ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας

Μεταπτυχιακή εργασία

Δρώσα διάρκεια παλμικών καταγραφών

Efficient duration of pulse-like records

ΙΩΑΝΝΑ Α. ΜΑΚΡΗ

Επιβλέπων Καθηγητής: Μ. Φραγκιαδάκης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021

Αφιερωμένη στην οικογένειά μου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας και επομένως των μεταπτυχιακών μου σπουδών, θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μιχαήλ Φραγκιαδάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή του ΕΜΠ, για την άριστη συνεργασία και βοήθεια μέχρι το πέρας της εργασίας.

Επιπλέον, ευχαριστώ πολύ τον κ. Ιωάννη Ταφλαμπά για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης και για την εμπιστοσύνη, τη συνεχή υποστήριξη και καθοδήγηση που μου παρείχε σε κάθε στάδιο της εργασίας. Σημαντικό ρόλο στην εκπόνηση της, κατείχε η κ. Βίκη Δημακοπούλου, Υποψήφια Διδάκτωρ Ε.Μ.Π. Μέσω της συνεχής της συμπαράστασης και βοήθειας, ολοκληρώθηκε η εργασία και επιλύθηκαν τυχόν προβλήματα που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια αυτής.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ τους ανθρώπους του φιλικού και οικογενειακού μου περιβάλλοντος, για τη συνεχή συμπαράσταση και πίστη που μου δείχνουν όλα τα χρόνια μέχρι και σήμερα.

Ευχαριστώ!
Αθήνα, Οκτώβριος 2021.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την αξιολόγηση της σεισμικής απόκρισης των κτηρίων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των περικομμένων παλμικών εδαφικών καταγραφών κοντινού πεδίου. Αξίζει να σημειωθεί πως οι καταγραφές κοντινού πεδίου είναι ιδιαίτερης σημασίας για την σεισμική απόκριση των κτηρίων, καθώς σε μερικές περιπτώσεις η επίδρασή τους στις κατασκευές μπορεί να θεωρηθεί και καταστρεπτική. Διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, α) τις παλμικές καταγραφές (pulse-like records), οι οποίες εξετάζονται στην εργασία λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που τις διακατέχουν, και β) τις μη παλμικές καταγραφές (non-pulse –like records). Έπειτα από σειρά ερευνών, αποδεικνύεται ότι ένα παλμικό κύμα έχει τη δυνατότητα βασιζόμενο στην κυρίαρχη- θεμελιώδη εδαφική κίνηση να περιοριστεί- περικοπεί χρονικά (truncated pulse-like ground motion) και να αποδώσει, με την κατάλληλη χρονική προσαρμογή, αποτελέσματα πολύ κοντά στην πραγματικότητα σε λιγότερο χρόνο και με μικρότερο αριθμό αναλύσεων. Ο χρονικά περιορισμένος παλμός αντικαθιστά τις εγγραφές των παλμών κοντινού πεδίου. Ουσιαστικά, υφίσταται η δυνατότητα αντικατάστασης της αρχικής κίνησης του εδάφους, πράγμα που επιταχύνει τη διαδικασία της μελέτης για τη σεισμική απόκριση των κατασκευών. Το περικομμένο σήμα που λαμβάνεται αποτελεί μέρος του επιταχυνσιογραφήματος, του οποίου η διάρκεια συμπίπτει με τη διάρκεια του κυρίαρχου παλμού. Η προτεινόμενη προσέγγιση κατέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα όχι μόνο για συστήματα ενός βαθμού ελευθερίας (SDOF), αλλά και για συστήματα πολλαπλών βαθμών ελευθερίας, κάτι που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία μέσω προσομοίωσης ενός 9- ορόφου μεταλλικού πλαισίου. Έπειτα της προσομοίωσης του πλαισίου με χρήση του λογισμικού «OpenSees» και την εκτέλεση της ιδιομορφικής του ανάλυσης, πραγματοποιήθηκε δυναμική ανάλυση μέσω του λογισμικού «Matlab» λαμβάνοντας ως δεδομένα ένα πλήθος 50 διαφορετικών καταγραφών απομειωμένων σεισμικών παλμών κοντινού πεδίου και των αντίστοιχων εδαφικών κινήσεων. Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση αποτελεσμάτων των σεισμικών αναλύσεων μεταξύ των περικομμένων και κυρίαρχων παλμών που αφορούν σε μετακινήσεις των διαφόρων ορόφων, σε σχετικές μετακινήσεις μεταξύ αυτών, στη συνολική μετακίνηση του πλαισίου παρουσίας σεισμικής εδαφικής επιταχύνσεως και τέλος σε εντατικά μεγέθη που εμφανίζονται στους κόμβους του εκάστοτε ορόφου. Μέσω των διαγραμμάτων που παρατίθενται, συμπεραίνεται ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου του περιορισμένου σήματος παλμικής καταγραφής κοντινού πεδίου δύνανται να αντικαταστήσουν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους αντίστοιχους κυρίαρχους παλμούς.

ABSTRACT

The paper discusses the fast seismic performance assessment of structures using truncated pulse-like ground motion records. It is shown that it is possible to truncate a pulse-like signal using a novel wavelet-based definition that identifies the duration of the predominant velocity pulse. The truncated time history is still able to efficiently reproduce the increased seismic demand that near-field records typically produce. Substituting the original ground motion with the truncated signal, can significantly accelerate structural analysis and design. The truncated signal is the part of the original accelerogram that coincides with the duration of the predominant pulse, which is identified using a wavelet-based procedure, previously proposed by the authors. Elastic and inelastic response spectra and nonlinear time history analyses for SDOF (single-degree-of-freedom) systems are first studied. Subsequently a nine-storey steel frame is examined in order to demonstrate the performance of the proposed approach on a multiple-degree-of-freedom system. The proposed approach is found very efficient for pulse-like ground motions, while it is also sufficient for many records that are not characterized as such.

Πίνακας περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ v

ΠΕΡΙΛΗΨΗ vi

ABSTRACT vii

Πίνακας περιεχομένων viii

Περιεχόμενα Σχημάτων: xi

Περιεχόμενα Πινάκων: xiii

1 Εισαγωγή 14
1.1 Γενικά 14
1.2 Εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου 14
1.2.1 Φαινόμενο κατευθυντικότητας 14
1.3 Μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης των εδαφικών κινήσεων 17
1.3.1 Μαθηματικό προσομοίωμα Μαυροειδή & Παπαγεωργίου 19

2 Κατάταξη καταγραφών ως παλμικές 22
2.1 Διαδικασία ταξινόμησης παλμών 22
2.1.1 Κυματίδιο Daubechie 4ης τάξεως 24
2.2 Δείκτης παλμικότητας Καρδούτσου (2017) 26
2.2.1 Εισαγωγικά στοιχεία 26
2.3 Δείκτες παλμικότητας - Βιβλιογραφική αναφορά 27
2.3.1 Παλμικός δείκτης – Baker (2007) 27
2.3.2 Παλμικός δείκτης - Zhai et al. (2013) 28
2.3.3 Παλμικός δείκτης - Chang et al. (2016), ... 28
2.4 Μεθοδολογία Καρδούτσου (2017) 29
2.5 Αξιολόγηση μεθοδολογίας 30
2.6 Παράμετροι παλμού κοντινού πεδίου 33
2.7 Προσδιορισμός χρονικής διάρκειας παλμού 33
2.8 Μεθοδολογία Μίμογλου (2014) 35
2.9 Ορισμός παλμικών παραμέτρων 36
2.9.1 Περίοδος του παλμού 36
2.9.2 Εύρος, διάρκεια, μετατόπιση φάσης και χρόνος έναρξης παλμού 38

3 Αριθμητική Διερεύνηση 41
3.1 Ανάλυση μονοβάθμιων ταλαντωτών (Sdof) 41
3.2 Συσχέτιση μονοβάθμιου ταλαντωτή με τον παλμικό δείκτη Καρδούτσου PI 45

4 Προσομοίωση μεταλλικού πλαισίου 48
4.1 Μοντελοποίηση πλαισίου 48
4.2 Αρχές προσομοίωσης πλαισίου 48
4.2.1 Πλαστικότητα αρθρώσεων 48
4.2.2 Σύστημα πλαισίου ροπής 49
4.2.3 Φαινόμενα P-Δ 50
4.3 Γεωμετρία κτηρίου 51
4.4 Εισαγωγή υλικού 53
4.5 Μεθοδολογία προσομοίωσης- Λογισμικό OpenSees 55
4.5.1 Μέθοδος μοντελοποίησης πλαισίου 55
4.6 Εκτέλεση αναλύσεων και κωδικοποίηση 57

4.6.1 Ιδιομορφική Ανάλυση (Eigenvalue Analysis) 57
4.6.2 Στατική Ανελαστική Ανάλυση (Pushover Analysis) 59

5 Μεθοδολογία διεξαγωγής αποτελεσμάτων 63
5.1 Περικομμένο σήμα- Truncated signal 63
5.1.1 Αποτελέσματα μονοβάθμιου ταλαντωτή (SDOF) 65
5.1.2 Αποτελέσματα MDOF 67

6 Συμπεράσματα 77

7 Βιβλιογραφία 79

8 Παραρτήματα 81
8.1 Παράρτημα Α- Κώδικας προσομοίωσης OpenSees 81
8.2 Παράρτημα Β- Δεδομένα καταγραφών κοντινού πεδίο 103

Περιεχόμενα Σχημάτων:

Σχήμα 1.1: Φαινόμενο κατευθυντικότητας (Kramer, 1996). 15
Σχήμα 1.2: Καταγραφές πρόσω και οπίσω κατευθυντικότητας (Somerville et al, 1997) 16
Σχήμα 1.3: Φαινόμενο κατευθυντικότητας και μόνιμης μετακίνησης στην περίπτωση οριζόντιου ρήγματος (αριστερά) και ρήγματος βύθισης (δεξιά) (Stewart et al, 2001). 17
Σχήμα 1.4: Φαινόμενο κατευθυντικότητας και μόνιμης μετακίνησης στην περίπτωση οριζόντιου ρήγματος (επάνω) και ρήγματος βύθισης (κάτω)..... 17
Σχήμα 1.5: Απλοποιημένα σχήματα έκφρασης των παλμών κατευθυντικότητας. 18
Σχήμα 1.6: Κυματομορφή Mavroeidis and Papageorgiou (2003). 19
Σχήμα 1.7: Προσδιορισμός περιόδου του παλμού με βάση τον Mavroeidis et al [2004]. 20
Σχήμα 1.8: Συνοριακό Μοντέλο Papageorgiou και Mavroeidis (2003). 21
Σχήμα 2.1: Κοινές μητρικές συναρτήσεις κυμάτων για χρήση στην ανάλυση κύματος (Baker 2007). 22
Σχήμα 2.2: (a) Η χρονοϊστορία της ταχύτητας για μια εδαφική κίνηση, b) Διακριτός μετασχηματισμός και c) Συνεχής μετασχηματισμός (Baker 2007). 23
Σχήμα 2.3: Το κυματίδιο του Daubechie 4ης τάξεως. 24
Σχήμα 2.4: Επεξήγηση της διαδικασίας αποσύνθεσης που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του τμήματος παλμού μιας κίνησης εδάφους (της fault-normal συνιστώσας από την καταγραφή του Northridge, Rinaldi, 1979)..... 25
Σχήμα 2.5: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης και αντίστοιχοι εξαγόμενοι παλμοί. 26
Σχήμα 2.6: Σύγκριση των δεικτών παλμικότητας Καρδούτσου (2017) και Baker (2007) 31
Σχήμα 2.7: Ο λόγος της ανελαστικής προς την ελαστική μετατόπιση din/del ως προς τον προτεινόμενο δείκτη *Καρδούτσου (2017).* 32
Σχήμα 2.8: Διαγραμματική σύγκριση μεταξύ προτεινόμενων μεθοδολογιών εξαγωγής χρονικής διάρκεια του περικομμένου παλμού (truncated record)..... 35
Σχήμα 2.9: Για μια δεδομένη καταγραφή: 36
Σχήμα 2.10: Για δύο διαφορετικές καταγραφές γίνεται προσδιορισμός της περιόδου παλμού ταχύτητας Tp από την κορυφή του φάσματος Sd × Sv για απόσβεση 5% (οι αντίστοιχες καμπύλες για μηδενική απόσβεση παρουσιάζονται για σύγκριση), ενώ στο κάτω σχήμα γίνεται σύγκριση..... 38
Σχήμα 3.1: (a) Μοντέλο μονοβάθμιου ταλαντωτή που χρησιμοποιείται ως αναφορά (μαύρο χρώμα), (b) Ταλαντωτής με ψαθυρή συμπεριφορά (ανοιχτό γκρι χρώμα) και ταλαντωτής όλκιμης συμπεριφοράς (σκούρο γκρι χρώμα). 41
Σχήμα 3.2: Καμπύλη συντελεστού CR υπό σταθερή τιμή μειωτικού συντελεστή Ry=6, (a) σε σχέση με την περίοδο του ταλαντωτή T1 και (b) και σχέση με την κανονικοποιημένη μορφή της περιόδου T1/Tp. 43
Σχήμα 3.3: Διάγραμμα τυπικής μη-όλκιμης συμπεριφοράς. 44
Σχήμα 3.4: Διάγραμμα ψαθυρής συμπεριφοράς. 44
Σχήμα 3.5: Διάγραμμα όλκιμης συμπεριφοράς. 45
Σχήμα 3.6: Λόγος μέγιστης μετακίνησης ελαστοπλαστικού συστήματος μονοβάθμιου ταλαντωτή SDOF που υπολογίζεται για κάθε πρωτότυπη και

περικομμένη καταγραφή έναντι του αντίστοιχου δείκτη παλμού, (a) Ry=1 και T1=0,2sec, (b) R1 kai T1=2sec, (c) Ry=4 και T1=0,2sec, (d) Ry=4 και T1=2sec.....46
Σχήμα 4.1: Μοντέλα προσομοίωσης κατά το NIST GCR 10-917-5 (NIST 2010) 49
Σχήμα 4.2: Απεικόνιση καμπύλης τέμνουσας- μετατόπισης υποστυλώματος, με και χωρίς φαινόμενα 2ας τάξεως (PEER/ATC2010).....51
Σχήμα 4.3: Απεικόνιση καμπύλης ικανότητας με και χωρίς φαινόμενα 2ας τάξεως, κατά Chopra2007.....51
Σχήμα 4.4: Γεωμετρία υπό μελέτη κτηριακού πλαισίου.....53
Σχήμα 4.5: Συμπεριφορά υλικού υπό μονοτονική φόρτιση.....54
Σχήμα 4.6: Υστερητική συμπεριφορά υλικού λαμβάνοντας υπόψη μας και την κράτυνση του χάλυβα. 54
Σχήμα 4.7: Αρίθμηση κόμβων πλαισίου για την κωδικοποίησή του στο OpenSees. Η στήλη με χρώμα μπλε παρουσιάζει το υποστύλωμα που δέχεται τα φαινόμενα P-δ. 56
Σχήμα 4.8: Καμπύλη αντίστασης (capacity curve) του 9-όροφου μεταλλικού πλαισίου. Αποτύπωση τέμνουσας βάσης (Base shear) συναρτήσει του λόγου της σχετικής μετακίνησης της οροφής (Roof drift ratio).....60
Σχήμα 5.1: Προτεινόμενη μειωμένη διάρκεια παλμού 12 εξεταζόμενων καταγραφών, σύμφωνα με τον ορισμό της ενεργειακής ροής.....65
Σχήμα 5.2: Φάσμα μετακίνησης με σταθερή τιμή συντελεστή ολκιμότητας, μ, ίση με 6.....66
Σχήμα 5.3: Διαγραμματική απεικόνιση καταγραφών με περίοδο Tp=0.1, 1.23, 2.17, 4.88sec. φασματικής επιτάχυνσης σταθερής τιμής ολκιμότητας, μ. (a) NGA#568, (b) NGA#1119, (c) NGA#1013, (d) NGA#1161. 67
Σχήμα 5.4: Διαγραμματικά αποτελέσματα που αφορούν τις μέγιστες τιμές της σχετικής μετακίνησης μεταξύ των ορόφων σε συνάρτηση με τους ορόφους του κτηρίου (a), και σε συνάρτηση με το πηλίκο T/Tp (b).....68
Σχήμα 5.5: Διαγραμματικά αποτελέσματα σχετικών μετακινήσεων μεγίστων τιμών ανά καταγραφή μεταξύ ορόφων κατασκευής (Γράφημα a-i). 70
Σχήμα 5.6: Διαγραμματικά αποτελέσματα που αφορούν στις μετακινήσεις της οροφής συναρτήσει του πηλίκου περιόδων T/Tp (a), και μέγιστα αποτελέσματα μετακίνησης οροφής ανά καταγραφή με στόχο τη σύγκριση των δύο περιπτώσεων (b). 70
Σχήμα 5.7: Διαγραμματικά αποτελέσματα μετακίνησης ορόφων (Γράφημα a-g) σε συνάρτηση με το πηλίκο T/Tp.....71
Σχήμα 5.8: Διαγραμματικά αποτελέσματα τέμνουσας βάσης σε συνάρτηση με το πηλίκο T/Tp. 72
Σχήμα 5.9: Διαγραμματικά αποτελέσματα αναπτυσσόμενης τέμνουσας δύναμης σε κάθε όροφο (Γράφημα a-i).....74
Σχήμα 5.10: Σύγκριση αποτελεσμάτων αυθεντικών (original record) και περικομμένων (truncated record) αντίστοιχων καταγραφών.....75
Σχήμα 5.11: Απεικόνιση μέγιστης σχετικής μετακίνησης διαφορετικών ορόφων της κατασκευής, (a) 2ος όροφος, (b) 5ος όροφος, (c) 7ος όροφος, (d) 9ος όροφος.....76

Περιεχόμενα Πινάκων:

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά παραμέτρων μονοβάθμιου ταλαντωτή (Sdof). 42
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά γεωμετρίας κτηρίου και ιδιότητες υλικού κατασκευής 52
Πίνακας 4.2: Μεταλλικές διατομές κύριων μελών κατασκευής. 52
Πίνακας 4.4: Δυνάμεις βαρύτητας σε μονάδες μέτρησης kipf. 58
Πίνακας 4.5: Απόσπασμα κωδικοποίησης μάζας του 9-όροφου πλαισίου. 59
Πίνακας 4.6: Εισαγωγή οριζόντιων μονοτονικών φορτίσεων ανά όροφο για τη διαδικασία ανάλυσης pushover. 60

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια με την πύκνωση των δικτύων επιταχυνσιογράφων γύρω από τα ενεργά ρήγματα έγινε δυνατή η παρατήρηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της εδαφικής κίνησης σε κοντινό ως προς τα ρήγματα πεδίο. Οι λεγόμενες καταγραφές κοντινού πεδίου έδειξαν σημαντικές διαφοροποιήσεις στα ελαστικά και ανελαστικά φάσματα απόκρισης και κατά επέκταση στις σεισμικές φορτίσεις. Οι σεισμικές καταγραφές που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική αφορά σε καταγραφές παλμικών κινήσεων κοντινού πεδίου με πρόσθια κατευθυντικότητα. Είναι κατανοητό πως η μέθοδος της περικομμένης καταγραφής (truncated record) δεν είναι δυνατό να ανταποκριθεί αποτελεσματικά για κάθε είδος εδαφικής κίνησης και κατά επέκταση για κάθε κτηριακή συμπεριφορά έναντι σεισμού. Παρόλα αυτά έχει αποδειχθεί πως η περίπτωση των παλμικών καταγραφών (Pulse- like records) που ανήκει στην κατηγορία των καταγραφών εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου (near field records) μπορεί να χρησιμοποιηθεί αξιόπιστα σε αυτή τη μέθοδο.

1.2 Εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου

Η έκταση της περιοχής από την οποία λαμβάνονται οι εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου, «Ζώνη κοντινού πεδίου» (Near fault zone ή Near field zone), τυπικά θεωρείται ότι βρίσκεται εντός μιας απόστασης περίπου 20-60 Km από την σεισμογενή διάρρηξη. Το μέγεθός της είναι ανάλογο με το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος και είναι γενικώς εξαρτημένη από την επιφάνεια ρηγμάτωσης που βρίσκεται στο επίπεδο του ρήγματος. Εντός της ζώνης εκείνης εμφανίζεται η μεγαλύτερη συγκέντρωση βλαβών. Επιπλέον, η εδαφική κίνηση συνδέεται άμεσα με τον μηχανισμό διάρρηξης, τη διεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης του ρήγματος σε σχέση με την θέση καταγραφής του σεισμικού γεγονότος και τις πιθανές παραμένουσες μετακινήσεις που δύνανται να προκληθούν εξαιτίας της ολίσθησης του ρήγματος. Αυτοί είναι και οι λόγοι εμφάνισης δύο σημαντικών φαινομένων, αυτό της κατευθυντικότητας (Directivity Effect) και το φαινόμενο της μόνιμης στατικής παραμόρφωσης (Fling Step).

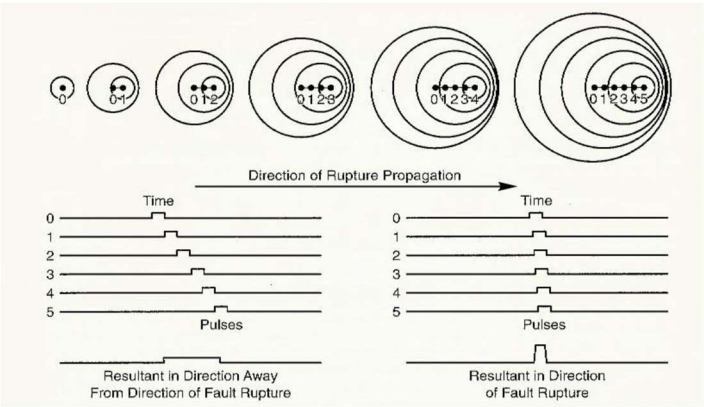
1.2.1 Φαινόμενο κατευθυντικότητας

Τα είδη κατευθυντικότητας που δύναται να έχει μία παλμική κίνηση είναι τα εξής:

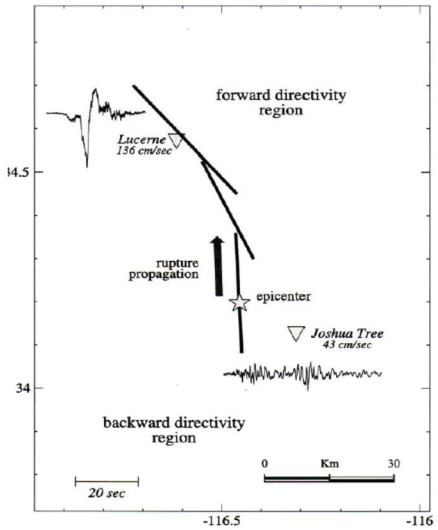
1. Πρόσω κατευθυντικότητα (forward directivity),
2. οπίσω κατευθυντικότητα (backward directivity), και
3. ουδέτερη κατευθυντικότητα (neutral directivity).

Στην επιφάνεια του ρήγματος και πιο συγκεκριμένα στην εστία (hypocenter), γεννάται ένα σεισμικό γεγονός από την διάρρηξη του εδάφους και σημειώνεται ολίσθηση μεταξύ των δύο εδαφικών τεμαχίων που προκύπτουν. Η διάρρηξη αυτή δεν

υλοποιείται μόνο σε ένα σημείο αλλά διαδίδεται σταδιακά και συνοδεύεται από την θραύση των κλείθρων (asperities). Με τον όρο αυτό περιγράφονται τα φυσικά εξογκώματα που εντοπίζονται στην επιφάνεια του ρήγματος και διαθέτουν μεγάλη τραχύτητα. Κατά επέκταση προβάλλεται αντίσταση κατά την θραύση τους, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται εντονότερες διαρρήξεις στα σημεία αυτά σε αντίθεση με τα υπόλοιπα σημεία του ρήγματος. Κατά την διάρκεια μιας τέτοιας διάρρηξης, παράγεται ένας παλμός ταχύτητας όπου διαδίδεται ως κύμα S (διατμητικό κύμα) με την ταχύτητα διάδοσης του να είναι ανάλογη της ταχύτητας διάρρηξης του εδάφους. Επομένως, με την διάδοση της ρηγμάτωσης από την εστία του ρήγματος προς μια θέση προκαλείται ένα φαινόμενο αντίστοιχο με το φαινόμενο Doppler. Λόγω εγγύτητας των τιμών των ταχυτήτων διάρρηξης και διάδοσης των κυμάτων, όταν η ρηγμάτωση πλησιάζει προς μια θέση, στην θέση αυτή θα υπάρξει άθροιση των παλμών ταχύτητας των επιμέρους διαρρήξεων με αποτέλεσμα να προκύπτει παλμός ταχύτητας μεγάλου εύρους, μικρής διάρκειας και μεσαίας προς μεγάλης δεσπόζουσας περιόδου (πρόσω κατευθυντικότητα – forward directivity). Η παλμική αυτή κίνηση είναι ιδιαίτερα έντονη στην συνιστώσα της εδαφικής κίνησης που είναι κάθετη στο ίχνος του ρήγματος, λόγω της πόλωσης των διατμητικών κυμάτων. Ωστόσο, στην αντίθετη κατεύθυνση, απομακρυνόμενοι δηλαδή από την κατεύθυνση διάρρηξης, οι παλμοί ταχύτητας ακολουθούν ο ένας τον άλλον οπότε προκύπτει παλμός ταχύτητας μικρού εύρους και μεγάλης διάρκειας (οπίσω κατευθυντικότητα – backward directivity). Πέραν όμως την πρόσω κι όπισθεν κατευθυντικότητας, εντοπίζεται και η περίπτωση της ουδέτερης κατευθυντικότητας (neutral directivity) όπου σε σημεία συνήθως εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος δεν εμφανίζεται έντονη διάδοση της διάρρηξης. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται γραφικά το φαινόμενο της κατευθυντικότητας κατά τον *Kramer(1996)*. Συγκεκριμένα, το πρώτο εικονίδιο αναπαριστά την περίπτωση της οπίσω κατευθυντικότητας, ενώ το δεύτερο της πρόσω. Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζονται καταγραφές του φαινομένου σύμφωνα με τους *Somerville et al (1997)*.



Σχήμα 1.1: Φαινόμενο κατευθυντικότητας (Kramer, 1996).



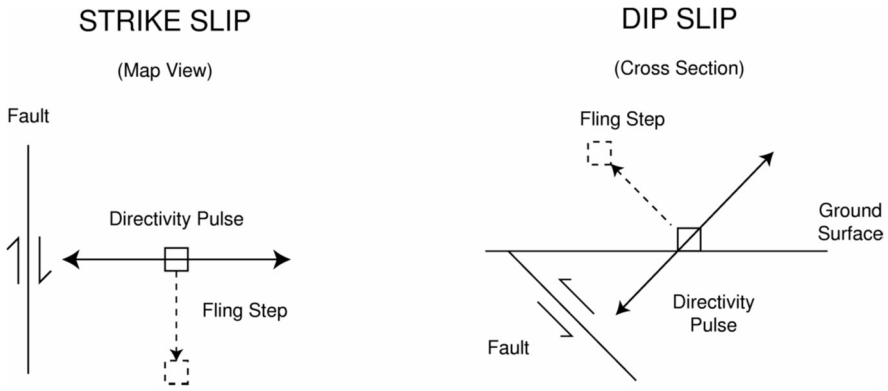
Σχήμα 1.2: Καταγραφές πρόσω και οπίσω κατευθυντικότητας (Somerville et al, 1997)

Τα ρήγματα τα οποία υπόκεινται σε φαινόμενα κατευθυντικότητας διακρίνονται στα εξής :

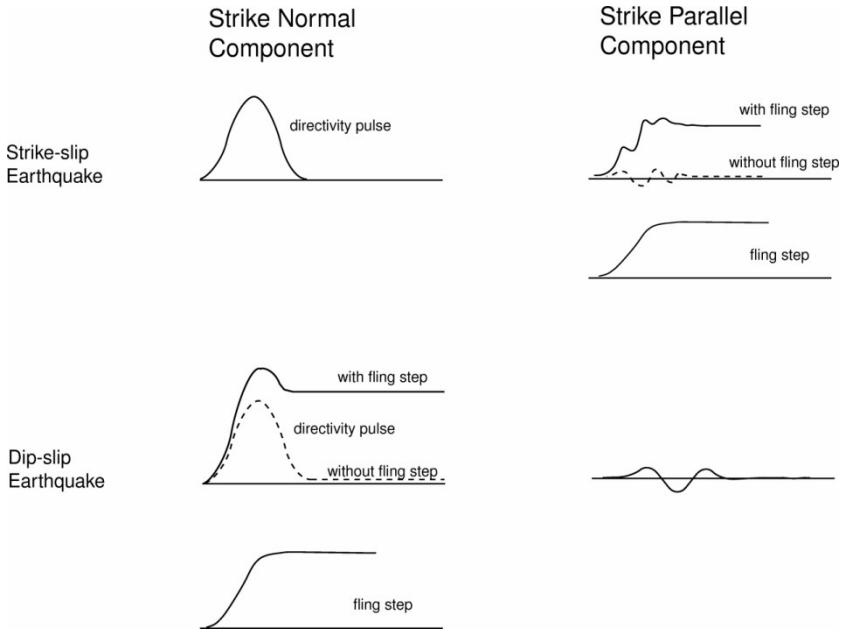
1. Οριζόντια ρήγματα (strike slip),
2. κανονικά ρήγματα (normal) ή ανάστροφα (reverse), και
3. ρήγματα βύθισης (dip slip).

Στην περίπτωση των οριζοντίων ρηγμάτων, η εδαφική κίνηση κάθετα στο ίχνος του ρήγματος, λόγω της πόλωσης των διατμητικών κυμάτων, εμφανίζει ισχυρούς παλμούς κατευθυντικότητας. Στην περίπτωση των κανονικών ή ανάστροφων ρηγμάτων, κάθετα στο ίχνος του ρήγματος, καταγράφεται μια εδαφική κίνηση που αποτελεί σύνθεση του παλμού της κατευθυντικότητας και της ολίσθησης του ρήγματος. Στην περίπτωση ρηγμάτων βύθισης (dip slip), οι συνθήκες για πρόσω κατευθυντικότητα πληρούνται σε περιοχές που βρίσκονται κοντά στην οριζόντια προβολή του επιπέδου διάρρηξης (hanging wall).

Η μελέτη ψηφιακών καταγραφών που ελήφθησαν από σεισμογενής διαρρήξεις στο κοντινό πεδίο, ανέδειξε την ύπαρξη μόνιμων μετακινήσεων. Οι μόνιμες στατικές εδαφικές μετακινήσεις αναπτύσσονται κατά την διάρκεια της ολίσθησης και προς την κατεύθυνση αυτή σε ένα διακριτό χρονικό διάστημα. Μια ενδεικτική περίπτωση του φαινομένου αυτού σημειώνεται σε οριζόντια ρήγματα όπου η κατευθυντικότητα του παλμού πραγματοποιείται στη συνιστώσα που είναι κάθετη στο ίχνος του ρήγματος, ενώ μόνιμη μετακίνηση εντοπίζεται στη συνιστώσα που είναι παράλληλη στο ίχνος . Ωστόσο, σε ρήγματα βύθισης, η μόνιμη μετακίνηση και η κατευθυντικότητα του παλμού συντίθενται στην κάθετη στο ίχνος συνιστώσα. Στο Σχήμα 1.3 και Σχήμα 1.4 φαίνονται τα φαινόμενα κατευθυντικότητας και μόνιμης μετακίνησης για τη περίπτωση οριζόντιου ρήγματος και ρήγματος βύθισης, κατά *Stewart et al (2001)*.



Σχήμα 1.3: Φαινόμενο κατευθυντικότητας και μόνιμης μετακίνησης στην περίπτωση οριζόντιου ρήγματος (αριστερά) και ρήγματος βύθισης (δεξιά) (Stewart et al, 2001).



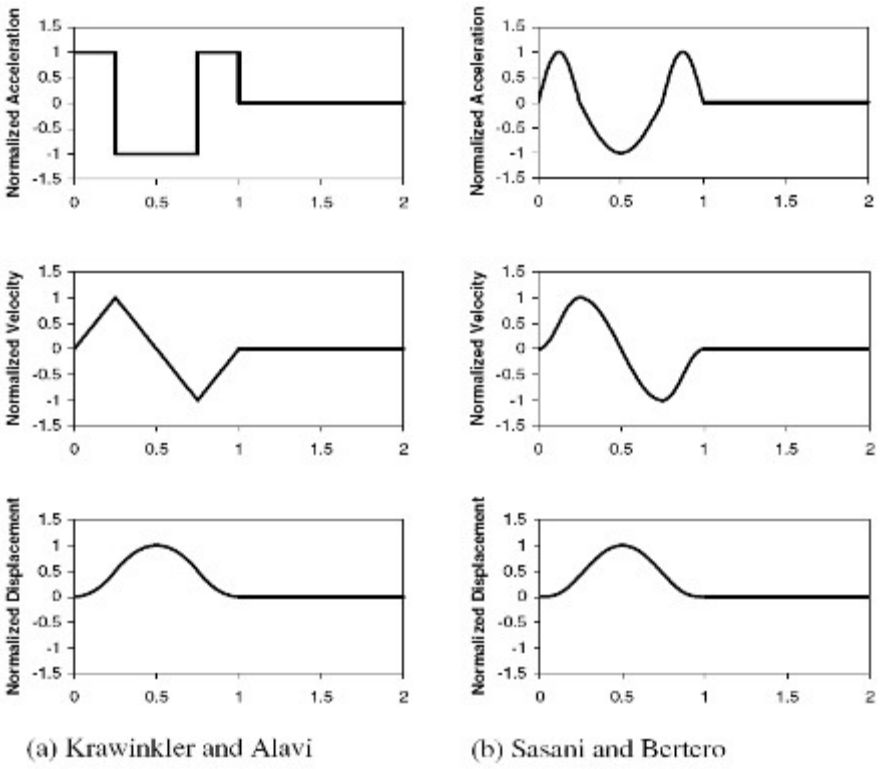
Σχήμα 1.4: Φαινόμενο κατευθυντικότητας και μόνιμης μετακίνησης στην περίπτωση οριζόντιου ρήγματος (επάνω) και ρήγματος βύθισης (κάτω).

1.3 Μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης των εδαφικών κινήσεων

Σύμφωνα, με τους *Krawinkler και Alavi (1998)*, *Sasani και Bertero (2000)*, η απόκριση των κατασκευών σε εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου μπορεί να προσεγγισθεί εύκολα με απλοποιημένες μορφές παλμών της εδαφικής ταχύτητας. Τέτοιου είδους μορφές παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.6. Δηλαδή, έχει διαπιστωθεί ότι απλοποιημένες αναπαραστάσεις του παλμού της ταχύτητας μπορεί να εντοπίσουν τα εμφανή χαρακτηριστικά της απόκρισης μιας κατασκευής που υπόκειται σε εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Για την αναπαράσταση των εδαφικών κινήσεων σε δύο διευθύνσεις, είναι αναγκαία μια ημιτονικού παλμού αναπαράσταση της συνιστώσας που είναι παράλληλη στο ρήγμα καθώς και το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην αρχή

των συνιστωσών κάθετα και παράλληλα στο ρήγμα. Οι απλοποιημένες χρονοϊστορίες των παλμών κατευθυντικότητας καθορίζονται από τον αριθμό των ημίκυκλων (half cycles) που ισοδυναμούν με τους παλμούς της εδαφικής κίνησης, τη δεσπόζουσα περίοδο που αντιστοιχεί στη διάρκεια κάθε ημίκυκλου και τέλος από το εύρος του παλμού.

Ο προσδιορισμός της εδαφικής κίνησης απαιτεί εκτίμηση της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας (PGV), της δεσπόζουσας περιόδου του παλμού (T_p) και του αριθμού των σημαντικών ημίκυκλων της κίνησης του εδάφους.



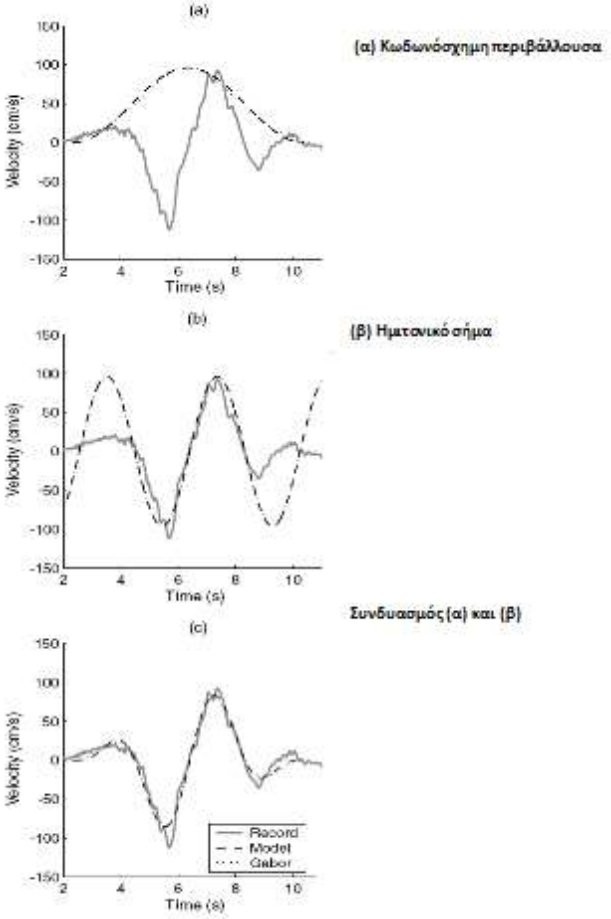
Σχήμα 1.5: Απλοποιημένα σχήματα έκφρασης των παλμών κατευθυντικότητας.

Έτσι, οι *Krawinkler and Alavi (1998)*, προσδιόρισαν τον παλμό της ταχύτητας μέσω ενός ξεκάθαρου και καθολικού μεγίστου στο φάσμα απόκρισης της ταχύτητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η εκτίμηση της περιόδου του ισοδύναμου παλμού ($T_{v\text{-}p}$) να είναι σχετικά ξεκάθαρη. Για τις κινήσεις με ένα παλμό, αυτοί οι διαφορετικοί ορισμοί της περιόδου του παλμού, παρέχουν σχεδόν ισοδύναμα αποτελέσματα. Για πιο πολύπλοκες καταγραφές, τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν σημαντικά. Συνολικά, η αναλογία μεταξύ T_v και $T_{v\text{-}p}$ είναι 0.84 με μια τυπική απόκλιση 0.28, σύμφωνα με τους *Rodriguez-Marek (2000)*. Η ταύτιση των T_v και $T_{v\text{-}p}$ για μια σεισμική κίνηση του εδάφους δείχνει ότι ο παλμός της ταχύτητας περιέχει ενέργεια σε μια ζώνη στενής περιόδου.

Οι μελέτες της απόκρισης των κατασκευών για καταγραφές κοντινού πεδίου, έχουν εστιάσει σε φαινόμενα στην μεγαλύτερη συνιστώσα που εντοπίζεται κάθετα στην διεύθυνση του ρήγματος, σύμφωνα με τους *Alavi and Krawinkler (2000)*. Παρόλα αυτά, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες η κίνηση σε διεύθυνση παράλληλη με το ρήγμα μπορεί να καταστεί εξίσου σημαντική.

1.3.1 Μαθηματικό προσομοίωμα Μαυροειδή & Παπαγεωργίου

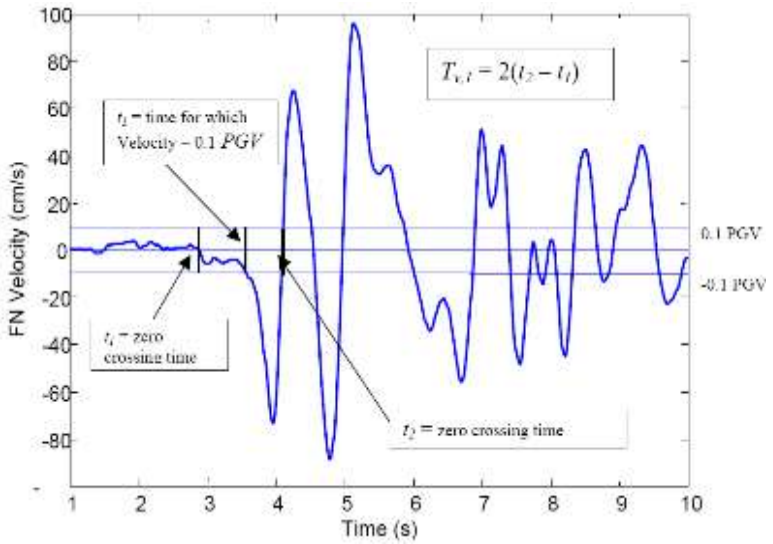
Η μέθοδος που αναλύεται στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως βάση το μαθηματικό προσομοίωμα εδαφική κίνησης με παλμό καυτευθυντικότητας, σύμφωνα με τη θεωρία *Μαυροειδή & Παπαγεωργίου (2003)*, η οποία χρησιμοποιεί κυματομορφές (wavelets). Πιο συγκεκριμένα, η χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας μοντελοποιείται με ένα ημιτονικό σήμα, που πολλαπλασιάζεται με μια κωδωνόσχημη περιβάλλουσα, η οποία προκύπτει από ένα μετατεθειμένο κύκλο συνημιτόνου. Στο Σχήμα 1.6 παρουσιάζεται διαγραμματικά ο συνδυασμός της κωδωνόσχημης περιβάλλουσας και του ημιτονικού σήματος. Σημειώνεται ότι η περίοδος του ημιτονικού σήματος πρέπει να είναι μικρότερη από αυτήν της κωδωνόσχημης περιβάλλουσας προκειμένου η προκύπτουσα εδαφική κίνηση να έχει φυσική σημασία.



Σχήμα 1.6: Κυματομορφή Mavroeidis and Papageorgiou (2003).

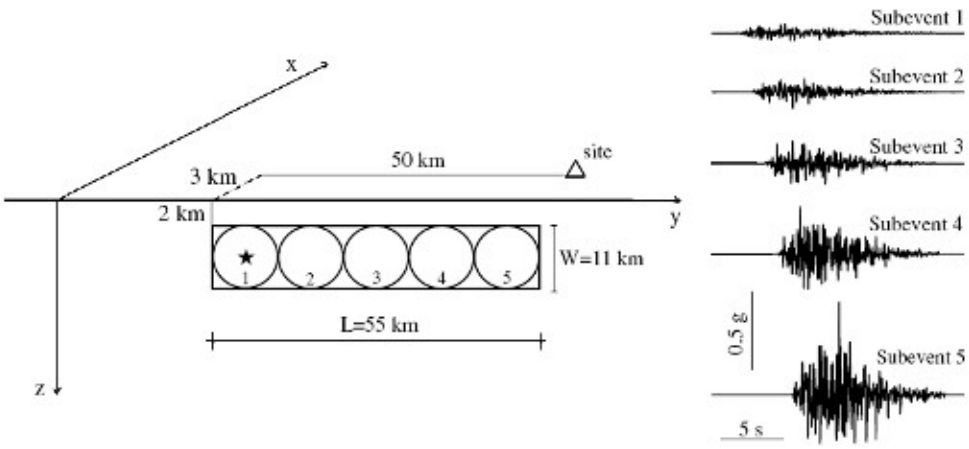
Από την άλλη πλευρά, σύμφωνα με τον *Mavroeidis et al (2004)*, η κρίσιμη παράμετρος της εδαφικής κίνησης σε περίπτωση φαινομένων κατευθυντικότητας θεωρείται ότι είναι η περίοδος των παλμών κατευθυντικότητας της εδαφικής κίνησης. Ο καθορισμός αυτής της περιόδου, δηλαδή της δεσπόζουσας περιόδου, γίνεται μέσω του προσδιορισμού της διάρκειας του παλμού με βάση τα σημεία όπου ο παλμός

διέρχεται από τον μηδενικό άξονα ή των σημείων στα οποία το εύρος της ταχύτητας αποκτά τιμή ίση με το 10% της μέγιστης τιμής της ταχύτητας του παλμού. Αυτή η δεύτερη προσέγγιση γίνεται με σκοπό να αποφευχθεί το πιθανό σφάλμα στην περίπτωση που υπάρχει κατακόρυφη μετάθεση (drift) στην καταγραφή, η οποία θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με καλύτερη διόρθωση της γραμμής βάσης. Στο Σχήμα 1.7 προσδιορίζεται διαγραμματικά η περίοδος με βάση τη θεωρία του *Mavroeidis et al (2004)*.



Σχήμα 1.7: Προσδιορισμός περιόδου του παλμού με βάση τον Mavroeidis et al [2004].

Η κρίσιμη παράμετρος για να προσδιοριστεί η εδαφική κίνηση κοντινού πεδίου είναι η περίοδος T_p, που σχετίζεται με τη διάρκεια του παλμού κατευθυντικότητας. Η περίοδος εξαρτάται άμεσα από τη διαδικασία διάρρηξης του ρήγματος και πιο συγκεκριμένα από την διάρκεια της διάρρηξης τ (rise time). Η διάρκεια της διάρρηξης εξαρτάται από τα επιμέρους γεγονότα που αποτελούν το κύριο σεισμικό γεγονός. Οι *Papageorgiou and Aki (1983)*, πρότειναν ένα συνοριακό μοντέλο, το οποίο θεωρεί ότι τα επιμέρους σεισμικά γεγονότα προκαλούνται από προσεγγιστικά ισομεγέθεις κυκλικές επιφάνειες διάρρηξης, που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στην επιφάνεια ενός ρήγματος. Οι επιφάνειες αυτές έχουν μια μέση διάμετρο ($2\rho_o$) που σχετίζεται με το μέγεθος της σεισμικής ροπής (M_w) του σεισμικού γεγονότος, Σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8: Συνοριακό Μοντέλο Papageorgiou και Mavroeidis (2003).

Συμπερασματικά, σύμφωνα με τους *Alawi & Krawinkler* προκύπτουν μικρότερες τιμές για την περίοδο T_{p-v} από αυτές που προκύπτουν σύμφωνα με τον *Somerville* και η απόκλιση των δύο τιμών αυξάνει με το μέγεθος της σεισμικής ροπής (M_w). Παρά τις σημαντικές αποκλίσεις που υπάρχουν ανάμεσα στα δύο αποτελέσματα, οι δύο περίοδοι θεωρούνται ίσες κατά παραδοχή.

Λόγω της θεωρούμενης συσχέτισης μεταξύ της περιόδου του παλμού T_p και της περιόδου που αντιστοιχεί στην μέγιστη φασματική ταχύτητα T_{v-p} προτείνονται, όπως ήδη αναφέρθηκε, από διάφορους ερευνητές, σχέσεις που αφορούν το ένα ή το άλλο μέγεθος.

2 Κατάταξη καταγραφών ως παλμικές

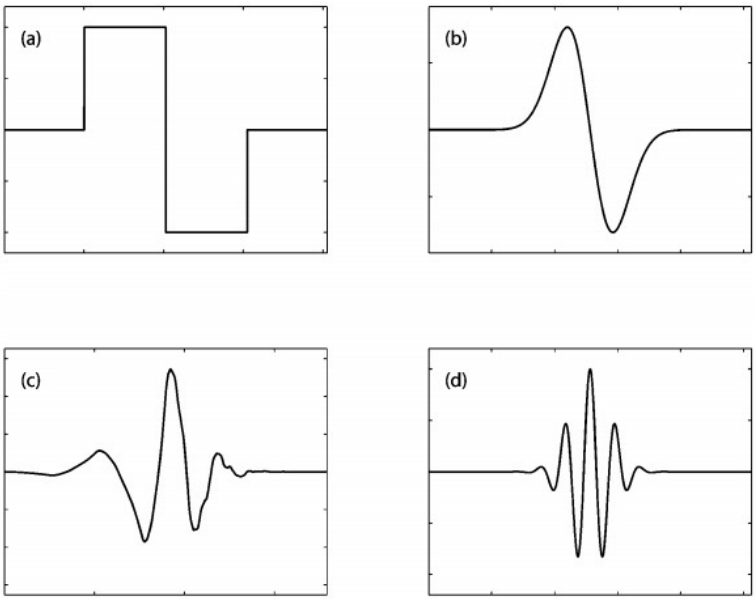
2.1 Διαδικασία ταξινόμησης παλμών

Μεταξύ διαφόρων διαδικασιών που έχουν προταθεί στην επιστημονική κοινότητα για την ταξινόμηση των εδαφικών κινήσεων ως παλμικών ή μη, στην ενότητα αυτή θα περιγραφεί η διαδικασία ανάλυσης κυματιδίων (wavelet analysis), η οποία αποδίδει σε σημαντικό βαθμό σε περιπτώσεις προσδιορισμού καταγραφών.

Η ανάλυση κυμάτων χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο, ο οποίος μπορεί να κατανοηθεί αρκετά μέσω μιας σύγκρισης με την ανάλυση Fourier. Η ανάλυση Fourier αντιπροσωπεύει ένα σήμα με χρήση γραμμικού συνδυασμού ημιτονοειδών κυμάτων, κάθε ένα από τα οποία αντιπροσωπεύει ένα σήμα άπειρου μήκους και μιας μόνο συχνότητας. Αντίθετα, μέσω της ανάλυσης κυμάτων, ένα σήμα αποσυντίθεται σε κυματίδια, που τοποθετούνται στο χρόνο και τα οποία αντιπροσωπεύονται από μια στενή περιοχή συχνοτήτων.

Τα κύματα είναι οι βασικές συναρτήσεις οι οποίες ικανοποιούν ένα σύνολο από μαθηματικές απαιτήσεις. Πολλά πρωτότυπα κύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποσυνθέσουν ένα σήμα. Η πρωτότυπη συνάρτηση αναφέρεται ως μια μητρική συνάρτηση κύματος, και η συνάρτηση αυτή κλιμακώνεται και μεταφέρεται στο χρόνο για να σχηματίσει ένα σύνολο από βασικές συναρτήσεις.

Πλήθος θεωρητικών μελετών έχουν αναπτυχθεί αναφορικά με την επιλογή της κατάλληλης μητρικής συνάρτησης κύματος, χρησιμοποιώντας διάφορα κριτήρια που περιλαμβάνουν ζητήματα ορθογωνικότητας, συμβατότητας, συμμετρίας καθώς και έναν αριθμό παράγωγων. Τα κύματα που παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα, χρησιμοποιούνται ευρέως ως μητρικά κυματίδια και είναι κατάλληλα να εφαρμοστούν στα πλαίσια της διαδικασίας ταξινόμησης.



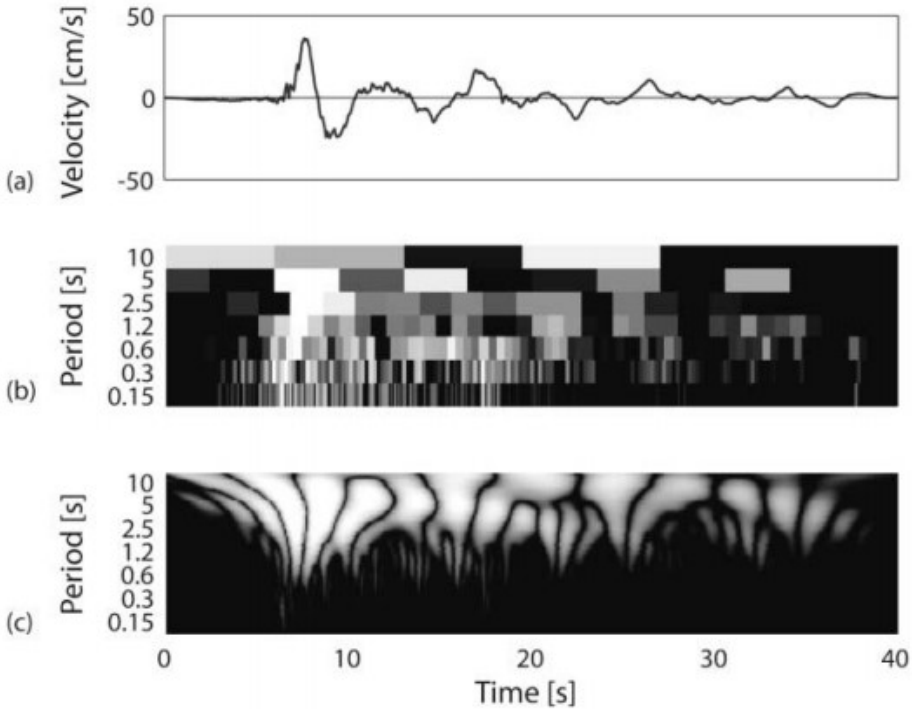
Σχήμα 2.1: Κοινές μητρικές συναρτήσεις κυμάτων για χρήση στην ανάλυση κύματος (Baker 2007).

Η σχέση που ορίζει τη συνάρτηση βάσης του κύματος στο χρόνο t, δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Phi s,l(t) = \frac{1}{\sqrt{s}}\Phi\left(\frac{t-l}{s}\right) \qquad \text{Εξίσωση (2.1)}$$

Στην παραπάνω σχέση, η παράμετρος $\Phi_{s.l\,(t)}$ είναι η μητρική συνάρτηση κύματος, s είναι ο συντελεστής κλιμάκωσης που προκαλεί διαστολή στο κύμα και l είναι η παράμετρος του χώρου, που μεταθέτει το κύμα στο χρόνο. Κάθε σήμα με συνάρτηση f(t) μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένας γραμμικός συνδυασμός της συνάρτησης βάσης και οι συντελεστές για το γραμμικό αυτό συνδυασμό ορίζονται από το ακόλουθο ολοκλήρωμα, το οποίο είναι το ίδιο σαν έννοια με εκείνο του μετασχηματισμού του Fourier. Έτσι, ο συντελεστής που σχετίζεται με το κύμα, με κλίμακα s και θέση l, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$C_{s,l} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Phi s,l(t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Phi\left(\frac{t-l}{s}\right)dt \qquad \text{Εξίσωση (2.2)}$$



Σχήμα 2.2: (a) Η χρονοϊστορία της ταχύτητας για μια εδαφική κίνηση, b) Διακριτός μετασχηματισμός και c) Συνεχής μετασχηματισμός (Baker 2007).

Υπάρχουν δύο τύποι μετασχηματισμού κυμάτων που χρησιμοποιούνται για να αναλύσουν ένα σήμα και εξαρτώνται από τον αριθμό κλίμακας και τόπου για τον οποίο οι συντελεστές υπολογίζονται.

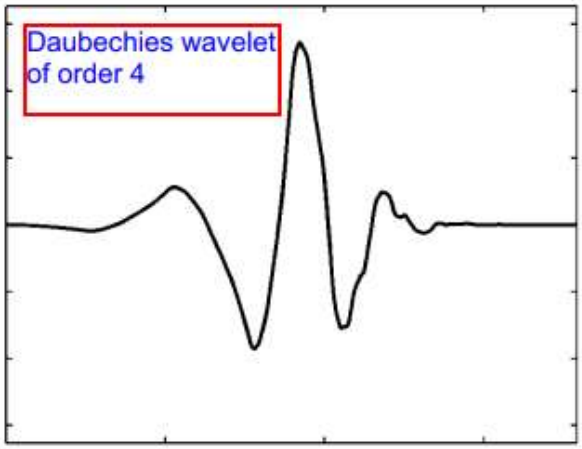
α) Ο συνεχής μετασχηματισμός κυμάτων υπολογίζει τους συντελεστές που σχετίζονται με την κάθε ακέραια τιμή της κλιμάκωσης και τις παραμέτρους της τοποθεσίας. Αυτό παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά του χρόνου-συχνότητας του σήματος. Αλλά ένα ψηφιακό σήμα μήκους n, μπορεί να περιγραφεί πλήρως χρησιμοποιώντας ένα μειωμένο αριθμό από συντελεστές. Εάν τα κύματα είναι ορθογωνικά, τότε μόνο n κύματα απαιτούνται για να περιγραφεί πλήρως κάθε διακριτή τιμή του χρόνου του σήματος μήκους n.

β) Ο διακριτός μετασχηματισμός κυμάτων παρέχει n συντελεστές που περιγράφουν το εύρος των n κυμάτων σε διάφορες κλίμακες και τοποθεσίες. Εάν n είναι μια δύναμη του 2, τότε υπάρχει ένας πολύ αποτελεσματικός αλγόριθμος που να εκτελεί τους υπολογισμούς (ανάλογος του γρήγορου μετασχηματισμού του Fourier).

Και οι δύο τύποι μετασχηματισμών, ο συνεχής και ο διακριτός, έχουν χαρακτηριστικά που τους καθιστούν κατάλληλους για εφαρμογή. Σε ότι αφορά στον συνεχή μετασχηματισμό, έχει πολύ μεγαλύτερο κόστος υπολογισμών και παράγει πολύ περισσότερους συντελεστές απ' ότι χρειάζεται για να περιγράψουν το σήμα και η υψηλότερη ανάλυσή του είναι χρήσιμη για τον ακριβή προσδιορισμό του μέγιστου συντελεστή, ο οποίος θα δείχνει την περίοδο και την τοποθεσία του παλμού κοντινού πεδίου. Επίσης, ανόμοια με τον διακριτό μετασχηματισμό των κυμάτων, οι συντελεστές που λαμβάνονται από τον συνεχή μετασχηματισμό δεν αλλάζουν εάν η αρχή και το τέλος του σήματος έχουν επιπρόσθετα μηδενικά. Για τους λόγους αυτούς, συνήθως χρησιμοποιείται ο συνεχής μετασχηματισμός για την κατηγοριοποίηση των εδαφικών κινήσεων.

2.1.1 Κυματίδιο Daubechie 4ης τάξεως

Για κάθε, υπό εξέταση, κίνηση εδάφους, ο μέγιστος παλμός ταχύτητας έχει εξαχθεί με χρήση της ανάλυσης κυμάτων, όπως περιεγράφηκε προηγουμένως. Το κυματίδιο του Daubechie της τάξης του 4, χρησιμοποιήθηκε ως μητρική συνάρτηση κύματος, επειδή προσεγγίζει το σχήμα πολλών παλμών ταχύτητας και φαίνεται να έχει καλή απόδοση σε σχέση με τις άλλες υποψήφιες μητρικές συναρτήσεις κυμάτων.



Σχήμα 2.3: Το κυματίδιο του Daubechie 4ης τάξεως.

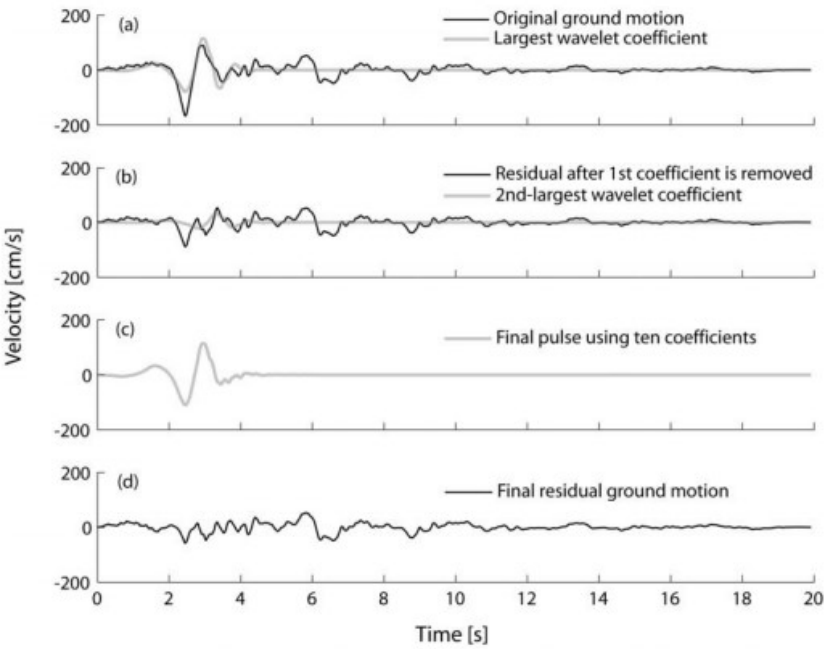
Αρχικά υπολογίζεται ο συνεχής μετασχηματισμός κυμάτων της χρονοϊστορίας της ταχύτητας και προσδιορίζεται ο συντελεστής με την μέγιστη απόλυτη τιμή. Το κύμα

που σχετίζεται με αυτό το συντελεστή, καθορίζει την περίοδο και την τοποθεσία του παλμού, όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω.

Ένας συντελεστής κύματος είναι όμοιος με την ενέργεια του σχετικού κύματος, και έτσι ο επιλεγμένος παλμός είναι εκείνος με την μέγιστη ενέργεια. Αυτό το κύμα αφαιρείται από την κίνηση του εδάφους και ο συνεχής μετασχηματισμός υπολογίζεται για την παραμένουσα κίνηση. Επειδή η τοποθεσία και η περίοδος του παλμού έχουν προσδιοριστεί, μόνο τα κύματα που έχουν την ίδια περίοδο, τοποθετούνται σε κοντινές χρονικές στιγμές (εντός +- ενός και μισού πλάτους του αρχικού κύματος του σήματος, s). Προσδιορίζεται το μέγιστο από αυτούς τους συντελεστές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4 - b.

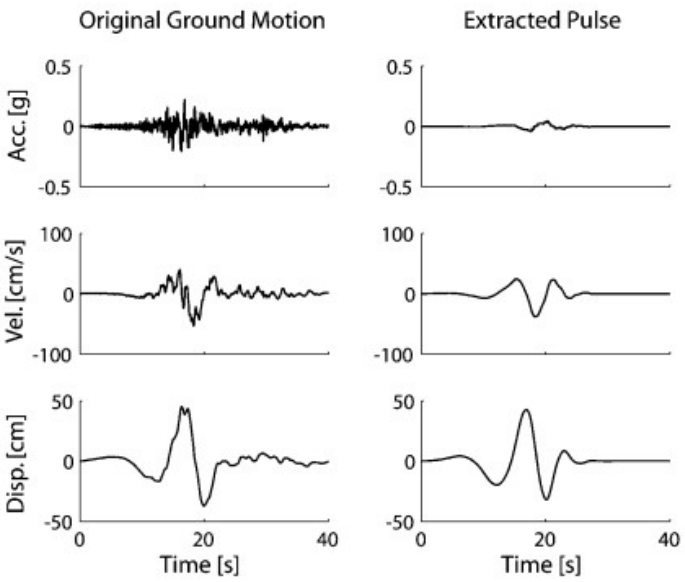
Συχνά μόνο ένας ή δύο συντελεστές απαιτούνται για να περιγράψουν τον παλμό, αλλά ένα σύνολο από δέκα συντελεστές στην προσδιοριζόμενη περίοδο και στο πλαίσιο της τοποθεσίας εξάγονται από τον αλγόριθμο για να βεβαιώσουν ότι ο παλμός αναπαρίσταται με ένα λεπτομερή τρόπο.

Ένας παλμός που έχει εξαχθεί χρησιμοποιώντας 10 συντελεστές φαίνεται στο σχήμα 2.4 - c, και η παραμένουσα κίνηση εδάφους, αφού έχει αφαιρεθεί ο παλμός, φαίνεται στο σχήμα 2.4 - d.



Σχήμα 2.4: Επεξήγηση της διαδικασίας αποσύνθεσης που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του τμήματος παλμού μιας κίνησης εδάφους (της fault-normal συνιστώσας από την καταγραφή του Northridge, Rinaldi, 1979).

Ένα παράδειγμα από χρονοϊστορίες ταχύτητας, επιτάχυνσης και μετατόπισης που σχετίζονται με έναν εξαγόμενο παλμό φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα. Ο παλμός που εξάγεται εμφανώς μοιάζει με τους παλμούς ταχύτητας και μετατόπισης, αγνοώντας την κίνηση υψηλής συχνότητας που επικρατεί στη χρονοϊστορία της επιτάχυνσης της αρχικής κίνησης του εδάφους.



Σχήμα 2.5: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης και αντίστοιχοι εξαγόμενοι παλμοί.

Χρησιμοποιώντας αυτή τη διαδικασία, ο παλμός μπορεί να εξαχθεί από οποιαδήποτε κίνηση εδάφους, εάν ο σημαντικός παλμός κατευθυντικότητας υπάρχει. Για μη παλμικές καταγραφές, ωστόσο, ο παλμός που εξάγεται είναι συνήθως ένα μικρό χαρακτηριστικό της κίνησης του εδάφους και η παραμένουσα κίνηση του εδάφους είναι σχεδόν ταυτόσημη με την αρχική. Για να κατηγοριοποιηθούν οι καταγραφές, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν οι ιδιότητες των εξαγόμενων παλμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτοματοποιημένη ταξινόμηση.

2.2 Δείκτης παλμικότητας Καρδούτσου (2017)

2.2.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Οι παλμικές σεισμικές καταγραφές αποτελούν μια ειδική κατηγορία εδαφικών κινήσεων, επειδή είναι ικανές να προκαλέσουν σημαντική ζημιά σε πλήθος κατασκευών. Η *Β. Καρδούτσου (2017)*, πρότεινε ένα νέο παλμικό δείκτη για τον χαρακτηρισμό των σεισμικών κινήσεων ως παλμικές ή μη. Ο δείκτης αυτός ισούται με τον συντελεστή συσχέτισης του σημαντικού παλμού και της αρχικής καταγραφής. Σύμφωνα με την *Καρδούτσου*, για όσες καταγραφές οι δείκτες PI είναι μεγαλύτεροι από 0.65, τότε οι καταγραφές χαρακτηρίζονται ως παλμικές, ενώ καταγραφές με δείκτη PI μικρότερο από 0.55 χαρακτηρίζονται ως μη-παλμικές. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε για ένα πλήθος από καταγραφές, οι οποίες έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές, μη παλμικές ή αμφιλεγόμενες και έγινε μια σύγκριση του προτεινόμενου νέου παλμικού δείκτη PI , με προηγούμενους δείκτες που έχουν προταθεί. Με βάση την εφαρμογή αυτή έγινε φανερό ότι ο προτεινόμενος PI, σχετίζεται με την ανελαστική απόκριση των κατασκευών, επειδή οι καταγραφές που χαρακτηρίζονται ως παλμικές, παράγουν, γενικά, ανελαστικές μετακινήσεις, οι οποίες είναι μεγαλύτερες από τις ελαστικές.

Η ταξινόμηση των καταγραφών ως παλμικές ή μη, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τους μηχανικούς, λόγω της επίδρασης των παλμών κατευθυντικότητας στο ελαστικό και το ανελαστικό φάσμα απόκρισης. Σύμφωνα με την ελαστική απόκριση, οι παλμοί κατευθυντικότητας παράγουν μια κωδωνόσχημη επαύξηση στο φάσμα απόκρισης γύρω από την περίοδο του παλμού T_p. Για την ανελαστική απόκριση, οι παλμοί κατευθυντικότητας παράγουν μεγάλες απαιτήσεις πλαστιμότητας μ για κατασκευές με δεσπόζουσα περίοδο κοντά στο μισό της περιόδου του παλμού $T_p/2$, μεγαλύτερες από την τιμή του αντίστοιχου μειωτικού συντελεστή R, η οποία θα ήταν αναμενόμενη σύμφωνα με τον κανόνα ίσων μετακινήσεων. Ωστόσο, για κατασκευές με περίοδο ίση ή μεγαλύτερη από την περίοδο του παλμού, ο λόγος μ/R είναι γενικά κοντά στη μονάδα και ισχύει ο κανόνας των ίσων μετατοπίσεων.

Οι παλμοί της ταχύτητας που εμπεριέχονται στις καταγραφές εδαφικής κίνησης είναι συνήθως ορατοί στη χρονοϊστορία της ταχύτητας. Πολλοί ερευνητές παρουσίασαν ποικίλες μεθόδους για προσομοίωση αυτών, κυρίως χρησιμοποιώντας την ανάλυση κυμάτων.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ένας νέος δείκτης παλμικότητας PI, και υλοποιείται συσχέτιση του δεσπόζοντος παλμού και της αρχικής πραγματικής καταγραφής. Για την μαθηματική αναπαράσταση του δεσπόζοντος παλμού, εφαρμόστηκε το κύμα των Μαυροειδή και Παπαγεωργίου. Ο νέος παλμικός δείκτης, συγκρίνεται με την ταξινόμηση κατά *Baker*, δηλαδή με τις καταγραφές μέγιστης εδαφικής ταχύτητας (PGV)>30 cm/s. Σε πολλές περιπτώσεις ο νέος δείκτης έρχεται σε αντίθεση με την ταξινόμηση κατά *Baker*.

2.3 Δείκτες παλμικότητας - Βιβλιογραφική αναφορά

2.3.1 Παλμικός δείκτης – Baker (2007)

Η έως τώρα ταξινόμηση των εδαφικών κινήσεων ως παλμικές ή μη-παλμικές, βασιζόταν στην υπόθεση ότι η ενέργεια μιας παλμικής εδαφικής κίνησης συγκεντρώνεται περισσότερο στην διάρκεια του παλμού *(Baker 2007)*. Αυτό υπονοεί ότι η εισαγόμενη παραμόρφωση της κατασκευής αποσβήνει ενέργεια σε ένα ή σε μερικούς πλαστικούς κύκλους.

Έχουν προταθεί ποικίλα κριτήρια από διαφορετικούς ερευνητές με βάση αυτή την ταξινόμηση. Ο *Baker (2007)* πρότεινε ένα παλμικό δείκτη PI, ο οποίος λαμβάνει υπόψη το λόγο της μέγιστης ταχύτητας εδάφους (PGV), της παραμένουσας κίνησης, που είναι η χρονοϊστορία που υπολογίζεται από την εξαγωγή του παλμού της ταχύτητας από την αρχική εδαφική κίνηση, προς το PGV της αρχικής καταγραφής, καθώς και το λόγο των ενεργειών των παραμενουσών προς τις αρχικές καταγραφές. Εκείνες οι μεταβλητές αναφέρονται ως PGV ratio και ως Energy ratio, αντίστοιχα. Η ενέργεια υπολογίζεται από την ολοκλήρωση του τετραγώνου της ταχύτητας του εδάφους.

Όπως έχει αναφερθεί ήδη σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο δείκτης PI κατά Baker, δίνεται από τη σχέση:

$$PI = \frac{1}{1 + e^{-2.3+14.6(PGVratio)+20.5(Energyratio)}} \qquad \text{Εξίσωση (2.3)}$$

και λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Έτσι, εάν PI > 0.85, η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως παλμική και εάν PI < 0.15, η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως μη-παλμική. Για ενδιάμεσες τιμές, η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως αμφιλεγόμενη.

2.3.2 Παλμικός δείκτης - Zhai et al. (2013)

Ένας, παρόμοιος δείκτης προτάθηκε και από τους *Zhai et al. (2013)* και βασίζεται στο λόγο της ενέργειας που περιέχεται στον παλμό της ταχύτητας και στη συνολική ενέργεια της καταγραφής. Ο παλμός υπολογίζεται σύμφωνα με το μοντέλο που προτείνεται από τον *Dickinson and Gavin (2011)*, σύμφωνα με το οποίο υπολογίζεται η αθροιστική ενέργεια $E_{(t)}$ μιας εδαφικής κίνησης στη χρονική στιγμή t, σύμφωνα με τη σχέση:

$$E(t) = \frac{\int_0^t u^2(t)dt}{\int_0^\infty u^2(t)dt} \qquad \text{Εξίσωση (2.4)}$$

Όπου u(t) αντιπροσωπεύει τις χρονοϊστορίες της ταχύτητας. Επίσης, η ενέργεια που περιέχεται σε ένα παλμό ταχύτητας, συμβολίζεται με E_p και ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_p = E(t_e) - E(t_s) \qquad \text{Εξίσωση (2.5)}$$

στην οποία t_s, t_e συμβολίζουν το χρόνο έναρξης και το χρόνο λήξης του παλμού, αντίστοιχα. Έτσι, η σχετική ενέργεια του παλμού E_p, χρησιμοποιείται ως δείκτης παλμικότητας. Εάν Ep>0.3, τότε η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως παλμική.

2.3.3 Παλμικός δείκτης - Chang et al. (2016),

Μια άλλη μέθοδος που, επίσης βασίζεται στο περιεχόμενο ενέργειας της καταγραφής, προτάθηκε από τον *Chang et al. (2016)*, και αποτελεί βελτίωση της μεθόδου του *Zhai et al. (2013)*. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το εύρος του παλμού και η θέση του στη χρονοϊστορία της καταγραφής προσδιορίζονται από το εύρος του παλμικού μισού κύκλου που έχει τη μέγιστη σεισμική ενέργεια. Ο προτεινόμενος παλμικός δείκτης PI ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που περιέχεται στον κυρίαρχο παλμό της συνολικής σεισμικής ενέργειας. Εάν ο PI> 0.34, τότε η καταγραφή θεωρείται παλμική. Η μαθηματική αναπαράσταση του παλμού της ταχύτητας και ο τρόπος της ενέργειας υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως στη μέθοδο του *Zhai et al. (2013)*.

2.4 Μεθοδολογία Καρδούτσου (2017)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στη μέθοδο κατά *Μίμογλου et al. (2014)*, ο δεσπόζων παλμός επιλέγεται από ένα σύνολο επιλέξιμων παλμών με βάση το κριτήριο της μεγαλύτερης συσχέτισης με την αρχική καταγραφή. Αυτό το σκεπτικό επεκτείνεται, έτσι ώστε να οριστεί ένας νέος δείκτης PI, για το χαρακτηρισμό της καταγραφής ως παλμική ή μη, με βάση τον συντελεστή συσχέτισης r, και επομένως, τίθεται PI = r.

Η συνάρτηση συσχέτισης ανάμεσα σε δύο συναρτήσεις f, g με μια χρονική καθυστέρηση, ορίζεται ως:

$$(f * g)(t_d) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t) g(t + t_d) dt \qquad \text{Εξίσωση (2.6)}$$

Έτσι, ο συντελεστής συσχέτισης r, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$r = \frac{\sum_i (f(t_i) - \tilde{f})(g(t_i - t_d) - \tilde{g})}{\sqrt{\left[[\sum_i (f(t_i) - \tilde{f})^2][\sum_i (g(t_i - t_d) - \tilde{g})^2 \right]}} \qquad \text{Εξίσωση (2.7)}$$

όπου, με $\tilde{f}, \tilde{g}$ συμβολίζονται οι μέσες τιμές των συναρτήσεων f,g

Στην περίπτωσή μας, ο συντελεστής συσχέτισης r, υπολογίζεται για τη χρονοϊστορία της ταχύτητας της αρχικής καταγραφής $u_g(t)$ και την χρονοϊστορία της ταχύτητας του παλμού $u_p(t)$ και για χρονική καθυστέρηση t_d ίση με εκείνη το χρονική στιγμή που ξεκινά ο παλμός. Ως συντελεστής συσχέτισης λαμβάνεται το μέγιστο μεταξύ της χρονοϊστορίας της εδαφικής ταχύτητας και των προσομοιωμένων παλμών για όλα τα πιθανά χρονικά περιθώρια.

Η διαδικασία αποτελείται από μετατόπιση του παλμού κατά μήκος της χρονοϊστορίας της εδαφικής ταχύτητας, από την αρχή μέχρι το τέλος της διάρκειάς της, και το σημείο όπου η συσχέτιση του παλμού και της εδαφικής ταχύτητας παρουσιάζουν τη μέγιστη τιμή τους, αποτελεί τη θέση του παλμού στη χρονοϊστορία της εδαφικής κίνησης.

Θέτοντας PI = r , πρέπει να οριστούν δύο ακραίες τιμές, οι $PI_{cr,max}$, $PI_{cr,min}$, τέτοιες ώστε εάν το $PI > PI_{cr,max}$, η καταγραφή θεωρείται παλμική, ενώ εάν $PI < P_{icr,min}$τότε η καταγραφή θεωρείται μη παλμική. Ύστερα από μια βαθμονόμηση του μοντέλου, η οποία βασίστηκε στο χαρακτηρισμό του Baker (2007), προτείνονται οι παρακάτω τιμές, $PI_{cr,max}$= 0.65 και $PI_{cr,min}$= 0.55. Στο εξής, εάν PI> 0.65, οι καταγραφές θεωρούνται παλμικές, ενώ αν PI< 0.55, οι καταγραφές θεωρούνται ως μη-παλμικές. Η μέθοδος που προτείνεται, έχει και εκείνη σχέση με την ανελαστική απόκριση των μονοβάθμιων κατασκευών.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, παρόλο που η πλειονότητα των παλμικών καταγραφών αποδίδεται στα φαινόμενα κοντινού πεδίου (παλμοί κατευθυντικότητας), σημαντικοί παλμοί μπορεί να προκληθούν κι από άλλα αίτια, όπως είναι φαινόμενα βάσης, συνθήκες εδάφους, βαθιά διάρρηξη, παραμένουσα μετακίνηση και πολλά ακόμη. Υπό την έννοια αυτή, ο *Baker (2007)*, θεώρησε ότι καταγραφές με σημαντικά παλμικά

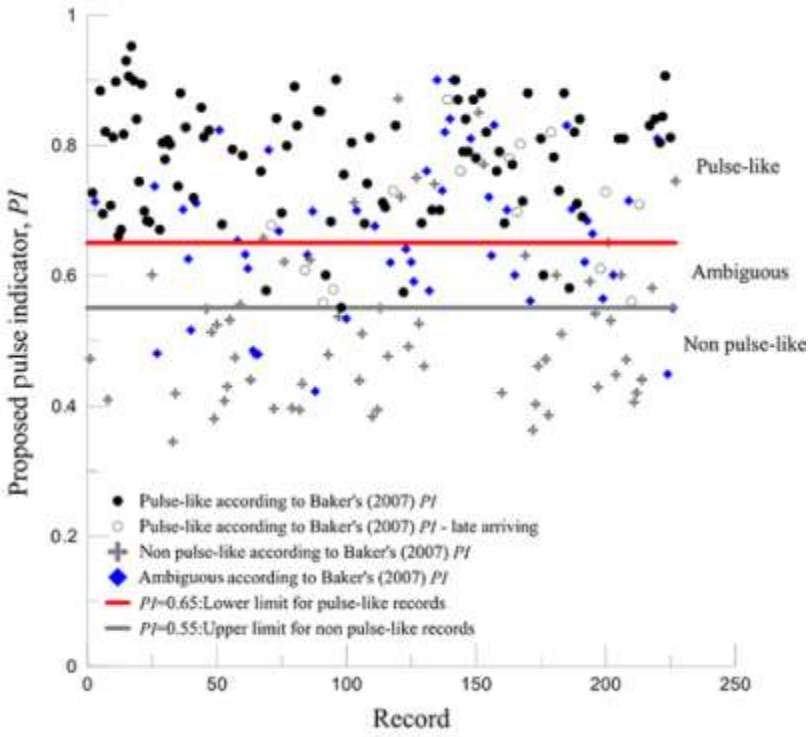
χαρακτηριστικά, τα οποία πιθανώς προέρχονται από φαινόμενα διαφορετικά από την κατευθυντικότητα, θα πρέπει να μην θεωρηθούν παλμικές. Για το λόγο αυτό, οι καταγραφές με παλμούς που φθάνουν αργά, ταξινομούνται ως μη παλμικές, ακόμα και αν έχουν μεγάλο δείκτη παλμικότητας. Στη μέθοδο των *Καρδούτσου (2017)*, δόθηκε έμφαση στην άποψη ότι τα αποτελέσματα των ισχυρών παλμών που περιέχονται στην εδαφική κίνηση στο ελαστικό και στο ανελαστικό φάσμα απόκρισης είναι ανεξάρτητα από την αιτία δημιουργίας των παλμών. Για το λόγο αυτό, υιοθετήθηκε το κριτήριο του Baker για τους παλμούς που φθάνουν αργά, και όλες οι καταγραφές με $PI>PI_{cr,max}$, θεωρήθηκαν ως παλμικές.

Ο προτεινόμενος παλμικός δείκτης μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε καταγραφή με γνωστή τη μαθηματική έκφραση του κυρίαρχου παλμού της. Ταυτόχρονα, οποιαδήποτε μορφή κύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μαθηματική έκφραση του κυρίαρχου παλμού. Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με την *Καρδούτσου (2017)*, χρησιμοποιήθηκε το κύμα σύμφωνα με τους M&P (2003), όπως ορίστηκε από την εφαρμογή της μεθόδου που προτάθηκε από τον *Μίμογλου et al (2014)*. Η μέθοδος αυτή παράγει ένα κυρίαρχο παλμό για κάθε καταγραφή, ανεξάρτητα από το αν είναι παλμική ή όχι.

2.5 Αξιολόγηση μεθοδολογίας

Η προτεινόμενη μέθοδος, εφαρμόστηκε, αρχικά, για την εκτίμηση του παλμικού δείκτη στις επιλεγμένες καταγραφές όπου εφαρμόστηκε κι η αντίστοιχη μέθοδος του *Baker (2007),* για τις ίδιες κατευθύνσεις της εδαφικής κίνησης. Τα αποτελέσματα, συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από τη μέθοδο του *Baker (2007),* και παρουσιάζονται συνολικά στο παρακάτω διάγραμμα, για 221 καταγραφές.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, οι 108 καταγραφές διαθέτουν $PI_{Baker}> 0.85$. Αυτές οι καταγραφές θα πρέπει να χαρακτηρίζονται ως παλμικές σύμφωνα με το κριτήριο του *Baker*. Ωστόσο, μόνο 91 από αυτές (που υποδηλώνονται με συμπαγείς μαύρους κύκλους) θεωρούνται τελικά ως παλμικές κατά *Baker (2007),* ενώ οι υπόλοιπες 17 (συμβολίζονται με ανοιχτούς κύκλους) αποκλείστηκαν, καθώς περιείχαν όσους παλμούς έφτασαν αργά στην καταγραφή. Οι μη-παλμικές καταγραφές, με $PI_{Baker}< 0.15$, σημειώνονται με γκρι σταυρούς και οι διφορούμενες, για τις οποίες $0.15 <PI_{Baker}< 0.85$, συμβολίζονται με μπλε χρώμα. Οι καταγραφές με παλμούς που φτάνουν αργά δεν αποκλείονται, επομένως όλα τα σημεία συμβολίζονται είτε με συμπαγείς είτε με ανοικτούς κύκλους. Οι κύκλοι θεωρούνται παλμικοί με βάση την μεθοδολογία του Baker (2007).

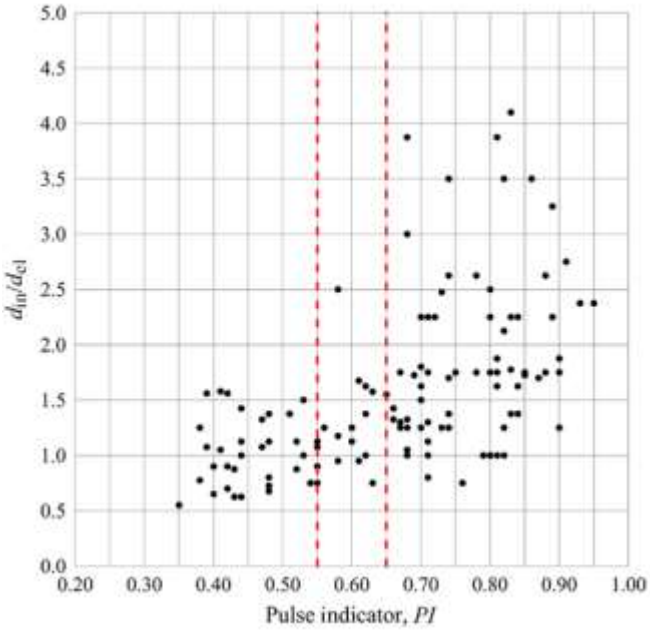


Σχήμα 2.6: Σύγκριση των δεικτών παλμικότητας Καρδούτσου (2017) και Baker (2007)

Από το σχήμα φαίνεται ότι, για την πλειονότητα των καταγραφών, σύμφωνα με το νέο δείκτη PI, παρατηρείται παρόμοια ταξινόμηση των καταγραφών με τον δείκτη του *Baker (2007)*. Συγκεκριμένα, η πλειονότητα των καταγραφών που ταξινομούνται ως παλμικές με βάση τον δείκτη Baker PI (που υποδηλώνεται από συμπαγείς και ανοιχτούς κύκλους) εμφανίζονται με τιμή του νέου δείκτη PI μεγαλύτερο από το όριο του $PI_{cr,max}$= 0.65, έτσι ταξινομούνται επίσης ως παλμικές από τη νέα προσέγγιση. Ομοίως, η πλειονότητα των καταγραφών που ταξινομούνται ως μη παλμικές βάση του Baker (που υποδηλώνεται με γκρι σταυρούς) έχουν μια τιμή του νέου PI μικρότερη από το όριο του $PI_{cr,min}$= 0.55, επομένως ταξινομούνται επίσης ως μη παλμικές από την προτεινόμενη ταξινόμηση**.** Ενδιαφέρον στοιχείο είναι ο περιορισμός της ζώνης των καταγραφών που θεωρούνται διφορούμενες σύμφωνα με τη νέα προσέγγιση, σε σχέση με το εύρος της αντίστοιχης ζώνης κατά τον Baker.

Τα αποτελέσματα σύγκρισης της ταξινόμησης κατά *Καρδούτσου (2017)* με τα αντίστοιχα αποτελέσματα κατά *Baker (2007)*, δείχνουν ότι για την πλειοψηφία των καταγραφών είναι σε συμφωνία οι δύο μέθοδοι ταξινόμησης. Σε περιπτώσεις όπου διαφέρουν οι δύο μέθοδοι, τότε η προτεινόμενη στο κεφάλαιο αυτό μέθοδος οδηγεί σε πολύ πιο λογικά αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης κατά *Καρδούτσου (2017)*, ελέγχθηκαν επίσης και ως προς την ανελαστική απόκριση των μονοβάθμιων κατασκευών. Σύμφωνα με τους *Iervolino και Cornell (2008)*, σχετικά με την ανελαστική απόκριση, οι εδαφικές κινήσεις που περιέχουν ισχυρό παλμό μπορεί να επηρεάσουν κατασκευές, με κυρίαρχη περίοδο κοντά στο ήμισυ της περιόδου παλμού, έχοντας απαίτηση πλαστιμότητας μ μεγαλύτερη από την τιμή του αντίστοιχου μειωτικού συντελεστή R, ο οποίος δεν θα αναμενόταν σύμφωνα με τον κανόνα ίσων μετατοπίσεων (μ=R).



Σχήμα 2.7: Ο λόγος της ανελαστικής προς την ελαστική μετατόπιση din/del ως προς τον προτεινόμενο δείκτη *Καρδούτσου (2017).*

Ισχύουν οι σχέσεις:

$din / del = \mu / R$ Εξίσωση (2.8)

$din / del = 1.0$ (κανόνας ίσων μετατοπίσεων) Εξίσωση (2.9)

Στο παραπάνω σχήμα είναι εμφανές ότι οι καταγραφές με τιμές PI> 0.65, που θεωρήθηκαν παλμικές σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο, παράγουν ανελαστικές μετατοπίσεις, που είναι κατά μέσο όρο μεγαλύτερες από 1.5 φορά των αντίστοιχων ελαστικών και η τιμή αυτή αυξάνεται με την αύξηση του παλμικού δείκτη. Ως εκ τούτου, οι παλμικές καταγραφές παράγουν, γενικά, μεγαλύτερες απαιτήσεις πλαστιμότητας και ο προτεινόμενος δείκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα μέτρο αυτής της απαίτησης. Αντίθετα, οι καταγραφές με δείκτη PI< 0.55, που θεωρήθηκαν ως μη-παλμικές, παρουσιάζουν λόγο ανελαστικών προς ελαστικές μετατοπίσεις, χαμηλότερο από 1.5 με μια μέση τιμή κοντά στη μονάδα, και έτσι ο κανόνας ίσων μετατοπίσεων ισχύει για τις καταγραφές εκείνες εν γένει.

Υπάρχουν λίγες περιπτώσεις στις οποίες η προτεινόμενη μέθοδος δεν συμφωνεί με τα αποτελέσματα του *Baker (2007)*. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η νέα μέθοδος δείχνει ότι οι καταγραφές που θεωρούνται παλμικές, σύμφωνα με τον *Baker (2007)* θεωρούνται ως μη παλμικές. Με ανάλυση των καταγραφών αυτών, από τη γραφική τους παράσταση γίνεται φανερό ότι οι καταγραφές περιέχουν ένα σημαντικό, κυρίαρχο παλμό και επομένως, σωστά θεωρήθηκαν σύμφωνα με τη νέα μέθοδο ως παλμικές.

Συμπεραίνουμε επομένως, ότι ο δείκτης PI *Καρδούτσου (2017)* σχετίζεται με την ανελαστική απόκριση των κατασκευών. Αναλύσεις σε μονοβάθμιους ταλαντωτές, οι οποίοι έχουν περίοδο ίση με το μισό της περιόδου του παλμού, δείχνουν ότι οι καταγραφές που χαρακτηρίζονται ως παλμικές, εν γένει οδηγούν σε ανελαστικές μετατοπίσεις μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες ελαστικές μετατοπίσεις. Η τιμή των

ανελαστικών μετατοπίσεων αυξάνεται με την αύξηση του δείκτη PI. Αντίθετα, ο κανόνας των ίσων μετατοπίσεων ισχύει γενικά για καταγραφές που χαρακτηρίζονται ως μη-παλμικές.

Κλείνοντας, στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι προφανώς, η τελική τιμή για τον δείκτη PI εξαρτάται από το κύμα που έχουμε υποθέσει για την μαθηματική αναπαράσταση του κυρίαρχου παλμού της εδαφικής κίνησης. Ωστόσο, η εξάρτηση αυτή δεν είναι σημαντική, ώστε να αλλάξει την κατηγοριοποίηση της καταγραφής, με εξαίρεση τις περιπτώσεις όπου έχουμε καταγραφές με δείκτη κοντά στις οριακές τιμές που ορίζονται από την μέθοδο. Από διάφορες εφαρμογές και συγκρίσεις ανάμεσα στους δείκτες που προκύπτουν, δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο κύμα που να οδηγεί σε μεγαλύτερο παλμικό δείκτη PI, και έτσι να οδηγεί σε καλύτερη συσχέτιση με την αρχική καταγραφή. Στις περισσότερες περιπτώσεις η τιμή του PI που προκύπτει από τη χρήση του κύματος M&P είναι μεγαλύτερη από εκείνη που προκύπτει με χρήση του κυματιδίου Daubechies 4^{ης} τάξης. Έτσι, επειδή το κύμα των M&P παρουσιάζει καλύτερη συσχέτιση με την αρχική καταγραφή στις περισσότερες περιπτώσεις, για το λόγο αυτό μπορούμε να πούμε ότι γενικά το κύμα M&P αποτελεί μια καλύτερη προσέγγιση του παλμού κατευθυντικότητας από την αντίστοιχη του κυματιδίου Daubechies.

2.6 Παράμετροι παλμού κοντινού πεδίου

Για τον υπολογισμό της διάρκειας ενός παλμού λαμβάνεται υπόψη η κυρίαρχη περίοδος αυτού, Tp. Ο μη σταθερός κυματοειδής παλμός (versatile wavelet) είναι κατάλληλος να αντιπροσωπεύσει διάφορα επίπεδα διαρκείας, αφού περιλαμβάνει στον υπολογισμό του μία παράμετρο συνδεδεμένη με τον αριθμό των παλμικών κύκλων. Επιπλέον πλεονέκτημα που προσφέρει αυτή η κυματομορφή κατά *Μαυροειδή και Παπαγεωργίου (1975)* είναι το γεγονός ότι πρόκειται για ένα προϊόν ημιτονοειδούς περιοδικής συναρτήσεως με κωδωνόσχημη περιβάλουσσα. Πρόκειται, δηλαδή, για μία αρμονική ταλάντωση, κατά την οποία η διαδικασία διεξαγωγής της περιόδου είναι απλή. Η κυματομορφή (wavelet) εξαρτάται από τις παρακάτω παραμέτρους:

1. Την κυρίαρχη περίοδο του παλμού, Tp
2. Το εύρος του παλμού, A
3. Τον αριθμό των παλμικών κύκλων, γ, και
4. Τη γωνία του αρχικού παλμικού σήματος, φ.

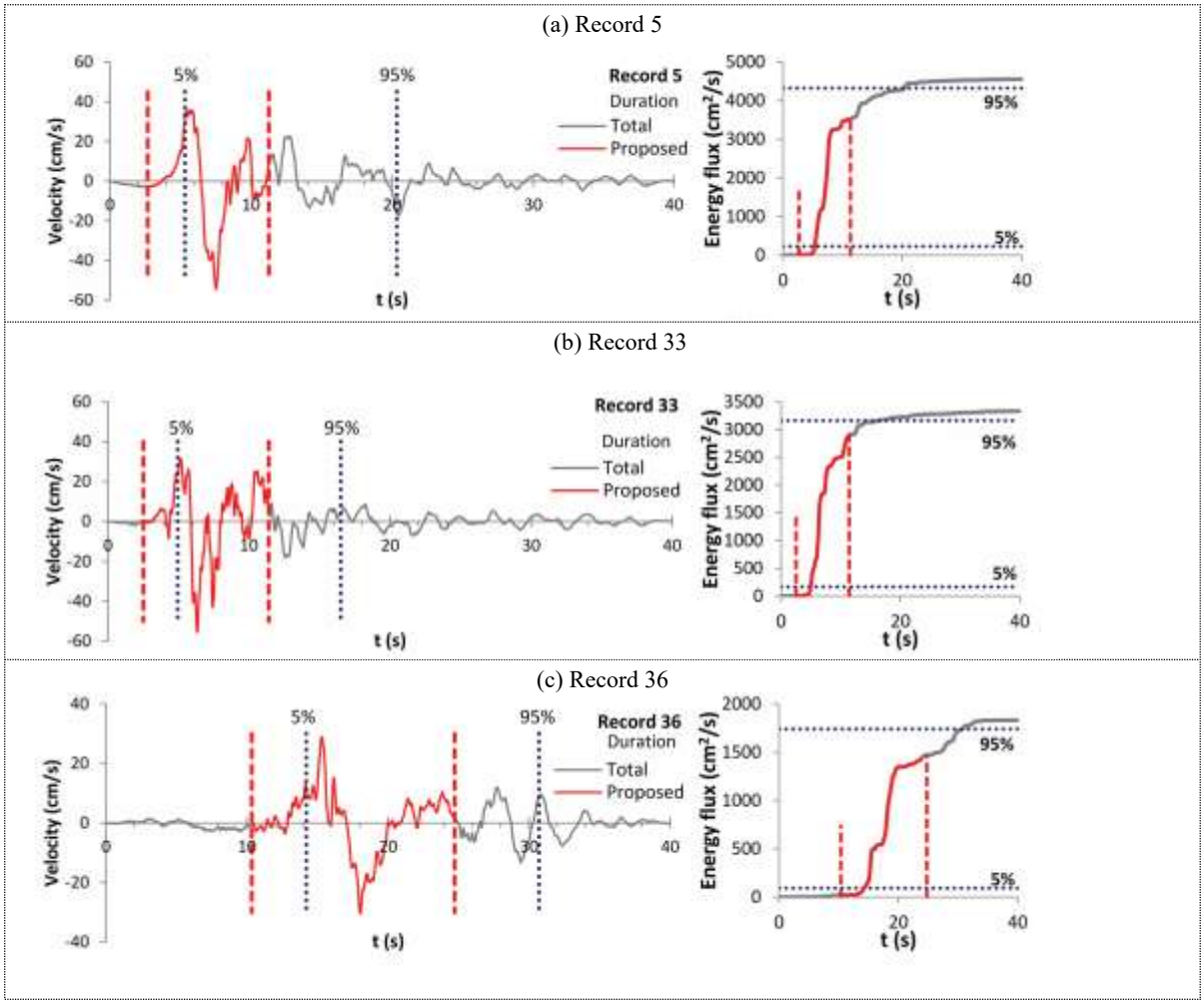
2.7 Προσδιορισμός χρονικής διάρκειας παλμού

Για την εφαρμογή της παρακάτω προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι απαραίτητος ο ορισμός του θεμελιώδους παλμού και των αντίστοιχων παραμέτρων του. Για την ανάλυση και μοντελοποίηση των εδαφικών παλμικών κινήσεων χρησιμοποιείται η μεθοδολογία που αφορά στου παλμούς κυματοειδούς μορφής (wavelet analysis). σημειώνεται πως σε μερικές προτεινόμενες μεθοδολογίες, το αρχικό κυματίδιο που προτείνεται για την προσομοίωση του αυθεντικού παλμού ορίζεται από προκαθορισμένο αριθμό ημικυκλίων, ο οποίος σε συνδυασμό με τη χρονική περίοδο του κυματιδίου καθορίζει την περίοδο του προς εξέταση παλμού. Κατά αυτόν τον τρόπο η διάρκεια του εξαγώμενου παλμού είναι περιορισμένη και σε πολλές

περιπτώσεις δεν αντιστοιχεί ακριβώς στη διάρκεια του αρχικού παλμού (original pulse). Αυτό είναι ένα μειονέκτημα που καθιστά τη θεωρία του *Baker (2007)* μη ακριβή και ανεπαρκής για ένα σύνολο περιπτώσεων παλμών κοντινού πεδίου, καθώς υποτιμά τη χρονική διάρκεια του παλμού, κάτι που μπορεί να επηρεάσει και την αντίστοιχη περικομμένη διάρκεια της αντίστοιχης καταγραφής (truncated record). Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, η προτεινόμενη μεθοδολογία του Baker πραγματεύεται το κυματίδιο Daubechies τετάρτης τάξεως (Daubechies wavelet) με προκαθορισμένο σχήμα και αριθμών ημικυκλίων, όπως ακριβώς σημειώνεται και στη θεωρία Καρδούτσου.

Οι αναλύσεις στην παρούσα διπλωματική εργασία επιτεύχθηκαν σύμφωνα με τη θεωρία των *Μαυροειδή και Παπαγεωργίου*. Επιλέχθηκε αυτού του είδους το κυματίδιο για την αναπαράσταση του παλμού, καθώς μπορεί να προσαρμοστεί σε διάφορα επίπεδα χρονικής διαρκείας αφού κατέχει συγκεκριμένη παράμετρο που αφορά στον αριθμό των κύκλων του παλμού, γ. Για τον καθορισμό των παραμέτρων που προτείνει η μεθοδολογία M&P, χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία που παρουσιάζεται στη μεθοδολογία *Μίμογλου (2014)*. Έπειτα από αυτή τη διαδικασία η διάρκεια του μειωμένου παλμού ισοδυναμεί με τη διάρκεια του κυρίαρχου παλμού της εκάστοτε καταγραφής.

Επιπλέον πλεονέκτημα χρήσης της μεθοδολογίας *Μαυροειδή και Παπαγεωργίου* αποτελεί το γεγονός ότι το κυματίδιο που εφαρμόζεται είναι προϊόν συνημιτονοειδούς περιοδικής συνάρτησης με κωδωνόσχημη περιβάλουσσα. Τα όρια της καμπύλης μπορούν να θεωρηθούν οριοθετημένα στα σημεία όπου εξασθενεί η αρμονική συνάρτηση και εξομαλύνεται η αρχική γραμμή των στιγμιαίων διακοπών. Συμπερασματικά, τα άκρα της προτεινόμενης περικομμένης χρονικής διάρκειας βρίσκονται στα σημεία όπου το γράφημα- διάγραμμα της ενεργειακής ροής (energy flux) παρουσιάζει οριζόντιο βήμα μηδενικής κλίσης. Για αυτό το λόγο, σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία, δεν παρουσιάζεται καμία αντιστάθμιση ή σφάλμα αναφορικά των ορίων της περικομμένης διάρκειας. Σε άλλη περίπτωση, όπως για παράδειγμα κατά τη θεωρία *Trifunac & Bray*, όπου η χρονική διάρκεια του περικομμένου παλμού περιορίζεται μεταξύ αυθαίρετων ορίων των 5% και 95% της συνολικής ενεργειακής ροής, εμφανίζονται βασικά σφάλματα, τα οποία δεν είναι εύκολο να εξαλειφθούν. Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζονται συγκριτικά οι δύο θεωρίες εξαγωγής χρονικής διάρκειας του περικομμένου παλμού. Μεταξύ των κόκκινων διακεκομμένων γραμμών τοποθετείται η χρονική διάρκεια σύμφωνα με τη θεωρία *Μαυροειδή και Παπαγεωργίου*, ενώ μεταξύ των γκρι γραμμών παρουσιάζεται η προτεινόμενη χρονική διάρκεια σύμφωνα με τη θεωρία *Trifunac & Bray*.



Σχήμα 2.8: Διαγραμματική σύγκριση μεταξύ προτεινόμενων μεθοδολογιών εξαγωγής χρονικής διάρκεια του περικομμένου παλμού (truncated record)

2.8 Μεθοδολογία Μίμογλου (2014)

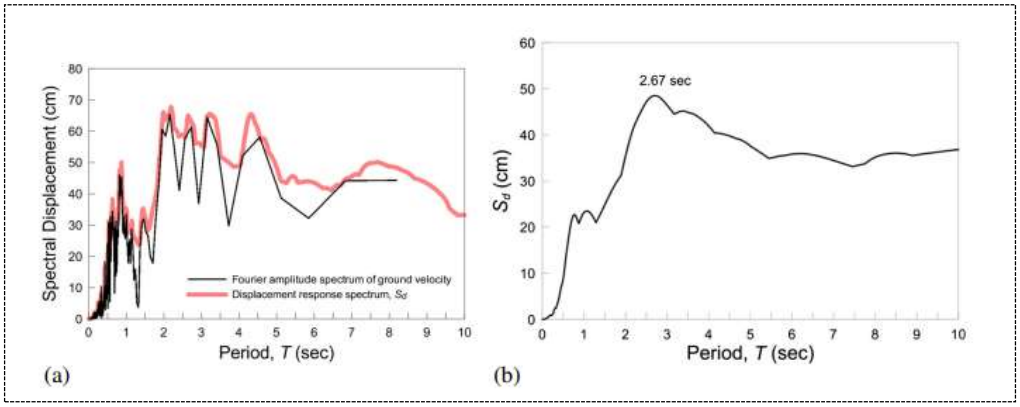
Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστεί μια νέα μεθοδολογία με βάση την οποία καθορίζονται οι παράμετροι του παλμού που περιέχονται σε καταγραφές που είναι παλμικές. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, το κύμα των *Μαυροειδή και Παπαγεωργίου (M&P) (2003)*, χρησιμοποιήθηκε για την μαθηματική αναπαράσταση του παλμού, όμως με τη μεθοδολογία που προτάθηκε από τον *Μίμογλου (2014)*, η μεθοδολογία των *Μαυροειδή και Παπαγεωργίου (M&P) (2003),* τροποποιείται κατάλληλα, ώστε να εφαρμοστεί και για άλλους τύπους κυμάτων. Η νέα μεθοδολογία εισάγει ένα νέο μέγεθος, το γινόμενο των φασμάτων απόκρισης της ταχύτητας και της μετατόπισης, ($S_d x S_v$). Η περίοδος του παλμού καθορίζεται από το μέγιστο του προαναφερθέντος φάσματος. Ταυτόχρονα, εφαρμόζεται μια νέα σχέση μεταξύ της αθροιστικής απόλυτης μετατόπισης (cumulative absolute displacement-CAD) του κύματος και του μέγιστου φασματικού εύρους αυτού.

2.9 Ορισμός παλμικών παραμέτρων

2.9.1 Περίοδος του παλμού

Μια κοινή πρακτική είναι να θεωρείται η περίοδος T_p του παλμού της ταχύτητας, ότι είναι ίση με τη μέγιστη τιμή της ψευδοταχύτητας στο φάσμα απόκρισης για απόσβεση ίση με 5%. Σύμφωνα με διάφορες εφαρμογές, έχει βρεθεί ότι η υπόθεση αυτή για την περίοδο του παλμού οδηγεί σε σφάλματα. Δηλαδή, η περίοδος του παλμού σύμφωνα με τους *M&P*, αντιπροσωπεύει καλύτερα τον παλμό που εμπεριέχεται στην εδαφική κίνηση, ενώ η περίοδος του κύματος που προτείνεται από την εν λόγω μεθοδολογία μέσω του μεγίστου στο φάσμα της ψευδοταχύτητας, αντιστοιχεί σε μια, υψηλής-συχνότητας, συνιστώσα της κίνησης και όχι στον κύριο παλμό της ταχύτητας.

Μια εναλλακτική είναι να υπολογισθεί η T_p, με βάση το φάσμα απόκρισης της μετατόπισης, υπό κάποιες προϋποθέσεις. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο παλμός ταχύτητας είναι εμφανής στη χρονοϊστορία της ταχύτητας του εδάφους, θα μπορούσε κανείς να θεωρήσει εύλογο τον καθορισμό της περιόδου T_p από τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης μετατόπισης για απόσβεση 5%, αντί για το φάσμα της ψευδο-ταχύτητας. Πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι μπορεί η χρήση του φάσματος απόκρισης μετατόπισης να είναι προβληματική. Ένα σημαντικό ζήτημα είναι ότι η κορυφή του φάσματος απόκρισης μετατόπισης, μπορεί να επηρεαστεί από την παρουσία σφαλμάτων μεγάλης διάρκειας στην καταγραφή της εδαφικής επιτάχυνσης. Επιπλέον, η κορυφή του φάσματος απόκρισης μετατόπισης μπορεί να αντιστοιχεί σε έναν παλμό ταχύτητας με μεγάλη περιοχή αλλά μικρό εύρος, ο οποίος μπορεί να μην είναι ο κυρίαρχος παλμός. Επιπλέον, αυτός ο εναλλακτικός ορισμός του T_p μέσω της κυρίαρχης περιόδου στο φάσμα απόκρισης της μετατόπισης δεν μπορεί επίσης να γενικευτεί, καθώς υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες δεν είναι έγκυρος.



Σχήμα 2.9: Για μια δεδομένη καταγραφή:

a) σύγκριση του φάσματος εύρους Fourier της ταχύτητας εδάφους με το φάσμα απόκρισης μετατόπισης για μηδενική απόσβεση και,

b) φάσμα απόκρισης μετατόπισης για 5% απόσβεση

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ούτε το φάσμα απόκρισης της ψευδοταχύτητας ούτε το φάσμα απόκρισης μετατόπισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν γενικά για τον προσδιορισμό της περιόδου του παλμού ταχύτητας, επειδή υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες οι δύο προσεγγίσεις οδηγούν σε σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα. Αυτό

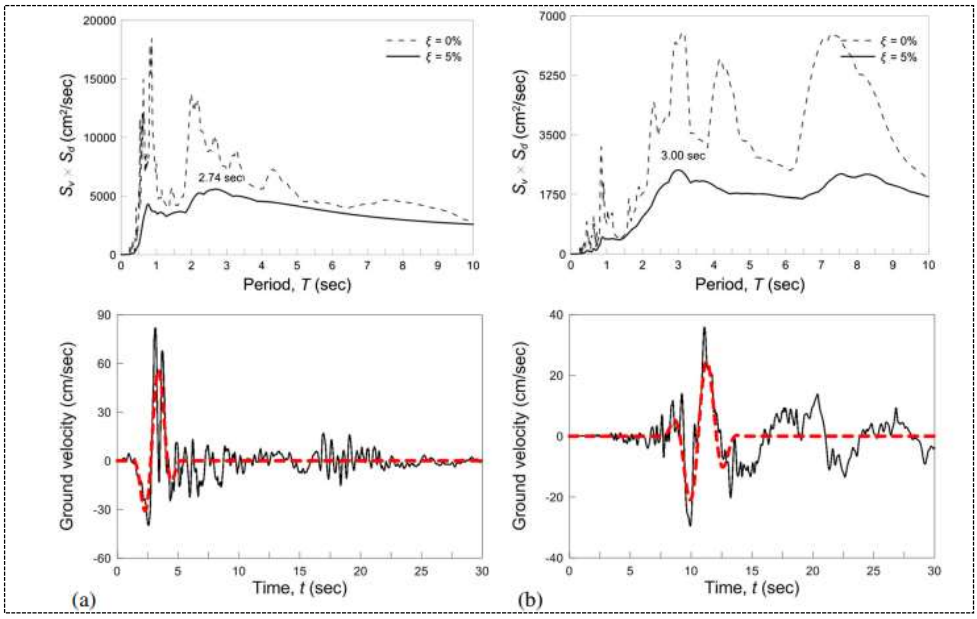
συμβαίνει διότι πολλές παλμικές κινήσεις εδάφους επηρεάζονται από περισσότερους από έναν παλμούς διαφορετικών περιόδων.

Έτσι, προτείνεται μια νέα μεθοδολογία που επιτρέπει τον προσδιορισμό του κυρίαρχου παλμού μέσω ενός συνδυασμού των φασμάτων απόκρισης της ταχύτητας και μετατόπισης. Η νέα προσέγγιση βασίζεται στην παρατήρηση ότι, επειδή ο παλμός που περιέχεται σε μια κίνηση του εδάφους επηρεάζει και την εδαφική επιτάχυνση και την ταχύτητα, σε διαφορετικό βαθμό όμως, θα πρέπει να επικρατήσει η περίοδος παλμού T_p στην ολοκλήρωση αυτών των δύο χρονοϊστοριών. Επιπλέον, τα στοιχεία υπερβολικά υψηλής συχνότητας ή χαμηλής συχνότητας που περιέχονται στην επιτάχυνση του εδάφους και την ταχύτητα του εδάφους εξασθενούν. Κατά συνέπεια, η κορυφή του φάσματος εύρους Fourier της σύνθεσης επιτάχυνσης-ταχύτητας, πρέπει να αντιστοιχεί στην περίοδο του κυρίαρχου παλμού που περιέχεται στην κίνηση του εδάφους.

Είναι γνωστό ότι το εύρος του φάσματος Fourier στην ολοκλήρωση είναι ίσο με το γινόμενο του εύρους του φάσματος του Fourier των δύο σημάτων που συντίθενται. Αντίθετα, το χωρίς απόσβεση φάσμα ταχύτητας $S_{v,0}$ περιέχει το εύρος του φάσματος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης και το χωρίς απόσβεση φάσμα της μετατόπισης $S_{d,0}$, περιέχει το εύρος του φάσματος Fourier της εδαφικής ταχύτητας. Έτσι, με χρήση των ιδιοτήτων αυτών, το εύρος του φάσματος Fourier κατά την ολοκλήρωση προσεγγίζεται από το γινόμενο $S_{d,0}xS_{v,0}$, το οποίο θα αναφέρεται παρακάτω ως γινόμενο φάσματος για μηδενική απόσβεση, S_dxS_v. Συνεπώς, η περίοδος του παλμού της ταχύτητας μπορεί να προσδιοριστεί από την κορυφή του φάσματος S_dxS_v.

Παρά τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, προτείνεται η περίοδος του παλμού να ορίζεται από το γινόμενο των φασμάτων S_dxS_v για απόσβεση 5%, το οποίο ορίζεται ως το γινόμενο $S_{d,5}xS_{v,5}$, όπου $S_{d,5}$ και $S_{v,5}$ είναι τα φάσματα απόκρισης για την μετατόπιση και για την ταχύτητα για απόσβεση 5%. Η απόσβεση προτείνεται εδώ, επειδή οι περίοδοι ταιριάζουν καλύτερα με αυτές που προέρχονται από τον Baker, που χρησιμοποιούνται ως αποτελέσματα αναφοράς. Επιπλέον, τα φάσματα απόκρισης για απόσβεση 5% της κίνησης του εδάφους, τα οποία είναι πιο σημαντικά από αυτά για μηδενική απόσβεση για τυπικό σεισμό, ταιριάζουν καλύτερα με τα αντίστοιχα φάσματα του εξαγόμενου παλμού ταχύτητας.

Από εφαρμογές της παραπάνω προταθείς μεθοδολογίας, προκύπτει ότι η χρήση του φάσματος S_dxS_v για απόσβεση 5% οδηγεί σε αποτελέσματα που συμφωνούν κατά πολύ με όσα προτάθηκαν από τον Baker. Οι υπολογισμένες περίοδοι παλμού ταιριάζουν καλά με τους παλμούς ταχύτητας που είναι ενσωματωμένοι στις αρχικές καταγραφές κινήσεων εδάφους.



Σχήμα 2.10: Για δύο διαφορετικές καταγραφές γίνεται προσδιορισμός της περιόδου παλμού ταχύτητας Tp από την κορυφή του φάσματος Sd × Sv για απόσβεση 5% (οι αντίστοιχες καμπύλες για μηδενική απόσβεση παρουσιάζονται για σύγκριση), ενώ στο κάτω σχήμα γίνεται σύγκριση.

2.9.2 Εύρος, διάρκεια, μετατόπιση φάσης και χρόνος έναρξης παλμού

Αρχικά, ξεκινάμε με τον υπολογισμό του εύρους του κύματος A, το οποίο υπολογίζεται, ώστε η μετατόπιση στο φάσμα απόκρισης για τον παλμό, να προσεγγίζει καλύτερα με το αντίστοιχο φάσμα της καταγραφής. Στην διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται η αθροιστική απόλυτη μετατόπιση της εδαφικής κίνησης και συσχετίζεται με την φασματική μετατόπιση. Η σχέση για την αθροιστική φασματική μετατόπιση, έχει προταθεί από τον *Taflampas et al (2014).* Ο δείκτης απόλυτης αθροιστικής μετατόπισης ορίζεται ως το ολοκλήρωμα της απόλυτης ταχύτητας του εδάφους στο χρόνο, σύμφωνα με την Εξίσωση (2.10):

$$CAD = \int_0^{t_{tot}} |v_g| \, dt \qquad \text{Εξίσωση (2.10)}$$

Αρχικά, γίνεται θεώρηση μιας αρμονικής εδαφικής κίνησης εύρους $d_{g,max}$, η οποία εφαρμόζεται στη βάση ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή, χωρίς απόσβεση. Όταν συμβεί συντονισμός, το εύρος της απόκρισης του ταλαντωτή αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με τον αριθμό των κύκλων της φόρτισης, και για υπόθεση γ κύκλων φόρτισης, η μέγιστη απόκριση (φασματική μετατόπιση-spectral displacement) υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση (2.11).

$$S_{d,o}\left(T_{res}\right) = \pi \gamma d_{g,\max} \qquad \text{Εξίσωση (2.11)}$$

Όπου, $S_{d,0\ (Tres)}$ είναι η φασματική μετατόπιση σε συντονισμό για μηδενική απόσβεση.

Παράλληλα, η CAD στο τέλος του γ κύκλου φόρτισης για μια αρμονική ταλάντωση, υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση (2.12).

$$CAD = 4\gamma d_{g,\max}$$ Εξίσωση (2.12)

Όπου, $d_{g,max}$ είναι η μέγιστη μετατόπιση εδάφους.

Με βάση τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι για γ κύκλους φόρτισης, υπάρχει μια σταθερή σχέση μεταξύ της φασματικής μετατόπισης και του δείκτη απόλυτης αθροιστικής μετατόπισης CAD, για μηδενική απόσβεση κατά το συντονισμό, η οποία εκφράζεται σύμφωνα με την Εξίσωση (2.13).

$$\frac{S_{d,\xi}\left(T_{res}\right)}{CAD} = \frac{\pi}{4}$$ Εξίσωση (2.13)

Ο παραπάνω λόγος τείνει στην τιμή π/4 για παλμούς με μεγάλη διάρκεια. Δηλαδή για μεγάλες τιμές αριθμού κύκλων γ. Η μέγιστη απόκλιση συμβαίνει για γ=1.5 και ν=30° . Παρόλα αυτά, το σφάλμα παραμένει μικρότερο από 6%. CAD=$4\gamma d_{g,max}$

Για τιμές απόσβεσης διάφορες το μηδενός, έστω απόσβεση ίση με ξ για ένα μονοβάθμιο ταλαντωτή και για απλή αρμονική ταλάντωση, η μετατόπιση $S_{d,\xi}$ (Tres) κατά την περίοδο του συντονισμού, υπολογίζεται κατά την Εξίσωση (2.14).

$$S_{d,\xi}\left(T_{res}\right) = \frac{1-e^{-2\pi\gamma\xi}}{2\xi} d_{g,\max}$$ Εξίσωση (2.14)

Με χρήση της Εξίσωσης (2.15), η παραπάνω μετατρέπεται στην Εξίσωση (2.16).

$$CAD=4\gamma d_{g,max}$$ Εξίσωση (2.15)

$$\frac{S_{d,\xi}\left(T_{res}\right)}{CAD} = \frac{1-e^{-2\pi\gamma\xi}}{8\gamma\xi}$$ Εξίσωση (2.16)

Από παραμετρική μελέτη προέκυψε ότι είναι απαραίτητη η χρήση ενός διορθωτικού συντελεστή, για μεγάλες τιμές του γ, ο οποίος θα είναι ίσος με 1+(γ-1)*ξ.

Επομένως, για κύματα M&P και λαμβάνοντας υπόψη τον διορθωτικό συντελεστή, η παραπάνω σχέση μετατρέπεται στην Εξίσωση (2.17).

$$\frac{S_{d,\xi,\max}}{CAD} = \frac{1-e^{-2\pi\gamma\xi}}{8\gamma\xi}\left[1+\left(\gamma-1\right)\xi\right] \qquad \text{Εξίσωση (2.17)}$$

Η Εξίσωση (2.17) είναι πολύ ακριβής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις περιπτώσεις.

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στις σχέσεις ανάμεσα σε PS_v (Pseudovelocity Spectral Velocity- φάσμα ψευδοταχύτητας) και CAD, για τα κύματα M&P. Η Εξίσωση (2.18) αναφέρεται στη σχέση για την φασματική ψευδο-ταχύτητα:

$$PS_v = \frac{2\pi}{T} S_d \qquad \text{Εξίσωση (2.18)}$$

Επομένως, για μηδενική απόσβεση (ξ=0), υπάρχει η Εξίσωση (2.19), ενώ για απόσβεση διάφορη του μηδενός (ξ≠0), υπάρχει η Εξίσωση (2.20).

$$\frac{PS_{v,0,\max}}{CAD} = \frac{\pi^2}{2T_P} \qquad \text{Εξίσωση (2.19)}$$

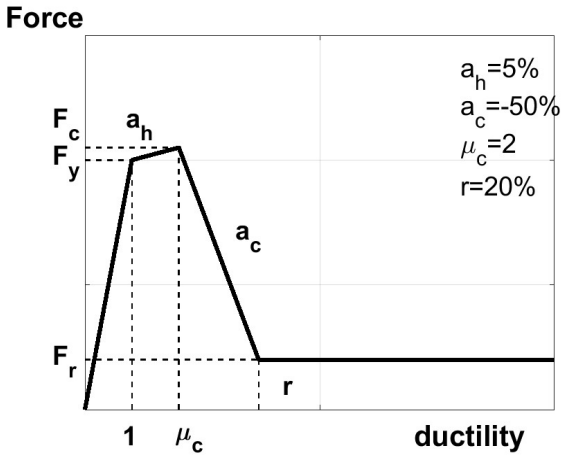
$$\frac{PS_{v,\xi,\max}}{CAD} = \frac{\pi\left(1-e^{-2\pi\gamma\xi}\right)\left[1+\left(\gamma-1\right)\xi\right]}{4\gamma\xi\Gamma_p} \qquad \text{Εξίσωση (2.20)}$$

Όπου $PS_{v,o}$ και $PS_{v,\xi}$ είναι οι ψευδο-φασματικές ταχύτητες για μηδενική απόσβεση και για απόσβεση ίση με ξ, αντιστοίχως.

3 Αριθμητική Διερεύνηση

3.1 Ανάλυση μονοβάθμιων ταλαντωτών (Sdof)

Για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης διαδικασίας χρονικής περικοπής ενός παλμού κοντινού πεδίου, ερευνήθηκαν για αρχή 3 μονοβάθμιοι ταλαντωτές (Single degree of freedom oscillators- Sdof). Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η απομείωση του βρόγχου ανακύκλισης και της μονοτονικής καμπύλης που διαθέτουν ως κοινό χαρακτηριστικό οι ταλαντωτές. Το πλεονέκτημα των μονοβάθμιων ταλαντωτών κατά τη διάρκεια της αριθμητικής διερεύνησης είναι το γεγονός ότι ανταποκρίνονται περισσότερο στις συνθήκες της πραγματικότητας, σε αντίθεση με τα ελαστοπλαστικά συστήματα, τα οποία κατέχουν απεριόριστη αντοχή (infinite capacity).



(a)

(b)

Σχήμα 3.1: (a) Μοντέλο μονοβάθμιου ταλαντωτή που χρησιμοποιείται ως αναφορά (μαύρο χρώμα), (b) Ταλαντωτής με ψαθυρή συμπεριφορά (ανοιχτό γκρι χρώμα) και ταλαντωτής όλκιμης συμπεριφοράς (σκούρο γκρι χρώμα).

Η περίπτωση του μονοβάθμιου ταλαντωτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1(α) αντιπροσωπεύει την τυπική μη -όλκιμη (non-ductile) συμπεριφορά, η οποία εμφανίζεται συνήθως στις περιοχές της νότιας Ευρώπης. Τα χαρακτηριστικά αυτού είναι τα εξής: a_h=5%, α_c=50%, μ_c=2 και r=20%. Στην (β) περίπτωση λαμβάνονται υπόψη και οι 3 συμπεριφορές ταλαντωτών, όλκιμη, ψαθυρή καθώς και η τυπική μη-όλκιμη συμπεριφορά (μαύρο χρώμα). Τα χαρακτηριστικά και των 3 περιπτώσεων παρουσιάζονται παρακάτω, στον Πίνακα 3.1. Το υλικό με υστερητική απόσβεση (hysteretic material), το οποίο λαμβάνεται υπόψη στα παραπάνω διαγράμματα είναι βασισμένο στο εγχειρίδιο του λογισμικού OpenSees (McKenna and Fenves, 2001). Επιπλέον, οι παράμετροι δύναμης (Force) και μετακινήσεων (Displacement) τίθεται ίσες με μία μέση τιμή.

Oscillator Type	a_h	a_c	μ_c	r
Reference	5%	-50%	2	20%
Ductile	5%	-10%	8	20%
Brittle	5%	-100%	1.2	20%

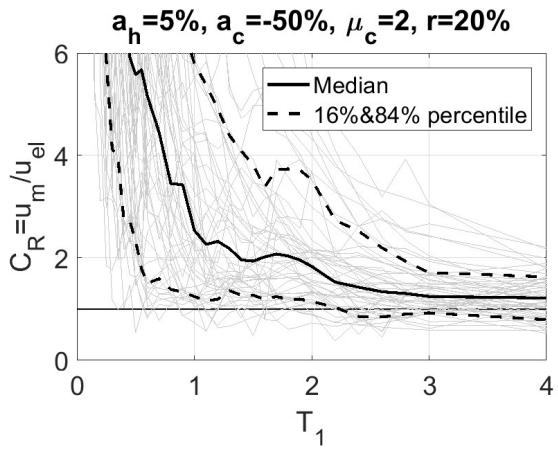
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά παραμέτρων μονοβάθμιου ταλαντωτή (Sdof).

Για τον έλεγχο της ανταπόκρισης του μονοβάθμιου ταλαντωτή κρίνεται απαραίτητο διάγραμμα της περιόδου (T) της ταλάντωσης σε αντίθεση με το λόγο της ανελαστικής μετακίνησης (C_R),ο οποίος υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση (3.1).

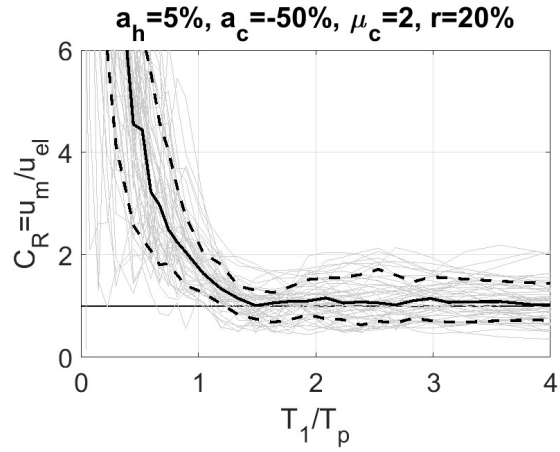
$$CR = um/uel \qquad \text{Εξίσωση (3.1)}$$

όπου,
u_m, η μέγιστη ανελαστική πλευρική μετακίνηση, και
uel, η μέγιστη πλευρική ελαστική μετακίνηση του μονοβάθμιου ταλαντωτή (Sdof) για μία σταθερή τιμή του μειωτικού συντελεστή Ry.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται οι καμπύλες του συντελεστού C_R σε σχέση με την περίοδο της ταλάντωσης του ταλαντωτή, T1 (α) και με το λόγο της περιόδου της ταλάντωσης του ταλαντωτή προς τη θεμελιώδη περίοδο του παλμού T1/Tρ (β), (κανονικοποίηση της περιόδου), υπό σταθερή τιμή του μειωτικού συντελεστή Ry. Παρατηρείται ότι με την κανονικοποίηση της περιόδου μειώνεται σημαντικά η διασπορά των αποτελεσμάτων με αποτέλεσμα να λαμβάνεται καλύτερη συσχέτιση των αποτελεσμάτων.



(a)



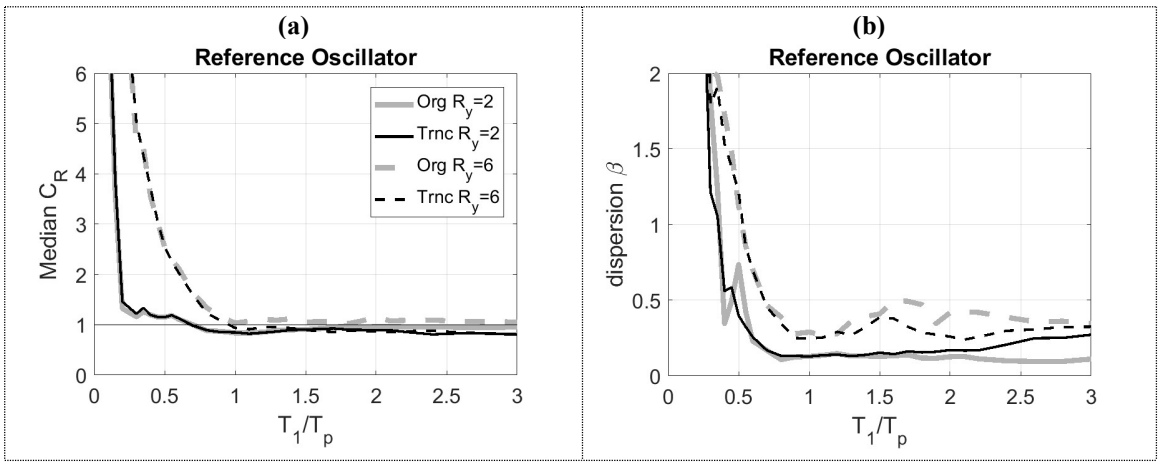
(b)

Σχήμα 3.2: Καμπύλη συντελεστού CR υπό σταθερή τιμή μειωτικού συντελεστή Ry=6, (a) σε σχέση με την περίοδο του ταλαντωτή T1 και (b) και σχέση με την κανονικοποιημένη μορφή της περιόδου T1/Tp.

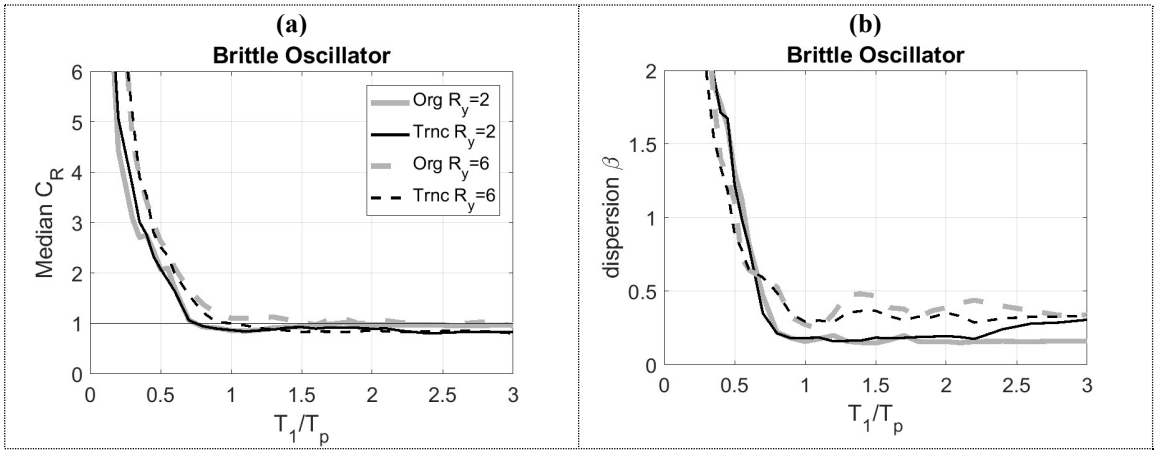
Λόγω της καλύτερης συσχέτισης και μικρότερης διασποράς αποτελεσμάτων που παρουσιάζει η κανονικοποιημένη μορφή της περιόδου της ταλάντωσης, επισυνάπτονται τα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 3.3, Σχήμα 3.4,3.5) με σταθερό απομειωτικό συντελεστή Ry=2 και 6. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται και συγκρίνονται επίσης η καμπύλη συντελεστού C_R όλκιμης, ψαθυρής και τυπικής μη-όλκιμης συμπεριφοράς. Οι περιπτώσεις (α) των σχεδιαγραμμάτων αφορούν στην καμπύλη C_R μέσης τιμής (median C_R). Οι περιπτώσεις (β) αφορούν στα διαγράμματα διασποράς αποτελεσμάτων, η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση (3.2). Παρατηρείται ότι ο λόγος ανελαστικής μετακίνησης μειώνεται εκθετικά, όσο η τιμή της κανονικοποιημένης περιόδου T1/Tp του μονοβάθμιου ταλαντωτή με την τυπική μη-όλκιμη συμπεριφορά αυξάνεται. Επιπλέον, και για τις δύο τιμές του απομειωτικού συντελεστή Ry η προβλεπόμενη ανταπόκριση του περικομμένου παλμού πρακτικά ταυτίζεται με τα αποτελέσματα του αυθεντικού σήματος. Πολύ καλή ακρίβεια αποτελεσμάτων μεταξύ περικομμένου και αυθεντικού παλμού παρατηρείται στους ταλαντωτές με ψαθυρή και όλκιμη συμπεριφορά. Από την άλλη πλευρά, ο ταλαντωτής με μέση τιμή συντελεστού C_R φαίνεται να καθορίζεται από την τιμή του απομειωτικού συντελεστή Ry. Το Ry καθορίζει την κλίση της καθοδικής καμπύλης του διαγράμματος όσο η καμπύλη της μέσης τιμής πλησιάζει τον οριζόντιο κλάδο στην τιμή C_R=1 η οποία

ανταποκρίνεται σε έναν ισοδύναμο κανόνα μετακίνησης. Συμπερασματικά, παρά την ποικιλία των αποτελεσμάτων των παλμικών καταγραφών, το χρονικά περικομμένο σήμα έχει τη δυνατότητα να αντικαταστήσει επαρκώς την αυθεντική εδαφική κίνηση καθ' όλη τη διάρκειά της ανεξάρτητα από την τιμή του μειωτικού συντελεστή και τον τύπο του ταλαντωτή.

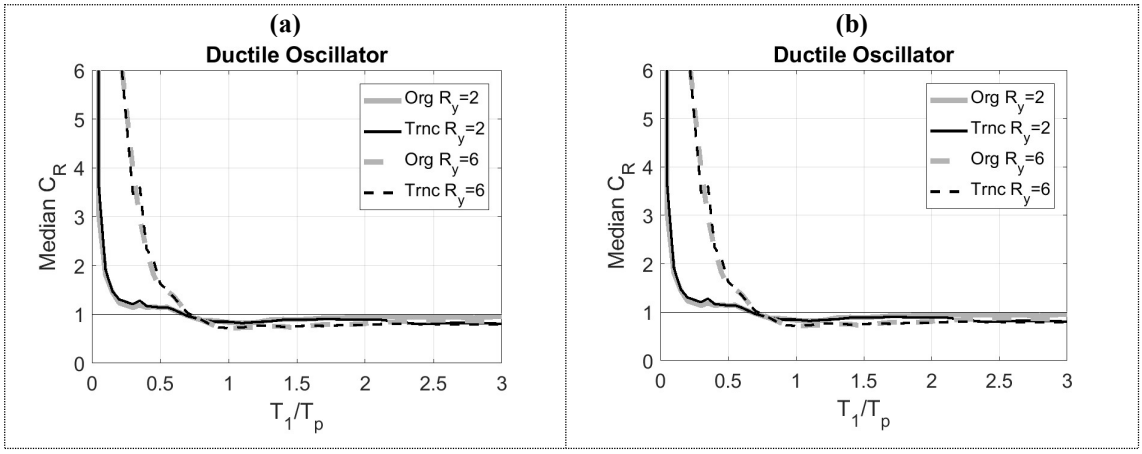
$$\beta = \frac{\mathrm{Prc84\%} - \mathrm{Prc16\%}}{2} \qquad \text{Εξίσωση (3.2)}$$



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα τυπικής μη-όλκιμης συμπεριφοράς.



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα ψαθυρής συμπεριφοράς.



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα όλκιμης συμπεριφοράς.

3.2 Συσχέτιση μονοβάθμιου ταλαντωτή με τον παλμικό δείκτη Καρδούτσου PI

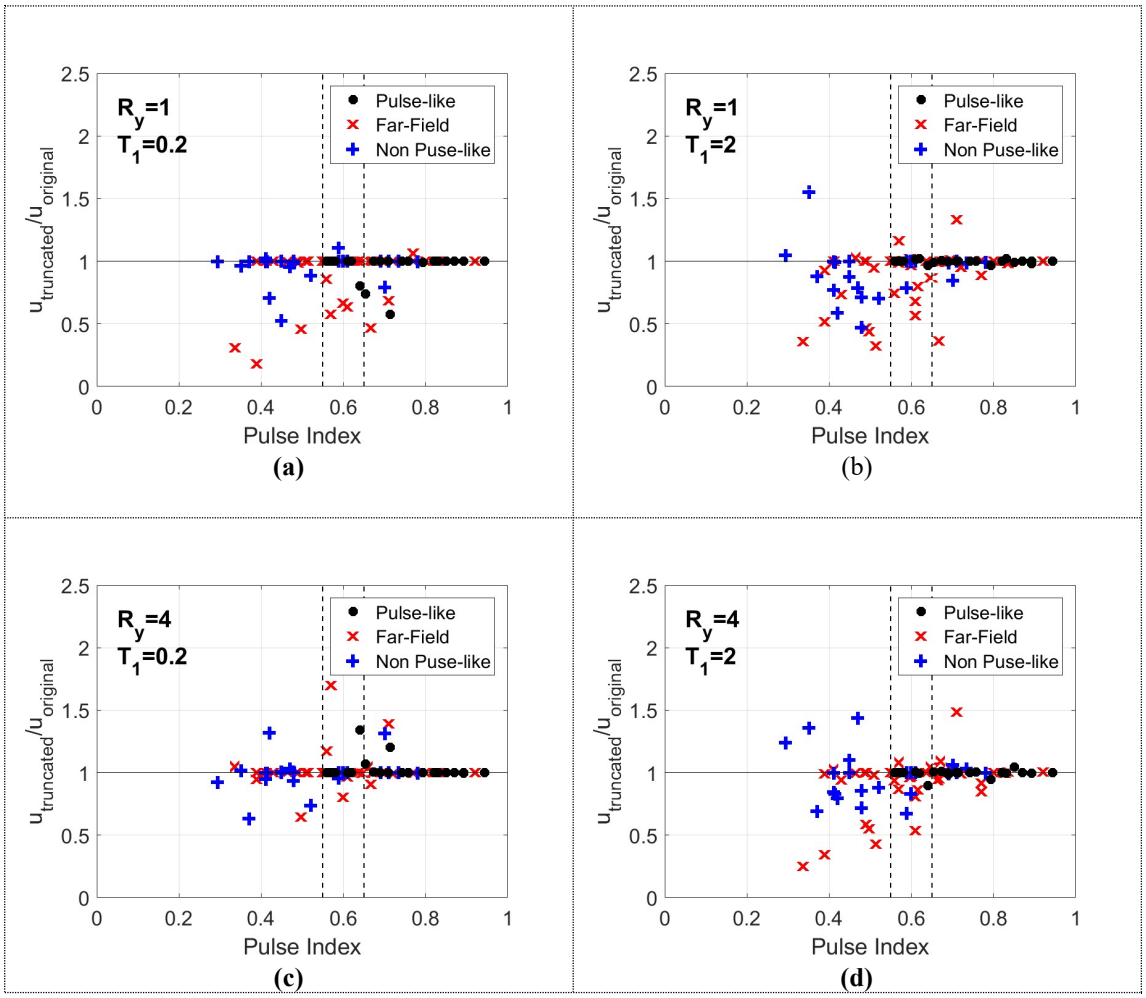
Η προτεινόμενη μέθοδος περικοπής της περιόδου με βάση τις κυματομορφές λειτουργεί για παλμικές εδαφικές κινήσεις. Παρόλα αυτά, αυτή η προτεινόμενη μέθοδος δίνει αρκετά ακριβή αποτελέσματα και σε περιπτώσεις όπου οι εδαφικές κινήσεις χαρακτηρίζονται εκ των προτέρων και ως μη- παλαμικές. Έτσι είναι σημαντικό να υπάρχει ένας δείκτης μέτρησης, ο οποίος θα καθορίζει αν η προτεινόμενη περικομμένη μέθοδος θα μπορεί να αντικαταστήσει τον αρχικό αυθεντικό παλμό. Αυτός ο δείκτης μέτρησης έχει ήδη προταθεί από τους *Baker(2007)* και *Kardoutsou et al (2017).*

Σύμφωνα με τη θεωρία των *Kardoutsou et al (2017)*, οι καταγραφές με δείκτη παλμού PI λιγότερο από 0,55 δεν κατατάσσονται σε παλμικές κινήσεις, ενώ οι καταγραφές με δείκτη παλμού μεγαλύτερο της τιμής 0,65 ταξινομούνται ως παλμικές. Οι καταγραφές που βρίσκονται στο ενδιάμεσο διάστημα, δηλαδή 0,55<PI<0,65, χαρακτηρίζονται ως διφορούμενες. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει μέγιστες τιμές μετατοπίσεων σε σχέση με τον δείκτη παλμικότητας, PI. Για τη σύγκριση αυτή χρησιμοποιήθηκε μια γνωστή βάση δεδομένων καταγραφής (FEMA P-695 (2009)), προκειμένου να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές καταγραφές από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για τις μελέτες *Kardoutsou et al (2017) και Baker (2007*). Το σύνολο αυτών των καταγραφών αποτελείται από 44 καταγραφές μακρινού πεδίου (far-pulse record), 28 καταγραφές κοντινού πεδίου (near- pulse record) που χαρακτηρίζονται ως παλμικές καταγραφές και 26 αρχεία επίσης κοντινού πεδίου που χαρακτηρίζονται ως μη-παλμικές καταγραφές. Το σύνολο αυτό περιλαμβάνει σεισμούς μεγάλου μεγέθους (Mw>6,5) και σε τύπο εδαφών C και D, σύμφωνα με την ταξινόμηση NEHRP. Επιπλέον, περιλαμβάνονται καταγραφές με διαφορετικές περιόδους παλμού Tp, οι οποίες αντιστοιχούν σε σεισμικά γεγονότα μεγέθους 6,5 και 7,6.

Ο λόγος μετατοπίσεων που παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα αντιστοιχεί σε μονοβάθμιους ταλαντωτές με φυσικές περιόδους ίσες με T1=0,2 και 2 δευτερόλεπτα, καθώς επίσης και σταθερό μειωτικό συντελεστή τιμής Ry=1 και 4. Οι ταλαντωτές υποβάλλονται στις παραπάνω καταγραφές. Ο οριζόντιος άξονας των διαγραμμάτων φέρει τον παλμικό δείκτη PI και ο κατακόρυφος άξονας τον λόγο μετακίνησης του ταλαντωτή όταν αυτός υποβάλλεται στην καταγραφή περικομμένου σήματος προς τη

μετακίνηση αυτού έπειτα από την υποβολή του στην σεισμική καταγραφή του αντίστοιχου αυθεντικού σήματος.

Για τις εδαφικές κινήσεις παλμικού τύπου φαίνεται ότι οι καταγραφές έχουν την ίδια τιμή παλμικού συντελεστή, πάνω από 0,60, ενώ έχει επιτευχθεί τέλεια συμφωνία μεταξύ περικομμένου και αυθεντικού σήματος. Ωστόσο, παρατηρείται πως για τις εδαφικές κινήσεις που χαρακτηρίζονται ως μη παλμικές, ο παλμικός δείκτης εμφανίζει σαφώς μικρότερες τιμές. Η πλειοψηφία των καταγραφών, όπως παρατηρείται, βρίσκεται κάτω από το όριο της τιμής 0,65. Ακόμα βέβαια και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει ταύτιση αποτελεσμάτων μεταξύ του περικομμένου και του αυθεντικού σήματος. Τέλος, για τις εδαφικές κινήσεις μακρινού πεδίου ο δείκτης παλμικής συμπεριφοράς κυμαίνεται μεταξύ 0,3 και 0,9, με ενδιάμεση τιμή περίπου το 0,6. Και σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται καλή ταύτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων, παρά το γεγονός ότι ο μειωτικός συντελεστής έχει αυξημένη τιμή, Ry=4.



Σχήμα 3.6: Λόγος μέγιστης μετακίνησης ελαστοπλαστικού συστήματος μονοβάθμιου ταλαντωτή SDOF που υπολογίζεται για κάθε πρωτότυπη και περικομμένη καταγραφή έναντι του αντίστοιχου δείκτη παλμού, (a) Ry=1 και T1=0,2sec, (b) R1 kai T1=2sec, (c) Ry=4 και T1=0,2sec, (d) Ry=4 και T1=2sec.

Με βάση τα παραπάνω, ένα παλμικός δείκτης όπως αυτός του *Καρδούτσου (2017),* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατάταξη μιας καταγραφής στην κατηγορία παλμικής εδαφικής κίνησης ή μη, αρκεί η προτεινόμενη καταγραφή να βασίζεται σε κυματομορφές. Οι μεγάλες τιμές του δείκτη, δηλαδή PI>0,6, δείχνουν ότι η αντικατάσταση της πρωτότυπης κίνησης εδάφους θα είναι επιτυχής, ενώ από την άλλη πλευρά, οι μικρότερες τιμές δηλώνουν πως η επιτυχία αντικατάστασης δεν είναι σίγουρη.

4 Προσομοίωση μεταλλικού πλαισίου

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται τη σεισμική απόκριση των κτηρίων που υπόκεινται σε παλμικές εδαφικές κινήσεις κοντά στο πεδίο. Για τη διεξαγωγή των συμπερασμάτων που αφορούν στη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ αυθεντικών παλμικών κινήσεων (original pulses) και αντίστοιχων περικομμένων (truncated pulses), χρησιμοποιείται ένα μεταλλικό πλαίσιο αποτελούμενο από 9 ορόφους, το οποίο υπέστη εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Η μοντελοποίηση έγινε με τη χρήση του προγράμματος OpenSees και οι αναλύσεις μέσω του προγράμματος Matlab.

4.1 Μοντελοποίηση πλαισίου

Για την προσομοίωση του κτηρίου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation). Σύμφωνα με αυτό το λογισμικό, πραγματοποιούνται μη γραμμικές αναλύσεις για την προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών. Στην περίπτωσή μας, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση σε 2 διαστάσεις (2D System), επομένως έγινε προσομοίωση μόνο των κύριων στοιχείων της κατασκευής, όπως δοκοί και υποστυλώματα. Σημειώνεται ότι το μήκος των δοκών ισούται με το μήκος των φατνωμάτων και το ύψος των υποστυλωμάτων ισούται με το ύψος του εκάστοτε ορόφου.

4.2 Αρχές προσομοίωσης πλαισίου

4.2.1 Πλαστικότητα αρθρώσεων

Η πλαστικότητα μπορεί να είναι είτε συγκεντρωμένη, είτε κατανεμημένη. Είναι γνωστό ότι τα δομικά υλικά συμπεριφέρονται ως ελαστικά και γραμμικά για σχετικά μικρές τιμές των τάσεων (σ) και των ανηγμένων (ε) παραμορφώσεων. Έπειτα από ένα στάδιο φόρτισης, οι παραμορφώσεις αυξάνονται δυσανάλογα υπό την επιβαλλόμενη τάση. Το φαινόμενο αυτής της δυσανάλογης αύξησης ονομάζεται μη γραμμικότητα του υλικού.

Για την προσομοίωση των κατασκευών η περίπτωση της μη γραμμικότητας του υλικού μοντελοποιείται σύμφωνα με τις εξής δύο διαφορετικές θεωρήσεις:

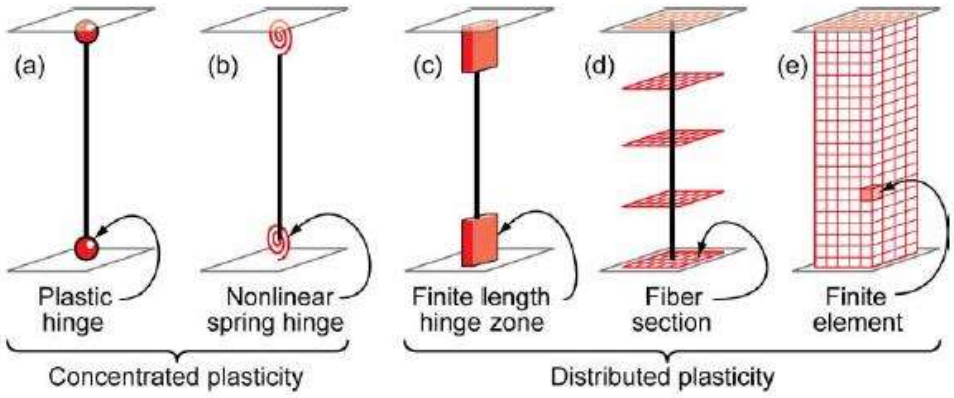
1. Θεώρηση συγκεντρωμένης πλαστικότητας (concentrated plasticity), όπου η διαρροή επέρχεται ταυτόχρονα σε όλα τα σημεία της διατομής, μόλις τα εντατικά μεγέθη ικανοποιήσουν το κριτήριο διαρροής.
2. Θεώρηση κατανεμημένης πλαστικότητας (distributed plasticity), κατά την οποία η πλαστικοποίηση των διατομών πραγματοποιείται σταδιακά ανάλογα με την ικανοποίηση του κριτηρίου διαρροής σε χαρακτηριστικά σημεία κατά ύψος της διατομής.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται μοντέλα προσομοίωσης της πλαστικότητας σε στοιχεία δοκού και υποστυλώματος (beam- column elements), σύμφωνα με το NIST GCR 10-917-5 (NIST 2010).

Υπολογιστικά, το πιο απλό μοντέλο προσομοίωσης της πλαστικότητας αρθρώσεων είναι η περίπτωση της συγκεντρωμένης πλαστικότητας, κατά την οποία οι πλαστικές παραμορφώσεις που εξαρτώνται από τις σχέσεις ροπών- καμπυλοτήτων της αντίστοιχης διατομής, βρίσκονται συγκεντρωμένες στα άκρα ενός γραμμικού - ελαστικού μέλους. Από την άλλη πλευρά, κατά την κατανεμημένη πλαστικότητα οι πλαστικές αρθρώσεις έχουν τη δυνατότητα να κατανεμηθούν σε οποιαδήποτε θέση κατά μήκους του στοιχείου.

Η επιλογή της μοντελοποίησης εξαρτάται από τον τρόπο που αναμένουμε να συμπεριφερθεί η εκάστοτε κατασκευή, καθώς επίσης και από τις υποθέσεις και προσεγγίσεις που έγιναν για το μοντέλο. Η περίπτωση της παρούσας εργασίας, πραγματεύεται ένα πλαίσιο ροπής υπό την επίδραση σεισμικής φόρτισης. Οι πλαστικές αρθρώσεις, κατά τα πλαίσια ροπής, βρίσκονται στα άκρα των μελών της κατασκευής. Συνεπώς, χρησιμοποιήθηκε η θεωρία της συγκεντρωμένης πλαστικότητας.

Αξίζει να σημειωθεί πως η περίπτωση της κατανεμημένης πλαστικότητας λαμβάνει χώρα όταν χρειάζεται η παρακολούθηση της διακύμανσης των τάσεων και των παραμορφώσεων κατά μήκος του μέλους και κατά ύψος της διατομής. Επιπλέον, σε συμπεριφορά όπως ο τοπικός λυγισμός και σε περίπτωση συστήματος συνδέσμων δυσκαμψίας χρησιμοποιείται η θεώρηση της κατανεμημένης πλαστικότητας.



Σχήμα 4.1: Μοντέλα προσομοίωσης κατά το NIST GCR 10-917-5 (NIST 2010)

4.2.2 Σύστημα πλαισίου ροπής

Σε περίπτωση πλαισίων ροπής, όπως και στη δική μας περίπτωση, οι κόμβοι υποστυλωμάτων- δοκών απαιτείται να είναι άκαμπτοι, ώστε να έχουν τη δυνατότητα παραλαβής ροπής. Συνεπώς, η πλευρική δυσκαμψία τέτοιων συστημάτων οφείλεται στην καμπτική δυσκαμψία των μελών που είναι συνδεδεμένα σε άκαμπτους κόμβους. Τα πλαίσια ροπής θεωρούνται από τα πιο αξιόπιστα δομικά συστήματα στα πλαίσια της αντισεισμικής τεχνολογίας, καθώς έχουν απλή διαμόρφωση και κριτήρια σχεδιασμού. Ωστόσο, έπειτα από περιπτώσεις σεισμών, όπως αυτός του Northridge (1994) και αργότερα του *Hyogogen Nanbu (1995)*, παρουσιάστηκαν σε πλαίσια ροπής, δηλαδή σε συστήματα SMRF, ψαθυρές αστοχίες σε συνδέσεις δοκών- υποστυλωμάτων με αποτέλεσμα τη μείωση της εμπιστοσύνης των μηχανικών ως προς αυτά, αλλά και

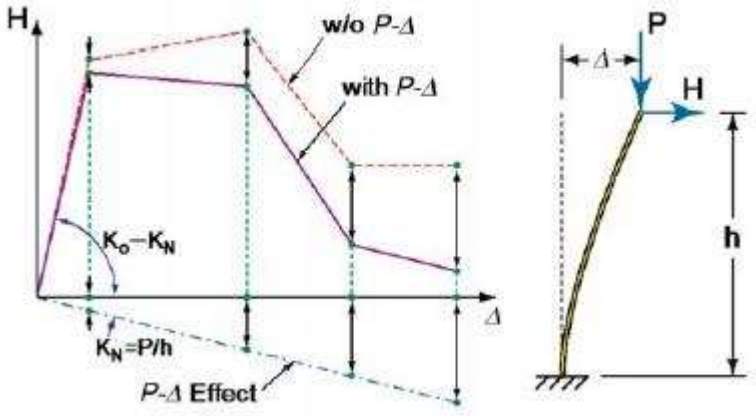
τη διεξαγωγή εκτενέστερων ερευνών της FEMA 2000 (Federal Emergency Management Agency).

4.2.3 Φαινόμενα P-Δ

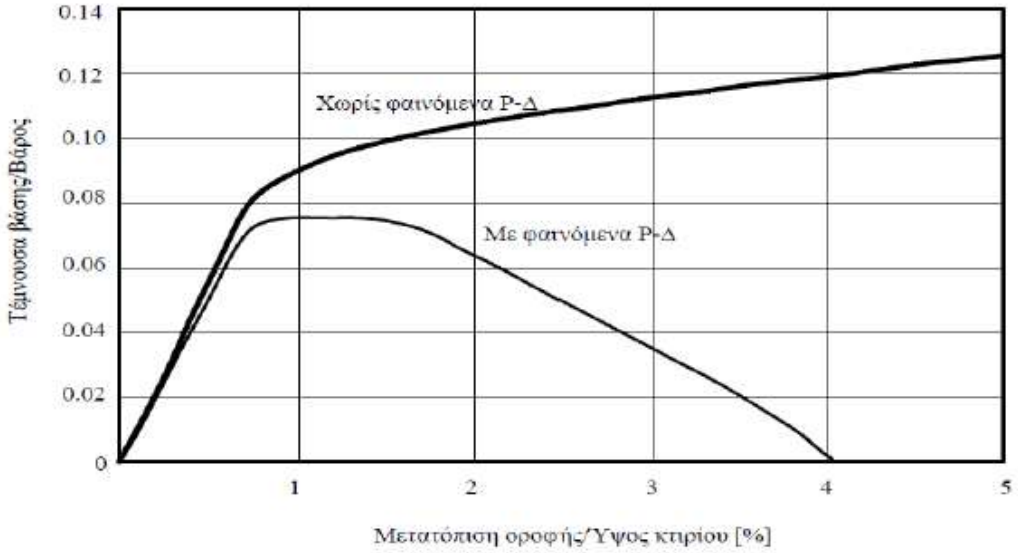
Πρόκειται για ένα φαινόμενο κατά το οποίο η κατασκευή υφίσταται αύξηση της εσωτερικής έντασης, χωρίς όμως να υπάρχει αύξηση των εξωτερικά επιβαλλόμενων φορτίων. Ουσιαστικά, η μη γραμμικότητα που εμφανίζει η γεωμετρία της κατασκευής, υφίσταται στην παραμορφωμένη και όχι στην απαραμόρφωτη κατάστασή της. Τότε οι βαρυτικές δυνάμεις επιβαρύνουν τις στηρίξεις του φορέα δημιουργώντας πρόσθετες εσωτερικές δυνάμεις. Σύμφωνα με τα φαινόμενα 2ας τάξεως, η αξονική δύναμη (P) που εφαρμόζεται στο υποστύλωμα σε συνδυασμό με την οριζόντια μετακίνηση (Δ) που υφίσταται η κορυφή, δημιουργεί εσωτερικές ροπές στη βάση του υποστυλώματος με τιμή ίση με το γινόμενο P x Δ. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται η καμπύλη τέμνουσας-οριζόντιας μετακίνησης του υποστυλώματος και η διαφορά αυτής με την ύπαρξη των φαινομένων 2ας τάξεως.

Κατά την σεισμική ανάλυση, τα φαινόμενα P-Δ επηρεάζουν σημαντικά τη σεισμική απόκριση της συνολικής κατασκευής, ιδιαίτερα στην ανελαστική περιοχή (Chopra 2007). Σημαντικό να αναφερθεί είναι το γεγονός κατά το οποίο τα φαινόμενα 2ας τάξεως δεν επηρεάζουν το σύνολο της κατασκευής και τη σεισμική της απόκριση όταν αυτή βρίσκεται στην ελαστική περιοχή. Αντιθέτως, όταν η κατασκευή μεταβεί στην μετελαστική περιοχή, τα φαινόμενα αυτά ασκούν μεγάλη επιρροή στην απόκριση του φορέα με κίνδυνο τη γρήγορη μείωση της πλευρικής του αντοχής και επομένως την κατάρρευσή του. Στο Σχήμα 4.3 φαίνονται οι καμπύλες ικανότητας με και χωρίς τον συνυπολογισμό των P-Δ φαινομένων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η προσομοίωση των φαινομένων P-Δ έγινε με τη χρήση επιπλέον υποστυλώματος και δημιουργία ενός επιπλέον φατνώματος. Η κατασκευή αποτελείται από 4 φατνώματα, δηλαδή από 5 υποστυλώματα στο ισόγειο του προσομοιώματος, τα οποία πακτώνονται στο έδαφος με αποτέλεσμα τη δέσμευση και των τριών βαθμών ελευθερίας. Για το συνυπολογισμό των φαινομένων δευτέρας τάξεως (φαινόμενα P-Δ) εντάχθηκε ένα επιπλέον υποστύλωμα, το οποίο σε αντίθεση με τα υπόλοιπα έχει στροφική ελευθερία. Όλα τα υποστυλώματα δέχονται βαρυτικές δυνάμεις. Οι δοκοί που εφαρμόζονται στο δημιουργούμενο επιπλέον φάτνωμα κατά την εισαγωγή του υποστυλώματος P-Δ, προσομοιώνονται ως ράβδοι <truss elements>.



Σχήμα 4.2: Απεικόνιση καμπύλης τέμνουσας- μετατόπισης υποστυλώματος, με και χωρίς φαινόμενα 2ας τάξεως (PEER/ATC2010).



Σχήμα 4.3: Απεικόνιση καμπύλης ικανότητας με και χωρίς φαινόμενα 2ας τάξεως, κατά Chopra 2007.

4.3 Γεωμετρία κτηρίου

Πρόκειται για μία μεταλλική κατασκευή, για τη σεισμική μελέτη της οποίας η προσομοίωση έγινε με πλαίσια ροπής. Το πλαίσιο μοντελοποιήθηκε ως πολυβάθμιος ταλαντωτής (MDOF). Αποτελείται από 9 ορόφους και ένα υπόγειο. Τα φατνώματα του πλαισίου είναι 5, επομένως υπάρχουν 6 υποστυλώματα, πλην του υποστυλώματος που αντιπροσωπεύει τα φαινόμενα P-Δ. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα οι πληροφορίες που αφορούν τη βασική γεωμετρία της κατασκευής, καθώς και τις

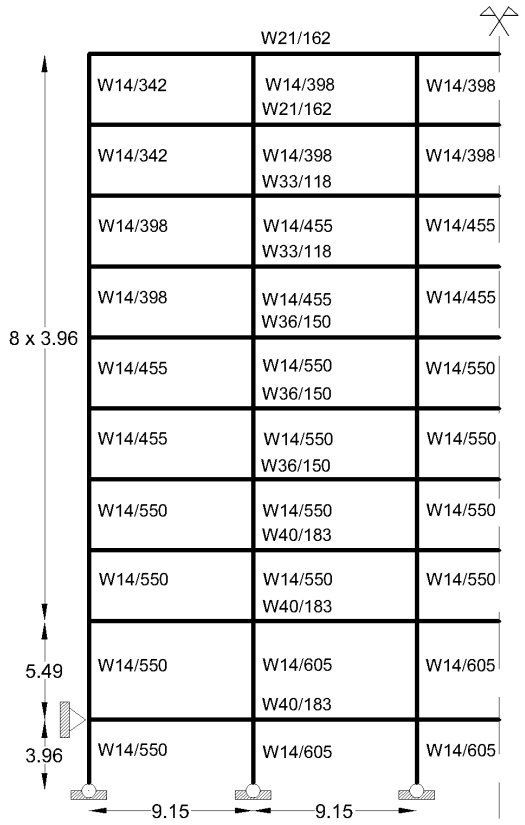
ιδιότητες των υλικών. Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται οι χρησιμοποιούμενες μεταλλικές διατομές. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται το συμμετρικά το υπό μελέτη κτηριακό πλαίσιο.

Γεωμετρία κατασκευής- Υλικά					
Αριθμός Ορόφων (N)	9	1 υπόγειο			
Αριθμός Φατνωμάτων	5				
Ύψος υπογείου	12	ft	~	3,65	m
Ύψος πρώτου Ορόφου	18	ft		5,5	m
Ύψος υπολοίπων Ορόφων (2ος-9ος)	13	ft		4	m
Συνολικό Ύψος	121	ft		37	m
Μήκος Φατνώματος	30	ft		9,15	m
Μέτρο Ελαστικότητας Young, E	29.000	ksi		200	Gpa
Όριο Διαρροής, fy	57.6	ksi		350	Mpa

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά γεωμετρίας κτηρίου και ιδιότητες υλικού κατασκευής

Μεταλλικές Διατομές, τύπου W				
Όροφος (Floor)	Επίπεδο (Storey)	Δοκοί (beams)	Εξωτερικά Υποστυλώματα (external columns)	Εσωτερικά Υποστυλώματα (Interior columns)
8	9	W21x162	W14x342	W14x398
7	8	W21x162	W14x342	W14x398
6	7	W33x118	W14x398	W14x455
5	6	W33x118	W14x398	W14x455
4	5	W36x150	W14x455	W14x550
3	4	W36x150	W14x455	W14x550
2	3	W36x150	W14x550	W14x550
1	2	W40x183	W14x550	W14x550
0	1	W40x183	W14x550	W14x605
-1	0	W40x183	W14x550	W14x605

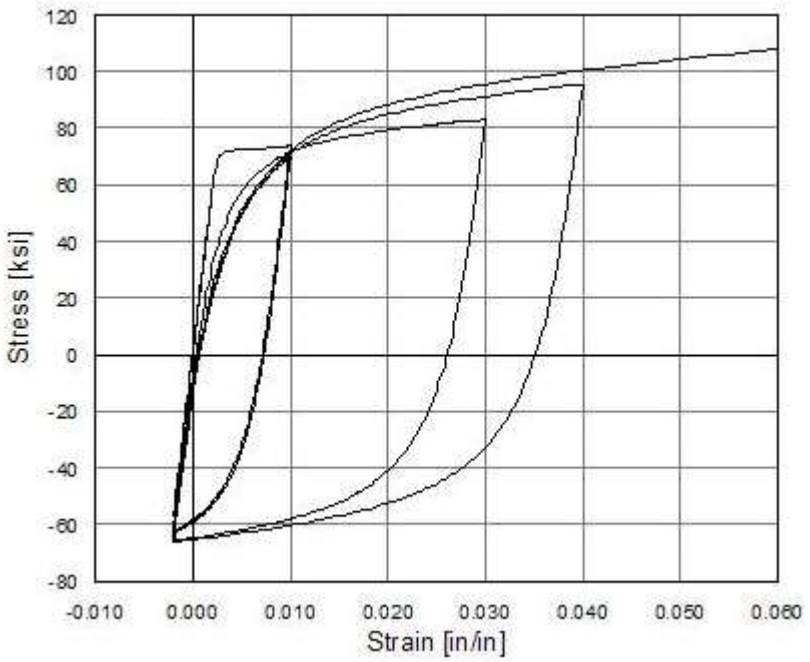
Πίνακας 4.2: Μεταλλικές διατομές κύριων μελών κατασκευής.



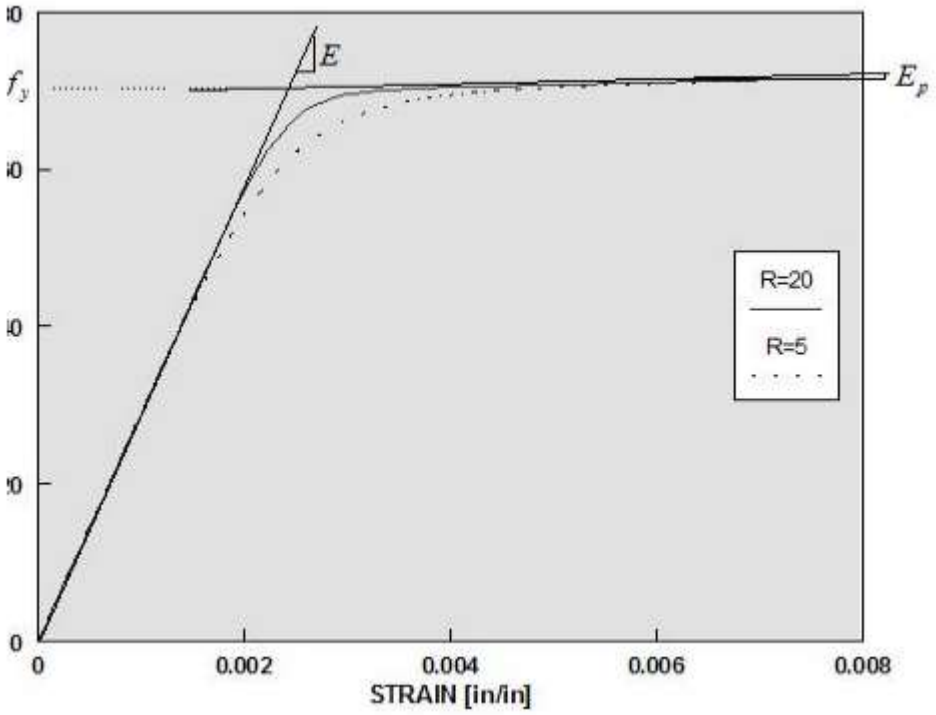
Σχήμα 4.4: Γεωμετρία υπό μελέτη κτηριακού πλαισίου.

4.4 Εισαγωγή υλικού

Για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκε χάλυβας, με όριο διαρροής fy =56,7 ksi, Ry=1.1 και μέτρο ελαστικότητας E= 29,000 ksi. Σύμφωνα με τις μονάδες μέτρησης του SI, το υλικό αυτό αντιστοιχεί σε χάλυβα με όριο διαρροής fy=350MPa και μέτρο ελαστικότητας E=200GPa. Για την προσομοίωση του υλικού στο λογισμικό Opensees, χρησιμοποιήθηκε η εντολή <uniaxialMaterialSteel02>, της οποίας η λήψη έγινε από τη διαδικτυακή βιβλιοθήκη του ίδιου του λογισμικού. Σύμφωνα με αυτή την εντολή, πρόκειται για ένα μοντέλο υλικού, το οποίο αντιπροσωπεύει το ευρέως γνωστό μονοαξονικό με υστέρηση μοντέλο χάλυβα. Αρχικά, προτάθηκε από τους *Menegotto και Pinto (1973)* και έπειτα αναπτύχθηκε από τους *Filippou et. al (1983),* ώστε να συγκαταλέγεται στις ιδιότητες του υλικού και η κράτυνση του χάλυβα. Οι παράμετροι της υστερητικής απόσβεσης για τη δόμηση του υλικού, σύμφωνα με τους Menegotto και Pinto, ελήφθησαν ίσες με a_1=a_3=0.0005, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι που ελέγχουν τη μεταφορά από ελαστική σε πλαστική κατάσταση ισούνται με R=20, cR_1=0.925 και cR_2=0.15. Μεταλλικούς συνδέσμους δε λάβαμε υπόψη μας, επομένως οι παράμετροι a_2=a_4 δε χρησιμοποιήθηκαν. Στο Σχήμα 4.5 και Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η διαγραμματική συμπεριφορά του υλικού υπό μονοτονική φόρτιση και η υστερητική του συμπεριφορά με ισοτροπική κράτυνση του χάλυβα, σύμφωνα με το λογισμικό Opensees.



Σχήμα 4.5: Συμπεριφορά υλικού υπό μονοτονική φόρτιση.



Σχήμα 4.6: Υστερητική συμπεριφορά υλικού λαμβάνοντας υπόψη μας και την κράτυνση του χάλυβα.

4.5 Μεθοδολογία προσομοίωσης- Λογισμικό OpenSees

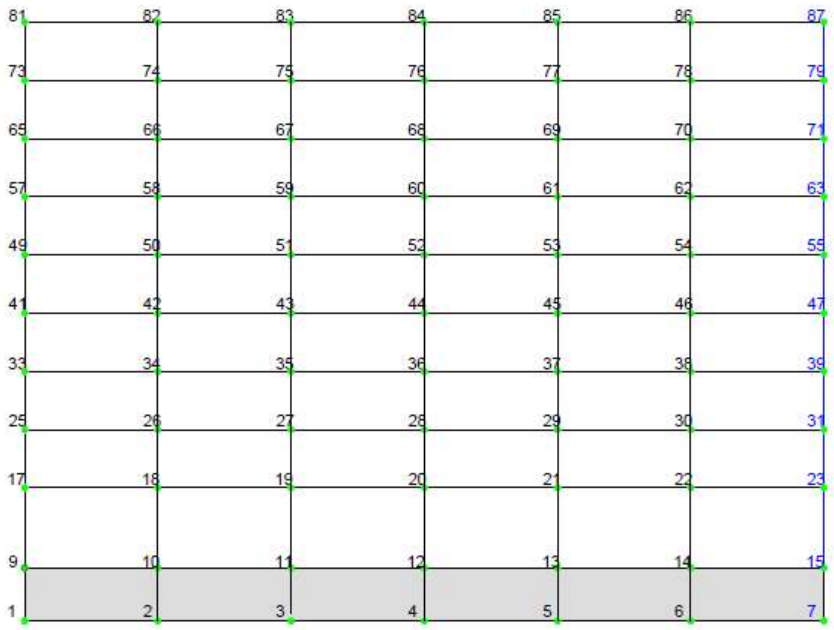
Η μεταλλική κατασκευή προσομοιώθηκε στο ελεύθερο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων <Opensees (Open System for Earthquake Engineering Simulation)>, το οποίο χρησιμοποιείται για τη σεισμική απόκριση των κατασκευών με βάση μη γραμμικών αναλύσεων, ένα ευρύ φάσμα μοντέλων υλικών, αλγορίθμων επίλυσης και τύπων στοιχείων. Πρόκειται για μία δισδιάστατη προσομοίωση (2D προσομοίωση), γι' αυτό το λόγο προσομοιώθηκαν μόνο τα κύρια μέλη της κατασκευής, όπως τα υποστυλώματα και οι δοκοί. Ως κύριο μέλος θεωρείται και ο σύνδεσμος δυσκαμψίας, κάτι που δεν υφίσταται στην παρούσα εργασία. Οι διαστάσεις αυτών των μελών ταυτίστηκαν με τα γεωμετρικά μήκη της κατασκευής. Το μήκος της δοκού εξισώθηκε με το μήκος του εκάστοτε φατνώματος, ενώ το ύψος του υποστυλώματος με το καθαρό ύψος του κάθε ορόφου, αντίστοιχα.

Το λογισμικό OpenSees χρησιμοποιείται για εφαρμογές στη σεισμική μηχανική με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Οι εντολές του OpenSees, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της γεωμετρίας, των φορτίσεων και τη διαμόρφωση της λύσης υποστηρίζονται από αρχεία της μορφής tcl.

4.5.1 Μέθοδος μοντελοποίησης πλαισίου

Το κτήριο υποδιαιρείται σε στοιχεία και κόμβους, ώστε να εκτελεσθεί η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων. Για την προσομοίωση της γεωμετρίας του κτηρίου χρησιμοποιείται ελαστικό μοντέλο, για την κατασκευή του οποίου χρησιμοποιείται το αντικείμενο Model Builder (OpenSees, Language Manual 2007). Μέσω του εγχειριδίου ορίζονται τα φορτία που δρουν στα στοιχεία (elements) και στους κόμβους (nodes), καθώς και οι περιορισμοί (constrains) που ενεργούν στους κόμβους.

Αρχικά, με την εντολή Basic Model Builder ορίζονται οι διαστάσεις του προβλήματος καθώς και ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας που έχει κάθε κόμβος. Εφόσον η προσομοίωση είναι δισδιάστατης μορφής, οι βαθμοί ελευθερίας ανά κόμβο είναι 3. Σαν πρώτο βήμα της μοντελοποίησης πραγματοποιείται η κατασκευή της γεωμετρίας του πλαισίου με την εισαγωγή της εντολής που αφορά στους κόμβους (nodes) σε κάθε δημιουργούμενο κόμβο μεταξύ δοκού και υποστυλώματος. Σημειώνεται πως για τη γεωμετρία, λήφθηκε υπόψη το επιπλέον υποστύλωμα που εκπροσωπεί τα φαινόμενα δευτέρας τάξεως. Η κάθε σειρά στοιχείων που προσομοιώνεται, μοντελοποιείται με βάση μία κωδικοποίηση, η οποία διευκολύνει το πέρας της διαδικασίας λόγω του μεγάλου αριθμού των στοιχείων που υπάρχουν. Παραδείγματα κατηγορίας στοιχείων είναι τα υποστυλώματα (column elements), οι δοκοί (beam elements), οι πλαστικές αρθρώσεις (plastic hinges), τα ελατήρια (spring elements)και οι ράβδοι (truss elements), οι οποίες χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των επιπλέον δοκών κατά την εισαγωγή του υποστυλώματος P-δ. Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η αρίθμηση των κόμβων της κατασκευής.



Σχήμα 4.7: Αρίθμηση κόμβων πλαισίου για την κωδικοποίησή του στο OpenSees. Η στήλη με χρώμα μπλε παρουσιάζει το υποστύλωμα που δέχεται τα φαινόμενα P-δ.

Σαν δεύτερο βήμα, γίνεται η εισαγωγή των δεσμεύσεων- περιορισμών(constrains) μετακίνησης και στροφής. Υπάρχουν δύο ειδών περιορισμών που εφαρμόζονται κατά τη μοντελοποίηση του κηρίου. Στο πρώτο είδος κατηγοριοποιείται ο περιορισμός της πάκτωσης (fixed constraint), με τον οποίο ορίζονται οι αρχικές συνθήκες του επιπέδου θεμελίωσης, δηλαδή της βάσης της προκείμενης κατασκευής στα στοιχεία που αφορούν στη βάση της κατασκευής, ώστε αυτή να θεωρείται πακτωμένη στο έδαφος. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζονται και οι 3 βαθμοί ελευθερίας Τα βασικά υποστυλώματα πακτώνονται πλήρως, ενώ το 6^{ο} υποστύλωμα που αντιπροσωπεύει τα φαινόμενα 2^{ας} τάξεως έχει την ελευθερία της στροφής. Η προσομοίωση των δεσμεύσεων πραγματοποιείται με την εντολή του λογισμικού Opensees <fix $nodeTag (ndf &constrValues) >. Σύμφωνα με αυτή, ο αριθμός <0> αποτελεί πλήρη δέσμευση των βαθμών ελευθερίας ενός κόμβου, ενώ ο αριθμός <1> την απελευθέρωση αυτού. Επιπλέον, σημαντική είναι η εντολή < equalDOF $rNodeTag $cNodeTag &dof1 &dof2 >, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία μίας multi-point δέσμευσης μεταξύ των δημιουργούμενων κόμβων. Δηλαδή, οι κόμβοι μετακινούνται κατά την ίδια κατεύθυνση και με την ίδια τιμή. Στο δεύτερο είδος περιορισμών κατηγοριοποιείται ο περιορισμός του άκαμπτου διαφράγματος (rigid diaphragm) που διασφαλίζει ότι το σύνολο των εισηγμένων επονομαζόμενων κόμβων (slave nodes) του ίδιου επιπέδου κινούνται ως ένα άκαμπτο επίπεδο με βάση τον κύριο κόμβο που ορίζεται στο ίδιο επίπεδο (τον επονομαζόμενο master node).

Έπειτα, ορίστηκαν τα στοιχεία του πλαισίου, όπως οι στύλοι και οι δοκοί, μέσω της εντολής < Elastic Beam Column Element >. Τα χαρακτηριστικά αυτού του τύπου στοιχείων εξαρτώνται από το εμβαδόν της διατομής τους, το συντελεστή του υλικού του και τη ροπή αδρανείας. Για να καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο οι συντεταγμένες των στοιχείων σχετίζονται με τις συνολικές συντεταγμένες, έγινε χρήση της εντολή < Geometric Transformation >. Σύμφωνα με αυτή την εντολή, όλα τα οριζόντια στοιχεία όπως οι δοκοί και τα άκαμπτα στοιχεία, καθορίστηκαν μέσω της εντολής <Linear

Transformation>, η οποία πραγματοποιεί γραμμικό γεωμετρικό μετασχηματισμό της δυσκαμψίας της δοκού και της δύναμης αντίστασής της, από το βασικό σύστημα για το συνολικό σύστημα. Από την άλλη πλευρά, τα κατακόρυφα στοιχεία, όπως τα υποστυλώματα, καθορίζονται με την εντολή <P-Δ Transformation>, ώστε να ληφθούν υπόψη και τα φαινόμενα δευτέρας τάξεως που εμφανίζονται. Τέλος, για τη μοντελοποίηση των ράβδων που συνδέουν το υποστύλωμα P-Δ με το υπόλοιπο πλαίσιο έγινε χρήση της εντολής <Truss Element>. Αυτά τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα στις άκρες τους με στροφικά ελατήρια, τα οποία παρουσιάζουν τη μη γραμμική συμπεριφορά του κτηρίου και δίνουν τη δυνατότητα στο πρόγραμμα να χρησιμοποιήσει τη μέθοδο της συγκεντρωμένης πλαστικότητας (concentrated plasticity). Η υστερητική απόδοση των διγραμμικών ελατηρίων έχει ως βάση το μοντέλο φθοράς IMK (IMK deterioration model). Η κατασκευή αποτελείται από 5 φατνώματα, δηλαδή από 6 υποστυλώματα στο ισόγειο του προσομοιώματος, τα οποία πακτώνονται στο έδαφος με αποτέλεσμα τη δέσμευση και των τριών βαθμών ελευθερίας. Επιπλέον, για το συνυπολογισμό των φαινομένων δευτέρας τάξεως (φαινόμενα P-Δ) εντάχθηκε ένα επιπλέον υποστύλωμα, το οποίο σε αντίθεση με τα υπόλοιπα έχει στροφική ελευθερία. Όλα τα υποστυλώματα δέχονται βαρυτικές δυνάμεις.

Για την εκτέλεση των δυναμικών αναλύσεων ορίστηκαν οι μάζες στον εκάστοτε κόμβο του δισδιάστατου πλαισίου χρησιμοποιώντας την εντολή <mass>. Οι μάζες υπολογίστηκαν έπειτα από το συνδυασμό σεισμικών φορτίων (G+0.3Q) για κάθε επίπεδο και στη συνέχεια κατανεμήθηκαν στους κόμβους.

4.6 Εκτέλεση αναλύσεων και κωδικοποίηση

Για τη διεξαγωγή αποτελεσμάτων πραγματοποιούνται έπειτα από την προσομοίωση του 9-όροφου πλαισίου, αναλύσεις. Αρχικά, πραγματοποιείται ιδιομορφική ανάλυση με στόχο τον προσδιορισμό των ιδιοπεριόδων και ιδιομορφών της πολυβάθμιας κατασκευής. Έπειτα εκτελείται δυναμική ανάλυση και τέλος ανάλυση pushover με στόχο την καμπύλη ικανότητας της κατασκευής (Σχήμα 4.8).

4.6.1 Ιδιομορφική Ανάλυση (Eigenvalue Analysis)

Εκτελείται ιδιομορφική ανάλυση της κατασκευής, από την οποία υπολογίζονται οι ιδιοπερίοδοι και οι ιδιομορφές της, καθώς και το ποσοστό της μάζας που ενεργοποιείται σε κάθε ιδιομορφή. Με αυτό τον τρόπο γίνεται εκτίμηση της συμπεριφοράς της κατασκευής, καθώς και την επίδραση των ανωτέρων ιδιομορφών σε αυτή. Στην περίπτωση του πλαισίου μας η κίνηση είναι μεταφορική και κατά τον άξονα xx'. Μέσω αυτής της διαδικασίας προσδιορίζεται και ο αριθμός των σημαντικών ιδιομορφών που λαμβάνονται υπόψη στη δυναμική φασματική ανάλυση.

Σημαντικό βήμα για την πραγματοποίηση της ιδιομορφικής ανάλυσης είναι η λήψη του μητρώου μάζας της κατασκευής. Η συνολική μάζα ταλάντωσης προκύπτει στην περίπτωσή μας από τις δυνάμεις βαρύτητας. Η εισαγωγή των μαζών γίνεται επικομβίως, ώστε να διαπραγματευτούν από το λογισμικό. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι δυνάμεις βαρύτητας της κατασκευής, ενώ στον Πίνακα 4.5 η προσομοίωση των μαζών στο λογισμικό του OpenSees. Σημειώνεται ότι στο Παράρτημα Α επισυνάπτεται ο κώδικας μοντελοποίησης σε ολοκληρωμένη μορφή.

Gravity Loads, G								
Όροφος (Floor)		External Loads(Kipf)		Internal Loads(kipf)		Loads P-Δ (Kipf)		Distributed load (kipf*in)
10	P31	2x12.75+30.9	P32	12.75+20.3	PP3	2x(385+165)	M3	765.00
9	P22	2x15.9+34.8	P21	15.9+23.6	PP2	2x(385+165)	M2	900.00
8	P22	2x15.9+34.8	P21	15.9+23.6	PP2	2x(385+165)	M2	900.00
7	P22	2x15.9+34.8	P21	15.9+23.6	PP2	2x(385+165)	M2	900.00
6	P22	2x15.9+34.8	P21	15.9+23.6	PP2	2x(385+165)	M2	900.00
5	P22	2x15.9+34.8	P21	15.9+23.6	PP2	2x(385+165)	M2	900.00
4	P22	2x15.9+34.8	P21	15.9+23.6	PP2	2x(385+165)	M2	900.00
3	P22	2x15.9+34.8	P21	15.9+23.6	PP2	2x(385+165)	M2	900.00
2	P22	2x15.9+34.8	P21	15.9+23.6	PP1	2x(385+165)	M2	900.00
basement	P11	24.6	P12	2x34.8	PP1	2x(385+165)	M1	954.00

Πίνακας 4.3: Δυνάμεις βαρύτητας σε μονάδες μέτρησης kipf.

```
        # No need for masses on the ceiling of the basement. It
is not supposed to move anyway
         # just give it a small mass for eigenvalue stability
        #set m1  [expr -$P11/$g]
        #set m2  [expr -$P12/$g]
        set m1  0.01
        set m2  0.01
        set mm  0.01
        } elseif {$i==10} {
        set m1  [expr -$P31/$g]
        set m2  [expr -$P32/$g]
        set mm  [expr -$PP3/$g]
        } elseif {$i==2} {
        set m1  [expr -$P21/$g]
        set m2  [expr -$P22/$g]
        set mm  [expr -$PP1/$g]
        } else {
        set m1  [expr -$P21/$g]
        set m2  [expr -$P22/$g]
        set mm  [expr -$PP2/$g]
        }
```

```
node   $nodeID                0.                  $yDim
mass   $nodeID          $m1   0.   0.

node  [expr $nodeID+1]  [expr     $bay]          $yDim
mass  [expr $nodeID+1]  $m2  0.   0.

node  [expr $nodeID+2]  [expr   2*$bay]          $yDim
mass  [expr $nodeID+2]  $m2  0.   0.

node  [expr $nodeID+3]  [expr   3*$bay]          $yDim
mass  [expr $nodeID+3]  $m2  0.  0.

node  [expr $nodeID+4]  [expr   4*$bay]          $yDim
mass  [expr $nodeID+4]  $m2  0.  0.

node  [expr $nodeID+5]  [expr   5*$bay]          $yDim
mass  [expr $nodeID+5]  $m1  0.  0.

node  [expr $nodeID+6]  [expr   5*$bay+$xsep]    $yDim
mass  [expr $nodeID+6]  $mm  0.  0.

#node  [expr $nodeID+7]  [expr   6*$bay+$xsep]    $yDim
#mass  [expr $nodeID+7]  $mm  0.   0.

incr nodeID 8
}
```

Πίνακας 4.4: Απόσπασμα κωδικοποίησης μάζας του 9-όροφου πλαισίου.

4.6.2 Στατική Ανελαστική Ανάλυση (Pushover Analysis)

Η στατική ανελαστική ανάλυση, γνωστή και ως pushover analysis, αφορά τη μη γραμμική, ανελαστική απόκριση του υπό μελέτη φορέα υπό τη δράση οριζοντίων δυνάμεων στατικού τύπου με στόχο την προσομοίωση των σεισμικών φορτίσεων .Για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης ανάλυσης είναι απαραίτητη η εισαγωγή πλαστικών αρθρώσεων (hinges) στο προσομοίωμα του φορέα, όπως και οι ιδιότητες αυτών.

Πρόκειται για την κυριότερη μη στατική μέθοδο που έχει ως στόχο τον προσδιορισμό της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών και είναι γνωστή και ως μέθοδος ελέγχου των μετακινήσεων (*Αβραμίδης και συνεργάτες, 2011*). Είναι μία διαδικασία απλούστερη σε απαιτήσεις προσομοίωσης και ανάλυσης σε σχέση με την κλασσική, πλήρη δυναμική ανελαστική ανάλυση. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματά της είναι επαρκή σε περιπτώσεις όπου οι φορείς χαρακτηρίζονται ως "κλασσικοί", δηλαδή κατά τη δυναμική ανάλυση δεν συμμετέχουν οι ανώτερες ιδιομορφές της απόκρισης (*EC8 $ 4.3.3.4.2.1, ΚΑΝ.ΕΠΕ $ 5.7.2α*).

Κατά την ανελαστική στατική ανάλυση εξετάζεται η συμπεριφορά του φορέα υπό την επίδραση σταθερών φορτίων βαρύτητας και μονοτονικά αυξανόμενων οριζόντιων φορτίων (*EC8 $4.3.3.4.2.1(1)*). Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζεται απόσπασμα εισαγωγής οριζόντιων μονοτονικών φορτίσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη ανάλυση pushover. Το αποτέλεσμα της μεθόδου είναι η καμπύλη αντίστασης ή αλλιώς η καμπύλη ικανότητας της υπό μελέτη κατασκευής, όπου αποτυπώνεται η μεταβολή της τέμνουσας βάσης με τη μετακίνηση του κόμβου ελέγχου, η θέση του οποίου αφορά το κέντρο μάζας στην κορυφή του φορέα (*EC8 $4.3.3.4.2.3,ΚΑΝ.ΕΠΕ $5.7.3.2*). Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η καμπύλη ικανότητας του συγκεκριμένου προσομοιώματος. Λόγω των συνδέσεων δοκού-

υποστυλώματος, φαίνεται ότι η καμπύλη ικανότητας του πολυβάθμιου (Mdof) συστήματος έχει τη μορφή της αντίστοιχης καμπύλης ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή (Sdof).

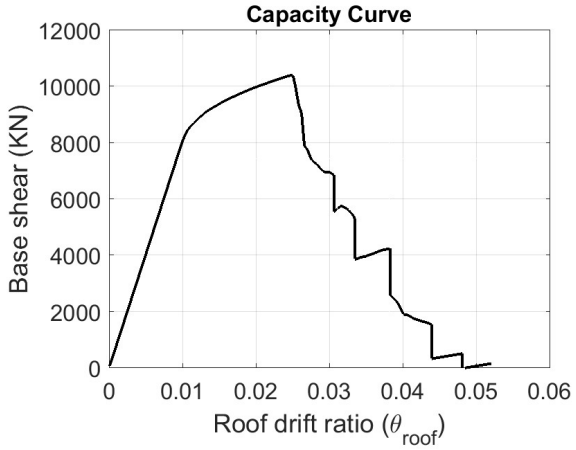
```
} elseif {$analysistype=="pushover"} {

  set  H [expr (12+13+8*13)*$ft]

  # Create a Plain load pattern with a Linear TimeSeries:
Note, the loads below do sum to 1.00!
  pattern Plain 2 "Linear" {
  #      nd        FX    FY    MZ
     load 17   0.01  0.0   0.0
     load 25   0.02  0.0   0.0
     load 33   0.04  0.0   0.0
     load 41   0.06  0.0   0.0
     load 49   0.09  0.0   0.0
     load 57   0.12  0.0   0.0
     load 65   0.17  0.0   0.0
     load 73   0.21  0.0   0.0
     load 81   0.28  0.0   0.0
  }

  source  util/RunPushover2Converge.tcl
```

Πίνακας 4.5: Εισαγωγή οριζόντιων μονοτονικών φορτίσεων ανά όροφο για τη διαδικασία ανάλυσης pushover.



Σχήμα 4.8: Καμπύλη αντίστασης (capacity curve) του 9-όροφου μεταλλικού πλαισίου. Αποτύπωση τέμνουσας βάσης (Base shear) συναρτήσει του λόγου της σχετικής μετακίνησης της οροφής (Roof drift ratio).

Παρατηρείται ότι πριν την κατάρρευση το κτήριο μπορεί να αναπτύξει τέμνουσα βάσης ίση με Vc= 10000 kN και μέγιστη σχετική μετακίνηση οροφής (roof drift) ίση με 5%. Σημειώνεται πως πρώτο βήμα για την εκτέλεση της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης (pushover analysis) είναι ο καθορισμός των πιθανών θέσεων σχηματισμού

πλαστικών αρθρώσεων (plastic hinges) στα μέλη της κατασκευής. Οι θέσεις αυτές ορίζονται στα σημεία όπου εμφανίζονται οι μέγιστες ροπές, δηλαδή στα άκρα των δοκών και των υποστυλωμάτων, όπου γίνεται η θεώρηση συγκεντρωμένης πλαστικότητας.

5 Μεθοδολογία διεξαγωγής αποτελεσμάτων

Τα διεξαγώμενα διαγράμματα της παρούσας εργασίας αφορούν στη σύγκριση εδαφικών παλμικών κινήσεων κοντινού πεδίου στην αυθεντική τους και στην περικομμένη μορφή. Οι παλμοί έχουν ταυτοποιηθεί με βάση τη θεωρία *Μίμογλου (2014)*, όπου ένα κύμα (wavelet) τοποθετείται καταλλήλως πάνω στο αρχικό σήμα βασιζόμενο στην περιορισμένη σημαντική διάρκεια του παλμού που προτάθηκε από τους *Mimoglou et al. (2014)*. Υπάρχει και η θεωρία των *Trifunac and Bray (1975)*, σύμφωνα με την οποία η σημαντική διάρκεια του παλμού περιορίζεται στα όρια που τίθενται μεταξύ των ποσοστών 5% και 95% της συνολικής διάρκειας του παλμού. Οι δύο αυτές μεθοδολογίες διαφέρουν σημαντικά. Το κύμα των *Μαυροειδή και Παπαγεωργίου (M&P) (2003)*, χρησιμοποιήθηκε για την μαθηματική αναπαράσταση του παλμού, όμως με τη μεθοδολογία που προτάθηκε από τον *Μίμογλου (2014)*, η μεθοδολογία των *Μαυροειδή και Παπαγεωργίου (M&P) (2003)*, τροποποιείται κατάλληλα, ώστε να εφαρμοστεί και για άλλους τύπους κυμάτων. Η νέα μεθοδολογία εισάγει ένα νέο μέγεθος, το γινόμενο των φασμάτων απόκρισης της ταχύτητας και της μετατόπισης, ($S_d x S_v$). Η περίοδος του παλμού καθορίζεται από το μέγιστο του προαναφερθέντος φάσματος. Ταυτόχρονα, εφαρμόζεται μια νέα σχέση μεταξύ της αθροιστικής απόλυτης μετατόπισης (cumulative absolute displacement- CAD) του κύματος και του μέγιστου φασματικού εύρους αυτού.

5.1 Περικομμένο σήμα- Truncated signal

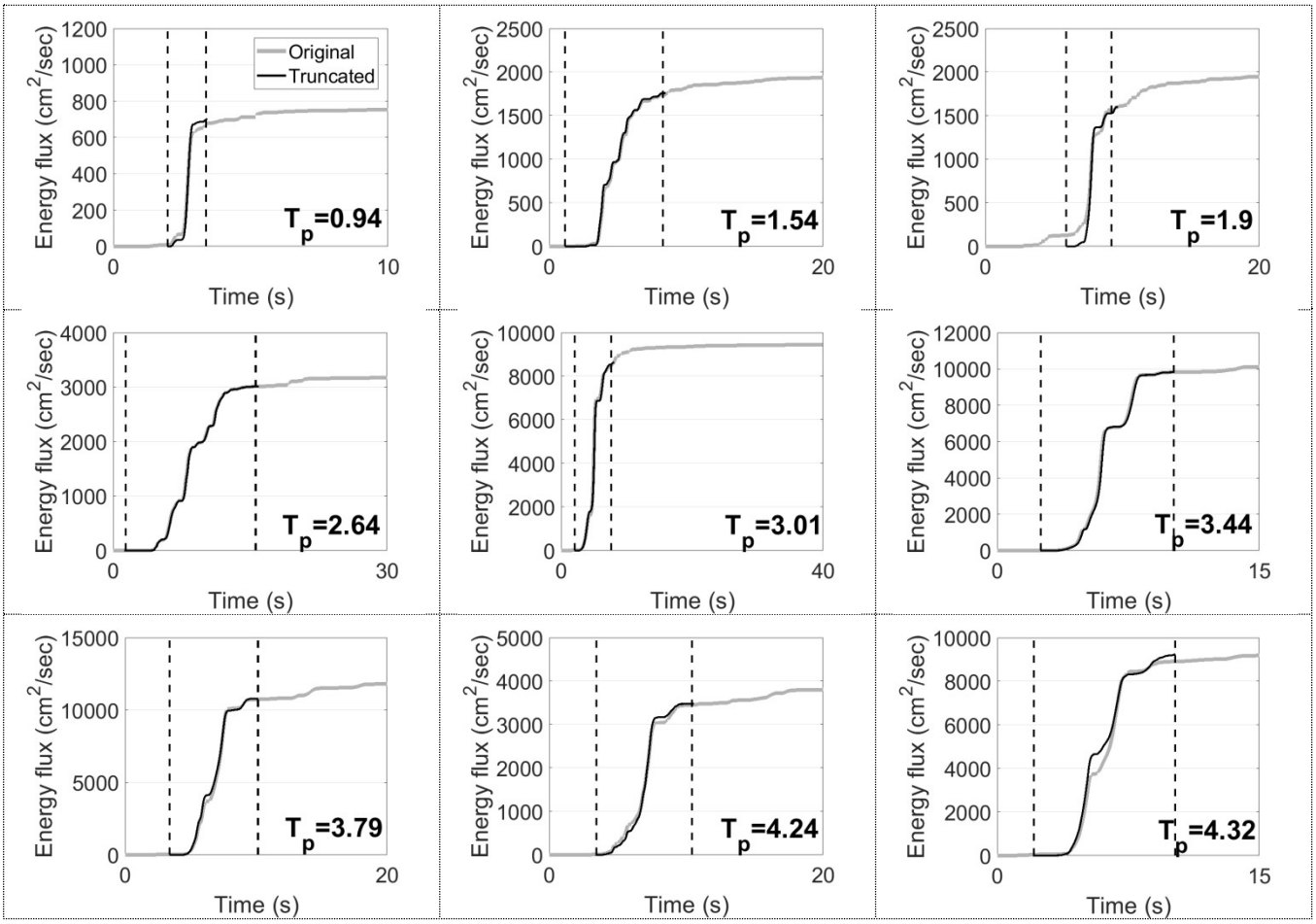
Το κυματίδιο που ταιριάζει καλύτερα στο αρχικό, αυθεντικό, εδαφικό σήμα, είναι το κατάλληλο μοντέλο προσομοίωσης του αρχικού κυρίαρχου παλμού κοντινού πεδίου. Το περικομμένο σήμα είναι μέρος του αυθεντικού, το οποίο στα χρονικά του όρια περιλαμβάνει τη θεμελιώδη περίοδο του αρχικού εδαφικού παλμού. Αυτό το σήμα κυματοειδούς μορφής περιλαμβάνει όλες τις σημαντικές πληροφορίες της εδαφικής κίνησης, συμπεριλαμβανομένου και της υψηλής συχνότητας πληροφορίες. Τα χρονικά όρια, δηλαδή οι άκρες της προτεινόμενης διάρκειας του κυματιδίου εμφανίζονται σε σημείο, όπου το γράφημα της ενέργειας (energy flux) παρουσιάζει οριζόντιο βήμα με μηδενική πρώτη παράγωγο. Γι' αυτό το λόγο δεν υπάρχει σημαντική διαγραμματική απόκλιση σχετικά με τη γραμμή στην αρχή και στο τέλος της περιόδου. Ο συγκεκριμένος ορισμός δεν ταυτίζεται με άλλους ορισμούς χρονικών ορίων, όπως η θεωρία *Trifunac & Bray*, σύμφωνα με την οποία ο παλμός περιορίζεται στα χρονικά όρια μεταξύ 5% και 95% της συνολικής διάρκειας του αρχικού παλμού.

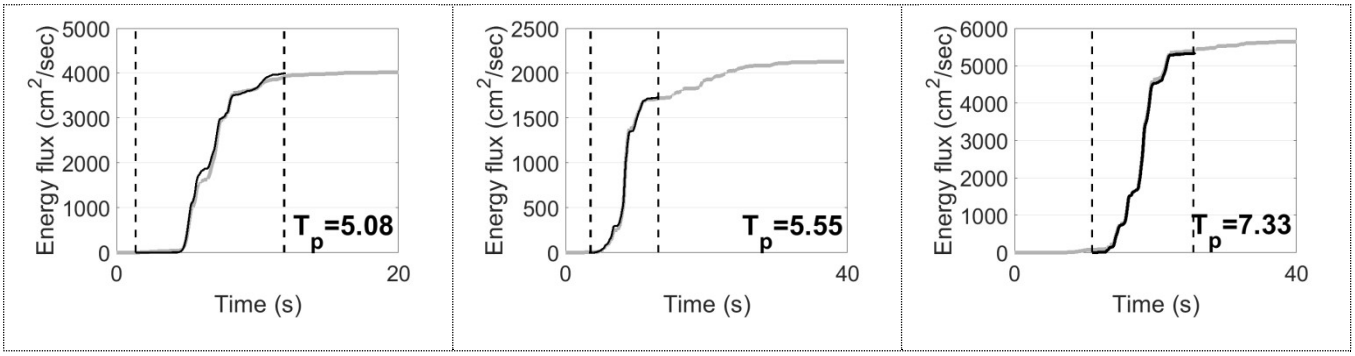
Εξαιτίας της προτεινόμενης μεθοδολογίας για τη διεξαγωγή του κατάλληλου περικομμένου σήματος, τα χρονικά όρια του περικομμένου σήματος σταματούν και ξεκινούν σε σημείο όπου η ταχύτητα της εδαφικής κίνησης βρίσκεται σε τιμές κοντά στο μηδέν.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν 50 σεισμικές καταγραφές από την ακόλουθη βάση δεδομένων: PEER-NGA2-West. Οι καταγραφές αυτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στις καταγραφές ολοκληρωμένης περιόδου και στις καταγραφές περικομμένης περιόδου. Έχοντας αυτές ως δεδομένα, πραγματοποιήθηκε δυναμική ανάλυση με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab και έγινε διεξαγωγή

διαγραμμάτων, για την καλύτερη επίτευξη σύγκρισης αποτελεσμάτων ολοκληρωμένης (original record) και μη (truncated record) καταγραφής. Οι καταγραφές αποτελούνται από εδαφικές κινήσεις με έντονη κατευθυντικότητα προς το ρήγμα (όπως η καταγραφή Loma Prieta) και παράλληλα σε αυτό (όπως η καταγραφή Erzincan-Turkey). Τα χαρακτηριστικά βρίσκονται συγκεντρωμένα στο Παράρτημα Β.

Παρακάτω, παρουσιάζεται παραδειγματικώς η προτεινόμενη περικομμένη διάρκεια, σύμφωνα με τον ορισμό της ενεργειακής ροής (energy flux), 12 παλμικών καταγραφών (Husid 1969, Arias 1970, Sarma 1971), οι οποίοι εξετάστηκαν για τη διεκπεραίωση της εργασίας, Σχήμα 5.1. Οι καταγραφές που παρουσιάζονται ανταποκρίνονται σε παλμικές εδαφικές κινήσεις με αυξανόμενη παλμική περίοδο, Tp. Το σκούρο χρώμα αντιστοιχεί στη μειωμένη διάρκεια του προτεινόμενου παλμού συναρτήσει του χρόνου, ώστε να υπάρχει παραλληλισμός με την αυθεντική διάρκεια του ίδιου παλμού. Παρατηρείται ότι η προτεινόμενη διάρκεια του παλμού συμπίπτει με την απότομη απελευθέρωση ενέργειας, η οποία σχετίζεται με το φαινόμενο των παλμών κοντινού πεδίου. Αξίζει να σημειωθεί πως η διάρκεια των υπό εξέταση παλμών στην πλειοψηφία τους μειώθηκε σημαντικά, κατά μέσο όρο 80%.

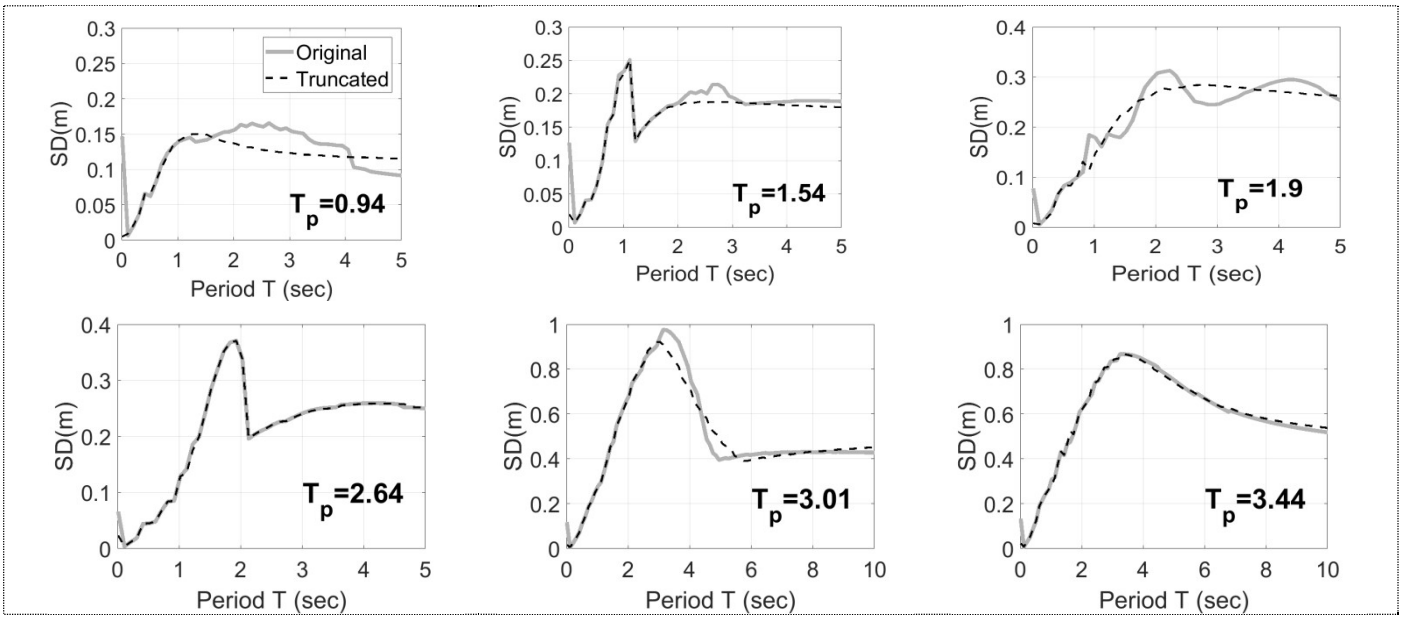


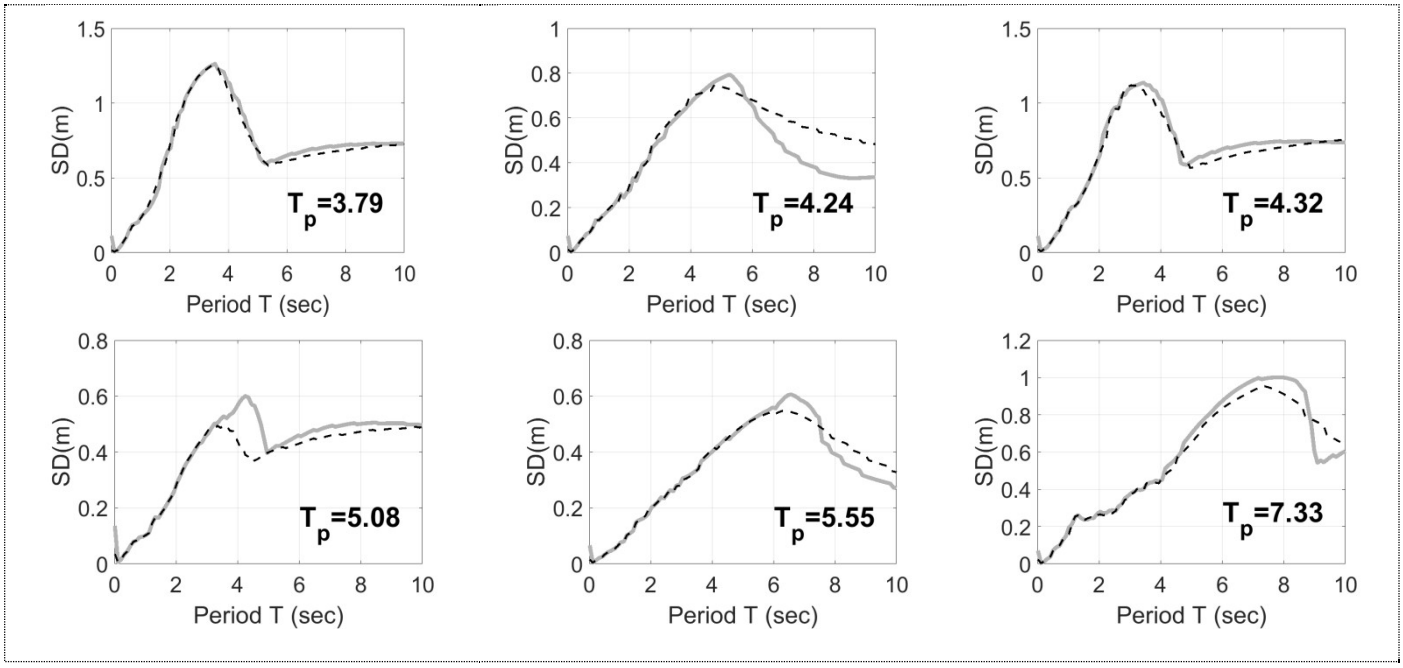


Σχήμα 5.1: Προτεινόμενη μειωμένη διάρκεια παλμού 12 εξεταζόμενων καταγραφών, σύμφωνα με τον ορισμό της ενεργειακής ροής

5.1.1 Αποτελέσματα μονοβάθμιου ταλαντωτή (SDOF)

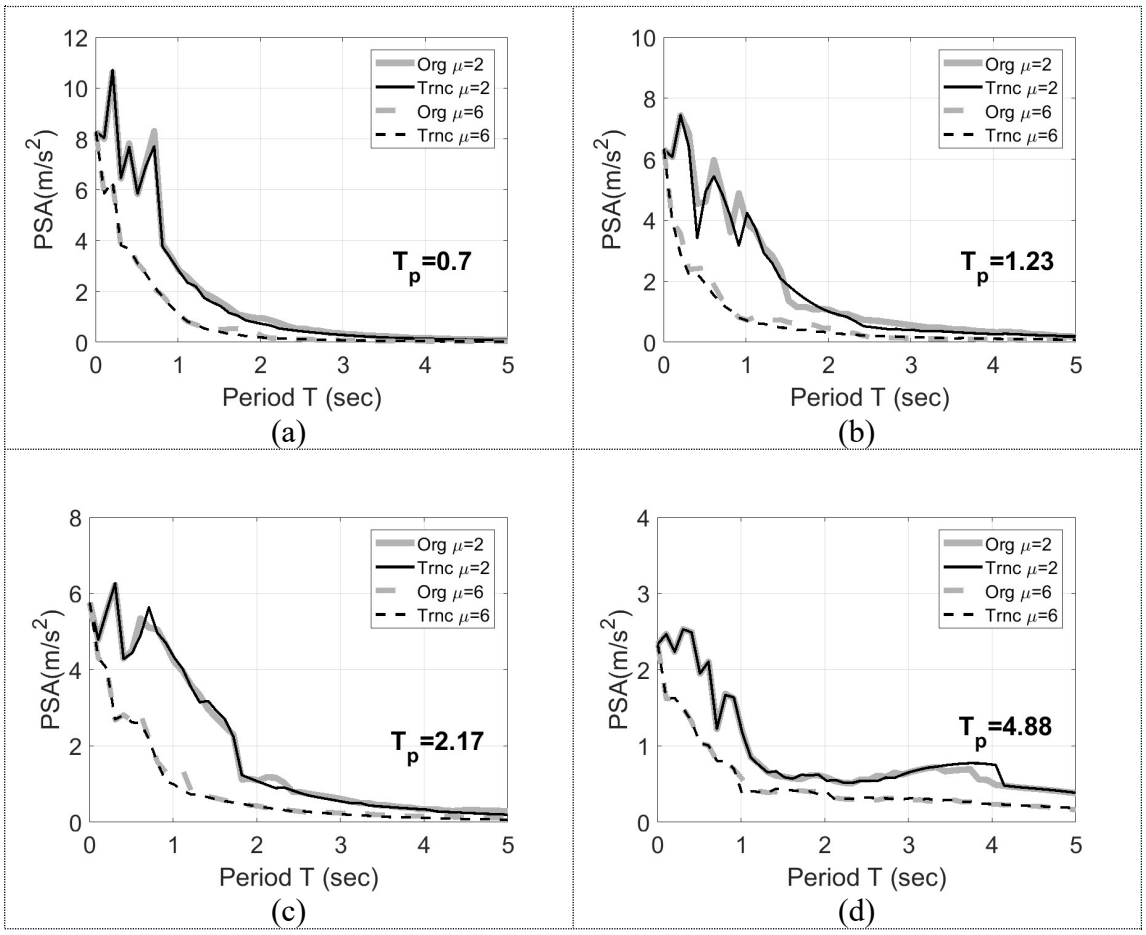
Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το φάσμα μετακίνησης της κάθε παραπάνω καταγραφής, χρησιμοποιώντας μονοβάθμιο ταλαντωτή με σταθερό συντελεστή ολκιμότητας, μ=6. Έπειτα από τη σύγκριση μεταξύ μειωμένης και αυθεντικής διάρκειας, παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις παρουσιάζεται μέγιστη τιμή μετακίνησης σε τιμές περιόδου, T, κοντά στη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο του παλμού, Tp. Συγκεκριμένα, φαίνεται να υφίσταται μεγαλύτερη ακρίβεια με τη χρήση περικομμένης διάρκειας παλμού σε σύγκριση με την αυθεντική.





Σχήμα 5.2: Φάσμα μετακίνησης με σταθερή τιμή συντελεστή ολκιμότητας, μ, ίση με 6.

Η συμφωνία μεταξύ αποτελεσμάτων περικομμένης και αντίστοιχης πρωτότυπης καταγραφής εδαφικών κινήσεων που βασίζονται σε κυματομορφές μελετάται και με τη χρήση των φασμάτων επιτάχυνσης σταθερής ολκιμότητας, μ, στο παρακάτω σχήμα. Σε αντίθεση με την περίπτωση των φασμάτων μετατόπισης, όπου οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται σε τιμές περιόδου κοντά στη θεμελιώδη περίοδο του παλμού, Tp, κατά την περίπτωση των φασμάτων επιτάχυνσης, οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται σε τιμές περιόδου μικρότερες από 0,5Tp. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τα φάσματα επιτάχυνσης σταθερής ολκιμότητας με τιμές μ=2 και μ=6 και περιπτώσεις παλμικών εδαφικών κινήσεων με τιμές περιόδου ίσες με Tp=0,7, 1,23, 2,17 και 4,88sec. Παρατηρείται πως και σε αυτή την περίπτωση υφίσταται ταύτιση αποτελεσμάτων μεταξύ προτεινόμενης περικομμένης και αυθεντικής εδαφικής κίνησης.

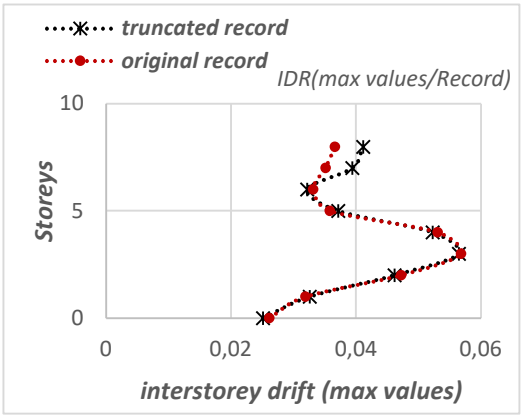


Σχήμα 5.3: Διαγραμματική απεικόνιση καταγραφών με περίοδο Tp=0.1, 1.23, 2.17, 4.88sec. φασματικής επιτάχυνσης σταθερής τιμής ολκιμότητας, μ. (a) NGA#568, (b) NGA#1119, (c) NGA#1013, (d) NGA#1161.

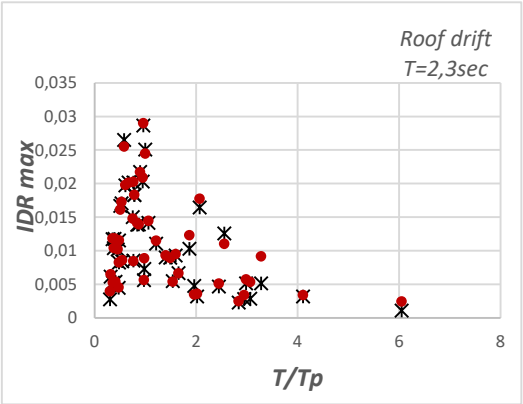
5.1.2 Αποτελέσματα MDOF

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα που αφορούν στις μετακινήσεις των ορόφων και ιδιαίτερα στη συνολική μετακίνηση οροφής (u_roof) σε σχέση με το πηλίκο της θεμελιώδους περιόδου T, η οποία διεξήχθη από την ιδιομορφική ανάλυση του κτηρίου, προς την αυξανόμενη περίοδο των κύκλων της παλμικής καταγραφής, T_p. Επίσης, παρουσιάζονται διαγράμματα αναφορικά της τέμνουσας δύναμης που αναπτύσσεται και συγκεκριμένα της τέμνουσας βάσης (V_base), αλλά και της σχετικής μετακίνησης μεταξύ των ορόφων (interstorey drift).

Παρατηρείται ότι τα διαγράμματα και στις δύο κατηγορίες των καταγραφών παρουσιάζουν ταυτόσημα αποτελέσματα εκτός από μερικές ελάχιστες αποκλίσεις κυρίως σε τιμές $T/T_p>2$.



(a)

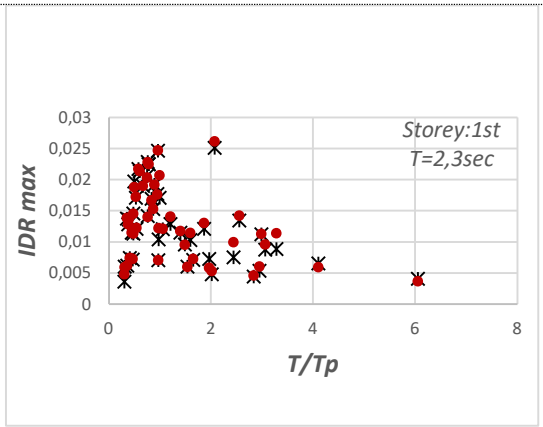


(b)

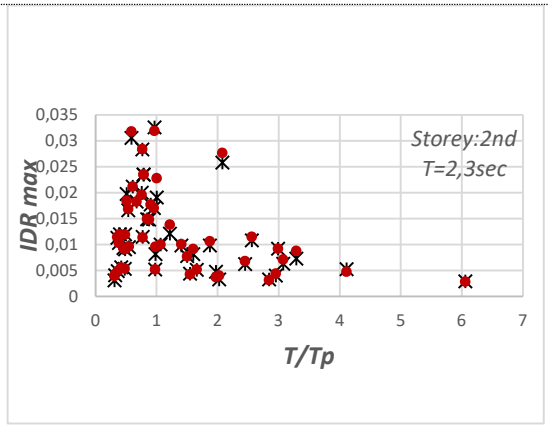
Σχήμα 5.4: Διαγραμματικά αποτελέσματα που αφορούν τις μέγιστες τιμές της σχετικής μετακίνησης μεταξύ των ορόφων σε συνάρτηση με τους ορόφους του κτηρίου (a), και σε συνάρτηση με το πηλίκο T/Tp (b).

Παρατηρείται ότι και οι δύο περιπτώσεις των καταγραφών δίνουν ίδια αποτελέσματα, πράγμα που σημαίνει πως η διαδικασία του προτεινόμενου κυματιδίου και η χρήση περικομμένης καταγραφής είναι αρκετά αξιόπιστη, τουλάχιστον για τις καταγραφές κοντινού πεδίου, τις οποίες πραγματευόμαστε. Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται να υφίστανται μερικές αποκλίσεις ιδιαίτερα στην οροφή του κτηρίου και σε περιπτώσεις όπου $4 < T/Tp < 3$.

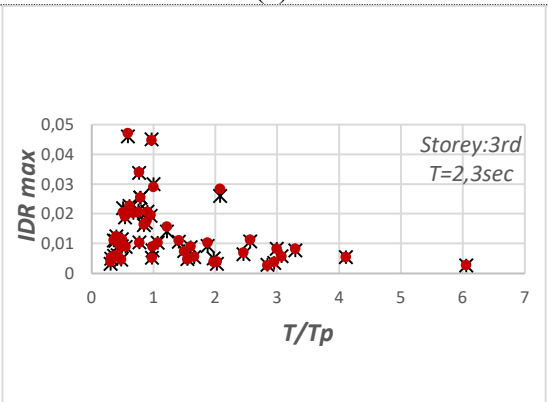
Σημειώνεται πως με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ολοκληρωμένου παλμού (original record), ενώ με μαύρο χρώμα τα αποτελέσματα της περικομμένης καταγραφής (truncated record). Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα που αφορούν στις σχετικές μετακινήσεις ανά ορόφου κτηρίου.


Storey:1st
T=2,3sec
IDR max
T/Tp

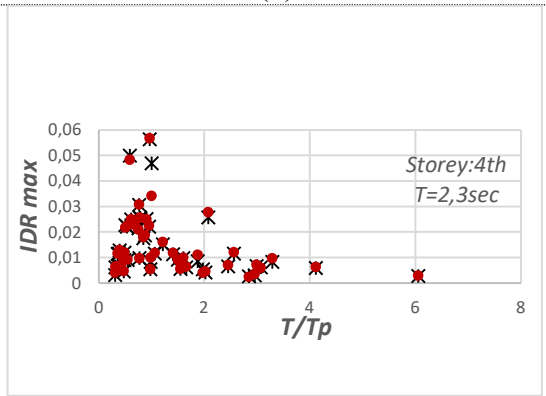
(a)


Storey:2nd
T=2,3sec
IDR max
T/Tp

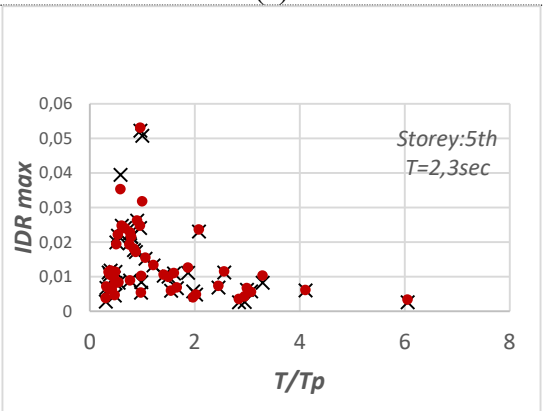
(b)


Storey:3rd
T=2,3sec
IDR max
T/Tp

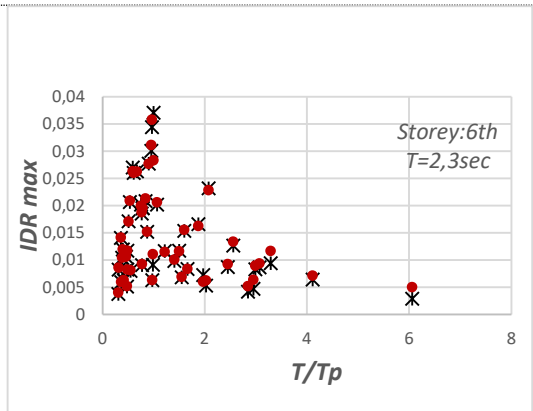
(c)


Storey:4th
T=2,3sec
IDR max
T/Tp

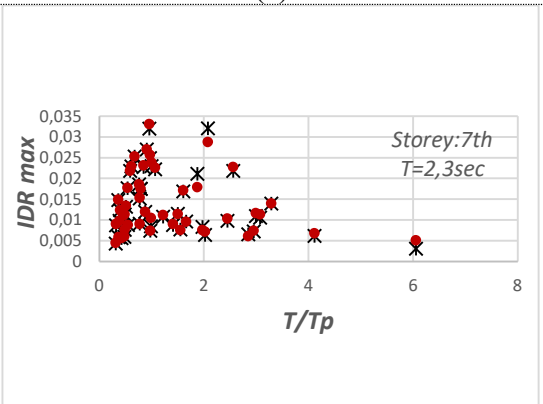
(d)


Storey:5th
T=2,3sec
IDR max
T/Tp

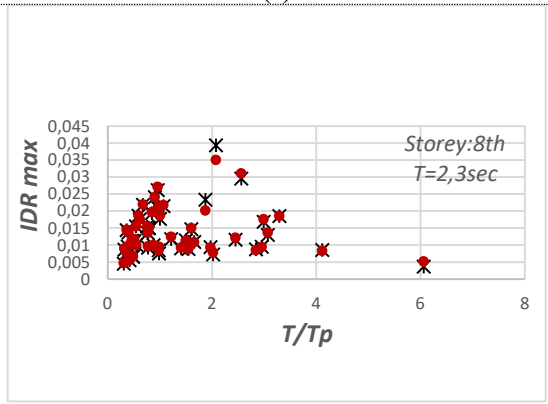
(e)


Storey:6th
T=2,3sec
IDR max
T/Tp

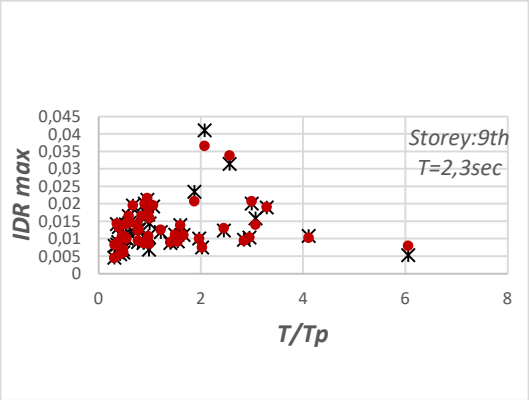
(f)


Storey:7th
T=2,3sec
IDR max
T/Tp

(g)

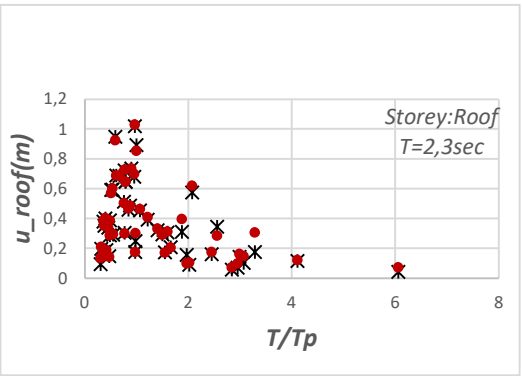

Storey:8th
T=2,3sec
IDR max
T/Tp

(h)

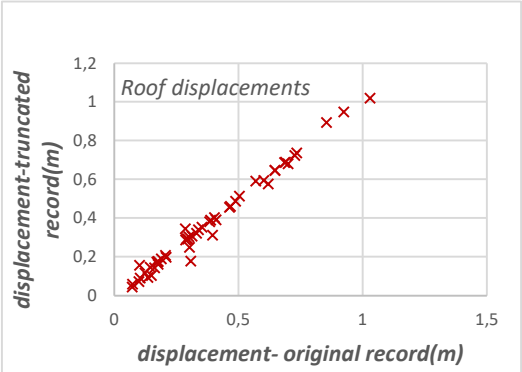


(i)

Σχήμα 5.5: Διαγραμματικά αποτελέσματα σχετικών μετακινήσεων μεγίστων τιμών ανά καταγραφή μεταξύ ορόφων κατασκευής (Γράφημα a-i).



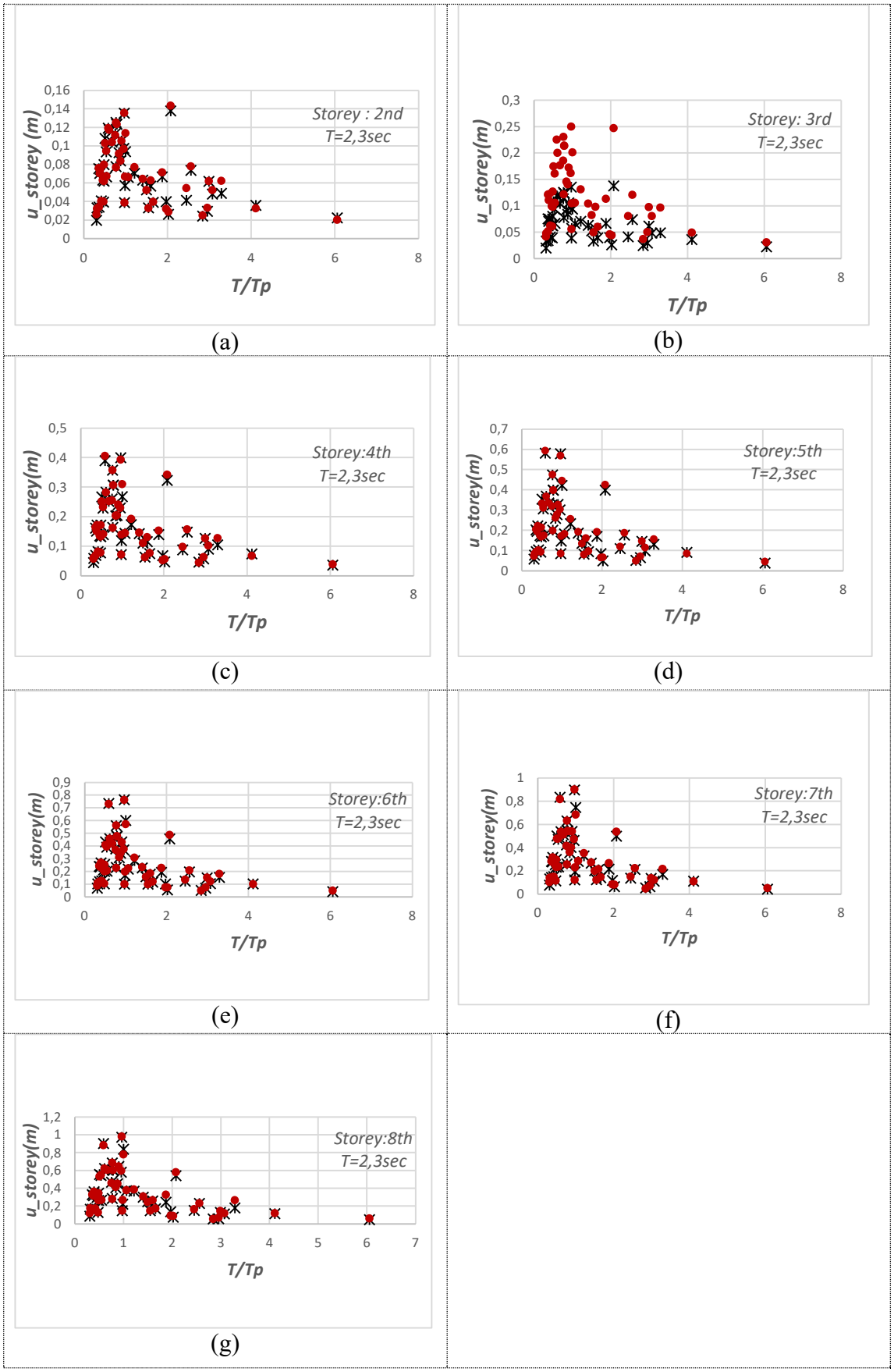
(a)



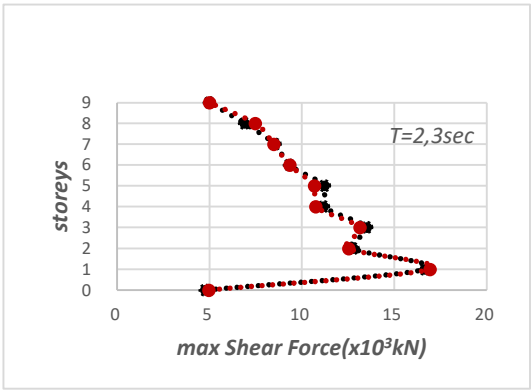
(b)

Σχήμα 5.6: Διαγραμματικά αποτελέσματα που αφορούν στις μετακινήσεις της οροφής συναρτήσει του πηλίκου περιόδων T/Tp (a), και μέγιστα αποτελέσματα μετακίνησης οροφής ανά καταγραφή με στόχο τη σύγκριση των δύο περιπτώσεων (b).

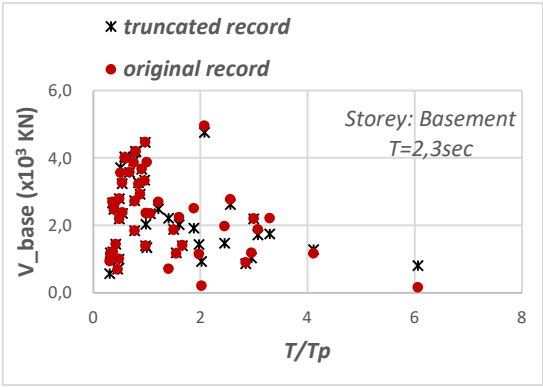
Παρατηρούνται αποκλίσεις ελάχιστες στην περίπτωση όπου 2< T/Tp<4, καθώς επίσης και στην περίπτωση όπου η τιμή των μετακινήσεων είναι μικρή σε σχέση με τη μέγιστη τιμή της μετακίνησης οροφής. Περαιτέρω διαγράμματα που αφορούν στις μετακινήσεις των εκάστοτε ορόφων παρατίθενται παρακάτω.



Σχήμα 5.7: Διαγραμματικά αποτελέσματα μετακίνησης ορόφων (Γράφημα a-g) σε συνάρτηση με το πηλίκο T/Tp.



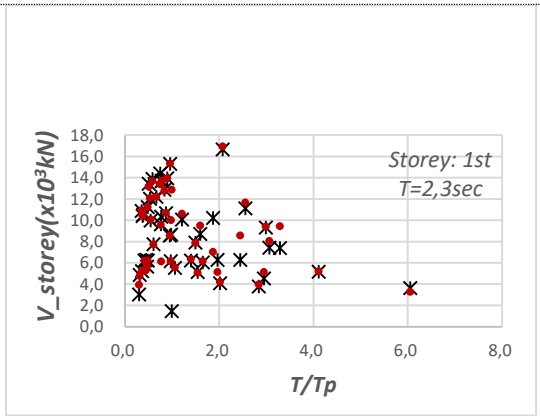
(a)



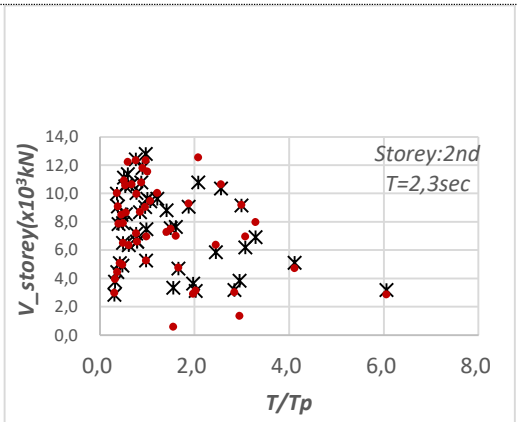
(b)

Σχήμα 5.8: Διαγραμματικά αποτελέσματα τέμνουσας βάσης σε συνάρτηση με το πηλίκο T/Tp.

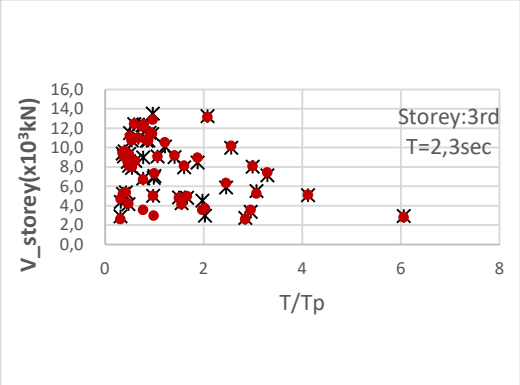
Παρατηρείται μία καλή ταύτιση αποτελεσμάτων, αφού τα εξαγόμενα αποτελέσματα της εκάστοτε κατηγορίας είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Μικρές διαφορές εμφανίζονται στους ορόφους 3, 4 και 5, όπου η απαίτηση τέμνουσας δύναμης είναι όπως φαίνεται μεγαλύτερη. Σύμφωνα με το Σχήμα 5.8 (b), οι μέγιστες τιμές της τέμνουσας βάσης εμφανίζονται για 0,5<T/Tp<1, ενώ οι μεγαλύτερες διαφορές αποτελεσμάτων υφίστανται στους ορόφους 1 με 5, όπως συμβαίνει κι με τα αποτελέσματα της σχετικής μετακίνησης (interstorey drifts). Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αφορούν στην τέμνουσα δύναμη που αναπτύσσεται ανά τον όροφο της κατασκευής.


V_storey(x10³kN)
T/Tp
Storey: 1st
T=2,3sec

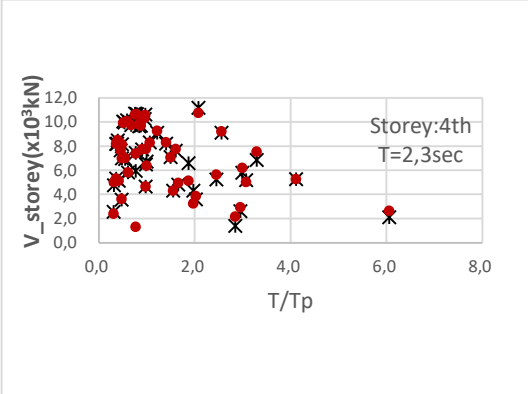
(a)


V_storey(x10³kN)
T/Tp
Storey:2nd
T=2,3sec

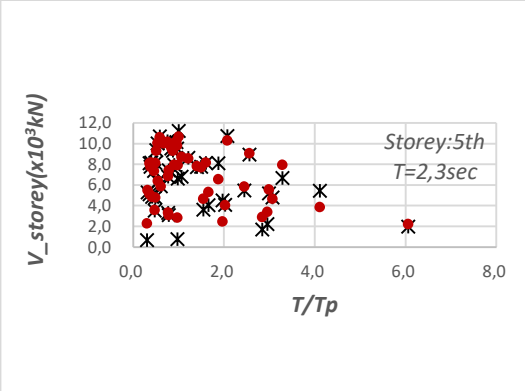
(b)


V_storey(x10³kN)
T/Tp
Storey:3rd
T=2,3sec

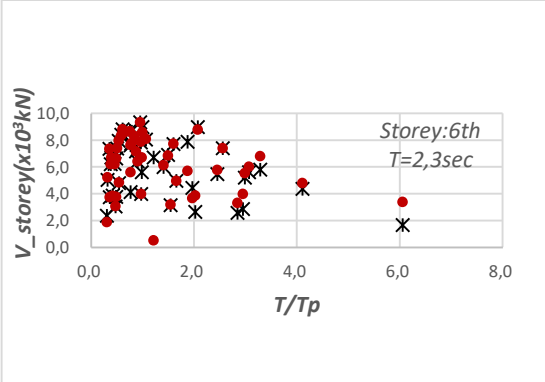
(c)


V_storey(x10³kN)
T/Tp
Storey:4th
T=2,3sec

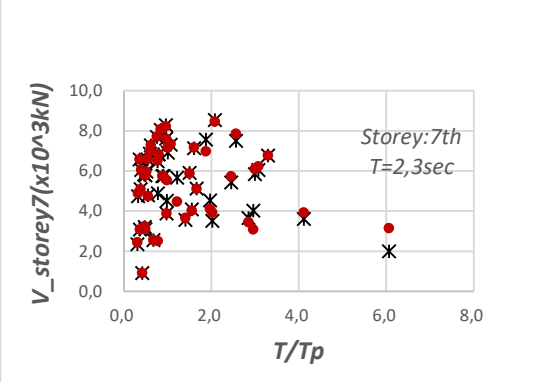
(d)


V_storey(x10³kN)
T/Tp
Storey:5th
T=2,3sec

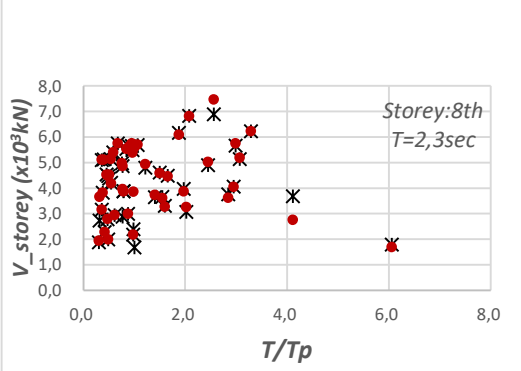
(e)


V_storey(x10³kN)
T/Tp
Storey:6th
T=2,3sec

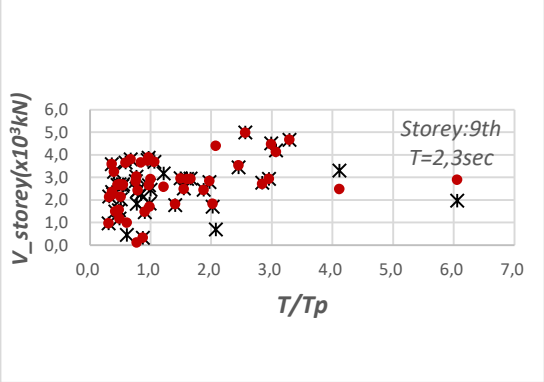
(f)


V_storey7(x10^3kN)
T/Tp
Storey:7th
T=2,3sec

(g)


V_storey (x10³kN)
T/Tp
Storey:8th
T=2,3sec

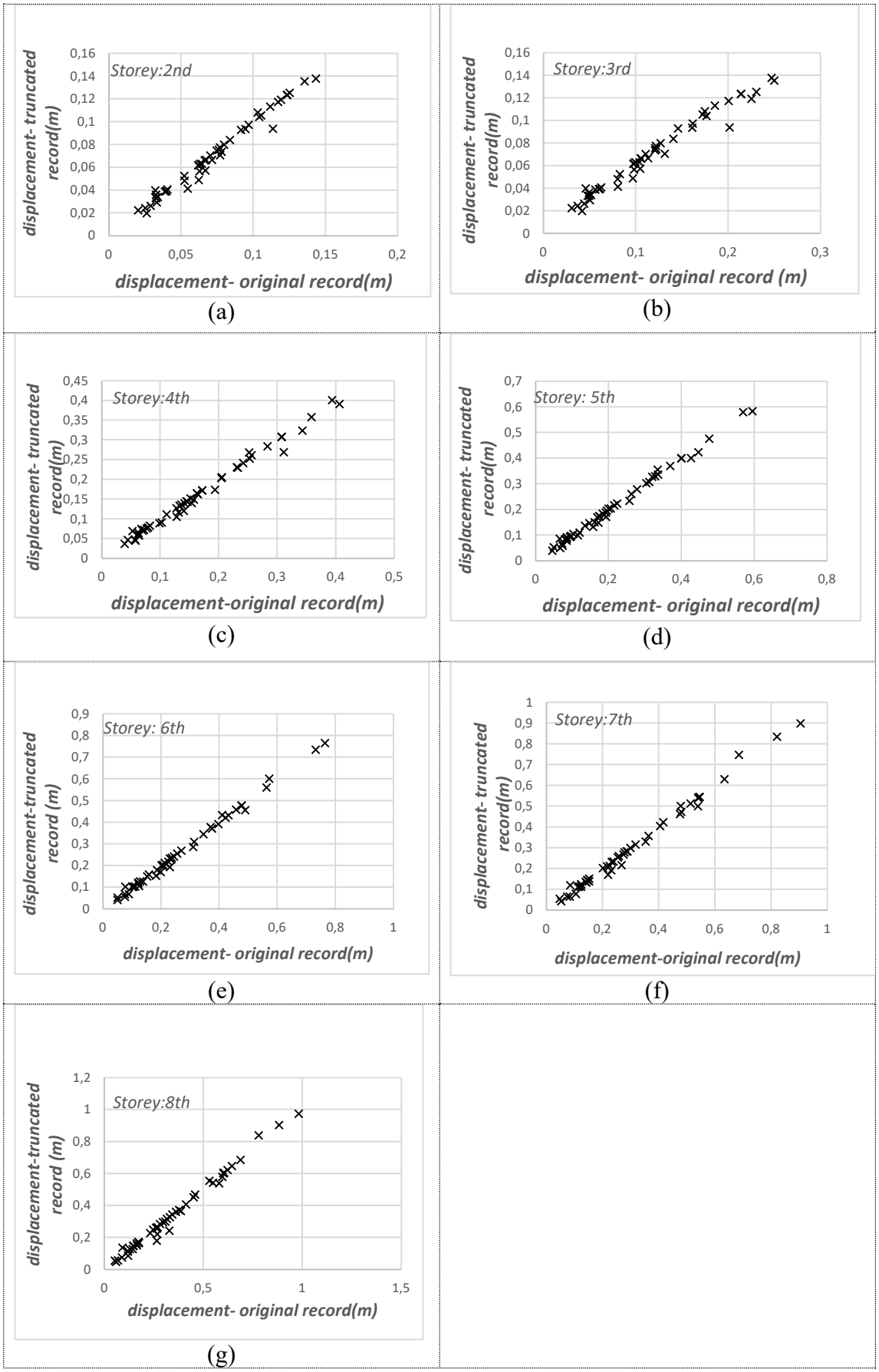
(h)



(i)

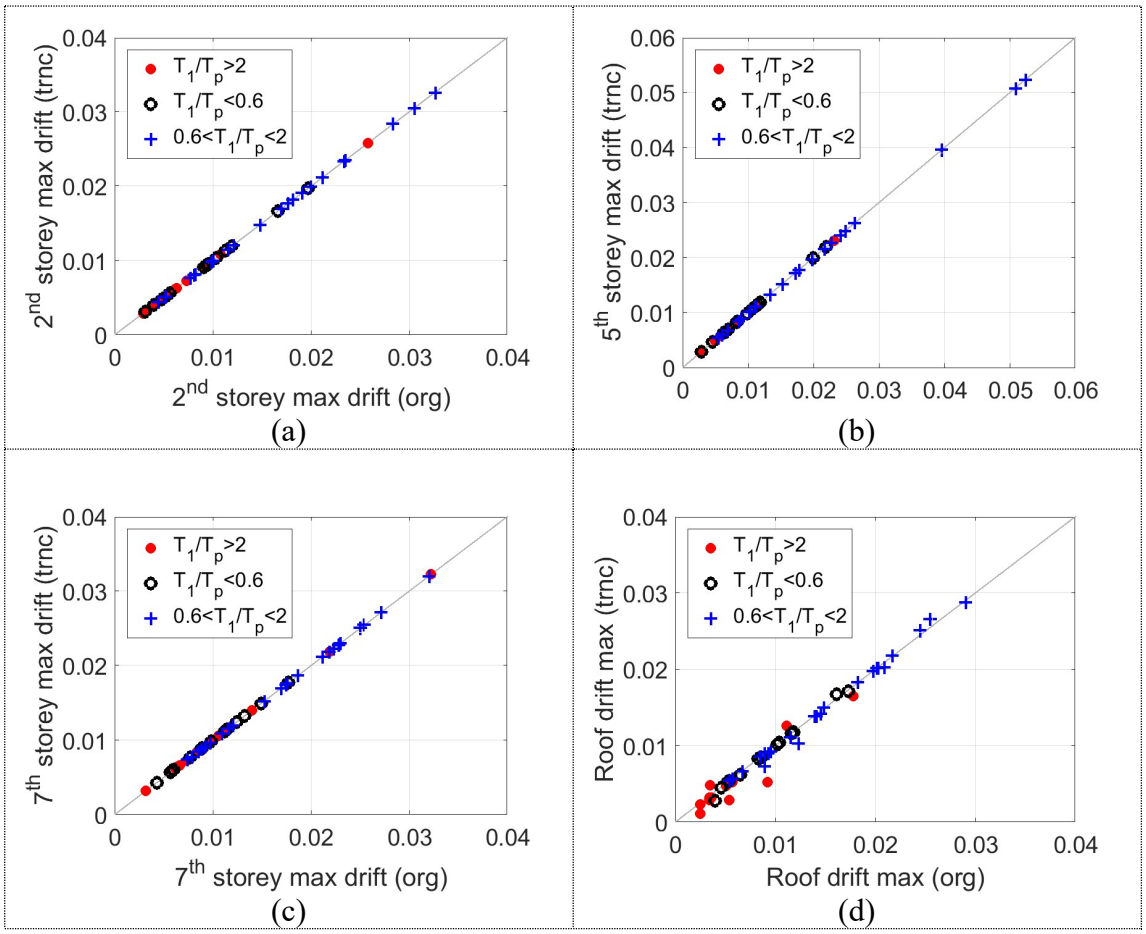
Σχήμα 5.9: Διαγραμματικά αποτελέσματα αναπτυσσόμενης τέμνουσας δύναμης σε κάθε όροφο (Γράφημα a-i).

Στην συνέχεια παραθέτουμε λεπτομερειακά τα διαγραμματικά αποτελέσματα της συμπεριφοράς κάθε ορόφου του κτηρίου υπό τις 50 καταγραφές κοντινού πεδίου. Συγκεκριμένα, συγκρίνεται η μετακίνηση των ορόφων σε περίπτωση περικομμένου και αυθεντικού σήματος. Παρατηρείται πως η μέθοδος του περικομμένου παλμού σε μορφή κυματιδίου παρουσιάζει αξιόπιστα αποτελέσματα, καθώς οι αποκλίσεις από τον αυθεντικό παλμό είναι ελάχιστες.



Σχήμα 5.10: Σύγκριση αποτελεσμάτων αυθεντικών (original record) και περικομμένων (truncated record) αντίστοιχων καταγραφών.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η μέγιστη σχετική μετατόπιση στον 2ο , 5ο ,7ο και το όροφο του κτηρίου. Παρατηρείται πως υπάρχει τέλεια συμφωνία μεταξύ των μεθόδων των σημάτων, με εξαίρεση τον τελευταίο όροφο όπου φαίνεται να υπάρχουν μερικά σφάλματα που αφορούν στην περίπτωση κατά την οποία οι καταγραφές έχουν μικρή θεμελιώδη περίοδο παλμού, Tp, δηλαδή όταν T1/Tp>2.



Σχήμα 5.11: Απεικόνιση μέσης μέγιστης σχετικής μετακίνησης διαφορετικών ορόφων της κατασκευής, (a) 2ος όροφος, (b) 5ος όροφος, (c) 7ος όροφος, (d) 9ος όροφος.

6 Συμπεράσματα

Έρευνες έδειξαν πως οι παλμικές εδαφικές κινήσεις με κατευθυντικότητα ευθύνονται για γραμμικές και μη γραμμικές κτηριακές συμπεριφορές έναντι σεισμού. Στην παρούσα διπλωματική αναλύεται η θεωρία κατά την οποία πραγματοποιείται η εξαγωγή ενός παλμού περιορισμένης χρονικής διάρκειας (truncated pulse) από τον αντίστοιχο αρχικό παλμό (original pusle), με στόχο την επιτάχυνση του ρυθμού των αναλύσεων, χωρίς όμως αυτές να χάνουν την ακρίβειά τους.

Αξίζει να σημειωθεί πως τα κτήρια μικρής ιδιοπεριόδου επηρεάζονται έντονα από την εδαφική επιτάχυνση (PGA) που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια του σεισμικού φαινομένου, ενώ τα κτήρια μεσαίας και υψηλής ιδιοπεριόδου, καθώς και τα κτήρια που πλήττονται από ανελαστικές συμπεριφορές επηρεάζονται από την εδαφική ταχύτητα που αναπτύσσεται (PGV). Γι' αυτό το λόγο, ένας χρονικά περιορισμένος παλμός που εξαρτάται από την εδαφική ταχύτητα, η οποία συνδέεται άμεσα με την εδαφική ενέργεια (energy flux) που απελευθερώνεται κατά την εδαφική κίνηση, είναι απαραίτητος.

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω, υπάρχουν δύο τρόποι επιλογής της περιόδου του παλμού. Ο πρώτος σχετίζεται με την επιλογή της περιόδου που αντιστοιχεί στην περίοδο μεταξύ των αυθαίρετων ορίων 5% και 95% του συνολικού ποσού της ενέργειας κατά τη θεωρία *Trifunac & Bray*. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, εμφανίζονται σφάλματα, τα οποία είναι δύσκολο να εξαλειφθούν. Ο δεύτερος τρόπος, σύμφωνα με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις στην παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στη θεωρία των *Μαυροειδή και Παπαγεωργίου*. Επιλέχθηκε ένα είδος κυματιδίου για την αναπαράσταση του παλμού, το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί σε διάφορα επίπεδα χρονικής διαρκείας αφού κατέχει συγκεκριμένη παράμετρο που αφορά στον αριθμό των κύκλων του παλμού, γ. Για τον καθορισμό των παραμέτρων που προτείνει η μεθοδολογία M&P, χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία που παρουσιάζεται στη μεθοδολογία *Μίμογλου (2014)*. Έπειτα από αυτή τη διαδικασία η διάρκεια του μειωμένου παλμού ισοδυναμεί με τη διάρκεια του κυρίαρχου παλμού της εκάστοτε καταγραφής.

Επιπλέον πλεονέκτημα χρήσης της μεθοδολογίας *Μαυροειδή και Παπαγεωργίου* αποτελεί το γεγονός ότι το κυματίδιο που εφαρμόζεται είναι προϊόν συνημιτονοειδούς περιοδικής συνάρτησης με κωδωνόσχημη περιβάλουσσα. Τα όρια της καμπύλης μπορούν να θεωρηθούν οριοθετημένα στα σημεία όπου εξασθενεί η αρμονική συνάρτηση και εξομαλύνεται η αρχική γραμμή του διαγράμματος. Συμπερασματικά, τα άκρα της προτεινόμενης περικομμένης χρονικής διάρκειας βρίσκονται στα σημεία όπου το γράφημα-διάγραμμα της ενεργειακής ροής (energy flux) παρουσιάζει οριζόντιο βήμα μηδενικής κλίσης. Για αυτό το λόγο, σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία, δεν παρουσιάζεται καμία αντιστάθμιση ή σφάλματα αναφορικά των ορίων της περικομμένης διάρκειας

Η προτεινόμενη έως τώρα περικομμένη καταγραφή (truncated record) έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί με στόχο την απλοποίηση του εισαγόμενου σήματος και την επιτάχυνση του χρόνου που απαιτείται για τη σεισμική αποτίμηση της κατασκευής. Αυτό συμβαίνει ειδικότερα στην περίπτωση που οι καταγεγραμμένοι παλμοί είναι κοντινού πεδίου. Ειδικότερα, η διαδικασία της περικοπής, σύμφωνα με τη θεωρία των *Καρδούτσου et al, (2017)*,η οποία αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 2, προσδίδει

πιο ακριβή αποτελέσματα στην περίπτωση που το PI (pulse index) της εκάστοτε καταγραφής υπερβαίνει την τιμή 0,65 (PI>0,65). Παρόλα αυτά, ακριβή αποτελέσματα μπορεί να αποδοθούν και σε περίπτωση που ο δείκτης PI είναι μικρότερος του 0,65 (PI<0,65), χωρίς όμως αυτό να αποτελεί εγγύηση για περαιτέρω χρήση και ανάλυση. Η χρήση του κυματιδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ώστε να δώσει αληθοφανής χρονοϊστορίες ταχύτητας και μετατόπισης. Για την ορθή επιβεβαίωση της διαδικασίας εξετάσθηκαν αρχικά μονοβάθμιοι ταλαντωτές και έπειτα πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή της προτάσεως σε πολυβάθμιο σύστημα, στην περίπτωσή μας στο 9- όροφο κτήριο. Σε όλες τις περιπτώσεις, είτε πρόκειται για μονοβάθμιο σύστημα ταλάντωσης (SDOF), είτε πρόκειται για πολυβάθμιο, τα αποτελέσματα που αφορούν στις μετατοπίσεις ορόφων, στις σχετικές μετατοπίσεις (drifts) και στην τέμνουσα βάσης συμπίπτουν και στις δύο κατηγορίες καταγραφών. Τέλος, πρόκειται για μία αντικατάσταση του αρχικού παλμού μίας καταγραφής (original record) από ένα κυματίδιο περιορισμένης χρονικής διάρκειας της αντίστοιχης καταγραφής (truncated record), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για μη γραμμική ανάλυση κτηριακής συμπεριφοράς έναντι σεισμού, χωρίς να χάνεται η ακρίβεια της ανάλυσης.

7 Βιβλιογραφία

1. Shrey K.Shahi, Jack W. Baker (2011). " An Empirically Calibrated Framework for Including the Effects of Near-Fault Directivity in Probabilistic Seismic Hazard Analysis", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, No. 2, pp. 742–755, April 2011, doi: 10.1785/0120100090.
2. Jack W. Baker (2007). "Plots of identified velocity pulses", Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA
3. Iunio Iervolino, C.Allin Cornell (2008). "Probability of Occurrence of Velocity Pulses in Near-Source Ground Motions", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 98, No. 5, pp. 2262–2277, October 2008, doi: 10.1785/0120080033.
4. LI Shuang, XIE Li-li (2007). "Progress and trend on near-field problems in civil engineering", Vol.20 No.1 (105~114) ACTA SEISMOLOGICA SINICA Jan., 2007, Article ID: 1000-9116(2007)01-0105-10, doi:10.1007/s11589-007-0105-0.
5. Mimoglou P., Psycharis I., Taflampas I. (2014) "Explicit determination of the pulse inherent in pulse-like ground motions", School of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Athens, Greece.
6. Mavroeidis P. George, Papageorgiou S. Apostolos (2003). "A Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No. 3, pp. 1099–1131, June 2003.
7. Yuan Lu, Panagiotou Marios (2014). "Characterization and Representation of Near-Fault Ground Motions Using Cumulative Pulse Extraction with Wavelet Analysis", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 104, No. 1, pp. 410–426, February 2014, doi: 10.1785/0120130031.
8. Jack W. Baker (2007). "Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, No. 5, pp. 1486–1501, October 2007, doi: 10.1785/0120060255.
9. Helmut Krawinkler, Babak Alavi and Farzin Zareian (2005). "IMPACT OF NEAR-FAULT PULSES ONENGINEERING DESIGN"P. G lkan and J.G. Anderson (eds.), Directions in Strong Motion Instrumentation, 83–106,© 2005 Springer. Printed in the Netherlands.
10. Kardoutsou V., Taflampas I. And Psycharis I. (2017). "A New Pulse Indicator for the Classification of Ground Motions", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 107, No. 3, pp. –, June 2017, doi: 10.1785/0120160301.
11. Maiatakis Ch. , Taflapas I. And Spryrakos C. (2008). "IDENTIFICATION OF NEAR-FAULT EARTHQUAKE RECORD CHARACTERISTICS", The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.
12. Amr S. Elnnashai, Luigi Di Sarno (2008). "FUNDAMENTALS OF EARTHQUAKE ENGINEERING", Εκδόσεις WILEY, A john Wiley & Sons, Ltd, Publication.
13. M. Zamora & R.Riddel (2011)."Elastic and Inelastic Response Spectra Considering Near-Fault Effects", Journal of Earthquake Engineering, 15:5, 775-808, DOI:10.1080/13632469.2011.555058.
14. Jonathan D. Bray and Andrian Rodriguez-Marek (2004). " Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24

15. Jorge Ruiz-Garcıa, Eduardo Miranda (2007). “Probabilistic estimation of maximum inelastic displacement demands for performance-based design”, EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS Earthquake Engng Struct. Dyn. 2007; **36**:1235–1254 Published online 6 March 2007 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/eqe.680.
16. Dimakopoulou V, Fragiadakis M, Spyrakos CC (2013) Seismic response of degrading sdof systems to near-field ground motions. Engineering Structures 53:10–24.
17. Constantinos C. Repapis, Petros P.Mimoglou, Vicky V. Dimakopoulou, Ionnis N. Psycharis, Ioannis M. Taflampas (2019) Efficient strong motion duration of pulse-like records for nonlinearstructural analysis. 10-1002/eqe.3249

8 Παραρτήματα

8.1 Παράρτημα Α- Κώδικας προσομοίωσης OpenSees

Α. Υπορουτίνα < source ModelConstruct.tcl>

```
set xsep [expr 6.10*$m]

#    tag              X          Y  <-- edafos
node  1             0.0        0.0
node  2   [expr    $bay]        0.0
node  3   [expr  2*$bay]        0.0
node  4   [expr  3*$bay]        0.0
node  5   [expr  4*$bay]        0.0
node  6   [expr  5*$bay]        0.0
node  7   [expr  5*$bay+$xsep]   0.0
#node  8   [expr  6*$bay+$xsep]   0.0

set nodeID 9;


 for {set i 1} {$i<=10} {incr i} {

 set yDim [expr ($i-2)*$stor+$stor1+$stor0];   # orofos  13ft
 if {$i == 1} {set yDim $stor0};               # upogeio 12ft
 if {$i == 2} {set yDim [expr $stor1+$stor0]}; # isogeio 18ft

 if {$i==1} {
        # No need for masses on the ceiling of the basement.
 It is not supposed to move anyway
         # just give it a small mass for eigenvalue stability
        #set m1  [expr -$P11/$g]
        #set m2  [expr -$P12/$g]
        set m1  0.01
        set m2  0.01
        set mm  0.01
        } elseif {$i==10} {
        set m1  [expr -$P31/$g]
        set m2  [expr -$P32/$g]
        set mm  [expr -$PP3/$g]
        } elseif {$i==2} {
        set m1  [expr -$P21/$g]
        set m2  [expr -$P22/$g]
        set mm  [expr -$PP1/$g]
        } else {
        set m1  [expr -$P21/$g]
        set m2  [expr -$P22/$g]
        set mm  [expr -$PP2/$g]
        }
```

```
node   $nodeID                0.                $yDim
mass   $nodeID          $m1   0.  0.

node  [expr $nodeID+1]  [expr     $bay]         $yDim
mass  [expr $nodeID+1]  $m2  0.   0.

node  [expr $nodeID+2]  [expr   2*$bay]         $yDim
mass  [expr $nodeID+2]  $m2  0.   0.

node  [expr $nodeID+3]  [expr   3*$bay]         $yDim
mass  [expr $nodeID+3]  $m2  0.  0.

node  [expr $nodeID+4]  [expr   4*$bay]         $yDim
mass  [expr $nodeID+4]  $m2  0.  0.

node  [expr $nodeID+5]  [expr   5*$bay]         $yDim
mass  [expr $nodeID+5]  $m1  0.  0.

node  [expr $nodeID+6]  [expr   5*$bay+$xsep]    $yDim
mass  [expr $nodeID+6]  $mm  0.  0.

#node  [expr $nodeID+7]  [expr   6*$bay+$xsep]    $yDim
#mass  [expr $nodeID+7]  $mm  0.   0.

incr nodeID 8
}

##############################################################
##############################################################
# Fix supports at base of columns
#    tag   DX   DY   RZ
for {set j 1} {$j<=7} {incr j} {
  fix   $j    1    1   0
}
fix   9    1    0    0 ; # basement node
fix   14   1    0    0 ; # basement node

##############################################################
######
# Define column elements
# ----------------------
set beamID 1
set matID 50

set j 1

set Emod $Young;

element elasticBeamColumn  1     1      9 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1; #W14x550
element elasticBeamColumn  2     2     10 [expr 178*$in2]
$Emod [expr 10800.*$in4] 1; #W14x605
element elasticBeamColumn  3     3     11 [expr 178*$in2]
$Emod [expr 10800.*$in4] 1; #W14x605
element elasticBeamColumn  4     4     12 [expr 178*$in2]
$Emod [expr 10800.*$in4] 1; #W14x605
element elasticBeamColumn  5     5     13 [expr 178*$in2]
$Emod [expr 10800.*$in4] 1; #W14x605
element elasticBeamColumn  6     6     14 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  3250.*$in4] 1; #W14x550 (weak)
element elasticBeamColumn  7     7     15 [expr 2*340.8*$in2]
$Emod [expr 2*14400.*$in4] 1; #12xW14x193
#element elasticBeamColumn  8     8     16 [expr 340.8*$in2]
$Emod [expr 14400.*$in4] 1; #6xW14x193
```

```
element elasticBeamColumn  9      9    17 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 10     10    18 [expr 178*$in2]
$Emod [expr 10800.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 11     11    19 [expr 178*$in2]
$Emod [expr 10800.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 12     12    20 [expr 178*$in2]
$Emod [expr 10800.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 13     13    21 [expr 178*$in2]
$Emod [expr 10800.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 14     14    22 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  3250.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 15     15    23 [expr 2*340.8*$in2]
$Emod [expr 2*14400.*$in4] 1
#element elasticBeamColumn 16     16    24 [expr 340.8*$in2]
$Emod [expr 14400.*$in4] 1

element elasticBeamColumn 17     17    25 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 18     18    26 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 19     19    27 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 20     20    28 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 21     21    29 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 22     22    30 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  3250.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 23     23    31 [expr 2*256.2*$in2]
$Emod [expr 2*10260.*$in4] 1
#element elasticBeamColumn 24     24    32 [expr 256.2*$in2]
$Emod [expr 10260.*$in4] 1

element elasticBeamColumn 25     25    33 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 26     26    34 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 27     27    35 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 28     28    36 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 29     29    37 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 30     30    38 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  3250.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 31     31    39 [expr 2*256.2*$in2]
$Emod [expr 2*10260.*$in4] 1
#element elasticBeamColumn 32     32    40 [expr 256.2*$in2]
$Emod [expr 10260.*$in4] 1
```

```
element elasticBeamColumn 33     33    41 [expr 134*$in2]
$Emod [expr  7190.*$in4] 1; #W14x455
element elasticBeamColumn 34     34    42 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1; #W14x550
element elasticBeamColumn 35     35    43 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1; #W14x550
element elasticBeamColumn 36     36    44 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1; #W14x550
element elasticBeamColumn 37     37    45 [expr 162*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1; #W14x550
element elasticBeamColumn 38     38    46 [expr 134*$in2]
$Emod [expr  2560.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 39     39    47 [expr 2*192.*$in2]
$Emod [expr  2*7440.*$in4] 1
#element elasticBeamColumn 40     40    48 [expr 192.*$in2]
$Emod [expr  7440.*$in4] 1

element elasticBeamColumn 41     41    49 [expr 134.*$in2]
$Emod [expr  7190.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 42     42    50 [expr 162.*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 43     43    51 [expr 162.*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 44     44    52 [expr 162.*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 45     45    53 [expr 162.*$in2]
$Emod [expr  9430.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 46     46    54 [expr 134.*$in2]
$Emod [expr  2560.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 47     47    55 [expr 2*192.*$in2]
$Emod [expr  2*7440.*$in4] 1
#element elasticBeamColumn 48     48    56 [expr 192.*$in2]
$Emod [expr  7440.*$in4] 1

element elasticBeamColumn 49     49    57 [expr 117*$in2]
$Emod [expr  6000.*$in4] 1; #W14x398
element elasticBeamColumn 50     50    58 [expr 134*$in2]
$Emod [expr  7190.*$in4] 1; #W14x455
element elasticBeamColumn 51     51    59 [expr 134*$in2]
$Emod [expr  7190.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 52     52    60 [expr 134*$in2]
$Emod [expr  7190.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 53     53    61 [expr 134*$in2]
$Emod [expr  7190.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 54     54    62 [expr 117*$in2]
$Emod [expr  2170.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 55     55    63 [expr 2*144.6*$in2]
$Emod [expr  2*5292.*$in4] 1
#element elasticBeamColumn 56     56    64 [expr 144.6*$in2]
$Emod [expr  5292.*$in4] 1
```

```
element elasticBeamColumn 57     57    65 [expr 117*$in2]
$Emod [expr  6000.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 58     58    66 [expr 134*$in2]
$Emod [expr  7190.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 59     59    67 [expr 134*$in2]
$Emod [expr  7190.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 60     60    68 [expr 134*$in2]
$Emod [expr  7190.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 61     61    69 [expr 134*$in2]
$Emod [expr  7190.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 62     62    70 [expr 117*$in2]
$Emod [expr  2170.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 63     63    71 [expr 2*144.6*$in2]
$Emod [expr  2*5292.*$in4] 1
#element elasticBeamColumn 64     64    72 [expr 144.6*$in2]
$Emod [expr  5292.*$in4] 1

element elasticBeamColumn 65     65    73 [expr 101*$in2]
$Emod [expr  4900.*$in4] 1; #W14x342
element elasticBeamColumn 66     66    74 [expr 117*$in2]
$Emod [expr  6000.*$in4] 1; #W14x398
element elasticBeamColumn 67     67    75 [expr 117*$in2]
$Emod [expr  6000.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 68     68    76 [expr 117*$in2]
$Emod [expr  6000.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 69     69    77 [expr 117*$in2]
$Emod [expr  6000.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 70     70    78 [expr 117*$in2]
$Emod [expr  1810.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 71     71    79 [expr 2*84.6*$in2]
$Emod [expr  2*2910.*$in4] 1
#element elasticBeamColumn 72     72    80 [expr 84.6*$in2]
$Emod [expr  2910.*$in4] 1

element elasticBeamColumn 73     73    81 [expr 101*$in2]
$Emod [expr  4900.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 74     74    82 [expr 117*$in2]
$Emod [expr  6000.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 75     75    83 [expr 117*$in2]
$Emod [expr  6000.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 76     76    84 [expr 117*$in2]
$Emod [expr  6000.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 77     77    85 [expr 117*$in2]
$Emod [expr  6000.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 78     78    86 [expr 117*$in2]
$Emod [expr  1810.*$in4] 1
element elasticBeamColumn 79     79    87 [expr 2*84.6*$in2]
$Emod [expr  2*2910.*$in4] 1
#element elasticBeamColumn 80     80    88 [expr 84.6*$in2]
$Emod [expr  2910.*$in4] 1
```

```
##############################################################
#######################
# General parameters for non-linear beams
set maxiter 15
source hyst_mat.tcl

# I usually set this at 1/1000 but this is a bit too much. It
actually causes premature failures in the pushovers
# It seems that with 1/200 the model is much more stable. The
reason is that with 1/1000 we have a hinge
# that is very stretched out (very shallow drops, very long
plateaus, everything get's smoothed out).
# This may lead to some numerical issues actually.
#set plr [expr 1./200.]
#set plr [expr 1./168.]
set plr [expr 1./75.]
set pl  [expr $plr*$bay];   # length of plastic hinge section

set Ebeam  $Young
set Ehinge $Young

set isec 1
set ilevel 1
set jlevel [expr $ilevel-1]


#         secID       matID         fy0($ilevel)  Young
In         Wpl      bay      ah0              mc0
ac0                  R                   mu0
p
hyst_mat $isec [expr 100+$ilevel]  [lindex $fy0 $jlevel]
$Ehinge  $In($isec) $Wpl($isec) $bay [lindex $ah $jlevel]
[lindex $mc $jlevel] [lindex $ac $jlevel] [lindex $R $jlevel]
[lindex $mu $jlevel]  $plr
#uniaxialMaterial Elastic [expr 100+$ilevel] [expr $In($isec)*
$Young]
section Genericld [expr 1000+$ilevel] [expr 100+$ilevel] Mz

#set pl $Lhinge($isec)
element beamWithHinges 81 9  10  1001  $pl 1001  $pl  $Ebeam
[expr 53.7*$in2]  [expr 13300*$in4]  2  -iter  $maxiter
element beamWithHinges 82 10 11  1001  $pl 1001  $pl  $Ebeam
[expr 53.7*$in2]  [expr 13300*$in4]  2  -iter  $maxiter
element beamWithHinges 83 11 12  1001  $pl 1001  $pl  $Ebeam
[expr 53.7*$in2]  [expr 13300*$in4]  2  -iter  $maxiter
element beamWithHinges 84 12 13  1001  $pl 1001  $pl  $Ebeam
[expr 53.7*$in2]  [expr 13300*$in4]  2  -iter  $maxiter
element beamWithHinges 85 13 14  1001  $pl 1000  $pl  $Ebeam
[expr 53.7*$in2]  [expr 13300*$in4]  2  -iter  $maxiter
#element truss          86 14 15  1111
#element truss          87 15 16  2222

set isec 1
set ilevel 2
set jlevel [expr $ilevel-1]
```

```
set isec 1
set ilevel 2
set jlevel [expr $ilevel-1]

hyst_mat $isec [expr 100+$ilevel]  [lindex $fy0 $jlevel]
$Ehinge  $In($isec) $Wpl($isec) $bay [lindex $ah $jlevel]
[lindex $mc $jlevel] [lindex $ac $jlevel] [lindex $R $jlevel]
[lindex $mu $jlevel]  $plr
#uniaxialMaterial Elastic [expr 100+$ilevel] [expr $In($isec)*
$Young]
section Genericld [expr 1000+$ilevel] [expr 100+$ilevel] Mz

#set pl $Lhinge($isec)
element beamWithHinges 88 17 18 1002 $pl 1002 $pl $Ebeam [expr
53.7*$in2] [expr 13300*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 89 18 19 1002 $pl 1002 $pl $Ebeam [expr
53.7*$in2] [expr 13300*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 90 19 20 1002 $pl 1002 $pl $Ebeam [expr
53.7*$in2] [expr 13300*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 91 20 21 1002 $pl 1002 $pl $Ebeam [expr
53.7*$in2] [expr 13300*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 92 21 22 1002 $pl 1000 $pl $Ebeam [expr
53.7*$in2] [expr 13300*$in4] 2 -iter $maxiter
#element truss          93 22 23 1111
#element truss          94 23 24 2222

# number of nodes to be slaved to the master
set slaveNodes 7

set masterNode 17
for {set ik [expr $masterNode+1]} {$ik<=$masterNode+
$slaveNodes} {incr ik} {
 equalDOF $masterNode $ik 1
}
set isec 1
set ilevel 3
set jlevel [expr $ilevel-1]

hyst_mat $isec [expr 100+$ilevel]  [lindex $fy0 $jlevel]
$Ehinge  $In($isec) $Wpl($isec) $bay [lindex $ah $jlevel]
[lindex $mc $jlevel] [lindex $ac $jlevel] [lindex $R $jlevel]
[lindex $mu $jlevel]  $plr
#uniaxialMaterial Elastic [expr 100+$ilevel] [expr $In($isec)*
$Young]
section Genericld [expr 1000+$ilevel] [expr 100+$ilevel] Mz

#set pl $Lhinge($isec)
element beamWithHinges 95 25 26 1003 $pl 1003 $pl $Ebeam [expr
53.7*$in2] [expr 13300*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 96 26 27 1003 $pl 1003 $pl $Ebeam [expr
53.7*$in2] [expr 13300*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 97 27 28 1003 $pl 1003 $pl $Ebeam [expr
53.7*$in2] [expr 13300*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 98 28 29 1003 $pl 1003 $pl $Ebeam [expr
53.7*$in2] [expr 13300*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 99 29 30 1003 $pl 1000 $pl $Ebeam [expr
53.7*$in2] [expr 13300*$in4] 2 -iter $maxiter
#element truss         100 30 31 1111
#element truss         101 31 32 2222
```

```
set masterNode 25
for {set ik [expr $masterNode+1]} {$ik<=$masterNode+
$slaveNodes} {incr ik} {
 equalDOF $masterNode $ik 1
}

set isec 2
set ilevel 4
set jlevel [expr $ilevel-1]

hyst_mat $isec [expr 100+$ilevel]  [lindex $fy0 $jlevel]
$Ehinge  $In($isec) $Wpl($isec) $bay [lindex $ah $jlevel]
[lindex $mc $jlevel] [lindex $ac $jlevel] [lindex $R $jlevel]
[lindex $mu $jlevel]  $plr
#uniaxialMaterial Elastic [expr 100+$ilevel] [expr $In($isec)*
$Young]
section Genericld [expr 1000+$ilevel] [expr 100+$ilevel] Mz

#set pl $Lhinge($isec)
element beamWithHinges 102 33 34 1004 $pl 1004 $pl $Ebeam
[expr 44.2*$in2] [expr 9040*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 103 34 35 1004 $pl 1004 $pl $Ebeam
[expr 44.2*$in2] [expr 9040*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 104 35 36 1004 $pl 1004 $pl $Ebeam
[expr 44.2*$in2] [expr 9040*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 105 36 37 1004 $pl 1004 $pl $Ebeam
[expr 44.2*$in2] [expr 9040*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 106 37 38 1004 $pl 1000 $pl $Ebeam
[expr 44.2*$in2] [expr 9040*$in4] 2 -iter $maxiter
#element truss          107 38 39 1111
#element truss          108 39 40 2222


 set isec 2
 set ilevel 5
 set jlevel [expr $ilevel-1]

 hyst_mat $isec [expr 100+$ilevel]  [lindex $fy0 $jlevel]
 $Ehinge  $In($isec) $Wpl($isec) $bay [lindex $ah $jlevel]
 [lindex $mc $jlevel] [lindex $ac $jlevel] [lindex $R $jlevel]
 [lindex $mu $jlevel]  $plr
 #uniaxialMaterial Elastic [expr 100+$ilevel] [expr $In($isec)*
 $Young]
 section Genericld [expr 1000+$ilevel] [expr 100+$ilevel] Mz

 #set pl $Lhinge($isec)
 element beamWithHinges 109 41 42 1005 $pl 1005 $pl $Ebeam
 [expr 44.2*$in2] [expr 9040*$in4] 2 -iter $maxiter
 element beamWithHinges 110 42 43 1005 $pl 1005 $pl $Ebeam
 [expr 44.2*$in2] [expr 9040*$in4] 2 -iter $maxiter
 element beamWithHinges 111 43 44 1005 $pl 1005 $pl $Ebeam
 [expr 44.2*$in2] [expr 9040*$in4] 2 -iter $maxiter
 element beamWithHinges 112 44 45 1005 $pl 1005 $pl $Ebeam
 [expr 44.2*$in2] [expr 9040*$in4] 2 -iter $maxiter
 element beamWithHinges 113 45 46 1005 $pl 1000 $pl $Ebeam
 [expr 44.2*$in2] [expr 9040*$in4] 2 -iter $maxiter
 #element truss          114 46 47 1111
 #element truss          115 47 48 2222

 set masterNode 41
 for {set ik [expr $masterNode+1]} {$ik<=$masterNode+
 $slaveNodes} {incr ik} {
  equalDOF $masterNode $ik 1
 }
```

```
set masterNode 41
for {set ik [expr $masterNode+1]} {$ik<=$masterNode+
$slaveNodes} {incr ik} {
 equalDOF $masterNode $ik 1
}

set isec 2
set ilevel 6
set jlevel [expr $ilevel-1]

hyst_mat $isec [expr 100+$ilevel]  [lindex $fy0 $jlevel]
$Ehinge  $In($isec) $Wpl($isec) $bay [lindex $ah $jlevel]
[lindex $mc $jlevel] [lindex $ac $jlevel] [lindex $R $jlevel]
[lindex $mu $jlevel]  $plr
#uniaxialMaterial Elastic [expr 100+$ilevel] [expr $In($isec)*
$Young]
section Genericld [expr 1000+$ilevel] [expr 100+$ilevel] Mz

#set pl $Lhinge($isec)
element beamWithHinges 116 49 50 1006 $pl 1006 $pl $Ebeam
[expr 44.2*$in2] [expr 9040*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 117 50 51 1006 $pl 1006 $pl $Ebeam
[expr 44.2*$in2] [expr 9040*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 118 51 52 1006 $pl 1006 $pl $Ebeam
[expr 44.2*$in2] [expr 9040*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 119 52 53 1006 $pl 1006 $pl $Ebeam
[expr 44.2*$in2] [expr 9040*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 120 53 54 1006 $pl 1000 $pl $Ebeam
[expr 44.2*$in2] [expr 9040*$in4] 2 -iter $maxiter
#element truss          121 54 55 1111
#element truss          122 55 56 2222

set isec 3
set ilevel 7
set jlevel [expr $ilevel-1]

hyst_mat $isec [expr 100+$ilevel]  [lindex $fy0 $jlevel]
$Ehinge  $In($isec) $Wpl($isec) $bay [lindex $ah $jlevel]
[lindex $mc $jlevel] [lindex $ac $jlevel] [lindex $R $jlevel]
[lindex $mu $jlevel]  $plr
#uniaxialMaterial Elastic [expr 100+$ilevel] [expr $In($isec)*
$Young]
section Genericld [expr 1000+$ilevel] [expr 100+$ilevel] Mz

#set pl $Lhinge($isec)
element beamWithHinges 123 57 58 1007 $pl 1007 $pl $Ebeam
[expr 34.7*$in2] [expr 5900*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 124 58 59 1007 $pl 1007 $pl $Ebeam
[expr 34.7*$in2] [expr 5900*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 125 59 60 1007 $pl 1007 $pl $Ebeam
[expr 34.7*$in2] [expr 5900*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 126 60 61 1007 $pl 1007 $pl $Ebeam
[expr 34.7*$in2] [expr 5900*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 127 61 62 1007 $pl 1000 $pl $Ebeam
[expr 34.7*$in2] [expr 5900*$in4] 2 -iter $maxiter
#element truss          128 62 63 1111
#element truss          129 63 64 2222
```

```
set masterNode 57
for {set ik [expr $masterNode+1]} {$ik<=$masterNode+
$slaveNodes} {incr ik} {
 equalDOF $masterNode $ik 1
}

set isec 3
set ilevel 8
set jlevel [expr $ilevel-1]

hyst_mat $isec [expr 100+$ilevel]  [lindex $fy0 $jlevel]
$Ehinge  $In($isec) $Wpl($isec) $bay [lindex $ah $jlevel]
[lindex $mc $jlevel] [lindex $ac $jlevel] [lindex $R $jlevel]
[lindex $mu $jlevel]  $plr
#uniaxialMaterial Elastic [expr 100+$ilevel] [expr $In($isec)*
$Young]
section Generic1d [expr 1000+$ilevel] [expr 100+$ilevel] Mz

#set pl $Lhinge($isec)
element beamWithHinges 130 65 66 1008 $pl 1008 $pl $Ebeam
[expr 34.7*$in2] [expr 5900*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 131 66 67 1008 $pl 1008 $pl $Ebeam
[expr 34.7*$in2] [expr 5900*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 132 67 68 1008 $pl 1008 $pl $Ebeam
[expr 34.7*$in2] [expr 5900*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 133 68 69 1008 $pl 1008 $pl $Ebeam
[expr 34.7*$in2] [expr 5900*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 134 69 70 1008 $pl 1000 $pl $Ebeam
[expr 34.7*$in2] [expr 5900*$in4] 2 -iter $maxiter
#element truss          135 70 71 1111
#element truss          136 71 72 2222

 set isec 4
 set ilevel 9
 set jlevel [expr $ilevel-1]

 hyst_mat $isec [expr 100+$ilevel]  [lindex $fy0 $jlevel]
 $Ehinge  $In($isec) $Wpl($isec) $bay [lindex $ah $jlevel]
 [lindex $mc $jlevel] [lindex $ac $jlevel] [lindex $R $jlevel]
 [lindex $mu $jlevel]  $plr
 #uniaxialMaterial Elastic [expr 100+$ilevel] [expr $In($isec)*
 $Young]
 section Generic1d [expr 1000+$ilevel] [expr 100+$ilevel] Mz

 #set pl $Lhinge($isec)
 element beamWithHinges 137 73 74 1009 $pl 1009 $pl $Ebeam
 [expr 27.7*$in2] [expr 3270*$in4] 2 -iter $maxiter
 element beamWithHinges 138 74 75 1009 $pl 1009 $pl $Ebeam
 [expr 27.7*$in2] [expr 3270*$in4] 2 -iter $maxiter
 element beamWithHinges 139 75 76 1009 $pl 1009 $pl $Ebeam
 [expr 27.7*$in2] [expr 3270*$in4] 2 -iter $maxiter
 element beamWithHinges 140 76 77 1009 $pl 1009 $pl $Ebeam
 [expr 27.7*$in2] [expr 3270*$in4] 2 -iter $maxiter
 element beamWithHinges 141 77 78 1009 $pl 1000 $pl $Ebeam
 [expr 27.7*$in2] [expr 3270*$in4] 2 -iter $maxiter
 #element truss          142 78 79 1111
 #element truss          143 79 80 2222

 set masterNode 73
 for {set ik [expr $masterNode+1]} {$ik<=$masterNode+
 $slaveNodes} {incr ik} {
  equalDOF $masterNode $ik 1
 }
```

```
set isec 5
set ilevel 10
set jlevel [expr $ilevel-1]

hyst_mat $isec [expr 100+$ilevel]  [lindex $fy0 $jlevel]
$Ehinge  $In($isec) $Wpl($isec) $bay [lindex $ah $jlevel]
[lindex $mc $jlevel] [lindex $ac $jlevel] [lindex $R $jlevel]
[lindex $mu $jlevel]  $plr
#uniaxialMaterial Elastic [expr 100+$ilevel] [expr $In($isec)*
$Young]
section Genericld [expr 1000+$ilevel] [expr 100+$ilevel] Mz

#set pl $Lhinge($isec)
element beamWithHinges 144 81 82 1010 $pl 1010 $pl $Ebeam
[expr 18.3*$in2] [expr 1330*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 145 82 83 1010 $pl 1010 $pl $Ebeam
[expr 18.3*$in2] [expr 1330*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 146 83 84 1010 $pl 1010 $pl $Ebeam
[expr 18.3*$in2] [expr 1330*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 147 84 85 1010 $pl 1010 $pl $Ebeam
[expr 18.3*$in2] [expr 1330*$in4] 2 -iter $maxiter
element beamWithHinges 148 85 86 1010 $pl 1000 $pl $Ebeam
[expr 18.3*$in2] [expr 1330*$in4] 2 -iter $maxiter
#element truss          149 86 87 1111
#element truss          150 87 88 2222


set masterNode 81
for {set ik [expr $masterNode+1]} {$ik<=$masterNode+
$slaveNodes} {incr ik} {
 equalDOF $masterNode $ik 1
}
```

B. Ρουτίνα < source generate_LA9-2Dframe.tcl >

```
# INITIAL MESSAGES
if {$analysistype=="pushover"} {
  if {$pushoverLPk==0} {
     set LoadPattern "uniform"
  } elseif {$pushoverLPk==1} {
     set LoadPattern "triangular"
  } else {
     set LoadPattern " k=$pushoverLPk "
  }
  # make the analysistype string to appear upper-case
  puts "[string toupper $analysistype] analysis with
$LoadPattern load pattern"
} else {
  puts "[string toupper $analysistype] analysis"
  if {$analysistype=="dynamic"} {
     puts "Applying $damping damping to modes 1 &
$maxMode_damped"
  }
}
```

```
if {$analysistype=="dynamic" & [file exists "MatIDA_thfile.tcl"]}
{
   set runIDAflag 1
   puts "Using EXTERNAL Timehistory data-file (Matlab-generated)"
   source MatIDA_thfile.tcl

   set GMfileY ''
   set GMfileZ ''
   set GMfactorY  0
   set GMfactorZ  0

} elseif {$analysistype=="dynamic"} {
   set runIDAflag 0
   puts "Using STANDARD Timehistory data-file"
   source standard_thfile.tcl
} else {
   set runIDAflag 0
}
".
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
set PDelta plain;  # options: plain, corotational, none

set nstorey 10
set nbay 5

# MODEL GEOMETRY PARAMETERS
set stor0 [expr  12.*$ft];
set stor1 [expr  18.*$ft];
set stor  [expr  13.*$ft];
set bay   [expr  30.*$ft];

# MATERIAL PROPERTIES
set fy [expr  57.6*$ksi];   # Yield stress 57.6
set Young  2.e8;            # Young's modulus 29000 ksi

set  b0 0.01
uniaxialMaterial Steel01 1  $fy $Young  $b0

# SECTION
set Estif  $Young;                  # very stif section
set Arstif [expr 10000.*$in2]
set Instif [expr 100000.*$in4]

set Etux  $Estif;
set Artux [expr 256.20*$in2]
set Intux [expr 102600*$in4]

# This is useful as it creates global variables that contain Iyy,
Wpl etc.
source FiberSections.tcl;   # obtain fiber patches and geometry
of sections
```

```
# This is useful as it creates global variables that contain Iyy,
Wpl etc.
source FiberSections.tcl;   # obtain fiber patches and geometry
of sections

uniaxialMaterial Hardening  222 1.e-5 0. 0. 0.
section Genericld 1000 222 Mz;                          # very
soft
section Elastic 1111  $Estif $Arstif     $Instif;       # rigid
section, truss
section Elastic 2222  $Young [expr 53.7] [expr 13300];  # for the
Pole beams (W40x183)

#Geometric Transformation for columns
if {$PDelta == "plain"} {
        geomTransf PDelta 1
} elseif {$PDelta == "corotational"} {
        geomTransf Corotational 1
} elseif {$PDelta == "none"} {
        geomTransf Linear 1
}

# beams never need P-Delta!
geomTransf Linear 2


# Define gravity loads
set P11 [expr -24.6*$kipf];
set P12 [expr -2*34.80*$kipf];

set P21 [expr -(15.90+23.60)*$kipf]
set P22 [expr -(2*15.90+34.80)*$kipf];

set P31 [expr -(12.75+20.30)*$kipf];
set P32 [expr -(2*12.75+30.90)*$kipf]

set M1  [expr -954.*$kipf*$in];
set M2  [expr -900.*$kipf*$in];
set M3  [expr -765.*$kipf*$in];

# for one P-D pole multiply by 2. Michalis meant the original
values
# to be for each of two P-D columns.
set PP1 [expr -2*(385.+165.)*$kipf];
set PP2 [expr -2*(385.+165.)*$kipf];
set PP3 [expr -2*(385.+165.)*$kipf];

source ModelConstruct-nl-improved.tcl
#source scripts/ModelConstruct-fiber.tcl
```

```
 set nodeID 9;
 pattern Plain 1 "Linear" {
        for {set i 1} {$i<=10} {incr i} {

        if {$i==1} {
                set P1  $P11
                set P2  $P12
                set PP  0.0
                set M   0.0
        } elseif {$i==10} {
                set P1 $P31
                set P2 $P32
                set PP $PP3
                set M   $M3
        } elseif {$i==2} {
                set P1 $P21
                set P2 $P22
                set PP $PP1
                set M $M1
        } else {
                set P1 $P21
                set P2 $P22
                set PP $PP2
                set M $M2
        }
 puts "$i $M"
                load        $nodeID     0.0  $P1         $M
                load  [expr $nodeID+1]  0.0  $P2        0.0
                load  [expr $nodeID+2]  0.0  $P2        0.0
                load  [expr $nodeID+3]  0.0  $P2        0.0
                load  [expr $nodeID+4]  0.0  $P2        0.0
                load  [expr $nodeID+5]  0.0  $P1 [expr -$M]

                load  [expr $nodeID+6]  0.0  $PP 0.0
                #load  [expr $nodeID+7]  0.0  $PP 0.0

                incr  nodeID 8
 }}

constraints Transformation
RunGravityAnalysis 10

#GetPeriodSetDamping Neigen  ksi    i  j  outfilename
GetPeriodSetDamping  $Ndof   $damping   1  3  "out/LA9_
2DModelPeriods.out"



if {$runIDAflag==0} {
  file delete LA9_2DModelGravity.out
  print LA9_2DModelGravity.out
}
```

```
if {$analysistype!="eigenvalue"} {
set nstory 9
for {set i 1} {$i<=$nstory} {incr i} {
recorder Drift  -file "out_col/idr_0$i\x.out" -time -iNode
[expr 14+($i-1)*8] -jNode [expr 22+($i-1)*8]  -dof 1 -perpDirn
2
}
}
recorder Drift -file "out_col/roofdrx.out" -time -iNode  14 -
jNode 86  -dof 1  -perpDirn 2

#basement columns
recorder Element -file "out_col/forc_001.out" -ele 1 forces
recorder Element -file "out_col/forc_002.out" -ele 2 forces
recorder Element -file "out_col/forc_003.out" -ele 3 forces
recorder Element -file "out_col/forc_004.out" -ele 4 forces
recorder Element -file "out_col/forc_005.out" -ele 5 forces
recorder Element -file "out_col/forc_006.out" -ele 6 forces

#basement columns

#recorder Node -file "out_col/disp_0001.out" -node 1 -dof 1 2 3
disp
#recorder Node -file "out_col/disp_0002.out" -node 2 -dof 1 2 3
disp
#recorder Node -file "out_col/disp_0003.out" -node 3 -dof 1 2 3
disp
#recorder Node -file "out_col/disp_0004.out" -node 4 -dof 1 2 3
disp
#recorder Node -file "out_col/disp_0005.out" -node 5 -dof 1 2 3
disp
#recorder Node -file "out_col/disp_0006.out" -node 6 -dof 1 2 3
disp

#recorder Node -file "out_col/disp_0009.out" -node  9 -dof 1 2 3
disp
#recorder Node -file "out_col/disp_0010.out" -node 10 -dof 1 2 3
disp
#recorder Node -file "out_col/disp_0011.out" -node 11 -dof 1 2 3
disp
#recorder Node -file "out_col/disp_0012.out" -node 12 -dof 1 2 3
disp
#recorder Node -file "out_col/disp_0013.out" -node 13 -dof 1 2 3
disp
#recorder Node -file "out_col/disp_0014.out" -node 14 -dof 1 2 3
disp

#1st Floor
#recorder Node -file "out_col/disp_0017.out" -node 17 -dof 1 2
3 disp
#recorder Node -file "out_col/disp_0018.out" -node 18 -dof 1 2
3 disp
#recorder Node -file "out_col/disp_0019.out" -node 19 -dof 1 2
3 disp
#recorder Node -file "out_col/disp_0020.out" -node 20 -dof 1 2
3 disp
#recorder Node -file "out_col/disp_0021.out" -node 21 -dof 1 2
3 disp
#recorder Node -file "out_col/disp_0022.out" -node 22 -dof 1 2
3 disp
```

```
recorder Node -file "out_col/disp_0009.out" -node 9  -dof 1 2
3 disp
recorder Node -file "out_col/disp_0017.out" -node 17 -dof 1 2
3 disp
recorder Node -file "out_col/disp_0025.out" -node 25 -dof 1 2
3 disp
recorder Node -file "out_col/disp_0033.out" -node 33 -dof 1 2
3 disp
recorder Node -file "out_col/disp_0041.out" -node 41 -dof 1 2
3 disp
recorder Node -file "out_col/disp_0049.out" -node 49 -dof 1 2
3 disp
recorder Node -file "out_col/disp_0057.out" -node 57 -dof 1 2
3 disp
recorder Node -file "out_col/disp_0065.out" -node 65 -dof 1 2
3 disp
recorder Node -file "out_col/disp_0073.out" -node 73 -dof 1 2
3 disp
recorder Node -file "out_col/disp_0081.out" -node 81 -dof 1 2
3 disp

recorder Node -file "out_col/vel_0081.out" -node  81 -dof 1 vel
recorder Node -file "out_col/vel_0082.out" -node 82 -dof 1 vel
recorder Node -file "out_col/vel_0083.out" -node 83 -dof 1 vel

recorder Node -file "out_col/accel_0002.out" -node 2  -dof 1
accel
recorder Node -file "out_col/accel_0010.out" -node 10  -dof 1
accel
recorder Node -file "out_col/accel_0081.out" -node  82 -dof 1
accel

recorder Node -file "out_col/disp_0009.out" -node 9  -dof 1 2 3
disp
recorder Node -file "out_col/disp_0017.out" -node 17 -dof 1 2 3
disp
recorder Node -file "out_col/disp_0025.out" -node 25 -dof 1 2 3
disp
recorder Node -file "out_col/disp_0033.out" -node 33 -dof 1 2 3
disp
recorder Node -file "out_col/disp_0041.out" -node 41 -dof 1 2 3
disp
recorder Node -file "out_col/disp_0049.out" -node 49 -dof 1 2 3
disp
recorder Node -file "out_col/disp_0057.out" -node 57 -dof 1 2 3
disp
recorder Node -file "out_col/disp_0065.out" -node 65 -dof 1 2 3
disp
recorder Node -file "out_col/disp_0073.out" -node 73 -dof 1 2 3
disp
recorder Node -file "out_col/disp_0081.out" -node 81 -dof 1 2 3
disp
```

```
#Columns 1st floor
recorder Element -file "out_col/forc_009.out" -ele 9 forces
recorder Element -file "out_col/forc_010.out" -ele 10 forces
recorder Element -file "out_col/forc_011.out" -ele 11 forces
recorder Element -file "out_col/forc_012.out" -ele 12 forces
recorder Element -file "out_col/forc_013.out" -ele 13 forces
recorder Element -file "out_col/forc_014.out" -ele 14 forces


#Columns 2nd floor
recorder Element -file "out_col/forc_017.out" -ele 17 forces
recorder Element -file "out_col/forc_018.out" -ele 18 forces
recorder Element -file "out_col/forc_019.out" -ele 19 forces
recorder Element -file "out_col/forc_020.out" -ele 20 forces
recorder Element -file "out_col/forc_021.out" -ele 21 forces
recorder Element -file "out_col/forc_022.out" -ele 22 forces



#Columns #3rd floor
recorder Element -file "out_col/forc_025.out" -ele 25 forces
recorder Element -file "out_col/forc_026.out" -ele 26 forces
recorder Element -file "out_col/forc_027.out" -ele 27 forces
recorder Element -file "out_col/forc_028.out" -ele 28 forces
recorder Element -file "out_col/forc_029.out" -ele 29 forces
recorder Element -file "out_col/forc_030.out" -ele 30 forces


#Columns #4th floor
recorder Element -file "out_col/forc_033.out" -ele 33 forces
recorder Element -file "out_col/forc_034.out" -ele 34 forces
recorder Element -file "out_col/forc_035.out" -ele 35 forces
recorder Element -file "out_col/forc_036.out" -ele 36 forces
recorder Element -file "out_col/forc_037.out" -ele 37 forces
recorder Element -file "out_col/forc_038.out" -ele 38 forces

#Columns #5th floor
recorder Element -file "out_col/forc_041.out" -ele 41 forces
recorder Element -file "out_col/forc_042.out" -ele 42 forces
recorder Element -file "out_col/forc_043.out" -ele 43 forces
recorder Element -file "out_col/forc_044.out" -ele 44 forces
recorder Element -file "out_col/forc_045.out" -ele 45 forces
recorder Element -file "out_col/forc_046.out" -ele 46 forces

#Columns #6th floor
recorder Element -file "out_col/forc_049.out" -ele 49 forces
recorder Element -file "out_col/forc_050.out" -ele 50 forces
recorder Element -file "out_col/forc_051.out" -ele 51 forces
recorder Element -file "out_col/forc_052.out" -ele 52 forces
recorder Element -file "out_col/forc_053.out" -ele 53 forces
recorder Element -file "out_col/forc_054.out" -ele 54 forces
```

```
#Columns #7th floor
recorder Element -file "out_col/forc_057.out" -ele 57 forces
recorder Element -file "out_col/forc_058.out" -ele 58 forces
recorder Element -file "out_col/forc_059.out" -ele 59 forces
recorder Element -file "out_col/forc_060.out" -ele 60 forces
recorder Element -file "out_col/forc_061.out" -ele 61 forces
recorder Element -file "out_col/forc_062.out" -ele 62 forces

#Columns #8th floor
recorder Element -file "out_col/forc_065.out" -ele 65 forces
recorder Element -file "out_col/forc_066.out" -ele 66 forces
recorder Element -file "out_col/forc_067.out" -ele 67 forces
recorder Element -file "out_col/forc_068.out" -ele 68 forces
recorder Element -file "out_col/forc_069.out" -ele 69 forces
recorder Element -file "out_col/forc_070.out" -ele 70 forces

#Columns #9th floor
recorder Element -file "out_col/forc_073.out" -ele 73 forces
recorder Element -file "out_col/forc_074.out" -ele 74 forces
recorder Element -file "out_col/forc_075.out" -ele 75 forces
recorder Element -file "out_col/forc_076.out" -ele 76 forces
recorder Element -file "out_col/forc_077.out" -ele 77 forces
recorder Element -file "out_col/forc_078.out" -ele 78 forces

set in 6
for {set i 1} {$i<=$in} {incr i} {

recorder Node -file "out_col/react_$i\x.out" -time -node $i -dof
1 2 3 reaction

}

#Check Recorders

recorder Element -file "check/forc_3.out" -ele 1 forces
recorder Element -file "check/forc_9.out" -ele 9 forces
recorder Element -file "check/forc_81.out" -ele 81 forces


set instory 9
for {set i 1} {$i<=$instory} {incr i} {
   recorder Node -file "check/react_$i\x.out" -time -node [expr
14+($i-1)*8] -dof 1 2 3 reaction
}


# print ele information for columns at bottom
#print ele 1 2 3 4 5 6 74 75 76 77 78 81
```

```
--
####################    analysis   #########################
if {$analysistype=="dynamic"} {
  #source util/DefineXYZ_UniformExcitation.tcl

  # you are getting back "nptsx" and "dtx". Careful, since you
already have 1 load pattern defined
  # (for gravity) you need to start your uniformexcitation
patterns from tag "2" at least.
  #  DefineXYZ_UniformExcitation $dtsub $g $GMdir $GMfileX
$GMfileY $GMfileZ $GMfactorX $GMfactorY $GMfactorZ nptsx dtx 2;
#MIKE MODIFY

set curdDir [pwd]
set dtx $dt

#puts "filename: $GMfileX, $GMdir$accfile.txt,$curdDir"
    set GaccelX "Path -dt $dt -filePath $GMfileX -factor [expr
$GMfactorX*$g]"
    pattern UniformExcitation 10 1 -accel $GaccelX

#DefineXYZ_UniformExcitation $dtsub $g $GMdir $GMfileX " " " "
$GMfactorX 0 0 nptsx dtx 2

  integrator Newmark 0.5 0.25
  test NormDispIncr 1.0e-8 20 0
  # puts "nptsx=$nptsx"
  # Actually, if coming from same earthquake we should have
nptsx==nptsy (or very close) and dtx==dty

    puts "analysis Transient"
    analysis Transient
    source util/RunTransient2Converge.tcl

                                  # Nsteps              dt
    RunTransient2Converge [expr $nptsx*$dtsub] [expr $dtx/$dtsub]

} elseif {$analysistype=="pushover"} {

  set  H [expr (12+13+8*13)*$ft]
```

```
  # Create a Plain load pattern with a Linear TimeSeries: Note,
the loads below do sum to 1.00!
  pattern Plain 2 "Linear" {
  #      nd       FX    FY    MZ
     load 17   0.01  0.0   0.0
     load 25   0.02  0.0   0.0
     load 33   0.04  0.0   0.0
     load 41   0.06  0.0   0.0
     load 49   0.09  0.0   0.0
     load 57   0.12  0.0   0.0
     load 65   0.17  0.0   0.0
     load 73   0.21  0.0   0.0
     load 81   0.28  0.0   0.0
  }

  source  util/RunPushover2Converge.tcl
  # Careful: If you change the node numbering, you must also
change the IDctrlNode!
  # NOTE: When I originally tried here using the node on the
other side of the frame (86) it had
  # problems converging. Maybe because of gravity loads that
nodes gets initial negative displacements?
  set IDctrlNode 81

 # Mostly elastic range, up to 1% roof drift. Use large steps
  set DriftStep 1.0e-4
  set DispStep [expr $H*$DriftStep]
  set Nsteps 140
  set DmaxPush [expr $Nsteps*$DispStep]
  puts "Pushing Node $IDctrlNode to [expr $Nsteps*$DriftStep*
100]% roof drift in  $Nsteps steps"
  integrator DisplacementControl $IDctrlNode 1 $DispStep
  #test EnergyIncr 1.0e-5 10 0
  test NormDispIncr 1.0e-8 20 0
  analysis Static

  #RunPushover2Converge IDctrlNode DmaxPush Nsteps dof
  RunPushover2Converge  $IDctrlNode $DmaxPush  $Nsteps

  # Tough part: In the inelastic range we need really small
steps.
  set currentDrift [expr $Nsteps*$DriftStep]
  set currentDisp  [expr $Nsteps*$DispStep]
  set DriftStep 0.04e-4
  set DispStep [expr $H*$DriftStep]
  set Nsteps 14000
  set DmaxPush [expr $currentDisp+$Nsteps*$DispStep]
  puts "Pushing Node $IDctrlNode from [expr $currentDrift*
100]% to [expr ($currentDrift+$Nsteps*$DriftStep)*100]% roof
drift in  $Nsteps steps"
  integrator DisplacementControl $IDctrlNode 1 $DispStep
```

```
  #integrator ArcLength [expr $DispStep] 5.1
  #RunPushover2Converge IDctrlNode DmaxPush Nsteps dof
  RunPushover2Converge  $IDctrlNode $DmaxPush  $Nsteps
  loadConst -time 0.0
}

if {$runIDAflag==1} {
  file delete LA9_2DModelFinal.out
  print LA9_2DModelFinal.out
 }

puts "runIDAflag: $runIDAflag "
#source generate_LA9-2Dframe_mfrag_improved.tcl
```

Γ. Υπορουτίνα- Χαρακτηριστικά διατομών < Fibersection.tcl, Wsection.tcl >

```
set nfdw 10
set nft 3

source Wsection.tcl
#       tag  matID             htot                tw
bf                tf    nfdw nftw nfbf $nft
Wsection  1    1   [expr 38.98*$in]  [expr 0.650*$in]   [expr
11.810*$in]  [expr 1.220*$in]   $nfdw   1   1  $nft
Wsection  2    1   [expr 35.85*$in]  [expr 0.625*$in]   [expr
11.975*$in]  [expr 0.940*$in]   $nfdw   1   1  $nft
Wsection  3    1   [expr 32.86*$in]  [expr 0.550*$in]   [expr
11.480*$in]  [expr 0.740*$in]   $nfdw   1   1  $nft
Wsection  4    1   [expr 26.92*$in]  [expr 0.490*$in]   [expr
9.990*$in]  [expr 0.745*$in]   $nfdw   1   1  $nft
Wsection  5    1   [expr 20.99*$in]  [expr 0.400*$in]   [expr
8.240*$in]  [expr 0.615*$in]   $nfdw   1   1  $nft
Wsection  6    1   [expr 20.24*$in]  [expr 2.380*$in]   [expr
17.200*$in]  [expr 3.820*$in]   $nfdw   1   1  $nft
Wsection  7    1   [expr 19.02*$in]  [expr 2.015*$in]   [expr
16.835*$in]  [expr 3.210*$in]   $nfdw   1   1  $nft
Wsection  8    1   [expr 18.29*$in]  [expr 1.770*$in]   [expr
16.590*$in]  [expr 2.845*$in]   $nfdw   1   1  $nft
Wsection  9    1   [expr 17.54*$in]  [expr 1.540*$in]   [expr
16.360*$in]  [expr 2.470*$in]   $nfdw   1   1  $nft
Wsection 10    1   [expr 20.92*$in]  [expr 2.595*$in]   [expr
17.415*$in]  [expr 4.160*$in]   $nfdw   1   1  $nft
Wsection 11    1   [expr 20.24*$in]  [expr 2.380*$in]   [expr
17.200*$in]  [expr 3.820*$in]   $nfdw   1   1  $nft
Wsection 12    1   [expr 19.02*$in]  [expr 2.015*$in]   [expr
16.835*$in]  [expr 3.210*$in]   $nfdw   1   1  $nft
Wsection 13    1   [expr 18.29*$in]  [expr 1.770*$in]   [expr
16.590*$in]  [expr 2.845*$in]   $nfdw   1   1  $nft
set diatomes [open "out/section.dat" "w"]
puts $diatomes "ID         Area       Iy         Wpl        Wy
(metric units)"

for {set i 1} {$i<=13} {incr i} {
     puts $diatomes "$i  $Ar($i)  $In($i) $Wpl($i)  $Wy($i)"
}
```

```
proc Wsection { secID matID d tw bf tf nfdw nftw nfbf nftf} {
  # input parameters
  # secID - section ID number
  # matID - material ID number
  # d  = nominal depth
  # tw = web thickness
  # bf = flange width
  # tf = flange thickness
  # nfdw = number of fibers along web depth
  # nftw = number of fibers along web thickness
  # nfbf = number of fibers along flange width
  # nftf = number of fibers along flange thickness

  set dw [expr $d - 2 * $tf]
  set y1 [expr -$d/2]
  set y2 [expr -$dw/2]
  set y3 [expr  $dw/2]
  set y4 [expr  $d/2]

  set z1 [expr -$bf/2]
  set z2 [expr -$tw/2]
  set z3 [expr  $tw/2]
  set z4 [expr  $bf/2]

  global Ar In Wy Wpl Lhinge
  set In($secID)  [expr $bf*$d*$d*$d/12-($bf-$tw)*($d-2*
$tf)*($d-2*$tf)*($d-2*$tf)/12]
  set Ar($secID)  [expr 2*$bf*$tf+$tw*($d-2*$tf)]
  set Wy($secID)  [expr 2*$In($secID)/$d]
  set Wpl($secID) [expr ($bf*$tf*($dw+$tf)+0.25*$dw*$dw*$tw)]
```

8.2 Παράρτημα Β- Δεδομένα καταγραφών κοντινού πεδίο

#	Year	NGA	Tp(s)	Event/ Station	A(cm/s)	γ	v(o)	td(s)	Total Duration	Proposed Duration
1	1979	150	0.94	Coyote Lake / Gilroy Array #6	44.94	1.6	355	1.93	27.08	1.46
2	1979	158	1.64	Imperial Valley-06 / Aeropuerto Mexicali	46.78	2.1	345	3.64	11.14	9.68
3	1979	159	1.90	Imperial Valley-06 / Agrarias	44.04	2.0	25	5.87	28.35	3.79
4	1979	161	4.78	Imperial Valley-06 / Brawley Airport	43.38	1.8	135	2.67	37.77	21.40
5	1979	170	4.78	Imperial Valley-06 / EC County Center FF	43.38	1.8	135	2.67	39.96	8.60
6	1979	171	3.01	Imperial Valley-06 / EC County Center FF	114.85	1.4	0	2.86	39.96	5.99
7	1979	173	6.08	Imperial Valley-06/ El Centro Array #10	58.79	1.1	140	3.66	36.95	22.41
8	1979	174	6.39	Imperial Valley-06/ El Centro Array #11	8.55	2.9	245	0.60	38.99	23.47
9	1979	178	5.55	Imperial Valley-06/ El Centro Array #3	39.65	1.2	180	5.00	36.93	9.98
10	1979	179	4.32	Imperial Valley-06/ El Centro Array #4	71.39	1.9	125	2.00	38.95	8.16
11	1979	180	3.79	Imperial Valley-06 / El Centro Array #5	86.02	1.8	135	3.37	39.24	6.76
12	1979	181	3.94	Imperial Valley-06 / El Centro Array #6	97.49	1.9	85	2.62	39.01	8.16
13	1979	182	3.44	Imperial Valley-06 / El Centro Array #7	74.50	2.2	45	2.52	36.79	7.67
14	1979	183	5.08	Imperial Valley-06 / El Centro Array #8	69.50	1.1	80	3.37	37.53	10.64
15	1979	184	5.86	Imperial Valley-06/El Centro Differential Array	60.43	1.1	70	2.66	38.93	11.20
16	1979	185	4.24	Imperial Valley-06/El Centro Holtville Post Office	47.52	1.7	175	3.35	37.72	7.20
17	1980	250	1.14	Mamoth Lakes-06 / Long Valley (Upr L Abut)	34.99	1.4	300	4.59	25.93	2.25
18	1980	292	2.64	Irpinia-Italy-01 / Sturno	23.95	5.6	110	1.13	39.31	14.72
19	1981	316	3.00	Westmorland /Parachute Test Site	25.91	2.2	300	7.54	39.97	6.59
20	1983	407	0.56	Coalinga-05 / Oil City	35.39	3.4	0	2.22	21.21	1.91
21	1983	415	0.75	Coalinga-05 / Transmitter Hill	44.06	1.5	135	2.54	21.74	2.29
22	1984	451	0.77	Morgan Hill / Coyote Lake Dam (SW Abut)	42.78	4.2	300	2.30	29.93	3.26
23	1984	459	1.17	Morgan Hill / Gilroy Array #6	31.87	2.6	235	4.45	29.96	3.01
24	1986	503	1.49	Taiwan SMART1(40) / SMART1 C00	29.00	2.1	215	5.91	30.59	3.42
25	1986	508	1.39	Taiwan SMART1(40) / SMART1 M07	35.07	2.1	215	10.29	29.12	3.05
26	1986	529	1.44	N. Palm Springs / North Palm Springs	56.48	1.5	345	1.80	20.00	2.41
27	1986	568	0.70	San Salvador / Geotech Investig Center	68.43	2.2	190	0.63	9.00	1.71
28	1987	615	0.81	Whittier Narrows-01 / Downey - Co Maint Bldg	27.35	2.5	260	4.36	39.97	2.01
29	1987	645	0.78	Whittier Narrows-01 / LB - Orange Ave	30.64	2.4	255	5.10	32.08	1.91
30	1989	766	1.54	Loma Prieta / Gilroy Array #2	28.64	4.8	270	1.16	39.92	7.34
31	1989	802	6.48	Loma Prieta / Saratoga - Aloha Ave	36.31	1.2	180	3.10	39.93	8.79
32	1992	821	2.42	Erzincan-Turkey / Erzincan	89.81	1.7	20	1.58	20.75	5.08
33	1992	828	2.74	Cape Mendocino / Petrolia	57.86	1.5	325	1.13	35.98	4.55
34	1992	838	7.57	Landers / Barstow	22.79	1.7	135	11.2	39.94	14.40
35	1992	879	4.57	Landers / Lucerne	96.72	1.6	65	7.03	48.10	7.29
36	1992	900	7.33	Landers / Yermo Fire Station	39.16	2.0	175	10.95	43.95	14.65
37	1994	982	2.94	Northridge-01 / Jensen Filter Plant	60.02	3.0	285	0.00	28.59	8.78
38	1994	983	2.94	Northridge-01 / Jensen Filter Plant Generator	60.02	3.0	285	0.00	28.59	8.78
39	1994	1009	2.35	Northridge-01 / LA-Wadsworth VA Hospital North	41.98	1.1	110	8.16	55.32	4.91
40	1994	1013	2.17	Northridge-01 / LA-Dam	76.26	1.1	220	1.78	26.55	3.23
41	1994	1045	2.39	Northridge-01 / Newhall-W Pico Canyon Rd.	117.85	1.2	290	3.82	24.98	3.56

42	1994	1050	3.37	Northridge-01 / Pacoima Dam (downstream).	11.71	3.2	25	0.04	19.96	10.71
43	1994	1051	0.90	Northridge-01 / Pacoima Dam (upper left)	100.31	1.6	255	3.26	39.94	1.44
45	1994	1063	1.11	Northridge-01/ Rinaldi Receiving Station	132.51	1.9	240	1.55	19.90	2.10
45	1994	1085	3.06	Northridge-01/Sylmar Converter Station East	89.17	1.6	175	1.15	39.97	5.20
46	1994	1086	2.56	Northridge-01/Sylmar Olive View Med FF	61.88	3.6	355	0.37	39.98	8.90
47	1995	1119	1.23	Kobe, Japan / Takarazuka	55.97	2.3	145	3.82	40.95	2.82
48	1999	1161	4.88	Kocaeli, Turkey / Gebze	42.18	1.8	190	3.37	27.98	8.49

T_p (sec): The period of the harmonic oscillation of the wavelet.
A (cm/sec): The amplitude of the wavelet.
γ: The duration of the wavelet, which measures the number of the oscillations.
ν (°): Phase shift.
t_d (sec): Time delay for the initiation of the pulse.