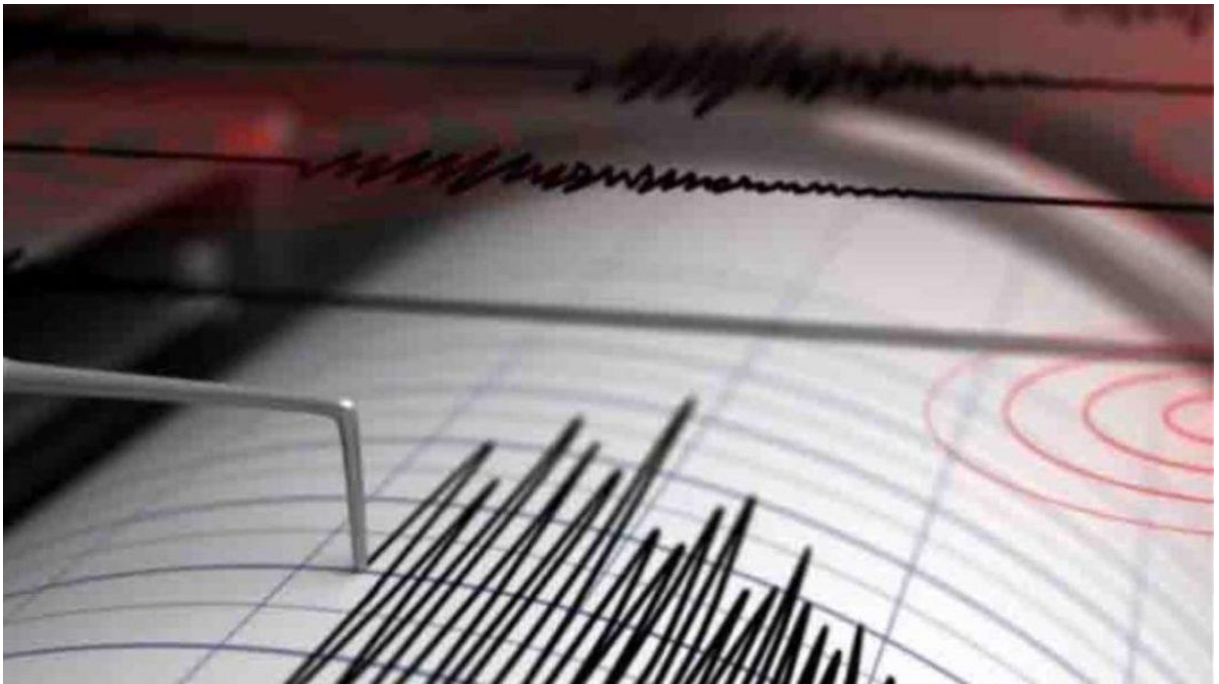




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας

Επεξεργασία σεισμικών καταγραφών κοντινού πεδίου και αντικατάστασή τους με ισοδύναμους παλμούς



Διπλωματική Εργασία
Αναστασία Ζαννή

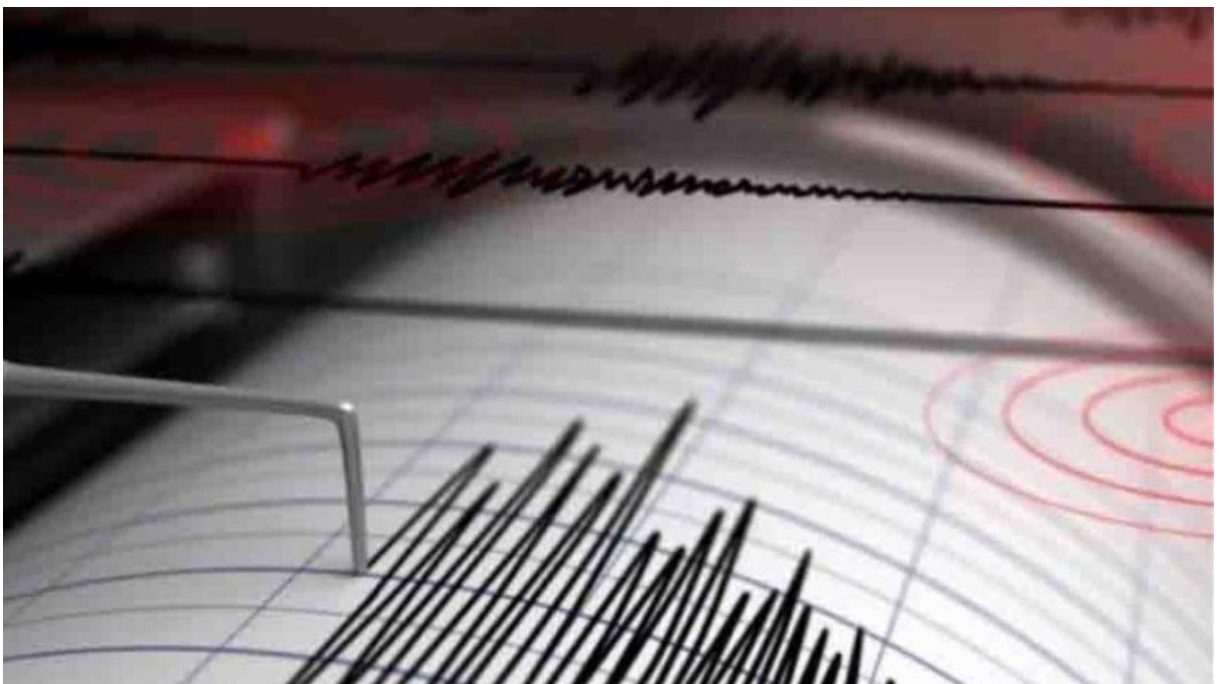
Επιβλέπων:
Επ. Καθηγητής Μιχαήλ Φραγκιαδάκης

Αθήνα, Μάρτιος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας

Επεξεργασία σεισμικών καταγραφών κοντινού πεδίου και αντικατάστασή τους με ισοδύναμους παλμούς



Διπλωματική Εργασία
Αναστασία Ζαννή

Επιβλέπων:
Επ. Καθηγητής Μιχαήλ Φραγκιαδάκης

Αθήνα, Μάρτιος 2020

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τον κύκλο των προπτυχιακών μου σπουδών θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και κυρίως:

Τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μιχάλη Φραγκιαδάκη για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και την συνεχή, πολύτιμη και ουσιαστική βοήθεια και καθοδήγηση του.

Τον επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου αντισεισμικής μηχανικής κ. Ιωάννη Ταφλαμπά για το ειλικρινές ενδιαφέρον του και την πολύτιμη βοήθεια του στις δυσκολίες που αντιμετώπισα.

Τον υπ. διδάκτορα Σπύρο Διαμαντόπουλο για τη συμβολή του σε ότι αφορά την εκμάθηση των λογισμικών που απαιτήθηκαν κατά τη διάρκεια της εργασίας.

Τέλος ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την αγάπη και τη στήριξη τους σε κάθε μου βήμα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι εδαφικές κινήσεις που καταγράφονται από σειсмоγράφους που βρίσκονται σε μια απόσταση 20-60 km από το ρήγμα, ονομάζονται σεισμοί κοντινού πεδίου. Πρόκειται για καταγραφές που επηρεάζονται από το μηχανισμό διάρρηξης και τα φαινόμενα κατευθυντικότητας με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν έντονη παλμικότητα. Η αυξημένη καταστρεπτικότητα των καταγραφών παλμικού χαρακτήρα έχει μελετηθεί σε βάθος τα τελευταία χρόνια, ωστόσο οι ισχύοντες μέχρι σήμερα αντισεισμικοί κανονισμοί δεν αντιμετωπίζουν το ζήτημα στην έκταση που απαιτείται. Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την επεξεργασία των σεισμών κοντινού πεδίου και λαμβάνοντας υπ' όψιν την έντονη παλμικότητα τους ερευνά την δυνατότητα αντικατάστασης αυτών των καταγραφών με τις παλμικές τους προσομοιώσεις.

Η επεξεργασία των σεισμικών καταγραφών αφορά την διόρθωση τους με σκοπό την εξομάλυνση των σφαλμάτων που εμφανίζονται στις χρονοϊστορίες της ταχύτητας και της μετακίνησης. Η παρουσία αυτών των σφαλμάτων οφείλεται σε λάθη που συνέβησαν κυρίως κατά την καταγραφή του σήματος. Η διόρθωση των σφαλμάτων έγκειται στην διόρθωση της γραμμής βάσης (baseline correction), για την οποία έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι μερικές από τις οποίες αναπτύσσονται στην παρούσα εργασία, και στο φιλτράρισμα (filtering) του εύρους των συχνοτήτων που μεταδίδονται.

Η μελέτη της δυνατότητας αντικατάστασης των αρχικών καταγραφών με τις παλμικές τους προσομοιώσεις προϋποθέτει την δημιουργία του κώδικα εξαγωγής παλμών ο οποίος εντοπίζει και εξαγει τον ζητούμενο αριθμό παλμών από μια εδαφική κίνηση κοντινού πεδίου. Μια βασική μέθοδος αναπαράστασης των παλμών είναι αυτή που εισήγαγαν οι Mavroeidis and Papageorgiou (2003), η οποία βασίζεται στην μαθηματική παρουσίαση των κινήσεων κοντινού πεδίου στηριζόμενη στη διαμόρφωση ενός σύνθετου κυματιδίου. Το κυματίδιο αυτό χαρακτηρίζεται από τέσσερις βασικές παραμέτρους (A , T_p , γ , ν), με σημαντικότερη την περίοδο T_p του παλμού για τον προσδιορισμό της οποίας απαιτείται η δημιουργία του φάσματος συνέλιξης.

Αφού εξαχθεί από 55 επιλεγμένες σεισμικές καταγραφές κοντινού πεδίου ο απαιτούμενος αριθμός παλμών, όπου στην παρούσα διπλωματική λαμβάνεται ίσος με 6, ξεκινάει η μελέτη για το αν και υπό ποιές προϋποθέσεις, η εφαρμογή μιας σεισμικής καταγραφής και της αντίστοιχης παλμικής της προσομοίωσης σε ένα κτίριο, επιφέρουν κοντινά αποτελέσματα. Τα βασικά στάδια της μελέτης είναι δύο, με πρώτο τον υπολογισμό των βασικών μεγεθών απόκρισης που αναπτύσσονται στο κτίριο και δεύτερο τον σχεδιασμό των ανελαστικών φασμάτων, τόσο των αρχικών καταγραφών όσο και των παλμικών τους προσομοιώσεων. Για τις ανάγκες της μελέτης δημιουργούνται δύο είδη παλμικών προσομοιώσεων, δηλαδή καταγραφών που συντάσσονται μόνο από τα στοιχεία των παλμών, μία με τα στοιχεία του 1ου παλμού και μία με τα στοιχεία του αθροίσματος των πρώτων 6 παλμών. Και στα δύο στάδια μελέτης αφού υπολογιστούν τα απαιτούμενα μεγέθη για κάθε ένα από τα 3 είδη καταγραφών, πραγματοποιούνται οι απαραίτητες συγκρίσεις και εμφανίζονται τα αποτελέσματα σε κατάλληλα διαγράμματα. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζουν τον βαθμό σύγκλισης των μεγεθών που προκαλεί η εφαρμογή της αρχικής καταγραφής και η εφαρμογή της παλμικής της προσομοίωσης στο ίδιο κτίριο. Παρατηρώντας τα τελικά διαγράμματα εξάγονται τα αντιστοιχα συμπεράσματα.

ABSTRACT

Ground motions recorded from seismographs that are within 20-60 km of a fault are called near-field ground motions. These motions could be referred to as records which are influenced by the rupture mechanism and the directivity phenomena resulting in the appearance of strong impulsive behaviour. Although this intensified devastating behaviour of pulse-like records has been studied a lot recently, the seismic regulations that are the case hitherto, does not face this problem in the indicated way. The present thesis is interested in processing near-field ground motions and taking into consideration their impulsive behaviour, investigates the ability of replacing these records with their pulse simulations.

The processing of seismic records has to do with adjusting velocity and displacement time histories. The detected errors in these histories may be attributed to factors that randomly affected the digitization process. The correction of these errors comprises baseline correction and filtering of the transmitted frequencies. The former can be applied using a lot of different methods, some of which are elaborated upon in this study.

The investigation of the ability to replace the main recording with its pulse simulations entails the implementation of a pulse extraction code, which detects and extracts the required number of pulses from a near-field ground motion. Mavroeidis and Papageorgiou (2003) introduced one of the most important pulse representation methods, which is based on a mathematical representation of ground motion movements relying on designing a complex wavelet. This wavelet is characterized by four principal parameters (A , T_p , γ , ν), the most important of which is the pulse period T_p . The computation of this period value requires the making of the convolution spectrum.

Once we extract the required number of pulses from 55 chosen seismic responses, which in the present thesis is equal to 6, we begin to investigate if and in which conditions the application of a seismic response and its pulse simulation to a building, begets similar results. The two most important parts that this research consists of, are firstly the calculation of the response sizes and secondly the graphic representation of inelastic response spectra, for all the types of recordings (main recording and its pulse-simulations). In the present study we create two types of pulse simulations, one by using the data from the first pulse and the other by adding the data from the first 6 pulses. In both stages, at the end of the calculations for all the types of recordings, we are carrying out the necessary comparisons, and we present the results via graphs. These results reflect the degree of convergence between the sizes that we get when applying a seismic response and its pulse simulations to the same building. By observing the final diagrams, appropriate conclusions are drawn.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Γενική Ανασκόπηση	1
1.2	Δομή διπλωματικής εργασίας.....	2
2	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ	3
2.1	Ελαστικά Φάσματα	3
2.1.1	Κατασκευή φάσματος απόκρισης.....	3
2.1.2	Επίλυση εξίσωσης κίνησης	5
2.1.3	Κώδικας κατασκευής φάσματος απόκρισης.....	6
2.2	Διόρθωση γραμμής βάσης και φιλτράρισμα	10
2.2.1	Γενικά	10
2.2.2	Διόρθωση γραμμής βάσης.....	10
2.2.3	Φιλτράρισμα	14
2.2.4	Κώδικες των D. Boore και H.C. Chiu	15
3	ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΑΛΜΩΝ ΑΠΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΚΟΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ	21
3.1	Βασικά κυματίδια στην Αντισεισμική Μηχανική.....	22
3.2	Προσδιορισμός των περιόδων T_p των σημαντικών παλμών	24
3.2.1	Εισαγωγή.....	24
3.2.2	Φάσμα συνέλιξης	24
3.3	Προσδιορισμός των παραμέτρων των κυματιδίων	25
3.4	Μεθοδολογία σε βήματα	29
4	ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΚΟΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥΣ	34
4.1	Δημιουργία κτιρίου	34
4.1.1	Λογισμικό OpenSees.....	34
4.2	Υπολογισμός βασικών μεγεθών απόκρισης.....	36
4.3	Σύγκριση μεγεθών απόκρισης.....	37
4.3.1	Συγκεντρωτικό γράφημα	38
4.3.2	Συμπεράσματα.....	42
4.4	Υπολογισμός ανελαστικών φασμάτων	43
4.4.1	Καμπύλη ικανότητας.....	43
4.4.2	Συντελεστής συμπεριφοράς η	43
4.4.3	Κατασκευή ανελαστικών φάσματα σταθερού συντελεστή συμπεριφοράς η	44
4.5	Σύγκριση ανελαστικών φασμάτων	46
4.5.1	Συγκεντρωτικό γράφημα	48

4.5.2 Συμπεράσματα.....	50
5 ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	51
6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	53

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Συσχέτιση φάσματος απόκρισης με χρονοϊστορίες	3
Εικόνα 2.2: Μέθοδος κατασκευής φάσματος απόκρισης	4
Εικόνα 2.3: Μονοβάθμιος ταλαντωτής	5
Εικόνα 2.4: Χρονοϊστορίες για $T=0.3$ sec	6
Εικόνα 2.5: Ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης	9
Εικόνα 2.6: Ελαστικό φάσμα ταχύτητας	9
Εικόνα 2.7: Ελαστικό φάσμα μετακίνησης	10
Εικόνα 2.8: Τυπικά παραδείγματα μη διορθωμένων επιταχυνσιογραφημάτων, τα οποία οδηγούν στην εμφάνιση λαθών στις χρονοϊστορίες της ταχύτητας και της μετακίνησης	11
Εικόνα 2.9: Παρουσίαση κοινού διορθωμένου επιταχυνσιογραφήματος, με εφαρμογή της πολυωνυμικής διόρθωσης γραμμής βάσης (πάνω εικόνα), και του φιλτραρίσματος (κάτω εικόνα) και διαπίστωση ότι η πολυωνυμική διόρθωση δεν είναι κατάλληλη για καταγραφές μεγάλης διάρκειας	13
Εικόνα 2.10: Είδη φίλτρων	14
Εικόνα 2.11: Άθροισμα φίλτρων	14
Εικόνα 2.12: Τύποι και στοιχεία φίλτρων του λογισμικού Seismosignal	15
Εικόνα 2.13: Χρονοϊστορία επιτάχυνσης (κώδικας Boore)	16
Εικόνα 2.14: Χρονοϊστορία ταχύτητας (κώδικας Boore)	16
Εικόνα 2.15: Χρονοϊστορία μετακίνησης (κώδικας Boore)	17
Εικόνα 2.16: Χρονοϊστορία επιτάχυνσης (κώδικας Chiu)	17
Εικόνα 2.17: Χρονοϊστορία ταχύτητας (κώδικας Chiu)	18
Εικόνα 2.18: Χρονοϊστορία μετακίνησης (κώδικας Chiu)	18
Εικόνα 2.19: Ελαστικό φάσμα μετακίνησης πριν και μετά τη διόρθωση γραμμής βάσης.	20
Εικόνα 3.1: Καταγραφή G 06-320 (Coyota Lake) 1979	24
Εικόνα 3.2: Φάσμα συνέλιξης	25
Εικόνα 3.3: Λόγος $S_{d,0,max}/CAD$ συναρτήσει διαφορετικών γωνιών και δεικτών γ	27
Εικόνα 3.4: Σύγκριση της χρονοϊστορίας ταχύτητας του 1ου παλμού με αυτή της αρχικής καταγραφής (λογισμικό Matlab)	31
Εικόνα 3.5: Σύγκριση της χρονοϊστορίας ταχύτητας του 6ου παλμού με αυτή της εναπομένουσας (στην 6η επανάληψη) καταγραφής	33
Εικόνα 3.6: Σύγκριση της χρονοϊστορίας ταχύτητας του αθροίσματος των 6 παλμών με αυτή της αρχικής καταγραφής	33
Εικόνα 4.1: Λόγος επιταχύνσεων rfa_{1pulse}/rfa_{tot} που αναπτύσσεται σε κάθε όροφο του κτιρίου	37
Εικόνα 4.2: Λόγος επιταχύνσεων $rfa_{6pulses}/rfa_{tot}$ σε κάθε όροφο του κτιρίου	38
Εικόνα 4.3: Λόγος επιταχύνσεων rfa_{1pulse}/rfa_{tot} συναρτήσει του συνολικού αριθμού ορόφων που διαθέτει το κτίριο	38
Εικόνα 4.4: Λόγος σχετικών στροφών rfd_{1pulse}/rfd_{tot} συναρτήσει του συνολικού αριθμού ορόφων που διαθέτει το κτίριο	40
Εικόνα 4.5: Λόγος δυνάμεων $rftem_{1pulse}/rftem_{tot}$ συναρτήσει του συνολικού αριθμού ορόφων που διαθέτει το κτίριο	40

Εικόνα 4.6: Λόγος επιταχύνσεων $rfa_{6pulses}/rfa_{tot}$ συναρτήσει του συνολικού αριθμού ορόφων που διαθέτει το κτίριο.....	41
Εικόνα 4.7: Συγκεντρωτικό γράφημα επιταχύνσεων	41
Εικόνα 4.8: Συγκεντρωτικό γράφημα σχετικών στροφών.....	42
Εικόνα 4.9: Συγκεντρωτικό γράφημα δυνάμεων	42
Εικόνα 4.10: Καμπύλη ικανότητας και ιδεατό διγραμμικό διάγραμμα	43
Εικόνα 4.11: Ανελαστικό φάσμα σταθερού συντελεστή συμπεριφοράς ($q=1, 2, 4$) από το λογισμικό Matlab	44
Εικόνα 4.12: Ανελαστικά φάσματα για $tot, 1pulse, 6pulses$ της σεισμικής καταγραφής 43 με $q=6$	47
Εικόνα 4.13: Ανελαστικά φάσματα για $tot, 1pulse, 6pulses$ της σεισμικής καταγραφής 41 με $q=6$	47
Εικόνα 4.14: Ανελαστικά φάσματα για $tot, 1pulse, 6pulses$ της σεισμικής καταγραφής 21 με $q=2$	48
Εικόνα 4.15: Συγκεντρωτικό γράφημα ανελαστικών φασμάτων.....	49

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Συνήθη κυματίδια που χρησιμοποιούνται στην Σεισμολογία	21
Πίνακας 3.2: Καταγραφές κοντινού πεδίου με διακριτό παλμό ταχύτητας.....	22

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική Ανασκόπηση

Σεισμός είναι η εδαφική δόνηση που γεννιέται κατά την σχετική ολίσθηση των δύο πλευρών ενός σεισμογόνου ρήγματος. Με τον όρο εδαφική δόνηση εννοούμε τα σεισμικά κύματα που παράγονται στο ρήγμα, διαδίδονται στο εσωτερικό της Γης και φτάνουν στην επιφάνεια της, όπου γίνονται αισθητά και καταγράφονται από τους σειсмоγράφους. Οι εδαφικές κινήσεις που καταγράφονται από σειсмоγράφους που βρίσκονται σε μια απόσταση 20-60 km από το ρήγμα, ονομάζονται σεισμοί κοντινού πεδίου.

Οι σεισμοί κοντινού πεδίου παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς αυξάνουν τις ανελαστικές απαιτήσεις των κατασκευών. Πρόκειται για καταγραφές που επηρεάζονται από το μηχανισμό διάρρηξης και τα φαινόμενα κατευθυντικότητας με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν έντονη παλμικότητα.

Η αυξημένη καταστρεπτικότητα των καταγραφών παλμικού χαρακτήρα έχει μελετηθεί σε βάθος τα τελευταία χρόνια, ωστόσο οι ισχύοντες μέχρι σήμερα αντισεισμικοί κανονισμοί και Κώδικες στη χώρα μας αλλά και την υπόλοιπη Ε.Ε δεν αντιμετωπίζουν το ζήτημα στην έκταση που απαιτείται. Ορισμένες φορές, αρκεί η ύπαρξη κάποιων καταστρεπτικών σεισμών οι οποίοι θα καταφέρουν να οδηγήσουν σε σημαντικές αναθεωρήσεις των αντισεισμικών κανονισμών.

Βασικό παράδειγμα αυτής της θεωρίας αποτελεί ο σεισμός του 1978 στη Θεσσαλονίκη και του 1981 στην Αθήνα οι οποίοι οδήγησαν στην καθιέρωση του ΝΕΑΚ, του πρώτου ελληνικού κανονισμού που λάμβανε υπόψη τη δυναμική συμπεριφορά των κατασκευών με ικανοποιητικό τρόπο. Αντίστοιχα, και η ύπαρξη παλμικών καταγραφών με σημαντικό καταστροφικό δυναμικό θα μπορέσει να μελετηθεί αρκετά και ίσως να εισαχθεί στους αντισεισμικούς κανονισμούς, μετά από μια σειρά αναπάντεχων βλαβών μετά από σεισμούς.

Ένα παράδειγμα τέτοιου σεισμού αποτελεί ο σεισμός του San Fernando (1971) ο οποίος προκάλεσε πολύ σημαντικές βλάβες στο νοσοκομείο Olive View, που αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης των Bertero et al (1978) οι οποίοι εστίασαν την προσοχή τους σε παλμούς επιτάχυνσης σχετικά μεγάλης περιόδου και την επίδρασή τους. Αν και η έρευνα στο πεδίο συνεχίστηκε, έστω και σε περιορισμένη σχετικά έκταση, το πεδίο των παλμικών καταγραφών γνώρισε άνθηση μετά του σεισμό του Northridge 1994 και του Kobe 1995 που όχι μόνο προκάλεσαν μεγάλες ζημιές, αλλά λόγω της θέσης τους κοντά σε σχετικά πυκνά δίκτυα σειсмоγράφων, επέτρεψαν την καταγραφή του φαινομένου.

Η παρούσα εργασία στα πλαίσια της έρευνας των σεισμών κοντινού πεδίου και βασιζόμενη στην έντονη παλμικότητα που τους χαρακτηρίζει, μελετά την δυνατότητα αντικατάστασης των καταγραφών αυτών από τις αντίστοιχες παλμικές τους προσομοιώσεις. Με τον όρο παλμική προσομοίωση, εννοείται

η καταγραφή που προκύπτει από τον πρώτο-βασικό παλμό της αρχικής καταγραφής ή από το άθροισμα περισσότερων παλμών.

1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία συμπεριλαμβανομένου του παρόντος, αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Ακολουθεί μία συνοπτική περιγραφή τους.

Στο κεφάλαιο 2 αναλύεται η επεξεργασία των σεισμικών καταγραφών κοντινού πεδίου. Το κεφάλαιο ξεκινάει με την παρουσίαση της διαδικασίας κατασκευής των ελαστικών φασμάτων απόκρισης μιας σεισμικής καταγραφής. Η διαδικασία αυτή θα χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια στον κώδικα εξαγωγής παλμών για την δημιουργία του φάσματος συνέλιξης. Αναφέρονται οι τρεις δυνατοί τρόποι επίλυσης της εξίσωσης κίνησης ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή, έτσι ώστε να σχεδιαστούν οι απαραίτητες χρονοϊστορίες, και από αυτούς επιλέγεται και αναλύεται η μέθοδος της κεντρικής διαφοράς. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα σφάλματα που παρατηρούνται στις χρονοϊστορίες των εδαφικών κινήσεων αλλά και οι λόγοι που δημιουργούνται αυτά. Αφού λοιπόν γίνει κατανοητή η αναγκαιότητα επεξεργασίας των σεισμικών καταγραφών, παρουσιάζονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την διόρθωσή τους. Οι διορθώσεις χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Διόρθωση της γραμμής βάσης (Baseline Correction)
- Φιλτράρισμα (Filtering)

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται ο κώδικας εξαγωγής παλμών που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των βασικών παλμών από τις σεισμικές καταγραφές κοντινού πεδίου. Εισάγεται η μέθοδος των Manroeidis and Parageorgiou που περιγράφει την εδαφική κίνηση με ένα απλό μαθηματικό μοντέλο στηριζόμενο στην διαμόρφωση ενός σύνθετου κυματιδίου. Προσδιορίζεται η μέθοδος υπολογισμού της περιόδου του κυρίαρχου παλμού καθώς και των βασικών παραμέτρων των κυματιδίων. Υπολογίζονται οι πρώτοι 6 παλμοί για 55 επιλεγμένες σεισμικές καταγραφές κοντινού πεδίου.

Στο κεφάλαιο 4 αναλύονται εκτενώς τα βήματα για την μελέτη αντικατάστασης μιας σεισμικής καταγραφής με την παλμική της προσομοίωση. Γίνεται χρήση των παλμών που παρήχθησαν στο κεφάλαιο 3 και δημιουργούνται καταγραφές με τον 1ο και με το άθροισμα των 6 πρώτων παλμών. Με χρήση του λογισμικού OpenSees, δημιουργείται η μορφή του κτιρίου που θα χρησιμοποιηθεί στη μελέτη και επιβάλλονται σε αυτό, τόσο οι 55 σεισμικές καταγραφές, όσο και οι παλμικές τους προσομοιώσεις (ενός και έξι παλμών). Πραγματοποιείται δυναμική ανάλυση και υπολογίζονται τα βασικά μεγέθη απόκρισης του κτιρίου. Για κάθε είδος καταγραφής γίνεται σύγκριση των παραγόμενων μεγεθών απόκρισης, και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε κατάλληλα διαγράμματα. Παράγονται τα ανελαστικά φάσματα όλων των καταγραφών (και των προσομοιώσεων), συγκρίνονται με αντίστοιχο τρόπο με αυτό των μεγεθών απόκρισης και παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα.

Στο κεφάλαιο 5 αναπτύσσονται τα συμπεράσματα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας καθώς και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

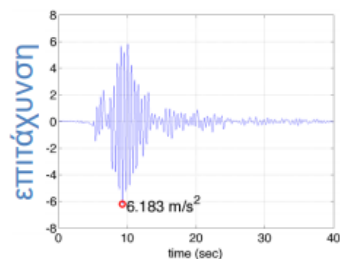
2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ

2.1 Ελαστικά Φάσματα

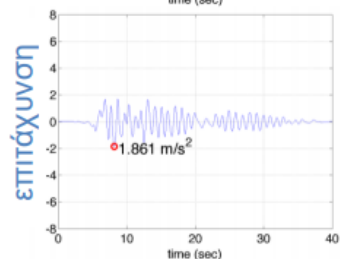
2.1.1 Κατασκευή φάσματος απόκρισης

Το φάσμα απόκρισης μιας σεισμικής καταγραφής, είναι ένα διάγραμμα που μας δίνει τις μέγιστες τιμές ενός μεγέθους απόκρισης (μετακίνησης, ταχύτητας, επιτάχυνσης) που θα αναπτυχθεί σε ταλαντωτές με διαφορετική ιδιοπερίοδο T , αλλά με συγκεκριμένη τιμή ιξώδους απόσβεσης ζ .

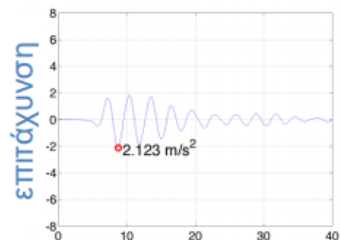
T=0.5sec



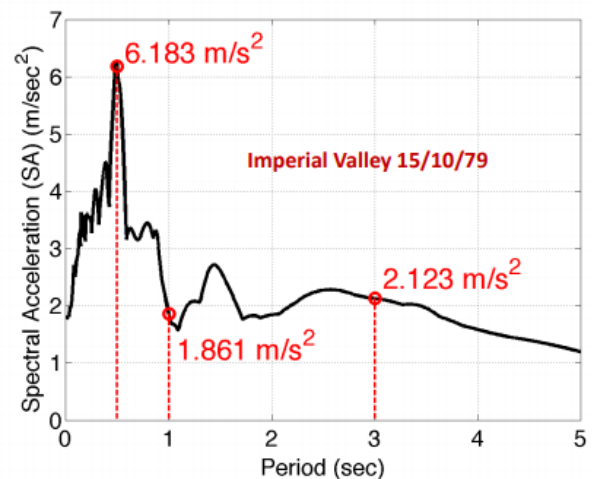
T=1.0sec



T=3.0sec



φάσμα επιταχύνσεων ($\zeta=5\%$)

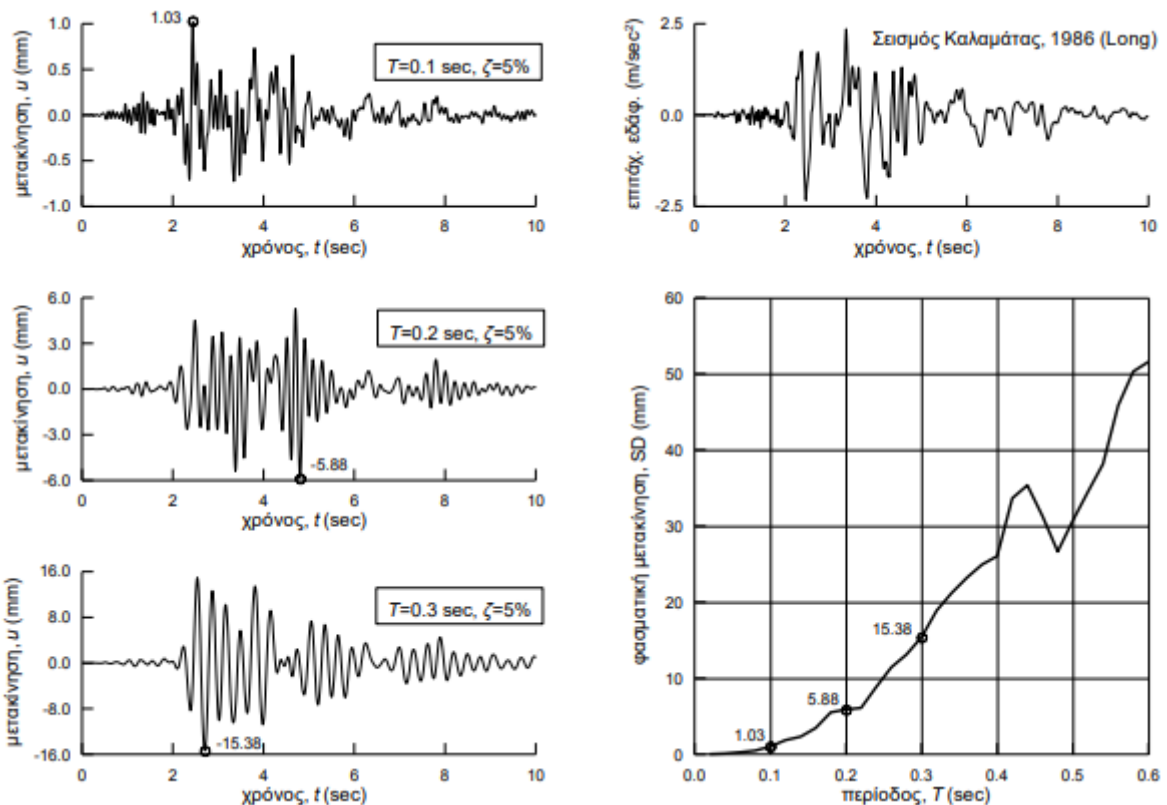


Εικόνα 2.1: Συσχέτιση φάσματος απόκρισης με χρονιοϊστορίες

Η κατασκευή των φασμάτων απόκρισης μιας εδαφικής κίνησης είναι μια απλή διαδικασία. Η αναλυτική περιγραφή τους μπορεί να γίνει υποθέτοντας μια δεδομένη σεισμική διέγερση (π.χ Σεισμός Καλαμάτας)

και επιλέγοντας την κατασκευή του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης για μια δεδομένη τιμή απόσβεσης, π.χ $\zeta=5\%$. Τα βήματα που ακολουθούμε είναι τα εξής:

1. Καθορισμός ιδιοπεριόδου (T) του ταλαντωτή για την οποία θα υπολογίσουμε την τιμή του φάσματος (π.χ $T=0.1$ s)
2. Υπολογισμός της χρονοιστορίας της μετακίνησης $u(t)$ για την δεδομένη σεισμική διέγερση. Για τον υπολογισμό θα χρησιμοποιηθεί μια από τις προτεινόμενες μεθόδους (ολοκλήρωμα Duhamel, μέθοδος κεντρικής διαφοράς, μέθοδος Newark). Η μέθοδος κεντρικής διαφοράς θα αναλυθεί στην συνέχεια. Η χρονοιστορία που υπολογίστηκε σε αυτό το βήμα απεικονίζεται στην Εικόνα 2.2 στο πάνω διάγραμμα της αριστερής στήλης.
3. Προσδιορισμός της μέγιστης μετακίνησης, κατά απόλυτη τιμή, $\max|u(t)|$. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα, η τιμή αυτή προκύπτει ίση με 1.03 mm.
4. Επανάληψη της παραπάνω διαδικασίας για πολλές τιμές της περιόδου T .
5. Συλλογή του απαιτούμενου αριθμού στοιχείων ($\max|u(t)|$) και κατασκευή του διαγράμματος $\max|u(t)|$ ως προς T (φάσμα απόκρισης μετακίνησης).



Εικόνα 2.2: Μέθοδος κατασκευής φάσματος απόκρισης

Ένα σημαντικό στοιχείο για την σωστότερη δημιουργία των φασμάτων είναι το βήμα των επιλεγμένων περιόδων dT να είναι μικρό, ώστε το διάγραμμα που θα προκύψει να περιλαμβάνει όλες τις πιθανές αιχμές.

Έχοντας το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης για μια συγκεκριμένη σεισμική διέγερση, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέγιστη μετακίνηση οποιασδήποτε κατασκευής με απόσβεση ίση με αυτή του φάσματος. Αυτό συμβαίνει προβάλλοντας το σημείο που αντιστοιχεί στην ιδιοπερίοδο της κατασκευής στον άξονα των φασματικών μετακινήσεων.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, φάσματα απόκρισης μπορούν να κατασκευαστούν και για οποιοδήποτε άλλο μέγεθος. Τα πιο συνήθη και χρήσιμα είναι τα εξής:

- Φάσμα σχετικών μετακινήσεων, συμβολίζεται ως SD ή Sd (spectral displacement)
- Φάσμα σχετικών ταχυτήτων, συμβολίζεται ως SV ή Sv (spectral velocity)
- Φάσμα ολικών επιταχύνσεων, συμβολίζεται ως SA ή Sa (spectral acceleration)

2.1.2 Επίλυση εξίσωσης κίνησης

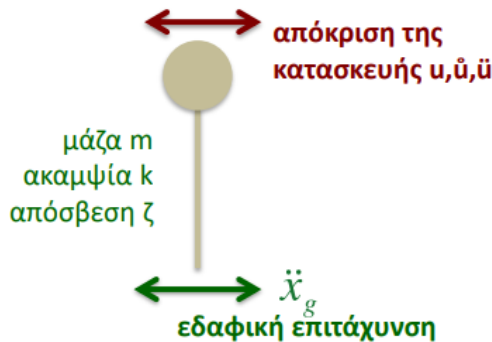
Η δυναμική απόκριση μίας μονοβάθμιας κατασκευής περιγράφεται από την εξίσωση κίνησης:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (2.1)$$

όπου:

- m: μάζα κατασκευής
- c: συντελεστής απόσβεσης
- k: δυσκαμψία της κατασκευής (μονόπακτο: $k=3EIh^3$, αμφίπακτο: $k=12EIh^3$)
- u'', u', u : σχετικές τιμές επιτάχυνσης, ταχύτητας, μετακίνησης της μονοβάθμιας κατασκευής

Η επίλυση της εξίσωσης κίνησης δίνει την μετακίνηση $u(t)$ για κάθε χρονική στιγμή t .



$$\ddot{u} + 2\zeta\omega\dot{u} + \omega^2u = -\ddot{x}_g$$

Εικόνα 2.3: Μονοβάθμιος ταλαντωτής

Εφόσον γνωρίζουμε την τιμή της μετακίνησης $u(t)$ μπορούμε να υπολογίσουμε, σε κάθε χρονική στιγμή, οποιοδήποτε εντατικό ή παραμορφωσιακό μέγεθος της κατασκευής (ροπές, τεμνουσες, αξονικές, τάσεις, παραμορφώσεις, κλπ). Επίσης, η επίλυση της εξίσωσης κίνησης ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή μας δίνει τις τιμές της επιτάχυνσης (\ddot{u}_t) και της ταχύτητας (\dot{u}_t) ως συνάρτηση του χρόνου.

Η επίλυση της εξίσωσης κίνησης ενός μονοβάθμιου συστήματος μπορεί να επιτευχθεί με:

- Την χρήση του ολοκληρώματος Duhamel
- Αριθμητικές μεθόδους όπως η μέθοδος της κεντρικής διαφοράς (central difference method)
- Την μέθοδο Newmark

Στις περισσότερες περιπτώσεις, όπως και στην συγκεκριμένη εργασία, χρησιμοποιούνται οι αριθμητικές μέθοδοι οι οποίες μπορούν εύκολα να προγραμματιστούν (π.χ. στο περιβάλλον του Matlab), όπως είναι η μέθοδος της κεντρικής διαφοράς.

Η μέθοδος της κεντρικής διαφοράς βασίζεται στην προσέγγιση των παραγώγων της μετακίνησης (ταχύτητα και επιτάχυνση) με τη μέθοδο των περασμένων διαφορών. Δηλαδή για σταθερό χρονικό βήμα Δt υποθέτουμε ότι:

$$\dot{u} = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta t} \quad (2.2)$$

$$\ddot{u} = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{\Delta t^2} \quad (2.3)$$

Με την αντικατάσταση των παραπάνω τύπων στην εξίσωση κίνησης του μονοβάθμιου έχουμε:

$$m\ddot{u}_i + c\dot{u}_i + ku_i = p_i \leftrightarrow$$

$$m \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{\Delta t^2} + c \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta t} + ku_i = p_i \leftrightarrow$$

$$\left[\frac{m}{\Delta t^2} + \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i+1} = p_i - \left[\frac{m}{\Delta t^2} + \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i-1} - \left[k - \frac{2m}{\Delta t^2} \right] u_i \leftrightarrow$$

$$\hat{k}u_{i+1} = \hat{p}_i \quad (2.4)$$

όπου:

- $\hat{k} = \left[\frac{m}{\Delta t^2} + \frac{c}{2\Delta t} \right]$, η ενεργός δυσκαμψία
- $\hat{p}_i = p_i - \left[\frac{m}{\Delta t^2} + \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i-1} - \left[k - \frac{2m}{\Delta t^2} \right] u_i$

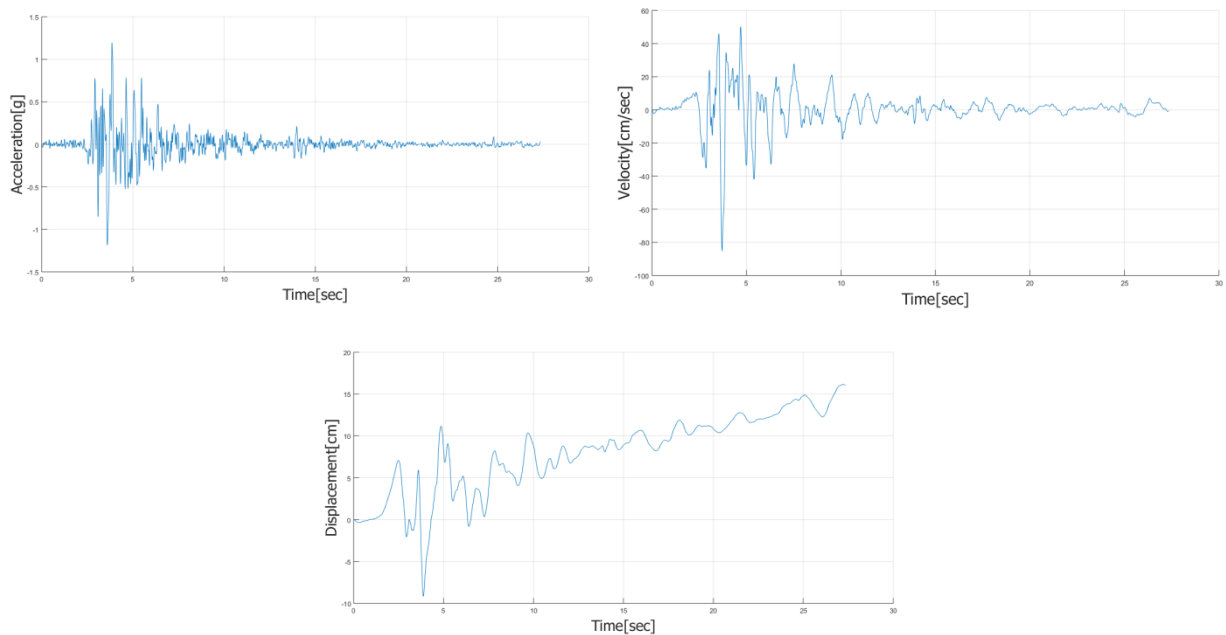
Θεωρώντας $u_0 = 0$ και $\dot{u}_0 = 0$ έχουμε:

$$u_{i-1} = u_0 - \Delta t \dot{u}_0 + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_0 \quad (2.5)$$

$$\ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c\dot{u}_0 - ku_0}{m} \quad (2.6)$$

Με την επανάληψη της παραπάνω διαδικασίας, για όσες φορές (i) είναι απαραίτητο, υπολογίζονται οι χρονοϊστορίες της μετακίνησης, ταχύτητας και επιτάχυνσης ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή.

2.1.3 Κώδικας κατασκευής φάσματος απόκρισης



Εικόνα 2.4: Χρονοϊστορίες για T=0.3 sec

Εφαρμόζοντας στο περιβάλλον του Matlab τα βήματα που αναπτύχθηκαν στα δύο προηγούμενα υποκεφάλαια (2.1.1 και 2.1.2), δημιουργείται ο κώδικας «spectrum».

```
function [td,amax,vmax,umax] = spectrum(aa,dt,damp,td)
if nargin < 4
    td = (5:400)*0.01;
end;
npts = length(aa);
for j = 1:length(td)
    [amax(j),vmax(j),umax(j)] = sdfLcdf(td(j),aa,damp,dt,npts); % new signal
end;
end;
```

όπου:

- aa: επιταχυνσιογράφημα της εδαφικής κίνησης
- dt: βήμα της καταγραφής
- damp: τιμή της ιξώδους απόσβεσης
- td: διάνυσμα που περιέχει τις τιμές των περιόδων
- sdfLcdf: συνάρτηση που υπολογίζει με την μέθοδο της κεντρικής διαφοράς, τις χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησησης της εδαφικής κίνησης για συγκεκριμένη περίοδο (td(j)) και απόσβεση (damp), και επιστρέφει τις μέγιστες τιμές τους.

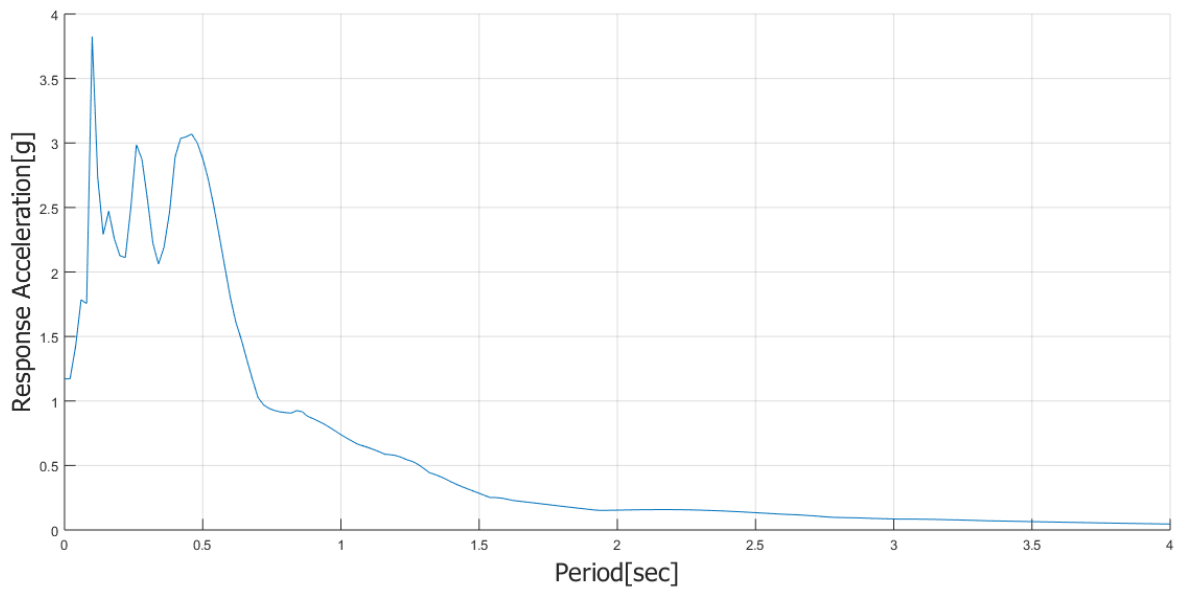
Ο κώδικας της συνάρτησης «sdfLcdf» είναι:

```
Kel = 1;
omega = 2*pi/td;
mass = Kel/omega/omega;
c1 = 2*xi*mass*omega;
isrec = 1;
if isrec == 1
    dt = (length(acc)/nsteps)*dtrec;
    %adjust accelerogram according to nsteps
    acc = [0;acc;0];
    nsteps = floor((length(acc)*dtrec)/dt);
    acc = interp1((1:length(acc))*dtrec,acc,(1:nsteps)*dt);
    acc = acc(1:nsteps);
    ii = isnan(acc);
    acc(ii) = 0;
    p = -mass*acc;
end
dt = dtrec;
omega = 2*pi/td;
```

```

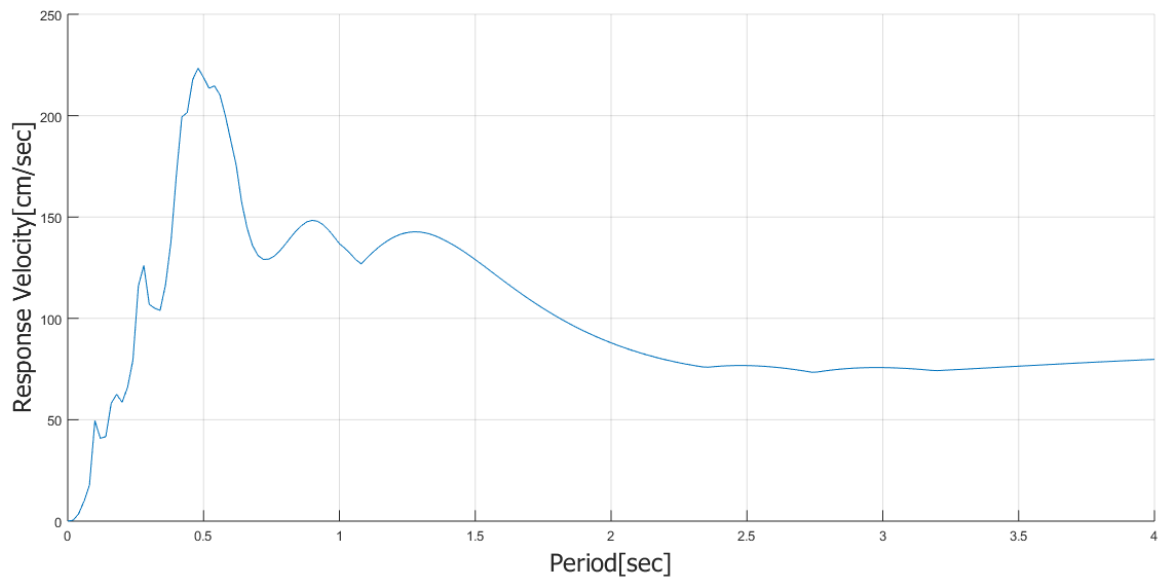
alpha = 0.25;
delta = 0.50;
umax = 0;
vmax = 0;
amax = 0;
uv = zeros(nsteps,1);
ua = zeros(nsteps,1);
ud = zeros(nsteps,1);
fs = zeros(nsteps,1);
kef = (1/(2*dt))*c1+(1./(dt*dt))*mass;
kinv = kef^(-1);
a = (1/(dt*dt))*mass-(1/(2*dt))*c1;
b = Kel-(2/(dt*dt))*mass;
ud(1) = ud(1)- dt*uv(1) + (dt*dt/2)*ua(1);
for it = 2:nsteps
    Ref = p(it)-a*ud(it-1)-b*ud(it);
    ud(it+1) = kinv*Ref;
    uv(it) = (1/(2*dt))*(ud(it+1)-ud(it-1));
    ua(it) = (1/dt/dt)*(ud(it+1)-2*ud(it)+ud(it-1));
    if abs(ud(it+1)) > umax;
        umax = abs(ud(it+1));
    end
    if abs(uv(it))>vmax;
        vmax=abs(uv(it));
    end
    if abs(ua(it)+acc(it)') > amax;
        amax = abs(ua(it)+acc(it)');
    end;
end;
end;

```

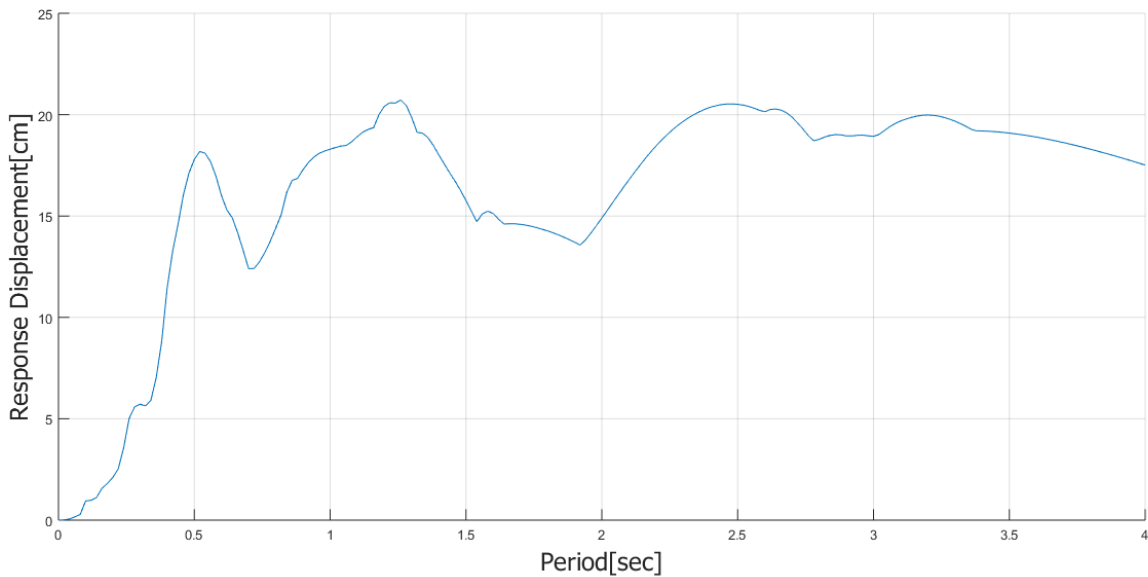


Εικόνα 2.5: Ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης

Υποθέτοντας ως είσοδο της συνάρτησης «spectrum» έναν σεισμό της Αθήνας, και για απόσβεση 5%, σχεδιάζονται για κάθε ιδιοπερίοδο $t_d(j)$ οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης και κρατώντας μόνο τις μέγιστες τιμές αυτών, δημιουργούνται τα αντίστοιχα ελαστικά φάσματα. Στην Εικόνα 2.4 αποτυπώνονται οι χρονοϊστορίες της σεισμικής καταγραφής για $T=0.3$ sec



Εικόνα 2.6: Ελαστικό φάσμα ταχύτητας



Εικόνα 2.7: Ελαστικό φάσμα μετακίνησης

2.2 Διόρθωση γραμμής βάσης και φιλτράρισμα

2.2.1 Γενικά

Από την στιγμή που οι σεισμολόγοι κατάφεραν να αποκτήσουν τις χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης των εδαφικών κινήσεων που κατέγραφαν, παρατήρησαν, κυρίως σε όσες αφορούσαν εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου, την εμφάνιση κάποιου από τα παρακάτω “λάθη”:

- η αρχική ταχύτητα της καταγραφής δεν ήταν μηδέν
- η αρχική μετακίνηση της καταγραφής δεν ήταν μηδέν
- οι τελικές τιμές της χρονοϊστορίας της μετακίνησης δεν προσέγγιζαν το μηδέν

Στην Εικόνα 2.8 παρουσιάζονται κάποια από αυτά τα “λάθη”.

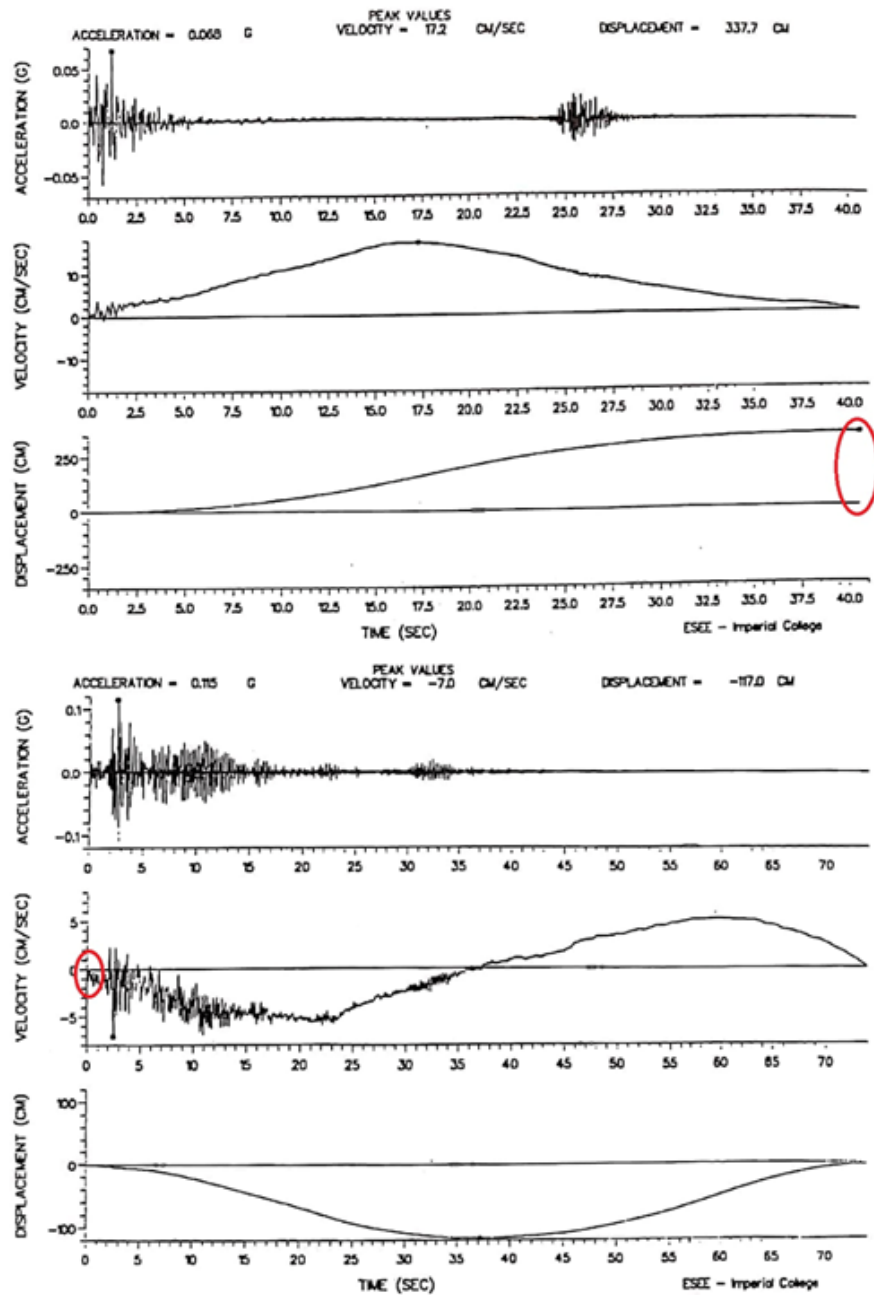
Τα λάθη αυτά στις χρονοϊστορίες της ταχύτητας και της μετακίνησης οφείλονταν σε σφάλματα που προέκυπταν κατά την διάρκεια της καταγραφής (ασταθής βάση οργάνου, θόρυβος οργάνου και περιβαλλοντικός) αλλά και σε λάθη που προέκυπταν κατά την ψηφιοποίηση του σήματος. Η δεύτερη κατηγορία σφαλμάτων εξαλείφθηκε μετά το 2000, καθώς πλέον τα οι εδαφικές κινήσεις καταγράφονταν κυρίως από ψηφιακούς καταγραφείς οι οποίοι παρείχαν την εδαφική κίνηση απευθείας σε ψηφιακή μορφή (σε αντίθεση με τα αναλογικά όργανα που χρησιμοποιούνταν έως τότε).

Αναπτύχθηκαν λοιπόν πολλές τεχνικές για να διορθώσουν τα ψηφιοποιημένα επιταχυνσιογραφήματα, προσπαθώντας να εξαλείψουν τα προβλήματα που προκαλούσε κυρίως η παρουσία θορύβου στη διαδικασία καταγραφής του σήματος. Οι τεχνικές αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- την πολυωνυμική διόρθωση γραμμής βάσης (baseline correction)
- την τεχνική του φιλτραρίσματος του σήματος (filtering)

2.2.2 Διόρθωση γραμμής βάσης

Η βασική λογική της διόρθωσης της γραμμής βάσης είναι η εύρεση μιας καμπύλης, η οποία προσεγγίζει το “λάθος” της καταγραφής. Συνεπώς η διόρθωση της, έγκειται στην αφαίρεση αυτής της καμπύλης από την καταγραφή.



Εικόνα 2.8: Τυπικά παραδείγματα μη διορθωμένων επιταχυνσιογραφημάτων, τα οποία οδηγούν στην εμφάνιση λαθών στις χρονοϊστορίες της ταχύτητας και της μετακίνησης

Για την υλοποίηση της διόρθωσης της γραμμής βάσης έχουν αναπτυχθεί πολλές μεθοδολογίες. Η πιο απλή μέθοδος χρησιμοποιεί μια ευθεία η οποία προσεγγίζει την χρονοϊστορία της επιτάχυνσης, και ελαχιστοποιεί το άθροισμα του τετραγώνου του r . Η ευθεία έχει την μορφή:

$$y(t) = c_0 + c_1 t \quad (2.7)$$

όπου t είναι ο χρόνος.

Με τον όρο r αναφερόμαστε στην διαφορά της ευθείας $y(t)$ από την πραγματική καταγραφή $a(t)$

$$r = a(t) - y(t) = a(t) - c_0 - c_1 t \quad (2.8)$$

$$R = \sum r^2 \quad (2.9)$$

Η ελαχιστοποίηση του R εξασφαλίζεται με την χρήση των εξής περιορισμών:

$$\partial R / \partial c_0 = 0 \quad (2.10)$$

$$\partial R / \partial c_1 = 0 \quad (2.11)$$

Με εφαρμογή αυτών των περιορισμών έχουμε:

$$c_0 = \frac{2}{T} \left[\frac{3d(T)}{T} - v(T) \right] \quad (2.12)$$

$$c_1 = \frac{12}{T^2} \left[\frac{v(T)}{2} - \frac{d(T)}{T} \right] \quad (2.13)$$

όπου

1. T είναι η συνολική διάρκεια της καταγραφής
2. v(t) και d(t) είναι η χρονοϊστορία της ταχύτητας και της μετακίνησης αντίστοιχα

Οι v(t) και d(t) ορίζονται ως εξής:

$$\Delta t = t[n + 1] - t[n] \quad (2.14)$$

$$v[n + 1] = v[n] + (\Delta t/2)(a[n] + a[n + 1]) \quad (2.15)$$

$$d[n + 1] = d[n] + v[n]\Delta t + (\Delta t^2/6)(2a[n] + a[n + 1]) \quad (2.16)$$

Η μέθοδος που περιγράφηκε, προϋποθέτει:

1. την χρήση αυθαίρετων ευθειών, ώστε να προσδιοριστούν οι τιμές της πραγματικής καταγραφής.
2. ότι οι αρχικές τιμές της ταχύτητας και της μετακίνησης είναι μηδενικές, και εξασφαλίζει ότι και οι τελικές τιμές τους θα είναι ίσες με μηδέν.

Μια επέκταση αυτής της μεθόδου, είναι η εφαρμογή στην χρονοϊστορία της επιτάχυνσης, μιας παραβολής 2ου βαθμού αντί της ευθείας, με μορφή:

$y(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2$	(2.17)
--------------------------------	--------

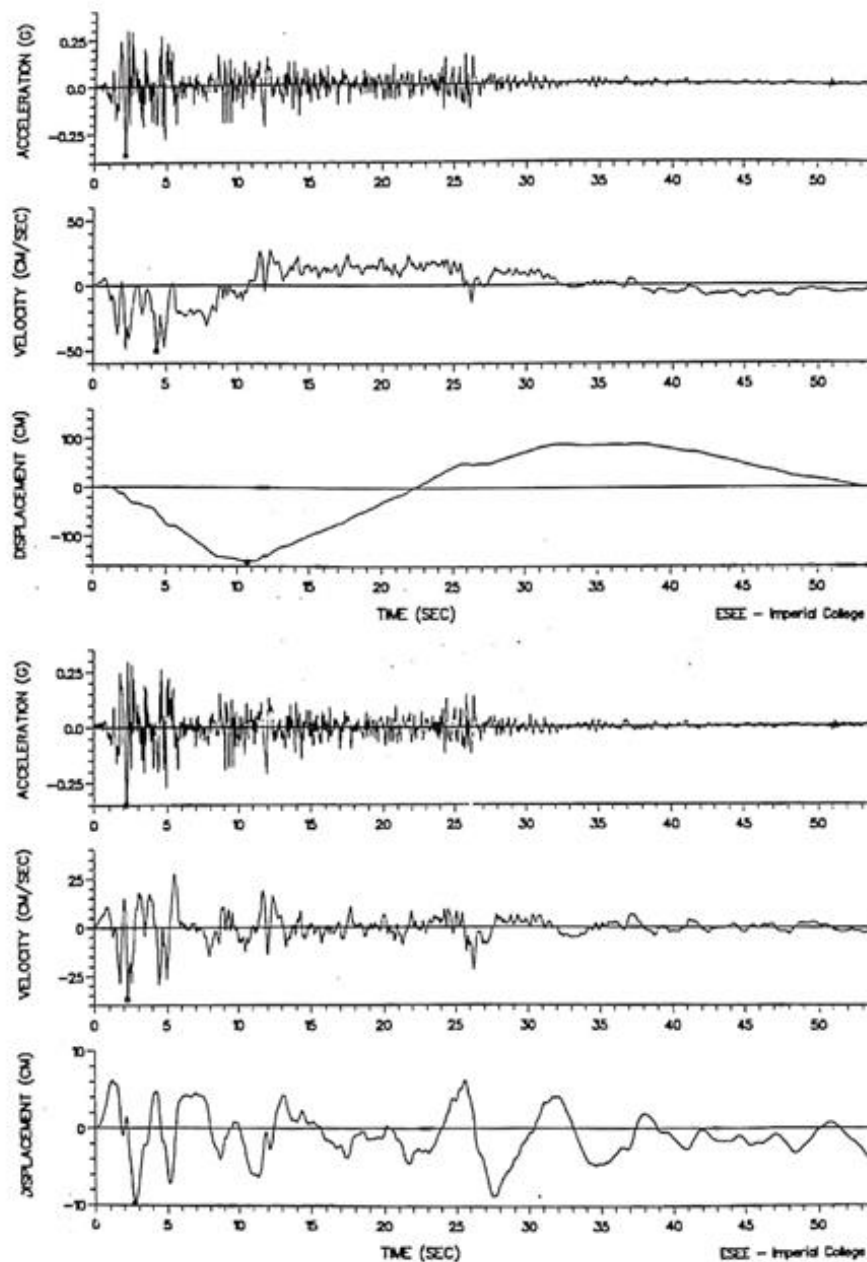
Μια λίγο διαφορετική μέθοδος, προτείνει την εφαρμογή της παραβολικής καμπύλης στο επιταχυνσιογράφημα έμμεσα, εφαρμόζοντας ένα πολυώνυμο 3ου βαθμού στην χρονοϊστορία της ταχύτητας, της μορφής:

$$\dot{y}(t) = v_0 + c_0 t + c_1 \frac{t^2}{2} + c_2 \frac{t^3}{3} \quad (2.18)$$

Επιδιώκεται και πάλι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του τετραγώνου της αντίστοιχης τιμής του r. Αυτή η μέθοδος μπορεί να επιλυθεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι με την υπόθεση ότι η $v_0=0$ (Berg & Housner, 1961). Στον δεύτερο η τιμή της v_0 υπολογίζεται ακολουθώντας τα ίδια βήματα επίλυσης με την πρώτη μέθοδο, και χρησιμοποιώντας ως πρόσθετο περιορισμό $\partial R / \partial v_0 = 0$, (Boyce, 1970).

Μια ακόμη μεθοδολογία χρησιμοποιεί ένα πολυώνυμο 3ου βαθμού, το οποίο εφαρμόζεται απευθείας στο επιταχυνσιογράφημα αυτή την φορά. Το διορθωμένο επιταχυνσιογράφημα ac(t) υπολογίζεται με την παρακάτω αφαίρεση:

$$ac(t) = a(t) - c_0 - c_1 t - c_2 t^2 - c_3 t^3 \quad (2.19)$$



Εικόνα 2.9: Παρουσίαση κοινού διορθωμένου επιταχυνσιογραφήματος, με εφαρμογή της πολωνυμικής διόρθωσης γραμμής βάσης (πάνω εικόνα), και του φιλτραρίσματος (κάτω εικόνα) και διαπίστωση ότι η πολωνυμική διόρθωση δεν είναι κατάλληλη για καταγραφές μεγάλης διάρκειας

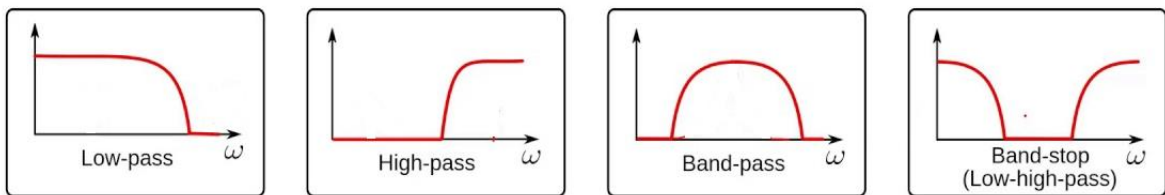
Με διπλή ολοκλήρωση καταλήγουμε στις αντίστοιχες εκφράσεις για την διορθωμένη ταχύτητα και μετακίνηση, οι οποίες εισάγουν δύο επιπλέον αγνώστους (τις σταθερές ολοκλήρωσης). Οι έξι άγνωστοι υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τους περιορισμούς για τις αρχικές και τελικές τιμές των τριών εξισώσεων.

Όλες οι μέθοδοι που περιγράφηκαν παραπάνω, μπορούν να εξαγάγουν αξιόπιστα αποτελέσματα για καταγραφές μικρής διάρκειας. Σε καταγραφές μεγάλης διάρκειας, είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί η καμπύλη που θα προσεγγίσει σωστά τα σφάλματα του επιταχυνσιογραφήματος, οπότε και τα τελικά αποτελέσματα δεν είναι αξιόπιστα (Εικόνα 2.9)

2.2.3 Φιλτράρισμα

Χρήση ψηφιακών φίλτρων που ανήκουν στο πεδίο των συχνοτήτων, τα οποία φροντίζουν ώστε να μεταδίδονται συγκεκριμένα εύρη τιμών συχνοτήτων και να εξαλείφονται τα υπόλοιπα. Αυτά τα εύρη, αναφέρονται στην βιβλιογραφία ως pass-bands και stop-bands αντίστοιχα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι φίλτρων που μπορούν να εφαρμοστούν σε μια καταγραφή, οι βασικότεροι εκ των οποίων είναι:

- Χαμηλοπερατό φίλτρο: μεταδίδει σήματα με συχνότητα χαμηλότερη από την επιλεγμένη
- Υψηλοπερατό φίλτρο: μεταδίδει σήματα με συχνότητα υψηλότερη από την επιλεγμένη
- Ζωνοπερατό φίλτρο: μεταδίδει σήματα με συχνότητα εντός του επιλεγμένου εύρους
- Ζωνοφρακτικό φίλτρο: μεταδίδει σήματα με συχνότητα εντός του επιλεγμένου εύρους



Εικόνα 2.10: Είδη φίλτρων

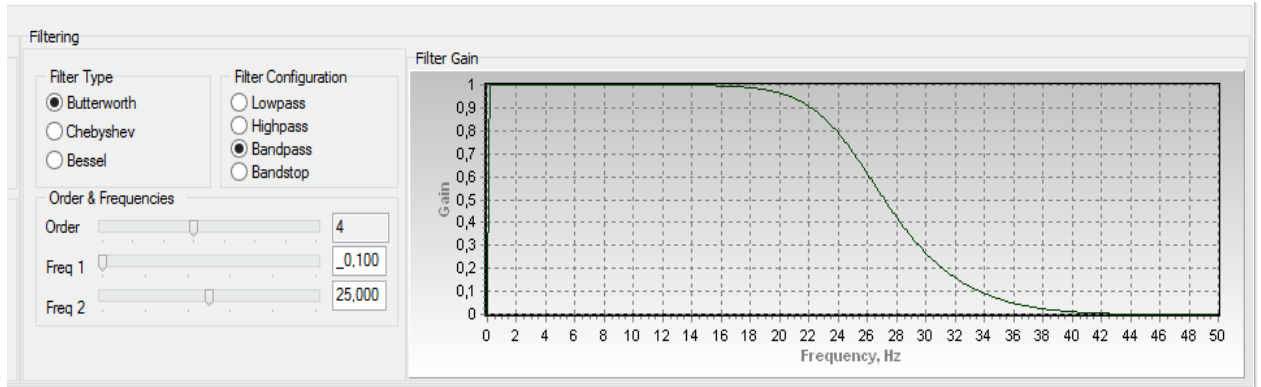
Το κάθε φίλτρο επιτρέπει την διέλευση των συχνοτήτων που εσωκλείει η κόκκινη γραμμή. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το άθροισμα των 2 πρώτων σχημάτων της Εικόνας Εικόνα 2.10 μας δίνει το σχήμα του φίλτρου pass-band. Με τον όρο f (δηλαδή frequency) αναφερόμαστε στα όρια των τιμών των συχνοτήτων που είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν για κάθε φίλτρο (Εικόνα 2.11). Ανάλογα με το είδος του φίλτρου απαιτείται ο προσδιορισμός μιας ή δύο τέτοιων τιμών ($f_{1,2}$).

Η διαδικασία του φιλτραρίσματος χρησιμοποιείται στα περισσότερα προγράμματα που δέχονται και επεξεργάζονται σεισμικές καταγραφές. Στην Εικόνα 2.12 παρουσιάζεται η καρτέλα του φιλτραρίσματος στο λογισμικό Seismosignal.



Εικόνα 2.11: Άθροισμα φίλτρων

Προκειμένου να εφαρμοστούν τα παραπάνω φίλτρα, τα οποία είναι σχεδιασμένα στο πεδίο των συχνοτήτων, σε μια σεισμική καταγραφή, η οποία ανήκει στο πεδίο του χρόνου, είναι απαραίτητη η χρήση του μετασχηματισμού Fourier. Οι τιμές της καταγραφής μεταφέρονται στο πεδίο των συχνοτήτων, όπου και εφαρμόζεται σε αυτές το κατάλληλο φίλτρο. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με τον αντίστροφο μετασχηματισμό, όπου η διορθωμένη καταγραφή μεταφέρεται πίσω στο πεδίο του χρόνου.



Εικόνα 2.12: Τύποι και στοιχεία φίλτρων του λογισμικού Seismosignal

2.2.4 Κώδικες των D. Boore και HC. Chiu

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αναπτύχθηκαν δύο κώδικες στο λογισμικό Matlab, χρησιμοποιώντας τις θεωρίες και τις μεθόδους που ανέπτυξαν στον πρώτο οι Boore, Stephens και Joyner (2002) και στον δεύτερο ο Chiu (1997).

Ο κώδικας των Boore, Stephens και Joyner (2002) δέχεται σαν είσοδο το μη διορθωμένο επιταχυνσιογράφημα και αφού υπολογίσει την χρονοϊστορία της ταχύτητας εντοπίζει το πολυώνυμο 2ου βαθμού που την προσεγγίζει. Η πρώτη διόρθωση πραγματοποιείται με την αφαίρεση αυτού του πολυωνύμου από το αρχικό επιταχυνσιογράφημα. Στο διορθωμένο επιταχυνσιογράφημα εφαρμόζεται ένα υψηλοπερατό φίλτρο τύπου «Butterworth» ολοκληρώνοντας με αυτόν τον τρόπο την διαδικασία της διόρθωσης. Με εφαρμογή διπλής ολοκλήρωσης στο τελικό επιταχυνσιογράφημα υπολογίζονται οι διορθωμένες χρονοϊστορίες της ταχύτητας και της μετακίνησης.

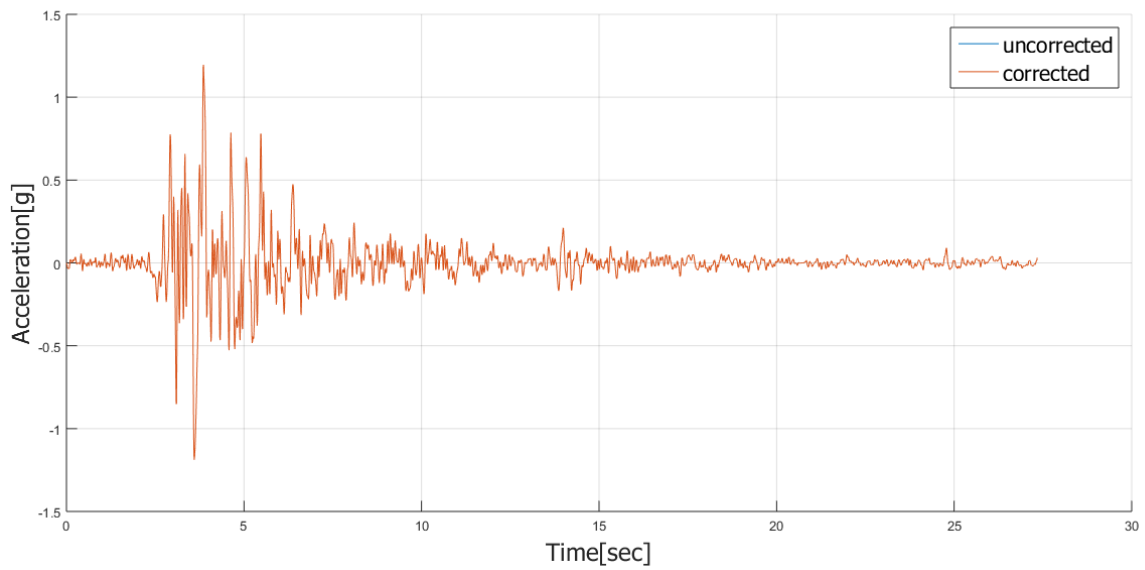
Κώδικας D. Boore, Stephens και Joyner:

```
dt = mean(diff(t));
% STEP 1: integrate acceleration to velocity(ud)
ud = cumtrapz(udd)*dt;
% STEP 2: fit a quadratic to velocity constrained to be 0 at the start time
p = polyfit(t,ud,2);
pt = p(1)*t.^2+p(2)*t+p(3);
pt(1) = 0;
% STEP 3: remove the derivative of the quadratic from the zeroth-ordered-
corrected acceleration
ptd = 2*p(1)*t+p(2);
udd_cor1 = udd-ptd;
% STEP 4: apply a causal, low-cut Butterworth filter with a subjectively
chosen corner frequency
udd_cor1_f = fft(udd_cor1);
df = 1/dt/length(t);
f = df:df:df*length(t);
[b,a] = butter(4,fcut/(f(end)/2),'high'); % 4th order butterworth filter
udd_cor2_f = filter(b,a,udd_cor1_f);
```

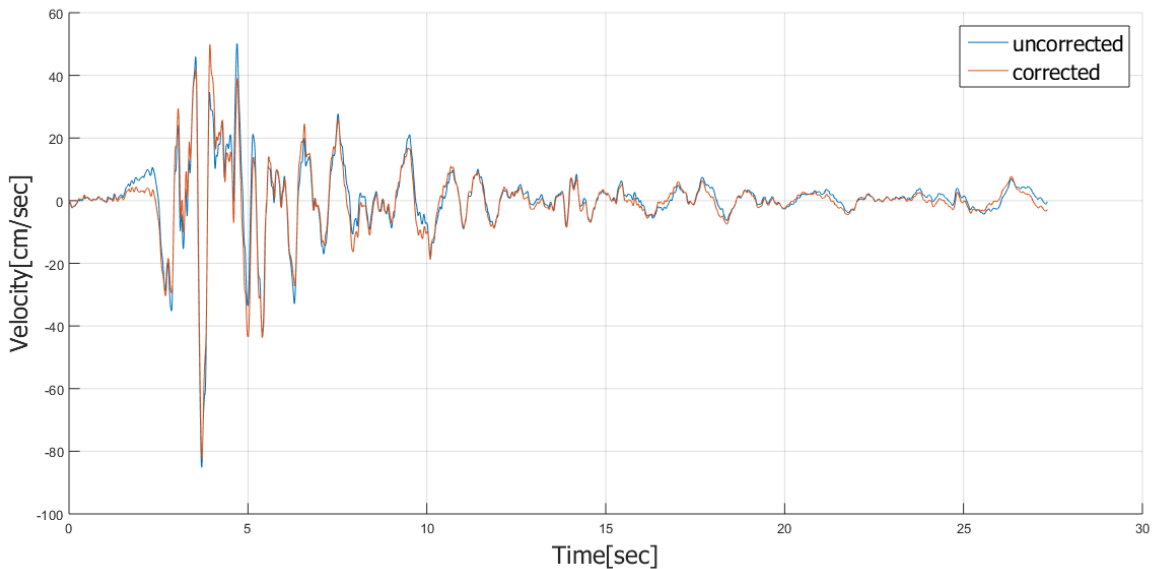
```

udd_cor2 = ifft(udd_cor2_f);
% STEP 5: integrate to velocity and displacement(u)
ud_cor = cumtrapz(udd_cor2)*dt;
u_cor = cumtrapz(ud_cor)*dt;
% output of the function
disp = real(u_cor);
vel = real(ud_cor);
acc = real(udd_cor2);
    
```

όπου το f_{cut} ορίζεται στην είσοδο.



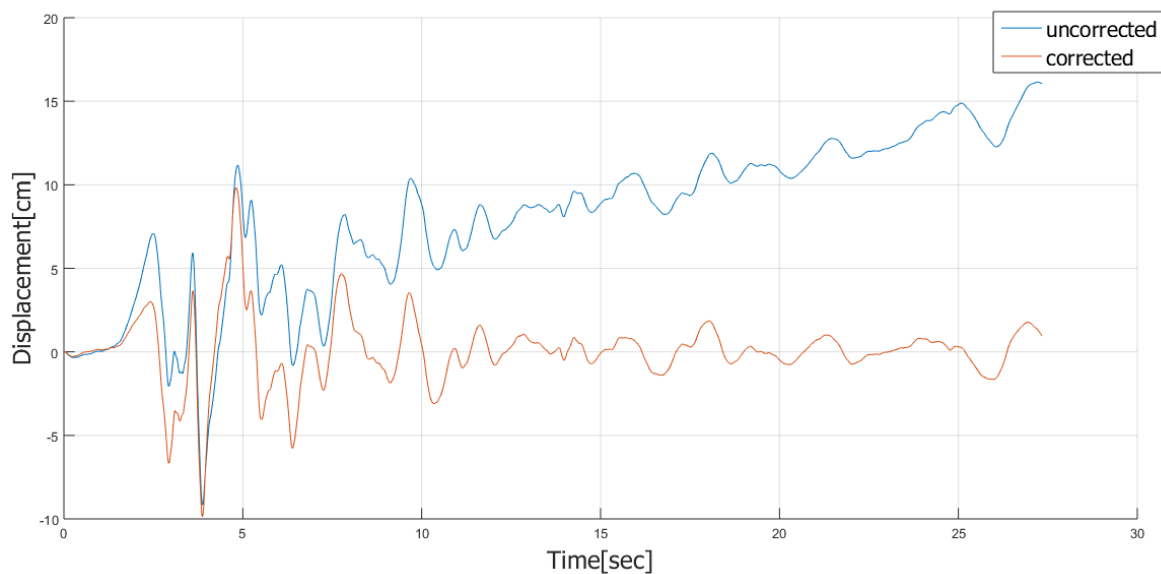
Εικόνα 2.13: Χρονοϊστορία επιτάχυνσης (κώδικας Boore)



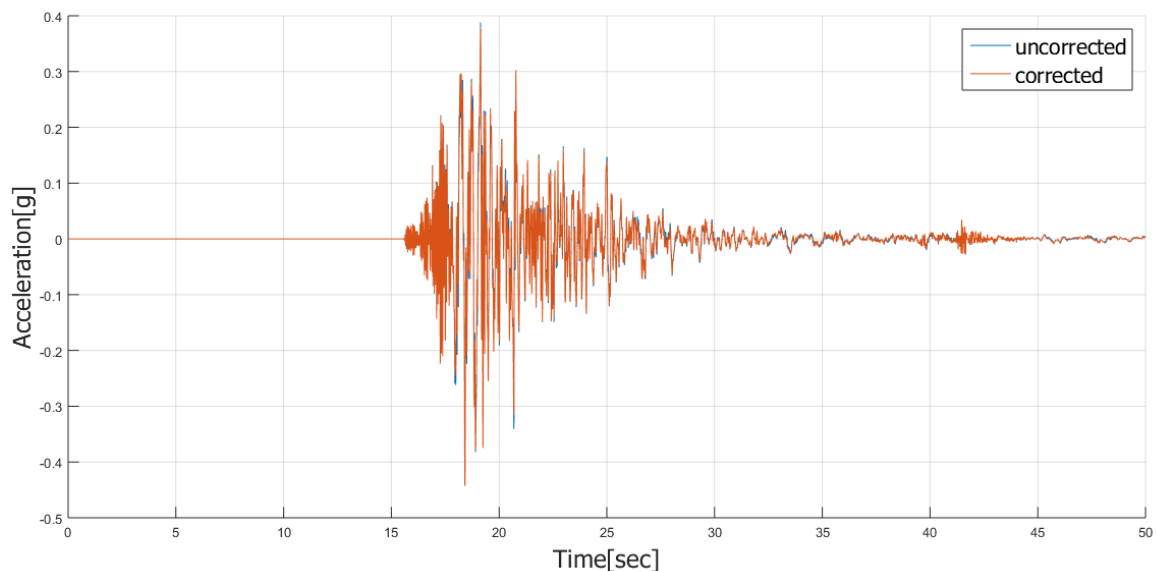
Εικόνα 2.14: Χρονοϊστορία ταχύτητας (κώδικας Boore)

Υποθέτοντας ως είσοδο τον σεισμό της Αθήνας που χρησιμοποιήσαμε και στο υποκεφάλαιο 2.1.3 με επιταχυνσιογράφημα αυτό της Εικόνα 2.13, με χρήση της διπλής ολοκλήρωσης καταλήγουμε πρώτα στην χρονοϊστορία της ταχύτητας (Εικόνα 2.14, uncorrected) και ύστερα της μετακίνησης (Εικόνα 2.15, uncorrected).

Στην χρονοϊστορία της μετακίνησης, παρατηρείται ένα από τα λάθη που αναφέρθηκαν στην αρχή του 2ου κεφαλαίου. Οι τελευταίες τιμές της καμπύλης πρέπει να προσεγγίζουν το 0, κάτι το οποίο στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν συμβαίνει. Η διόρθωση της καταγραφής πραγματοποιείται με τα βήματα που παρουσιάστηκαν στον κώδικα Boore, και το τελικό διάγραμμα της μετακίνησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.15 (corrected).



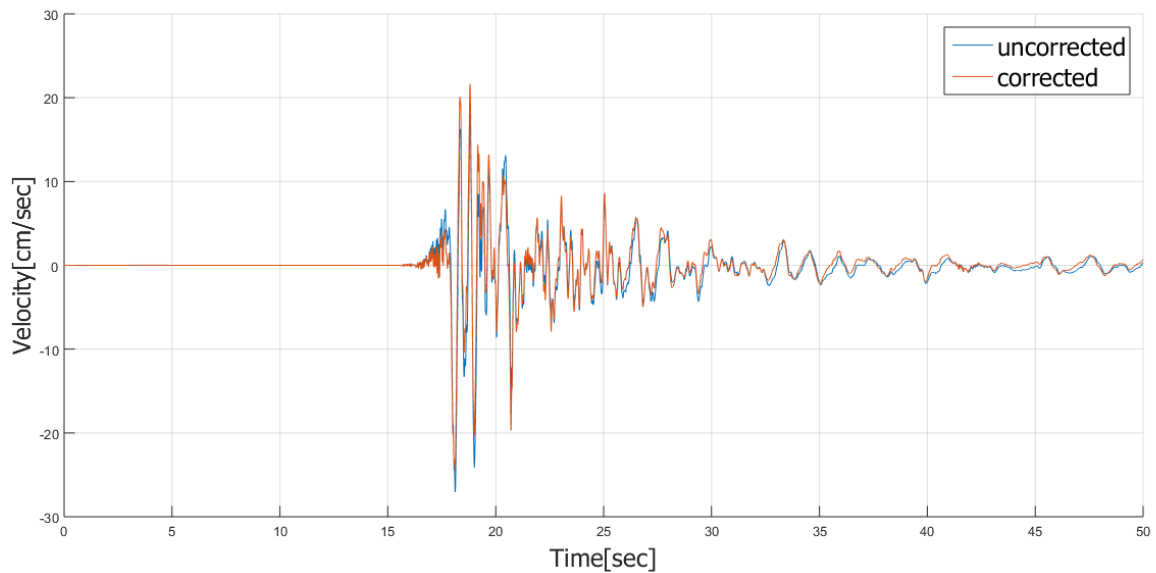
Εικόνα 2.15: Χρονοϊστορία μετακίνησης (κώδικας Boore)



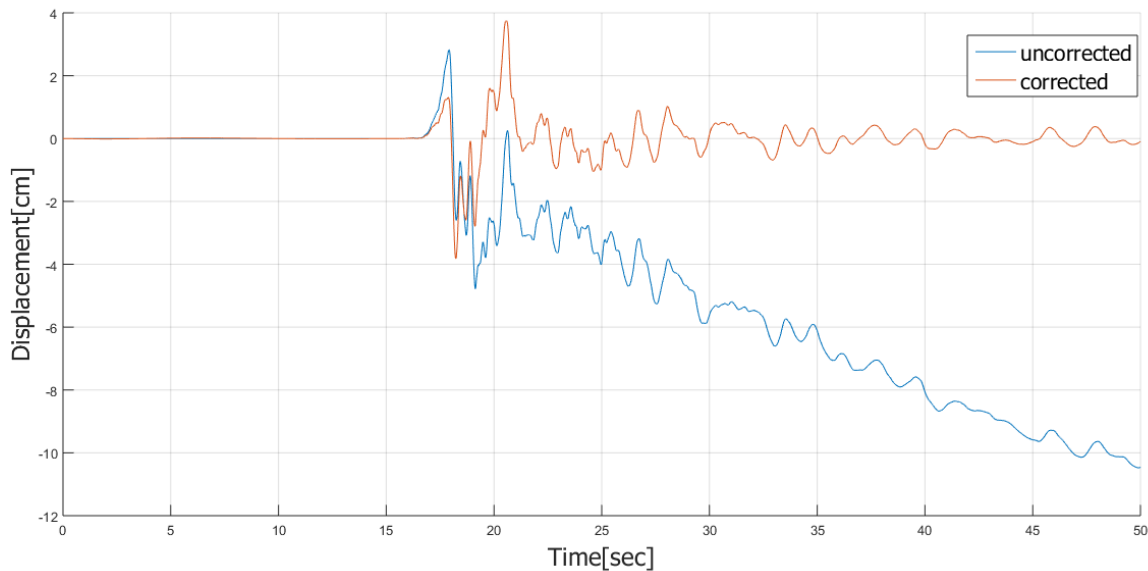
Εικόνα 2.16: Χρονοϊστορία επιτάχυνσης (κώδικας Chiou)

Στον κώδικα που δημιουργήθηκε σύμφωνα με τις μεθόδους του HC. Chiou, εισάγεται και πάλι το μη διορθωμένο επιταχυνσιογράφημα, στο οποίο εφαρμόζεται απευθείας ένα πολυώνυμο 2ου βαθμού. Η

πρώτη διόρθωση πραγματοποιείται με την αφαίρεση αυτού του πολυωνύμου από το επιταχυνσιογράφημα, και ολοκληρώνεται και πάλι με την εφαρμογή ενός υψηλοπερατού φίλτρου τύπου «Butterworth». Με το πέρας αυτού του βήματος έχει προσδιοριστεί το τελικό επιταχυνσιογράφημα και με διπλή ολοκλήρωση υπολογίζονται οι διορθωμένες χρονοϊστορίες της ταχύτητας και της μετακίνησης. Στην τελευταία εφαρμόζεται και μια επιπλέον διόρθωση υπολογίζοντας, με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, και αφαιρώντας ένα πολυώνυμο 1ου βαθμού.



Εικόνα 2.17: Χρονοϊστορία ταχύτητας (κώδικας Chiu)



Εικόνα 2.18: Χρονοϊστορία μετακίνησης (κώδικας Chiu)

Κώδικας HC. Chiu:

```
dt = mean(diff(t));
% STEP 1: least-square fitting in acceleration
```

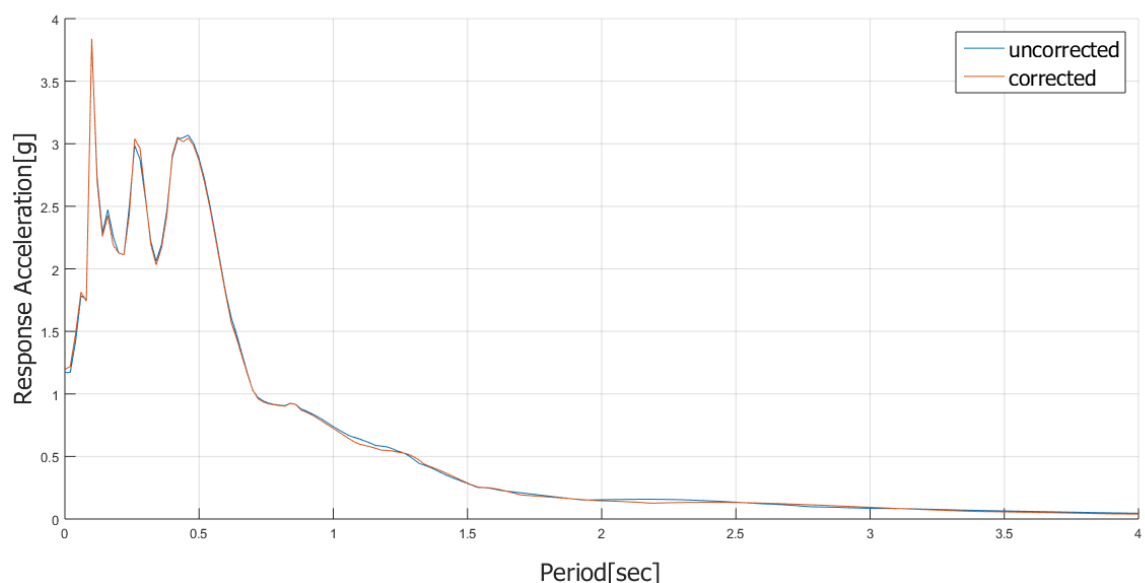


```

pudd = polyfit(t,udd,2);
ptudd = pudd(1)*t.^2 + pudd(2)*t+pudd(3);
udd_cor1 = udd - ptudd;
% STEP 2: high-pass filtering in acceleration
df = 1/dt/length(t);
f=df:df:df*length(t);
udd_cor1_f=fft(udd_cor1);
[b,a] = butter(4,fcut/(f(end)/2),'high'); % 4th order butterworth filter
udd_cor2_f = filter(b,a,udd_cor1_f);
udd_cor2 = ifft(udd_cor2_f);
u_cor2 = cumtrapz(cumtrapz(udd_cor2))*dt^2; % disp from acc
% STEP 3: subtract the initial value in the velocity
%subtract a linear trend from the displacement
pu_cor2 = polyfit(t,u_cor2,1);
ptu_cor2 = pu_cor2(1)*t + pu_cor2(2);
ucor3 = u_cor2 - ptu_cor2;
% output of the function
acc = real(udd_cor2);
vel = real(cumtrapz(acc)*dt);
disp = real(ucor3);

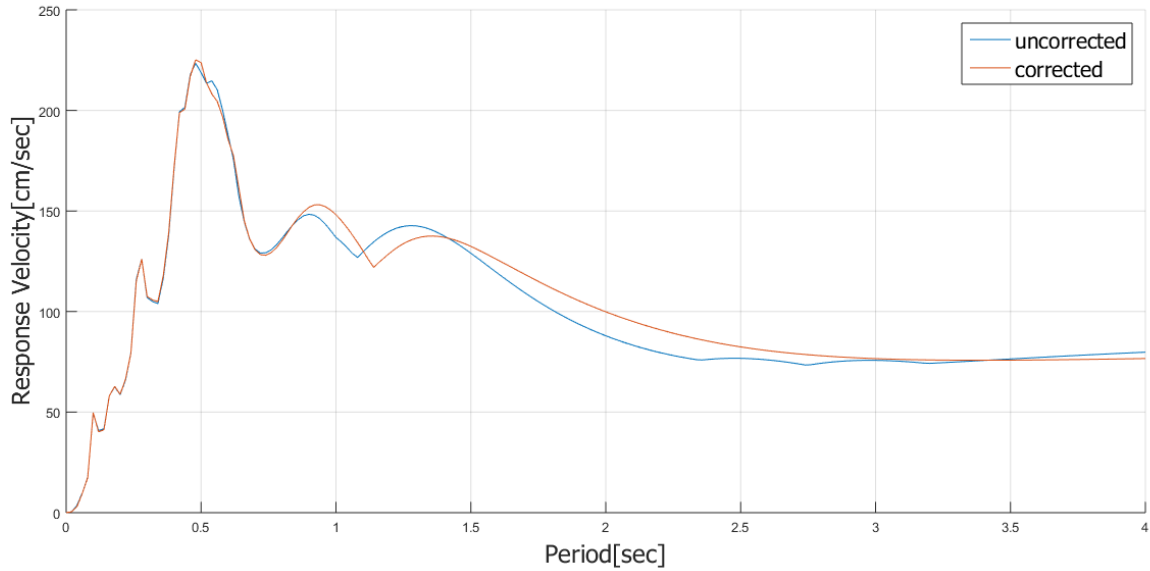
```

Εισάγοντας στον κώδικα Chiu μια σεισμική καταγραφή κοντινού πεδίου με χρονιόστοιρίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης αυτές των Εικόνων Εικόνα 2.16 (uncorrected), Εικόνα 2.17 (uncorrected), Εικόνα 2.18(uncorrected), και εφαρμόζοντας όλα τα βήματα του κώδικα που παρουσιάστηκαν παραπάνω προκύπτουν τα διορθωμένα γραφήματα.(Εικόνα 2.16 (corrected) Εικόνα 2.17 (corrected) Εικόνα 2.18 (corrected)).

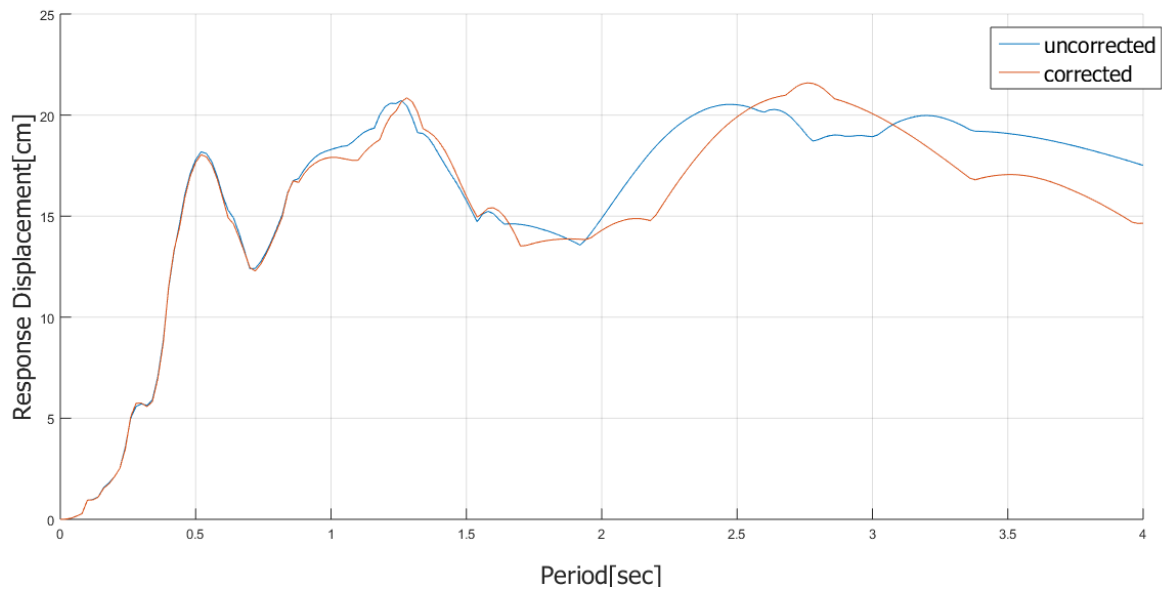


Εικόνα 2.19: Ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης πριν και μετά την διόρθωση της γραμμής βάσης

Στο κεφάλαιο 2.1.3 δημιουργήθηκαν τα ελαστικά φάσματα του σεισμού της Αθήνας, χρησιμοποιώντας μη διορθωμένες χρονοϊστορίες για την κατασκευή τους. Εφαρμόζοντας λοιπόν την διαδικασίες που περιγράφηκαν στον κώδικα Boore σε όλες τις χρονοϊστορίες που χρησιμοποιήθηκαν, προκύπτουν τα διορθωμένα(corrected) ελαστικά φάσματα, τα οποία παρουσιάζονται στις Εικόνες Εικόνα 2.19 (corrected), Εικόνα 2.20 (corrected), Εικόνα 2.21 (corrected).



Εικόνα 2.20: Ελαστικό φάσμα ταχύτητας πριν και μετά την διόρθωση της γραμμής βάσης



Εικόνα 2.21: Ελαστικό φάσμα μετακίνησης πριν και μετά τη διόρθωση γραμμής βάσης.

3 ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΑΛΜΩΝ ΑΠΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΚΟΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Η μελέτη της δυνατότητας αντικατάστασης των αρχικών καταγραφών με τις παλμικές τους προσομοιώσεις προϋποθέτει την δημιουργία του κώδικα εξαγωγής παλμών ο οποίος εντοπίζει και εξάγει τον ζητούμενο αριθμό παλμών από μια εδαφική κίνηση κοντινού πεδίου. Βασικό αντικείμενο μελέτης αυτού του κεφαλαίου, αποτελεί ο προσδιορισμός των βασικότερων χαρακτηριστικών αυτών των παλμών.

Μια βασική μέθοδος αναπαράστασης των παλμών είναι αυτή που εισήγαγαν οι Manroeidis and Parageorgiou (2003), η οποία βασίζεται στην μαθηματική παρουσίαση των κινήσεων κοντινού πεδίου στηριζόμενη στη διαμόρφωση ενός σύνθετου κυματιδίου. Τα κυματίδια είναι βασικές συναρτήσεις που ικανοποιούν ένα σύνολο μαθηματικών απαιτήσεων. Υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος κυματιδίων στην βιβλιογραφία, τα περισσότερα από τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Συνήθη κυματίδια που χρησιμοποιούνται στην Σεισμολογία

Κυματίδιο	Αναλυτική Έκφραση
Gabor	$f(t) = Ae^{-\left(\frac{2\pi f_p}{c}\right)^2 t^2} \cos [2\pi f_p t + m]$
Berlage	$f(t) = AH(t)t^n e^{-\left(\frac{2\pi f_p}{c}\right)^2 t} \cos [2\pi f_p t + m]$
Generalized Rayleigh	$f(t) = A(-1)^k \frac{e^{i(u+\frac{\pi}{2})}}{\left(i + \frac{2\pi f_p t}{k}\right)^{k+1}}$
Kupper	$f(t) = A \left[\sin(m\pi t) - \frac{m}{m+2} \sin(m+2\pi t) \right] \text{ for } 0 < t < T$
Ricker	Three loop (symmetric): $f(t) = A(1 - 2\pi^2 f_p^2 t^2) e^{-(\pi f_p)^2 t^2}$ Two loop (antisymmetric): $f(t) = Ate^{-(2\pi f_p)^2 t^2}$

όπου:

- A: πλάτος
- f_p : κύρια συχνότητα
- u: διαφορά φάσης
- c: συντελεστής απόσβεσης
- n: ασυμμετρία περιβάλλουσας

- T: περίοδος
- m: αριθμός ημικυκλίων
- H(t): συνάρτηση Heaviside

3.1 Βασικά κυματίδια στην Αντισεισμική Μηχανική

Για την επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου, συλλέχθηκαν 24 σεισμικές καταγραφές κοντινού πεδίου (καταγραφές που έγιναν σε σταθμούς που βρίσκονταν εντός ακτίνας 20 km από το ρήγμα.) με διακριτό παλμό ταχύτητας. Στον Πίνακα 3.2 παρατίθενται αυτές οι καταγραφές μαζί με πληροφορίες σχετικά με την θέση τους, την απόσταση από το ρήγμα, και την μέγιστη εδαφική ταχύτητα.

Πίνακας 3.2: Καταγραφές κοντινού πεδίου ε διακριτό παλμό ταχύτητας

No	Location	Fault Mechanism	M _w	Station	Site Code	Closest Fault Distance (km)	Component	Recorded PGV (cm/sec)	Effect
1	Parkfield, CA, USA	SS	6.20	CO2	SL	0.1	SN	75.1	FD
2	San Fernando, CA, USA	RV	6.55	PCD	HR	3.0	SN	120.0	FD
3	Gazli, USSR3	RV	6.80	KAR	SR	3.0	Rad	60.0	FD
4	Bucharest, Romania	RV	7.27	BRI	SL	190.0	SN	74.9	FD
5	Tabas, Iran	RV	7.11	TAB	SL	1.2	SP	122.0	FD
6	Coyote Lake, CA, USA	SS	5.63	GA6	SR	1.2	SN	47.5	FD
7	Imperial Valley, CA, USA	SS	6.50	E04	SL	6.0	SN	78.3	FD
				E05	SL	2.7	SN	91.8	FD
				E06	SL	0.3	SN	112.0	FD
				E07	SL	1.8	SN	109.0	FD
				EMO	SL	1.2	SN	115.0	FD
8	Mexicali Valley, Mexico	SS	6.37	VCT	SL	3.0	SN	76.7	FD
9	Morgan Hill, CA, USA	SS	6.15	HAL	SL	2.0	SN	39.8	FD
10	Palm Springs, CA, USA	OB	6.09	NPS	SL or SR	4.0	SN	73.6	FD
				DSP	SL	6.4	SN	29.2	FD
11	Whittier Narrows, CA, USA	RV	5.93	DO2	SL	16.4	SN	30.7	FD
				NWK	SL	15.7	SN	20.0	FD
12	Superstition Hills, CA, USA	SS	6.4	PTS	?	0.7	SN	109.0	FD
				ELC	SL	13.6	SN	52.0	FD
13	Loma Prieta, CA, USA	OB	6.90	LGP	HR	3.0	SN	102.0	FD
				STG	?	8.3	SN	56.4	FD
14	Sierra Madre, CA, USA	RV	5.56	COG	SL	9.4	Rad (filt)	15.3	FD
15	Erzincan, Turkey	SS	6.63	ERZ	SL	2.0	SN	95.2	FD
16	Landers, CA, USA	SS	7.20	LUC	SL	1.1	SN	114.0	FD
17	Northridge, CA, USA	RV	6.70	JFA	SL	5.2	SN	105.0	FD
				RRS	SL	6.0	SN	173.0	FD
				SCG	SL	5.1	SN	134.0	FD
				SCH	SL	5.0	SN	122.0	FD

No	Location	Fault Mechanism	M _w	Station	Site Code	Closest Fault Distance (km)	Component	Recorded PGV (cm/sec)	Effect
				NWS	SL	5.3	SN	117.0	FD
18	Aigion, Greece	NM	6.33	AEG	SL or SR	6.0	Long	40.9	FD
				AEG	SL or SR	6.0	Tran	52.0	FD
19	Izmit, Turkey	SS	7.40	ARC	SR	14.0	SN	44.3	FD
				SKR	SR	3.1	SN	80.3	PT
				YPT	SR	2.6	SN	87.8	PT
				GBZ	SL	11.0	SN	41.4	FD
				GBZ	SR	11.0	SN	28.7	PT
20	Chi-Chi, Taiwan	OB	7.60	TCU052	SL	0.8	SN	270.0	PT
				TCU068	SL	0.2	SN	380.0	PT
				TCU075	SL	0.6	SN	115.0	FD
				TCU076	SL	2.3	SN	88.0	FD
				TCU129	SL	1.5	SN	68.0	FD

όπου

- SS: strike-slip, RV: reverse, OB: oblique, NM: normal
- HR: hard rock, SR: sedimentary and conglomerate rock, SL: soil and alluvium
- SN: strike-normal, SP: strike-parallel, Rad: radial, Long: longitudinal, Tran: transverse
- FD: forward directivity, PT: permanent translation

Από τα κυματίδια που διατίθενται στην βιβλιογραφία, επιδιώκεται η επιλογή αυτού που προσομοιάζει όσο το δυνατόν περισσότερες από τις παραπάνω παλμικές καταγραφές και αναπαριστά τον παλμό με χρήση των ελάχιστων απαιτούμενων παραμέτρων. Τα κυματίδια που φαίνεται να πληρούν αυτές τις προϋποθέσεις είναι κυρίως τα Gabor, Berlage και Ricker, με βέλτιστη επιλογή το κυματίδιο του Gabor. Σύμφωνα με αυτό το σήμα, ο παλμός περιγράφεται με την χρήση τεσσάρων βασικών παραμέτρων:

- A: το εύρος της εδαφικής ταχύτητας
- f_p : η συχνότητα της αρμονικής ταλάντωσης του κυματιδίου
- γ : το γινόμενο της διάρκειας της εδαφικής ταχύτητας επί την συχνότητα f_p , με $\gamma > 1$
- ν : η διαφορά φάσης της ημιγωνικής συνιστώσας ($\nu=0$ και $\nu=\pm\pi/2$, για συμμετρικό και αντισυμμετρικό σήμα αντίστοιχα)

Ωστόσο, το σήμα αυτό παρουσιάζει ένα σημαντικό μειονέκτημα, που οφείλεται στην μορφή της μαθηματικής του έκφρασης. Η ύπαρξη της εκθετικής συνάρτησης, εμποδίζει την ανάπτυξη κλειστών λύσεων για την απόκριση μονοβάθμιων συστημάτων. Για τον λόγο αυτό, οι Manroeidis and Parageorgiou (2003), πρότειναν ένα μοντέλο που επιτρέπει την ανάπτυξη κλειστών λύσεων για την εκτίμηση φασμάτων απόκρισης και τον προσδιορισμό των φασματικών χαρακτηριστικών σε μορφή Fourier. Το κυματίδιο αυτό, έχει τις ίδιες παραμέτρους με το κυματίδιο Gabor, και εκφράζεται με την εξής μαθηματική σχέση:

$$f(t) = A \frac{1}{2} [1 + \cos(2\pi f_p t)] \cos(2\pi f_p t + \nu) \quad (3.1)$$

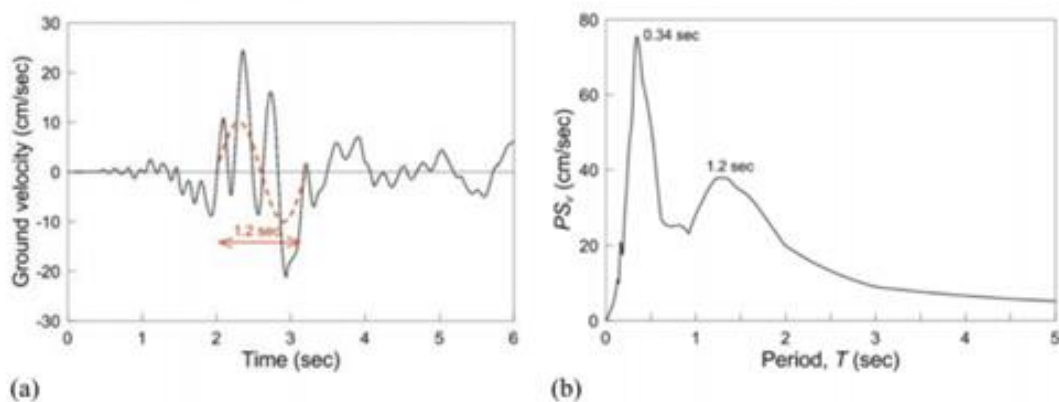
Οι πραγματικές καταγραφές είναι δυνατόν να αποτελούνται από περισσότερους από έναν διακριτούς παλμούς. Στον κώδικα εξαγωγής παλμών παρουσιάζεται μια μεθοδολογία που συνδυάζει την χρήση του κυματιδίου των Manroeidis and Parageorgiou (2003) για την αποτελεσματική αναπαράσταση των παλμών κατευθυντικότητας, μαζί με μια καλώς ορισμένη διαδικασία για τον προσδιορισμό των παραμέτρων των χρησιμοποιούμενων κυματιδίων. Η διαδικασία αυτή, επιτρέπει την αναγνώριση και

την εξαγωγή όλων των παλμών που εντοπίζονται στο εύρος των μέτριων και μεγάλων περιόδων. Αν γίνει υπέρθεση όλων των εξαγόμενων παλμών, μπορεί να παραχθεί μια προσομοίωση ολόκληρης της εδαφικής κίνησης. Τα χαρακτηριστικά των κυματιδίων καθορίζονται από την βέλτιστη προσαρμογή τους (max correlation) στο φάσμα απόκρισης της ταχύτητας κάθε σεισμικής καταγραφής.

3.2 Προσδιορισμός των περιόδων T_p των σημαντικών παλμών

3.2.1 Εισαγωγή

Μια κοινή πρακτική για την εκτίμηση της περιόδου T_p του κυρίαρχου παλμού που περιέχεται στις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου είναι η τιμή της περιόδου για την οποία το ελαστικό φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5% εμφανίζει την μέγιστη αιχμή του. Ωστόσο η ακρίβεια της διαδικασίας αυτής έχει αμφισβητηθεί από πολλούς ερευνητές (Rodriguez-Marek 2000, Baker 2007).



Εικόνα 3.1: Καταγραφή G 06-320 (Coyota Lake) 1979

Ένα παράδειγμα στο οποίο είναι εμφανές ότι η μέθοδος αυτή οδηγεί σε εσφαλμένα αποτελέσματα παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1. Στην Εικόνα 3.1.a παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας από την καταγραφή G 06-320 (Coyote Lake) 1979, στην οποία διακρίνουμε έναν βασικό παλμό με περίοδο περίπου ίση με $T=1.2$ sec. Στην διπλανή Εικόνα 3.1.b, απεικονίζεται το φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για λόγο ιξώδους απόσβεσης 5%. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι η μέγιστη αιχμή του φάσματος είναι ίση με 0.34 sec, ενώ η κορυφή στην περίοδο $T=1.2$ sec έχει σημαντικά μικρότερο πλάτος.

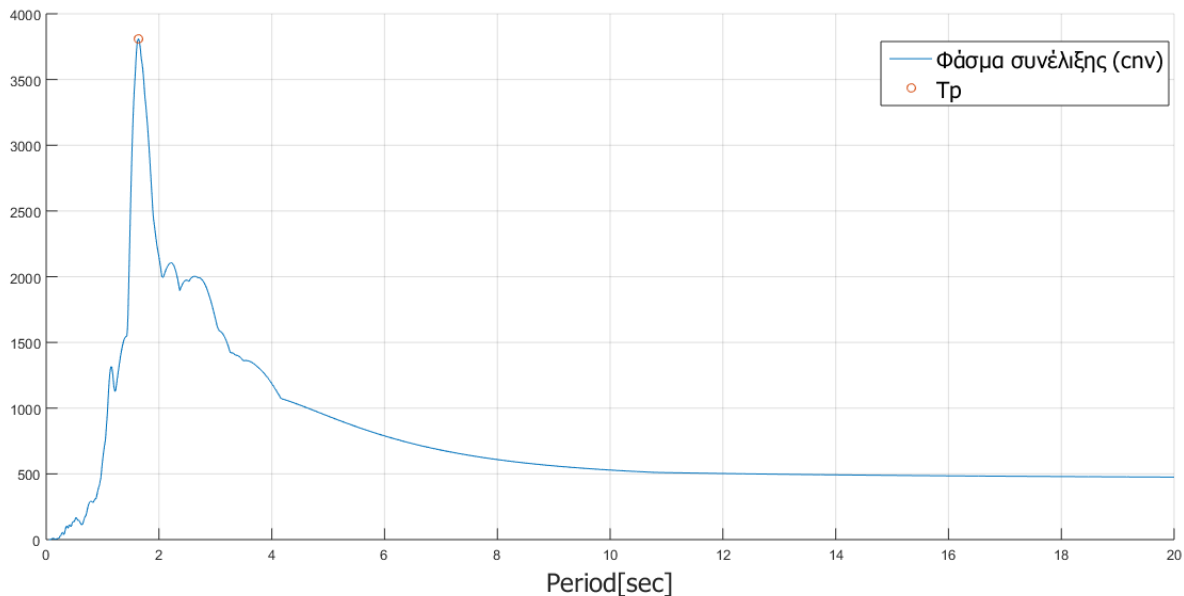
Άρα καθίσταται αναγκαία η υιοθέτηση μιας διαφορετικής μεθόδου για τον υπολογισμό της περιόδου του δεσπόζοντος παλμού.

3.2.2 Φάσμα συνέλιξης

Στον κώδικα εξαγωγής παλμών χρησιμοποιείται μια μέθοδος, που στηρίζεται σε αυτή που προτάθηκε από τους Mimosoglou et al (2014), και προσδιορίζει την περίοδο του κυρίαρχου παλμού από την μέγιστη τιμή του φάσματος συνέλιξης μια καταγραφής.

Είναι γνωστό ότι ο μετασχηματισμός Fourier της συνέλιξης δύο σημάτων είναι ίσος με το γινόμενο των επιμέρους μετασχηματισμών. Επίσης, το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας για μηδενική απόσβεση $S_{v,0}$ είναι μια επαρκής περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης και το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης για μηδενική απόσβεση $S_{d,0}$ είναι μια επαρκής περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής ταχύτητας. Χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες αυτές, το φάσμα Fourier της συνέλιξης μπορεί να προσεγγιστεί από το γινόμενο $S_{v,0} \times S_{d,0}$, το οποίο στη συνέχεια θα αναφέρεται ως «Φάσμα Συνέλιξης». Η μέγιστη τιμή αυτού του φάσματος, αντιστοιχεί στην περίοδο του κυρίαρχου παλμού.

Η χρήση του φάσματος συνέλιξης επιτρέπει τον εντοπισμό πρόσθετων σημαντικών παλμών που ενδέχεται να εμπεριέχονται μέσα στην εδαφική κίνηση και εμφανίζονται στο φάσμα, ως δευτερεύουσες κορυφές, με τιμές μικρότερες ή μεγαλύτερες από την τιμή του κυρίαρχου παλμού. Καθώς όμως δεν ξεχωρίζουν πάντα στο φάσμα, κάθε δευτερεύων παλμός μπορεί να εντοπιστεί επαναλαμβάνοντας την προαναφερθείσα διαδικασία στην εναπομένουσα εδαφική κίνηση (αρχική καταγραφή-παλμός). Παρατηρείται ότι όλοι οι παλμοί που εξάγονται από τη διαδικασία αυτή, δεν είναι εξίσου σημαντικοί. Έτσι, είναι απαραίτητος ο καθορισμός κριτηρίων, ώστε να ελέγχεται εάν ένας παλμός είναι αποδεκτός, ή πρέπει να απορριφθεί.



Εικόνα 3.2: Φάσμα συνέλιξης

Στον συγκεκριμένο κώδικα, το φάσμα συνέλιξης δημιουργείται από το γινόμενο του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης και της ταχύτητας για απόσβεση 5% αντί για 0%, διότι παρατηρήθηκε ότι ανταποκρίνεται καλύτερα στις κατασκευές.

Κώδικας κατασκευής φάσματος συνέλιξης και προσδιορισμός T_p :

```
[td, SA, SV, SD] = spectrum(aa, dt, xi);
cnv=SV.*SD;
[CNVmax, IImax] = max(cnv);
Tp = td(IImax);
SDMAX = SD(IImax)
```

όπου:

- aa: η καταγραφή
- dt: το βήμα της καταγραφής
- xi: η απόσβεση ($\xi = 0.05$).

3.3 Προσδιορισμός των παραμέτρων των κυματιδίων

Το μοντέλο των Manroeidis and Parageorgiou (2003), έχει μια περιοδική εξίσωση που λύνεται μέσω του περιορισμού του χρονικού διαστήματος του σήματος ως εξής:

$$\frac{-\gamma}{2f_p} \leq t \leq \frac{\gamma}{2f_p} \quad (3.2)$$

Επιπλέον η περίοδος της αρμονικής ταλάντωσης, για να παράγει φυσικώς αποδεκτά σήματα θα πρέπει να είναι μικρότερη από την περιβάλλουσα που δημιουργείται.

$$\frac{1}{f_p} < \frac{\gamma}{f_p} \rightarrow \gamma > 1 \quad (3.3)$$

Για την βαθμονόμηση του μοντέλου, είναι βολικό να εισαχθεί μια χρονική μετατόπιση t_0 ώστε να καθορίζεται με ακρίβεια η χρονική στιγμή της κορυφής της περιβάλλουσας.

$$t \rightarrow t - t_0 \quad (3.4)$$

Ο συνδυασμός των εκφράσεων (3.3) έως (3.4) δίνει τις απαιτούμενες εξισώσεις για τον υπολογισμό της επιτάχυνσης $a_p(t)$ και της ταχύτητας $v_p(t)$ του κυματιδίου κατά τους Mavroudis and Parageorgiou (2003).

$$v_p(t) = \frac{A}{2} \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{f_p}{\gamma} (t - t_0) \right) \cos [2\pi f_p (t - t_0) + \nu] \right] \quad (3.5)$$

για $t_0 - \gamma/2f_p < t < t_0 + \gamma/2f_p$, με $\gamma > 1$

$v_p(t) = 0$, σε άλλη περίπτωση

$$a_p(t) = \frac{-A\pi f_p}{\gamma} \left[\sin \left(\frac{2\pi f_p}{\gamma} (t - t_0) \right) \cos [2\pi f_p (t - t_0) + \nu] + \gamma \sin \left[2\pi f_p (t - t_0) + \nu \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi f_p}{\gamma} (t - t_0) \right) \right] \right] \right] \quad (3.6)$$

για $t_0 - \gamma/2f_p < t < t_0 + \gamma/2f_p$, με $\gamma > 1$

$a_p(t) = 0$, σε άλλη περίπτωση

Παράθεση συνάρτησης υπολογισμού των a_p, v_p, t του παλμού στο λογισμικό Matlab:

```
function [acc, vel, time] = mavroeides(dt, Ap, fp, gamma, nu, tshift)
tb = (gamma/2/fp);
t0 = 0;
t = (t0-tb):dt:(t0+tb);
nt = length(t);
% now calculate the velocity pulse:
p1 = ones(1, nt) + cos(2*pi*fp*(t-t0)/gamma);
p2 = cos(2*pi*fp*(t-t0) + nu*ones(1, nt));
vel = 0.5*Ap*(p1.*p2);
% now calculate the acceleration pulse
c0 = -Ap*pi*fp/gamma;
a1 = sin(2*pi*fp*(t-t0)/gamma);
a2 = cos(2*pi*fp*(t-t0) + nu*ones(1, nt));
b1 = gamma*sin(2*pi*fp*(t-t0) + nu*ones(1, nt));
```



```

b2 = (ones(1,nt) + cos( 2*pi*fp*(t-t0)/gamma ));
acc = c0*(a1.*a2+b1.*b2);
if gamma <= 1;
    error('gamma should be > 1');
end;
time = t+tshift;
end
    
```

Η μεταβλητή A αναφέρεται στο πλάτος του σήματος, και για τον καθορισμό της τιμής του αλλά και των γ , ν εισάγεται η παράμετρος CAD (Cumulative Absolute Displacement) που παρουσιάστηκε από τους Ταφλαμπάς et al (2009), σε αναλογία με την CAV (Cumulative Absolute Velocity) (EPRI 1991), που ορίζεται ως το ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής της εδαφικής ταχύτητας:

$$CAD = \int_0^{tot} |v_g| dt \quad (3.7)$$

Ας θεωρήσουμε ότι μια αρμονική εδαφική κίνηση πλάτους $d_{g,max}$, εφαρμόζεται ως διέγερση στη βάση ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή με μηδενική απόσβεση. Στον συντονισμό, το πλάτος της απόκρισης του ταλαντωτή σχετίζεται σχεδόν γραμμικά με τον αριθμό των κύκλων ταλάντωσης και για μια διέγερση γ κύκλων, η μέγιστη απόκριση είναι (Clough and Penzien 1975):

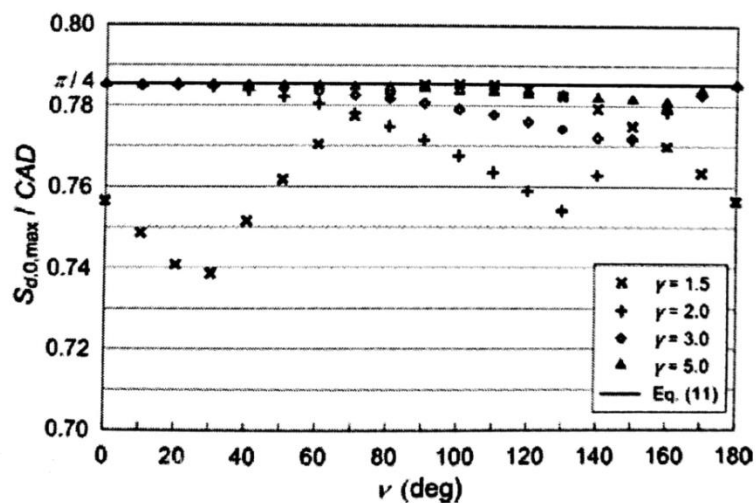
$$S_{d,0}(Tres) = \pi \cdot \gamma \cdot d_{g,max} \quad (3.8)$$

Η τιμή του CAD στο τέλος του γ κύκλου της αρμονικής διέγερσης είναι:

$$CAD = 4 \cdot \gamma \cdot d_{g,max} \quad (3.9)$$

Προκύπτει λοιπόν η παρακάτω σχέση, η οποία δείχνει ότι για μια αρμονική εδαφική κίνηση γ κύκλων, που εφαρμόζεται ως διέγερση στη βάση ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή με μηδενική απόσβεση, υπάρχει μια σταθερή σχέση μεταξύ της τιμής της φασματικής μετατόπισης μηδενικής απόσβεσης κατά τον συντονισμό και της CAD , η οποία είναι:

$$\frac{S_{d,0}(Tress)}{CAD} = \frac{\pi}{4} \quad (3.10)$$



Εικόνα 3.3: Λόγος $S_{d,0,max}/CAD$ συναρτήσει διαφορετικών γωνιών και δεικτών γ

Εάν αντί μιας καθαρά αρμονικής διέγερσης, χρησιμοποιείται ένα κυματίδιο M&P, η παραπάνω σχέση συνεχίζει να ισχύει προσεγγιστικά, παρά το γεγονός ότι η περιβάλλουσα κωδωνοειδούς μορφής έχει επιβληθεί στο πλάτος της διέγερσης. Αυτό παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.3 όπου ο λόγος της μέγιστης φασματικής μετατόπισης για μηδενική απόσβεση προς την παράμετρο CAD παριστάνεται γραφικά συναρτήσει του δείκτη φάσης ν , και για $\gamma=1, 1.5, 2, 3, 5$. Τα αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα της περιόδου T_p και του πλάτους A . Είναι εμφανές ότι ο λόγος $S_{d,0,max}/CAD$ είναι κοντά στο $\pi/4$, ειδικά για παλμούς μεγάλης διάρκειας (μεγάλες τιμές του γ). Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται για $\gamma=1.5$ και $\nu=30$, αλλά ακόμα και τότε το σφάλμα είναι μικρότερο από 6%.

Στην γενικότερη περίπτωση όπου η απόσβεση δεν είναι μηδενική, η μετακίνηση συντονισμού ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή απόσβεσης ξ για μια αρμονική διέγερση είναι:

$$S_{d,\xi}(Tress) = \frac{1 - e^{-2\pi\gamma\xi}}{2\xi} d_{g,max} \quad (3.11)$$

Και μέσω της σχέσης (3.7) καταλήγουμε στην:

$$\frac{S_{d,\xi}(Tress)}{CAD} = \frac{1 - e^{-2\pi\gamma\xi}}{8\gamma\xi} \quad (3.12)$$

Αν η διέγερση δεν είναι καθαρά αρμονική, αλλά ένα κυματίδιο M&P, η παραπάνω σχέση παρουσιάζει σφάλμα για μεγάλες τιμές του γ . Μέσω μια παραμετρικής έρευνας, βρέθηκε ότι ο συντελεστής διόρθωσης ισούται με $1+(\gamma-1)\xi$. Συνεπώς για κυματίδια M&P, προκύπτει η σχέση:

$$\frac{S_{d,\xi}(Tress)}{CAD} = \frac{1 - e^{-2\pi\gamma\xi}}{8\gamma\xi} [1 + (\gamma - 1)\xi] \quad (3.13)$$

Στην δική μας περίπτωση όπου η απόσβεση είναι $\xi=5\%$, η παραπάνω σχέση παίρνει την μορφή:

$$\frac{S_{d,\xi}(Tress)}{CAD} = \frac{1 - e^{-0.1\pi\gamma}}{0.4\gamma} [1 + (\gamma - 1)0.05] \quad (3.14)$$

Για κυματίδια M&P, η τιμή της παραμέτρου CAD συνδέεται άμεσα με το πλάτος και την διάρκεια γ , καθώς ισχύει η σχέση:

$$CAD \left(= \int_0^{tot} v_g dt \right) = \gamma A \frac{T_p}{\pi} \quad (3.15)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.13) και (3.14) υπολογίζουμε το πλάτος του παλμού, ο οποίος έχει περίοδο T_p .

$$A = \frac{0.4\pi S_{d,5\%} T_p}{(1 - e^{-0.1\pi\gamma}) [1 + (\gamma - 1)0.05] T_p} \quad (3.16)$$

Παρατηρούμε ότι το πλάτος A του κυματιδίου εξαρτάται από το γ . Καθώς η διάρκεια του κυματιδίου (γ) δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, ορίζεται ένα εύρος τιμών που μπορεί να λάβει η μεταβλητή γ και υπολογίζονται όλα τα κυματίδια που προκύπτουν για αυτές τις τιμές του γ .

Για την επιλογή του καταλληλότερου κυματιδίου, πραγματοποιείται μια σύγκριση μεταξύ της χρονοϊστορίας ταχύτητας των παραγόμενων κυματομορφών ($v_p(t)$) και της αντίστοιχης εδαφικής. Η κυματομορφή, για την οποία παρατηρείται η μεγαλύτερη συσχέτιση μεταξύ των χρονοϊστοριών ταχύτητας επιλέγεται ως η καταλληλότερη. Στο Matlab για την συγκεκριμένη διαδικασία υπάρχει η συνάρτηση $xcorr$ (cross-correlation).

$$[r, lags] = xcorr() \quad (3.17)$$

Η συνάρτηση `corr` συγκρίνει δύο διανύσματα και ως αποτέλεσμα επιστρέφει την τιμή της συσχέτισης τους (r) και την σχετική τους θέση (`lags`) για την οποία συμβαίνει αυτή η συσχέτιση.

3.4 Μεθοδολογία σε βήματα

Βάσει όλων των παραπάνω, συντάχθηκε ο κώδικας εξαγωγής παλμών με την χρήση του λογισμικού Matlab ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα για την εξαγωγή του απαιτούμενου αριθμού παλμών από μια σεισμική καταγραφή κοντινού πεδίου.

1. Για την υπό εξέταση εδαφική κίνηση υπολογίζονται τα φάσματα της επιτάχυνσης της ταχύτητας και της μετακίνησης, για λόγο ιξώδους απόσβεσης $\zeta=5\%$. Έπειτα παράγεται το φάσμα συνέλιξης πολλαπλασιάζοντας το φάσμα ταχύτητας με αυτό της μετατόπισης. Ο κώδικας «`spectrum`» για τον υπολογισμό των φασμάτων απόκρισης παρουσιάστηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 2.1.3.

Παράθεση αντίστοιχου κώδικα:

```
[td, SA, SV, SD] = spectrum(aa, dt, xi);
cnv = SV.*SD;
```

2. Προσδιορίζεται η τιμή της T_p ως η περίοδος που αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή του φάσματος συνέλιξης. Ακόμα, εντοπίζεται η τιμή της φασματικής μετατόπισης που αντιστοιχεί στην περίοδο αυτή ($S_d(T_p)$).

Παράθεση αντίστοιχου κώδικα:

```
[CNVmax, IImax] = max(cnv);
Tp = td(IImax);
SDMAX = SD(IImax);
```

3. Τίθεται μια μέγιστη τιμή max για την διάρκεια του κυματιδίου. Αφού η διάρκεια του κυματιδίου, που προσαρμόζεται καλύτερα στην εδαφική κίνηση, δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, πραγματοποιείται μια σάρωση όλων των πιθανών τιμών του γ , από 1 μέχρι και max . Για παλμούς κατευθυντικότητας σε σεισμικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου, η προτεινόμενη τιμή για max είναι το 5. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις ίσως απαιτούνται τιμές της τάξης του $max=10$ ή και μεγαλύτερες. Η σάρωση όλων των τιμών της διάρκειας του γ εντός του εύρους, πραγματοποιείται με την χρήση του βήματος $\Delta\gamma=0.1$. Για κάθε τιμή j εντός του εύρους $1 \leq j_{max}$, με βήμα $\Delta\gamma$ υπολογίζεται το πλάτος A_j με χρήση της εξίσωσης (3.16).
4. Για κάθε ζεύγος (A_j, j) που προσδιορίστηκε στο βήμα 3, και για όλες τις τιμές της φάσης ν στο διάστημα $0 \leq \nu \leq 360$ με βήμα $\Delta\nu=5$, παράγεται το κυματίδιο των M & P με χρήση της συνάρτησης <code>manroeides που αναφέρθηκε παραπάνω, για $f_p=1/T_p$. Από τα κυματίδια που παράγονται, απορρίπτονται εκείνα στα οποία η μέγιστη επιτάχυνση, ταχύτητα ή μετακίνηση είναι μεγαλύτερη από την PGA, PGV, PGD της εδαφικής κίνησης αντίστοιχα.

Παράθεση αντίστοιχου κώδικα (των βημάτων 3 και 4):

```
gm = 1.1:0.1:10;
aphn = 0:5:360;
for ig = 1:length(gm)
    for iph = 1:length(aphn)
        Ap(ig, iph) = (0.4*pi*SDMAX) / ((1-exp(-0.1*pi*gm(ig))) *...
        ...((1+(gm(ig)-1)*xi)*Tp));
    [acc_MP, vel_MP, t_MP] = ...
```

```

...mavroeides(dt, Ap(ig, iph), 1/Tp, gm(ig), aphn(iph));
disp_MP = cumtrapz(t_MP, vel_MP);
pga_mp = max(abs(acc_MP));
pgv_mp = max(abs(vel_MP));
pgd_mp = max(abs(disp_MP));
if (pga_mp>=PGA) || (pgv_mp>=PGV) || (pgd_mp>=PGD)
    break
end

```

5. Για κάθε αποδεκτό κυματίδιο που παράχθηκε στο βήμα 4, πραγματοποιείται μια συσχέτιση (cross-correlation), μεταξύ της ιστορίας της ταχύτητας του κυματιδίου και της εδαφικής κίνησης.

Παράθεση αντίστοιχου κώδικα:

```

mVelrec = mean(vv);
sx1 = sum((vv-mVelrec)^2);
mVelMP = mean(vel_MP);
sx2 = sum((vel_MP-mVelMP)^2);
denominator = sqrt(sx1*sx2);
[r, lag] = xcorr(vv, vel_MP');
[rmax, imax] = max(r(find(lag>=0)));
Rfactor(ig, iph) = rmax/denominator;

```

6. Επιλέγεται το κυματίδιο με την μεγαλύτερη συσχέτιση (r) και ορίζεται η θέση του κυματιδίου (σχετικά με την καταγραφή) στην οποία πραγματοποιείται αυτή η μέγιστη συσχέτιση (lag). Έπειτα προσδιορίζονται οι τιμές των παραμέτρων A_i , γ_i , ν_i , για το συγκεκριμένο κυματίδιο. Εννοείται ότι $T_i = T_p$ που υπολογίστηκε στην αρχή της διαδικασίας.

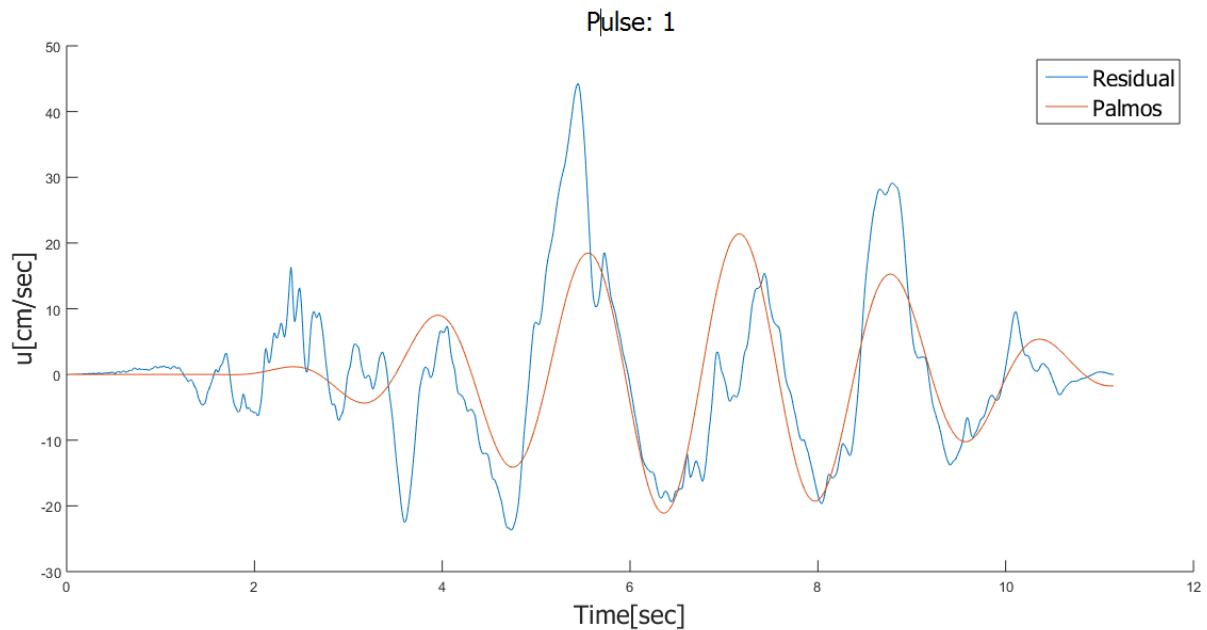
Παράθεση αντίστοιχου κώδικα:

```

if rmax/denominator > rrmx %rrmx λαμβάνει την τιμή 0 στην αρχή
    rrmx = rmax/denominator;
    igmax=ig;
    iphmax=iph;
end
gm_max = gm(igmax);
aphn_max = aphn(iphmax);
Ap_max = Ap(igmax, iphmax);
R_max = Rfactor(igmax, iphmax);
thesi_max=thesi(igmax, iphmax);
[acc_MP, vel_MP, t_MP] = mavroeides(dt, Ap_max, 1/Tp, gm_max, aphn_max);

```

Στο τέλος αυτού του βήματος έχει προσδιοριστεί ο πρώτος παλμός της καταγραφής και έχει την μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4: Σύγκριση της χρονοϊστορίας ταχύτητας του 1ου παλμού με αυτή της αρχικής καταγραφής (λογισμικό Matlab)

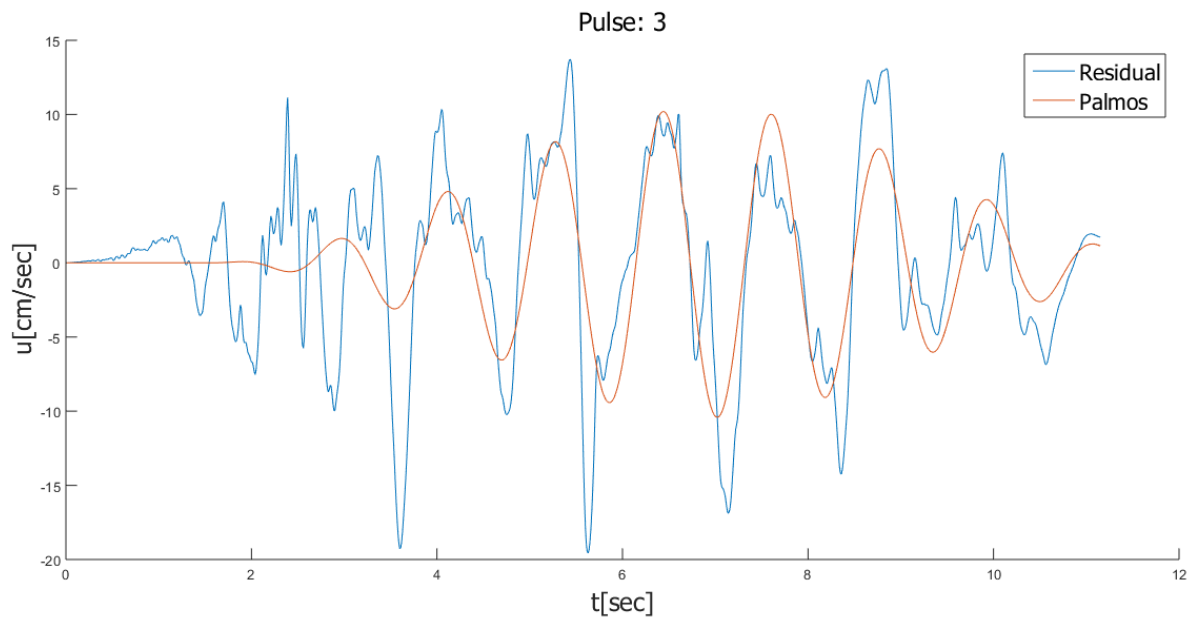
7. Υπολογίζεται η εναπομένουσα εδαφική κίνηση με αφαίρεση του παλμού (a_p) που υπολογίστηκε στο βήμα 6 από την αρχική καταγραφή (aa).

Παράθεση αντίστοιχου κώδικα:

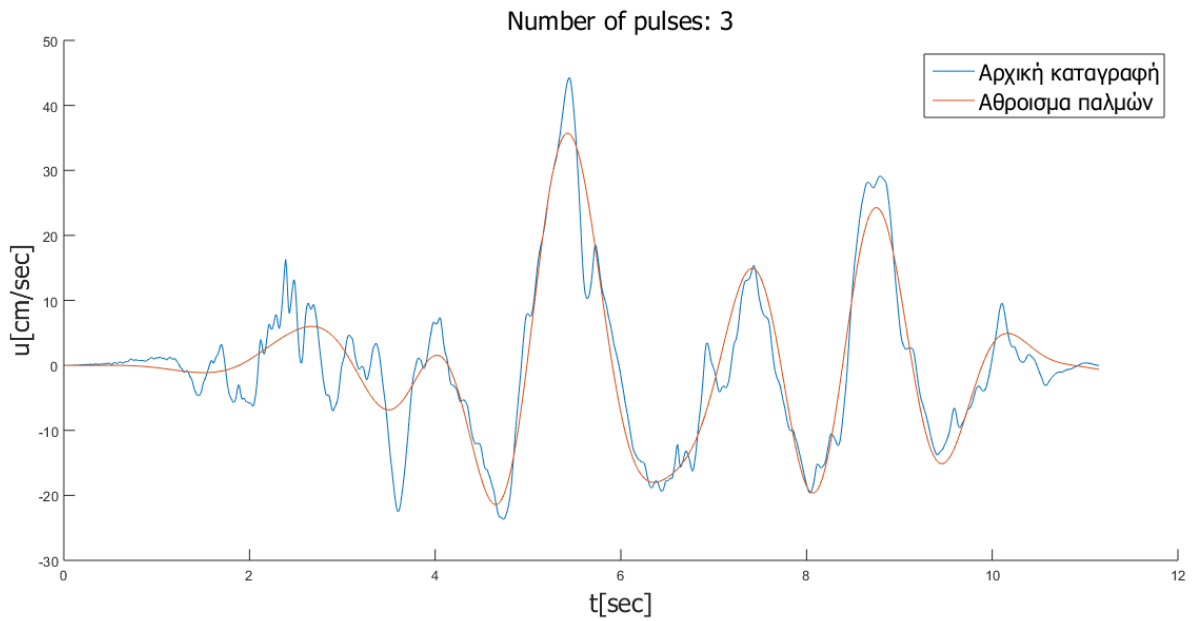
```
if ipulse > 1% subtract the previous pulse
    aa = aa- $a_p$ ;
end
```

8. Θεωρώντας την εναπομένουσα καταγραφή ως την νέα αρχική εδαφική κίνηση, επαναλαμβάνονται όλα τα βήματα (1-6) και υπολογίζεται ο δεύτερος (2) παλμός. Όλη η διαδικασία επαναλαμβάνεται για i αριθμό παλμών. Στο βήμα 6 ο δείκτης 1 στις παραμέτρους αντικαθίσταται σε κάθε επανάληψη με τον δείκτη i του εκάστοτε παλμού. Κάθε παλμός i προσεγγίζει την εκάστοτε εναπομένουσα καταγραφή, και το άθροισμα των i παλμών προσεγγίζει την αρχική καταγραφή.

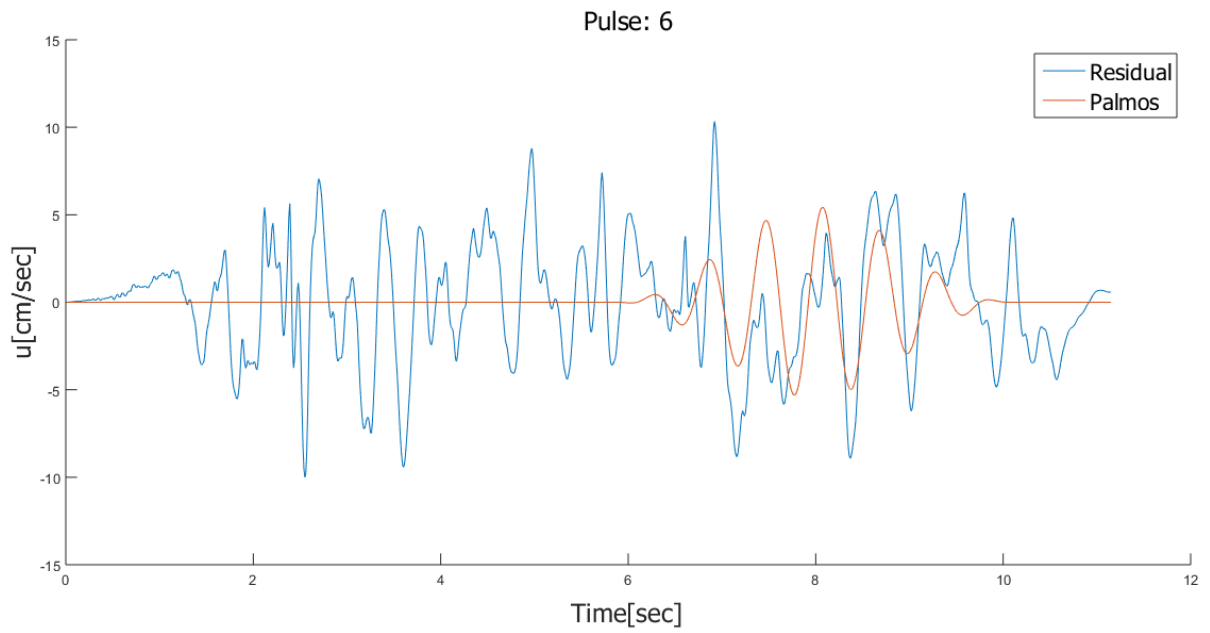
Παράδειγμα από τον κώδικα εξαγωγής παλμών που μια σεισμική καταγραφή κοντινού πεδίου προσεγγίζεται από 6 παλμούς. Παρουσίαση της εικόνας του 3ου και του 6ου παλμού (Εικόνα 3.7 και Εικόνα 3.8).



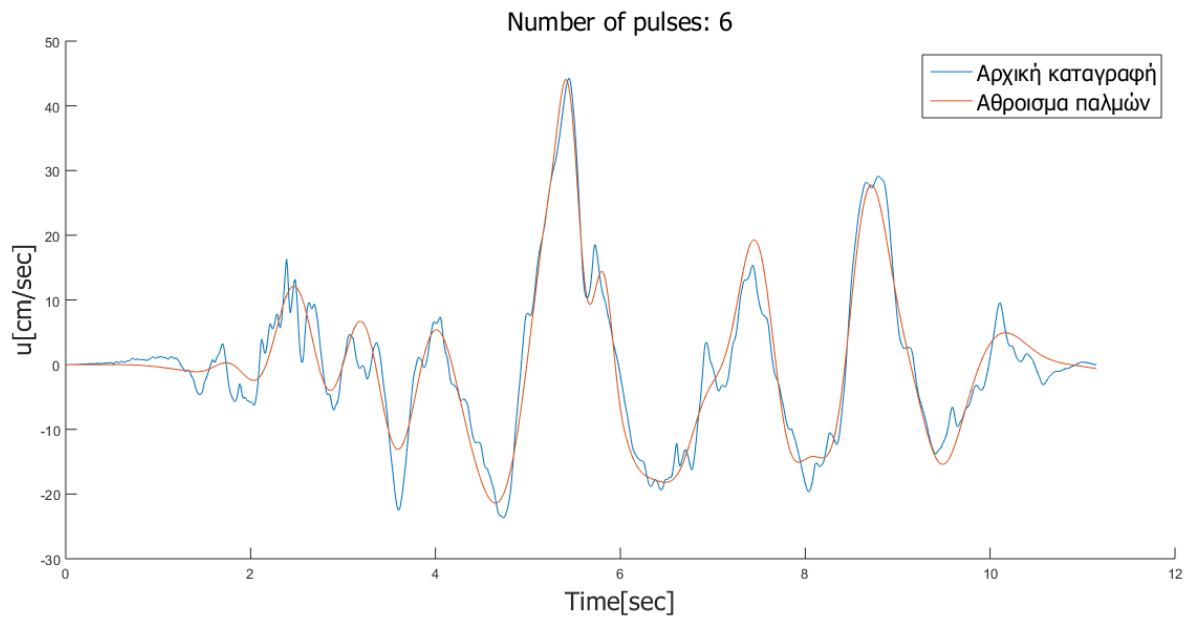
Εικόνα 3.5: Σύγκριση της χρονοϊστορίας ταχύτητας του 3ου παλμού με αυτή της εναπομένουσας (στην 3η επανάληψη) καταγραφής.



Εικόνα 3.6: Σύγκριση της χρονοϊστορίας ταχύτητας του αθροίσματος των 3 παλμών με αυτή της αρχικής καταγραφής



Εικόνα 3.7: Σύγκριση της χρονιοστορίας ταχύτητας του 6ου παλμού με αυτή της εναπομένουσας (στην 6η επανάληψη) καταγραφής



Εικόνα 3.8: Σύγκριση της χρονιοστορίας ταχύτητας του αθροίσματος των 6 παλμών με αυτή της αρχικής καταγραφής

4 ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥΣ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε ο κώδικας εξαγωγής παλμών, ο οποίος χρησιμοποιείται για την εξαγωγή n αριθμού παλμών από τις σεισμικές καταγραφές κοντινού πεδίου. Οι παλμοί αυτοί, είναι απλά και μικρά σε διάρκεια σήματα τα οποία είναι εύκολα κατανοητό ότι αν εφαρμοστούν σε ένα κτίριο θα διευκολύνουν και θα επιταχύνουν σε μεγάλο βαθμό τις αναλύσεις, σε σχέση με το σύνθετο σήμα της αρχικής καταγραφής. Τίθεται λοιπόν το ζήτημα της αντικατάστασης του αρχικού σήματος με καταγραφές που θα δημιουργούνται από τους εξαγόμενους παλμούς, οι οποίες στο εξής θα καλούνται «παλμικές προσομοιώσεις».

Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει σε ποιες περιπτώσεις και υπό ποιες προϋποθέσεις, η εφαρμογή μιας σεισμικής καταγραφής και της αντίστοιχης παλμικής της προσομοίωσης σε ένα κτίριο, επιφέρουν κοντινά αποτελέσματα.

4.1 Δημιουργία κτιρίου

4.1.1 Λογισμικό OpenSees

Το OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται με σκοπό την ανάλυση της σεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Οι βασικές λειτουργίες του OpenSees είναι η προσομοίωση (Modeling) του φορέα, η ανάλυση (Analysis) και η έκδοση αποτελεσμάτων (Output Specifications).

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η μορφή του φορέα είναι ένα μεταλλικό κτίριο μεταβλητού αριθμού ορόφων, με κοινό ύψος ορόφων, και κοινή μάζα και δυσκαμψία σε κάθε όροφο.

Παράθεση κώδικα από το OpenSees, όπου προσδιορίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του κτιρίου. Η μεταβλητή *storey* αναφέρεται στον αριθμό των ορόφων του κτιρίου.

```
for {set i 1} {$i<=$storey} {incr i} {  
  set k[expr $i] [expr 78612/2]}
```



```

for {set i 1} {$i<=$storey} {incr i} {
set fy[expr $i] [expr 450]}
for {set i 1} {$i<=$storey} {incr i} {
mass [expr 100*$i+1] [expr 50.] [expr 50.] 0}
for {set i 1} {$i<=$storey} {incr i} {
set total_mass [expr 50*$i.]
set total_weight [expr $i*50.*9.81]}

```

Με χρήση της δυναμικής, στην περίπτωση μας, ανάλυσης υπολογίζονται και εκτυπώνονται τα ζητούμενα μεγέθη, όπως είναι τα εντατικά μεγέθη και τα μεγέθη απόκρισης, ξεχωριστά για κάθε όροφο του κτιρίου (το κτίριο προσομοιώνεται από ένα σύστημα μονοβάθμιων ταλαντωτών).

Παράθεση αντίστοιχου κώδικα:

```

for {set i 1} {$i<=$storey} {incr i} {
recorder Node -file node[expr $i*100+1]_disp.out -time -node
[expr$i*100+1] -dof 1 disp}
for {set i 1} {$i<=$storey} {incr i} {
recorder Node -file elem1_[expr $i*100+1 ].out -time -node [expr $i*100+1]
-dof 1 reaction;
recorder Element -file elem2_[expr $i*100+1 ].out -ele [expr $i*100+1 ]
forces}
for {set i 1} {$i<=$storey} {incr i} {
recorder Node -file node[expr $i*100+1 ]_accel.out -time -node
[expr$i*100+1 ] -dof 1 accel}
for {set i 1} {$i<=$storey} {incr i} {
recorder Node -file node[expr $i*100+1 ]_vel.out -time -node [expr $i*100+1 ]
-dof 1 vel}
for {set i 1} {$i<=$storey} {incr i} {
recorder Node -file node[expr $i*100+1 ]_shear.out -time -node [expr
$i*100+1 ] -dof 1 reaction}

```

Με την παραπάνω διαδικασία, έχει οριστεί επακριβώς το κτίριο που θα χρησιμοποιήσουμε στην συνέχεια για την επιβολή των καταγραφών.

Το αρχείο που ορίζει το είδος της ανάλυσης, τον αριθμό των ορόφων του κτιρίου, την μορφή της καμπύλης ικανότητας, και περιλαμβάνει το αρχείο με όλα τα στοιχεία του κτιρίου και των πιθανών αναλύσεων είναι το batch.tcl

Παράθεση αρχείου «batch.tcl»:

```

set AnalysisType Dynamic; #Modal, Pushover, Dynamic
set elastic 2; #1. elastic, 2. steel01, 3.bilin
set storey 10;
source analysis/chopra_tetraorofa_metalliko_anastasia_v3.tcl

```

4.2 Υπολογισμός βασικών μεγεθών απόκρισης

Εφόσον έχει γίνει η πλήρης μορφοποίηση του κτιρίου, επιλέγονται 55 σεισμικές καταγραφές κοντινού πεδίου, για τις οποίες έχουν υπολογιστεί οι παλμικές προσομοιώσεις τους, σύμφωνα με τον κώδικα εξαγωγής παλμών. Με χρήση λοιπόν της συνάρτησης του Matlab «*opensees function*», επιβάλλονται διαδοχικά όλες οι καταγραφές (τόσο οι αρχικές όσο και οι προσομοιώσεις) στο κτίριο, και αποθηκεύονται τα μεγέθη της σχετικής στροφής, της επιτάχυνσης, και της δύναμης κάθε ορόφου για κάθε καταγραφή.

Τμήμα κώδικα της «*opensees-function*», που διαβάζει και αποθηκεύει τις μεταβλητές που δημιουργήθηκαν με την χρήση του λογισμικού *OpenSees*, μετά την επιβολή κάποιας καταγραφής:

```
infile = 'batch.tcl';
eval(['! OpenSees ' infile '>screendump'])
for i = 1:nstories
    nodeid(i) = i*100+1;
    tmp1 = load(['node' num2str(nodeid(i)) '_disp.out']);
    u(:,i) = tmp1(:,2);
    tmp2 = load(['node' num2str(nodeid(i)) '_accel.out']);
    a(:,i) = tmp2(:,2);
    tmp6 = load(['elem2_' num2str(nodeid(i)) '.out']);
    tem(:,i) = tmp6(:,1);
end
```

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις σεισμικές καταγραφές κοντινού πεδίου και για τις παλμικές τους προσομοιώσεις, και για αριθμό ορόφων στο κτίριο από 1-10. Στην παρούσα εργασία, δημιουργήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν παλμικές προσομοιώσεις για 1 και για 6 παλμούς.

Στο τέλος κάθε επανάληψης και με χρήση της συνάρτησης «*create_values*» (που δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του Matlab) εντοπίζεται και αποθηκεύεται μόνο η μέγιστη τιμή της εκάστοτε καταγραφής, για κάθε όροφο του υπό εξέταση κτιρίου. Η αποθήκευση αυτών των τιμών γίνεται σε κατάλληλους φακέλους ανάλογα με το αν αναφέρονται στην αρχική καταγραφή (tot), στην προσομοίωση με 1 παλμό (1 pulse), στην προσομοίωση με 6 παλμούς (6 pulses), αλλά και ανάλογα με τον αριθμό των ορόφων που διαθέτει το υπό εξέταση κάθε φορά κτίριο.

Παράθεση τμήματος κώδικα της συνάρτησης «*create values*»:

```
for ist = 1:nstories
    pfd(ist,irec) = max(abs(u(:,ist)-u(:,ist-1)))/3%irec η εκάστοτε καταγραφή
    pfa(ist,irec) = (max(abs(a(:,ist))))/9.81;
    pftem(ist,irec) = ( max(abs(tem(:,ist)))));
end
if strfind(re,'recs_near_tot')%otan iparxei leitourgei san yes
    mkdir(['data/values/tot/' num2str(nstories)]);
    save(['data/values/tot/' num2str(nstories) '/max_times.mat']...
    ..., 'pfa', 'pfd', 'pftem');
elseif strfind(re,'recs_near_6pulses')
    mkdir(['data/values/6pulses/' num2str(nstories)]);
    save(['data/values/6pulses/' num2str(nstories) '/max_times.mat']...
    ..., 'pfa', 'pfd', 'pftem');
```

```
elseif strfind(re,'recs_near_pulses')
mkdir(['data/values/1pulse/' num2str(nstories)]);
save(['data/values/1pulse/' num2str(nstories) '/max_times.mat']...
..., 'pfa', 'pfd', 'pftem');
end
```

όπου:

- pfa= max τιμή επιτάχυνσης
- pfd= max τιμή σχετικής στροφής
- pftem= max τιμή δύναμης

Τελικά για κάθε τύπο καταγραφής (tot, 1pulse (ή pulses), 6pulses) και για κτίρια από 1-10 ορόφους (ορίζεται μέσω της μεταβλητής nstories) έχουμε 3 πίνακες (pfa, pfd, pftem) με διαστάσεις nstories*55 (αριθμός υπό εξέταση καταγραφών).

4.3 Σύγκριση μεγεθών απόκρισης

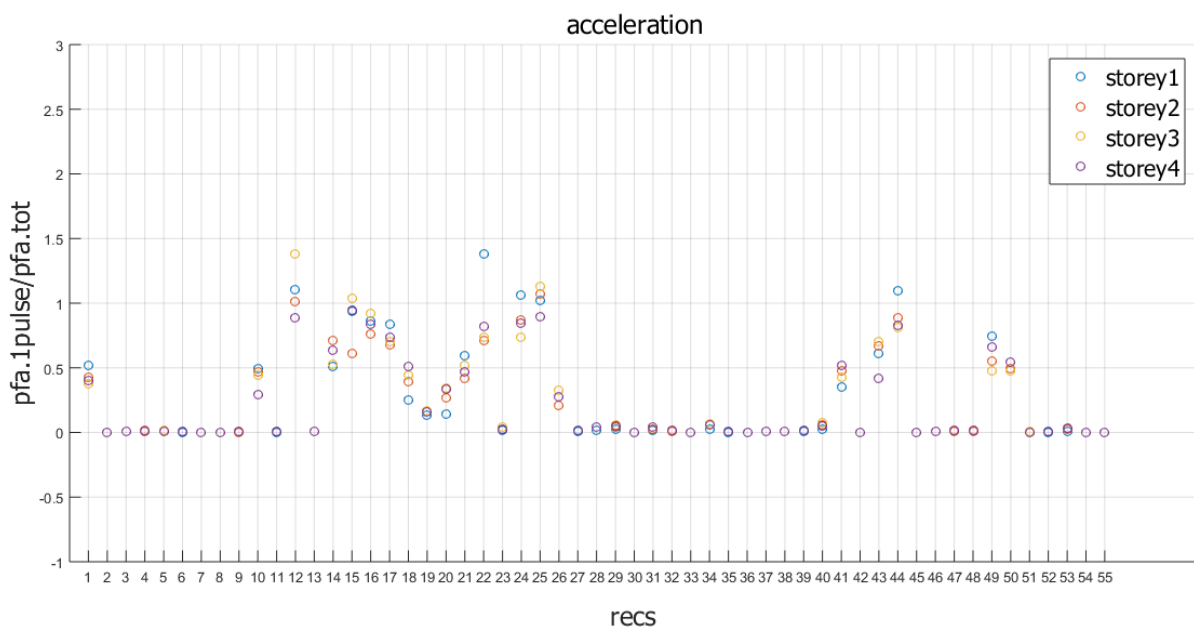
Αφού έχουν υπολογιστεί και αποθηκευτεί οι απαιτούμενες τιμές για κάθε καταγραφή, προχωράμε στην δημιουργία του λόγου k όπου:

$$k = \frac{\text{τιμή μεγέθους που αναπτύσσεται κατά την επιβολή της παλμικής προσομοίωσης}}{\text{τιμή μεγέθους που αναπτύσσεται κατά την επιβολή της αρχικής καταγραφής}} \quad (4.1)$$

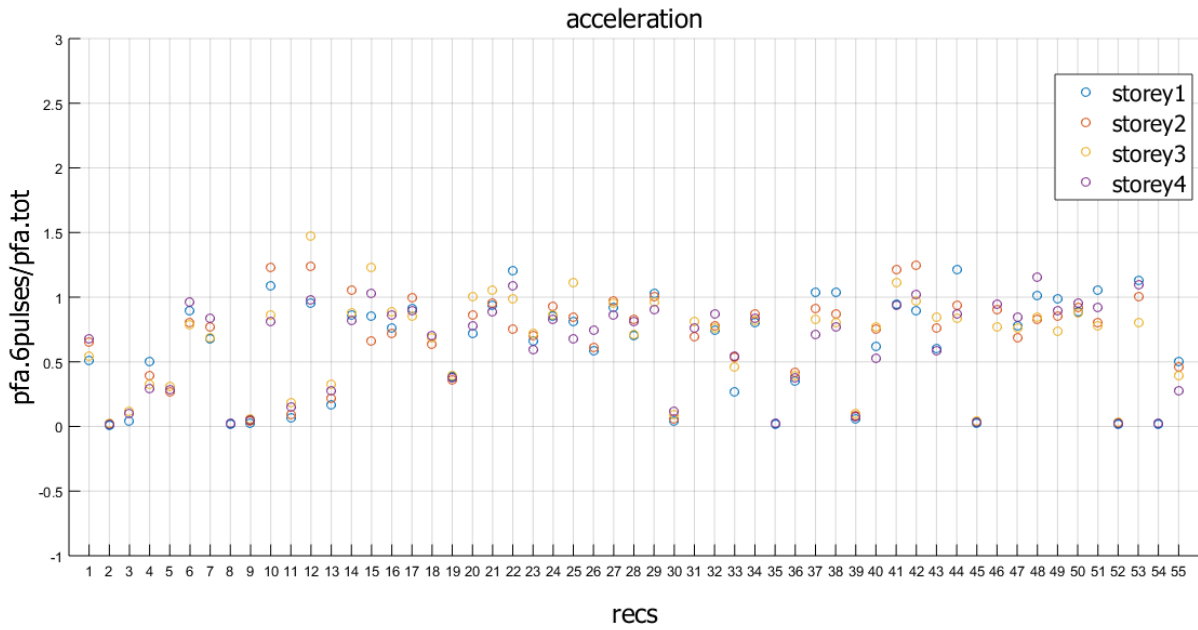
Έτσι στην παρούσα εργασία θα δημιουργηθούν οι εξής δύο λόγοι k :

1. $k = \frac{pfa_{1pulse}}{pfa_{tot}}$
2. $k = \frac{pfa_{6pulses}}{pfa_{tot}}$

Παράδειγμα: Εφαρμογή 55 σεισμικών καταγραφών, αρχικών και προσομοιώσεων από 1 και 6 παλμούς, σε κτίριο με 4 ορόφους. Παρουσίαση του μεγέθους της επιτάχυνσης κάθε ορόφου του κτιρίου. Στις εικόνες Εικόνα 4.1 και Εικόνα 4.2 παρουσιάζονται τα στοιχεία των πινάκων που δημιουργήθηκαν με την εφαρμογή του λόγου k .



Εικόνα 4.1: Λόγος επιταχύνσεων pfa_{1pulse}/pfa_{tot} που αναπτύσσεται σε κάθε όροφο του κτιρίου



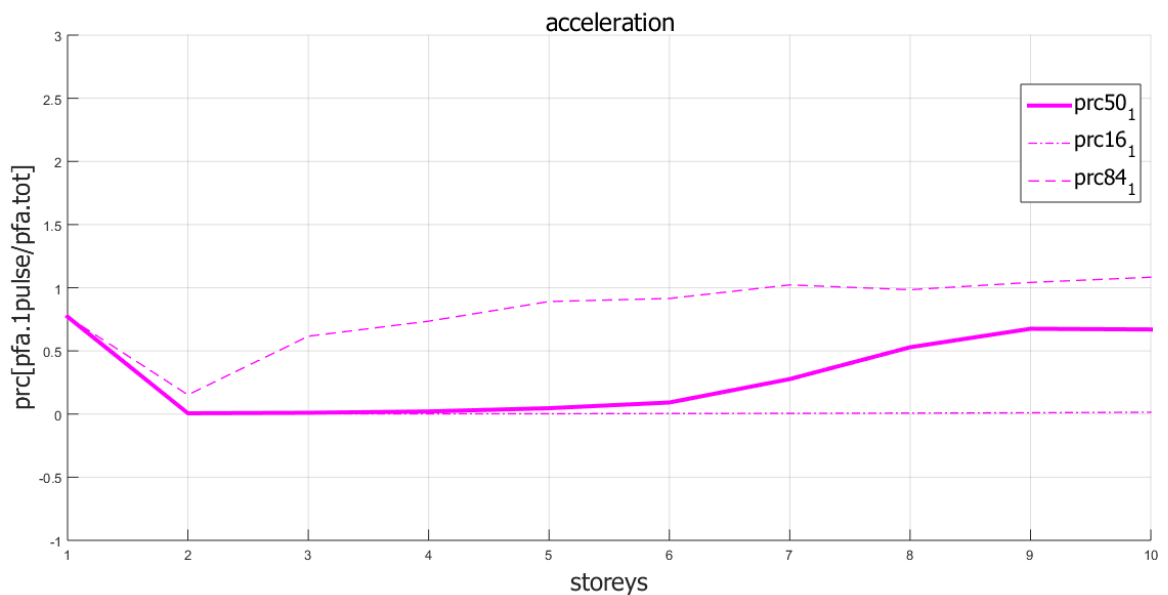
Εικόνα 4.2: Λόγος επιταχύνσεων $pfa_{6pulses}/pfa_{tot}$ σε κάθε όροφο του κτιρίου

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα είναι αρκετά ικανοποιητικά, κυρίως στο δεύτερο γράφημα που αναφέρεται στη σχέση της αρχικής καταγραφής με το προσομοίωμα που προκύπτει από το άθροισμα των 6 παλμών, όπου η τιμή των περισσότερων λόγων είναι κοντά στο 1.

Υπάρχουν συγκεκριμένοι σεισμοί, που παρουσιάζουν πρόβλημα (τιμές λόγου $\ll 1$), οι οποίοι επειδή αποτελούν εξαίρεση δεν λαμβάνονται υπ' όψιν.

Οι προαναφερθέντες πίνακες και τα αντίστοιχα γραφήματα, δημιουργούνται και για τα τρία ζητούμενα μεγέθη (pfa , pdf , $pfem$) και για αριθμό ορόφων από 1 έως 10. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, ότι ο τελικός όγκος πινάκων και γραφημάτων είναι πολύ μεγάλος, με αποτέλεσμα να καθίσταται αδύνατη η εξαγωγή των απαιτούμενων συμπερασμάτων.

4.3.1 Συγκεντρωτικό γράφημα



Εικόνα 4.3: Λόγος επιταχύνσεων pfa_{1pulse}/pfa_{tot} συναρτήσει του συνολικού αριθμού ορόφων που διαθέτει το κτίριο

Στην παραπάνω ενότητα εξετάστηκε και παρατηρήθηκε ότι για το πλήθος των σεισμών τα αποτελέσματα της συσχέτισης της αρχικής καταγραφής με την παλμική προσομοίωση, μέσω της σύγκρισης βασικών μεγεθών απόκρισης, είναι ικανοποιητικά. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη να μελετηθεί ο τρόπος που μεταβάλλεται αυτή η συσχέτιση ανάλογα με το ύψος (ή αντίστοιχα την περίοδο) του κτιρίου.

Για τον σκοπό αυτό μελετάται η δημιουργία ενός συγκεντρωτικού γραφήματος για κάθε ένα από τα 3 υπό εξέταση μεγέθη, το οποίο θα αποτυπώνει τα αποτελέσματα της σύγκρισης συναρτήσει του συνολικού ύψους του κτιρίου. Τα μεγέθη αυτά είναι η επιτάχυνση, η σχετική στροφή και η δύναμη του κτιρίου. Οι τιμές που θα παρουσιάζονται στο γράφημα θα αναφέρονται στον λόγο k που αναφέρθηκε παραπάνω. Τα βήματα για την δημιουργία του συγκεντρωτικού γραφήματος (έστω για τον λόγο 1pulse/tot) είναι τα εξής:

1. Χρησιμοποιώντας την συνάρτηση του Matlab «max», πραγματοποιείται η πρώτη “κατακόρυφη” συγκέντρωση του πίνακα. Με αυτό το βήμα, για κάθε σεισμό επιλέγεται η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης, που εμφανίζεται στο κτίριο. (μετατροπή από πίνακα nstories*55 (πλήθος σεισμικών καταγραφών) σε πίνακα 1*55).

Παράθεση αντίστοιχου κώδικα:

```
maxpfd=max(pfd_logos); %pfd_logos:times του logou  $k = \frac{pfd_{1pulse}}{pfd_{tot}}$ 
maxpfa=max(pfa_logos);
maxpfem=max(pfem_logos);
```

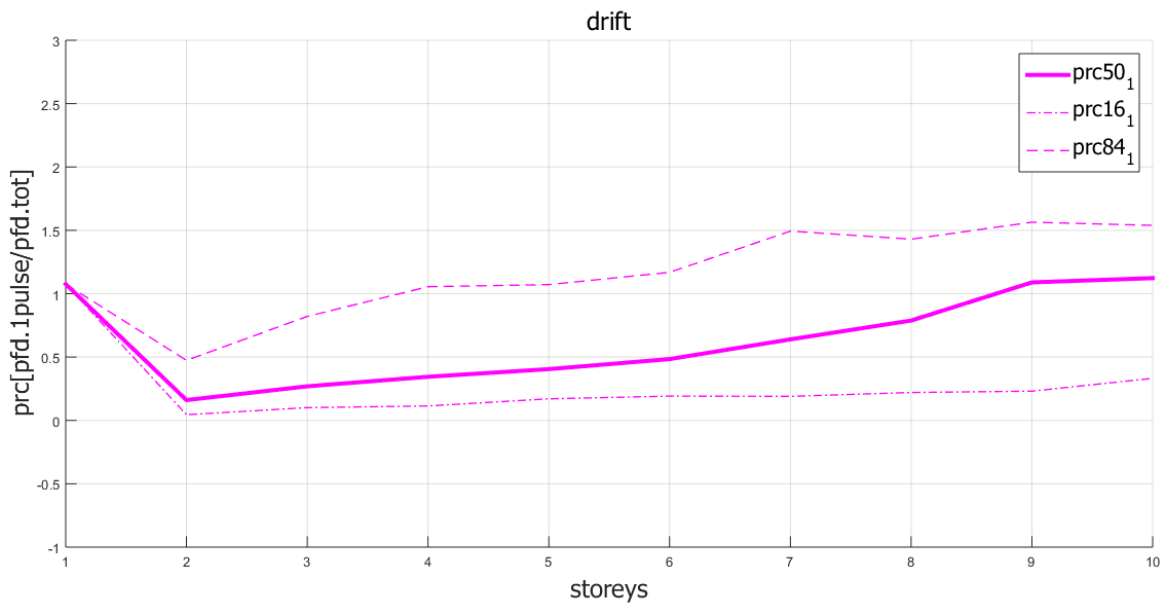
2. Η δεύτερη (“οριζόντια”) συγκέντρωση γίνεται με χρήση της συνάρτησης του Matlab «percentile» με δείκτες 16, 50, 84, η οποία εφαρμόζεται στον πίνακα διαστάσεων 1*55, και επιστρέφει 3 τιμές. Οι τιμές που επιστρέφει το percentile για δείκτες 16 και 84 αποτελούν την διασπορά του δείγματος, και για δείκτη ίσο με 50 την μέση τιμή.

Παράθεση αντίστοιχου κώδικα:

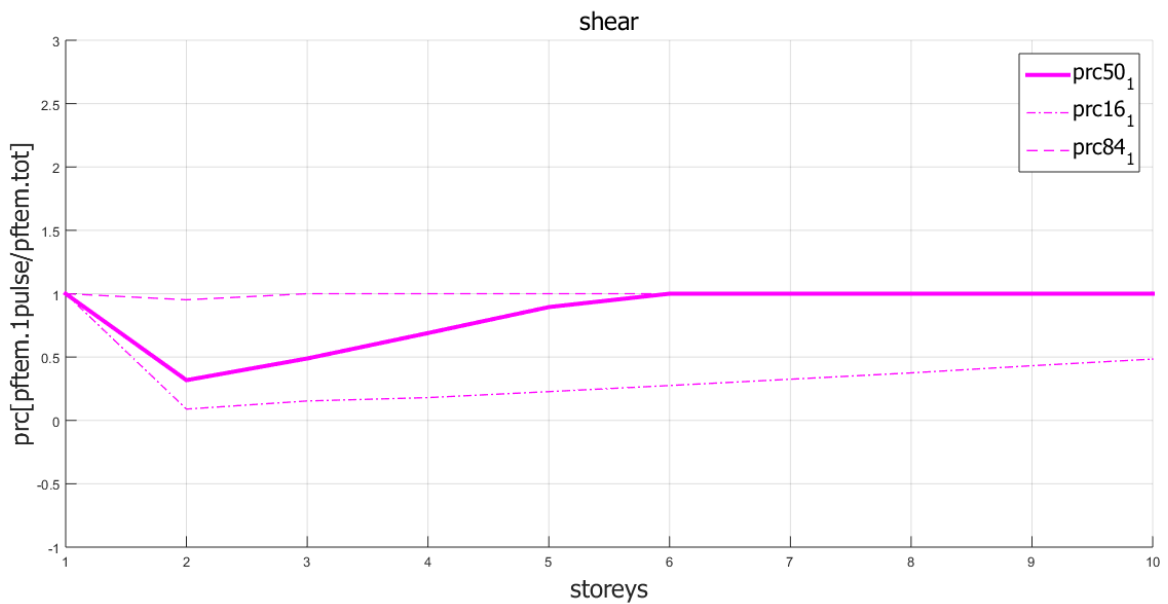
```
timh_prc=[50;16;84];
for i=1:3
    percpfd=prctile(maxpfd,timh_prc(i));
    percpfa=prctile(maxpfa,timh_prc(i));
    percpfem=prctile(maxpfem,timh_prc(i));
end
```

3. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα κτίρια (δηλαδή για κτίρια από 1-10 ορόφους) και για όλα τα μεγέθη (acc, drift, shear). Καταλήγουμε λοιπόν για κάθε μέγεθος να έχουμε 3 τιμές για κάθε διαφορετικό ,από άποψη ύψους, κτίριο. Με αυτά τα στοιχεία δημιουργούνται τα εξής διαγράμματα (Εικόνα 4.3, Εικόνα 4.4, Εικόνα 4.5), όπου:

- άξονας x = ο συνολικός αριθμός των ορόφων που διαθέτει το κτίριο (κάθε όροφος θεωρείται ότι έχει ύψος 3 m, άρα ο άξονας x αναφέρεται αντίστοιχα και στο ύψος των κτιρίων)
- άξονας $y = prc_{16,50,84}(\max(\frac{pfa_{1pulse}}{pfa_{tot}}))$ όπου pfa αντικαθίσταται με pfd και pfem, για υπολογισμό των drift και shear αντίστοιχα.

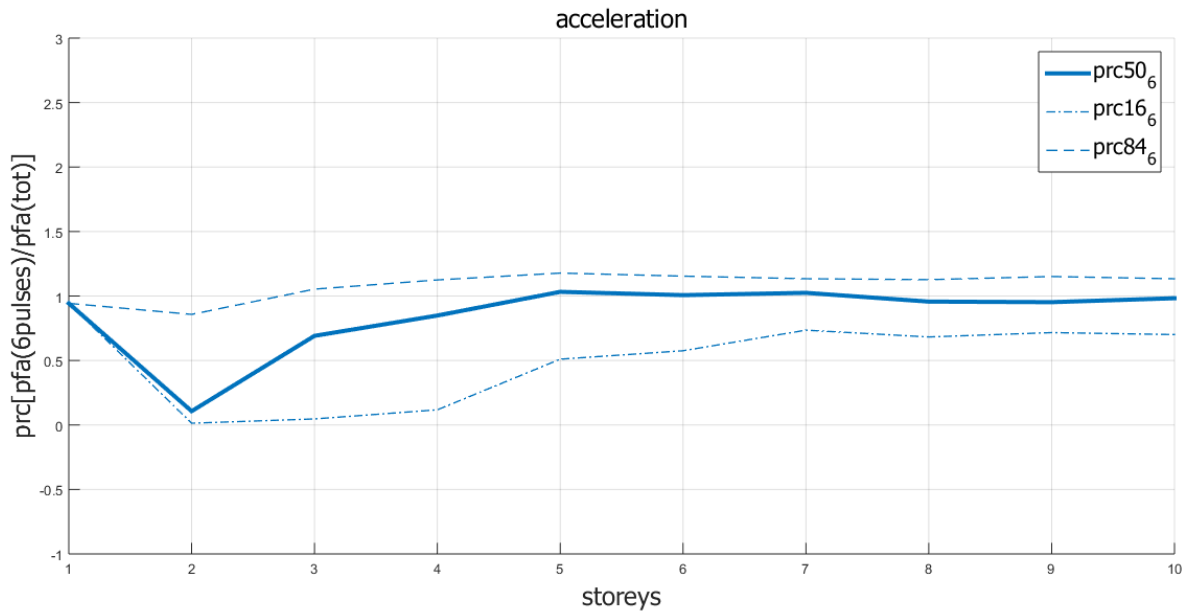


Εικόνα 4.4: Λόγος σχετικών στροφών $\text{pfd}_{1\text{pulse}}/\text{pfd}_{\text{tot}}$ συναρτήσει του συνολικού αριθμού ορόφων που διαθέτει το κτίριο



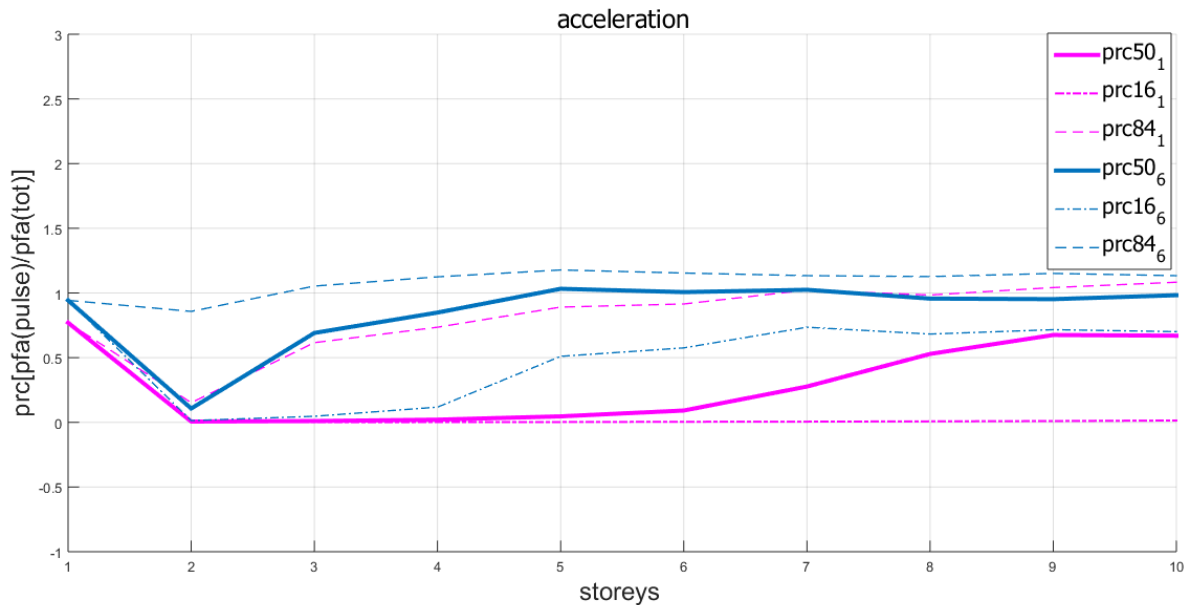
Εικόνα 4.5: Λόγος δυνάμεων $\text{pftem}_{1\text{pulse}}/\text{pftem}_{\text{tot}}$ συναρτήσει του συνολικού αριθμού ορόφων που διαθέτει το κτίριο

Τα αντίστοιχα στοιχεία και διαγράμματα υπολογίζονται και για την συσχέτιση της αρχικής καταγραφής με την παλμική προσομοίωση που προκύπτει από το άθροισμα 6 παλμών. Ενδεικτικά παρουσιάζεται το διάγραμμα του μεγέθους της επιτάχυνσης στην Εικόνα 4.6.

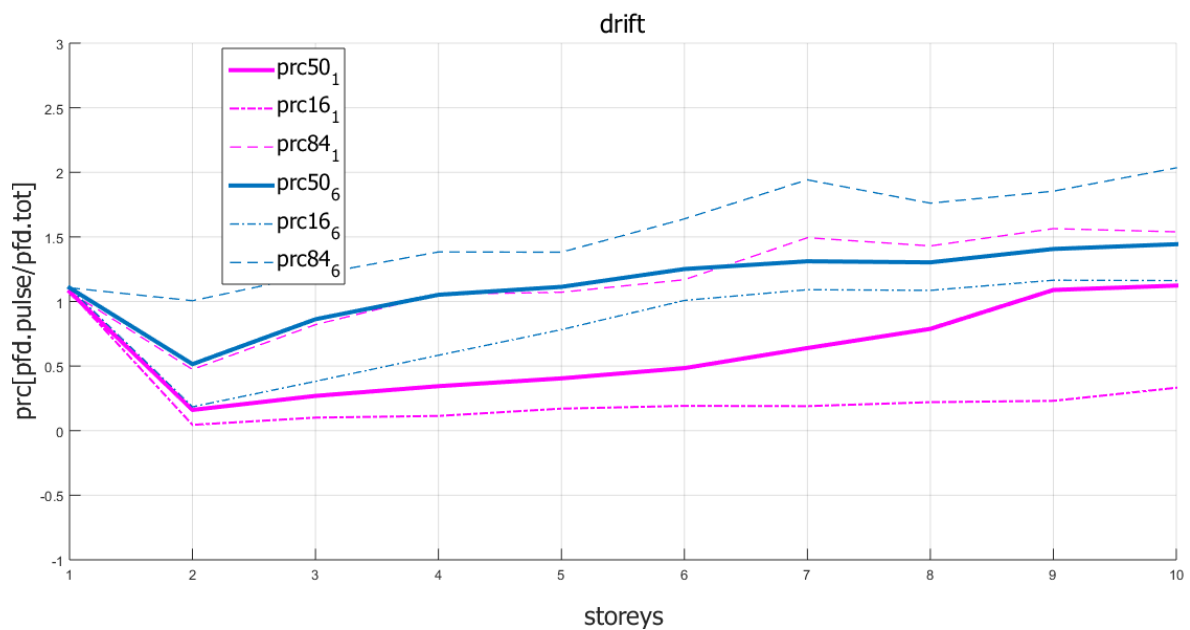


Εικόνα 4.6: Λόγος επιταχύνσεων prc_{pulses}/prc_{tot} συναρτήσει του συνολικού αριθμού ορόφων που διαθέτει το κτίριο

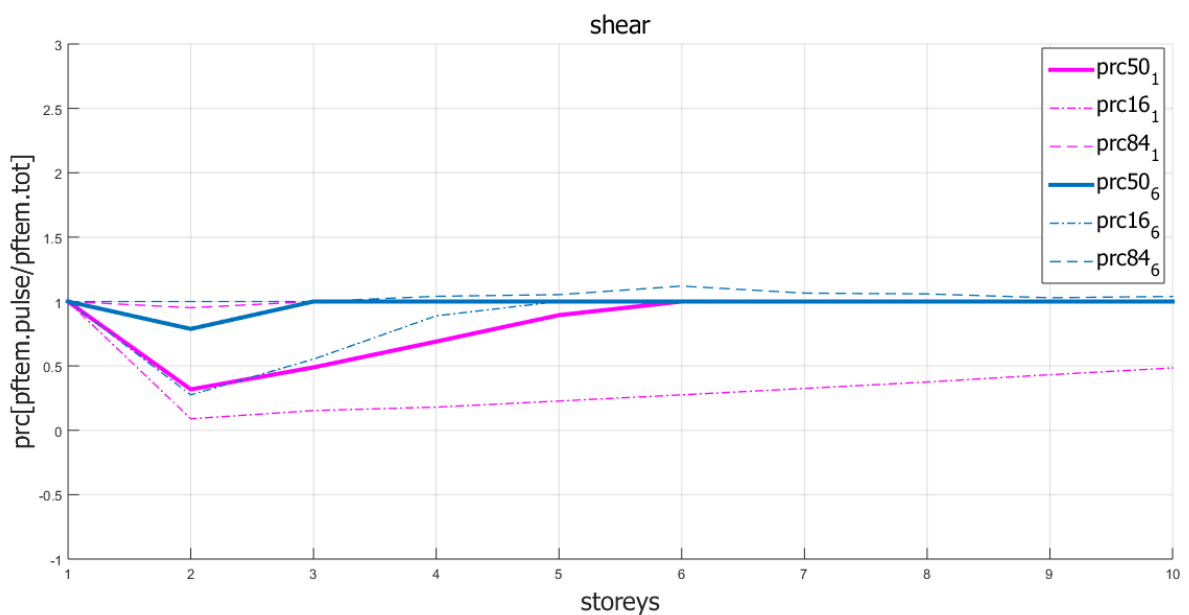
Εναλλακτικά, μπορεί να πραγματοποιηθεί άμεσα η σύγκριση και των 3 τύπων καταγραφών (αρχική, προσομοίωση 1 παλμού, προσομοίωση 6 παλμών) παρουσιάζοντας όλα τα στοιχεία των παραπάνω διαγραμμάτων που αφορούν κάποιο από τα τρία μεγέθη, σε ένα διάγραμμα (Εικόνα 4.7, Εικόνα 4.8, Εικόνα 4.9).



Εικόνα 4.7: Συγκεντρωτικό γράφημα επιταχύνσεων



Εικόνα 4.8: Συγκεντρωτικό γράφημα σχετικών στροφών



Εικόνα 4.9: Συγκεντρωτικό γράφημα δυνάμεων

4.3.2 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα, είναι ότι τα αποτελέσματα της σύγκρισης των καταγραφών βελτιώνονται καθώς αυξάνεται η περίοδος (το ύψος-οι όροφοι) του κτιρίου.

Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπ' όψιν τα αποτελέσματα και των τριών διαγραμμάτων, η αντικατάσταση της αρχικής καταγραφής με την παλμική προσομοίωση που προκύπτει από το άθροισμα των πρώτων 6 παλμών επιφέρει πολύ κοντινά αποτελέσματα, για κτίρια που διαθέτουν από 3 ή 4 ορόφους και πάνω δηλαδή ύψους μεγαλύτερο των 9 m (στο κτίριο που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη λήφθηκε ύψος ορόφου ίσο με 3 m.). Όσον αφορά την αντικατάσταση με το προσομοίωμα που προκύπτει από τον πρώτο παλμό, τα αποτελέσματα θεωρούνται αποδεκτά για κτίρια που διαθέτουν περισσότερους από 7 ορόφους.

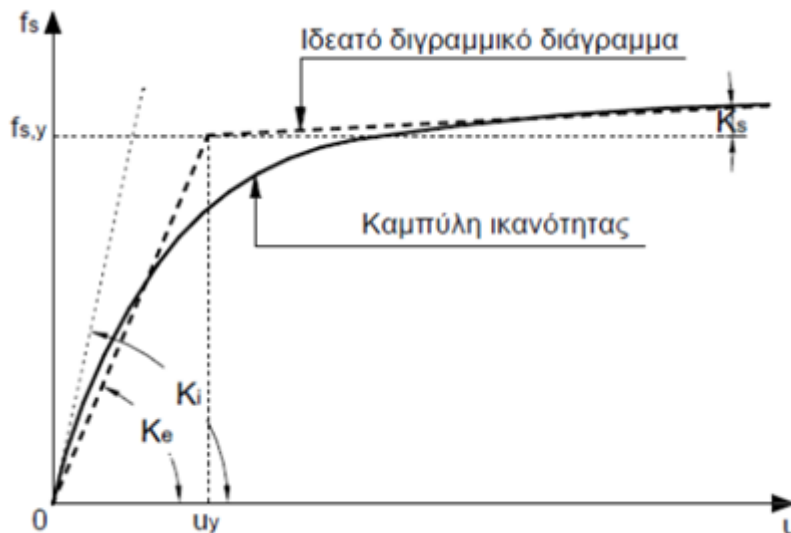
4.4 Υπολογισμός ανελαστικών φασμάτων

4.4.1 Καμπύλη ικανότητας

Στην ελαστική συμπεριφορά, έχουμε σταθερή δυσκαμψία η οποία είναι ανεξάρτητη του χρόνου t . Στην ανελαστική συμπεριφορά, η δυσκαμψία είναι συνάρτηση του χρόνου και επομένως χρειάζεται να δοθεί η σχέση της δύναμης f_s συναρτήσει της μετακίνησης u . Η καμπύλη που περιγράφει αυτή τη σχέση ονομάζεται «καμπύλη ικανότητας» και έχει τη μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 4.10

Η καμπύλη ικανότητας μπορεί να υπολογιστεί με ανάλυση pushover, δηλαδή επιβάλλοντας στατικό, σταδιακά αυξανόμενο οριζόντιο φορτίο στη μάζα της κατασκευής και υπολογίζοντας την αντίστοιχη μετακίνηση. Για τον υπολογισμό της ανελαστικής συμπεριφοράς των κατασκευών, αντί της κανονικής καμπύλης ικανότητας χρησιμοποιούμε την ισοδύναμη ιδεατή διγραμμική του απεικόνιση (διακεκομμένη γραμμή στην Εικόνα 4.10), σύμφωνα με την οποία η διαρροή της κατασκευής συμβαίνει σε συγκεκριμένη μετακίνηση u_y (μετακίνηση διαρροής) με αντίστοιχη τιμή δύναμης $f_{s,y}$. Η κατασκευή συμπεριφέρεται ως εξής:

- ελαστικά με δυσκαμψία $K_{elastic}$ για μετακίνηση $u < u_y$
- πλαστικά με μειωμένη δυσκαμψία K_s για μετακίνηση $u > u_y$



Εικόνα 4.10: Καμπύλη ικανότητας και ιδεατό διγραμμικό διάγραμμα

Το φάσμα απόκρισης μιας σεισμικής καταγραφής μας δίνει τις μέγιστες τιμές (κατα απόλυτη τιμή) της απόκρισης ενός πλήθους μονοβάθμιων ταλαντωτών με ιδιοπερίοδο T για μία συγκεκριμένη σεισμική καταγραφή και για σταθερή τιμή της απόσβεσης (ζ).

Το ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού ορίζεται διαιρώντας το αντίστοιχο ελαστικό φάσμα με το συντελεστή συμπεριφοράς q , εκτός από την περιοχή περιόδων $0 < T < T_B$ όπου θεωρείται μία γραμμική συνάρτηση για την επιτάχυνση σχεδιασμού, η οποία ξεκινάει από την τιμή $S_d = (2/3)S_{ag}$ για $T=0$.

4.4.2 Συντελεστής συμπεριφοράς q

Με τον όρο συντελεστής συμπεριφοράς q αναφερόμαστε στον λόγο:

$$q = \frac{F_e}{F_d} \quad (4.2)$$

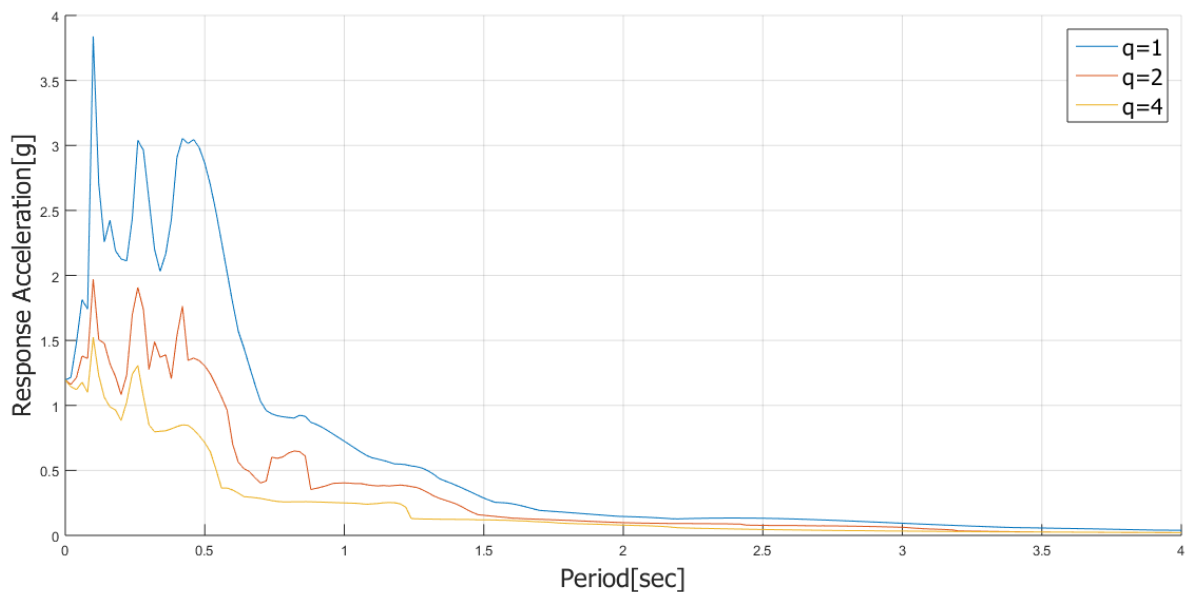
όπου:

- F_e : η μέγιστη δύναμη που θα αναπτυσσόταν στην κατασκευή για ελαστική συμπεριφορά
- F_d : η δύναμη διαρροής

4.4.3 Κατασκευή ανελαστικών φάσματα σταθερού συντελεστή συμπεριφοράς q

Ο σχεδιασμός ενός ανελαστικού φάσματος σταθερού δείκτη συμπεριφοράς περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Θεωρώντας ελαστική συμπεριφορά, υπολογίζεται η ελαστική φασματική επιτάχυνση $SA_e(T, \zeta)$ για κάθε ιδιοπερίοδο T και για την σταθερή απόσβεση ζ .
2. Υπολογίζεται η επιτάχυνση διαρροής από τη σχέση: $a_y = SA_e(T, \zeta)/q$.
3. Μέσω ανελαστικής ανάλυσης, προσδιορίζεται η μέγιστη ανελαστική μετακίνηση d_m και η μέγιστη ανελαστική επιτάχυνση a_m . Η τελευταία ισούται με a_y εάν δεν έχει ληφθεί υπόψη κράτυνση μετά τη διαρροή.
4. Οι ανελαστικές φασματικές τιμές είναι: $SA(T, \zeta) = a_m$ και $SD(T, \zeta) = d_m$



Εικόνα 4.11: Ανελαστικό φάσμα σταθερού συντελεστή συμπεριφοράς ($q=1, 2, 4$) από το λογισμικό Matlab

Ακολουθώντας λοιπόν την παραπάνω διαδικασία, συντάχθηκε η συνάρτηση `spectrumCR` στο λογισμικό `matlab` και μέσω αυτής δημιουργήθηκαν τα ανελαστικά φάσματα για τις 55 σεισμικές καταγραφές και για τις παλμικές προσομοιώσεις τους. Τα φάσματα αυτά υπολογίστηκαν για μονοβάθμιους ταλαντωτές με περίοδο $T \leq 2$ sec και τιμές συντελεστή συμπεριφοράς $q=1, 2, 4, 6$.

Παράθεση τμήματος της συνάρτησης «`spectrumCR`» όπου με τον όρο `CR` αναφερόμαστε στον σταθερό συντελεστή συμπεριφοράς q :

```
function [Se,td,Sd] = spectrumCR(aa,dt,qValues,td,damp)
% define optional arguments
if ~exist('damp','var')
    damp = 0.05;
end
if ~exist('td','var')
    td = linspace(0.01,2,100);
end
hardening = 0.;
npts=length(aa);
```

```

q_factor = qValues;
for j=1:length(td)
    mass = 1.;
    omega = 2*pi/td(j);
    k = mass*omega*omega;
    Sael = sdfL(td(j),aa,damp,dt);
    fy = Sael/q_factor;
    uy = fy/k;
    [umax,vmax,amaxRel,amaxTot] = sdfNL(td(j),damp,dt,hardening,fy,aa,npts);
    Se(j) = amaxTot;
    Sd(j) = umax;
end
end

```

όπου:

- aa: η καταγραφή
- dt: βήμα καταγραφής
- td: διάνυσμα που περιέχει τις περιόδους των μονοβάθμιων ταλαντωτών
- damp: τιμή ιξώδους απόσβεσης
- qValues: διάνυσμα που περιέχει τις τιμές του q για τις οποίες θα υπολογιστούν τα ανελαστικά φάσματα
- Sael: τιμή ελαστικού φάσματος
- Se, Sd: τιμές ανελαστικού φάσματος
- sdfL: συνάρτηση γραμμικής επίλυσης εξίσωσης κίνησης μονοβάθμιων ταλαντωτών με την μέθοδο Newmark
- sdfNL: συνάρτηση μη γραμμικής επίλυσης εξίσωσης κίνησης μονοβάθμιων ταλαντωτών με την μέθοδο Newmark

Ο κώδικας της συνάρτησης «sdfNL» είναι:

```

omega = 2*pi/Tn;
mass = 1.;
damp = 2*xi*mass*omega;
kel = omega*omega/mass;
ff = sfactor*ff;
alpha = 4*mass/dt+2*damp;
beta = 2*mass;
k0 = Kel;
k(1) = Kel;
p(1) = 0; v(1)=0; u(1)=0;
a(1) = (p(1)-damp*v(1)-k(1)*u(1))/mass;
dphatP = 0;
fs(1) = 0;
alpha0 = 0;
k(2) = k(1);
amax = 0;
for t = 2:nsteps
    dp = ff(t)-ff(t-1);
    dphat = dp+alpha*v(t-1)+beta*a(t-1);
    if dphat*dphatP < 0

```

```

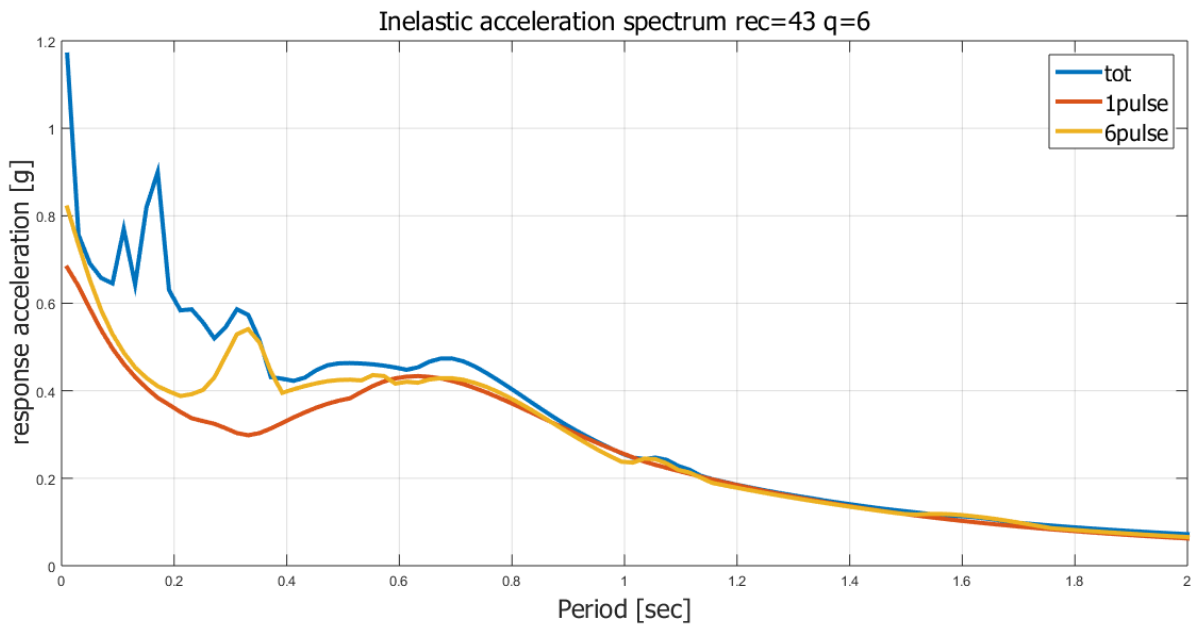
if k(t)==hardening*k(t)
    k(t) = k0;
elseif k(t)==k0;
    k(t) = hardening*k(t);
end;
end
keff = k(t)+2*damp/dt+4*mass/dt/dt;
uTemp = 0;
fsITp = fs(t-1);
uP = u(t-1);
uITtot = 0;
for iter = 1:niter
    du = dphat/keff;
    uITtot = uITtot+du;% iterative displacement
    uTemp = uP+uITtot;% total displacement
    [fsIT,k(t+1)] = ForceDelta(fy,k0,hardening,uTemp-du,fsITp,du);
    df = fsIT-fsITp+alpha*du/dt;
    dr = dphat-df;
    err = dr;
    if err < 0.000001
        break;
    end;
    dphat = dr;
    fsITp = fsIT;
end;
fs(t) = fsIT;
u(t) = uTemp; %u(t)=u(t-1)+du
dv = 2*(u(t)-u(t-1))/dt-2*v(t-1);
v(t) = v(t-1)+dv;
a(t) = (1/mass)*(ff(t)-damp*v(t)-fs(t));
dphatP = dphat;
end;
umax = max(abs(u));
vmax = max(abs(v));
amaxRel = max(abs(a));% max relative acceleration
fsmax = max(abs(fs));
[i1,i2] = size(ff);
if i1 > i2
    ff = ff';
end;
l1 = min(length(a),length(ff));
amaxTot = max(abs(a(1:l1)-ff(1:l1)));% max relative acceleration
aTot = (a(1:l1)-ff(1:l1))';

```

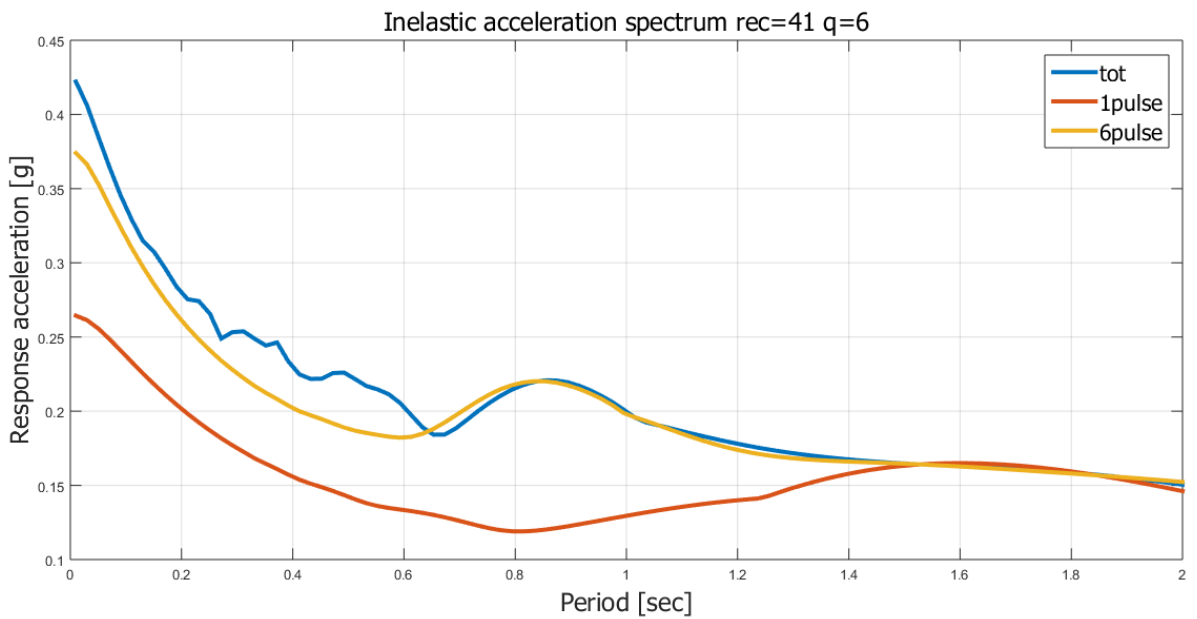
4.5 Σύγκριση ανελαστικών φασμάτων

Σκοπός της δημιουργίας αυτών των φασμάτων είναι και πάλι η μελέτη της δυνατότητας αντικατάστασης της αρχικής καταγραφής από την παλμική της προσομοίωση. Για να μπορέσουν λοιπόν, να συγκριθούν τα φάσματα που προκύπτουν, και να εξαχθούν τα αντίστοιχα συμπεράσματα, παρουσιάζονται αυτά που αναφέρονται στον ίδιο σεισμό σε ένα κοινό διάγραμμα.

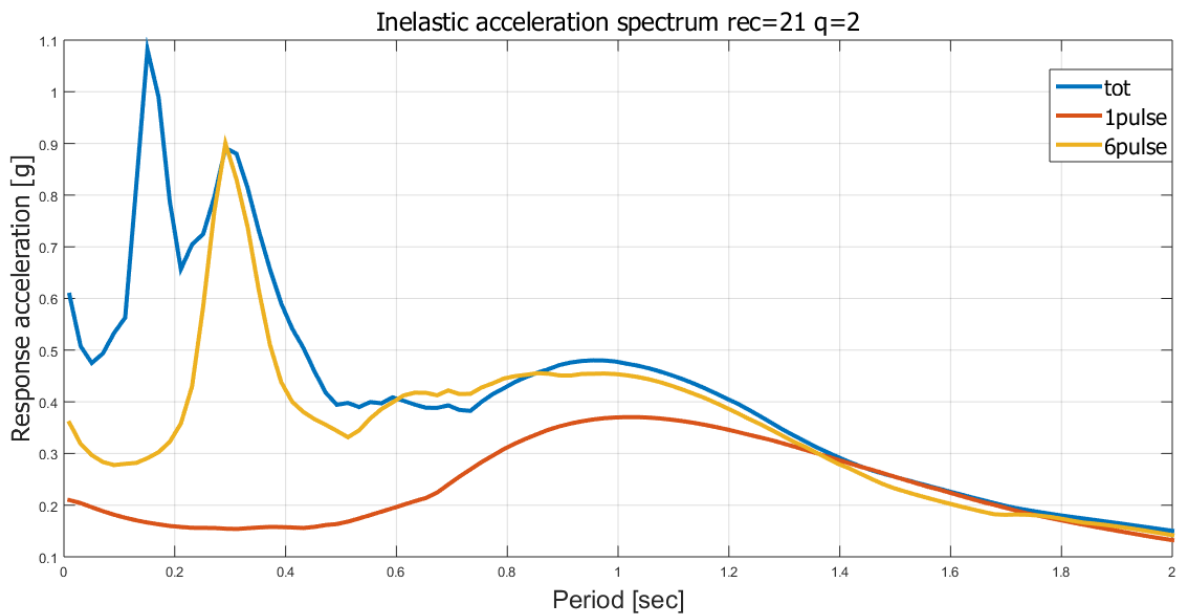
Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα ανελαστικά φάσματα κάποιων από τους σεισμούς:



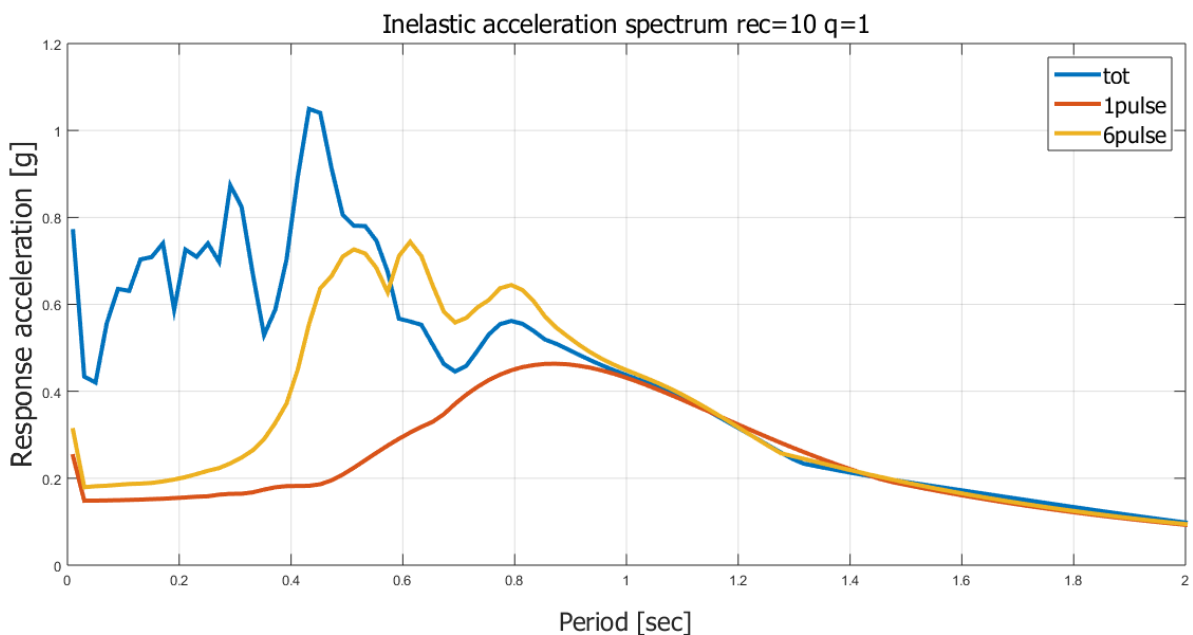
Εικόνα 4.12: Ανελαστικά φάσματα για tot, 1pulse, 6pulses της σεισμικής καταγραφής 43 με $q=6$



Εικόνα 4.13: Ανελαστικά φάσματα για tot, 1pulse, 6pulses της σεισμικής καταγραφής 41 με $q=6$



Εικόνα 4.14: Ανελαστικά φάσματα για tot, 1pulse, 6pulses της σεισμικής καταγραφής 21 με $q=2$

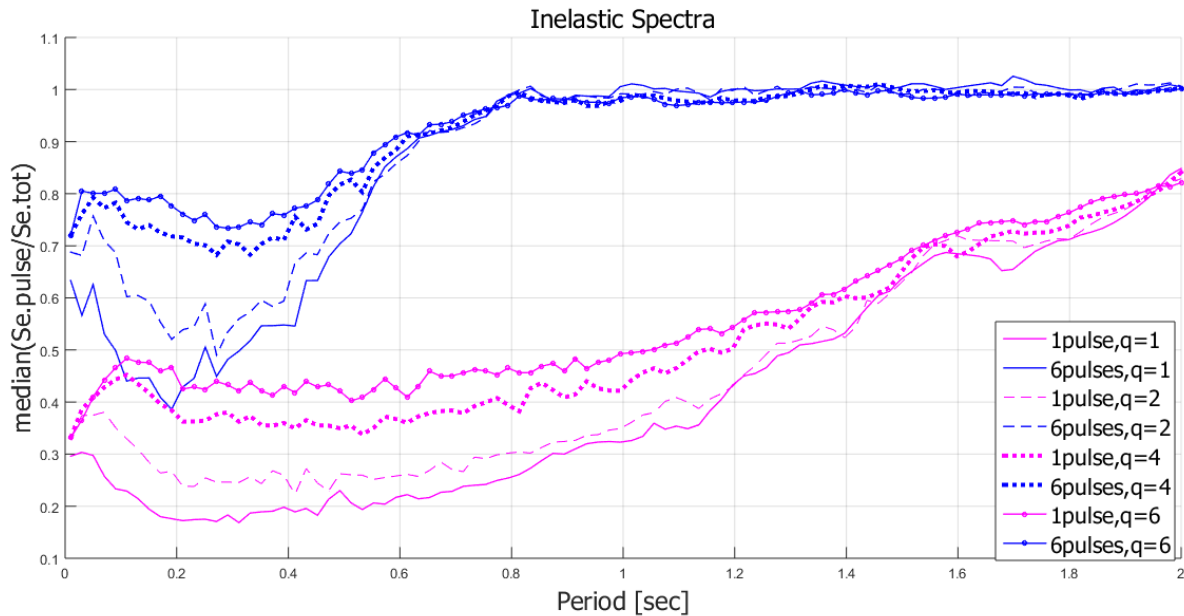


Εικόνα 4.15: Ανελαστικά φάσματα για tot, 1pulse, 6pulses της σεισμικής καταγραφής 10 με $q=1$

4.5.1 Συγκεντρωτικό γράφημα

Προκύπτει και πάλι το πρόβλημα του μεγάλου όγκου διαγραμμάτων, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η διαδικασία της σύγκρισης των αποτελεσμάτων και η εξαγωγή των απαιτούμενων συμπερασμάτων.

Μελετάται και πάλι η δημιουργία ενός συγκεντρωτικού γραφήματος, που θα παρουσιάζει συνοπτικά την συσχέτιση των ανελαστικών φασμάτων (1pulse/tot και 6pulses/tot) συναρτήσει της περιόδου μονοβάθμιων ταλαντωτών. Για την δημιουργία αυτού του γραφήματος, γίνεται χρήση της συνάρτησης percentile (prc_{50}).



Εικόνα 4.16: Συγκεντρωτικό γράφημα ανελαστικών φασμάτων

Μέρος της διαδικασίας υπολογισμού των ανελαστικών φασμάτων των καταγραφών, αποτελεί η αποθήκευση των στοιχείων τους σε πίνακες. Η οργάνωση των στοιχείων γίνεται με τον εξής τρόπο:

1. Διαχωρισμός των πινάκων ανάλογα με το είδος της καταγραφής (tot, 1pulse, 6pulses), αλλά και τον συντελεστή συμπεριφοράς q. Κάθε πίνακας έχει τις διαστάσεις 55 x 100, όπου ο αριθμός 55 αναφέρεται στις καταγραφές και το 100 στο πλήθος των ιδιοπεριόδων των ταλαντωτών για τους οποίους υπολογίζονται τα φάσματα.
2. Διάρθρωση των πινάκων σύμφωνα με το λόγο $k = \frac{\text{στοιχεία παλμικής προσομοίωσης (1 ή 6pulses)}}{\text{στοιχεία αρχικής καταγραφής (tot)}}$
3. Διαχωρισμός πλέον των πινάκων σύμφωνα με τα στοιχεία του λόγου k(1pulse/tot ή 6pulses/tot) και την τιμή του συντελεστή q(1, 2, 4, 6).
4. Χρήση της συνάρτησης percentile (prc50), με αποτέλεσμα την μετατροπή από πίνακα 55 x 100 σε μονοδιάστατο 1 x 100. Άρα για κάθε διαφορετικό συντελεστή συμπεριφοράς q και λόγο k έχουμε έναν μονοδιάστατο πίνακα. Σε αυτό το βήμα υπολογίζεται η μέση τιμή του λόγου k των 55 σεισμικών καταγραφών.

Παράθεση κώδικα δημιουργίας και αποθήκευσης του λόγου k (στην συγκεκριμένη περίπτωση για $k = \frac{Se_{1pulse}}{Se_{tot}}$) και του τελικού πίνακα με την χρήση της συνάρτησης percentile.

```
qValues=[1,2,4,6];
for iq=qValues
    q_mode=['q=' num2str(iq)];
    Se_logos=Se_pulse./Se_tot;
    if ~exist(['matlabScripts/spectra_data/percentages/plain/'q_mode '/'...
...num_pulse ])
        mkdir(['matlabScripts/spectra_data/percentages/plain/'q_mode '/'...
...num_pulse ])
    end
    save(['matlabScripts/spectra_data/percentages/plain/'q_mode '/'...
...num_pulse '/percentage.mat'],'Se_logos')
```

```

end
timh_prc=[50];
for iq=1:length(qValues)
    q_mode=['q=' num2str(qValues(iq))];
    perc_Se(iq,:)=prctile(Se_logos,timh_prc);
end
if ~exist(['matlabScripts/spectra_data/percentages/percentile/'...
...num_pulse ])
    mkdir(['matlabScripts/spectra_data/percentages/percentile/'...
...num_pulse ])
end
save(['matlabScripts/spectra_data/percentages/percentile/'...
...num_pulse '/prc_times' num2str(timh_prc(i)) '.mat'],'perc_Se')

```

όπου η μεταβλητή num_pulse ορίζεται στην είσοδο και παίρνει τις τιμές 1pulse ή 6pulses, ανάλογο με τον λόγο k στον οποίο αναφέρεται.

5. Γραφική απεικόνιση των τελικών αποτελεσμάτων, η οποία έχει την εξής μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 4.16.

4.5.2 Συμπεράσματα

Βάσει των ανελαστικών φασμάτων της κάθε σεισμικής καταγραφής το αρχικό συμπέρασμα είναι ότι η προσομοίωση με το άθροισμα των 6 παλμών προσεγγίζει καλύτερα το φάσμα της αρχικής καταγραφής.

Παρατηρώντας το τελικό συγκεντρωτικό γράφημα των ανελαστικών φασμάτων, προκύπτει ότι και για τις δύο είδη προσομοιώσεων τα αποτελέσματα βελτιώνονται με την αύξηση της περιόδου των μονοβάθμιων ταλαντωτών καθώς και με την αύξηση του συντελεστή συμπεριφοράς α .

Όσον αφορά την προσομοίωση με 6 παλμούς, για περιόδους μεγαλύτερες του $T=0.8$ sec, η μέση τιμή του λόγου k των ανελαστικών φασμάτων είναι ίση με 1. Αυτό σημαίνει ότι, για αυτές τις τιμές περιόδων, η αρχική καταγραφή και η προσομοίωση με 6 παλμούς δημιουργούν πολύ κοντινές μορφές ανελαστικών φασμάτων.

Η προσομοίωση με 1 παλμό, ξεκινάει να έχει αποδεκτά αποτελέσματα για αρκετά μεγαλύτερες τιμές περιόδων.

5 ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ήταν η μελέτη του αν και υπό ποιές προϋποθέσεις, η εφαρμογή μιας σεισμικής καταγραφής και της αντίστοιχης παλμικής της προσομοίωσης σε ένα κτίριο, επιφέρουν κοντινά αποτελέσματα. Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν προσομοιώσεις με χρήση του 1ου παλμού αλλά και αθροίζοντας τους πρώτους 6 παλμούς κάθε μιας από τις 55 επιλεγμένες σεισμικές καταγραφές. Για τα 3 αυτά είδη καταγραφών υπολογίστηκαν τα ζητούμενα κάθε φορά μεγέθη, τα αποτελέσματα των οποίων μετά τις απαραίτητες συγκρίσεις παρουσιάστηκαν σε διαγράμματα.

Ξεκινώντας ήδη από το κεφάλαιο 2 στο οποίο περιγράφεται ο κώδικας εξαγωγής παλμών, παρατηρώντας τις εικόνες όπου παρουσιάζονται η χρονοϊστορία της ταχύτητας του 1ου παλμού και του αθροίσματος των πρώτων 6 παλμών συγκριτικά με την χρονοϊστορία της αρχικής καταγραφής, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι 6 παλμοί προσεγγίζουν καλύτερη την εικόνα της αρχικής καταγραφής απ' ότι ο 1. Επίσης παρατηρώντας την εξέλιξη της εικόνας από τον 1 στους 6 παλμούς, συμπεραίνεται ότι όσοι περισσότεροι παλμοί χρησιμοποιούνται τόσο καλύτερα προσεγγίζεται η αρχική καταγραφή, αλλά και τόσο πιο σύνθετο και άρα ασύμφορο τελικά γίνεται το σήμα. Άρα οι έξι παλμοί, και ίσως και λίγοι περισσότεροι, αποτελούν έναν καλό συνδυασμό απλοποίησης και ταυτόχρονα καλής προσέγγισης του αρχικού σήματος.

Τα επόμενα συμπεράσματα προκύπτουν παρατηρώντας τα διαγράμματα που απεικονίζουν τις συγκρίσεις των τριών ειδών καταγραφών σχετικά με τα μεγέθη απόκρισης που αναπτύσσονται στο κτίριο αλλά και τα ανελαστικά τους φάσματα. Και στις δύο περιπτώσεις τα κοντινότερα αποτελέσματα προκύπτουν για την αντικατάσταση της αρχικής καταγραφής με την προσομοίωση με 6 παλμούς. Επίσης παρατηρείται ότι και για τα δύο είδη αντικατάστασης (είτε με 1pulse είτε με 6pulses) τα αποτελέσματα βελτιώνονται αισθητά καθώς αυξάνεται το ύψος των κτιρίων στα οποία επιβάλλονται οι καταγραφές. Άρα, μια πρώτη εκτίμηση βάσει όλων των προαναφερθέντων είναι ότι η αντικατάσταση της αρχικής καταγραφής με την παλμική της προσομοίωση είναι εφικτή

Ωστόσο, είναι απαραίτητη η πρόταση για περαιτέρω έρευνα ώστε να πραγματοποιηθούν πολλές ακόμα δοκιμές χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο πλήθος σεισμών, έτσι ώστε να μεγαλώσει κατά πολύ το δείγμα της έρευνας, αλλά και πιο σύνθετα κτίρια.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Β.Κ Παπαζάχος, Γ.Φ.Καρακαΐσης , Π.Μ.Χατζηδημητρίου, «Εισαγωγή στη Σεισμολογία», Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, 2005.
2. Hu Guorui, Lu Tao, «Review on Baseline Correction of Strong-Motion Accelerogram», *International Journal of Science, Technology and Society*, Vol. 3(6), pp. 309-314, 2015
3. Μιχάλης Φραγκιαδάκης, «Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας 1», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Διαλέξεις 1-11, Αθήνα, 2017.
4. Γιάννης Ν. Ψυχάρης, «Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, Τεύχος 1, Αθήνα, 2016.
5. Julian Bommer, «Engineering Seismology», Lecture Notes, Imperial College.
6. George P. Mavroeidis and Apostolos S. Papageorgiou, «A Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions», *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No. 3, pp. 1099–1131, 2003.
7. Πέτρος-Θεόδωρος Μιμόγλου, «Διερεύνηση της συμπεριφοράς και προτάσεις σχεδιασμού κατασκευών σε σεισμούς κοντινού πεδίου», Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα, 2019.
8. Mimoglou P., Psycharis I, Taflampas I., «Explicit determination of the pulse inherent», *The Journal of International Association for Earthquake Engineering, Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 43, pp.2261-2281, 2014.
9. Γεωργάκης Παναγιώτης, «Δημιουργία λογισμικού επεξεργασίας σεισμικών καταγραφών και επίλυσης θεμελιωδών προβλημάτων της αντισεισμικής μηχανικής», Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, Αθήνα, 2019.
10. Χόρτη Γεωργία, Ζέρντης Μπλέριμ, «Παλμοί κατευθυντικότητας σε σεισμούς μεσαίου μεγέθους για καταγραφές του ελλαδικού χώρου και παρακείμενων περιοχών και η επιρροή τους στην ανελαστική συμπεριφορά.», Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, Αθήνα, 2016.

