



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ
ΤΟ ΡΗΓΜΑ ΣΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ**

Undergraduate Thesis

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ORIENTATION TOWARDS
THE FAULT ON NEAR-FAULT ZONE GROUND MOTIONS**

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ: ΝΑΥΠΛΙΩΤΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ι. ΨΥΧΑΡΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ
ΤΟ ΡΗΓΜΑ ΣΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ**

Undergraduate Thesis

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ORIENTATION TOWARDS
THE FAULT ON NEAR-FAULT ZONE GROUND MOTIONS**

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ: ΝΑΥΠΛΙΩΤΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ι. ΨΥΧΑΡΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2015

Ευχαριστίες

Με την περάτωση των προπτυχιακών μου σπουδών θα ήθελα να απευθύνω θερμές ευχαριστίες σε όλους του συντελεστές που συνέβαλαν στην αποπεράτωση της εργασίας αυτής.

Αρχικά, στον κ. Ιωάννη Ν. Ψυχάρη, Καθηγητή Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της διπλωματικής αυτής εργασίας, για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και την πολύτιμη επιστημονική καθοδήγησή του.

Στην Υποψήφια Διδάκτωρ Ε.Μ.Π. Βασιλική Καρδούτσου για το ειλικρινές ενδιαφέρον, τις ουσιαστικές παρατηρήσεις και συμβουλές και τη συνεχή στήριξη σε κάθε βήμα της εργασίας αυτής.

Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αγάπη και τη στήριξή τους και όσους βοήθησαν με οποιονδήποτε τρόπο στην διαμόρφωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Οι παλμικές εδαφικές κινήσεις αυξάνουν τις σεισμικές απαιτήσεις των κατασκευών και προκαλούν εκτεταμένες καταστροφές, όπως έχει παρατηρηθεί σε διάφορους σεισμούς. Τα συμβατικά μοντέλα πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης που χρησιμοποιούνται στην πιθανοτική ανάλυση σεισμικού κινδύνου δε λαμβάνουν υπόψη την ύπαρξη παλμικής κίνησης και υποεκτιμούν τον σεισμικό κίνδυνο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η επιρροή του προσανατολισμού ως προς το ρήγμα στη σεισμική κίνηση και διερευνάται η αποτελεσματικότητα μιας νέας προτεινόμενης μεθόδου για τον χαρακτηρισμό μιας κίνησης ως παλμική ή μη.

Βασικό χαρακτηριστικό των παλμικών καταγραφών είναι η ύπαρξη ενός εμφανούς παλμού στην αρχή της χρονοϊστορίας της εδαφικής ταχύτητας. Οι συνιστώσες των καταγραφών που παρουσιάζουν το φαινόμενο της κατευθυντικότητας είναι σύμφωνα με τη βιβλιογραφία οι κάθετες στο ρήγμα. Ο εντοπισμός και η απομόνωση του χαρακτηριστικού παλμού έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών (*Baker, 2007, Shahi-Baker, 2011, P. Mimoglou et al., 2012, V. Kardoutsou et al., 2014*). Ο *Baker (2007)* παρουσιάζει μία ποσοτική μέθοδο στην οποία οι σημαντικοί παλμοί μιας εδαφικής κίνησης στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα αναγνωρίζονται και εξάγονται μέσω κυματικής ανάλυσης. Έπειτα οι *Shahi-Baker (2011)* αναλύουν ένα αντίστοιχο μοντέλο προσομοίωσης στο οποίο περιστρέφονται οι εδαφικές καταγραφές και εντοπίζεται ο παλμός σε όλες τις διευθύνσεις γύρω από το ρήγμα χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του *Baker (2007)*.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια μέθοδος αναγνώρισης των σημαντικών παλμών σε καταγραφές κοντινού πεδίου, όπως αυτή εισήχθη από τους *P. Mimoglou, I. Psycharis and I. Taflampas (2012)* σύμφωνα με την οποία οι σημαντικοί παλμοί μιας εδαφικής κίνησης περιγράφονται από το κυματίδιο που έχει προταθεί από τους *Mavroeidis & Papageorgiou (2003)* και οι περίοδοι των παλμών T_p προσδιορίζονται από τις κορυφές του φάσματος συνέλιξης $S_d \times S_v$ για 5% απόσβεση. Έπειτα, περιγράφεται μια μέθοδος ταξινόμησης των εδαφικών κινήσεων σε παλμικές και μη παλμικές, όπως εισήχθη από τους ερευνητές *V. Kardoutsou, I. Taflampas, I. Psycharis (2014)*, στην οποία το παλμικό περιεχόμενο μιας εδαφικής κίνησης συσχετίζεται με το λόγο $S_{d,0}(T_p)/CAD$, όπου το $S_{d,0}(T_p)$ αντιστοιχεί στην τιμή του ελαστικού φάσματος απόκρισης μετακίνησης για την περίοδο του παλμού T_p και 5% απόσβεση, ενώ το CAD είναι η τιμή της *Αθροιστικής Απόλυτης Μετακίνησης* (*Taflampas et al. 2009*).

Στη παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται κατά πόσο η παλμική κίνηση εμφανίζεται στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε ένα σύνολο 149 σεισμικών καταγραφών από τη βάση δεδομένων του προγράμματος *NGA (Next Generation Attenuation)* οι οποίες έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτάθηκε από τους *V. Kardoutsou, I. Taflampas, I. Psycharis (2014)*. Οι προαναφερθείσες καταγραφές υπολογίστηκαν για όλες τις διευθύνσεις γύρω από το ρήγμα και μελετήθηκαν ενεργειακά υπολογίζοντας το *Energy Flux* κάθε στραμμένης καταγραφής. Παρατηρήθηκε ότι οι μέγιστες τιμές του *Energy Flux* για κάθε

εδαφική καταγραφή εμφανίζονται σε ένα εύρος γωνιών πολύ κοντά στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα ενώ οι ελάχιστες τιμές παρατηρούνται κοντά στην παράλληλη συνιστώσα. Επίσης μελετήθηκε ο λόγος της μέγιστης τιμής της ενέργειας προς την ελάχιστη τιμή για κάθε στραμμένη καταγραφή και παρατηρήθηκε ότι οι καταγραφές των οποίων ο λόγος αυτός λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από 2,5 χαρακτηρίζονται ως παλμικές.

Με σκοπό να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα χρήσης του λόγου της μέγιστης ενέργειας προς την ελάχιστη $\max EF/\min EF$ ως δείκτης ύπαρξης παλμού συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου με τα αποτελέσματα άλλων μεθόδων ταξινόμησης που έχουν προταθεί από άλλους ερευνητές (*P. Mimoglou et al., 2012, V. Kardoutsou et al., 2014*). Εξάγοντας τα αποτελέσματα για τέσσερα σεισμικά γεγονότα (*Northridge, Imperial Valley, Loma Prieta, Chi-Chi*) παρατηρήθηκε ότι η παλμική καταγραφή εντοπίζεται σε μια περιοχή γωνιών πολύ κοντά στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα ανάλογα με το τύπο του ρήγματος. Επίσης ο λόγος $\max EF/\min EF$ δείχνει να αποτελεί έναν αξιόπιστο δείκτη ύπαρξης παλμού ο οποίος υπερτερεί των υπολοίπων μεθόδων χαρακτηρισμού των καταγραφών καθώς αναγνωρίζει ως παλμικές καταγραφές που από τη βιβλιογραφία δίνονται ως μη παλμικές.

Abstract

Pulse-like ground motions place extreme demands on structures and are known to have caused extensive damage in previous earthquakes. Traditional ground-motion models used in probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) do not account for the effects of pulse-like ground motions and may therefore underpredict the seismic hazard at near fault sites where pulse-like ground motions are expected. The intension of the thesis was to investigate whether pulse-like ground motions appear mainly at the fault-normal direction of most of the ground motions and the effectiveness of a new proposed method for the classification of near fault ground motions to “pulse like” and “non pulse like”.

Basic feature of pulse-like ground motions is the existence of an apparent pulse at the beginning of the velocity time history. The identification and extraction of the characteristic pulse has been subject of study of many researchers (*Baker, 2007, Shahi-Baker, 2011, P. Mimoglou et al., 2012, V. Kardoutsou et al., 2014*). *Baker (2007)* introduced a quantitative classification method in which the significant pulses of a ground motion are identified and extracted through wavelet analysis. In addition, *Shahi-Baker (2011)* analyze a corresponding classification model in which the ground motions are rotated and the characteristic pulse is found in all directions around the fault using the algorithm proposed by *Baker (2007)*.

Next a classification method introduced by the researchers *P. Mimoglou, I. Psycharis, I. Taflampas (2014)* is described, in which the significant pulses of a ground motion are extracted through wavelet analysis and the pulse periods T_p are determined by the peaks of the convolution spectrum $S_d \times S_v$, for 5% damping, while the mathematical presentation of the pulse is described by the wavelet used by *Mavroeidis & Papageorgiou (2003)*. Afterwards, another method for the classification of near fault ground motions to “pulse like” and “non pulse like” is explained, as it is introduced by the researchers *V. Kardoutsou, I. Taflampas, I. Psycharis (2014)*, in which the “pulse like” content of a ground motion is correlated to the ratio $S_{d,0}(T_p)/CAD$, where $S_{d,0}(T_p)$ corresponds to the value of the elastic response spectrum of the displacement for the dominant pulse period T_p and 5% damping, while *CAD* corresponds to the recently introduced parameter *Cumulative Absolute Displacement* (*Taflampas et al. 2009*).

For the purposes of the diploma thesis a total of 149 records are selected from the Next Generation Attenuation (NGA) database, which were already categorized as pulse-like using the classification method proposed by *V. Kardoutsou, I. Taflampas, I. Psycharis (2014)*. The aforementioned motions are rotated at every direction around the fault and the value of the parameter *Energy Flux* of each record is calculated. It is observed that the maximum values of the *Energy Flux* for each ground motion appear at a range of angles very close to the fault-normal direction, while the minimum values appear close to the fault-parallel direction. In addition, the ratio of the maximum value of the *Energy Flux* divided by the minimum value of the *Energy Flux* for each rotated record is studied and it is observed that for pulse-like records this ratio is bigger than 2,5.

In order to study the effectiveness of using the aforementioned ratio $\max EF / \min EF$ as a pulse indicator, the results of the new proposed method are compared with the results of the other methods proposed by other researchers (*P. Mimoglou et al., 2012, V. Kardoutsou et al., 2014*). Exporting the results for four seismic events (*Northridge, Imperial Valley, Loma Prieta, Chi-Chi*) it is observed that pulse-like records appear at a range of angles very close to the fault-normal direction depending on the type of the fault. Moreover, the ratio $\max EF / \min EF$ seems to be a

reliable pulse indicator that prevails over the other classification methods as it is able to identify pulse-like records that have been categorized as non pulse-like in the past by other researchers.

Διάρθρωση εργασίας

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι να ερευνήσουμε κατά πόσο η παλμική κίνηση εμφανίζεται στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα και να μελετήσουμε αν μπορούμε να εισάγουμε μία νέα μέθοδο χαρακτηρισμού μιας κίνησης ως παλμική ή μη.

Στο **Κεφάλαιο 1** αναλύονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου, γεωμετρικές παράμετροι του ρήγματος που έχουν συσχετιστεί με χαρακτηριστικά του παλμού ταχύτητας και σχέσεις ερευνητών που αφορούν την αναγνώριση της περιόδου και της μορφής του δεσπόζοντος παλμού.

Στο **Κεφάλαιο 2** αναλύεται μια μέθοδος εντοπισμού των πιο σημαντικών παλμών ταχύτητας μέσω κυματικής ανάλυσης και μια διαδικασία κατάταξης των εδαφικών κινήσεων σε «παλμικές» ή «μη παλμικές», όπως έχει εισαχθεί από τον *Baker (2007)*.

Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύεται το αντίστοιχο μοντέλο προσομοίωσης των *Shahi-Baker (2011)* για το κοντινό πεδίο στο οποίο περιστρέφονται οι εδαφικές καταγραφές και εντοπίζεται ο παλμός σε όλες τις διευθύνσεις.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται η μέθοδος εντοπισμού των παλμών ταχύτητας που όπως έχει εισαχθεί από τους *P. Mimoglou, I. Psycharis, I. Taflampas (2014)*, στην οποία οι σημαντικοί παλμοί εντοπίζονται μέσω κυματικής ανάλυσης και οι περίοδοί τους προκύπτουν από τις κορυφές του φάσματος συνέλιξης $S_d \times S_v$ για απόσβεση 5%.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται μια μέθοδος ταξινόμησης σεισμικών καταγραφών σε παλμικές και μη, όπως έχει εισαχθεί από τους *V. Kardoutsou, I. Taflampas, I. Psycharis (2014)*, στην οποία το παλμικό περιεχόμενο συσχετίζεται με την τιμή του λόγου της τιμής του ελαστικού φάσματος μετακίνησης για την περίοδο του παλμού T_p και μηδενική απόσβεση, προς τη νεοεισαχθείσα έννοια *CAD (Taflampas et al. 2009)*.

Στο **Κεφάλαιο 6** πραγματοποιείται η επεξεργασία των 149 καταγραφών που χαρακτηρίστηκαν ως παλμικές σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτάθηκε από τους *V. Kardoutsou, I. Taflampas, I. Psycharis (2014)*. Η επεξεργασία περιλαμβάνει την περιστροφή των καταγραφών σε όλες τις γωνίες γύρω από το ρήγμα και τον υπολογισμό της ενέργειας *Energy Flux*, του συντελεστή συσχέτισης και του λόγου $S_{d,0}(T_p)/CAD$ για κάθε στραμμένη καταγραφή.

Στο **Κεφάλαιο 7** εξάγονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας που έλαβε μέρος στο προηγούμενο κεφάλαιο και ομαδοποιούνται σε τέσσερα σεισμικά γεγονότα του *Northridge (1994)*, του *Imperial Valley (1979)*, του *Loma Prieta (1989)* καθώς και του *Chi-Chi (1999)*.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1-ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

1.1 Εισαγωγή	21
1.2 Ρήγματα	21
1.2.1 Βασικοί τύπου ρηγμάτων	21
1.2.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρηγμάτων	22
1.3 Το φαινόμενο της Κατευθυντικότητας	23
1.4 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου	27
1.5 Μοντέλα προσομοίωσης σεισμών κοντινού πεδίου	33

Κεφάλαιο 2-ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕΣΩ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ – Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΒΑΚΕΡ

2.1 Εισαγωγή	41
2.2 Αίτια δημιουργίας παλμών ταχύτητας	41
2.3 Επιλογή μιας διαδικασίας ταξινόμησης	42
2.4 Ανάλυση με κυματίδια	42
2.5 Ταξινόμηση των χρονοϊστοριών	45
2.5.1 Απομόνωση του παλμού ταχύτητας	45
2.5.2 Προσδιορισμός της σημαντικότητας του αφαιρούμενου παλμού	47
2.5.3 Αποκλεισμός των παλμών που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία ταχύτητας	49
2.5.4 Αποκλεισμός εδαφικών κινήσεων με $PGV < 30 \text{ cm/s}$	52
2.6 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού	52

Κεφάλαιο 3-ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

3.1 Εισαγωγή	56
3.2 Το μοντέλο προσομοίωσης των Shahi-Baker για το κοντινό πεδίο	57
3.2.1 Αναγνώριση της ύπαρξης παλμικής κίνησης	57
3.2.2 Ανάπτυξη μοντέλων υπολογισμού της οριζόντιας φασματικής επιτάχυνσης	60
3.2.3 Πιθανότητα ύπαρξης παλμικής κίνησης	62
3.2.4 Διεύθυνση παλμού	66
3.2.5 Περίοδος παλμού	67
3.2.6 Επαύξηση της φασματικής επιτάχυνσης λόγω του παλμού κατευθυντικότητας	69

Κεφάλαιο 4-ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ ΜΕΣΩ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΝΕΛΙΞΗΣ

4.1 Εισαγωγή	73
4.2 Προσδιορισμός των περιόδων των σημαντικών παλμών	73
4.3 Προσδιορισμός των παραμέτρων των κυματιδίων	79
4.4 Προτεινόμενη Μεθοδολογία σε Βήματα	83

Κεφάλαιο 5-ΤΟ CAD ΩΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΥΠΑΡΞΗΣ ΠΑΛΜΟΥ

5.1 Εισαγωγή	87
5.2 Διεγέρσεις κοντινού πεδίου και ανελαστική απαίτηση	88
5.3 Άλλες μέθοδοι ταξινόμησης των εδαφικών κινήσεων	89
5.4 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού	89
5.5 Νέα μέθοδος ταξινόμησης των εδαφικών κινήσεων	91
5.6 Σύγκριση με άλλες μεθόδους	94

Κεφάλαιο 6-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

6.1 Εισαγωγή	100
6.2 Κριτήρια ταξινόμησης των καταγραφών	100
6.3 Υπολογισμός της ενέργειας Energy Flux	100
6.4 Προσδιορισμός του σημαντικού παλμού σε κάθε γωνία γύρω από το ρήγμα	101
6.5 Επιβεβαίωση του παλμικού περιεχομένου με βάση την τιμή του λόγου $Sd,0(Tp)/CAD$	101
6.6 Ομαδοποίηση των παλμικών σε τέσσερα σεισμικά γεγονότα	102

Κεφάλαιο 6-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΣΜΑΤΑ

7.1 Διαγράμματα Energy Flux	105
7.2 Διαγράμματα Cross Correlation	108
7.3 Διαγράμματα $Sd,0(Tp)/CAD$	111
7.4 Διαγράμματα μη παλμικών καταγραφών	114
7.5 Διαγράμματα παλμικών καταγραφών	115

Σχήματα

- Σχήμα 1.1:** Βασικοί τύποι ρηγμάτων (1) Κανονικό ρήγμα, (2) Ανάστροφο ρήγμα, (3) Ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης. 21
- Σχήμα 1.2:** Γεωμετρικές παράμετροι ενός ρήγματος (*NGA Database Documentation File*) 22
- Σχήμα 1.3:** Σχηματικό διάγραμμα επίδρασης της κατευθυντικότητας της διάρρηξης για οριζόντιο ρήγμα ολίσθησης. Η διάρρηξη αρχίζει στο υπόκεντρο και διαδίδεται με ταχύτητα περίπου ίση με το 80% της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Η εικόνα παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο του μετώπου της ρήξης σε μία δεδομένη στιγμή (από *Somerville et al 1997α*). 24
- Σχήμα 1.4:** Αποτελέσματα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις καταγεγραμμένες ιστορίες μετακινήσεων του σεισμού του Loma Prieta του 1989 για τις κάθετες (άνω) και τις παράλληλες (κάτω) στο ρήγμα συνιστώσες. EERI, 1995. 25
- Σχήμα 1.5:** Σχηματικό διάγραμμα των προσανατολισμών της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και για ρήγμα κεκλιμένης ολίσθησης. 26
- Σχήμα 1.6:** Χρονοϊστορίες για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα κεκλιμένης ολίσθησης, στο οποίο φαίνονται οι επιρροές της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας μαζί και χωριστά. 26
- Σχήμα 1.7:** Παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να ερμηνεύσουν τις συνθήκες της κατευθυντικότητας της διάρρηξης (*Somerville et al. 1997α*). 27
- Σχήμα 1.8:** Προβλέψεις από τη σχέση των *Somerville et al. (1997α)* μεταξύ διαφορετικών συνθηκών κατευθυντικότητας. 28
- Σχήμα 1.9:** Απλοποιημένοι παλμοί που έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές 29
- Σχήμα 1.10:** Παράγοντες που χρειάζονται για να καθορίσουν την παράλληλη και την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα για απλοποιημένους παλμούς ταχύτητας. Τα σύμβολα N, P αντιστοιχούν στις κάθετες και παράλληλες κινήσεις ως προς τη διεύθυνση του ρήγματος αντίστοιχα (*Rodriguez-Marek 2000*). 30
- Σχήμα 1.11:** Χρονοϊστορίες ταχύτητας και οριζόντια τροχιακά σχέδια της κάθετης (FN) και της παράλληλης (FP) στο ρήγμα συνιστώσα για δύο καταγραφές κοντινού πεδίου. 32

- Σχήμα 1.12:** Απλοποιημένες αναπαραστάσεις ημιτονικού παλμού για εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Η *PHV* (μέγιστη οριζόντια ταχύτητα) για παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα αντιστοιχεί στο 50% της *PHV* κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (*Rodriguez-Marek 2000*). 32
- Σχήμα 1.13:** Σύγκριση αποτελεσμάτων παλινδρομικής ανάλυσης για εκτίμηση της *PHV* με σχέσεις προτεινόμενες από διάφορους ερευνητές για βάσεις δεδομένων σεισμών κοντινού πεδίου και με το φαινόμενο της εμπρόσθιας κατευθυντικότητας (*Rodriguez - Marek 2000*).36
- Σχήμα 1.14:** Σύγκριση μοντέλου *Rodriguez-Marek (2000)* με αυτές που προτάθηκαν από *Somerville (1998)* για την *T_v* και από τους *Alavi* και *Kranwinkler (2000)* για την *T_{v-p}* (*Rodriguez Marek 2000*) 38
- Σχήμα 1.15:** Μοντέλα εκτίμησης της περιόδου του παλμού (*T_v*) για βράχο και έδαφος του *Rodriguez-Marek (2000)*. Οι έντονες γραμμές αναπαριστούν τη μέση τιμή και οι λεπτές τις τυπικές αποκλίσεις (*Rodriguez-Marek 2000*). 39
- Σχήμα 2.1:** Πρότυπα μητρικά κυματίδια (*Baker 2007*). 43
- Σχήμα 2.2:** Μετασχηματισμοί κυματιδίων (*Baker 2007*). 44
- Σχήμα 2.3:** Περιγραφή της διαδικασίας αφαίρεσης παλμού (*Baker 2007*). 46
- Σχήμα 2.4:** Παραδείγματα καθέτων στο ρήγμα συνιστωσών σε σεισμούς κοντινού πεδίου (*Baker 2007*). 48
- Σχήμα 2.5:** Περιγραφή της διαδικασίας αφαίρεσης παλμού (*Baker 2007*). 49
- Σχήμα 2.6:** Παλμός στην αρχή της χρονοϊστορίας: (a), (b) χρονοϊστορία ταχύτητας και παλμού, (c) *CSV (Baker 2007)*. 51
- Σχήμα 2.7:** Παλμός στο τέλος της χρονοϊστορίας. (a), (b) χρονοϊστορία ταχύτητας και παλμού, (c) *CSV (Baker 2007)*. 51
- Σχήμα 2.8:** Εδαφική κίνηση με μικρή *PGV* που εμφανίζεται ως παλμική και αποκλείεται (*Baker 2007*). 52
- Σχήμα 2.9:** Κυματίδιο *Daubechies* και ημιτονικό κύμα με περίοδο ίση με τη μέγιστη της κυματομορφής από το φάσμα *Fourier (Baker 2007)*. 53
- Σχήμα 3.1:** Απεικόνιση της διαδικασίας που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος του *Baker (2007)* για να εξαγάγει τον μεγαλύτερο παλμό από τη χρονοϊστορία ταχυτήτων (εδώ παρουσιάζεται η χρονοϊστορία του σεισμού στο *Imperial Valley, El Centro 1979*). Στην περίπτωση αυτή ο παλμός είναι μεγάλος και η εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται ως παλμική. 58

- Σχήμα 3.2:** Τιμές συντελεστή εμφάνισης παλμού ως συνάρτηση της διεύθυνσης για το σεισμό Imperial Valley, El Centro 1979. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή υποδεικνύει τις διευθύνσεις στις οποίες η παλμική κίνηση είναι εμφανής. 59
- Σχήμα 3.3:** Φάσμα απόκρισης από το σεισμό Imperial Valley, El Centro 1979 σε κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα. Η μέση πρόβλεψη των Boore και Atkinson (2007) και η φασματική απόκριση για την απομένουσα εδαφική κίνηση παρουσιάζονται επίσης. 62
- Σχήμα 3.4:** Σχήμα που επεξηγεί τις απαιτούμενες παραμέτρους για τη λογιστική παλινδρόμηση για (α) ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και (β) ρήγμα μη οριζόντιας ολίσθησης. Επίσης παρουσιάζεται η γωνία α μεταξύ της διεύθυνσης ενδιαφέροντος και της διεύθυνσης του ρήγματος. 64
- Σχήμα 3.5:** Χάρτης του σεισμού του Imperial Valley ο οποίος απεικονίζει (α) ισούψεις πιθανότητας εμφάνισης παλμού για δεδομένη διάρρηξη και (β) περιοχές όπου παρατηρήθηκε παλμική εδαφική κίνηση. 65
- Σχήμα 3.6 :** Χάρτης του σεισμού του Northridge ο οποίος απεικονίζει (α) ισούψεις πιθανότητας εμφάνισης παλμού για δεδομένη διάρρηξη και (β) περιοχές όπου παρατηρήθηκε παλμική εδαφική κίνηση. 65
- Σχήμα 3.7:** Απεικόνιση της πιθανότητας εμφάνισης παλμού σε γωνία α δεδομένου της ύπαρξης παλμού σε κάποια θέση για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και μη. 67
- Σχήμα 3.8:** Περίοδος του παλμού σχετιζόμενη με το σεισμικό μέγεθος για εδαφικές κινήσεις χαρακτηριζόμενες ως παλμικές. 68
- Σχήμα 3.9:** Παρατηρούμενες τιμές ϵ της απομένουσας εδαφικής κίνησης. 69
- Σχήμα 3.10:** Συντελεστής ενίσχυσης των φασματικών επιταχύνσεων S_a λόγω της παρουσίας των παλμικών χαρακτηριστικών στις εδαφικές κινήσεις. (α) Γραφική παράσταση των παραγόμενων εξισώσεων μαζί με τις παρατηρήσεις πεδίου και (β) Μέση ενίσχυση λόγω της καταγραφής παλμών σε διάφορες διευθύνσεις. 70
- Σχήμα 3.11:** Λόγος της τυπικής απόκλισης των υπολοίπων από προβλέψεις του παλμικού φάσματος $\sigma_{I_n S_a, pulse}$ προς την τυπική απόκλιση $\sigma_{I_n S_a, gmm}$ του μοντέλου των Boore και Atkinson (2008). 72
- Σχήμα 4.1:** Καταγραφή G 06-320 (Coyote Lake) 1979 (α) χρονοϊστορία ταχύτητας, (β) *PSV 5%* (Mimoglou et al. 2014) 74
- Σχήμα 4.2:** Καταγραφή G06-320 (Coyote Lake) 1979: (α) σύγκριση του φάσματος ταχύτητας *Fourier* με το φάσμα μετακίνησης για μηδενική απόσβεση, (β) *Sd 5%* (Mimoglou et al. 2014) 75

Σχήμα 4.3: Καταγραφή PCD-164 από το σεισμό στο San Fernando, CA (1971): (a) φάσμα απόκρισης ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5%; (b) φάσμα απόκρισης μετακίνησης για απόσβεση 5% (Mimoglou et al. 2014).	76
Σχήμα 4.4: Φάσματα συνέλιξης και προσδιορισμός της περιόδου T_i για τις καταγραφές: (a) G06-320 (Coyote Lake), (b) PCD-164 San Fernando (Mimoglou et al. 2014).	77
Σχήμα 4.5: Σχέση μεταξύ της μέγιστης φασματικής μετακίνησης S_d,max και CAD για κυματίδιο $M\&P$ και διάφορες τιμές γ και ν . (a) μηδενική απόσβεση (b) απόσβεση 5% (Mimoglou et al. 2014)	82
Σχήμα 5.1: Λόγοι απαίτησης ανελαστικής προς ελαστικής μετακίνησης παλμικών καταγραφών (Tothong and Cornell, 2006).	88
Σχήμα 5.2: Καταγραφή Petrolia από το σεισμό στο Cape Mendocino, 1992: (a) Φάσμα συνέλιξης $S_d \times S_v$; (b) Φάσμα ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5%; (c) χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας και ο υπολογισμένος δεσπόζων παλμός (Mimoglou 2014).	90
Σχήμα 5.3: Σεισμός του Cape Mendocino, 1992: (a) χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας. Οι σκιασμένες επιφάνειες υποδεικνύουν το τμήμα της καταγραφής για το οποίο υπολογίζεται το CAD ; (b) Φάσμα συνέλιξης $S_d \times S_v$ για απόσβεση 5%. (c) Φάσμα μετατόπισης για μηδενική απόσβεση.	93
Σχήμα 5.4: Καταγραφή CHY036 από το σεισμό στο Chi-Chi, 1999: (a) χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας; (b) Φάσμα συνέλιξης $S_d \times S_v$ για απόσβεση 5%; (c) φάσμα μετατόπισης για μηδενική απόσβεση.	93
Σχήμα 5.5: $S_d,0(T_p)$ ως προς το CAD για τις καταγραφές που έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές από τους (a) Baker (2007) και (b) Zhai et al. (2013). Οι μαύρες κουκίδες αντιστοιχούν σε παλμικές καταγραφές και οι γκρι σταυροί σε μη παλμικές σύμφωνα με την ταξινόμηση που έχει γίνει στις αρχικές δημοσιεύσεις.	94
Σχήμα 5.6: Χρονοϊστορίες της εδαφικής ταχύτητας για τις καταγραφές: (a) Hollister City Hall και (b) Sunnyvale - Colton Ave. από το σεισμό στο Loma Prieta, 1989.	95
Σχήμα 7.1: Διάγραμμα Energy Flux για το Imperial Valley (1979)	105
Σχήμα 7.2: Διάγραμμα Energy Flux για το Loma Prieta (1989)	106
Σχήμα 7.3: Διάγραμμα Energy Flux για το Northridge (1994)	106
Σχήμα 7.4: Διάγραμμα Energy Flux για το Chi-Chi (1999)	107
Σχήμα 7.5: Διάγραμμα Cross Correlation για το Imperial Valley (1979)	108

Σχήμα 7.6: Διάγραμμα Cross Correlation για το Loma Prieta (1989)	109
Σχήμα 7.7: Διάγραμμα Cross Correlation για το Northridge (1994)	109
Σχήμα 7.8: Διάγραμμα Cross Correlation για το Chi-Chi (1999)	110
Σχήμα 7.9: Διάγραμμα $S_{d,0}(T_p)/CAD$ για το Imperial Valley (1979)	111
Σχήμα 7.10: Διάγραμμα $S_{d,0}(T_p)/CAD$ για το Loma Prieta (1989)	112
Σχήμα 7.11: Διάγραμμα $S_{d,0}(T_p)/CAD$ για το Northridge (1994)	112
Σχήμα 7.12: Διάγραμμα $S_{d,0}(T_p)/CAD$ για το Chi-Chi (1999)	113
Σχήμα 7.13: Διάγραμμα μη παλμικών καταγραφών	114
Σχήμα 7.14: Διάγραμμα μη παλμικών καταγραφών	115
Σχήμα 7.15: Χρονοϊστορία ταχύτητας καταγραφής 1463	116
Σχήμα 7.16: Χρονοϊστορία ταχύτητας καταγραφής 1478	116
Σχήμα 7.17: Χρονοϊστορία ταχύτητας καταγραφής 1495	117

Πίνακες

Πίνακας 1.1: Παράγοντες που χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις απλοποιημένες εδαφικές κινήσεις ημιτονικού παλμού (Rodriguez - Marek 2000).	30
Πίνακας 1.2: Τροποποίηση των παραμέτρων εδαφικής κίνησης για την εκτίμηση της επίδρασης της κατευθυντικότητας. Οι παράμετροι X , Y , θ , φ έχουν οριστεί στο σχήμα 1.7. Οι τροποποιήσεις φαίνονται στο Σχήμα 1.8.	33
Πίνακας 1.3: Παράμετροι για την παλινδρομική ανάλυση της PHV (Rodriguez - Marek 2000)	35
Πίνακας 1.4: Παράμετροι του μοντέλου Rodriguez-Marek (2000) για την περίοδο του παλμού	38
Πίνακας 1.5: Αριθμός ημικύκλων παλμού (N_v) ανά γεγονός για 48 κινήσεις κοντινού πεδίου (κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα). Οι τιμές στις παρενθέσεις είναι οι αριθμοί των ημικύκλων του παλμού της ταχύτητας που έχουν εύρη τουλάχιστον 33% της PHV, όπως αντίστοιχα χρησιμοποιήθηκε το 50% για να καθοριστεί ο N_v (Rodriguez-Marek 2000)	40
Πίνακας 2.: Παλμικές καταγραφές της βάσης δεδομένων NGA (Baker 2007)	53
Πίνακας 5.1: Παλμικές καταγραφές (Kardoutsou et al. 2014).	95
Πίνακας 5.2: Μη παλμικές καταγραφές (Kardoutsou et al. 2014).	98
Πίνακας 5.3: Αμφιλεγόμενες καταγραφές (Kardoutsou et al. 2014).	99
Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα επεξεργασίας καταγραφών Imperial Valley-06 (1979)	102
Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα επεξεργασίας καταγραφών Loma Prieta (1989)	102
Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα επεξεργασίας καταγραφών Northridge-01(1994)	103
Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα επεξεργασίας καταγραφών Chi-Chi, Taiwan (1999)	103

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

1.1 Εισαγωγή

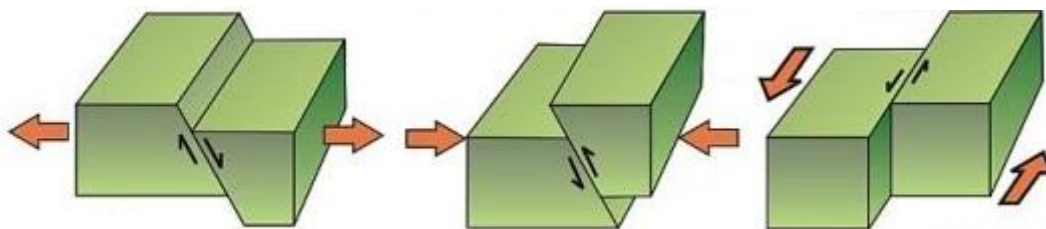
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες και παράμετροι που διέπουν τις σεισμικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου. Αρχικά, περιγράφονται τρεις βασικοί μηχανισμοί διάρρηξης. Στη συνέχεια, αναλύεται ο τρόπος γένεσης των παλμών κατευθυντικότητας και η διαφοροποίηση της επιρροής του φαινομένου σε περιοχές με διαφορετικές σχετικές θέσεις ως προς την επιφάνεια του ρήγματος. Ακόμα, πραγματοποιείται μια περιγραφή των βασικότερων παραμέτρων που σχετίζονται με το φαινόμενο της κατευθυντικότητας, όπως έχουν διατυπωθεί από ερευνητές που έχουν ασχοληθεί εκτεταμένα με τις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου και αποτελούν πλέον παραδοσιακή βιβλιογραφία για την κατανόηση και αντιμετώπιση του εν λόγω φαινομένου.

1.2 Ρήγματα

Τα σεισμικά γεγονότα είναι άμεσα συνδεδεμένα με τα ρήγματα, δηλαδή ασυνέχειες στο φλοιό της Γης που προκλήθηκαν στο παρελθόν από προηγούμενες διαρρήξεις. Σεισμοί που θα προκληθούν στο μέλλον αναμένονται να εμφανιστούν σε ορισμένα τμήματα των ήδη υπαρχόντων ρηγμάτων. Η επιφάνεια της ασυνέχειας η οποία ονομάζεται ρήγμα, παρότι χαρακτηρίζεται ως μη επίπεδη σε μεγάλη κλίμακα, εμείς την προσομοιάζουμε ως ένα επίπεδο, το ονομαζόμενο επίπεδο του ρήγματος. Το επίπεδο του ρήγματος χωρίζει τον φλοιό της περιοχής σε δύο τμήματα, στο υπερκείμενο του επιπέδου άνω τμήμα του ρήγματος και στο κάτω τμήμα.

1.2.1 Βασικοί τύποι ρηγμάτων

Υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος πολύπλοκων τύπων ρηγμάτων, οι οποίοι διαφοροποιούνται ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζει η διάρρηξη ως προς το οριζόντιο επίπεδο και από τη μορφή της σχετικής ολίσθησης των τμημάτων εκατέρωθεν της διάρρηξης. Παρ' όλα αυτά συνήθως αναφερόμαστε στους τρεις κυριότερους μηχανισμούς διάρρηξης του ρήγματος (rupture mechanisms) οι οποίοι είναι το κανονικό ή βαρύτητας ρήγμα, το ανάστροφο ρήγμα και το ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης όπως εμφανίζονται στο σχήμα 1.1.



(1) κανονικό ρήγμα

(2) ανάστροφο ρήγμα

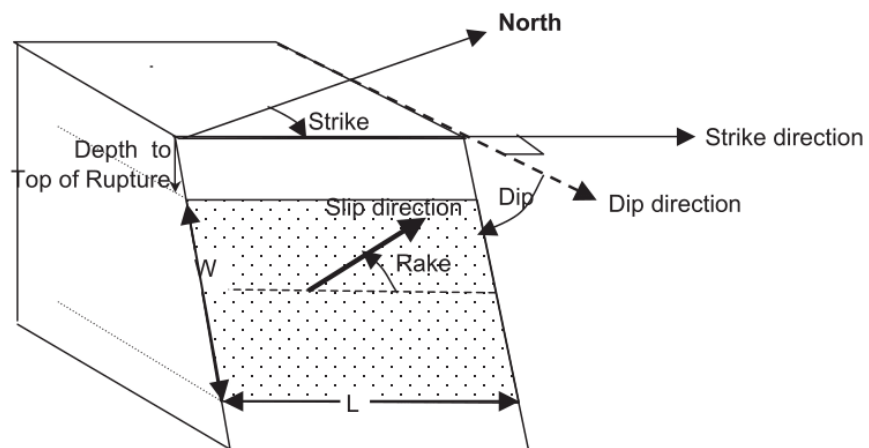
(3) ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης

Σχήμα 1.1: Βασικοί τύποι ρηγμάτων: Κανονικό ρήγμα, ανάστροφο ρήγμα και ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης.

Στο κανονικό ρήγμα (normal fault), το υπερκείμενο τμήμα ολισθαίνει προς τα κάτω εξαιτίας των εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται. Αντιθέτως, στα ανάστροφα ρήγματα (reverse fault), το υπερκείμενο τμήμα ολισθαίνει προς τα πάνω καθώς και τα δύο τμήμα συμπιέζονται υπό τις θλιπτικές τάσεις που δημιουργούνται. Τα κανονικά και τα ανάστροφα ρήγματα, αναφέρονται στη βιβλιογραφία ενιαία ως ρήγματα κεκλιμένης ολίσθησης ή ρήγματα κατακόρυφης βύθισης (dip-slip faults). Αντίστοιχα, στα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης (strike-slip fault), η διάρρηξη εκτείνεται κατακόρυφα μέσα στο πέτρωμα και τα τμήμα των πετρωμάτων κατά μήκος του ρήματος ολισθαίνουν το ένα ως προς το άλλο οριζόντια (διατμητικό πεδίο τάσεων). Τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης χαρακτηρίζονται ως προς τη φορά με την οποία ολισθαίνουν τα επιμέρους τμήμα, ως δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα.

1.2.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρηγμάτων

Στο σχήμα 1.2 παρουσιάζονται ορισμένα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός ρήματος



Σχήμα 1.2: Γεωμετρικές παράμετροι ενός ρήματος (NGA Database Documentation File).

Η τομή του επιπέδου του ρήματος με το οριζόντιο λέγεται ίχνος του ρήματος και η θετική του φορά είναι η ωρολογιακή φορά όταν βρισκόμαστε στο άνω μέρος του ρήματος. Η δεξιόστροφη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στον γεωγραφικό βορρά και στην θετική φορά του ίχνους του ρήματος ονομάζεται γωνία διεύθυνσης ϕ (Strike) ενώ η γωνία θ ανάμεσα στο οριζόντιο επίπεδο και το επίπεδο του ρήματος είναι η γωνία βύθισης ή κλίση (Dip). Η γωνία Strike κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $0^\circ \leq \text{Strike} \leq 360^\circ$, ενώ η γωνία Dip μεταξύ των τιμών $0^\circ \leq \text{Dip} \leq 90^\circ$. Τα ανάστροφα ρήματα με γωνία βύθισης $\text{Dip} \leq 45^\circ$ ονομάζονται Thrust.

Κατά την διάρκεια ενός σεισμού δημιουργείται μια διάρρηξη πάνω στην επιφάνεια του ρήματος. Η διάρρηξη ξεκινά από ένα σημείο της επιφάνειας του ρήματος το οποίο ονομάζεται εστία του σεισμού. Η οριζόντια προβολή της εστίας πάνω στην επιφάνεια του Γης ονομάζεται επίκεντρο. Η κατακόρυφη απόσταση της εστίας από το επίκεντρο ονομάζεται αντίστοιχα εστιακό βάθος. Οι διαστάσεις της διάρρηξης

χαρακτηρίζονται ως το μήκος L το οποίο είναι το μήκος του ρήγματος και το πλάτος του ρήγματος W και μετράται επί της επιφάνειας διάρρηξης από το ανώτερο τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης μέχρι το κατώτερο.

Προηγουμένως αναφέρθηκε ότι την σχετική ολίσθηση των τμημάτων του ρήγματος την προκαλούν οι διατμητικές τάσεις και παραμορφώσεις στην επιφάνεια ανάμεσα στα δύο τμήματα του ρήγματος. Η θεωρία της ελαστικής ανάπαλσης εξηγεί τον μηχανισμό δημιουργίας των σεισμών. Σύμφωνα με αυτήν, κατά την μετακίνηση των τεκτονικών πλακών συσσωρεύεται ελαστική ενέργεια με την αύξηση των διατμητικών τάσεων και εκλύεται θερμική και κινητική ενέργεια με την μορφή διαμήκων P και εγκάρσιων S σεισμικών κυμάτων. Η ολίσθηση του ρήγματος χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα (Slip direction) πάνω στο επίπεδο του ρήγματος που δείχνει την σχετική μετακίνηση του άνω ως προς το κάτω τμήμα του ρήγματος. Η αριστερόστροφη γωνία Rake ανάμεσα στην θετική φορά του ίχνους του ρήγματος και στο διάνυσμα ολίσθησης λέγεται γωνία ολίσθησης. Με βάση τη γωνία ολίσθησης χαρακτηρίζεται ο τύπος του μηχανισμού διάρρηξης, αν δηλαδή το ρήγμα είναι κανονικό, ανάστροφο ή οριζόντιας ολίσθησης.

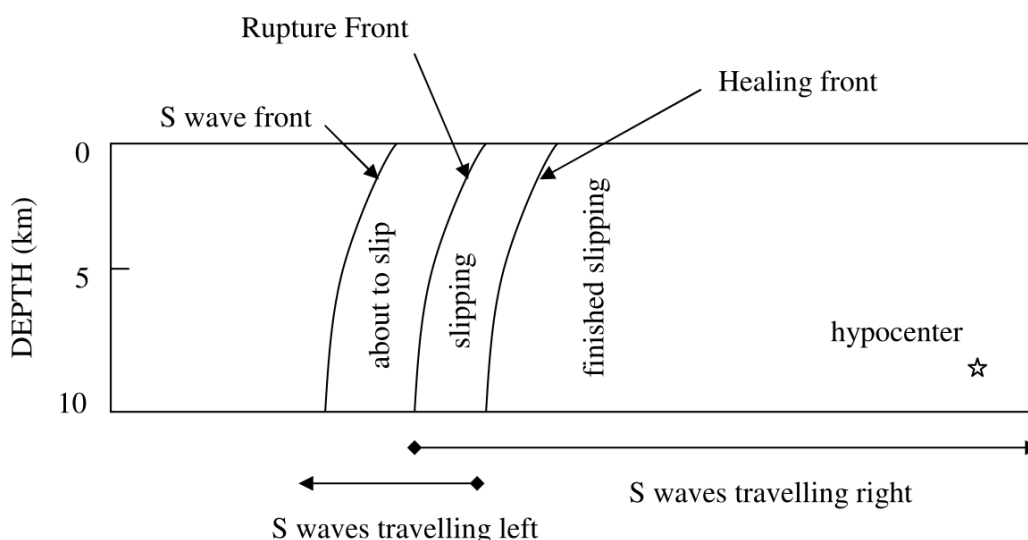
1.3 Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας

Οι εδαφικές κινήσεις που παρατηρούνται κοντά στην περιοχή της διάρρηξης ενός ρήγματος είναι δυνατόν να είναι σημαντικά διαφορετικές από εδαφικές κινήσεις σε μεγαλύτερη απόσταση από το ρήγμα. Η περιοχή κοντά στη σεισμική πηγή, η οποία θεωρείται ότι βρίσκεται τυπικά σε απόσταση μικρότερη από 20-60 km μακριά από την περιοχή της επιφάνειας διάρρηξης, την αποκαλούμε *Περιοχή Κοντινού Πεδίου* (*Near Fault Zone* ή *Near Field Zone*). Εντός της περιοχής κοντινού πεδίου, οι σεισμικές κινήσεις επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το μηχανισμό διάρρηξης, τη κατεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης ως προς μια περιοχή και τις πιθανές μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις που προκαλεί η ολίσθηση του ρήγματος. Αυτοί οι παράμετροι επηρεάζουν σημαντικά φαινόμενα που στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως “*Κατευθυντικότητα της Διάρρηξης*” (*Rupture Directivity*) & “*Στατική Μόνιμη Παραμόρφωση*” (*Fling Step*). Η εκτίμηση των σεισμικών κινήσεων κοντά σε ένα ενεργό ρήγμα θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τα παραπάνω χαρακτηριστικά των εδαφικών κινήσεων του κοντινού πεδίου.

Η έμπροσθεν κατευθυντικότητα (forward directivity) εμφανίζεται όταν η διάδοση της διάρρηξης και η κατεύθυνση της ολίσθησης στο ρήγμα πραγματοποιούνται προς την ίδια περιοχή. Αυτό συμβαίνει επειδή η ταχύτητα διάδοσης της διάρρηξης στο ρήγμα είναι σχεδόν ίδια (συνήθως ελαφρώς μικρότερη) με την ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων του βράχου κοντά στην πηγή. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα για μηχανισμό οριζόντιας ολίσθησης στο οποίο το μέτωπο της διάρρηξης διαδίδεται μακριά από το υπόκεντρο και προς μια περιοχή, η ενέργεια συσσωρεύεται κοντά στο μέτωπο διάρρηξης από κάθε διαδοχική ζώνη της ολίσθησης κατά μήκος του ρήγματος. Το μέτωπο των κυμάτων φθάνει ως ένας μεγάλος παλμός της κίνησης ο οποίος λαμβάνει χώρα στην αρχή της καταγραφής και πολώνεται κυρίως την κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση (*Strike Normal Direction*). Ο παλμός αυτός χαρακτηρίζεται από τη μεγάλη διακύμανση σε ενδιάμεσες και μεγάλες περιόδους και τη μικρή διάρκεια.

Εάν μια θέση βρίσκεται κοντά στο επίκεντρο, τότε η διάρρηξη διαδίδεται μακριά από τη θέση, δηλαδή η κατεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης είναι αντίθετη από την μελετώμενη περιοχή. Επίσης η άφιξη των σεισμικών κυμάτων κατανέμεται στο χρόνο, δηλαδή η άφιξη κάθε παλμού επιμέρους σεισμικής διάρρηξης γίνεται στο τέλος του προηγούμενου του. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται όπισθεν κατευθυντικότητα (backward directivity) και χαρακτηρίζεται από κινήσεις με σχετικά

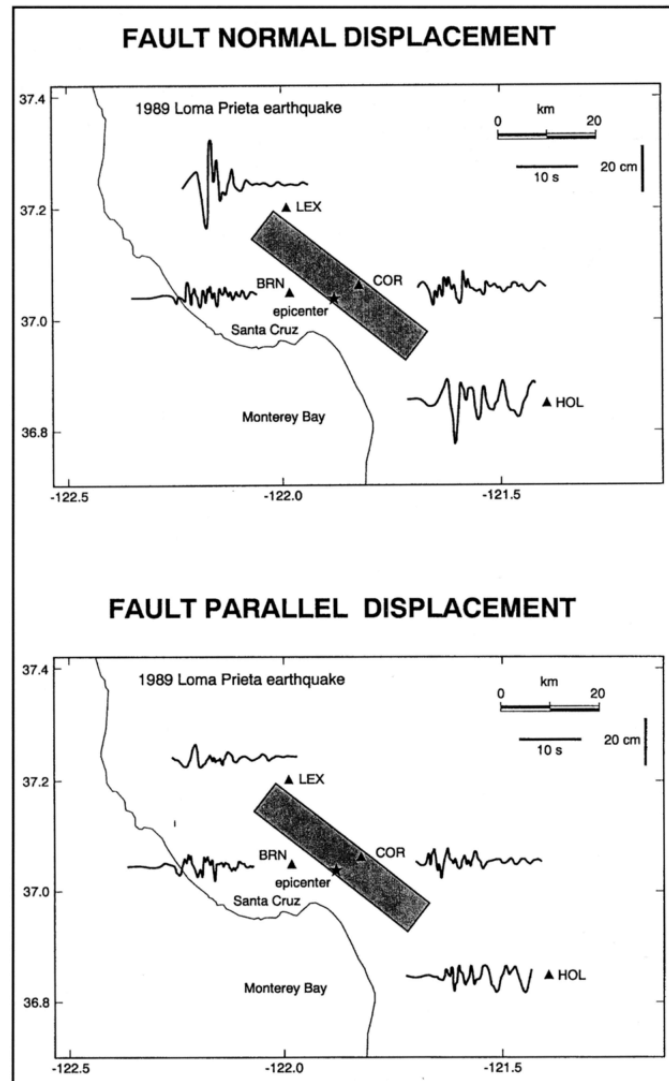
μεγάλη διάρκεια και μικρό πλάτος. Η ουδέτερη κατευθυντικότητα (neutral directivity) εμφανίζεται σε θέσεις που βρίσκονται στο πλάι της επιφάνειας διάρρηξης του ρήγματος και η κατεύθυνση της διάρρηξης δεν είναι ούτε προς, ούτε μακριά από τη θέση.



Σχήμα 1.3: Σχηματικό διάγραμμα επίδρασης της κατευθυντικότητας της διάρρηξης για οριζόντιο ρήγμα ολίσθησης. Η διάρρηξη αρχίζει στο υπόκεντρο και διαδίδεται με ταχύτητα περίπου ίση με το 80% της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Η εικόνα παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο του μετώπου της ρήξης σε μια δεδομένη στιγμή (από Somerville et al 1997a).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της επίδρασης της κατευθυντικότητας στις εδαφικές μετατοπίσεις είναι οι μετατοπίσεις που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του σεισμού στο Loma Prieta του 1989 και παρουσιάζονται στο σχήμα 1.4. Στο επίκεντρο του σεισμού οι οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις είναι μέτριες τόσο στις κάθετες (*fault normal*) όσο και στις παράλληλες (*fault parallel*) με το ρήγμα συνιστώσες, ένα φαινόμενο το οποίο αποδίδεται στην όπισθεν κατευθυντικότητα. Παρ' όλα αυτά, στα άκρα του ρήγματος, η εμπροσθεν κατευθυντικότητα αναγκάζει τις οριζόντιες εδαφικές κινήσεις οι οποίες εμφανίζονται στην κάθετη διεύθυνση του ρήγματος να είναι παλμικές και πολύ μεγαλύτερες από τις εδαφικές κινήσεις στην παράλληλη διεύθυνση του ρήγματος, οι οποίες έχουν παρόμοιες τιμές με αυτές που βρίσκονται κοντά στο επίκεντρο. Συνεπώς, οι μεγάλες παλμικές κινήσεις εμφανίζονται μόνο στην κάθετη με το ρήγμα συνιστώσα και μόνο μακριά από το επίκεντρο.

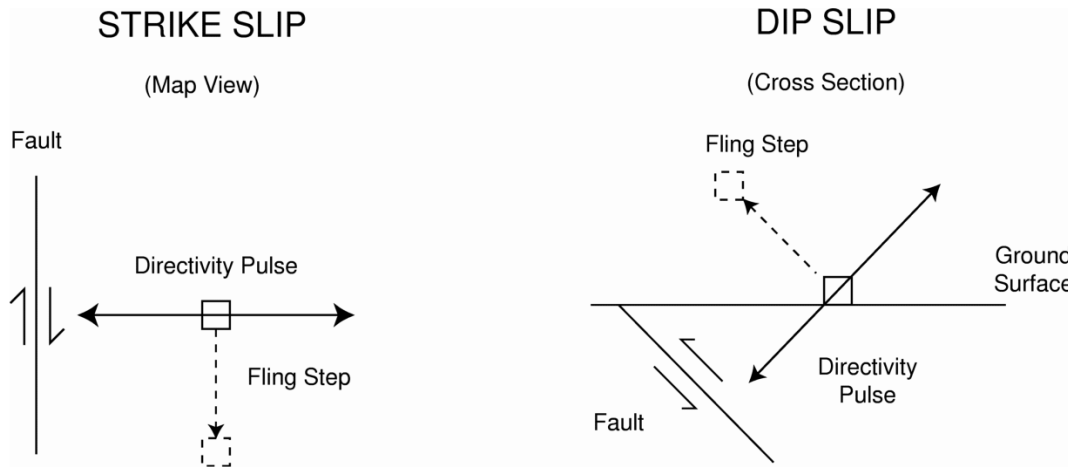
Τα φαινόμενα κατευθυντικότητας που οφείλονται στη διάρρηξη ενός ρήγματος είναι δυνατόν να εμφανιστούν σε φαινόμενα οριζόντιας ολίσθησης (*strike slip*), αλλά και σε φαινόμενα κεκλιμένης ολίσθησης (*dip slip*). Όσον αφορά τα φαινόμενα κεκλιμένης μετακίνησης, οι συνθήκες εμφάνισης φαινομένων εμπροσθεν κατευθυντικότητας επικρατούν σε θέσεις που βρίσκονται κοντά στην οριζόντια προβολή του ανώτερου τμήματος του ρήγματος. Όπως και στους μηχανισμούς οριζόντιας ολίσθησης, η διάδοση της διατμητικής μετατόπισης σε ένα ανάστροφο ρήγμα προκαλεί τον παλμό της κίνησης να προσανατολιστεί κάθετα ως προς τη διάρρηξη του ρήγματος (Somerville et al. 1997a).



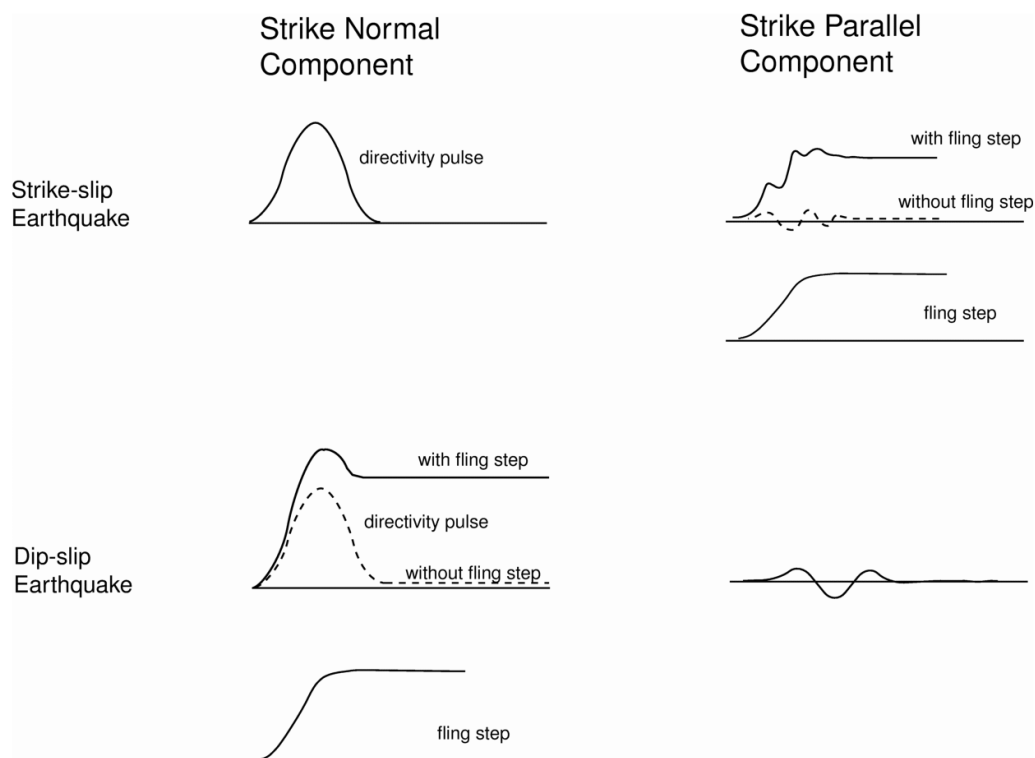
Σχήμα 1.4: Αποτελέσματα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες μετακινήσεων του σεισμού του Loma Prieta του 1989 για τις κάθετες (άνω) και τις παράλληλες (κάτω) στο ρήγμα συνιστώσες .EERI, 1995.

Σύγχρονες ψηφιακές καταγραφές των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου περιέχουν μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις λόγω του στατικού πεδίου παραμόρφωσης του σεισμού. Οι εν λόγω στατικές μετατοπίσεις, που αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως παραμένουσες μετακινήσεις (fling step), πραγματοποιούνται σε ένα διακεκριμένο χρονικό διάστημα αρκετών δευτερολέπτων, κατά το οποίο εκτυλίσσεται η ολίσθηση του ρήγματος. Οι μετακινήσεις αυτές είναι παράλληλες στη διεύθυνση ολίσθησης και δε συνδέονται άμεσα με τις προαναφερθείσες δυναμικές μετακινήσεις οι οποίες καλούνται παλμός κατευθυντικότητας της διάρρηξης. Στα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, ο παλμός κατευθυντικότητας εμφανίζεται στην κάθετη συνιστώσα ενώ η παραμένουσα μετακίνηση εμφανίζεται στην παράλληλη. Ενώ στα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης τόσο η παραμένουσα μετακίνηση όσο και ο παλμός κατευθυντικότητας εμφανίζονται στην κάθετη συνιστώσα.

Οι προσανατολισμοί της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και κατακόρυφης βύθισης απεικονίζονται στο σχήμα 1.5, ενώ οι χρονοϊστορίες στις οποίες αυτές οι συμβολές εμφανίζονται μαζί και χωριστά παρουσιάζονται στο σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.5: Σχηματικό διάγραμμα των προσανατολισμών της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και για ρήγμα κατακόρυφης βύθισης.

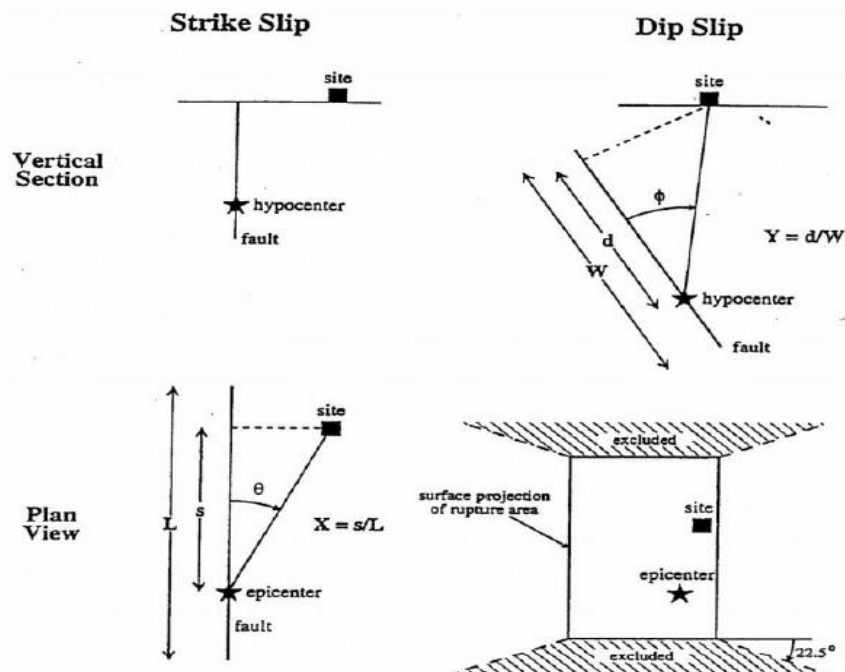


Σχήμα 1.6: Σχηματικό διάγραμμα των χρονοϊστοριών για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα κατακόρυφης βύθισης στο οποίο η παραμένουσα μετακίνηση και ο παλμός κατευθυντικότητας παρουσιάζονται μαζί και χωριστά.

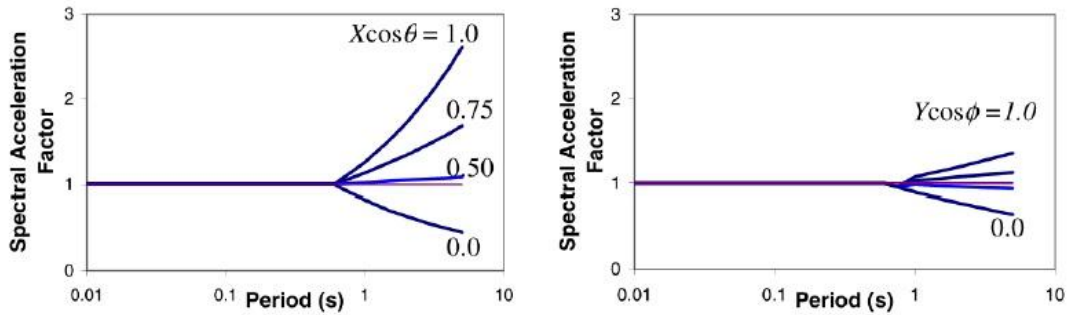
1.4 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου

Οι Somerville et al (1997a) μελέτησαν τις συνθήκες που οδηγούν σε έμπροσθεν και όπισθεν κατευθυντικότητα. Σύμφωνα με το Σχήμα , η χωρική απόκλιση των επιρροών των φαινομένων κατευθυντικότητας εξαρτάται αφενός από τη γωνία μεταξύ της διεύθυνσης διάδοσης της διάρρηξης και της διεύθυνσης στην οποία μεταφέρονται τα σεισμικά κύματα από το ρήγμα προς την εκάστοτε θέση ("θ" για μηχανισμούς οριζόντιας ολίσθησης και "φ" για μηχανισμούς κατακόρυφης ολίσθησης) και από το μέρος της επιφάνειας διάρρηξης του ρήγματος που βρίσκεται μεταξύ του υποκέντρου και της εξεταζόμενης περιοχής ("X" για μηχανισμούς οριζόντιας ολίσθησης και "Y" για μηχανισμούς κατακόρυφης ολίσθησης). Οι σημαντικότερες επιπτώσεις της έμπροσθεν κατευθυντικότητας προκύπτουν για μικρές γωνίες μεταξύ της εξεταζόμενης θέσης και του ρήγματος καθώς και για μεγαλύτερα τμήματα της επιφάνειας διάρρηξης του ρήγματος μεταξύ της θέσης και του υποκέντρου.

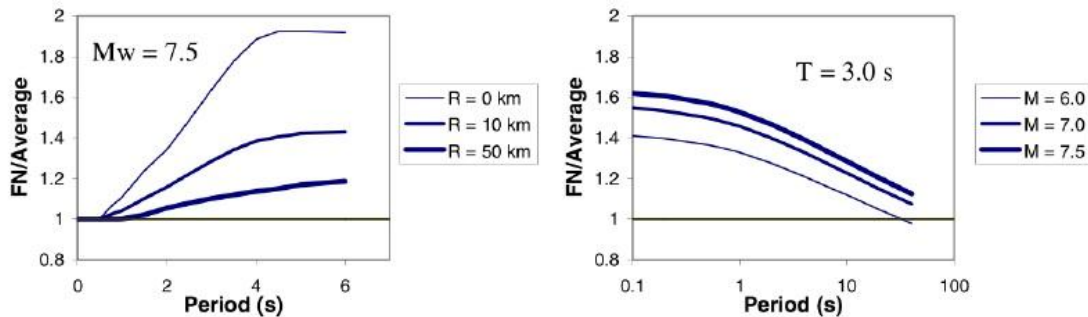
Πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμα και αν πληρούνται οι γεωμετρικές συνθήκες για την εμφάνιση των φαινομένων της έμπροσθεν κατευθυντικότητας, οι επιπτώσεις της μπορεί να μη πραγματοποιηθούν. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που ένας σταθμός βρίσκεται στο τέλος ενός ρήγματος και η διάρρηξη διαδίδεται προς το σταθμό αλλά η ολίσθηση συγκεντρώνεται κοντά στο τέλος του ρήγματος όπου βρίσκεται ο σταθμός. Με σκοπό να αντιπροσωπευθούν τα αποτελέσματα της κατευθυντικότητας οι Somerville et al. (1997a) συσχέτισαν τις ανηγμένες συνιστώσες των φασμάτων απόκρισης (με 5% απόσβεση) με τις γεωμετρικές παραμέτρους που καθορίζονται στο Σχήμα. Τα αποτελέσματα αυτής της συσχέτισης εμφανίζονται στο σχήμα 1.7. Οι παράμετροι εδαφικής κίνησης που τροποποιούνται είναι τα μέσα οριζόντια φάσματα απόκρισης και ο λόγος των φασμάτων απόκρισης της κάθετης και της παράλληλης στο ρήγμα συνιστώσας.



Σχήμα 1.7: Παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να ερμηνεύσουν τις συνθήκες κατευθυντικότητας της διάρρηξης (Somerville et al 1997a)



α) Μέση αναλογία φασματικής απόκρισης με εξάρτηση στις παραμέτρους της περιόδου και της διεύθυνσης

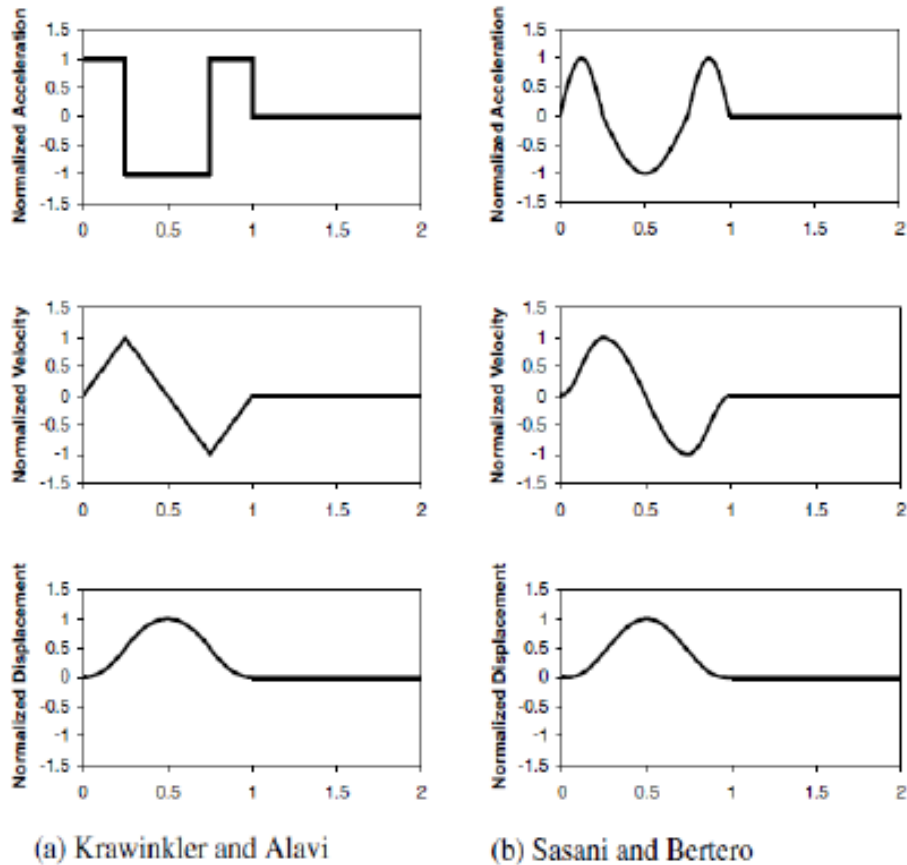


β) Αναλογία οριζόντιας φασματικής απόκρισης κάθετης στη ρήξη προς τη μέση οριζόντια για συνθήκες εμπρόσθιας κατευθυντικότητας ($X\cos\theta=1$).

Σχήμα 1.8: Προβλέψεις από τη σχέση των *Somerville et al (1997a)* για ποικίλες συνθήκες κατευθυντικότητας.

Έρευνες σχετικά με την απόκριση των κατασκευών στους σεισμούς κοντινού πεδίου έδειξαν ότι μια απεικόνιση των εδαφικών κινήσεων με τη μορφή χρονοϊστορίας είναι προτιμότερη από μια αντιπροσώπευση με τη μορφή φάσματος απόκρισης (π.χ. *Somerville (1998)*, *Alavi και Kranwinkler (2000)*, *Sasani και Bertero (2000)*, *Rodríguez- Marek (2000)*). Μια απεικόνιση των εδαφικών κινήσεων με τη μορφή χρονοϊστορίας είναι προτιμότερη επειδή ο χαρακτηρισμός μιας εδαφικής κίνησης με βάση ένα χώρο συχνοτήτων (π.χ. σε ένα φάσμα απόκρισης) υπαινίσσεται μια στοχαστική διαδικασία κατά την οποία υπάρχει μια σχετικά ομοιόμορφη κατανομή της ενέργειας καθ'όλη τη διάρκεια της εδαφικής κίνησης. Όταν η ενέργεια συγκεντρώνεται σε μερικούς παλμούς στην κίνηση, η απεικόνιση του φαινομένου απήχησης με τη χρήση ενός φάσματος απόκρισης μπορεί να μην έχει αρκετό χρόνο να αναπτυχθεί (*Somerville, 1998*).

Μελέτες των *Krawinkler and Alavi (1998)* και *Sasani and Bertero (2000)* έχουν δείξει ότι οι απλοποιημένες απεικονίσεις του παλμού ταχύτητας είναι ικανές να «συλλάβουν» τα εμφανή χαρακτηριστικά γνωρίσματα απόκρισης των κατασκευών που υποβάλλονται σε εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Μερικοί απλουστευμένοι παλμοί παρουσιάζονται στο σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.9: Απλοποιημένοι παλμοί που έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές

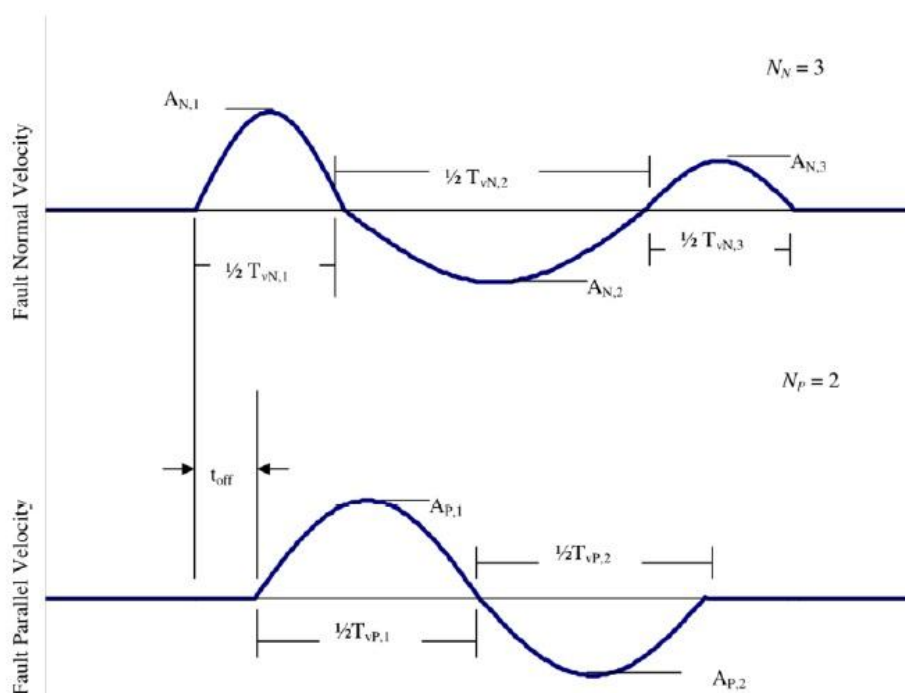
Οι απλοποιημένες ημιτονοειδείς παλμικές απεικονίσεις της ιστορίας των ταχυτήτων καθορίζονται από τον αριθμό των ισοδύναμων ημικυκλίων, την περίοδο κάθε

ημικυκλίου και τα αντίστοιχα πλάτη τους. Για την προσομοίωση διαξονικών κινήσεων είναι απαραίτητη μια ημιτονοειδής απεικόνιση της ιστορίας της παράλληλης στο ρήγμα κίνησης, καθώς και η χρονική καθυστέρηση μεταξύ της εκκίνησής της σε σχέση με την εκκίνηση της ιστορίας στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση.

Στον πίνακα 1.1 δίνονται οι ορισμοί των παραμέτρων των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, οι οποίοι απεικονίζονται στο σχήμα 1.10. Ένας απλός χαρακτηρισμός είναι πιθανός με τη χρήση της μέγιστης οριζόντιας ταχύτητας (*Peak Horizontal Velocity - PHV*), της κατά προσέγγιση περιόδου του δεσπόζοντος παλμού (*T_v*) και του αριθμού σημαντικών ημικυκλίων της κίνησης στη μεγαλύτερη κάθετη διεύθυνση στο ρήγμα.

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

Πίνακας 1.1: Παράγοντες που χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις απλοποιημένες εδαφικές κινήσεις ημιτονικού παλμού (Rodriguez - Marek 2000).

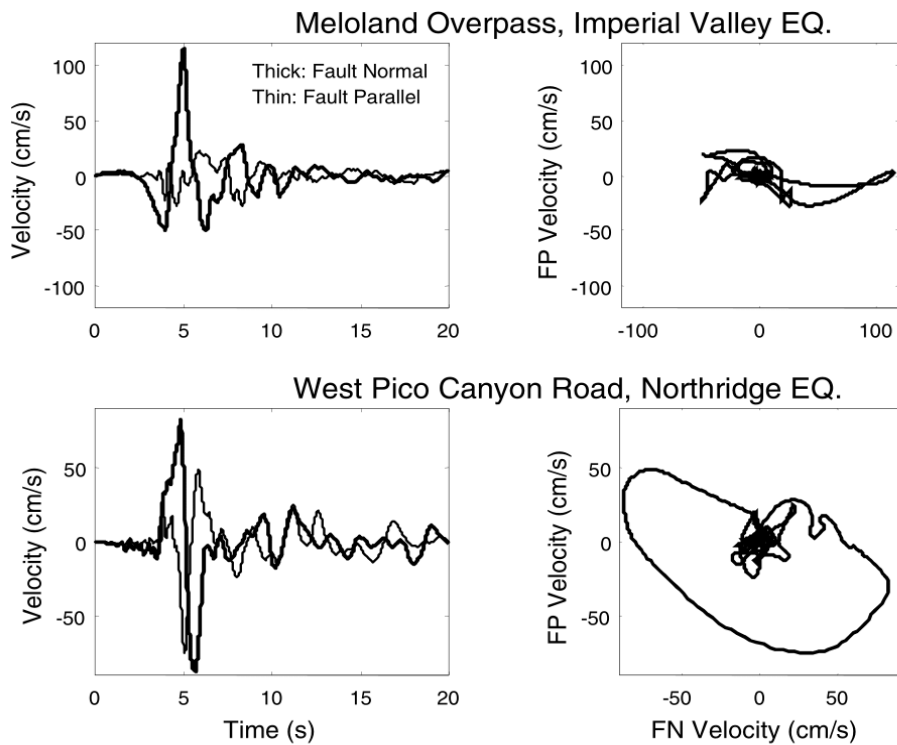


Σχήμα 1.10 : Παράγοντες που χρειάζονται για να καθορίσουν την παράλληλη και την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα για απλοποιημένους παλμούς ταχύτητας. Τα σύμβολα N , P αντιστοιχούν στις κάθετες και παράλληλες κινήσεις ως προς τη διεύθυνση του ρήγματος αντίστοιχα (Rodriguez - Marek 2000).

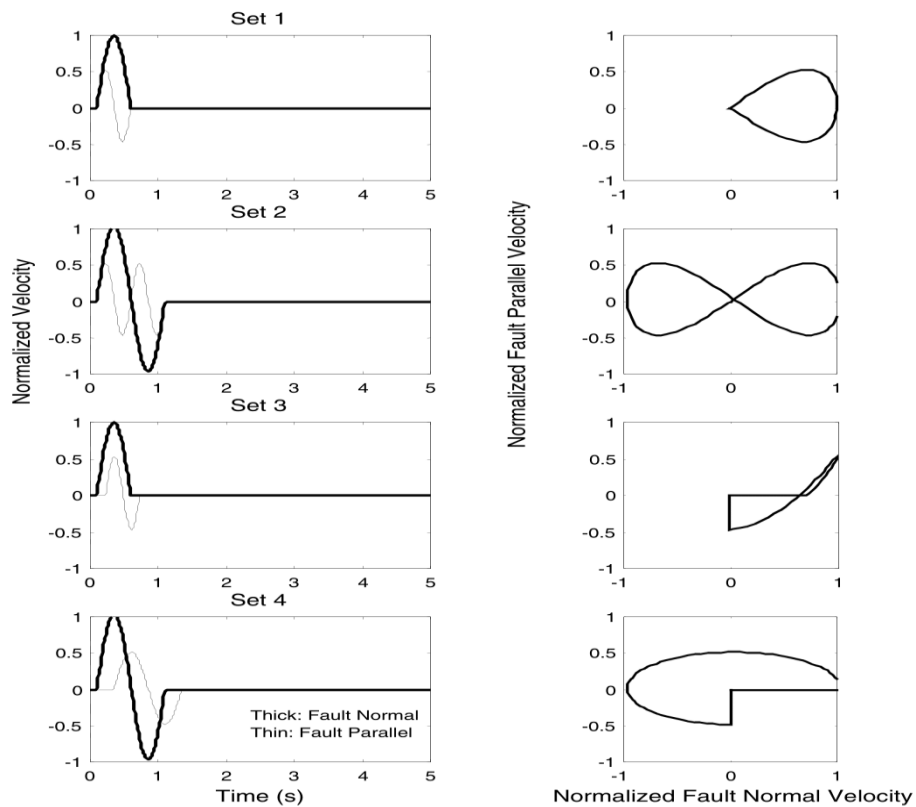
Ο προσδιορισμός της περιόδου του παλμού χρησιμοποιεί είτε το χρονικό διάστημα στο οποίο πραγματοποιούνται δύο διαδοχικοί μηδενισμοί της ταχύτητας (zero crossing time) είτε το χρόνο στον οποίο η ταχύτητα ισούται με το 10% της μέγιστης ταχύτητας για αυτό τον παλμό. Βεβαίως και υφίσταται ένας βαθμός αβεβαιότητας σε εκτιμήσεις της T_v , όμως η αβεβαιότητα που συνδέεται με την πρόβλεψη της T_v από τις σεισμολογικές μεταβλητές είναι πολύ μεγαλύτερη από τα λάθη στην εκτίμηση της από τα σημεία μηδενισμού. Οι Kranwinkler και Alavi (1998) προσδιορίζουν τον παλμό ταχύτητας από μια σαφή και σφαιρική κορυφή αιχμής στο φάσμα απόκρισης ταχύτητας της εδαφικής κίνησης. Ως εκ τούτου, αυτή η εκτίμηση της ισοδύναμης περιόδου παλμού (T_v-p) είναι σχετικά σαφής. Για τις μονοπαλμικές κινήσεις αυτοί οι διαφορετικοί ορισμοί της περιόδου του παλμού παρέχουν κατά προσέγγιση ισοδύναμα αποτελέσματα, αλλά για πιο πολύπλοκες καταγραφές μπορεί να διαφέρουν σημαντικά. Γενικώς, ο λόγος μεταξύ της T_v και της T_v-p είναι 0.84 με μια τυπική απόκλιση 0.28 (Rodriguez-Marek 2000). Η σύμπτωση των T_v και T_v-p για μια εδαφική κίνηση σεισμού δείχνει ότι ο παλμός ταχύτητας περιέχει την ενέργεια σε μια περιορισμένη ζώνη περιόδων.

Μελέτες σχετικά με την απόκριση των κατασκευών στις κινήσεις κοντινού πεδίου έχουν επικεντρωθεί στις συνέπειες της μεγαλύτερης κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (π.χ. Alavi και Kranwinkler 2000). Παρόλα αυτά, υπάρχουν εφαρμογές στις οποίες η παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα μπορεί να είναι επίσης σημαντική. Για παράδειγμα, η μείωση της δυσκαμψίας του εδάφους κατόπιν της μεγάλης, κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας της εδαφικής κίνησης μπορεί να επιτρέψει την ανάπτυξη μεγαλύτερων παραμορφώσεων κατά τη διεύθυνση της παράλληλης στο ρήγμα συνιστώσας, καθώς το έδαφος αντιδρά και στην παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα του σεισμού. Μη γραμμικές διαξονικές αναλύσεις εδαφικής απόκρισης από τους Rodriguez - Marek (2000) δείχνουν ότι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες μπορούν να έχουν επηρεάσουν τιμές όπως την PHV και τη T_v και στις δύο διευθύνσεις.

Δυο κινήσεις κοντινού πεδίου με σημαντικά διαφορετικές κινήσεις κατά την παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα παρουσιάζονται στο σχήμα 1.11. Οι διαφορές αυτές απεικονίζονται με τη μορφή ενός τροχιακού διαγράμματος των ταχυτήτων στις δύο διευθύνσεις, που φαίνεται στο δεξί μισό του σχήματος 1.11. Επιπρόσθετη έρευνα χρειάζεται έτσι ώστε να διακριθούν οι επιπτώσεις της διαξονικής δόνησης στην απόκριση του εδάφους και των κατασκευών εντός της ζώνης κοντινού πεδίου όπου οι δύο συνιστώσες της οριζόντιας εδαφικής κίνησης μπορούν να διαφέρουν σημαντικά. Από μια εξέταση καταγεγραμμένων κινήσεων κοντινού πεδίου που παρουσιάζουν την εμπρόσθια κατευθυντικότητα από τους Rodriguez - Marek (2000), κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι απλουστευμένες κινήσεις που παρουσιάστηκαν στο σχήμα 1.12 θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να διερευνηθεί η σημασία της διαξονικής καταπόνησης στις μελλοντικές μελέτες. Εάν είναι σημαντική για τη συμπεριφορά των κατασκευών, οι κατακόρυφες κινήσεις στη ζώνη κοντινού πεδίου μπορεί να χρειαστεί να υπολογιστούν επίσης.



Σχήμα 1.11 : Χρονοϊστορίες ταχύτητας και οριζόντια τροχιακά σχέδια για κάθετη (FN) και παράλληλη (FP) στο ρήγμα συνιστώσα για δυο καταγραφές κοντινού πεδίου. Και οι δυο καταγραφές παρουσιάζουν σημαντικές «κάθετες» ταχύτητες αλλά το Meloland έχει σχετικά μικρότερες «παράλληλες» ταχύτητες.



Σχήμα 1.12 : Απλοποιημένη αναπαράσταση ημιτονικού παλμού για εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Η PHV (μέγιστη οριζόντια ταχύτητα) για παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα αντιστοιχεί στο 50% της PHV κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (Rodríguez-Marek 2000).

1.5 Μοντέλα προσομοίωσης σεισμών κοντινού πεδίου

Φασματική επιτάχυνση

Οι Somerville et al. (1997a) και ο Abrahamson (2000) έχουν παρουσιάσει μοντέλα για την τροποποίηση των τεταγμένων των φασμάτων απόκρισης με απόσβεση $\zeta=5\%$ μέσω της σχέσης απόσβεσης των Abrahamson και Silva (1997). Τα μοντέλα αναπτύχθηκαν με οπισθοδρόμηση των μεταβλητών αυτής της σχέσης απόσβεσης στις γεωμετρικές παραμέτρους του κοντινού πεδίου του ρήγματος που εμφανίζονται στο σχήμα 1.7. Τα μοντέλα παρουσιάζονται για την τροποποίηση του γεωμετρικού μέσου των δυο οριζόντιων συνιστωσών και του λόγου της κάθετης προς τη μέση οριζόντια φασματική συνιστώσα. Οι λεπτομέρειες των μοντέλων υποδεικνύονται στις δυο πρώτες σειρές του πίνακα 1.2.

Διάρκεια και ισοδύναμος αριθμός ομοειδών κύκλων

Οι Somerville et al. (1997a) παρουσίασαν ένα μοντέλο για την τροποποίηση του 5 - 75% της σημαντικής διάρκειας από τη σχέση απόσβεσης των Abrahamson και Silva (1996). Το μοντέλο αναπτύχθηκε με παλινδρόμηση των μεταβλητών αυτής της σχέσης απόσβεσης στις γεωμετρικές παραμέτρους του κοντινού πεδίου του ρήγματος που εμφανίζονται στο σχήμα 1.7. Το μοντέλο απευθύνεται στη διάρκεια του γεωμετρικού μέσου και των δυο οριζόντιων συνιστωσών. Ένα παρόμοιο μοντέλο αναπτύχθηκε από τον Liu et al. (2001) για ισοδύναμο αριθμό ομοειδών κύκλων (N). Οι λεπτομέρειες των μοντέλων διάρκειας και αριθμού (N) υποδεικνύονται στις δυο τελευταίες σειρές του πίνακα 1.2.

Ground Motion Parameter (Reference)	Description	Equation	Range of Applicability
Spectral Acceleration: Ratio of data/model (Somerville et al., 1997a; Abrahamson, 2000)	y =Bias in average horizontal response spectral acceleration (ln units) with respect to Abrahamson and Silva (1997)	Strike-Slip faults: $y = c_1 + 1.88c_2 X \cos\theta$ ($X \cos\theta \leq 0.4$) $y = c_1 + 0.75c_2$ ($X \cos\theta > 0.4$) Dip-Slip faults: $y = c_1 + c_2 Y \cos\phi$	$m > 6.5$ For $m < 6.5$, replace y with $T_m \times y$ Where $T_m = 0$ for $m \leq 6$ and $T_m = 1 + (m - 6.5)/0.5$ for $6.5 < m < 6.6$ $r < 30$ km For $r > 30$, replace y with $T_d \times y$ Where $T_d = 0$ for $r > 60$ and $T_d = 1 - (r - 30)/30$ for $60 > r > 30$ km
Spectral Acceleration: Ratio of Strike Normal/Average Amplitude (Somerville et al., 1997a)	Natural logarithm of the ratio of strike normal to average horizontal spectral acceleration	$y = \cos 2\xi [C_1 + C_2 \ln(r + 1) + C_3(m - 6)]$	$6.0 \leq m \leq 7.5$ $0 \leq r \leq 50$ km $\xi = \theta$ for strike-slip, ϕ for dip-slip. $0 < \xi < 90^\circ$ C_1, C_2, C_3 function of period. Given separately for cases in which dependence on ξ is included, and cases in which dependence on ξ is ignored.
5-75% sig. duration: Ratio of data/model (Somerville et al., 1997a)	Bias in duration of acceleration with respect to Abrahamson and Silva (1996)	Strike-Slip faults: $y = C_1 + C_2 X \cos\theta$ Dip-Slip faults: $y = C_1 + C_2 Y \cos\phi$	$6.5 \leq m \leq 7.5$ $0 \leq r \leq 20$ km
Number of Cycles (N): Ratio of data/model (Liu et al., 2001)	Bias in N with respect to Liu et al. (2001)	Strike-Slip faults: $y = C_1 + C_2 X \cos\theta$ Dip-Slip faults: $y = C_1 + C_2 Y \cos\phi$	$6.5 \leq m \leq 7.5$ $0 \leq r \leq 20$ km

Πίνακας 1.2: Τροποποίηση των παραμέτρων εδαφικής κίνησης για την εκτίμηση της επίδρασης της κατευθυντικότητας. Οι παράμετροι X, Y, θ , ϕ έχουν οριστεί στο σχήμα 1.7. Οι τροποποιήσεις φαίνονται στο Σχήμα 1.8.

Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα (PHV)

Η PHV επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος του σεισμού, την απόσταση από το ρήγμα και τις εδαφικές συνθήκες της εξαιταζόμενης περιοχής. Ο Somerville (1998) πρότεινε τη χρήση μιας διγραμμικής σχέσης μεταξύ του λογαρίθμου PHV, του μεγέθους του σεισμού και του λογαρίθμου της απόστασης. Ο Somerville (1998) εφάρμοσε μια ανάλυση παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από 15 καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες επαυξημένες κατά 12 τεχνητές χρονοϊστορίες. Οι καταγραφές αντιστοιχούν σε μεγέθη σεισμού $m=6.2-7.5$ και απόσταση $r=0-10\text{km}$. Για να αποφύγει μη ρεαλιστικές προβλέψεις της PHV στις μικρές αποστάσεις ο Somerville (1998) χρησιμοποίησε μια ελάχιστη απόσταση των 3km. Η σχέση του Somerville (1998) για την PHV στη ζώνη κοντινού πεδίου είναι:

$$\ln(\text{PHV})=-2.31+1.15m-0.5\ln(r) \quad (1)$$

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

Μια παρόμοια μελέτη που συσχετίζει την PHV, το μέγεθος του σεισμού και την απόσταση στη ζώνη του κοντινού πεδίου παρουσιάστηκε από τους Alavi και Kranwinkler (2000) βασισμένη στα ίδια δεδομένα που χρησιμοποίησε ο Somerville (1998). Η σχέση της PHV των Alavi και Kranwinkler (2000) είναι:

$$\ln(\text{PHV})=-5.11+1.59m-0.58\ln(r) \quad (2)$$

Ο Rodriguez-Marek (2000) εφάρμοσε τις αναλύσεις παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας 48 χρονοϊστορίες ταχύτητας από 11 γεγονότα. Τα δεδομένα ήταν για περιοχές με αποστάσεις από την πηγή $r<20\text{km}$ και μεγέθους $m=6.1-7.4$. Χωριστές αναλύσεις εκτελέστηκαν για κινήσεις που καταγράφηκαν σε βραχώδεις και χωμάτινες περιοχές, καθώς και για όλες τις περιοχές. Βάσει της ανάλυσης των καταγραφών αυτών προτάθηκε η ακόλουθη σχέση για την PHV:

$$\ln(\text{PHV})= a+b m +c \ln(r_2+d_2)+\eta_i+\epsilon_{ij} \quad (3)$$

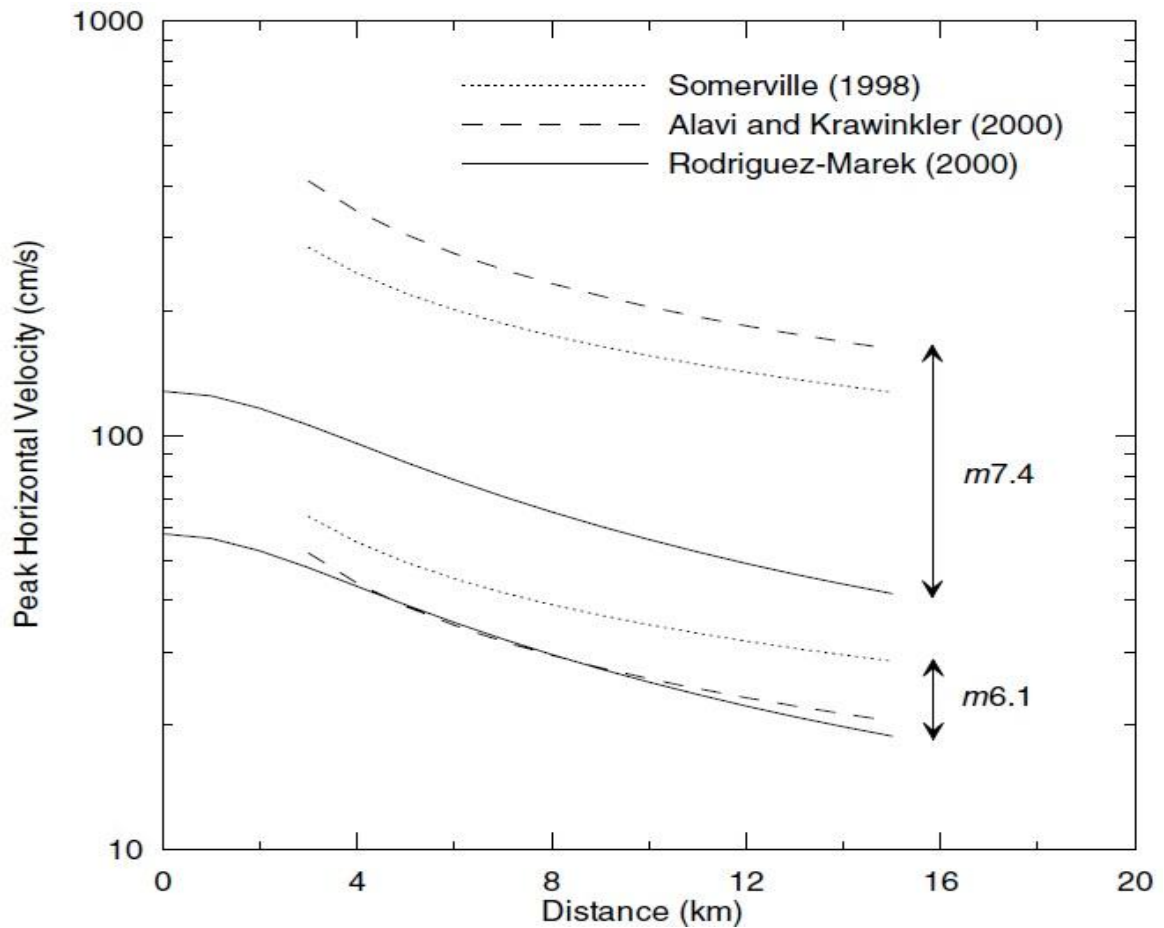
όπου η PHV εκφράζεται σε μονάδες cm/s, τα a , b , c , d είναι οι παράμετροι του μοντέλου, το r είναι η ελάχιστη απόσταση από το ρήγμα, το m είναι το μέγεθος του σεισμού, τα η_i και ϵ_{ij} είναι οι όροι σφάλματος, όπου το j εκφράζει την καταγραφή και το i το γεγονός.

Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου Rodriguez - Marek (2000) παρουσιάζονται στον πίνακα 1.3.

Data Set	a	b	c	d	σ	τ	σ_{total}	$Var(\sigma^2)$	$Var(\tau^2)$	$Cov(\sigma^2, \tau^2)$
All Motions	2.44	0.50	-0.41	3.93	0.47	0.41	0.62	0.0026	0.011	8.2e-4
Rock	1.46	0.61	-0.38	3.93	0.53	0.25	0.59	0.023	0.019	-0.0120
Soil	3.86	0.30	-0.42	3.93	0.43	0.41	0.59	0.014	0.0026	8.6e-4

Πίνακας 1.3: Παράμετροι για την παλινδρομική ανάλυση της PHV (Rodriguez - Marek 2000)

Το σχήμα 1.13 συγκρίνει τη σχέση για όλες τις περιοχές που προτάθηκε από τον Rodriguez - Marek (2000) με τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν πρώτα από τον Somerville (1998) και τους Alavi και Kranwinkler (2000). Οι σχέσεις διαφέρουν κυρίως στην επίδραση του μεγέθους m . Οι διαφορές οφείλονται πιθανώς στο μεγαλύτερο ποσό στοιχείων που περιλαμβάνεται στην πρόσφατη μελέτη. Ο Somerville (1998) και οι Alavi και Kranwinkler (2000) προτείνουν μια πιο δυνατή διακύμανση της PHV σε σχέση με το μέγεθος m . Η διακύμανση αυτή δε μπορεί να αποδοθεί στην προσθήκη των τεχνητών χρονοϊστοριών επειδή ο Somerville (1998) υποδεικνύει ότι η PHV των καταγεγραμμένων χρονοϊστοριών αυξάνεται πιο γρήγορα λόγω του μεγέθους m σε σχέση με τεχνητές χρονοϊστορίες. Οι διαφορές οφείλονται πιθανώς στη μεγαλύτερη ποσότητα στοιχείων που περιλαμβάνεται στην πρόσφατη μελέτη.



Rodriguez-Marek (2000):
 $\ln(\text{PHV}) = 2.44 + 0.5 m - 0.41 \ln(r^2 + 3.93^2)$

Somerville (1998):
 $\ln(\text{PHV}) = -2.31 + 1.15 m - 0.5 \ln(r)$

Alavi and Krawinkler (2000):
 $\ln(\text{PHV}) = -5.11 + 1.59 m - 0.58 \ln(r)$

Σχήμα 1.13: Σύγκριση αποτελεσμάτων παλινδρομικής ανάλυσης για εκτίμηση της PHV με σχέσεις προτεινόμενες από διάφορους ερευνητές για βάσεις δεδομένων σεισμών κοντινού πεδίου και με το φαινόμενο της εμπρόσθιας κατευθυντικότητας (Rodriguez - Marek 2000).

Περίοδος παλμού

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

$$\text{Log}_{10}T_v = -2.5 + 0.425m \quad (4)$$

όπου η T_v είναι η περίοδος του μεγαλύτερου κύκλου της κίνησης και το m είναι το μέγεθος του σεισμού. Σε μια μεγαλύτερη μελέτη των διανομών ολίσθησης που χρησιμοποιούν τα μοντέλα ολίσθησης για 15 σεισμούς ο Somerville et al. (1999) παρέχει αιτιολογίες για την χρήση σχέσεων με σκοπό να περιοριστούν οι παράμετροι του ρήγματος. Χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο, η διακύμανση του μεγέθους m είναι 0.5 και η προηγούμενη σχέση μετατρέπεται ως εξής:

$$\log_{10}T_v = -3.0 + 0.5m \quad (5)$$

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

$$T_v = 2.2T_R \quad (6)$$

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

Οι Alavi και Kranwinkler (2000) καθόρισαν την περίοδο του παλμού ως τη δεσπύζουσα περίοδο σε ένα φάσμα απόκρισης ταχύτητας (T_{v-p}). Η σχέση τους που χρησιμοποιεί αυτό τον ορισμό για την περίοδο του παλμού είναι:

$$\log_{10}T_{v-p} = -1.76 + 0.31m \quad (7)$$

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

$$\ln(T_v)_{ij} = a + b m + \eta_i + \epsilon_{ij} \quad (8)$$

όπου $(T_v)_{ij}$ είναι η περίοδος του παλμού της καταγραφής j από το γεγονός i , a και b είναι οι παράμετροι του μοντέλου, η_i και ϵ_{ij} είναι οι όροι σφάλματος. Εκτιμήσεις παρέχονται για την περίοδο του παλμού, T_v , και τη δεσπύζουσα περίοδο του φάσματος ταχύτητας T_{v-p} . Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου παρουσιάζονται στον πίνακα 1.5. Η σχέση ισχύει για $m=6.1-7.4$ και για $r < 20\text{km}$.

Η σχέση που πρόσφατα προτάθηκε από τον Rodriguez - Marek (2000) συγκρίνεται με τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν από τον Somerville (1998) και τους Alavi και Kranwinkler (2000) στο σχήμα 1.14. Οι σχέσεις του Rodriguez - Marek (2000) για τις T_v και T_{v-p} προβλέπουν συστηματικά μικρότερες περιόδους παλμού από τις σχέσεις που του Somerville(1998) για το T_v και των Alavi και Kranwinkler(2000) για το T_{v-p} .

Οι διαφορές στις προβλέψεις δεν είναι πιθανόν τεράστιες για τις περισσότερες υποθέσεις εξαιτίας των μεγάλων αβεβαιοτήτων που εμπλέκονται στον υπολογισμό της περιόδου του παλμού, ειδικά για μεγάλα μεγέθη σεισμού ($m > 7.0$), όπου οι γραμμές παλινδρόμησης είναι πολύ κοντά μεταξύ τους.

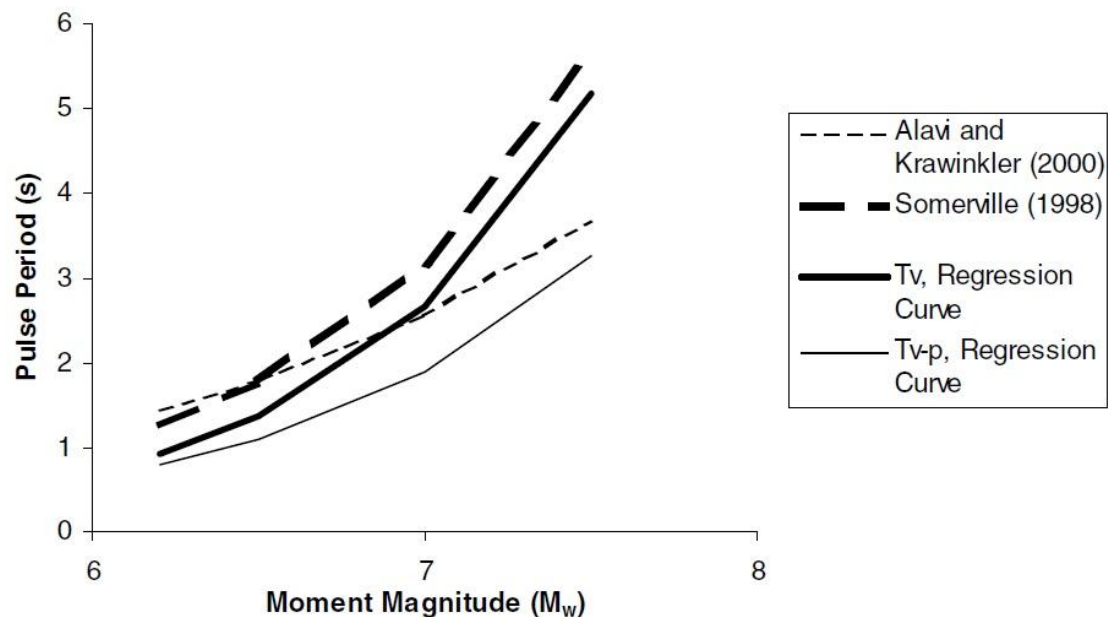
T_v

Data Set	a	b	σ	τ	σ_{total}	$Var(\sigma^2)$	$Var(\tau^2)$	$Cov(\sigma^2, \tau^2)$
All Motions	-8.33	1.33	0.36	0.40	0.54	0.0008	0.0078	-0.0003
Rock	-11.10	1.70	0.31	0.41	0.51	0.0029	0.0140	-0.0018
Soil	-5.81	0.97	0.32	0.40	0.51	0.0008	0.0100	-0.0003

T_{v-p}

Data Set	a	b	σ	τ	σ_{total}	$Var(\sigma^2)$	$Var(\tau^2)$	$Cov(\sigma^2, \tau^2)$
All Motions	-6.92	1.08	0.48	0.45	0.66	0.0028	0.0154	-0.0009
Rock	-9.53	1.42	0.37	0.61	0.71	0.0062	0.0555	-0.0041
Soil	-5.66	0.91	0.41	0.45	0.61	0.0022	0.0181	-0.0008

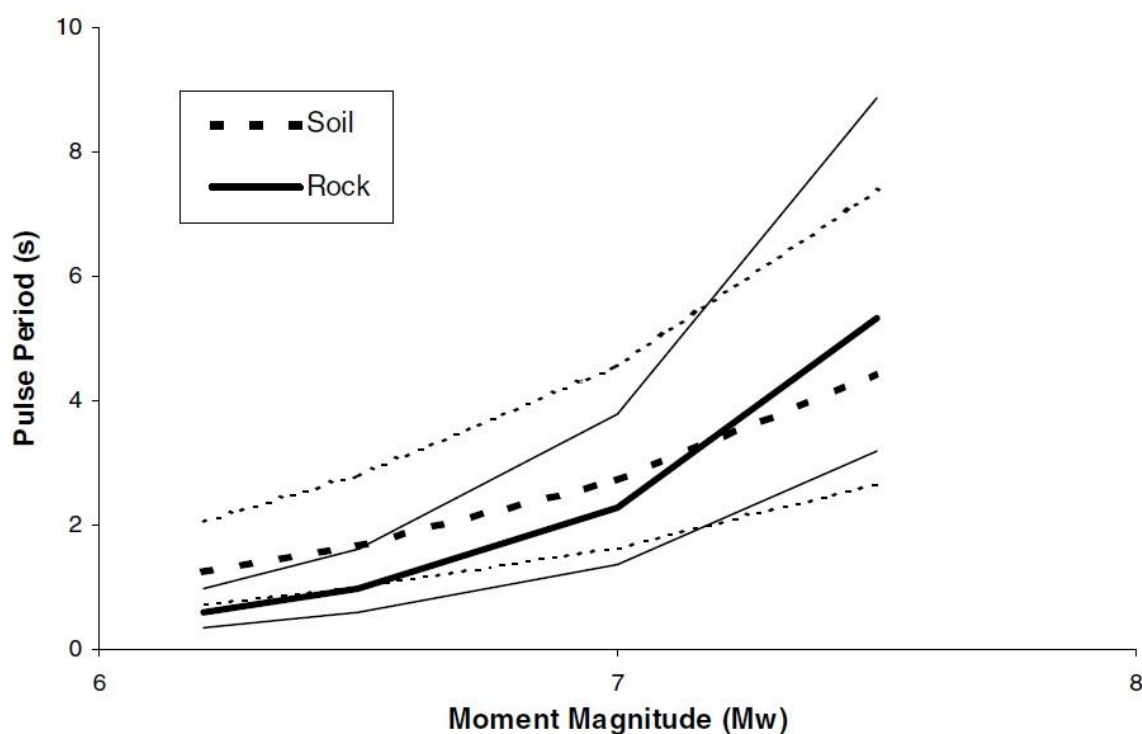
Πίνακας 1.4 : Παράμετροι του μοντέλου Rodriguez-Marek (2000) για την περίοδο του παλμού



Σχήμα 1.14: Σύγκριση μοντέλου Rodriguez-Marek (2000) με αυτές που προτάθηκαν από Somerville (1998) για την T_v και από τους Alavi και Kranwinkler (2000) για την T_{v-p} (Rodriguez Marek 2000)

Η επίδραση των εδαφικών συνθηκών μπορεί να ερευνηθεί μέσω της χρήσης των σχέσεων Rodriguez - Marek (2000) που υπολογίζουν την περίοδο του παλμού για το βράχο και το έδαφος (σχήμα 1.15). Η διαφορά μεταξύ των τιμών της περιόδου του παλμού για βράχο και για έδαφος είναι δυσδιάκριτη για μεγάλο μεγέθους γεγονότα ($m > 7$), όμως η περίοδος του παλμού είναι σημαντικά μεγαλύτερη επί εδαφών απ' ότι για βραχώδεις περιοχές για γεγονότα με μικρότερα μεγέθη σεισμού. Εξέταση των

ταξινομημένων σταθμών επί βράχου και εδάφους, καθώς και τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων απόκρισης επιβεβαιώνουν αυτή την παρατήρηση (Rodriguez-Marek 2000).



Σχήμα 1.15: Μοντέλα εκτίμησης της περιόδου του παλμού (T_v) για βράχο και έδαφος του Rodriguez-Marek (2000). Οι έντονες γραμμές αναπαριστούν τη μέση τιμή και οι λεπτές τις τυπικές αποκλίσεις (Rodriguez-Marek 2000).

Αριθμός σημαντικών παλμών

Ο αριθμός των ημικύκλων της κίνησης (καλούμενος ως αριθμός σημαντικών παλμών N_v) ορίζεται ως ο αριθμός των ημικύκλων του παλμού ταχύτητας που έχουν εύρη τουλάχιστον 50% της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας της εδαφικής κίνησης (πίνακας 1.2). Για τον υπολογισμό του πλήθους των σημαντικών παλμών ταχύτητας μόνο η κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της κίνησης λαμβάνεται υπόψη. Η επιλογή του 50% ως όριο είναι αυθαίρετη και ο αριθμός των σημαντικών παλμών είναι κάπως ευαίσθητος σε αυτή την τιμή. Ο αριθμός των σημαντικών παλμών στην κάθετη συνιστώσα 48 καταγραφών κοντινού πεδίου παρουσιάζεται στον πίνακα 1.5. Οι περισσότερες καταγραφές περιέχουν δυο σημαντικούς παλμούς (π.χ. ένας πλήρης κύκλος της εδαφικής κίνησης). Ο Somerville (1998) προτείνει ο αριθμός των μισών παλμών ημιτόνου στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μπορεί να συνδέεται με τον αριθμό των ετερογενών διαρρήξεων (asperities) σ' ένα ρήγμα, ο οποίος με τη σειρά του συνδέεται με τη διανομή της ολίσθησης του ρήγματος. Αυτό φυσικά είναι ένα δύσκολο φαινόμενο να εκτιμήσεις εκ των προτέρων. Δεν υπάρχουν μοντέλα διαθέσιμα αυτή τη στιγμή με σκοπό την πρόβλεψη του αριθμού των σημαντικών παλμών στη χρονοϊστορία της ταχύτητας. Για τις περισσότερες περιπτώσεις ο N_v θα ποικίλλει μεταξύ 1 και 3, με $N_v = 2$ να είναι μια καλή γενική τιμή για χρήση σε σεισμικές εκτιμήσεις.

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

Πίνακας 1.5: Αριθμός ημικύκλων παλμού (N_v) ανά γεγονός για 48 κινήσεις κοντινού πεδίου (κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα). Οι τιμές στις παρενθέσεις είναι οι αριθμοί των ημικύκλων του παλμού της ταχύτητας που έχουν εύρη τουλάχιστον 33% της PHV, όπως αντίστοιχα χρησιμοποιήθηκε το 50% για να καθοριστεί ο N_v (Rodriguez-Marek 2000)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕΣΩ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ – Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ BAKER

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια ποσοτική μέθοδος εντοπισμού των σημαντικών παλμών που εμπριέχονται στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας εδαφικής κίνησης λόγω φαινομένων κατευθυντικότητας εντός μιας ζώνης κοντινού πεδίου, καθώς και μια μέθοδος ταξινόμησης των καταγραφών σε παλμικές και μη, όπως εισήχθη από τον Baker (2007). Το πρόβλημα προσεγγίζεται μέσω κυματικής ανάλυσης για την εξαγωγή του μεγαλύτερου παλμού ταχύτητας από μια δεδομένη εδαφική κίνηση. Το μέγεθος του εξαγόμενου παλμού συγκρίνεται με το μέγεθος της αρχικής καταγραφής για την εδραίωση ενός ποσοτικού κριτηρίου κατάταξης μιας εδαφικής κίνησης ως παλμικής ή μη.

Για τον προσδιορισμό του υποσυνόλου αυτών των παλμικών καταγραφών που πιθανώς οφείλονται σε φαινόμενα κατευθυντικότητας, ορίζονται δύο κριτήρια i. ο παλμός φτάνει νωρίς στη χρονοϊστορία της εδαφικής κίνησης και ii. το απόλυτο μέγεθος του παλμού ταχύτητας είναι μεγάλο. Για τις εδαφικές κινήσεις που χαρακτηρίζονται ως παλμικές διεξάγονται κάποιες επιπρόσθετες βασικές μελέτες. Η περίοδος του παλμού ταχύτητας, μια παράμετρος μεγάλου ενδιαφέροντος για τους μηχανικούς, υπολογίζεται εύκολα ως μέρος της διαδικασίας.

Αυτή η προσπάθεια κατάταξης των καταγραφών είναι χρήσιμη για ένα μεγάλο εύρος σεισμολογικών θεμάτων και θεμάτων μηχανικής που επηρεάζονται από τα φαινόμενα κατευθυντικότητας, όπως είναι η Πιθανοτική Ανάλυση Εκτίμησης Σεισμικού Κινδύνου (Probabilistic Seismic Hazard Analysis ή PSHA), η δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης απομείωσης των εδαφικών κινήσεων, και οι μη γραμμικές αναλύσεις σε κατασκευές.

Η μέθοδος του Baker θεωρείται αξιόπιστη και ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις επεξεργασίας μιας μεγάλης βάσης δεδομένων σεισμικών καταγραφών, αφού αποτελεί μια κλειστή μαθηματική διαδικασία, καθαρά ποσοτική, σε αντίθεση με παρωχημένες τεχνικές που έχουν εφαρμοστεί, σύμφωνα με τις οποίες η ανίχνευση των παραμέτρων του σημαντικού παλμού γίνεται με οπτικά κριτήρια και το αποτέλεσμα έγκειται στην υποκειμενική αντίληψη του φαινομένου από τον εκάστοτε ερευνητή.

2.2 Αίτια δημιουργίας παλμών ταχύτητας

Στην έρευνα του Baker (2007), μια σεισμική κίνηση θεωρείται παλμική όταν περιέχει στη χρονοϊστορία της έναν, δύο ή και τρεις παλμούς οι οποίοι φτάνουν νωρίς στην χρονοϊστορία ταχύτητας και έχουν μεγάλο πλάτος. Η κύρια αιτία εμφάνισης τέτοιων παλμών είναι το φαινόμενο της κατευθυντικότητας στην περιοχή κοντινού πεδίου. Το φαινόμενο της Έμπροσθεν Κατευθυντικότητας (*Forward Directivity*) εμφανίζεται όταν η διάρρηξη κατευθύνεται προς τη θέση καταγραφής με μια ταχύτητα σχεδόν ίση με την ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων του εδάφους και η διεύθυνση ολίσθησης του ρήγματος είναι επίσης προς τη θέση αυτή. Το φαινόμενο περιγράφεται πιο αναλυτικά στο κεφάλαιο 1 της παρούσας εργασίας, όπως έχει διατυπωθεί από τους Somerville et al. (1997). Τόσο για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης (*strike slip*), όσο και για ρήγματα κεκλιμένης ολίσθησης (*dip slip*), η

έμπροσθεν κατευθυντικότητα συναντάται τυπικά στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της εδαφικής κίνησης (*strike normal component*). Για το λόγο αυτό δίνεται έμφαση στα αποτελέσματα που παρατηρούνται στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα στο κεφάλαιο αυτό. Η επιρροή της μόνιμης στατικής εδαφικής μετακίνησης λόγω της ολίσθησης του ρήγματος, γνωστή ως *fling step*, δεν λαμβάνεται υπόψη καθώς δε προσδιορίζεται από το παλμικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρακάτω διαδικασία.

Τα φαινόμενα κατευθυντικότητας είναι κύριας σημασίας για τους ερευνητές που μελετούν τις ιστορίες ταχύτητας και πολλές από τις παλμικές κινήσεις που προσδιορίζονται παρακάτω πιθανόν οφείλονται σε φαινόμενα κατευθυντικότητας (κρίνοντας την γεωμετρία του ρήγματος). Ωστόσο, πέραν των φαινομένων κατευθυντικότητας, άλλα φαινόμενα μπορούν επίσης να δώσουν παλμούς ταχύτητας που μοιάζουν με παλμούς κατευθυντικότητας. Εάν μια περιοχή είναι τοποθετημένη κοντά σε ασπερίτη, τότε μπορεί να δημιουργηθεί παλμός κατά τη δημιουργία των κυμάτων από εκείνη τη θέση. Ακόμα, όσον αφορά πολύπλοκους εδαφικούς σχηματισμούς, όπως είναι το άκρο μιας γεωλογικής λεκάνης, είναι πιθανή η παρέμβαση των σεισμικών κυμάτων στη δομή του εδάφους κατά τη διέλευσή τους από αυτό, και η δημιουργία παλμών ταχύτητας.

2.3 Επιλογή της διαδικασίας ταξινόμησης

Όταν επιλέγεται μια μέθοδος ταξινόμησης είναι απαραίτητο να οριστούν ορισμένα κριτήρια επιλογής. Συγκεκριμένα, η μέθοδος πρέπει να είναι ικανή να διαχωρίζει μία παλμική από μία μη παλμική καταγραφή. Όπως παρουσιάζεται παρακάτω, η μέθοδος εγγενώς δεν έχει δυαδικό χαρακτήρα, αντιθέτως ο διαχωρισμός γίνεται με μια κατάταξη των καταγραφών μέσω δεικτών που εκφράζουν το κατά πόσο είναι ή όχι παλμικές και τον ορισμό ενός ορίου με βάση το οποίο εξάγεται το συμπέρασμα δυαδικού τύπου. Η μέθοδος θα πρέπει να είναι ικανή να διαχωρίζει τις καταγραφές με την ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση και χωρίς την απαίτηση κριτικής σκέψης από τον αναλυτή, ώστε να μην υπάρχουν περιθώρια λάθους ή αμφισβήτησης.

Οι παραπάνω στόχοι επιτυγχάνονται καλύτερα με τη χρήση ενός σχετικά απλού μοντέλου. Πολλοί ερευνητές έχουν αναπτύξει αρκετά περίπλοκα μοντέλα (Fu and Menem 2004, Mavroudis and Papageorgiou 2003), αλλά μια απλούστερη παρουσίαση είναι ευκολότερα εφαρμόσιμη για αυτόματη κατηγοριοποίηση και ταξινόμηση των μεγάλων παλμών. Μια αναλογία με τον εδαφικό τύπο θα μπορούσε να είναι χρήσιμη: υπάρχουν να αρκετές διαφορετικές μορφές εδαφικών συνθηκών, αλλά καταλήξαμε στην κατηγοριοποίησή τους σε πέντε ομάδες. Μία απλούστερη παρουσίαση επίσης επιτρέπει μια πιο αξιόπιστη ταυτοποίηση των παλμών έναντι μιας μεθόδου που απαιτεί ένα μεγάλο αριθμό εισαγόμενων παραμέτρων. Με βάση τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι μια ανάλυση με τη χρήση κυματιδίων είναι κατάλληλη για την ταξινόμηση των εδαφικών κινήσεων. Απαιτεί ελάχιστο υπολογιστικό χρόνο, διατηρεί ένα χαρακτήρα ποσοτικό και συνεπώς είναι αξιόπιστη. Οι παλμοί ταχύτητας μπορούν εύκολα να εντοπιστούν και να αφαιρεθούν δίνοντας τη δυνατότητα για κατηγοριοποίηση και περαιτέρω παραμετρική ανάλυση.

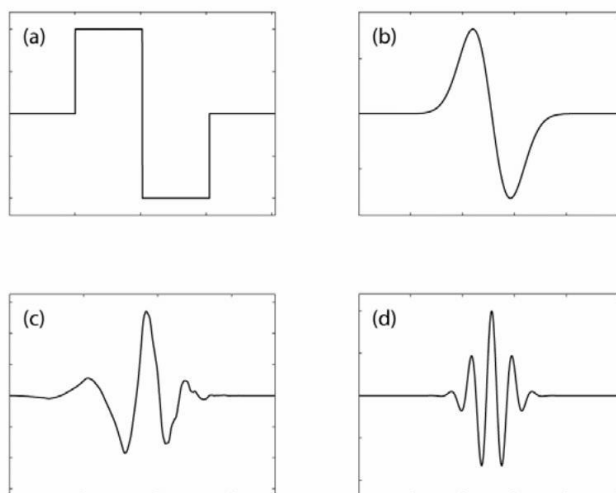
2.4 Ανάλυση με κυματίδια

Η ανάλυση με κυματίδια (*wavelet analysis*) έχει αναπτυχθεί αρκετά κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο αφού έχει αναγνωριστεί η χρηστικότητά της σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων. Υπάρχει μία ευρεία βιβλιογραφία που σχετίζεται με θεωρητικά στοιχεία της μεθόδου καθώς και αλγοριθμικές λεπτομέρειες. Μια βασική κατανόηση της μεθόδου μπορεί να επιτευχθεί

μέσω της σύγκρισής της με την ανάλυση *Fourier*. Η ανάλυση *Fourier* αναπαριστά ένα σήμα χρησιμοποιώντας γραμμικό συνδυασμό από ημιτονικά κύματα, από τα οποία το καθένα αντιπροσωπεύει ένα σήμα άπειρου μήκους και μιας μοναδικής συχνότητας.

Αντιθέτως, η ανάλυση με κυματίδια αποσυνθέτει ένα σήμα σε κυματίδια, τα οποία είναι διακριτά τοποθετημένα στο χρόνο και αντιστοιχούν σε ένα μικρό εύρος συχνοτήτων. Για τα μη στάσιμα κύματα, όπως είναι οι σεισμικές εδαφικές κινήσεις, είναι προτιμότερη η αναπαράσταση του σήματος ως ένα άθροισμα κυματιδίων παρά ως ένα άθροισμα στάσιμων ημιτονικών κυμάτων.

Τα κυματίδια είναι βασικές συναρτήσεις που ικανοποιούν συγκεκριμένα μαθηματικά κριτήρια. Αρκετά πρότυπα κυματίδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποσύνθεση ενός σήματος (σχήμα 2.1). Το πρότυπο κυματίδιο αναφέρεται ως μητρικό κυματίδιο (mother wavelet) και κλιμακώνεται και μεταφέρεται στο χρόνο με σκοπό τον σχηματισμό μιας σειράς βασικών συναρτήσεων. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός θεωρητικών προσεγγίσεων για την επιλογή ενός χρηστικού μητρικού κυματιδίου, όπως είναι η ορθογωνικότητα, η συμβατότητα, ο διαθέσιμος αριθμός παραγώγων, η συμμετρία κ.α. (Mallat 1999). Τα κυματίδια που χρησιμοποιούνται ευρέως δίνονται στο σχήμα 2.1 .



Σχήμα 2.1: Πρότυπα μητρικά κυματίδια (Baker 2007)

Η βασική συνάρτηση κυματιδίου στη χρονική στιγμή t ορίζεται μαθηματικά ως εξής:

$$\Phi_{s,l}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Phi\left(\frac{t-l}{s}\right) \quad (1)$$

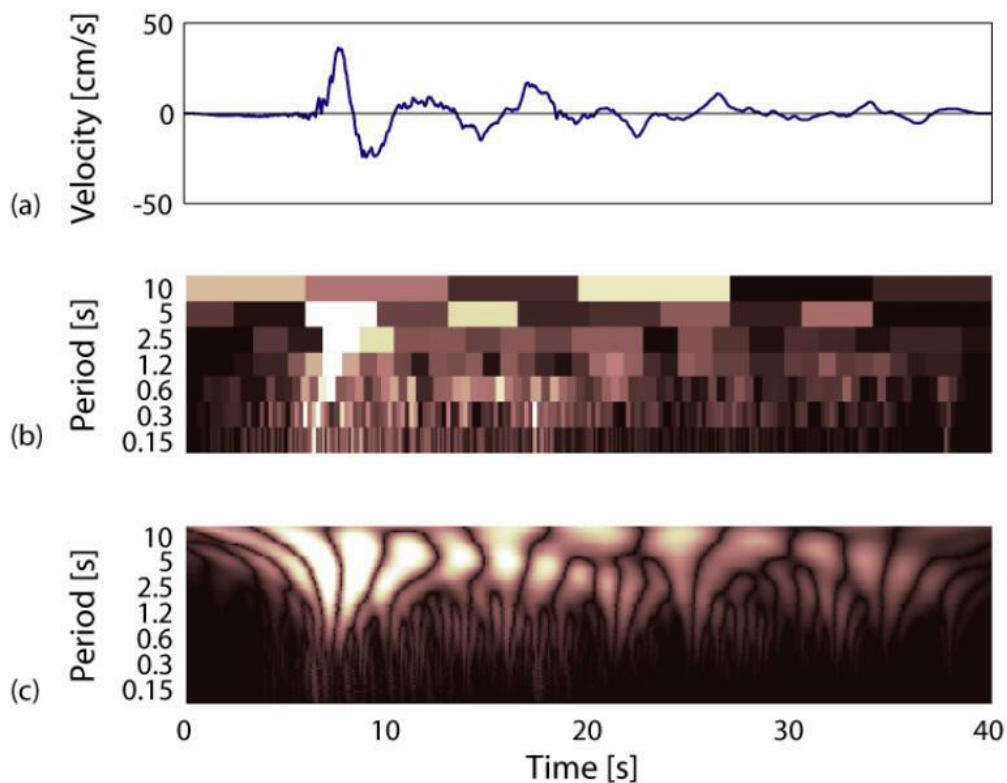
όπου $\Phi(\cdot)$ είναι η μητρική συνάρτηση κυματιδίου, s είναι η παράμετρος κλιμακοποίησης που διαστέλλει το κυματίδιο, και l είναι η χωρική παράμετρος που μεταφέρει το κυματίδιο στο χρόνο. Οποιοδήποτε σήμα $f(t)$ μπορεί να παρασταθεί ως ένας γραμμικός συνδυασμός βασικών συναρτήσεων και οι συντελεστές για το γραμμικό συνδυασμό μπορούν να υπολογιστούν από το

ακόλουθο ολοκλήρωμα συνέλιξης (*convolution integral*) το οποίο είναι πανομοιότυπο με το μετασχηματισμό *Fourier* :

$$C_{s,l} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Phi_{s,l}(t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\frac{1}{\sqrt{s}}\Phi\left(\frac{t-1}{s}\right)dt \quad (2)$$

Για την ψηφιακή ανάλυση σημάτων, όπως η χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας εδαφικής κίνησης, η εξίσωση (2) εκφυλίζεται περισσότερο ως άθροισμα παρά ως ολοκλήρωμα, με τις αρχές όμως με τις οποίες ορίστηκε να είναι οι ίδιες.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες μετασχηματισμού κυματιδίων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ενός σήματος ανάλογα με τον αριθμό των κλιμάκων και τον αριθμό των θέσεων για τους οποίους υπολογίζονται οι συντελεστές. Ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου (*continuous wavelet transform*) υπολογίζει τους συντελεστές κυματιδίου που σχετίζονται με κάθε ακέραια τιμή των παραμέτρων κλίμακας και θέσης. Έτσι παρέχονται λεπτομερείς πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά χρόνου-συχνότητας του σήματος. Όμως, ένα ψηφιακό σήμα μήκους n , μπορεί να περιγραφεί πλήρως χρησιμοποιώντας έναν μειωμένο αριθμό συντελεστών. Εάν τα κυματίδια είναι ορθογωνικά, τότε χρειάζονται μόνο n κυματίδια για την πλήρη περιγραφή οποιουδήποτε χρονικού σήματος μήκους n . Ο *διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίου* (*discrete wavelet transform*), παρέχει τους n συντελεστές που περιγράφουν το πλάτος των n κυματιδίων σε διάφορες κλίμακες και θέσεις. Εάν το n μπορεί να εκφραστεί ως δύναμη του 2, τότε υπάρχει ένας ισχυρά αποτελεσματικός αλγόριθμος για την εκτέλεση των υπολογισμών, ανάλογος του μετασχηματισμού *Fourier*. Στο σχήμα 2.2 απεικονίζονται συντελεστές από συνεχείς και διακριτούς μετασχηματισμούς κυματιδίων από ένα παράδειγμα μιας εδαφικής κίνησης, ώστε να γίνει αισθητή η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών προσεγγίσεων.



Σχήμα 2.2: Μετασχηματισμοί κυματιδίων (*Baker 2007*)

Ακόμη, στην περίπτωση που το μητρικό κυματίδιο αντιπροσωπεύει επαρκώς το επιθυμητό σχήμα των χαρακτηριστικών που εξετάζονται, τότε απαιτούνται ακόμα λιγότεροι από n συντελεστές για την επαρκή περιγραφή του σήματος. Κάποιοι από τους συντελεστές θα είναι μεγάλοι και τα κυματίδια που τους αντιστοιχούν θα αναπαριστούν τα σημαντικά χαρακτηριστικά του σήματος, ενώ άλλοι θα είναι κοντά στο μηδέν επειδή τα κυματίδια που τους αντιστοιχούν θα αναπαριστούν σχετικά μικρά χαρακτηριστικά του σήματος. Αυτό το φαινόμενο διαμορφώνει τη βάση πολλών εφαρμογών απομάκρυνσης θορύβου από σήματα και συμπίεσης δεδομένων. Η παραπάνω παρατήρηση είναι σημαντική για τον εξής λόγο: εάν ένα σημαντικό μέρος της ιστορίας της εδαφικής κίνησης περιγράφεται από ένα ή μερικά κυματίδια με μεγάλες τιμές συντελεστών, τότε υποδεικνύεται η ύπαρξη παλμού.

Τόσο ο συνεχής, όσο και ο διακριτός μετασχηματισμός έχουν σημεία χρήσιμα στην μέθοδο ταξινόμησης του Baker. Ενώ ο συνεχής μετασχηματισμός έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος και παράγει πολλούς περισσότερους συντελεστές από αυτούς που απαιτούνται για την περιγραφή του σήματος, η υψηλότερη ανάλυση είναι χρήσιμη για τον ακριβή προσδιορισμό των μεγάλων συντελεστών της κίνησης, οι οποίες θα υποδείξουν την περίοδο και τη θέση του παλμού ταχύτητας σε μια καταγραφή κοντινού πεδίου. Αντίθετα με τον διακριτό μετασχηματισμό, ο συνεχής δεν επηρεάζεται στην περίπτωση περισσότερων μηδενικών στην αρχή ή στο τέλος της ιστορίας, κάτι που είναι σημαντικό αφού δεν είναι επιθυμητή η επεξεργασία συντελεστών που εξαρτώνται από χαρακτηριστικά άσχετα με την εδαφική κίνηση, όπως είναι η χρονική στιγμή στην οποία το καταγραφικό όργανο ξεκίνησε ή σταμάτησε την καταγραφή. Τόσο ο διακριτός, όσο και ο συνεχής μετασχηματισμός, χρησιμοποιούνται στο κριτήριο ταξινόμησης που περιγράφεται παρακάτω.

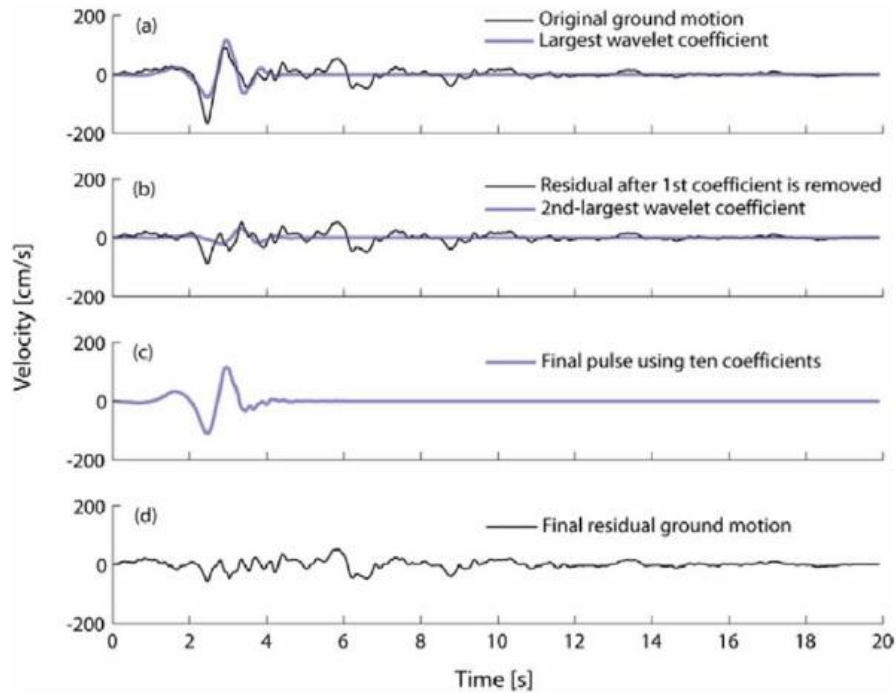
2.5 Ταξινόμηση των ιστοριών

Η διαδικασία που περιγράφεται στην παρούσα ενότητα χρησιμοποιεί την ανάλυση με *κυματίδια* προκειμένου να αναγνωρίσει τις σεισμικές εδαφικές κινήσεις που περιέχουν παλμό στη ιστορία ταχύτητας. Ο μεγαλύτερος παλμός αφαιρείται και προσδιορίζεται το κατά πόσον αποτελεί σημαντικό μέρος του σήματος. Δύο πρόσθετα κριτήρια είναι σημαντικά στην αναγνώριση αυτών των παλμών και στο αν αυτοί οφείλονται στο φαινόμενο της κατευθυντικότητας. Θέλουμε να φτάνουν στην αρχή της ιστορίας και η μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη.

2.5.1 Απομόνωση του παλμού ταχύτητας

Για κάθε εδαφική κίνηση που εξετάζεται, αφαιρείται ο μεγαλύτερος παλμός ταχύτητας χρησιμοποιώντας την αποσύνθεση του σήματος σε κυματίδια, όμως περιγράφηκε συνοπτικά παραπάνω. Για τη μορφή του μητρικού κυματιδίου ο Baker (2007) επιλέγει το κυματίδιο Daubechies 4 (προσδιορίζεται από τέσσερις παραμέτρους κλίμακας), το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα 2.3 καθώς το σχήμα του προσεγγίζει ικανοποιητικά πολλούς παλμούς ταχύτητας σε καταγραφές σεισμών κοντινού πεδίου και συσχετίζεται καλύτερα με αυτές σε σχέση με άλλα μητρικά κυματίδια.

Για την αξιολόγηση μιας εδαφικής κίνησης, αρχικά υπολογίζεται ο συνεχής κυματικός μετασχηματισμός από τη ιστορία της ταχύτητας και αναγνωρίζεται ο συντελεστής με τη μεγαλύτερη κατ' απόλυτο τιμή. Το κυματίδιο που σχετίζεται με το συντελεστή αυτό καθορίζει την περίοδο και τη θέση του παλμού, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.3: Περιγραφή της διαδικασίας αφαίρεσης παλμού (Baker 2007)

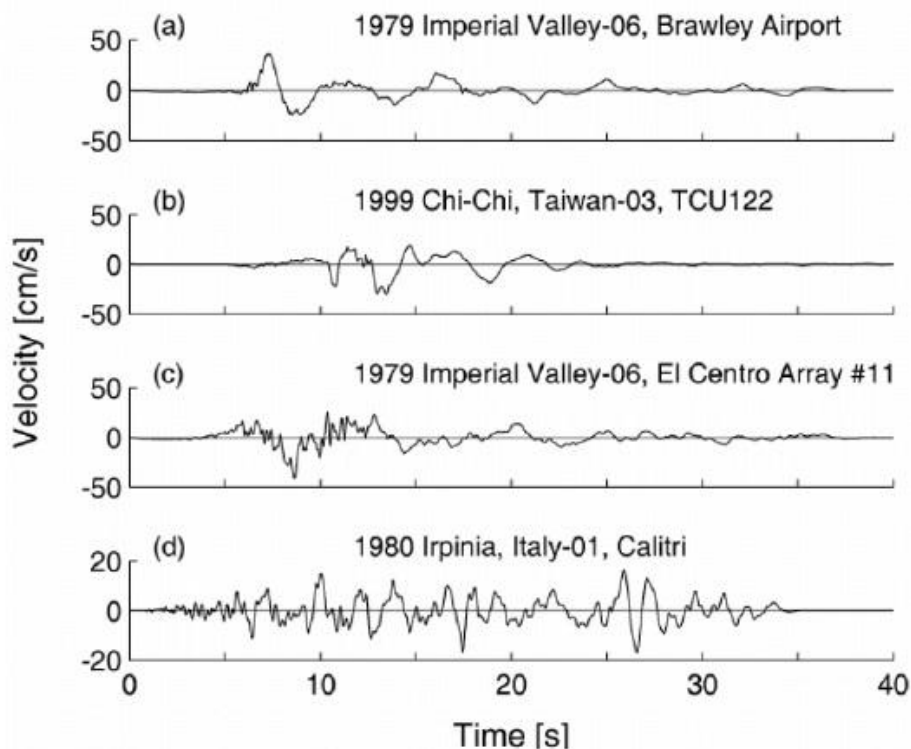
Σημειώνεται ότι ο συντελεστής ενός κυματιδίου είναι ανάλογος με την ενέργεια του κυματιδίου που του αντιστοιχεί, συνεπώς ο πρώτος παλμός που έχει το μεγαλύτερο συντελεστή, θα έχει εμπεριέχει και την περισσότερη ενέργεια. Στη συνέχεια το συγκεκριμένο κυματίδιο αφαιρείται από την εδαφική κίνηση και υπολογίζεται ο συνεχής μετασχηματισμός για την εναπομένουσα εδαφική κίνηση (*residual ground motion*). Επειδή η θέση και η περίοδος του σημαντικού παλμού έχουν ήδη εντοπιστεί, στο βήμα αυτό επιλέγονται μόνο τα κυματίδια που έχουν την ίδια περίοδο και έχουν θέση σχετικά κοντά (+/- μισό πλάτος του αρχικού κυματιδίου) με το κυματίδιο που έδωσε το μεγαλύτερο συντελεστή. Ο μεγαλύτερος από τους συντελεστές αυτούς αναγνωρίζεται, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.3b. Συχνά απαιτούνται μόνο ένας ή δύο συντελεστές για την περιγραφή του παλμού, όμως εξάγονται δέκα συντελεστές για τη συγκεκριμένη περίοδο και θέση για τη βέλτιστη αναλυτική αναπαράσταση του παλμού. Ένας απομονωμένος παλμός που έχει προκύψει με χρήση δέκα συντελεστών απεικονίζεται στο σχήμα 2.3c. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι βασικές συναρτήσεις των κυματιδίων που χρησιμοποιούνται για την απομόνωση του παλμού έχουν εξ' ορισμού μηδενική παραμένουσα μετακίνηση και συνεπώς οι επιπτώσεις της μόνιμης στατικής παραμόρφωσης (*fling step*) δε μπορούν να εκτιμηθούν με χρήση των κυματιδίων αυτών.

Κάνοντας χρήση της περιγραφόμενης διαδικασίας, ένας παλμός μπορεί να αφαιρεθεί από μια εδαφική κίνηση είτε αν σε αυτήν εμπεριέχεται ένας μεγάλος παλμός κατευθυντικότητας, είτε όχι. Ωστόσο, για μη παλμικές καταγραφές ο εξαγόμενος παλμός αποτελεί τυπικά ένα ασήμαντο χαρακτηριστικό της εδαφικής κίνησης και η εναπομένουσα εδαφική κίνηση είναι σχεδόν πανομοιότυπη με την αρχική. Συνεπώς για την ταξινόμηση των καταγραφών είναι απαραίτητος ο υπολογισμός ιδιοτήτων των εξαγόμενων παλμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια αυτοματοποιημένη ταξινόμηση, χωρίς καμία εξωτερική επιρροή.

2.5.2 Προσδιορισμός της σημαντικότητας του αφαιρούμενου παλμού

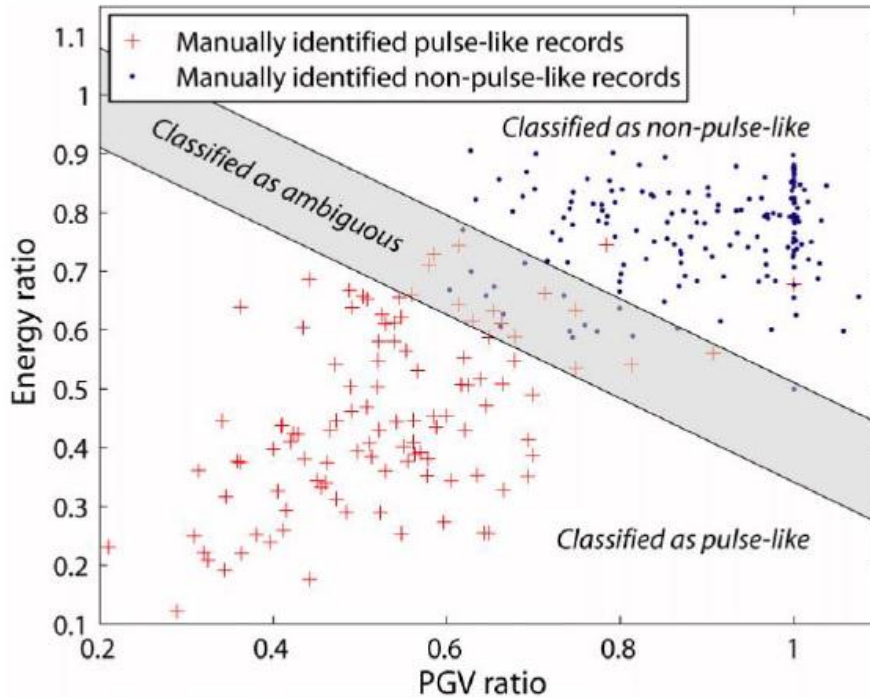
Οι αρχικές εδαφικές κινήσεις και οι εναπομένουσες μετά την εξαγωγή του παλμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του αν μια δοθείσα εδαφική κίνηση είναι παλμική ή μη. Για την πραγματοποίηση της ταξινόμησης αυτής ο *Baker (2007)* υπολόγισε ένα πλήθος μεταβλητών και αξιολόγησε ποιοι είναι ικανοί να συνεισφέρουν στην ταξινόμηση, εκτιμούν δηλαδή ικανοποιητικά κάποια από τα χαρακτηριστικά της παλμικής κίνησης και μπορούν να αποτελέσουν δείκτες της σημαντικότητας του παλμού. Η προσέγγιση του προβλήματος πραγματοποιείται από τον *Baker* με την ταξινόμηση μιας μεγάλης ομάδας καταγραφών και στη συνέχεια την κατασκευή ενός στατιστικού μοντέλου πρόβλεψης που είναι ικανό να αναπαράγει αποτελέσματα που δίνουν κοντινές τιμές με τις αρχικές καταγραφές. Για τη μόρφωση μιας ομάδας ταξινομημένων καταγραφών επιλέγονται όλες οι συνιστώσες των καταγραφών, στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση, από τη βάση δεδομένων *Next Generation Attenuation (NGA)* για σεισμούς μεγέθους μεγαλύτερου από 5,5 και που είναι καταγεγραμμένες εντός 30 km από κάθε σεισμικό γεγονός.

Οι 398 επιλεγείσες καταγραφές ταξινομούνται βάσει οπτικών ελέγχων και εντοπίζονται οι παλμοί στις χρονοϊστορίες ταχύτητας. Καταγραφές με εμφανή παλμικά ή μη παλμικά χαρακτηριστικά, όπως αυτές στα σχήματα 2.4a και 2.4d κατατάσσονται κατάλληλα. Καταγραφές χωρίς διακριτά χαρακτηριστικά, όπως αυτές στα σχήματα 2.4b και 2.4c ταξινομούνται ως ασαφείς και διαχειρίζονται χωριστά, μετά την εκ των υστέρων εκτίμηση της αποδοτικότητας των κριτηρίων που τίθενται στην κυματική ανάλυση. Οι ταξινομήσεις γίνονται αρχικά με οπτικούς μόνο ελέγχους των χρονοϊστοριών ταχύτητας, χωρίς χρήση σεισμολογικών πληροφοριών και χωρίς αποκλεισμό των παλμών που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία της εδαφικής κίνησης ή παλμικών μορφών μικρού πλάτους. Αυτός ο “χειροκίνητος” έλεγχος του *Baker* έδωσε 124 πιθανώς παλμικές, 190 μη παλμικές και 84 ασαφείς εδαφικές κινήσεις. Μετά τη χειροκίνητη αυτή ταξινόμηση των εδαφικών κινήσεων, χρησιμοποιήθηκαν στατιστικά εργαλεία πρόβλεψης για την αναπαραγωγή της ταξινόμησης βάσει αυτοματοποιημένων προβλέψεων, με χρήση κυματικής ανάλυσης.



Σχήμα 2.4: Παραδείγματα καθέτων στο ρήγμα συνιστωσών σε σεισμούς κοντινού πεδίου (Baker 2007)

Ο Baker χρησιμοποιεί μια ποικιλία μεταβλητών πρόβλεψης, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους των συντελεστών που προκύπτουν από την αποσύνθεση του σήματος σε κυματίδια, τις φασματικές τιμές απόκρισης, τις μέγιστες εδαφικές ταχύτητες και ενεργειακές τιμές. Μετά από την εξέταση των μεταβλητών πρόβλεψης σε σειρές της μιας, των δύο και των τριών, ελέγχεται κατά πόσο αυτές μπορούν να παράξουν τα ίδια αποτελέσματα με τη χειροκίνητη ταξινόμηση. Δύο μεταβλητές που είναι αφενός εύκολες στον υπολογισμό και αφετέρου δείχνουν την ικανότητα πρόβλεψης που αναζητείται, είναι η μέγιστη εδαφική ταχύτητα (Peak Ground Velocity ή PGV) της εναπομένουσας καταγραφής προς τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα της αρχικής καταγραφής και η ενέργεια της εναπομένουσας καταγραφής προς την ενέργεια της αρχικής καταγραφής. Αυτές οι μεταβλητές αναφέρονται στις μελέτες του Baker ως: «Λόγος PGV» (PGV ratio) και «Λόγος ενεργειών» (Energy ratio), αντίστοιχα. Στο σχήμα 2.5 εμφανίζεται ένα διάγραμμα μεταξύ των λόγων αυτών για τις καταγραφές που έχουν ταξινομηθεί χειροκίνητα, στο οποίο φαίνεται ότι η χρήση των συγκεκριμένων δεικτών είναι ικανοί για την αναπαραγωγή της χειροκίνητης ταξινόμησης.



Σχήμα 2.5: Περιγραφή της διαδικασίας αφαίρεσης παλμού (Baker 2007)

Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των δύο αυτών δεικτών πρόβλεψης, επιτρέπει τη δημιουργία ενός δείκτη πρόβλεψης της ύπαρξης ή όχι παλμού σε μια εδαφική κίνηση. Ο δείκτης αυτός που καλείται από τον Baker ως *Pulse Indicator* (*Παλμικός δείκτης*), βασίζεται στο μέρος των καταγραφών που έχουν όμοια χαρακτηριστικά και έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές από τη χειροκίνητη ταξινόμηση και προκύπτει ως εξής:

$$Pulse\ Indicator = \frac{1}{1 + e^{-23.3 + 14.6(PGV\ ratio) + 20.5(Energy\ ratio)}} \quad (3)$$

Ο *Παλμικός δείκτης* παίρνει τιμές εντός του εύρους 0 και 1, με τις υψηλές τιμές να παρέχουν μια ισχυρή ένδειξη ότι μια εδαφική κίνηση είναι παλμική. Τα αποτελέσματα των προβλέψεων του *Παλμικού δείκτη* διαμορφώνουν ένα συνεχές φάσμα τιμών μεταξύ των ακραίων μηδέν και ένα. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων δυαδικού τύπου, δηλαδή «*Παλμική*» ή «*Μη παλμική*» καταγραφή, εδραιώνονται δύο εσωτερικά όρια κατάταξης. Συνεπώς, για καταγραφές όπου ο *Παλμικός δείκτης* παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 0,85 ή μικρότερες από 0,15, αυτές κατατάσσονται ως *Παλμικές* και *Μη παλμικές*, αντίστοιχα. Οι εδαφικές κινήσεις που δίνουν ενδιάμεσες τιμές του *Pulse Indicator* χαρακτηρίζονται ως *Ασαφείς (Ambiguous)* όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5.

2.5.3 Αποκλεισμός των παλμών που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία ταχύτητας

Ενώ οι εδαφικές κινήσεις που ταξινομούνται ως παλμικές με βάση τη διαδικασία που περιγράφηκε στις παραπάνω ενότητες εμπεριέχουν σημαντικά παλμικά χαρακτηριστικά, αυτά μπορεί να οφείλονται σε μια ποικιλία φαινομένων πέρα από τα φαινόμενα

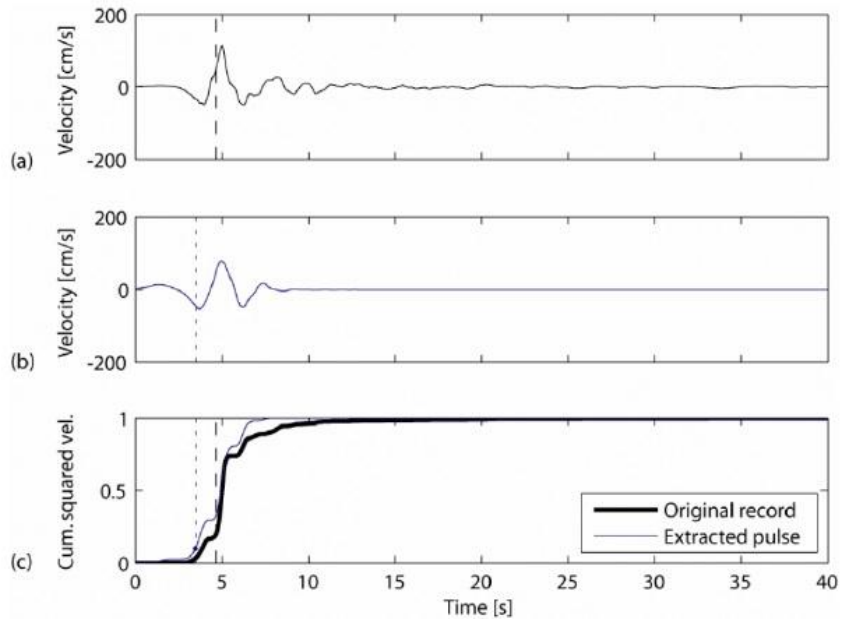
κατευθυντικότητας. Εάν η επεξεργασία ενός εύρους εδαφικών κινήσεων πραγματοποιείται για την εύρεση των παλμών που οφείλονται σε φαινόμενα κατευθυντικότητας, θα πρέπει να εδραιωθεί ένα κριτήριο για τον εντοπισμό εκείνων των παλμών που φτάνουν νωρίς στη χρονοϊστορία της ταχύτητας, όπως προβλέπεται από θεωρητικές σεισμολογικές μελέτες ότι συμβαίνει στους παλμούς που οφείλονται στην κατευθυντικότητα.

Οι παλμοί που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μπορούν να εντοπιστούν υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας (Cumulative Squared Velocity ή CSV) της αρχικής καταγραφής και του εξαγόμενου παλμού. Σε μια τυχαία χρονική στιγμή t το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας υπολογίζεται ως:

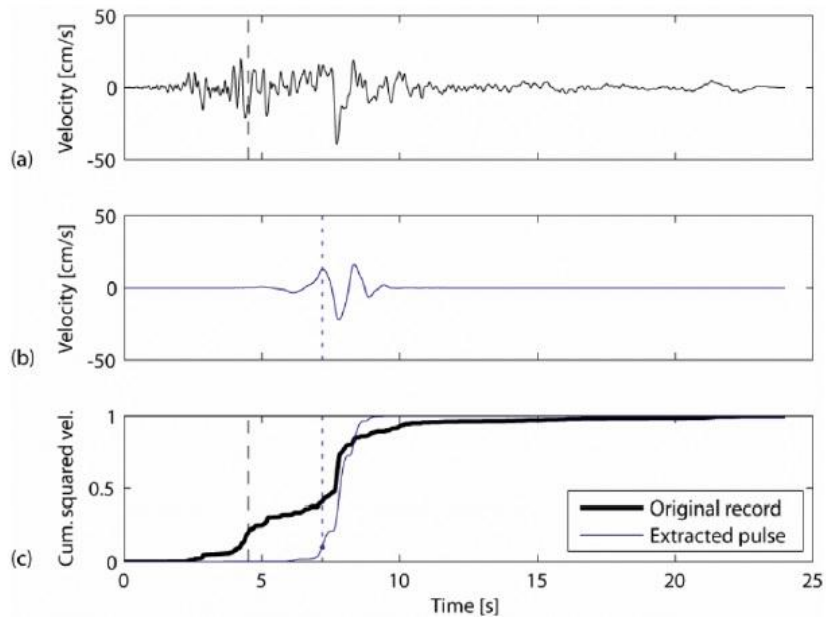
$$CSV(t) = \int_0^t V^2(u) du \quad (4)$$

όπου $V(u)$ είναι η ταχύτητα της εδαφικής κίνησης τη χρονική στιγμή u . Υπολογίζοντας το παραπάνω ολοκλήρωμα για την αρχική καταγραφή και για τον εξαγόμενο παλμό, καθορίζονται οι χρονικές στιγμές για τις οποίες καθένα φτάνει το $x\%$ του συνολικού του CSV. Οι χρονικές αυτές στιγμές συμβολίζονται ως $t_{x\%,orig}$ και $t_{x\%,pulse}$ για την αρχική εδαφική κίνηση και για τον παλμό αντίστοιχα.

Μετά την εξέταση των *αρχικών* και των *εναπομενουσών εδαφικών κινήσεων (original & residual ground motion)* για κάθε καταγραφή, εκτελείται μια βαθμονόμηση της διαδικασίας που δείχνει ότι οι παλμοί που φτάνουν νωρίς στη χρονοϊστορία της ταχύτητας έχουν τιμές $t_{20\%,orig}$ μεγαλύτερες από το χρόνο $t_{10\%,pulse}$. Δηλαδή για να θεωρείται ότι ο παλμός βρίσκεται στην αρχή της εδαφικής κίνησης, θα πρέπει να φτάνει το 10% του συνολικού του CSV, πριν η εδαφική κίνηση φτάνει το 20% του συνολικού της CSV. Το κριτήριο αυτό διασφαλίζει ότι ένα σημαντικό ποσοστό της ενέργειας του παλμού έχει εκδηλωθεί πριν ακόμα αναπτυχθεί σημαντικό μέρος της ενέργειας της αρχικής χρονοϊστορίας. Στα σχήματα 2.6 και 2.7 απεικονίζονται παραδείγματα παλμών που φτάνουν νωρίς και αργά στη χρονοϊστορία της εδαφικής κίνησης.



Σχήμα 2.6: Παλμός στην αρχή της χρονοϊστορίας: (a), (b) χρονοϊστορία ταχύτητας και παλμού, (c) CSV (Baker 2007).

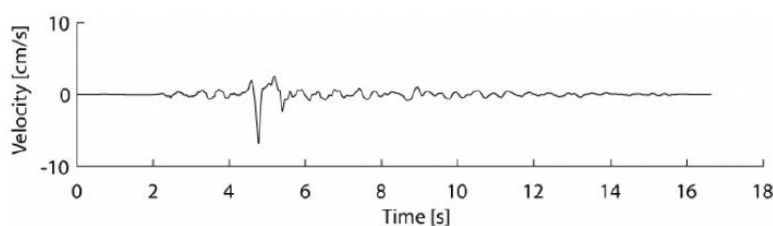


Σχήμα 2.7: Παλμός στο τέλος της χρονοϊστορίας. (a), (b) χρονοϊστορία ταχύτητας και παλμού, (c) CSV (Baker 2007).

Ενώ στις μελέτες του Baker οι παλμοί που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία της κίνησης αποκλείονται ως παλμοί κατευθυντικότητας, το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

2.5.4 Αποκλεισμός των εδαφικών κινήσεων με $PGV < 30 \text{ cm/s}$

Η τελευταία κατάσταση που τίθεται υπό εξέταση στις μελέτες του *Baker* αφορά σεισμικές εδαφικές κινήσεις μικρής έντασης στις οποίες εμφανίζονται παλμικές μορφές στη χρονοϊστορία της ταχύτητάς τους. Αυτό παρατηρείται για παράδειγμα σε σεισμικές κινήσεις σύντομης διάρκειας και μικρού μεγέθους που εμφανίζουν ανακλάσεις κατά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων. Αντιπροσωπευτικά, απεικονίζεται στο σχήμα 2.8 μια εδαφική κίνηση μεγέθους 5.1, για την οποία υποδεικνύεται ότι η εμφάνιση του παλμού ταχύτητας μπορεί να είναι απότοκο της σύντομης διάρκειας της εδαφικής κίνησης και δεν οφείλεται στο φαινόμενο της κατευθυντικότητας.



Σχήμα 2.8: Εδαφική κίνηση με μικρή PGV που εμφανίζεται ως παλμική και αποκλείεται (*Baker 2007*)

Για τον αποκλεισμό των καταγραφών αυτών, αποκλείονται οι σεισμικές εδαφικές κινήσεις με μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV) μικρότερη των 30 cm/s . Το κριτήριο αυτό αποκλείει αυτόματα και τις καταγραφές μακρινού πεδίου.

Τα τρία κριτήρια που περιγράφηκαν στην ενότητα αυτή μπορούν να συνδυαστούν με διάφορους τρόπους για τη δημιουργία ενός υποσυνόλου παλμικών εδαφικών κινήσεων. Για τη δημιουργία ενός τέτοιου υποσυνόλου, ο *Baker* εξέτασε όλες τις καταγραφές της βάσης δεδομένων *NGA* στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση και κατέληξε σε 91 παλμικές κινήσεις (πίνακας 1) που πληρούν και τα τρία κριτήρια που αναφέρθηκαν, δηλαδή:

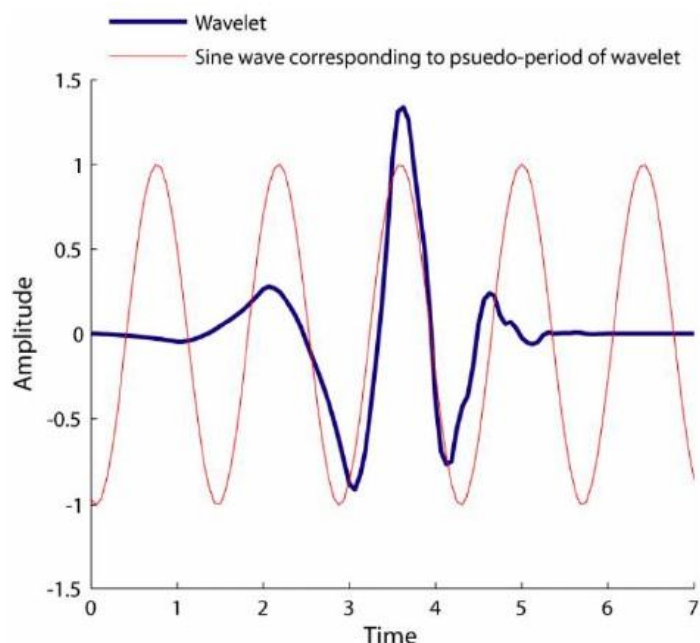
1. Ο *Παλμικός Δείκτης (Pulse Indicator)* λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από 0,85.
2. Ο παλμός φτάνει νωρίς στη χρονοϊστορία της κίνησης ($t_{20\%,orig} > t_{10\%,pulse}$).
3. Η αρχική εδαφική κίνηση έχει $PGV > 30 \text{ cm/s}$.

2.6 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού

Η περίοδος ενός παλμού ταχύτητας είναι μια κρίσιμη και σημαντική παράμετρος για το δομοστατικό μηχανικό, αφού ο λόγος της περιόδου του παλμού προς τη θεμελιώδη περίοδο μιας κατασκευής μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόκριση της κατασκευής (*Alavi and Krawinkler 2001, Anderson and Bertero 1987, Mavroudis et al. 2004*). Εξετάζοντας τη δεσπόζουσα συχνότητα του κυματιδίου που χρησιμοποιείται για την περιγραφή του παλμού ταχύτητας μιας εδαφικής κίνησης, ο *Baker* στα πλαίσια των μελετών του προσδιορίζει την περίοδο του παλμού.

Η έννοια της περιόδου ενός κυματιδίου δεν είναι ξεκάθαρα ορισμένη, όπως συμβαίνει στα ημιτονικά κύματα που προκύπτουν από ανάλυση *Fourier*. Παρ' όλα αυτά η περίοδος που σχετίζεται με το μέγιστο πλάτος *Fourier* ενός κυματιδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό μιας ψευδο-περιόδου. Στο σχήμα 2.9 δείχνεται το παράδειγμα ενός κυματιδίου συγκριτικά με ένα ημιτονικό σήμα που έχει περίοδο ίση με εκείνη στην οποία παρατηρείται το μεγαλύτερο πλάτος *Fourier* του κυματιδίου. Η ψευδο-περίοδος της μεγαλύτερης

συνιστώσας του κυματιδίου χρησιμοποιείται ως η περίοδος παλμού της εδαφικής κίνησης. Οι περίοδοι των παλμών ταχύτητας για τις καταγραφές που χαρακτηρίζονται παλμικές από τον Baker δίνονται στον πίνακα 1.



Σχήμα 2.9: Κυματίδιο Daubechies και ημιτονικό κύμα με περίοδο ίση με τη μέγιστη της κυματομορφής από το φάσμα Fourier (Baker 2007).

Πίνακας 1: Παλμικές καταγραφές της βάσης δεδομένων NGA (Baker 2007).

1	San Fernando	1971	Pacoima Dam (upper left abut)	1.6	116.5	6.6	1.8	11.9
2	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #6	1.2	51.5	5.7	3.1	4.4
3	Imperial Valley-06	1979	Aeropuerto Mexicali	2.4	44.3	6.5	0.3	2.5
4	Imperial Valley-06	1979	Agrarias	2.3	54.4	6.5	0.7	2.6
5	Imperial Valley-06	1979	Brawley Airport	4.0	36.1	6.5	10.4	43.2
6	Imperial Valley-06	1979	EC County Center FF	4.5	54.5	6.5	7.3	29.1
7	Imperial Valley-06	1979	EC Meloland Overpass FF	3.3	115.0	6.5	0.1	19.4
8	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #10	4.5	46.9	6.5	6.2	26.3
9	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #11	7.4	41.1	6.5	12.5	29.4
10	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #3	5.2	41.1	6.5	12.9	28.7
11	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #4	4.6	77.9	6.5	7.1	27.1
12	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #5	4.0	91.5	6.5	4.0	27.8
13	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #6	3.8	111.9	6.5	1.4	27.5
14	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #7	4.2	108.8	6.5	0.6	27.6
15	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #8	5.4	48.6	6.5	3.9	28.1
16	Imperial Valley-06	1979	El Centro Differential Array	5.9	59.6	6.5	5.1	27.2
17	Imperial Valley-06	1979	Holtville Post Office	4.8	55.1	6.5	7.7	19.8
18	Mammoth Lakes-06	1980	Long Valley Dam (Upr L Abut)	1.1	33.1	5.9		14.0
19	Irpinia, Italy-01	1980	Sturno	3.1	41.5	6.9	10.8	30.4
20	Westmorland	1981	Parachute Test Site	3.6	35.8	5.9	16.7	20.5
21	Coalinga-05	1983	Oil City	0.7	41.2	5.8		4.6
22	Coalinga-05	1983	Transmitter Hill	0.9	46.1	5.8		6.0
23	Coalinga-07	1983	Coalinga-14th & Elm (Old CHP)	0.4	36.1	5.2		9.6
24	Morgan Hill	1984	Coyote Lake Dam (SW Abut)	1.0	62.3	6.2	0.5	24.6
25	Morgan Hill	1984	Gilroy Array #6	1.2	35.4	6.2	9.9	36.3

26	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 C00	1.6	31.2	6.3		68.2
27	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 M07	1.6	36.1	6.3		67.2
28	N. Palm Springs	1986	North Palm Springs	1.4	73.6	6.1	4.0	10.6
29	San Salvador	1986	Geotech Investig Center	0.9	62.3	5.8	6.3	7.9
30	Whittier Narrows-01	1987	Downey - Co Maint Bldg	0.8	30.4	6.0	20.8	16.0
31	Whittier Narrows-01	1987	LB - Orange Ave	1.0	32.9	6.0	24.5	20.7
32	Superstition Hills-02	1987	Parachute Test Site	2.3	106.8	6.5	1.0	16.0
33	Loma Prieta	1989	Alameda Naval Air Stn Hanger	2.0	32.2	6.9	71.0	90.8
34	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #2	1.7	45.7	6.9	11.1	29.8
35	Loma Prieta	1989	Oakland - Outer Harbor Wharf	1.8	49.2	6.9	74.3	94.0
36	Loma Prieta	1989	Saratoga - Aloha Ave	4.5	55.6	6.9	8.5	27.2
37	Erzican, Turkey	1992	Erzincan	2.7	95.4	6.7	4.4	9.0
38	Cape Mendocino	1992	Petrolia	3.0	82.1	7.0	8.2	4.5
39	Landers	1992	Barstow	8.9	30.4	7.3	34.9	94.8
40	Landers	1992	Lucerne	5.1	140.3	7.3	2.2	44.0
41	Landers	1992	Yermo Fire Station	7.5	53.2	7.3	23.6	86.0
42	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant	3.5	67.4	6.7	5.4	13.0
43	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant Generator	3.5	67.4	6.7	5.4	13.0
44	Northridge-01	1994	LA - Wadsworth VA Hospital North	2.4	32.4	6.7	23.6	19.6
45	Northridge-01	1994	LA Dam	1.7	77.1	6.7	5.9	11.8
46	Northridge-01	1994	Newhall - W Pico Canyon Rd.	2.4	87.8	6.7	5.5	21.6
47	Northridge-01	1994	Pacoima Dam (downstr)	0.5	50.4	6.7	7.0	20.4
48	Northridge-01	1994	Pacoima Dam (upper left)	0.9	107.1	6.7	7.0	20.4
49	Northridge-01	1994	Rinaldi Receiving Sta	1.2	167.2	6.7	6.5	10.9
50	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta	3.5	130.3	6.7	5.4	13.1
51	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta East	3.5	116.6	6.7	5.2	13.6
52	Northridge-01	1994	Sylmar - Olive View Med FF	3.1	122.7	6.7	5.3	16.8
53	Kobe, Japan	1995	Takarazuka	1.4	72.6	6.9	0.3	38.6
54	Kobe, Japan	1995	Takatori	1.6	169.6	6.9	1.5	13.1
55	Kocaeli, Turkey	1999	Gebze	5.9	52.0	7.5	10.9	47.0
56	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY006	2.6	64.7	7.6	9.8	40.5
57	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY035	1.4	42.0	7.6	12.7	43.9
58	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY101	4.8	85.4	7.6	10.0	32.0
59	Chi-Chi, Taiwan	1999	TAP003	3.4	33.0	7.6	102.4	151.7
60	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU029	6.4	62.3	7.6	28.1	79.2
61	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU031	6.2	59.9	7.6	30.2	80.1
62	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU034	8.6	42.8	7.6	35.7	87.9
63	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU036	5.4	62.4	7.6	19.8	67.8
64	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU038	7.0	50.9	7.6	25.4	73.1
65	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU040	6.3	53.0	7.6	22.1	69.0
66	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU042	9.1	47.3	7.6	26.3	78.4
67	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU046	8.6	44.0	7.6	16.7	68.9
68	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU049	11.8	44.8	7.6	3.8	38.9
69	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU053	12.9	41.9	7.6	6.0	41.2
70	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU054	10.5	60.9	7.6	5.3	37.6
71	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU056	12.9	43.5	7.6	10.5	39.7
72	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU060	12.0	33.7	7.6	8.5	45.4
73	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU065	5.7	127.7	7.6	0.6	26.7
74	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU068	12.2	191.1	7.6	0.3	47.9
75	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU075	5.1	88.4	7.6	0.9	20.7
76	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU076	4.0	63.7	7.6	2.8	16.0
77	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU082	9.2	56.1	7.6	5.2	36.2
78	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU087	9.0	53.7	7.6	7.0	55.6
79	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU098	7.5	32.7	7.6	47.7	99.7

80	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU101	10.0	68.4	7.6	2.1	45.1
81	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU102	9.7	106.6	7.6	1.5	45.6
82	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU103	8.3	62.2	7.6	6.1	52.4
83	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU104	12.0	31.4	7.6	12.9	49.3
84	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU128	9.0	78.7	7.6	13.2	63.3
85	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU136	10.3	51.8	7.6	8.3	48.8
86	Northwest China-03	1997	Jiashi	1.3	37.0	6.1		19.1
87	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY024	3.2	33.1	6.2	19.7	25.5
88	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY080	1.4	69.9	6.2	22.4	29.5
89	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	TCU076	0.9	59.4	6.2	14.7	20.8
90	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY101	2.8	36.3	6.3	36.0	50.0
91	Yountville	2000	Napa Fire Station #3	0.7	43.0	5.0		9.9

a: Μέγεθος της ροπής.

b: Κοντινότερη απόσταση του καταγραφικού σταθμού από την επιφάνεια διάρρηξης.

c: Απόσταση του καταγραφικού σταθμού από το επίκεντρο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Ανά τα χρόνια, αρκετοί ερευνητές ανέπτυξαν μοντέλα προσομοίωσης της εδαφικής κίνησης για σεισμούς κοντινού πεδίου. Κάποια από αυτά αναφέρθηκαν και παρουσιάστηκαν στα πρώτα δύο κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το μοντέλο πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης που δημιούργησαν οι Shahi – Baker (2011), βασικό στοιχείο του οποίου είναι ότι λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της κατευθυντικότητας.

Οι Shahi και Baker (2011) προτείνουν μια μέθοδο ενσωμάτωσης των φαινομένων κοντινού πεδίου στις εξισώσεις πιθανοτικής ανάλυσης σεισμικού κινδύνου. Επίσης, προτείνεται μια νέα μέθοδος κατηγοριοποίησης της εδαφικής κίνησης ως παλμικής ή μη, περιστρέφοντας τις εδαφικές καταγραφές και εντοπίζοντας τον παλμό σε όλες τις διευθύνσεις. Η εν λόγω μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για την αποκωδικοποίηση 179 καταγραφών της νέας βάσης σεισμικών δεδομένων (NGA), όπου μια παλμική κίνηση παρατηρείται το λιγότερο σε μια διεύθυνση. Οι προκύπτουσες πληροφορίες από τη συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν ώστε να εκτιμηθεί η πιθανότητα εμφάνισης παλμικής κίνησης σε κάποια περιοχή, η διεύθυνση εμφάνισης του παλμού σε σχέση με τη διεύθυνση του ρήγματος, η περίοδος της παλμικής κίνησης και η ενίσχυση του φάσματος απόκρισης λόγω της παρουσίας του παλμού στην εδαφική κίνηση.

Οι εδαφικές κινήσεις με παρουσία παλμού στην αρχή της χρονοϊστορίας της ταχύτητας ανήκουν σε μια ειδική κατηγορία εδαφικών κινήσεων που προκαλούν πολλές καταστροφές στις κατασκευές. Αυτό το είδος εδαφικής κίνησης, το οποίο στην έρευνα των Shahi και Baker (2011) αναφέρεται ως παλμική κίνηση, παρατηρείται συνήθως σε περιοχές που βρίσκονται κοντά στο ρήγμα και πιστεύεται ότι προκαλείται κατά κύριο λόγο εξαιτίας της παρουσίας των φαινομένων έμπροσθεν κατευθυντικότητας (Somerville et al. 1997, Somerville 2003 και 2005, Spudlich και Chiu 2008). Οι παλμικές εδαφικές κινήσεις αυξάνουν τις σεισμικές απαιτήσεις των κατασκευών και προκαλούν εκτεταμένες καταστροφές, όπως παρατηρήθηκε σε διάφορους σεισμούς. Τα συμβατικά μοντέλα πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης που χρησιμοποιούνται στην πιθανοτική ανάλυση σεισμικού κινδύνου δε λαμβάνουν υπόψη την ύπαρξη παλμικής κίνησης και γι' αυτό ίσως να υποεκτιμούν τον σεισμικό κίνδυνο σε περιοχές κοντινού πεδίου όπου αναμένεται να εμφανιστεί ο παλμός. Είναι πολύ σημαντικό να μοντελοποιηθούν οι επιδράσεις της εν λόγω κίνησης ώστε να εκτιμηθεί σωστά ο σεισμικός κίνδυνος και να ενσωματωθούν τα φαινόμενα κατευθυντικότητας στους υπολογισμούς του τελευταίου. Η μόνιμη παραμένουσα μετακίνηση του εδάφους (fling step) αποτελεί ακόμα ένα χαρακτηριστικό του κοντινού πεδίου αλλά δε λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα μελέτη.

Στο παρελθόν έγιναν πολλές προσπάθειες ενσωμάτωσης της επίδρασης του παλμού του κοντινού πεδίου στην εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου. Σε αυτές δόθηκε έμφαση στη μοντελοποίηση της ενίσχυσης του φάσματος απόκρισης λόγω της παλμικής κίνησης είτε αυξάνοντας είτε μειώνοντας μονοτονικά τις φασματικές συντεταγμένες σε ένα εύρος περιόδων (Somerville et al. 1997, Abrahamson 2000), είτε ενισχύοντας το φάσμα απόκρισης σε ένα στενό εύρος περιόδων κοντά στην περίοδο του παλμού (Tp) (Somerville 2005, Tothong et al. 2007). Τα πρώτα μοντέλα αναφέρονται

συνήθως ως μοντέλα με ευρεία ζώνη ενώ τα τελευταία ως αυτά με τη στενή ζώνη. Η πορεία μελέτης αυτής της εργασίας επεκτείνει την πορεία των Tothong et al (2007) και χρησιμοποιεί επιπρόσθετα μοντέλα περιοριζόμενων καταγραφών, αντί για τα παλαιότερα χρησιμοποιούμενα υποθετικά μοντέλα. Η συγκεκριμένη μελέτη δίνει επίσης τη δυνατότητα υπολογισμού της φασματικής επιτάχυνσης σε οποιαδήποτε τυχαία διεύθυνση περιμετρικά του ρήγματος, ενώ μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μοντέλο στενής ζώνης καθώς η φασματική επιτάχυνση ενισχύεται σε ένα εύρος περιόδων κεντραρισμένων γύρω από την περίοδο του παλμού. Παρ' όλα αυτά, δε μπορούν να γίνουν υποθέσεις εκ των προτέρων όσον αφορά τον αριθμό των περιόδων που ενισχύονται γύρω από την περίοδο του παλμού και το μέγεθος της ενίσχυσης. Το μοντέλο προέκυψε εντελώς εμπειρικά ενώ ο χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος περιστρέφει την εδαφική κίνηση και εντοπίζει τον παλμό όχι μόνο στην κάθετη στο ρήγμα αλλά σε όλες τις διευθύνσεις. Αυτή η τροποποίηση επιτρέπει την αναγνώριση των παλμών της ταχύτητας σε τυχαίες διευθύνσεις, οι οποίες αργότερα χρησιμοποιούνται στη βαθμονόμηση των μοντέλων πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης.

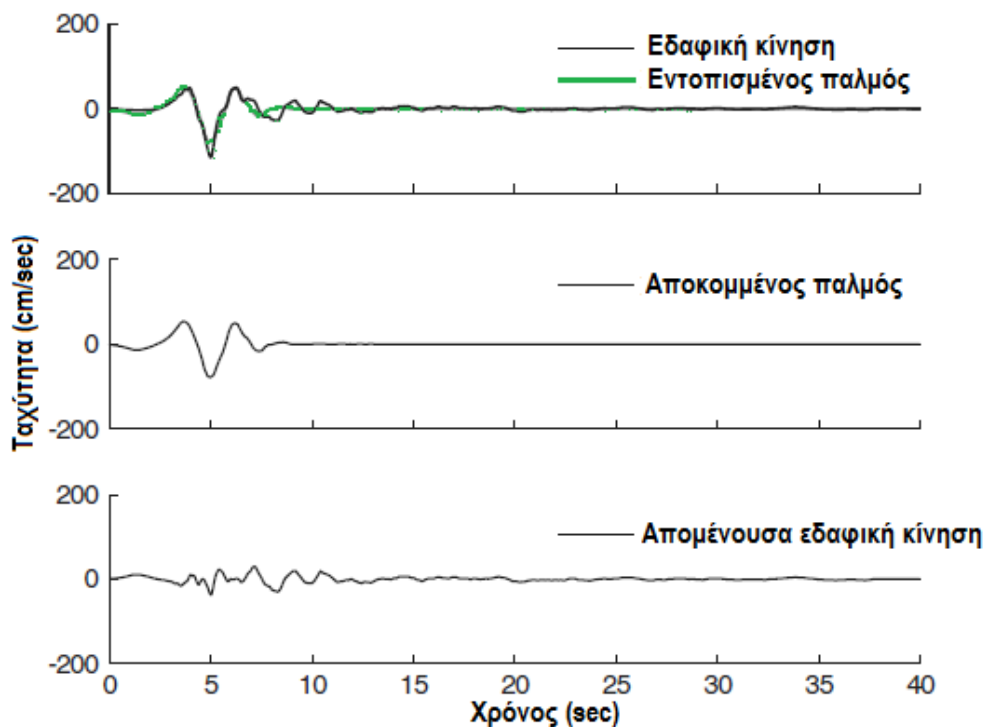
Η συνολική έρευνα περιλαμβάνει μοντέλα πρόβλεψης της πιθανότητας εμφάνισης παλμού για μια δεδομένη γεωμετρία πηγής και θέσης καταγραφής, την πιθανότητα παρατήρησης παλμού σε κάποια συγκεκριμένη διεύθυνση δεδομένου ότι έχει παρατηρηθεί ο παλμός σε κάποια θέση καταγραφής και την απόσβεση του φάσματος απόκρισης λόγω της απουσίας παλμού στην εδαφική κίνησης κοντινού πεδίου.

3.2 Το μοντέλο προσομοίωσης των Shahi – Baker για το κοντινό πεδίο

3.2.1 Αναγνώριση της ύπαρξης παλμικής κίνησης

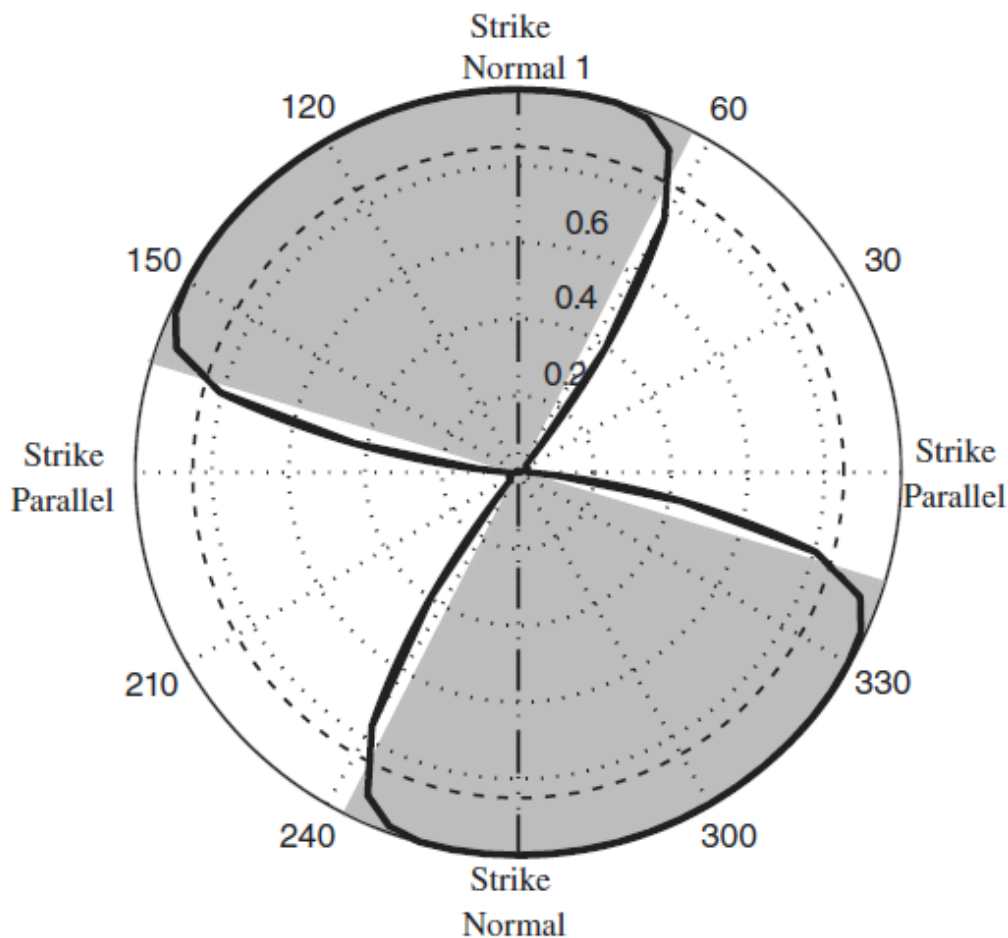
Προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια πιθανολογική μελέτη παλμικών εδαφικών κινήσεων είναι αναγκαία μια βιβλιοθήκη εδαφικών καταγραφών με κατηγοριοποίηση της εκάστοτε εδαφικής κίνησης ως παλμικής ή μη. Πολλοί ερευνητές έχουν αναπτύξει βιβλιοθήκες παλμικών εδαφικών κινήσεων κατηγοριοποιώντας τις καταγραφές με χρήση οπτικών ή ποσοτικών τεχνικών (Mavroeidis και Parageorgiou 2003, Somerville 2003, Fu και Menun 2004, Akkar et al 2005). Αυτές οι βάσεις δεδομένων όμως δεν περιέχουν μη παλμικές εδαφικές κινήσεις, γι' αυτό αποτρέπουν την ανάλυση από τον προσδιορισμό της πιθανότητας εμφάνισης παλμού.

Στην προκειμένη έρευνα προτιμήθηκε η χρήση του αλγόριθμου εντοπισμού παλμού του Baker (2007) επειδή είναι εντελώς ποσοτική μέθοδος και επιτρέπει την κατηγοριοποίηση πολλών δεδομένων όπως αυτά της νέας βάσης δεδομένων (NGA database) χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρησιμοποιεί κυματική ανάλυση για να αποκόψει το παλμικό κομμάτι από τη χρονοϊστορία της ταχύτητας της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας της εδαφικής κίνησης. Το αποκτώμενο παλμικό κομμάτι αναλύεται και χρησιμοποιείται για την κατηγοριοποίηση της εδαφικής κίνησης ως παλμικής ή μη. Αν και η κατηγοριοποίηση ορισμένων καταγραφών ως παλμικής ή μη είναι δύσκολη λόγω της δυαδικότητας της μεθόδου, ο εν λόγω αλγόριθμος είναι γενικά αποτελεσματικός στο να δώσει βάσιμες κατηγοριοποιήσεις. Το σχήμα 3.1 απεικονίζει γραφικά τα αποτελέσματα του αλγορίθμου.



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση της διαδικασίας που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος του Baker (2007) για να εξάγει τον μεγαλύτερο παλμό από τη χρονοϊστορία ταχυτήτων (εδώ παρουσιάζεται η χρονοϊστορία του σεισμού στο Imperial Valley, El Centro 1979). Στην περίπτωση αυτή ο παλμός είναι μεγάλος και η εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται ως παλμική.

Παρόλο που οι παλμοί ταχύτητας που προέρχονται από φαινόμενα κατευθυντικότητας αναμένονται να εμφανιστούν στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της εδαφικής κίνησης (Somerville 1997), πολλές διαρρήξεις έχουν ανώμαλη γεωμετρία, το οποίο καθιστά δύσκολο τον προσδιορισμό της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας. Επίσης οι παλμικές κινήσεις παρατηρούνται σε ένα ευρύ φάσμα διευθύνσεων γύρω από το ρήγμα (Howard et al 2005). Το σχήμα 3.2 δείχνει τον συντελεστή εμφάνισης παλμού όπως αυτός υπολογίστηκε από τον αλγόριθμο του Baker (2007) σε διάφορες διευθύνσεις γύρω από μια περιοχή (στις παλμικές εδαφικές κινήσεις εμφανίζονται μεγάλες τιμές συντελεστή εμφάνισης παλμού). Οι συντελεστές εμφάνισης παλμού στο σχήμα 3.2 δείχνουν ότι οι παλμικές εδαφικές κινήσεις πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες διευθύνσεις γύρω από τη θέση καταγραφής. Η συγκεκριμένη περίπτωση αποτελεί μία απλή περίπτωση όπου ο παλμός εμφανίζεται γύρω από την περιοχή κανονικού ρήγματος. Πιο περίπλοκες περιπτώσεις υφίστανται όταν η διεύθυνση του ρήγματος κανονικής διάρρηξης δεν κείται στο εύρος διευθύνσεων όπου παρατηρήθηκαν οι παλμοί αλλά οι εν λόγω περιπτώσεις είναι μικρές σε αριθμό.



Σχήμα 3.2: Τιμές συντελεστή εμφάνισης παλμού ως συνάρτηση της διεύθυνσης για το σεισμό Imperial Valley, El Centro 1979. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή υποδεικνύει τις διευθύνσεις στις οποίες η παλμική κίνηση είναι εμφανής.

Προκειμένου να μελετηθούν οι διευθύνσεις στις οποίες εμφανίζονται οι παλμικές εδαφικές κινήσεις, οι εδαφικές καταγεγραμμένες κινήσεις περιστράφηκαν σε όλες τις πιθανές διευθύνσεις και σε κάθε διεύθυνση η εδαφική κίνηση κατηγοριοποιήθηκε ως παλμική ή μη. Μια θέση, λοιπόν, θεωρείται ότι μπορεί να εμφανίσει παλμική κίνηση αν τουλάχιστον μια εδαφική κίνηση σε οποιαδήποτε διεύθυνση στη θέση αυτή είναι παλμική. Αυτό το μοντέλο περιστροφής και κατηγοριοποίησης των εδαφικών κινήσεων σε κάθε διεύθυνση οδήγησε στην αναγνώριση 179 καταγραφών της νέας βάσης δεδομένων NGA, οι οποίες εμφανίζουν παλμικές εδαφικές κινήσεις. Η συγκεκριμένη μέθοδος κατηγοριοποίησης προσδιορίζει παλμούς μόνο στην οριζόντια διεύθυνση και ίσως να μη μπορεί να κατηγοριοποιήσει την κίνηση ως παλμική αν ο παλμός εκτείνεται εκτός του οριζόντιου επιπέδου. Η κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση μπορεί να μη εκτείνεται στο οριζόντιο επίπεδο για ορισμένα ρήγματα μη κανονικής ολίσθησης, γι' αυτό τα μοντέλα για τα ρήγματα μη κανονικής διάρρηξης που αναπτύχθηκαν στην παρούσα μελέτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο όταν οι παλμοί εκτός του οριζόντιου επιπέδου είναι μικρής σημασίας.

Η προηγούμενη έρευνα του Baker (2007) η οποία εξέταζε μόνο εδαφικές κινήσεις ρηγμάτων κανονικής διάρρηξης, προσδιόρισε 91 παλμικές εδαφικές κινήσεις της νέας βάσης δεδομένων. Οι περισσότερες από τις πρόσθετες εδαφικές κινήσεις που

προσδιορίστηκαν στην παρούσα μελέτη είχαν ένα εμφανή παλμικό χαρακτηριστικό στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα. Οι συγκεκριμένες καταγραφές δεν είχαν κατηγοριοποιηθεί ως παλμικές στην προηγούμενη έρευνα του Baker (2007) επειδή το παλμικό χαρακτηριστικό στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα βρισκόταν ελάχιστα εκτός των ορίων για την κατηγοριοποίηση. Η παρουσία διακριτού παλμού στη χρονοϊστορία ταχυτήτων της κάθετης στο ρήγμα διεύθυνσης των περισσότερων εδαφικών καταγραφών που χαρακτηρίστηκαν ως παλμικές, υποδηλώνει ότι η επίδραση της κατευθυντικότητας μπορεί να είναι η κύρια αιτία του παλμικού χαρακτηριστικού σε αυτές τις εδαφικές κινήσεις.

3.2.2 Ανάπτυξη μοντέλων υπολογισμού της οριζόντιας φασματικής επιτάχυνσης PSHA

Η συμβατική εξίσωση προσδιορισμού της οριζόντιας φασματικής επιτάχυνσης PSHA είναι:

$$\nu_{S_a}(x) = \sum_{i=1}^{\#faults} \nu_i \iint P(S_a > x|m, r) \cdot f_i(m, r) \cdot dm \cdot dr \quad (1)$$

και χρησιμοποιείται για την εύρεση του ετήσιου ρυθμού με τον οποίο η φασματική επιτάχυνση S_a σε μια περιοχή υπερβαίνει την τιμή x (η σχετική περίοδος T παραλείπεται για λόγους συντομίας). Ο όρος $P(S_a > x|m, r)$ δίνει την πιθανότητα η S_a σε μια συγκεκριμένη περίοδο να υπερβεί την τιμή x με την ταυτόχρονη εμφάνιση σεισμού μεγέθους m σε απόσταση r , η οποία μπορεί να υπολογιστεί με οποιοδήποτε μοντέλο εδαφικής κίνησης. Η συγκεκριμένη πιθανότητα αν πολλαπλασιαστεί με την πυκνότητα πιθανότητας $f_i(m, r)$ εμφάνισης ενός τέτοιου σεισμού μεγέθους m σε απόσταση r , σε ένα συγκεκριμένο ρήγμα i και αν ολοκληρωθεί για όλες τις πιθανές τιμές των m και r , δίνει την πιθανότητα υπέρβασης ενός σεισμού. Ο συνολικός ρυθμός υπέρβασης σε μία περιοχή μπορεί να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας αυτή την πιθανότητα με το ρυθμό εμφάνισης των σεισμών στο ρήγμα ν_i και αθροίζοντας κάθε ρήγμα στη γύρω περιοχή της θέσης. Πρέπει να αναφερθεί ότι η πιθανότητα $P(S_a > x|m, r)$ προέκυψε χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο εδαφικής κίνησης το οποίο γενικότερα αποτελεί και αυτό συνάρτηση των παραμέτρων όπως του μηχανισμού διάρρηξης, των χαρακτηριστικών της θέσης καταγραφής και άλλων παραμέτρων πέραν του σεισμικού μεγέθους και της απόστασης, αλλά αυτοί οι παράμετροι παραλείπονται για λόγους συντομίας.

Οι επιπτώσεις της παλμικής εδαφικής κίνησης μπορούν να συμπεριληφθούν στην ανάλυση σεισμικού κινδύνου χρησιμοποιώντας ένα τροποποιημένο μοντέλο εδαφικής κίνησης, το οποίο υπολογίζει την επίδραση των παλμών κατευθυντικότητας στην ενίσχυση των τιμών της φασματικής επιτάχυνσης. Επειδή οι επιδράσεις της κατευθυντικότητας εξαρτώνται κυρίως από τη γεωμετρία της πηγής και της θέσης καταγραφής (Somerville et al., 1997), το εδαφικό μοντέλο ερμηνείας των παλμών πρέπει να είναι συνάρτηση της γεωμετρίας της πηγής και της θέσης καθώς και συνάρτηση του μεγέθους και της απόστασης. Άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα τροποποιημένο εδαφικό μοντέλο ερμηνείας της παλμικής εδαφικής κίνησης για τον υπολογισμό της πιθανότητας υπέρβασης $P(S_a > x|m, r, z)$, όπου το z αναπαριστά τις πληροφορίες για τη γεωμετρία της πηγής και της θέσης. Αυτή η νέα πιθανότητα υπέρβασης $P(S_a > x|m, r, z)$ όταν χρησιμοποιείται στην εξίσωση της φασματικής

επιτάχυνσης (1), μπορεί να δώσει το ρυθμό υπέρβασης της S_a σε κάποια θέση, μετά τον υπολογισμό της επίδρασης των παλμικών εδαφικών κινήσεων.

Η επίδραση της κατευθυντικότητας μπορεί να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό της φασματικής επιτάχυνσης μέσω της εξίσωσης:

$$v_{Sa}(x) = \sum_{i=1} v_i \iiint P * (S_a > x|m,r,z) \cdot f_i(m,r,z) \cdot dm \cdot dr \cdot dz \quad (2)$$

Η παρουσία ενός παλμικού χαρακτηριστικού της εδαφικής κίνησης ενισχύει το φάσμα απόκρισης για ένα εύρος περιόδων, όπως διακρίνεται στο σχήμα 3.3. Αυτή η ενίσχυση της απόκρισης αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα υπέρβασης μιας συγκεκριμένης τιμής φασματικής επιτάχυνσης S_a όταν παλμική εδαφική κίνηση εμφανίζεται σε κάποια περιοχή. Για το λόγο αυτό, η προτεινόμενη εξίσωση (2) μπορεί να προκύψει διαχωρίζοντας την πιθανότητα $P(S_a > x|m,r,z)$ σε δυο περιπτώσεις ανάλογα με το αν εμφανίζεται ή όχι παλμική εδαφική κίνηση. Οι δυο περιπτώσεις μπορούν στη συνέχεια να συνδυαστούν ώστε να υπολογιστεί ο συνολικός βαθμός υπέρβασης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Τα συγκεκριμένα μοντέλα πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης προσαρμόζονται εμπειρικά χρησιμοποιώντας παλμικές και μη κινήσεις από μια βάση δεδομένων εδαφικής κίνησης. Στην περιοχή κοντινού πεδίου, όπου κυρίως παρουσιάζονται οι παλμοί, τα εδαφικά μοντέλα μπορεί να υποεκτιμούν την παλμική εδαφική κίνηση και να υπερεκτιμούν τη μη παλμική. Όταν παρατηρείται ένας παλμός μια πρόβλεψη της υπέρβασης της φασματικής επιτάχυνσης μπορεί να ληφθεί από την εξίσωση:

$$P(S_a > x|m, r, z, \text{pulse}) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(x) - \mu_{\ln S_{a,\text{pulse}}}}{\sigma_{\ln S_{a,\text{pulse}}}}\right) \quad (3)$$

όπου οι παλμικές εδαφικές κινήσεις έχουν μέση τιμή $\mu_{\ln S_{a,\text{pulse}}}$ και τυπική απόκλιση $\sigma_{\ln S_{a,\text{pulse}}}$. Να σημειωθεί ότι τα $\mu_{\ln S_{a,\text{pulse}}}$ και $\sigma_{\ln S_{a,\text{pulse}}}$ είναι συναρτήσεις των m , r , T_p και άλλων παραγόντων αλλά η εξάρτησή τους έχει παραληφθεί για συντομία και με σκοπό να τονιστούν οι νέες παράμετροι υπολογισμού της συγκεκριμένης έρευνας.

Στην δεύτερη περίπτωση όπου δεν παρατηρείται παλμός, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα τροποποιημένο εδαφικό μοντέλο για τον υπολογισμό της πιθανότητας η φασματική επιτάχυνση να υπερβεί το x , αφού πρωτίστως γίνει η διόρθωσή για την υπερεκτίμηση της κίνησης:

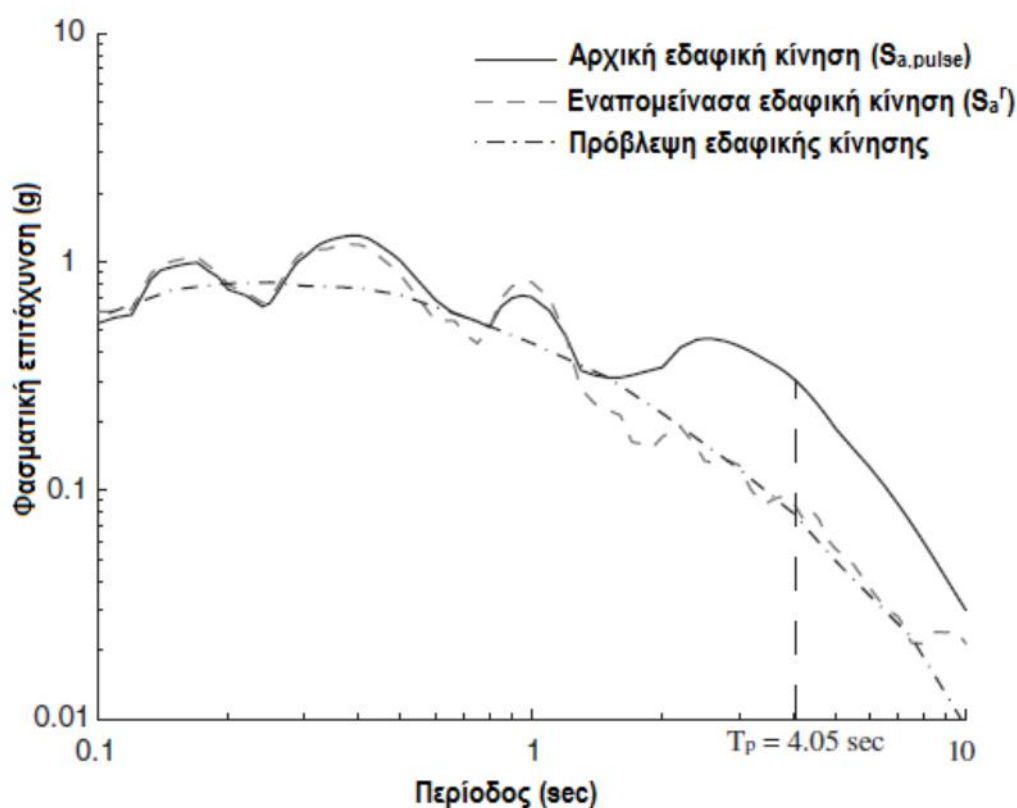
$$P(S_a > x|m, r, \text{no pulse}) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(x) - \mu_{\ln S_{a,\text{no pulse}}}}{\sigma_{\ln S_{a,\text{no pulse}}}}\right) \quad (4)$$

όπου η μέση τιμή $\mu_{\ln S_{a,\text{no pulse}}}$ και η τυπική απόκλιση $\sigma_{\ln S_{a,\text{no pulse}}}$ μπορούν να προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας ένα τροποποιημένο μοντέλο εδαφικής κίνησης για μη παλμικές κινήσεις. Στις εξισώσεις (3) και (4) το $\Phi()$ αντιπροσωπεύει την τυπική κανονική αθροιστική συνάρτηση κατανομής. Υποτέθηκε κανονική κατανομή

υπολοίπων ενώ τα ιστογράμματα των υπολοίπων που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη έρευνα είναι συμβατά με αυτή την υπόθεση.

Οι δυο αυτές περιπτώσεις μπορούν να συνδυαστούν χρησιμοποιώντας το θεώρημα ολικής πιθανότητας (Benjamin και Cornell, 1970) ώστε να προκύψει η ολική πιθανότητα να υπερβεί η S_a την τιμή x σε κάποια θέση :

$$\begin{aligned}
 P^*(S_a > x|m, r, z) &= P(\text{pulse}|m, r, z) \cdot P(S_a > x|m, r, z, \text{pulse}) \\
 &+ (1 - P(\text{pulse}|m, r, z)) \cdot P(S_a > x|m, r, \text{no pulse})
 \end{aligned} \quad (5)$$



Σχήμα 3.3: Φάσμα απόκρισης από το σεισμό Imperial Valley, El Centro 1979 σε κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα. Η μέση πρόβλεψη των Boore και Atkinson (2007) και η φασματική απόκριση για την απομένουσα εδαφική κίνηση παρουσιάζονται επίσης.

3.2.3 Πιθανότητα ύπαρξης παλμικής κίνησης

Όπως παρατηρείται στην εξίσωση (5) η πιθανότητα ύπαρξης παλμικής εδαφικής κίνησης σε μια περιοχή είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της φασματικής επιτάχυνσης PSHA. Χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για τον προσδιορισμό της πιθανότητας εμφάνισης παλμού δεδομένης της γεωμετρίας της πηγής και της θέσης καταγραφής. Το μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης είναι

ένα γενικευμένο γραμμικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιείται για την προσαρμογή των δεδομένων διωνυμικής κατανομής (π.χ. Kutner et al. 2004).

Έχει ευρέως καθιερωθεί ότι η επίδραση του φαινομένου της έμπροσθεν κατευθυντικότητας, το οποίο πιστεύεται να είναι μία αιτία δημιουργίας παλμικών εδαφικών κινήσεων, εξαρτάται από τη γεωμετρία της πηγής και της θέσης καταγραφής (Somerville et al., 1997). Οι Iervolino και Cornell (2008) απέδειξαν ότι οι παράμετροι r , s και θ για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και r , d και φ για ρήγματα μη οριζόντιας ολίσθησης έχουν μεγαλύτερη ισχύ κατά τη λογιστική παλινδρόμηση για τον προσδιορισμό της πιθανότητας εμφάνισης παλμού απ' ότι άλλες παράμετροι. Το σχήμα 3.4 εξηγεί γραφικά αυτές τις παραμέτρους. Στην προκειμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παράμετροι με αυτές των Iervolino και Cornell (2008) για να πραγματοποιηθεί η λογιστική παλινδρόμηση χρησιμοποιώντας πληροφορίες από όλες τις θέσεις καταγραφής της νέας βάσης δεδομένων NGA. Ήταν απαραίτητη η αναπροσαρμογή του μοντέλου επειδή το μοντέλο των Iervolino και Cornell (2008) προβλέπει μόνο την πιθανότητα εμφάνισης παλμού στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση ενώ η συγκεκριμένη έρευνα χρειάζεται ένα μοντέλο που να προβλέπει την πιθανότητα εμφάνισης σε οποιαδήποτε συνιστώσα. Προέκυψε ότι μόνο οι παράμετροι r και s είναι στατιστικά σημαντικές στην περίπτωση ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης ενώ οι παράμετροι r , d και φ είναι στατιστικά σημαντικές για όλους τους υπόλοιπους τύπους ρηγμάτων. Τα αποτελέσματα της λογιστικής παλινδρόμησης συνοψίζονται στις εξισώσεις (6) και (7):

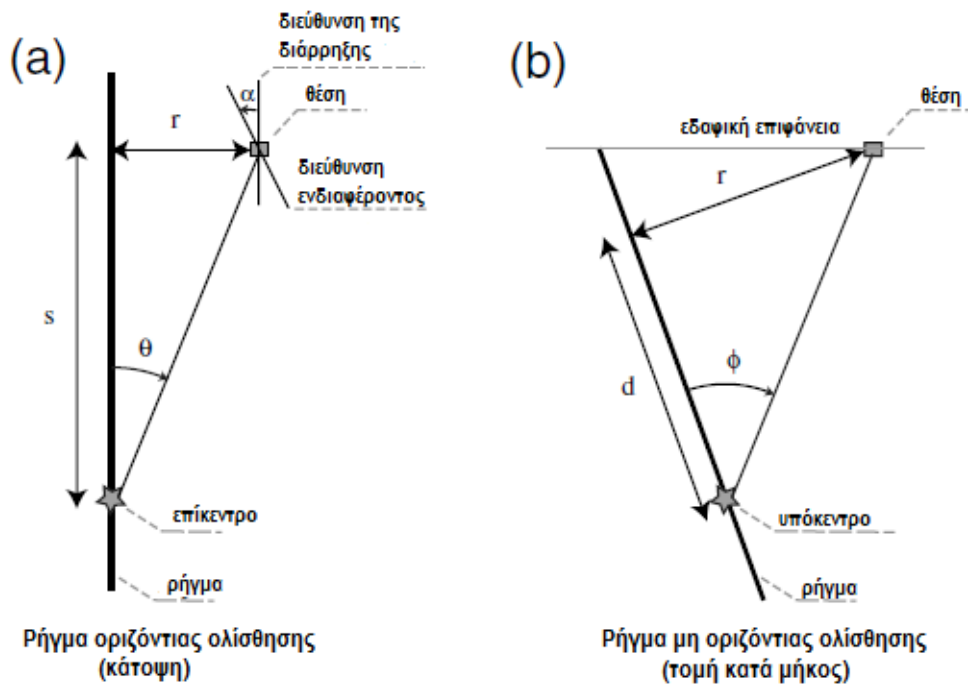
για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης

$$P(\text{pulse}|r, s) = \frac{1}{1+e^{(0.642+0.167 \cdot r-0.075 \cdot s)}} \quad (6)$$

για όλους τους υπόλοιπους τύπους ρηγμάτων

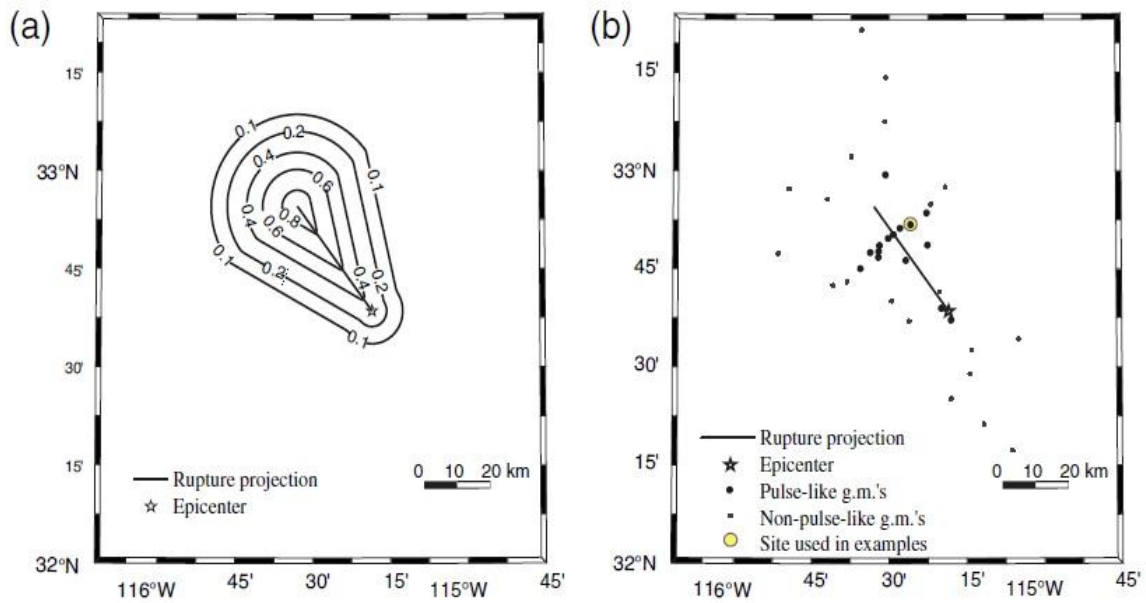
$$P(\text{pulse}|r, d, \varphi) = \frac{1}{1+e^{(0.128+0.055 \cdot r-0.061 \cdot d+0.036 \cdot \varphi)}} \quad (7)$$

Οι μονάδες των r , d και s είναι km ενώ του φ είναι μοίρες. Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε περιείχε τιμές του r που κυμαίνονταν από 0.3km έως 255km στην περίπτωση ρηγμάτων μη οριζόντιας ολίσθησης και 0.07km έως 472km για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης. Οι τιμές του d κυμαίνονταν από 0km έως 70km, του φ από 0 έως 90 μοίρες και του s από 0.3km έως 143km.

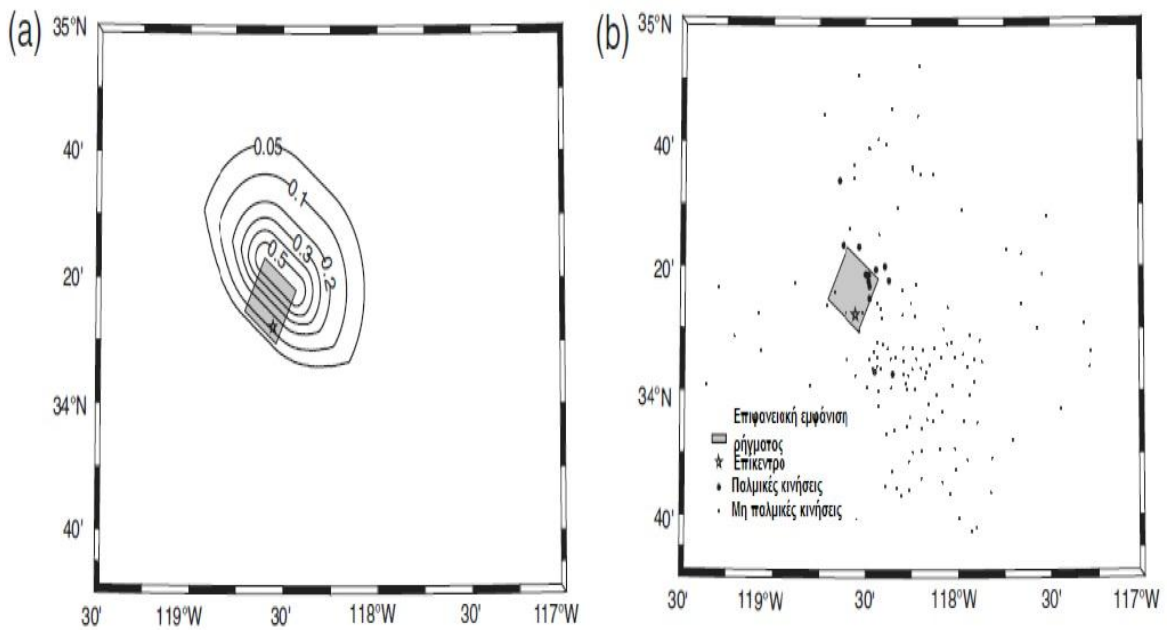


Σχήμα 3.4: Σχήμα που επεξηγεί τις απαιτούμενες παραμέτρους για τη λογιστική παλινδρόμηση για (a) ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και (b) ρήγμα μη οριζόντιας ολίσθησης. Επίσης παρουσιάζεται η γωνία α μεταξύ της διεύθυνσης ενδιαφέροντος και της διεύθυνσης του ρήγματος.

Ένας χάρτης ισουψών με τις προβλεπόμενες πιθανότητες για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5a και για ένα ρήγμα μη οριζόντιας ολίσθησης στο σχήμα 3.6a. Οι ισουψείς των χαρτών απεικονίζουν την πιθανότητα εμφάνισης παλμού όπως προέκυψαν γύρω από τη διάρρηξη κατά το σεισμό του Imperial Valley και του Northridge. Οι συγκεκριμένοι χάρτες μπορούν να συγκριθούν με τους πραγματικούς χάρτες για περιοχές όπου παρατηρήθηκαν παλμικές εδαφικές κινήσεις, κατά το σεισμό του Imperial Valley και του Northridge όπως φαίνεται στα σχήματα 3.5b και 3.6b αντίστοιχα. Το συγκεκριμένο μοντέλο προβλέπει αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης παλμού σε περιοχές όπου εμφανίζονται φαινόμενα κατευθυντικότητας, ενώ η μορφή των ισουψών φαίνεται να είναι συμβατή με αυτή των πραγματικών παρατηρήσεων.



Σχήμα 3.5: Χάρτης του σεισμού του Imperial Valley ο οποίος απεικονίζει (α) ισούψεις πιθανότητας εμφάνισης παλμού για δεδομένη διάρρηξη και (β) περιοχές όπου παρατηρήθηκε παλμική εδαφική κίνηση.



Σχήμα 3.6 : Χάρτης του σεισμού του Northridge ο οποίος απεικονίζει (α) ισούψεις πιθανότητας εμφάνισης παλμού για δεδομένη διάρρηξη και (β) περιοχές όπου παρατηρήθηκε παλμική εδαφική κίνηση.

3.2.4 Διεύθυνση παλμού

Η περιστροφή και η κατηγοριοποίηση των εδαφικών κινήσεων οδήγησε στην αναγνώριση των παλμικών εδαφικών κινήσεων σε ένα εύρος διευθύνσεων. Για τον υπολογισμό του σεισμικού κινδύνου μιας περιοχής κοντά σε ρήγματα για διάφορες διευθύνσεις πρέπει να είναι γνωστή η πιθανότητα παρατήρησης παλμικής κίνησης σε κάποια τυχαία διεύθυνση. Τα δεδομένα από τις περιστρεμμένες κατηγοριοποιήσεις παλμών χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό της πιθανότητας εύρεσης παλμού σε κάποια διεύθυνση (α) δεδομένου ότι ο παλμός εμφανίζεται σε στη θέση αυτή, άρα η πιθανότητα $P(\text{pulse at } \alpha | \text{ pulse})$. Η γωνία α αντιπροσωπεύει την μικρότερη γωνία που μπορεί να μετρηθεί συναρτήσει της γωνίας βύθισης του ρήγματος που λήφθηκε από τα δεδομένα της νέας βάσης δεδομένων NGA. Το σχήμα 3.4a απεικονίζει ένα σχηματικό διάγραμμα στο οποίο φαίνεται η γωνία α . Παρατηρήθηκε ότι η πιθανότητα $P(\text{pulse at } \alpha | \text{ pulse})$ είναι διαφορετική για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και διαφορετική για κάθε άλλο τύπο ρήγματος. Το σχήμα 3.7 δείχνει το κλάσμα των παλμικών κινήσεων που περιέχουν παλμό στη γωνία α για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και μη. Επίσης παρουσιάζει το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τη μείωση των τετραγωνικών σφαλμάτων μεταξύ των δεδομένων που προέκυψαν από παρατηρήσεις και αυτών που προέκυψαν από τις προβλέψεις. Το μοντέλο περιγράφεται από τις εξισώσεις (8) και (9) για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και μη αντίστοιχα:

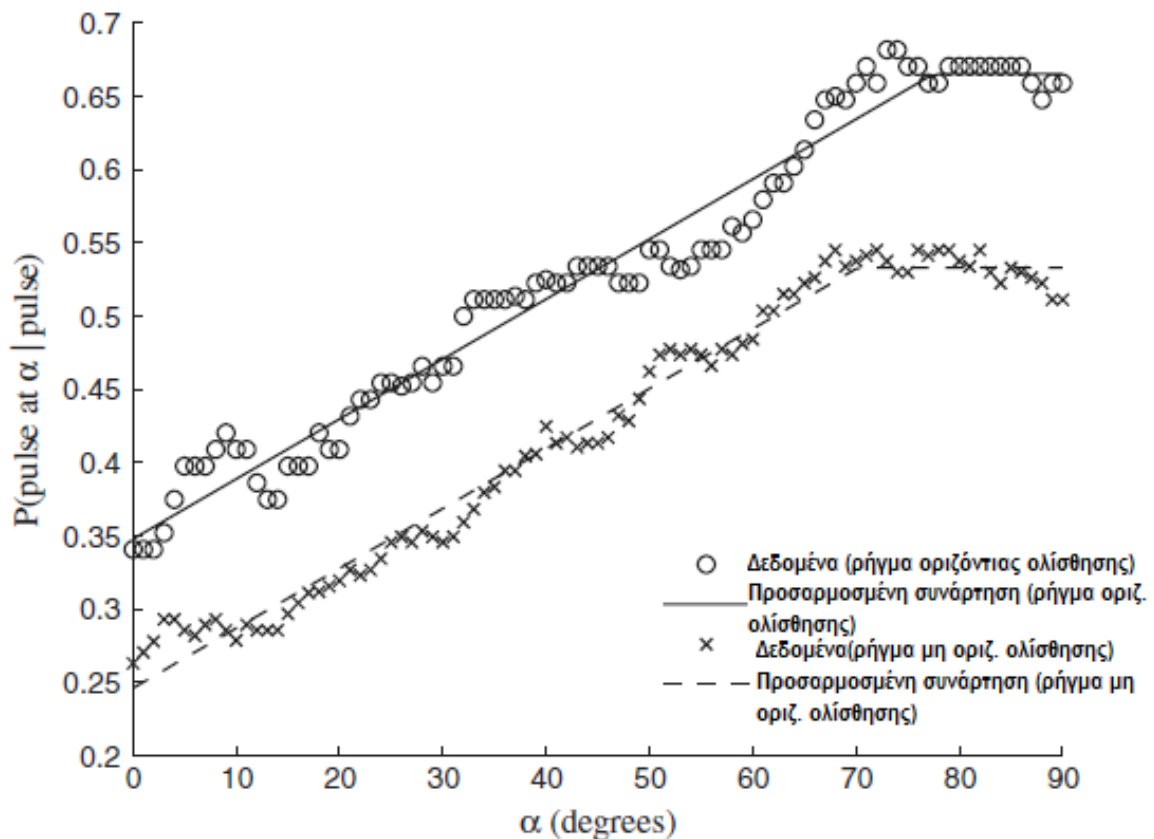
$$P(\text{pulse at } \alpha | \text{ pulse}) = \min [0.67, 0.67 - 0.0041(77.5 - \alpha)] \quad (8)$$

$$P(\text{pulse at } \alpha | \text{ pulse}) = \min [0.53, 0.53 - 0.0041(70.2 - \alpha)] \quad (9)$$

Επειδή το φαινόμενο της κατευθυντικότητας είναι εντονότερο στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα και η κάθετη διεύθυνση βρίσκεται πιο κοντά στην προβολή του ρήγματος στο οριζόντιο επίπεδο, αναμένεται να υπάρχουν μεγαλύτερες τιμές πιθανότητας παρατήρησης παλμού στη διεύθυνση αυτή. Όπως αναμενόταν, τα αποτελέσματα της ανάλυσης επιβεβαιώνουν ότι η πιο πιθανή διεύθυνση για εμφάνιση παλμικής κίνησης είναι η κάθετη στη διάρρηξη ($\alpha=90^\circ$) ενώ η λιγότερο πιθανή είναι η παράλληλη στη διάρρηξη ($\alpha=0^\circ$) για κατηγορίες ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης και μη. Η πιθανότητα παρατήρησης παλμικής κίνησης σε κάποια θέση με διεύθυνση α από τη γωνία βύθισης του ρήγματος δίνεται από την εξίσωση:

$$P(\text{pulse at } \alpha) = P(\text{pulse at } \alpha | \text{ pulse}) P(\text{pulse}) \quad (10)$$

όπου οι όροι στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (10) καθορίζονται από τις εξισώσεις (6) έως (9).



Σχήμα 3.7: Απεικόνιση της πιθανότητας εμφάνισης παλμού σε γωνία α δεδομένου της ύπαρξης παλμού σε κάποια θέση για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και μη.

3.2.5 Περίοδος παλμού

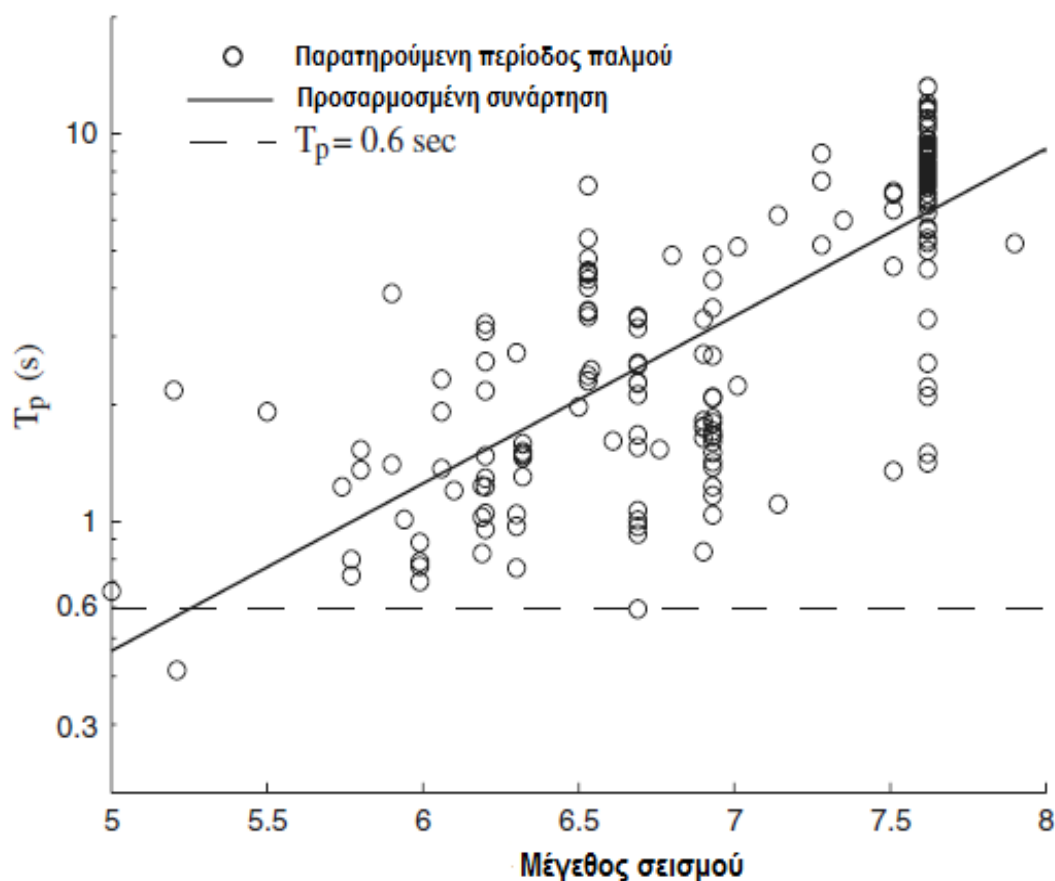
Η ενίσχυση της φασματικής επιτάχυνσης S_a λόγω της παρουσίας ενός παλμικού χαρακτηριστικού στην εδαφική κίνηση εξαρτάται από την περίοδο του παλμού. Πολλοί ερευνητές ανακάλυψαν στο παρελθόν ότι η περίοδος του παλμού εξαρτάται από το σεισμικό μέγεθος και μοντελοποίησαν αυτή τη σχέση στις εξισώσεις τους (Mavroudis και Papageorgiou 2003, Somerville 2003, Bray και Rodriguez-Marek 2004 και Baker 2007). Χρησιμοποιώντας τον τροποποιημένο αλγόριθμο κατηγοριοποίησης εντοπίστηκαν πολλές παλμικές εδαφικές κινήσεις οι οποίες δεν είχαν χρησιμοποιηθεί σε παλαιότερες έρευνες και κατασκευάστηκε μια εξίσωση συσχέτισης της περιόδου του παλμού και του σεισμικού μεγέθους χρησιμοποιώντας όλους τους παλμούς που κατηγοριοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα.

Με σκοπό να καθοριστεί η σχέση μεταξύ της περιόδου του παλμού και του μεγέθους του σεισμικού γεγονότος, υπολογίστηκαν οι περίοδοι όλων των εντοπισμένων παλμών. Η περίοδος που σχετίζεται με το μέγιστο πλάτος της ανάλυσης Fourier του παλμού χρησιμοποιήθηκε ως μέσο μέτρησης της περιόδου του παλμού σύμφωνα με τη μέθοδο του Baker (2007). Οι εξισώσεις (11) και (12) προέκυψαν από γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ του $\ln T_p$ και του σεισμικού μεγέθους.

$$\mu_{\ln T_p} = -5.37 + 0.99M \quad (11)$$

$$\sigma_{\ln T_p} = 0.56 \quad (12)$$

Το σχήμα 3.8 απεικονίζει τη σχέση της παρατηρούμενης περιόδου του παλμού T_p και του σεισμικού μεγέθους M της εξίσωσης (11).



Σχήμα 3.8: Περίοδος του παλμού σχετιζόμενη με το σεισμικό μέγεθος για εδαφικές κινήσεις χαρακτηριζόμενες ως παλμικές.

Οι υπόλοιποι παράμετροι του μοντέλου ακολουθούν κανονική κατανομή άρα η $\ln T_p$ μπορεί να θεωρηθεί ότι ακολουθεί επίσης κανονική κατανομή (ή ότι η T_p ακολουθεί λογαριθμο-κανονική κατανομή) σε σχέση με τη μέση τιμή $\mu_{\ln T_p}$ που δίνεται από την εξίσωση (11) και την τυπική απόκλιση $\sigma_{\ln T_p}$ που δίνεται από την εξίσωση (12).

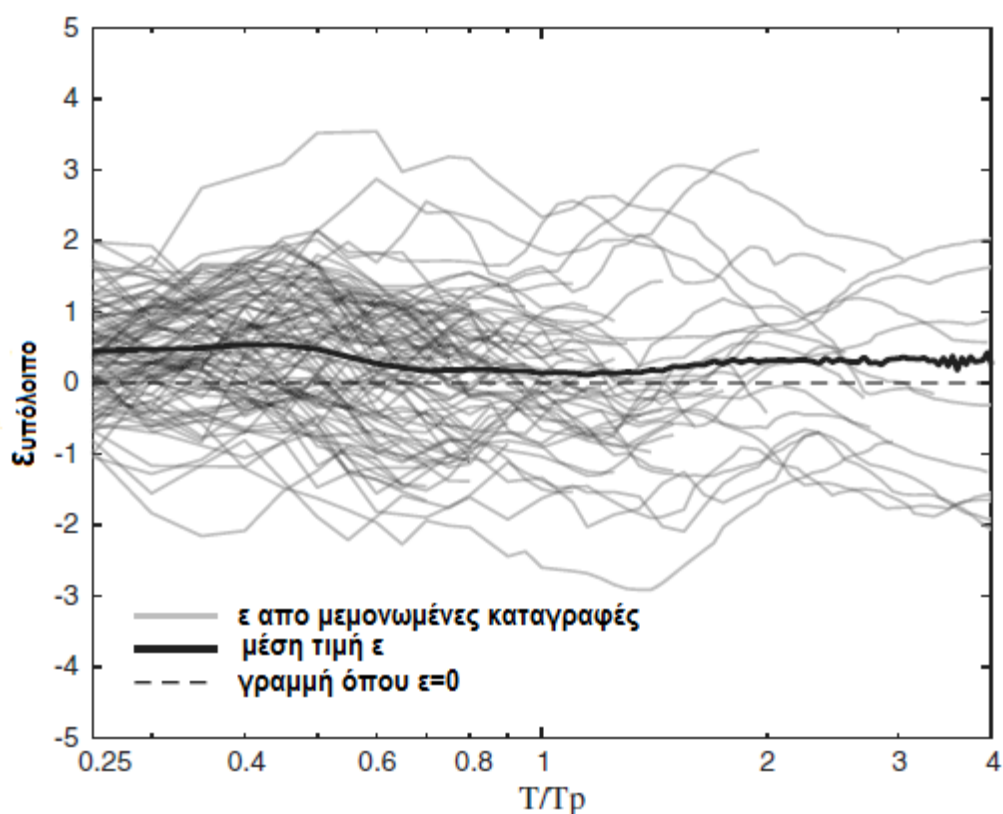
Το σχήμα 3.8 επίσης εμφανίζει ότι ο αριθμός των παλμικών κινήσεων με μικρή περίοδο παλμού είναι μικρός. Τιμές $T_p < 0.6 \text{ sec}$ είναι σπάνιες και παλμοί κατευθυντικότητας με χαμηλές περιόδους δεν αναμένεται να συμβάλλουν σημαντικά στη σεισμική επικινδυνότητα. Για το λόγο αυτό, οι παρατηρήσεις με $T_p < 0.6 \text{ sec}$ αγνοούνται στα εν λόγω μοντέλα και στους μετέπειτα υπολογισμούς.

3.2.6 Επαύξηση της φασματικής επιτάχυνσης λόγω της ύπαρξης παλμού κατευθυντικότητας

Η προτεινόμενη μελέτη χρειάζεται ένα μοντέλο εδαφικής κίνησης συμβατό με παλμικά χαρακτηριστικά. Το εδαφικό μοντέλο για την περίπτωση που παρατηρείται ο παλμός είναι απαραίτητο να προβλέπει τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της $\ln S_{a,pulse}$ στη συγκεκριμένη θέση. Με σκοπό την απλοποίηση του μοντέλου η συγκεκριμένη παράμετρος μπορεί να διαχωριστεί σε δυο μέρη:

$$\ln S_{a,pulse} = \ln \left(\frac{S_{a,pulse}}{S_a^r} \cdot S_a^r \right) = \ln(A_f \cdot S_a^r) = \ln A_f + \ln S_a^r \quad (13)$$

Ο όρος S_a^r στην εξίσωση (13) είναι η φασματική επιτάχυνση της απομένουσας εδαφικής κίνησης, δηλαδή της κίνησης που απομένει μετά την αφαίρεση του παλμού και ο όρος A_f είναι ο συντελεστής ενίσχυσης λόγω της παρουσίας του παλμού ($A_f = S_{a,pulse} / S_a^r$). Αυτή η αναπαράσταση του μοντέλου της εδαφικής κίνησης δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης της ενίσχυσης λόγω των παλμικών χαρακτηριστικών και της απομένουσας εδαφικής κίνησης σε κάποια θέση ξεχωριστά. Το σχήμα 3.9 παρουσιάζει τα υπόλοιπα ϵ της εδαφικής κίνησης σύμφωνα με το μοντέλο των Boore και Atkinson (2008), όπου τα ϵ συμβολίζουν τα τυποποιημένα υπόλοιπα του μοντέλου των Boore και Atkinson (2008).



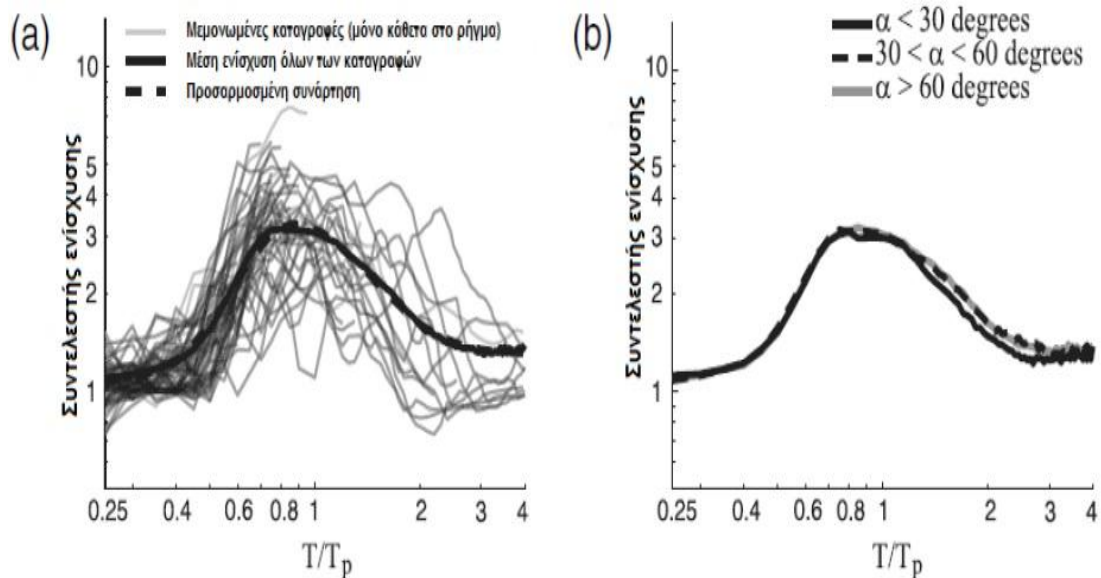
Σχήμα 3.9: Παρατηρούμενες τιμές ϵ της απομένουσας εδαφικής κίνησης.

Στο σχήμα φαίνεται ότι η μέση τιμή των ϵ είναι κοντά στο μηδέν υποδηλώνοντας ότι το εδαφικό μοντέλο μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά την S_a^r κατά μέσο όρο και για το λόγο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της απομένουσας

εδαφικής κίνησης. Οι Chioccarelli και Iervolino (2010) απέδειξαν ότι η κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα εδαφικής κίνησης είναι ισχυρότερη από την παράλληλη, ακόμα και μετά την αφαίρεση του παλμού, άρα το αποτέλεσμα του σχήματος 3.9 είναι συμβατό με αυτά τα ευρήματα καθώς τα ε από την απομένουσα εδαφική κίνηση είναι θετικά (δηλαδή η απομένουσα εδαφική κίνηση είναι ισχυρότερη από την πρόβλεψη για τη μέση τιμή). Όμως, τα ε είναι αρκετά κοντά στο 0 άρα συμπεραίνουμε ότι τα παραδοσιακά μοντέλα εδαφικής κίνησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της απομένουσας εδαφικής κίνησης. Άρα η εξίσωση (13) μπορεί να ξαναγραφεί αντικαθιστώντας το $\ln S_a^r$ με την τιμή που προβλέπεται από τα παραδοσιακά μοντέλα εδαφικής κίνησης:

$$\ln S_{a,pulse} = \ln Af + \ln S_{a,gmm} \quad (14)$$

Επίσης υπολογίστηκαν συντελεστές ενίσχυσης όπως είναι ο λόγος της φασματικής επιτάχυνσης της εδαφικής κίνησης προς την αντίστοιχη της απομένουσας εδαφικής κίνησης μετά την αφαίρεση του παλμού. Το σχήμα 3.10 δείχνει τους συντελεστές ενίσχυσης σε συνάρτηση με το λόγο της περιόδου που μας ενδιαφέρει (T) προς την περίοδο του παλμού (T_p). Οι μέσες τιμές των λόγων σχηματίζουν καμπύλη κωδωνοειδούς μορφής ομοιόμορφα τοποθετημένη σε σχέση με το λόγο $T/T_p=1$.



Σχήμα 3.10: Συντελεστής ενίσχυσης των φασματικών επιταχύνσεων S_a λόγω της παρουσίας των παλμικών χαρακτηριστικών στις εδαφικές κινήσεις. (α) Γραφική παράσταση των παραγόμενων εξισώσεων μαζί με τις παρατηρήσεις πεδίου και (β) Μέση ενίσχυση λόγω της καταγραφής παλμών σε διάφορες διευθύνσεις.

Μετά από την εφαρμογή διαφόρων σχέσεων, με σκοπό την απομείωση των τετραγώνων των σφαλμάτων την και εφαρμογή στα σεισμικά δεδομένα, επιλέχθηκε η εξής εξίσωση:

$$\mu_{lnAf} = 1.131 \cdot \exp \left(-3.11 \cdot \left(\ln \left(\frac{T}{T_p} \right) + 0.127 \right)^2 + 0.058 \right) \quad \text{εαν } T \leq 0.88T_p$$

$$\mu_{lnAf} = 0.896 \cdot \exp \left(-2.11 \cdot \left(\ln \left(\frac{T}{T_p} \right) + 0.127 \right)^2 + 0.255 \right) \quad \text{εαν } T > 0.88T_p \quad (15)$$

Το σχήμα 3.10a επίσης παρουσιάζει το μοντέλο προσομοίωση και τις παρατηρούμενες ενισχύσεις. Ενισχύσεις που υπολογίστηκαν για παλμικές κινήσεις σε διαφορετικές διευθύνσεις παρουσιάζονται στο σχήμα 3.10b το οποίο αποδεικνύει ότι το μοντέλο είναι σταθερό ανεξάρτητα από την αλλαγή της διεύθυνσης. Παρόμοιοι έλεγχοι έδειξαν ότι η ενίσχυση λόγω της παρουσίας του παλμού παραμένει σταθερή ανεξάρτητα με την αλλαγή των σεισμικών μεγεθών και του τύπου του ρήγματος. Η εξίσωση (14) μπορεί να μετατραπεί στην εξής μορφή:

$$\mu_{lnSa,pulse} = \mu_{lnAf} + \mu_{lnSa,gmm} \quad (16)$$

Επειδή το τροποποιημένο μοντέλο εδαφικής κίνησης της παρούσας μελέτης μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε παλμικές κινήσεις, αναμένεται ότι η τυπική απόκλιση αυτού του υποσυνόλου καταγραφών θα είναι μικρότερη από αυτή της συνολικής βάσης δεδομένων. Επίσης, επειδή το συγκεκριμένο μοντέλο εφαρμόζεται για εδαφική ενίσχυση προερχόμενη από τους παλμούς της κατευθυντικότητας, η ομαλοποίηση που γίνεται οδηγεί σε μείωση των τιμών των τυπικών αποκλίσεων των υπολοίπων. Η παρατηρούμενη μείωση των τυπικών αποκλίσεων εξαρτάται από το λόγο T/T_p και περιγράφεται από την εξίσωση :

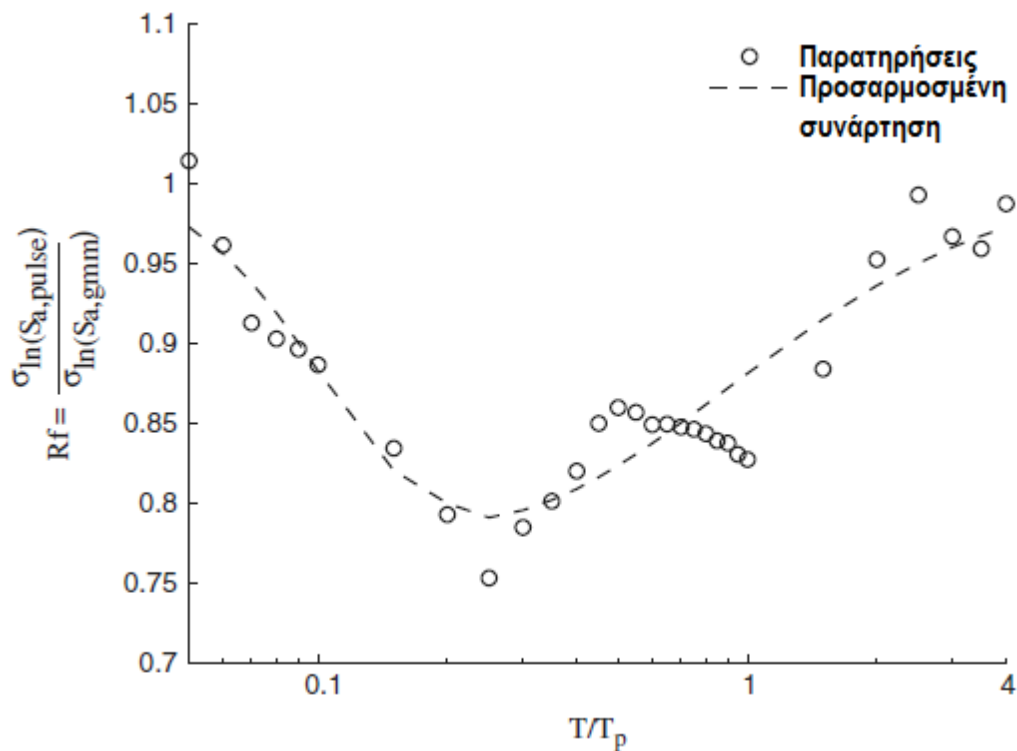
$$\sigma_{lnSa,pulse} = Rf \cdot \sigma_{lnSa,gmm} \quad (17)$$

όπου ο απομειωτικός συντελεστής Rf υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Rf = 1 - 0.2 \cdot \exp \left(-0.96 \cdot \left(\ln \left(\frac{T}{T_p} \right) + 1.56 \right)^2 \right) \quad \text{εαν } T \leq 0.21T_p$$

$$Rf = 1 - 0.21 \cdot \exp \left(-0.24 \cdot \left(\ln \left(\frac{T}{T_p} \right) + 1.56 \right)^2 \right) \quad \text{εαν } T > 0.21T_p \quad (18)$$

Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζεται ο λόγος της τυπικής απόκλισης των υπολοίπων του τροποποιημένου μοντέλου προς αυτές του μοντέλου των Boore και Atkinson (2008).



Σχήμα 3.11: Λόγος της τυπικής απόκλισης των υπολοίπων από προβλέψεις του παλμικού φάσματος $\sigma_{\ln S_a, pulse}$ προς την τυπική απόκλιση $\sigma_{\ln S_a, gmm}$ του μοντέλου των Boore και Atkinson (2008).

Όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη μελέτη είναι στατιστικά προσαρμοσμένα στα σεισμικά δεδομένα και εξαρτώμενα από την περίοδο του παλμού (T_p). Όπως προαναφέρθηκε, τα δεδομένα με περίοδο $T_p < 0.6 \text{sec}$ είναι σπάνια και η προσομοίωση του μοντέλου για τις συγκεκριμένες τιμές μπορεί να οδηγήσει σε ενίσχυση των μικρών περιόδων, άρα συνιστάται η χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου για τυπικές εδαφικές κινήσεις περιόδων $T_p > 0.6 \text{sec}$. Αυτό το όριο περιορίζει την ενίσχυση της S_a σε μικρές περιόδους, το οποίο είναι συμβατό με τα όρια που χρησιμοποιούνται σε ορισμένα άλλα μοντέλα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ ΜΕΣΩ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΝΕΛΙΞΗΣ

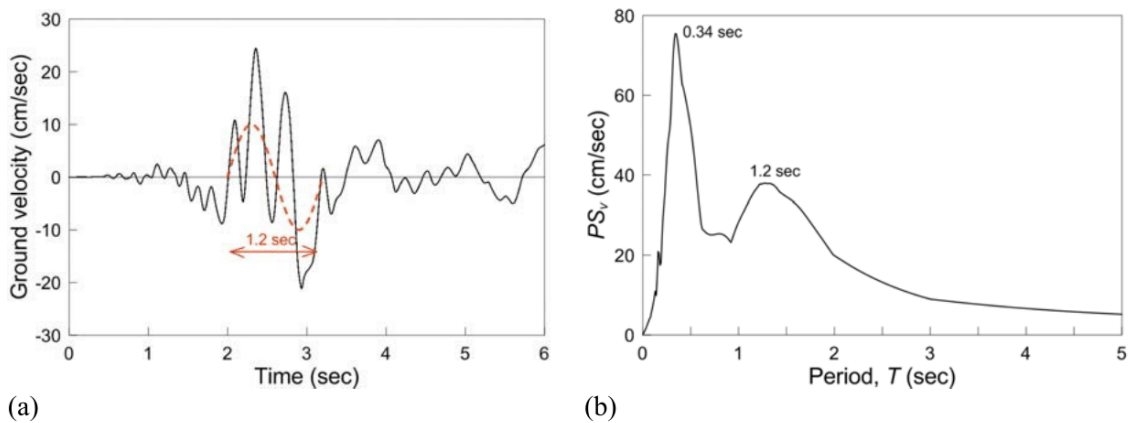
4.1 Εισαγωγή

Όπως σημειώθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας, οι σεισμοί κοντινού πεδίου με παλμό κατευθυντικότητας στη χρονοϊστορία της ταχύτητας αποτέλεσαν σημαντικό κομμάτι μελέτης για πολλούς ερευνητές. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος που προτάθηκε από τους ερευνητές Π. Μίμογλου, Ι. Ψυχάρη και Ι.Ταφλαμπά και αφορά στον προσδιορισμό των σημαντικών παλμών που περιλαμβάνονται στις καταγραφές των σεισμών κοντινού πεδίου. Η μέθοδος αυτή συνδυάζει την αποδεδειγμένη αποτελεσματικότητα της μαθηματικής παρουσίασης των παλμών κατευθυντικότητας από τους *Manroeidis and Parageorgiou (2003)* με μια καλώς καθορισμένη διαδικασία για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των σχετικών κυματιδίων. Η νέα μέθοδος επιτρέπει τον εντοπισμό και την αφαίρεση όλων των σημαντικών παλμών στο μεσαίο και μεγάλο εύρος περιόδων. Τα χαρακτηριστικά των κυματιδίων καθορίζονται με τη βοήθεια του φάσματος ταχύτητας.

4.2 Προσδιορισμός των περιόδων των σημαντικών παλμών

Μια κοινή πρακτική αποτελεί η περίοδος T_p του δεσπόζοντος παλμού που περιέχεται στις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου να καθορίζεται από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5%. Για παράδειγμα, η κλιμάκωση του μεγέθους της περιόδου του παλμού κατευθυντικότητας η οποία δίνεται από σχέσεις παλινδρόμησης, συχνά βασίζεται σε αυτό τον ορισμό (*Somerville 1998, Alavi and Krawinkler 2000, Rupakhetty et al. 2011*). Παρ' όλα αυτά, η ακρίβεια της διαδικασίας αυτής έχει αμφισβητηθεί από πολλούς ερευνητές (*Rodriguez- Marek 2000, Baker 2007*).

Ένα παράδειγμα στο οποίο αυτή η πορεία οδηγεί σε εσφαλμένα αποτελέσματα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1 για την καταγραφή *G06-320 (Gilroy Array #6)* από το σεισμό του *Coyote Lake (1979)*, για σεισμό μεγέθους $M_w = 5,7$. Στο σχήμα 4.1a εμφανίζεται η χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας, στην οποία είναι εμφανές ότι η κίνηση χαρακτηρίζεται από ένα παλμό με περίοδο κοντά στο $1,2 \text{ sec}$, η ίδια τιμή προτείνεται και από τον *Baker (2007)*. Ωστόσο, η περίοδος που αντιστοιχεί στην μέγιστη αιχμή του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για απόσβεσης 5% είναι ίση με $0,34 \text{ sec}$ (σχήμα 4.1b), ενώ η κορυφή για περίοδο $T = 1,2 \text{ sec}$ έχει σημαντικά μικρότερο πλάτος.



Σχήμα 4.1: Καταγραφή G06-320 για το σεισμό στο Coyote Lake (1979): (a) χρονοϊστορία ταχύτητας, (b) PSV για 5% απόσβεση

Είναι γνωστό ότι οι φασματικές τιμές *Fourier* της εδαφικής επιτάχυνσης είναι δυνατόν να είναι ίσες με τις αντίστοιχες φασματικές τιμές της εδαφικής ταχύτητας, εάν οι τελευταίες λάμβαναν μέρος στο τέλος της εδαφικής κίνησης (Hudson 1979). Άρα, το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας για μηδενική απόσβεση θεωρείται ότι είναι μια επαρκής περιβάλλουσα του φάσματος *Fourier* της εδαφικής επιτάχυνσης, δηλαδή:

$$\tilde{a}_g(\omega) \leq S_{v,0}(\omega) \quad (1)$$

όπου $\tilde{a}_g(\omega) = F(\ddot{a}g)$ είναι τα πλάτη του φάσματος *Fourier* της εδαφικής επιτάχυνσης $\ddot{a}g(t)$ και $S_{v,0}(\omega)$ είναι το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας για μηδενική απόσβεση.

Ομοίως, μπορεί να αποδειχτεί ότι το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης για μηδενική απόσβεση αποτελεί μια επαρκή περιβάλλουσα του φάσματος *Fourier* της εδαφικής ταχύτητας. Όντως, για ταλαντωτές μηδενικής απόσβεσης ($\xi = 0$) μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας $S_{v,0}(\omega)$ συμπίπτει με το φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας $PS_{v,0}(\omega)$, εκτός από τις περιοχές μεγάλων περιόδων.

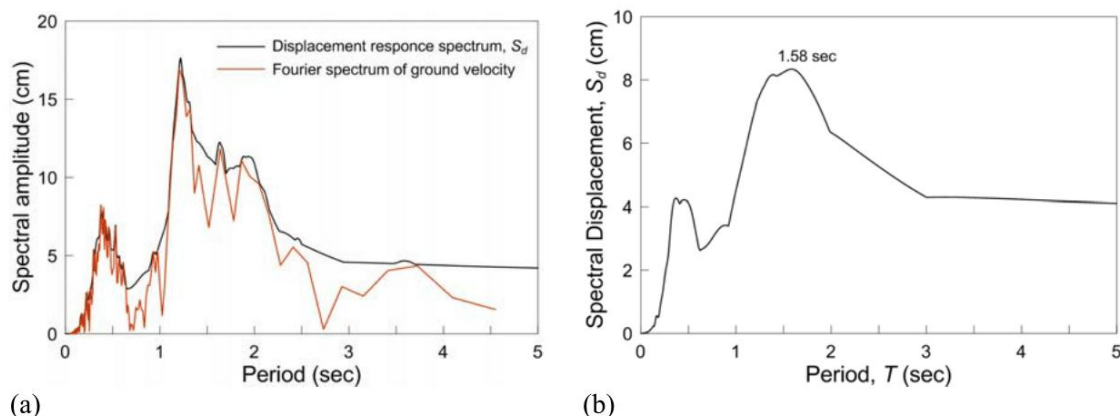
Άρα, σε ένα μεγάλο εύρος περιόδων, μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι $S_{v,0}(\omega) = \omega \cdot S_{d,0}(\omega)$, όπου $S_{d,0}(\omega)$ είναι το φάσμα απόκρισης της μετατόπισης για μηδενική απόσβεση. Διαιρώντας και τα δύο μέλη της σχέσης (1) με ω και λαμβάνοντας υπόψη ότι $\tilde{a}_g(\omega)/\omega = \tilde{v}g(\omega)$, όπου $\tilde{v}g(\omega) = F(\dot{v}g)$ είναι το φάσμα *Fourier* της εδαφικής ταχύτητας $\dot{v}g(t)$, προκύπτει η εξής σχέση:

$$\tilde{v}_g(\omega) \leq S_{d,0}(\omega) \quad (2)$$

το οποίο δείχνει ότι το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης είναι μια επαρκής περιβάλλουσα καμπύλη του φάσματος *Fourier* της εδαφικής ταχύτητας. Το σχήμα 4.2 εμφανίζει ένα παράδειγμα για την καταγραφή G06-320 από το σεισμό στο Coyote Lake (1979).

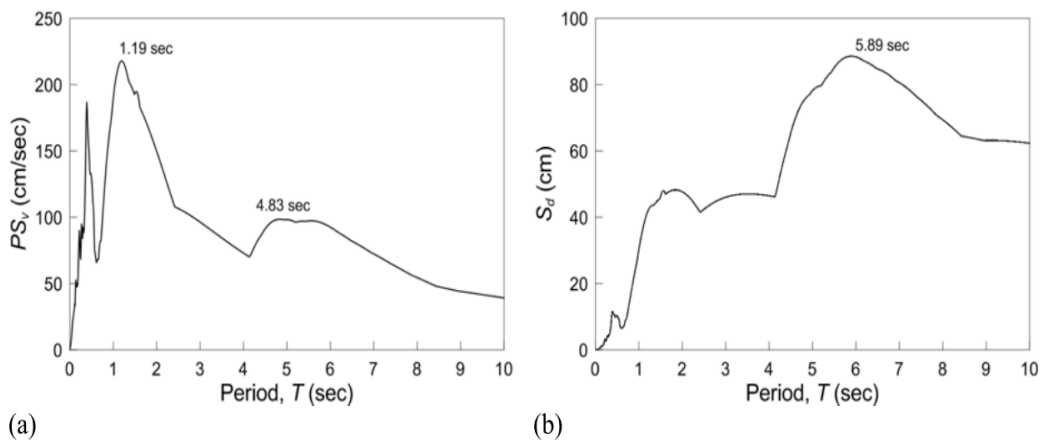
Με βάση την παραπάνω παρατήρηση και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο παλμός κατευθυντικότητας είναι δεσπόζων στη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας, θα ήταν λογικό η περίοδος του παλμού T_p να καθορίζεται από τη δεσπόζουσα περίοδο στο φάσμα απόκρισης της μετακίνησης. Για την καταγραφή G06-320, αυτός ο ορισμός οδηγεί σε

περίοδο $T_p = 1,58 \text{ sec}$ (σχήμα 4.2b) η οποία είναι κοντά στην περίοδο του παλμού ($1,2 \text{ sec}$) που μπορεί να προσδιοριστεί στην καταγραφή της εδαφικής ταχύτητας (σχήμα 4.1a).



Σχήμα 4.2: Καταγραφή G06-320 του σεισμού Coyote Lake (1979): (a) σύγκριση του φάσματος Fourier για την εδαφική ταχύτητα με το φάσμα απόκρισης μετακίνησης για μηδενική απόσβεση, (b) S_d 5%.

Ωστόσο, αυτός ο εναλλακτικός ορισμός της T_p μέσω της δεσπόζουσας περιόδου του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης δε μπορεί να γενικευτεί, αφού υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες δεν είναι έγκυρος. Ένα τέτοιο παράδειγμα δίνεται στο σχήμα 4.3 για τη συνιστώσα PCD-164 της καταγραφής Pacoima Dam από το σεισμό του San Fernando (1971). Σε αυτήν την περίπτωση, η περίοδος του παλμού κατευθυντικότητας είναι ίση με $1,47 \text{ sec}$ σύμφωνα με τους *Mavroeidis and Parageorgiou (2003)* και $1,60 \text{ sec}$ σύμφωνα με τον *Baker (2007)*. Αυτές οι τιμές είναι κοντινές στη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας (σχήμα 4.3a), ενώ η δεσπόζουσα περίοδος του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης είναι αρκετά μεγαλύτερη, ίση με $5,89 \text{ sec}$ (σχήμα 4.3b). Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι η αιχμή του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης μπορεί να επηρεαστεί από την παρουσία σφαλμάτων στις καταγραφές των εδαφικών επιταχύνσεων στην περιοχή των μεγάλων περιόδων, με αποτέλεσμα ο καθορισμός της περιόδου T_p από το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης να μην είναι αξιόπιστος σε πολλές περιπτώσεις.



Σχήμα 4.3: Καταγραφή PCD-164 από το σεισμό στο San Fernando, CA (1971): (a) φάσμα απόκρισης ψευδο- ταχύτητας για απόσβεση 5%; (b) φάσμα απόκρισης μετακίνησης για απόσβεση 5% .

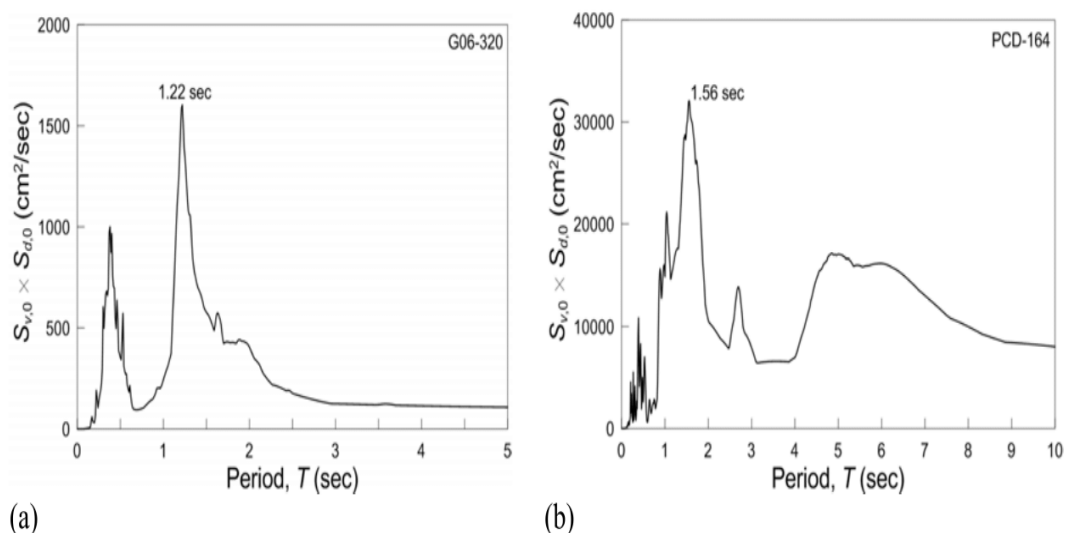
Συνεπώς, είναι εμφανές ότι η περίοδος του παλμού κατευθυντικότητας δε μπορεί να προκύψει από το φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας ή της μετακίνησης, αφού υπάρχουν περιπτώσεις που οι δύο αυτές προσεγγίσεις δίνουν αποτελέσματα που αποκλίνουν σημαντικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πολλές εδαφικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου επηρεάζονται από περισσότερους από ένα παλμούς διαφορετικών περιόδων. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία, σύμφωνα με την οποία η εύρεση όλων των σημαντικών παλμών που σχετίζονται με φαινόμενα κατευθυντικότητας προκύπτει μέσω ενός συνδυασμού των φασμάτων της ταχύτητας και της μετακίνησης.

Συγκεκριμένα, αφού οι παλμικές συνιστώσες των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου επηρεάζουν και την εδαφική επιτάχυνση και την εδαφική ταχύτητα, αν και σε διαφορετικό βαθμό, οι σημαντικές περίοδοι T_i πρέπει να ξεχωρίζουν στο ολοκλήρωμα συνέλιξης (*convolution integral*) των δύο αυτών χρονοϊστοριών. Επίσης, απομειώνεται η επιρροή των συνιστωσών υψηλών ή χαμηλών συχνοτήτων που εμπεριέχονται στην εδαφική επιτάχυνση και ταχύτητα. Συνεπώς οι κορυφές του φάσματος συνέλιξης επιτάχυνσης και ταχύτητας αντιστοιχούν στις περιόδους των σημαντικών παλμών που εμπεριέχονται στην εδαφική κίνηση.

Είναι γνωστό ότι το φάσμα *Fourier* του ολοκληρώματος συνέλιξης είναι ίσο με το παραγόμενο φάσμα *Fourier* των σημάτων για τα οποία γίνεται η συνέλιξη. Αφ' ετέρου, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας για μηδενική απόσβεση $S_{v,0}$ είναι μια περιβάλλουσα του φάσματος *Fourier* της εδαφικής επιτάχυνσης και το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης για μηδενική απόσβεση $S_{d,0}$ είναι μια περιβάλλουσα του φάσματος *Fourier* της εδαφικής ταχύτητας. Χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες αυτές, το φάσμα *Fourier* του ολοκληρώματος συνέλιξης μπορεί να προσεγγιστεί από το γινόμενο $S_{v,0} \times S_{d,0}$, το οποίο στη συνέχεια θα αναφέρεται ως φάσμα συνέλιξης (*convolution spectrum*). Επομένως, οι περίοδοι των σημαντικών παλμών μπορούν να προσδιοριστούν από τις κορυφές του φάσματος συνέλιξης.

Ένα παράδειγμα δίνεται στο σχήμα 4.4, όπου παρουσιάζονται τα φάσματα συνέλιξης για τις

καταγραφές που αναφέρθηκαν προηγουμένως, συγκεκριμένα της καταγραφής G06-320 του σεισμού στο *Coyote Lake* και της καταγραφής PCD-164 η οποία αντιστοιχεί στο σεισμό του *San Fernando*. Όπως έχει αναφερθεί ήδη, στην πρώτη περίπτωση η περίοδος του παλμού σχετίζεται με τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης, ενώ στη δεύτερη σχετίζεται με τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης της ψευδο- ταχύτητας. Η χρήση του φάσματος συνέλιξης επιτρέπει το σωστό υπολογισμό της περιόδου του παλμού και στις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 4.4: Προσδιορισμός της περιόδου κατευθυντικότητας T_i από την κορυφή του φάσματος συνέλιξης $S_{v,0} \times S_{a,0}$ για τις καταγραφές: (a) G06-320 Coyote Lake (1979), (b) PCD-164 San Fernando (1971)

Η χρήση του φάσματος συνέλιξης επιτρέπει τον εντοπισμό πιθανών πρόσθετων σημαντικών παλμών που ενδέχεται να εμπεριέχονται στην εδαφική κίνηση και σχετίζονται με το πεδίο των μεσαίων και χαμηλών συχνοτήτων. Το γεγονός ότι ίσως απαιτούνται περισσότεροι από ένα παλμοί για την αξιόπιστη προσομοίωση της εδαφικής κίνησης και την ικανοποιητική προσέγγιση των τελικών φασμάτων απόκρισης των καταγραφών, έχει τονιστεί και από τους *Mavroeidis and Papageorgiou (2003)*. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητος ο συνδυασμός περισσότερων κυματιδίων για την επαρκή αναπαράσταση της αρχικής καταγραφής.

Αυτοί οι πρόσθετοι παλμοί συνήθως εμφανίζονται ως δευτερεύουσες κορυφές στο φάσμα συνέλιξης και μπορεί να αντιστοιχούν σε μικρότερες ή μεγαλύτερες περιόδους σε σύγκριση με αυτόν του πρώτου παλμού που προκύπτει από την κορυφή του φάσματος συνέλιξης. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις αυτό δεν διακρίνεται εύκολα. Για το λόγο αυτό προτείνεται ο καθορισμός κάθε επιπρόσθετου παλμού επαναλαμβάνοντας την προαναφερθείσα διαδικασία στην εναπομένουσα εδαφική κίνηση (*residual motion*), δηλαδή στην χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας που παραμένει μετά την αφαίρεση όλων των προηγούμενων παλμών από την αρχική καταγραφή. Αυτή η διαδικασία πρέπει να επαναλαμβάνεται όσες φορές είναι απαραίτητο έτσι ώστε να εξαχθούν διαδοχικά όλοι οι σημαντικοί παλμοί.

Παρατηρείται ότι μερικοί παλμοί που εξάγονται από αυτή τη διαδικασία δεν είναι εξίσου σημαντικοί. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητος ο καθορισμός κριτηρίων, ώστε να ελέγχεται εάν ένας παλμός είναι αποδεκτός ή θα πρέπει να απορρίπτεται.

Ένα κριτήριο αφορά το χρόνο άφιξης του παλμού, αφού οι παλμοί που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία της καταγραφής δε σχετίζονται με την επιρροή των φαινομένων κατευθυντικότητας (Baker 2007). Υιοθετείται το κριτήριο που προτείνεται από τον Baker (2007) για τους παλμούς που φτάνουν αργά και σχετίζεται με το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας (Cumulative Squared Velocity), με μια μικρή τροποποίηση. Το ολοκλήρωμα $CSV(t)$ μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε χρονική στιγμή από το ολοκλήρωμα:

$$CSV = \int_0^t v_g^2(\tau) d\tau \quad (3)$$

Η συνάρτηση $CSV(t)$ υπολογίζεται για την αρχική καταγραφή και για κάθε κυματίδιο που αντιστοιχεί σε περίοδο T_i και καθορίζονται οι χρόνοι στους οποίους καθένα φτάνει το $x\%$ του συνολικού του CSV . Αυτοί οι χρόνοι συμβολίζονται ως $t_{x\%,orig}$ και $t_{x\%,pulse,i}$ για την αρχική καταγραφή και τον εκάστοτε εξαγόμενο παλμό i αντίστοιχα. Σύμφωνα με τον Baker, για να βρίσκεται ένας εξαγόμενος παλμός στην αρχή της εδαφικής κίνησης, θα πρέπει να φτάνει το 10% του συνολικού του CSV πριν η αρχική καταγραφή φτάσει το 20% του δικού της CSV , δηλαδή $t_{10\%,pulse,i} < t_{20\%,orig}$. Αυτό το κριτήριο υιοθετείται στην παρούσα μεθοδολογία για το χαρακτηρισμό ενός πρόσθετου παλμού ως σημαντικού, με την ακόλουθη τροποποίηση: Όλοι οι επόμενοι παλμοί που ξεκινούν πριν το τέλος του πρώτου παλμού θεωρούνται σημαντικοί ακόμα και εάν προκύπτει $t_{10\%,pulse,i} > t_{20\%,orig}$. Με τον τρόπο αυτό, παλμοί που τροποποιούν το δεσπόζων παλμό λαμβάνονται πάντα υπόψη.

Για τους παλμούς που ικανοποιούν το παραπάνω κριτήριο, καθιερώνεται ένα δεύτερο κριτήριο με σκοπό τη διατήρηση μόνο των σημαντικών. Αυτό το κριτήριο βασίζεται στην επιρροή του κάθε διαδοχικού παλμού στο φάσμα απόκρισης της ταχύτητας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το ολοκλήρωμα του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας CSv (cumulative response velocity spectrum), το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$CS_v = \int_0^{T_{max}} PS_{v,\xi}(T) dT \quad (4)$$

όπου $PS_{v,\xi}(T)$ είναι η φασματική ψευδο-ταχύτητα για την επιθυμητή τιμή της ιξώδους απόσβεσης ξ για περίοδο T και T_{max} είναι η μέγιστη περίοδος του φάσματος. Είναι προσιτό να χρησιμοποιείται μια αρκετά μεγάλη τιμή για την T_{max} , π.χ $T_{max} = 20 \text{ sec}$.

Πρώτα υπολογίζεται το $CS_{v,sim,i}$ για την προσομοιωμένη εδαφική κίνηση που αποτελείται από όλους τους καθορισμένους παλμούς μέχρι το βήμα αυτό (i παλμοί) και έπειτα υπολογίζεται το $CS_{v,sim,(i-1)}$, για την προσομοιωμένη εδαφική κίνηση που αποτελείται από όλους τους προηγούμενως καθορισμένους παλμούς εκτός του παλμού i ($i-1$ παλμοί). Στη συνέχεια, ο παλμός i θεωρείται σημαντικός εάν συνεισφέρει στο $CS_{v,sim}$ περισσότερο από 5%, δηλαδή εάν:

$$\frac{CS_{v,sim,i} - CS_{v,sim,(i-1)}}{CS_{v,sim,(i-1)}} \geq 5\% \quad (5)$$

Εάν ο παλμός i δεν ικανοποιεί το παραπάνω κριτήριο, τότε απορρίπτεται.

Ακόμα ένα κριτήριο λαμβάνεται υπόψη για να καθοριστεί πότε πρέπει να διακοπεί η διαδικασία, το οποίο βασίζεται στο ποσοστό ταύτισης του τεχνητού φάσματος της ψευδο-ταχύτητας. Άρα, η διαδικασία σταματά όταν ένα σημαντικό ποσοστό, γύρω στο 90%, του ολοκληρώματος του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας της αρχικής καταγραφής $CS_{v,orig}$, έχει επιτευχθεί με την προσομοίωση της εδαφικής κίνησης μέχρι αυτό το βήμα, δηλαδή όταν:

$$\frac{CS_{v,sim,i}}{CS_{v,orig}} \geq 90\% \quad (6)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κάποιος θα μπορούσε να θεωρήσει άλλα κριτήρια για τον προσδιορισμό των σημαντικών παλμών. Για παράδειγμα, ένα κριτήριο θα μπορούσε να βασίζεται στη σύγκριση της ενέργειας της εναπομένουσας κίνησης μετά την αφαίρεση ενός παλμού, με την ενέργεια της αρχικής καταγραφής. Αυτό το κριτήριο θα μπορούσε να αποτελέσει ένα δείκτη του εάν η εναπομένουσα κίνηση μετά την αφαίρεση του i παλμού, περιέχει και άλλους παλμούς που περιέχουν σημαντικό ποσοστό ενέργειας. Επειδή η ενέργεια κάθε καταγραφής υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της εδαφικής ταχύτητας CSV (*Cumulative Squared Velocity*) στο τέλος της εδαφικής κίνησης, ένα τέτοιο κριτήριο θα μπορούσε να βασίζεται στο λόγο: $CSV_{res,i} / CSV_{orig}$, όπου τα $CSV_{res,i}$ και CSV_{orig} συμβολίζουν το αθροιστικό τετράγωνο της ταχύτητας για την εναπομένουσα εδαφική κίνηση μετά την αφαίρεση του παλμού i και την αρχική εδαφική κίνηση, αντίστοιχα. Χαμηλές τιμές του λόγου $CSV_{res,i} / CSV_{orig}$ υποδηλώνουν ότι οι παλμοί που εμπεριέχονται στην εναπομένουσα κίνηση είναι μικρότερης σημασίας. Ωστόσο, ο καθορισμός ενός σταθερού ορίου στο λόγο αυτό δεν είναι εύκολος, αφού ποικίλει σημαντικά από καταγραφή σε καταγραφή, λόγω της επιρροής των συνιστωσών υψηλών συχνοτήτων της εδαφικής κίνησης στον υπολογισμό του CSV . Για το λόγο αυτό προτείνεται το κριτήριο αυτό να χρησιμοποιείται μόνο ενδεικτικά.

4.3 Προσδιορισμός των παραμέτρων των κυματιδίων

Η παρούσα μεθοδολογία αναπαριστά κάθε σημαντικό παλμό που εντοπίζεται με την προαναφερθείσα διαδικασία με ένα κυματίδιο και η εδαφική κίνηση προσομοιώνεται μέσω της υπέρθεσης των κυματιδίων αυτών. Υιοθετείται το κυματίδιο που έχει προταθεί από τους *Mavroeidis and Papageorgiou (2003)* και εφεξής θα αναφέρεται ως κυματίδιο *M&P*.

Το κυματίδιο *M&P* προέρχεται από τη σύζευξη ενός σήματος αρμονικής ταλάντωσης και μια περιβάλλουσα κωδωνοειδούς μορφής. Για τον ορισμό του παλμού χρησιμοποιούνται τέσσερις παράμετροι:

- Η περίοδος T_p της αρμονικής ταλάντωσης του κυματιδίου.
- Το πλάτος A της περιβάλλουσας, το οποίο σχετίζεται με το πλάτος της χρονοϊστορίας ταχύτητας.
- Η διάρκεια γ του κυματιδίου, η οποία μετρά τον αριθμό των ταλαντώσεων και ορίζεται ως $\gamma = t_{tot}/T_p$ όπου $\gamma > 1$ και t_{tot} η χρονική διάρκεια του κυματιδίου.
- Η διαφορά φάσης ν .

Με χρήση των παραμέτρων αυτών, η επιτάχυνση $a_p(t)$ και η ταχύτητα $v_p(t)$ του κυματιδίου μπορεί να οριστεί από τις ακόλουθες εξισώσεις (*Mavroeidis and Papageorgiou 2003*):

$$\alpha_p(t) = \left\{ \begin{array}{l} -\frac{A\pi}{\gamma T_p} \left[\begin{array}{l} \sin\left(\frac{2\pi}{\gamma T_p}(t-t_0)\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\gamma T_p}(t-t_0)+\nu\right) \\ +\gamma \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\gamma T_p}(t-t_0)+\nu\right) \cdot \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{T_p}(t-t_0)\right)\right] \end{array} \right], \quad t_0 - \frac{\gamma}{2}T_p \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2}T_p \\ 0, \quad \text{διαφορετικά} \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$\nu_p(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{A}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\gamma T_p}(t-t_0)\right) \right] \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_p}(t-t_0)+\nu\right), \quad t_0 - \frac{\gamma}{2}T_p \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2}T_p \\ 0, \quad \text{διαφορετικά} \end{array} \right\} \quad (8)$$

όπου t_0 είναι η χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στην αιχμή της περιβάλλουσας.

Προκειμένου να αντιστοιχηθεί ένα κυματίδιο $M\&P$ σε κάθε σημαντικό παλμό i , η περίοδος του παλμού T_p τίθεται ίση με την αντίστοιχη T_i . Ο καθορισμός των υπολοίπων τριών παραμέτρων του κυματιδίου, A , γ και ν , πραγματοποιείται με τη χρήση της νεοεισαχθείσας παραμέτρου CAD (*Cumulative Absolute Displacement – Αθροιστική Απόλυτη Μετατόπιση*), η οποία εισήχθη από τους *Taflampas et al. (2009)* σε αναλογία με το δείκτη CAV (*Cumulative Absolute Velocity – Αθροιστική Απόλυτη Ταχύτητα – EPRI 1991*).

Το CAD ορίζεται ως το χρονικό ολοκλήρωμα της απόλυτης εδαφικής ταχύτητας, δηλαδή:

$$CAD = \int_0^{t_{tot}} |v_g| dt \quad (9)$$

Σημειώνεται ότι ο *Baker (2007)* όπως και οι *Zamora and Riddell (2011)* έχουν επίσης χρησιμοποιήσει παρόμοιους δείκτες και συγκεκριμένα το χρονικό ολοκλήρωμα του τετραγώνου της επιτάχυνσης (*Arias 1970*) και το χρονικό ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας (*Riddell 2007*), ως δείκτες μέτρησης του παλμικού περιεχομένου μιας εδαφικής κίνησης.

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

$$S_{d,0}(T_{res}) = \pi \cdot \gamma \cdot d_{g,max} \quad (10)$$

Αφ' ετέρου, η τιμή του CAD στο τέλος του γ κύκλου μιας αρμονικής διέγερσης, είναι:

$$CAD = 4 \cdot \gamma \cdot d_{g,\max} \quad (11)$$

Ως εκ τούτου, για μια αρμονική διέγερση γ κύκλων υπάρχει μια σταθερή σχέση μεταξύ της φασματικής μετατόπισης για μηδενική απόσβεση στο συντονισμό και του CAD , η οποία μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\frac{S_{d,0}(T_{res})}{CAD} = \frac{\pi}{4} \quad (12)$$

Εάν χρησιμοποιείται ένα κυματίδιο $M\&P$ αντί μιας καθαρά αρμονικής διέγερσης, η παραπάνω σχέση συνεχίζει να διατηρείται με ικανοποιητική ακρίβεια, παρά το γεγονός ότι η περιβάλλουσα κωδωνοειδούς μορφής έχει σχηματιστεί με βάση το πλάτος της διέγερσης. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 4.5, στο οποίο παρουσιάζεται ο λόγος της μέγιστης φασματικής μετακίνησης για μηδενική απόσβεση προς το CAD ($S_{d,0,\max}/CAD$) για διαφορά φάσης ν και για $\gamma = 1.5, 2.0, 3.0$ και 5.0 . Τα αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα από την περίοδο T_p και το πλάτος A . Είναι εμφανές ότι ο λόγος $S_{d,0,\max}/CAD$ είναι κοντά στο $\pi/4$, ειδικά για παλμούς μεγάλης διάρκειας (μεγάλες τιμές του γ). Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται για $\gamma = 1.5$ και $\nu = 30^\circ$, αλλά ακόμα σε αυτή την περίπτωση το σφάλμα είναι μικρότερο από 6%.

Μια παρόμοια σχέση μεταξύ της μέγιστης φασματικής μετακίνησης και του CAD μπορεί να οριστεί και για τιμές απόσβεσης διαφορετικές από τη μηδενική. Για ένα μονοβάθμιο ταλαντωτή με λόγο ιξώδους απόσβεσης ξ και για καθαρά αρμονική διέγερση, η μετακίνηση στο συντονισμό είναι (*Clough and Penzien 1975*):

$$S_{d,\xi}(T_{res}) = \frac{1 - e^{-2\pi\gamma\xi}}{2\xi} \cdot d_{g,\max} \quad (13)$$

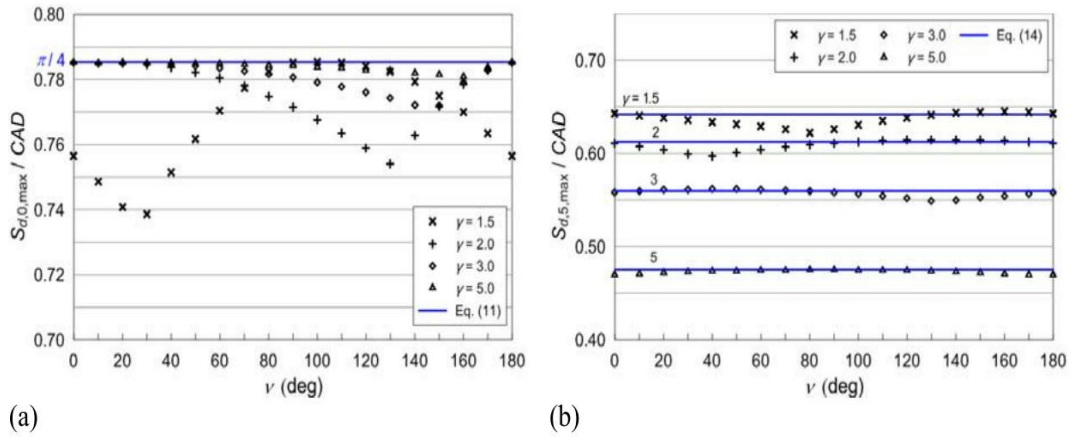
και με χρήση της εξίσωσης 12, προκύπτει:

$$\frac{S_{d,\xi}(T_{res})}{CAD} = \frac{1 - e^{-2\pi\gamma\xi}}{8\gamma\xi} \quad (14)$$

Εάν η διέγερση δεν είναι καθαρά αρμονική αλλά ένα κυματίδιο $M\&P$, η παραπάνω εξίσωση παρουσιάζει σφάλματα για μεγάλες τιμές του γ . Μια παραμετρική διερεύνηση έδειξε ότι στην περίπτωση αυτή πρέπει να ληφθεί υπόψη ένας διορθωτικός συντελεστής ίσος με $1 + (\gamma - 1)\xi$. Συνεπώς, για κυματίδια $M\&P$, εφαρμόζεται η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{S_{d,\xi}(T_{res})}{CAD} = \frac{1 - e^{-2\pi\gamma\xi}}{8\gamma\xi} [1 + (\gamma - 1)\xi] \quad (15)$$

Μια σύγκριση των τιμών που παράγονται από τη εξίσωση (15) με τις πραγματικές τιμές του λόγου $S_{d,\xi,\max}/CAD$, οι οποίες υπολογίστηκαν για διάφορες τιμές ν και γ , παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5 για $\xi = 5\%$. Είναι εμφανές ότι η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με την εξίσωση (15) είναι ικανοποιητική σε όλες τις περιπτώσεις.



Σχήμα 4.5: Σχέση μεταξύ της μέγιστης φασματικής μετακίνησης Sd,max και CAD για κυματίδιο $M\&P$ για διάφορες τιμές γ και ν . (a) μηδενική απόσβεση (b) απόσβεση 5%

Κάνοντας χρήση των εξισώσεων (12) και (15) και τη γνωστή σχέση μεταξύ του φάσματος μετακίνησης και του ψευδο-φάσματος ταχύτητας $PS_{\nu} = (2\pi/T) \cdot Sd$, μπορούν να διατυπωθούν οι εξής σχέσεις μεταξύ του CAD της PS_{ν} , για κυματίδια $M\&P$:

$$\frac{PS_{\nu,0,max}}{CAD} = \frac{\pi^2}{2T_p} \quad \xi = 0 \quad (16)$$

$$\frac{PS_{\nu,\xi,max}}{CAD} = \frac{\pi(1 - e^{-2\pi\gamma\xi})[1 + (\gamma - 1)\xi]}{4\gamma\xi T_p} \quad \xi \neq 0 \quad (17)$$

Για κυματίδια $M\&P$ η τιμή του CAD σχετίζεται άμεσα με το πλάτος A και το δείκτη διάρκειας γ , αφού ισχύει η εξής σχέση:

$$CAD = \gamma A T_p / \pi \quad (18)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι προσανατολισμένη γύρω από τις φασματικές τιμές και τα κυματίδια ορίζονται έτσι ώστε να προσαρμόζονται όσο το δυνατόν καλύτερα στο φάσμα απόκρισης της αρχικής καταγραφής. Συνεπώς, αντικαθιστώντας το CAD στις εξισώσεις (16) και (17) και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (18), προκύπτουν:

$$A_i = \frac{2PS_{\nu,0}(T_i')}{\pi\gamma_i}, \quad \xi = 0 \quad (19)$$

$$A_i = \frac{4\xi PS_{\nu,\xi}(T_i')}{(1 - e^{-2\pi\gamma_i\xi}) \cdot [1 + (\gamma_i - 1)\xi]}, \quad \xi \neq 0 \quad (20)$$

όπου ο δείκτης i αναφέρεται στο κυματίδιο που αντιστοιχεί στη δεσπόζουσα περίοδο T_i και $PS_{\nu,0}(T_i')$ και $PS_{\nu,\xi}(T_i')$ είναι οι κορυφές του φάσματος απόκρισης της ψευδο-

ταχύτητας της εδαφικής κίνησης για μηδενική απόσβεση και για λόγο ιξώδους απόσβεσης ίσο με ξ , αντίστοιχα και οι οποίες είναι πιο κοντά στην περίοδο T_i .

Σημειώνεται ότι ο όρος “εδαφική κίνηση” αναφέρεται στην αρχική καταγραφή μόνο για τον πρώτο παλμό ($i = 1$), ενώ για τους πρόσθετους παλμούς ($i \geq 2$) αναφέρεται στην “εναπομένουσα κίνηση”, η οποία προκύπτει με αφαίρεση όλων των προηγούμενων εντοπισμένων παλμών ($i = 1$ μέχρι $i-1$) από την αρχική καταγραφή.

Μεταξύ των εξισώσεων (19) και (20), για τον καθορισμό του πλάτους A_i προτιμάται η εξίσωση (20), αφού το παραγόμενο κυματίδιο θα ταιριάζει καλύτερα με τα φάσματα απόκρισης για την επιθυμητή τιμή απόσβεσης. Ωστόσο, η εξίσωση (19) θα πρέπει να χρησιμοποιείται στην περίπτωση που κάποιος θέλει να κανονικοποιήσει τα κυματίδια με τη φασματική τιμή απόκρισης για μηδενική απόσβεση.

Για τον καθορισμό του πλάτους A_i του κυματιδίου από τις εξισώσεις (19) ή (20), η τιμή της διάρκειας γ_i θα πρέπει να είναι γνωστή. Επειδή η παράμετρος αυτή είναι άγνωστη, ελέγχονται όλες οι τιμές γ_{ij} εντός ενός επιλεγμένου εύρους. Από αυτά τα ζεύγη (A_{ij}, γ_{ij}), εκείνα που οδηγούν σε πλάτη επιταχύνσεων, ταχυτήτων ή μετακινήσεων των κυματιδίων, τα οποία είναι μεγαλύτερα από τις αντίστοιχες αιχμές της εδαφικής κίνησης, PGA, PGV και PGD αντίστοιχα, απορρίπτονται.

Για τα ζεύγη (A_{ij}, γ_{ij}) που παραμένουν ως αποδεκτά και για όλες τις τιμές της διαφοράς φάσης ν_i , μεταξύ 0° και 360° , υπολογίζονται τα κυματίδια και επιλέγεται το κυματίδιο που έχει το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης με την εδαφική κίνηση. Η διαδικασία αυτή επεξηγείται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην επόμενη ενότητα.

4.4 Προτεινόμενη Μεθοδολογία σε Βήματα

Με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο που αναφέρθηκε προηγουμένως, μπορεί να εδραιωθεί μια καλώς ορισμένη διαδικασία για τον καθορισμό των σημαντικών παλμών και των

παραμέτρων των αντίστοιχων κυματιδίων $M\&P$ που αναπαριστούν καλύτερα την αρχική εδαφική κίνηση. Αυτή η μέθοδος, η οποία μπορεί εύκολα να προγραμματιστεί σε μορφή κώδικα, αποτελείται από τα εξής βήματα:

1. Για την υπό εξέταση εδαφική κίνηση παράγεται το φάσμα συνέλιξης με πολλαπλασιασμό των φασμάτων ταχύτητας και μετακίνησης για λόγο ιξώδους απόσβεσης 5%. Αν και τα φάσματα ταχύτητας και μετακίνησης για μηδενική απόσβεση αποτελούν επαρκείς περιβάλλουσες των φασμάτων *Fourier* επιτάχυνσης και ταχύτητας αντίστοιχα, γίνεται χρήση των φασμάτων για απόσβεση 5%, με στόχο την εξομάλυνση των κορυφών τους που αντιστοιχούν σε υψηλό συχνοτικό περιεχόμενο (υψίσυχνες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης).
2. Εντοπίζεται η περίοδος που αντιστοιχεί στην κορυφή του φάσματος συνέλιξης και τίθεται ίση με T_1 .
3. Υπολογίζεται το φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για την επιθυμητή τιμή του λόγου ιξώδους απόσβεσης ξ (τυπικά χρησιμοποιείται η τιμή $\xi=5\%$) και προσδιορίζεται η περίοδος T_1' , η τιμή της οποίας βρίσκεται κοντά στην T_1 και αντιστοιχεί σε μια τοπική κορυφή του φάσματος, με τιμή $PS_{\nu, \xi, \max}(T_1')$. Εάν δεν εμφανίζεται κάποια αιχμή κοντά στην περίοδο T_1 τίθεται $T_1' = T_1$. Για το βήμα αυτό προτείνεται η χρήση του φάσματος της ταχύτητας και όχι της μετακίνησης, επειδή οι κορυφές είναι σαφώς πιο διακριτές, ειδικά για μικρές περιόδους.
4. Τίθεται μια μέγιστη τιμή γ_{max} για την διάρκεια του κυματιδίου $M\&P$. Αφού η διάρκεια του κυματιδίου δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, για τον καθορισμό του κυματιδίου που αντιστοιχεί καλύτερα στη συγκεκριμένη εδαφική κίνηση

απαιτείται η σάρωση όλων των πιθανών τιμών του γ , από 1 μέχρι και γ_{max} . Για παλμούς κατευθυντικότητας σε σεισμούς κοντινού πεδίου, η τιμή $\gamma_{max} = 5$ συνήθως επαρκεί. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτούνται μεγαλύτερες τιμές, $\gamma_{max} = 10$ ή και μεγαλύτερες. Για τον προσδιορισμό των τιμών του γ προτείνεται ένα βήμα $\Delta\gamma = 0.1$ κατά τη διάρκεια σάρωσης.

Για κάθε τιμή γ_j εντός του εύρους $1 \leq \gamma_j \leq \gamma_{max}$, με βήμα $\Delta\gamma$ και για την τιμή του $PS_{v,\xi,max}(T_1')$ που καθορίστηκε στο βήμα 3, υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή του πλάτους A_j με χρήση της εξίσωσης (19) ή (20) για $\xi=0\%$.

5. Για κάθε ζεύγος (A_j, γ_j) που καθορίστηκε στο βήμα 4 και για τιμές διαφοράς φάσης ν εντός του εύρους 0° έως 360° , παράγεται το κυματίδιο $M\&P$ με χρήση των εξισώσεων (7) και (8) θέτοντας $T_p = T_1'$ και αφήνοντας το t_0 ως παράμετρο. Για τη σάρωση όλων των τιμών διαφοράς φάσης προτείνεται βήμα ίσο με $\Delta\nu=5^\circ$. Τα κυματίδια στα οποία η μέγιστη επιτάχυνση ή ταχύτητα ή μετακίνηση είναι μεγαλύτερη από την PGA , PGV ή PGD της εδαφικής κίνησης αντίστοιχα, απορρίπτονται.
6. Για κάθε αποδεκτό κυματίδιο που υπολογίστηκε στο βήμα 5 και για όλες τις τιμές t_0 από $t_0 = \gamma_j \cdot T_1'/2$ (αντιστοιχεί σε κυματίδια που ξεκινούν τη χρονική στιγμή $t = 0$) έως $t_0 = t_{max} - \gamma_j \cdot T_1'/2$ με το t_{max} να αντιστοιχεί στο τέλος της εδαφικής κίνησης (αντιστοιχεί σε κυματίδια που τελειώνουν τη χρονική στιγμή $t = t_{max}$), υπολογίζεται η συσχέτιση μεταξύ της χρονοϊστορίας ταχύτητας του κυματιδίου $v_p(t)$, όπως ορίστηκε στην εξίσωση (8) και της χρονοϊστορίας της εδαφικής ταχύτητας $v_g(t)$. Επιλέγεται το κυματίδιο με το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης και καθορίζονται οι αντίστοιχοι παράμετροι A_1 , γ_1 , ν_1 και $t_{0,1}$. Υπολογίζεται ο χρόνος έναρξης του παλμού: $t_{p,1} = t_{0,1} - \gamma_j \cdot T_1'/2$. Πρέπει να τονιστεί ότι εάν οι συντελεστές συσχέτισης για τα επιλεγμένα κυματίδια είναι αρκετά μικροί, είναι αμφισβητήσιμο το εάν η συγκεκριμένη εδαφική κίνηση μπορεί να θεωρηθεί ως παλμική.
7. Υπολογίζεται το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της εδαφικής ταχύτητας $CSV_{orig}(t)$ για την αρχική καταγραφή χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3) και προσδιορίζεται η χρονική στιγμή $t_{20\%,orig}$, στην οποία η αρχική κίνηση φτάνει το 20% του συνολικού της CSV . Επίσης, υπολογίζεται το ολοκλήρωμα του φάσματος απόκρισης της ταχύτητας $CS_{v,orig}$, με χρήση της εξίσωσης (4), για την επιθυμητή τιμή της μέγιστης περιόδου T_{max} .
8. Ελέγχεται εάν το κυματίδιο που υπολογίστηκε στο βήμα 6 αντιστοιχεί σε παλμό που φτάνει αργά στη χρονοϊστορία ταχύτητας και στην περίπτωση αυτή απορρίπτεται. Για το σκοπό αυτό, υπολογίζεται η συνάρτηση του ολοκληρώματος του τετραγώνου της εδαφικής ταχύτητας $CSV_{pulse1}(t)$ για τον παλμό και καθορίζεται η χρονική στιγμή $t_{10\%,pulse1}$, ως η χρονική στιγμή στην οποία ο παλμός φτάνει το 10% του συνολικού του CSV . Εάν $t_{10\%,pulse1} > t_{20\%,orig}$, ο παλμός απορρίπτεται και η διαδικασία συνεχίζεται στο βήμα 10. Στην αντίθετη περίπτωση εκτελείται κανονικά το βήμα 9.
9. Για το επιλεγμένο κυματίδιο υπολογίζεται το ολοκλήρωμα του φάσματος απόκρισης της ταχύτητας $CS_{v,sim}$. Επίσης, υπολογίζεται ο λόγος $CS_{v,sim}/CS_{v,orig}$, όπου $CS_{v,orig}$ είναι η αντίστοιχη τιμή για την αρχική καταγραφή, όπως ορίστηκε στο βήμα 7. Εάν ο λόγος είναι μεγαλύτερος από 90% δεν απαιτούνται επιπλέον παλμοί για την περιγραφή της εδαφικής κίνησης και η διαδικασία ολοκληρώνεται. Εάν όχι, εκτελείται το βήμα 10. Τα παρακάτω βήματα επαναλαμβάνονται για όλους τους επιπλέον σημαντικούς

παλμούς i , με $i \leq 2 \leq k$, όπου k ο συνολικός αριθμός των σημαντικών παλμών που εξετάζονται μέχρι την ικανοποίηση του κριτηρίου που δίνεται στο βήμα 14.

10. Υπολογίζεται η εναπομένουσα εδαφική κίνηση (*residual ground motion*) με αφαίρεση του κυματιδίου που υπολογίστηκε στο βήμα 6 από την αρχική καταγραφή. Αυτή η εναπομένουσα εδαφική κίνηση θεωρείται ως η αρχική εδαφική κίνηση για τα επόμενα βήματα.
11. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 έως 6 για τη νέα εδαφική κίνηση και προσδιορίζεται ο επόμενος σημαντικός παλμός i . Στα βήματα αυτά, ο δείκτης 1 αντικαθίσταται με το δείκτη του εκάστοτε παλμού i .
12. Ελέγχεται εάν το νέο κυματίδιο i που καθορίστηκε στο βήμα 6 αντιστοιχεί σε παλμό που φτάνει αργά στη χρονοϊστορία της ταχύτητας και πρέπει να απορριφθεί:
 - i. Ελέγχεται εάν η έναρξη του παλμού πραγματοποιείται πριν τη λήξη του πρώτου παλμού, δηλαδή εάν $t_{p,i} = t_{0,i} - \gamma_i \cdot T_i/2$ είναι μικρότερο από $t_{0,i} + \gamma_1 \cdot T_1/2$, όπου οι δείκτες 1 και i αναφέρονται στον πρώτο παλμό και τον παλμό i αντίστοιχα. Εάν ο παλμός ξεκινάει πριν το τέλος του πρώτου παλμού, θεωρείται αποδεκτός ανεξαρτήτως του εάν ικανοποιεί το κριτήριο του Baker (2007). Στην περίπτωση αυτή η διαδικασία συνεχίζεται στο βήμα 13. Εάν όμως ο παλμός ξεκινάει μετά το τέλος του πρώτου παλμού, δηλαδή $t_{p,i} > t_{0,i} + \gamma_1 \cdot T_1/2$, η διαδικασία συνεχίζεται στο βήμα 12(ii).
 - ii. Υπολογίζεται η συνάρτηση του ολοκληρώματος του τετραγώνου της ταχύτητας $CSV_{pulse,i}(t)$ για το κυματίδιο i και υπολογίζεται η χρονική στιγμή $t_{10\%,pulse,i}$. Εάν $t_{10\%,pulse,i} > t_{20\%,orig}$, όπου η χρονική στιγμή $t_{20\%,orig}$ υπολογίστηκε στο βήμα 8 για την αρχική καταγραφή (και όχι την εναπομένουσα), ο παλμός απορρίπτεται ως παλμός που φτάνει αργά στη χρονοϊστορία της ταχύτητας και η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το βήμα 10, χωρίς αλλαγή του δείκτη i . Εάν ο παλμός δε φτάνει αργά στη χρονοϊστορία, η διαδικασία συνεχίζεται στο επόμενο βήμα.
13. Γίνεται υπέρθεση του παλμού i με όλους τους προηγούμενους παλμούς 1 έως και $i-1$ που κρίθηκαν αποδεκτοί, ώστε να καθοριστεί η σειρά των κυματιδίων για την προσομοίωση της εδαφικής κίνησης.
14. Υπολογίζεται το ολοκλήρωμα του φάσματος απόκρισης της ταχύτητας $CS_{v,sim,i}$ για την τεχνητή κίνηση, όπως καθορίστηκε στο βήμα 13 και εκτελούνται οι παρακάτω έλεγχοι:
 - i. Υπολογίζεται η διαφορά: $\Delta CS_v = CS_{v,sim,i} - CS_{v,sim,(i-1)}$, όπου $CS_{v,sim,(i-1)}$ είναι το ολοκλήρωμα του φάσματος απόκρισης της ταχύτητας για τη σειρά των $(i-1)$ σημαντικών παλμών που έχουν εντοπιστεί πριν την επιλογή του παλμού i . Ελέγχεται εάν ο λόγος $\Delta CS_v / CS_{v,sim,(i-1)} < 5\%$. Εάν ναι, ο παλμός θεωρείται ασήμαντος και απορρίπτεται, ενώ η διαδικασία επιστρέφει στο βήμα 10 για την εύρεση του επόμενου παλμού. Εάν ο λόγος $\Delta CS_v / CS_{v,sim,(i-1)} > 5\%$, τότε ο παλμός θεωρείται σημαντικός και η διαδικασία συνεχίζεται στο βήμα 14(ii).
 - ii. Υπολογίζεται ο λόγος $CS_{v,sim,i} / CS_{v,orig}$, όπου η τιμή $CS_{v,orig}$ είναι η τιμή του ολοκληρώματος του φάσματος απόκρισης της ταχύτητας CS_v της αρχικής καταγραφής, όπως ορίστηκε στο βήμα 9. Εάν $CS_{v,sim,i} / CS_{v,orig} > 90\%$, δεν

απαιτείται η εύρεση πρόσθετων παλμών. Εάν όχι, η διαδικασία επιστρέφει στο βήμα 10 για την εύρεση του επόμενου παλμού.

Μετά το τέλος της παραπάνω διαδικασίας οι k παλμοί που θεωρούνται αποδεκτοί επαναριθμούνται, αφού διαταχθούν σε φθίνουσα σειρά με βάση τις περιόδους τους, δηλαδή $T_1 > T_2 > \dots > T_k$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΤΟ CAD ΩΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΥΠΑΡΞΗΣ ΠΑΛΜΟΥ

5.1 Εισαγωγή

Οι σεισμικές καταγραφές στις οποίες εμπεριέχεται ένας ή περισσότεροι παλμοί στη χρονοϊστορία της ταχύτητας αποτελούν μια ειδική κατηγορία εδαφικών κινήσεων ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, αφού είναι ικανές να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες σε ένα μεγάλο εύρος κατασκευών. Οι παλμοί που ενέχονται στις κινήσεις αυτές οφείλονται τυπικά σε φαινόμενα κατευθυντικότητας εντός μιας ζώνης κοντινού πεδίου και σπάνια σε άλλες αιτίες. Μέχρι τώρα, ο χαρακτηρισμός μιας καταγραφής ως παλμικής έχει βασιστεί στην παρατήρηση ότι το παλμικό μέρος της εδαφικής κίνησης περιέχει ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής ενέργειας της καταγραφής.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια διαφορετική προσέγγιση για τον καθορισμό της δεσπόζουσας περιόδου του παλμού και την κατάταξη των καταγραφών σε παλμικές και μη, όπως έχει προταθεί από τους ερευνητές *B. Καρδούτσου, Ι. Ταφλαμπάς, Ι. Ψυχάρης (2014)* και βασίζεται στην τιμή της νεοεισαχθείσας έννοιας *CAD (Taflampas et al. 2009)*.

Το *CAD (Cumulative Absolute Displacement – Αθροιστική Απόλυτη Μετακίνηση)* που ορίζεται ως το ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής της εδαφικής ταχύτητας συγκρίνεται με τη φασματική μετακίνηση για μηδενική απόσβεση $S_{d,o}(T_p)$, που αντιστοιχεί στη δεσπόζουσα περίοδο T_p του παλμού που εντοπίζεται στη χρονοϊστορία των ταχυτήτων. Έχει αποδειχτεί ότι για παλμικές εδαφικές κινήσεις, ο λόγος $S_{d,o}(T_p)/CAD$ παίρνει τιμές κοντά στο $\pi/4$, ενώ για μη παλμικές εδαφικές κινήσεις η τιμή του λόγου είναι σημαντικά μικρότερη. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου έχει επαληθευτεί στην αρχική δημοσίευση εισαγωγής της (*Kardoutsou et al. 2014*) με εφαρμογή της σε ένα δείγμα 229 καταγραφών της βάσης δεδομένων *NGA*, για τις οποίες η Μέγιστη Εδαφική Ταχύτητα είναι $PGV > 30 \text{ cm/s}$.

Η αυξημένη πυκνότητα καταγραφικών σταθμών σε περιοχές που βρίσκονται κοντά σε ρήγματα έχει επιτρέψει τη συλλογή πλήθους καταγραφών κοντινού πεδίου, οι οποίες εμφανίζουν χαρακτηριστικά με σημαντικές διαφορές σε σχέση με τις καταγραφές μακριά από το ρήγμα. Η κύρια διαφορά οφείλεται στην παρουσία μεγάλων παλμών στη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας, κυρίως σε θέσεις που βρίσκονται στην περιοχή έμπροσθεν της επιφάνειας διάρρηξης του ρήγματος και προκαλείται από τα φαινόμενα κατευθυντικότητας.

Οι καταγραφές που περιέχουν τέτοιους παλμούς χαρακτηρίζονται ως παλμικές (pulse like records) και παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα πεδία της Τεχνικής Σεισμολογίας και της Αντισεισμικής Μηχανικής, ειδικά όσον αφορά τον Αντισεισμικό Σχεδιασμό με Στάθμες Επιτελεστικότητας (Performance Based Design), λόγω των επιδράσεών τους στα ελαστικά και ανελαστικά φάσματα απόκρισης (*Bertero et al. 1978, Somerville 1997, 1998 & 2003, Alavi and Krawinkler 2000 & 2004, Luco and Cornell 2007, Zhai et al. 2007, Sehhati et al. 2011, Champion and Liel 2012*).

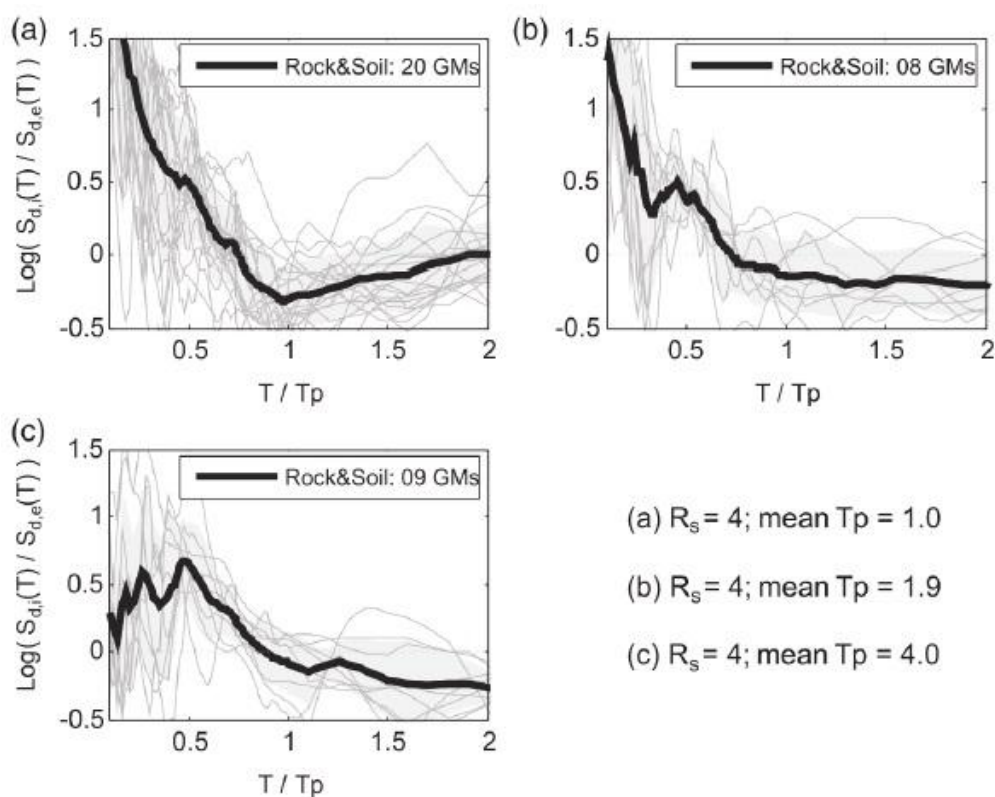
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αν και στην πλειονότητα των παλμικών καταγραφών η εμφάνιση του παλμού οφείλεται στην ύπαρξη συνθηκών κοντινού πεδίου (παλμοί κατευθυντικότητας), σημαντικοί παλμοί μπορεί να προκληθούν και από άλλες αιτίες, όπως είναι τα φαινόμενα που δημιουργούνται σε μια γεωλογική λεκάνη (basins effects), οι

εδαφικές συνθήκες, η βαθιά διάρρηξη (deep rupture) κ.α. (Rodriguez-Marek 2000, Baker 2007). Στα πλαίσια της διαδικασίας που περιγράφεται παρακάτω λαμβάνονται υπόψη όλοι οι εμφανιζόμενοι παλμοί, χωρίς περαιτέρω διερεύνηση της αιτίας που προκαλεί τον παλμό.

5.2 Διεγέρσεις κοντινού πεδίου και ανελαστική απαίτηση

Σε ότι αφορά τα ελαστικά φάσματα απόκρισης, οι παλμοί κατευθυντικότητας προκαλούν μια επαύξηση κωδωνοειδούς μορφής στα φάσματα μετακινήσεων στο πεδίο περιόδων κοντά στη δεσπόζουσα περίοδο του παλμού T_p (Shahi & Baker, 2011). Για τα ανελαστικά φάσματα απόκρισης, η πλαστιμότητα μ είναι αρκετά μεγαλύτερη από το συντελεστή συμπεριφοράς q_y για περιόδους μικρότερες από την περίοδο του παλμού (Iervolino and Cornell, 2008). Όσο η περίοδος μειώνεται, ο λόγος πλαστιμότητας - συντελεστή συμπεριφοράς αυξάνεται. Για περιόδους ίσες ή μεγαλύτερες από τη δεσπόζουσα περίοδο του παλμού, ο λόγος αυτός παίρνει τιμές κοντά στη μονάδα και επικρατεί η παραδοχή των "ίσων μετακινήσεων" δηλαδή $\mu = q_y$.

Αυτή η παρατήρηση προκύπτει από τις μελέτες των Tothong and Cornell (2006), οι οποίοι δημιούργησαν για ένα μονοβάθμιο σύστημα (SDOF oscillator) με σταθερό συντελεστή $q_y = 4,0$, μετελαστική δυσκαμψία με κράτυνση ίση με το 5% της ελαστικής (hardening stiffness) και λόγο ιξώδους απόσβεσης 5%, το λόγο της ανελαστικής προς την ελαστική μετακίνηση ($S_{d,i}[T]/S_{d,e}[T]$) και την παρέστησαν γραφικά ως προς την περίοδο ταλάντωσης ανηγμένη ως προς τη δεσπόζουσα περίοδο του παλμού (T/T_p), για τρεις τιμές της περιόδου του παλμού.



Σχήμα 5.1: Λόγοι απαίτησης ανελαστικής προς ελαστικής μετακίνησης παλμικών καταγραφών (Tothong and Cornell, 2006).

Στα διαγράμματα αυτά παρατηρείται μια τοπική επαύξηση του λόγου $S_{d,i}/S_{d,e}$ κοντά στην περιοχή περιόδων $T \approx 0,5 \cdot T_p$, γεγονός που υποδηλώνει την απαίτηση μιας σημαντικά αυξημένης ανελαστικής απαίτησης στην περιοχή αυτή. Δηλαδή, στις ανελαστικές αναλύσεις αναμένεται η απαίτηση αυξημένης πλαστιμότητας για τις κατασκευές που έχουν ιδιοπερίοδους κοντά στη μισή ιδιοπερίοδο του δεσπόζοντος παλμού, όπου η περίοδος του παλμού έχει προκύψει από τα ελαστικά φάσματα απόκρισης. Στην περίπτωση (α) του σχήματος 5.1 όπου η περίοδος του παλμού είναι μικρή, η επαύξηση αυτή υπερκαλύπτεται από τις συνιστώσες υψηλού συχνοτικού περιεχομένου της διέγερσης.

5.3 Άλλες μέθοδοι ταξινόμησης των εδαφικών κινήσεων

Οι παλμοί ταχύτητας που εμπεριέχονται στις καταγραφές των εδαφικών κινήσεων είναι συνήθως εμφανείς στη χρονοϊστορία της ταχύτητας. Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων τους, διάφοροι ερευνητές έχουν παρουσιάσει διαφορετικές μεθόδους για την προσομοίωση και εξαγωγή του σημαντικού παλμού, κυρίως χρησιμοποιώντας κυματική ανάλυση.

Οι *Mavroeidis and Papageorgiou (2003)* έχουν προτείνει ένα πολύ αποτελεσματικό προσομοίωμα για τη μαθηματική απεικόνιση του παλμού με βάση το πλάτος, την περίοδο, την διάρκεια και τη φάση του βήματος. Το μοντέλο περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.

Επίσης, ο *Baker (2007)* έχει αναπτύξει μια νέα μέθοδο για τον εντοπισμό των παλμών που εμπεριέχονται στις εδαφικές κινήσεις. Η διαδικασία στηρίζεται στην επεξεργασία των σημάτων με βάση κυματίδια για την αναγνώριση και την εξαγωγή του μεγαλύτερου παλμού ταχυτήτων από την εδαφική κίνηση, εφαρμόζοντας δύο κριτήρια: Πρώτον ο παλμός φτάνει νωρίς στη χρονοϊστορία της εδαφικής κίνησης και δεύτερον, η απόλυτη τιμή του πλάτους του παλμού της ταχύτητας είναι μεγάλη. Παρά το γεγονός ότι η μέθοδος αυτή είναι απλή και οδηγεί στην εδραίωση ενός δείκτη για μια ποσοτική κατηγοριοποίηση των καταγραφών κοντινού πεδίου, μερικές φαινομενικά παλμικές καταγραφές δε μπορούν να αναγνωριστούν.

Μια διαφορετική μέθοδος για την αναγνώριση των παλμικών καταγραφών έχει προταθεί από τους *Zhai et al. (2013)*, η οποία βασίζεται σε ενεργειακά κριτήρια. Συγκεκριμένα, οι εδαφικές κινήσεις στις οποίες ο δεσπόζων παλμός ταχύτητας ενέχει τιμές ενέργειας μεγαλύτερες από ένα συγκεκριμένο ποσοστό της συνολικής ενέργειας της καταγραφής, κατατάσσονται ως παλμικές. Ωστόσο, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα των δύο παραπάνω μεθόδων.

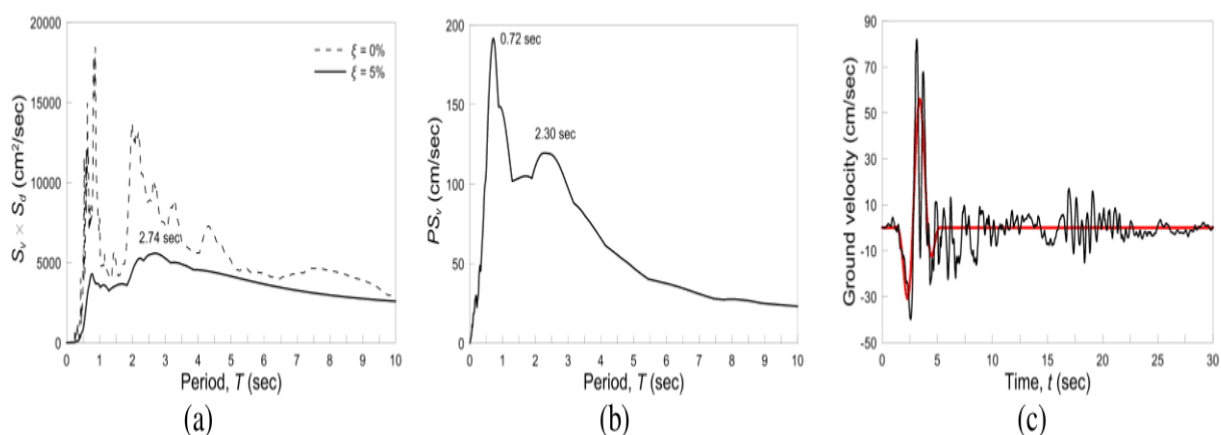
5.4 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού

Μια συχνή τακτική προσδιορισμού της περιόδου T_p του δεσπόζοντος παλμού μιας παλμικής εδαφικής κίνησης βασίζεται στην κορυφή του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5% (*Alavi and Krawinkler 2000*). Ωστόσο, η ακρίβεια αυτής της μεθόδου έχει αμφισβητηθεί από αρκετούς ερευνητές (*Rodriguez-Marek 2000, Baker 2007*).

Μια διαφορετική μέθοδος έχει προταθεί από τους *Zhai et al. (2013)*, η οποία ονομάζεται “*The Peak Point Method*” (Μέθοδος του Σημείου Αιχμής), σύμφωνα με την οποία η περίοδος του παλμού είναι ίση με το χρονικό διάστημα ενός κύκλου, που περιέχει τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV, μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή βαθών ανάλογα με το αν η PGV έχει θετική ή αρνητική τιμή.

Η μέθοδος που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό (V. Kardoutsou, I. Taflampas, I. Psycharis) για τον καθορισμό της περιόδου του δεσπόζοντος παλμού T_p , πραγματοποιείται με τη διαδικασία που περιγράφηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο (P. Mimoglou, I. Psycharis, I. Taflampas 2014). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η περίοδος του δεσπόζοντος παλμού καθορίζεται από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος συνέλιξης (convolution spectrum ή product spectrum) $S_d \times S_v$, όπου S_d είναι το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης και S_v το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας για απόσβεση 5%. Η διαδικασία βασίζεται στην παρατήρηση ότι επειδή ο δεσπόζοντος παλμός επηρεάζει την εδαφική επιτάχυνση και ταχύτητα, σε διαφορετικό βαθμό βεβαίως, η περίοδος του παλμού T_p πρέπει να επικρατεί στο φάσμα συνέλιξης των δύο χρονοϊστοριών και να αντιστοιχεί στην κορυφή του φάσματος Fourier.

Για παράδειγμα, η μέθοδος εφαρμόζεται για την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα μιας σεισμικής καταγραφής από το σεισμό του Cape Mendocino (1992) στο Petrolia. Η τιμή της περιόδου του παλμού προκύπτει με βάση τα παραπάνω ίση με: $T_p = 2,74$ sec (σχήμα 5.2a), μια τιμή κοντά στην περίοδο των 3,0 sec που έχει προταθεί από τον Baker (2007). Ωστόσο, όπως εμφανίζεται στο σχήμα 5.2b, αυτή η τιμή είναι κοντά στη δεύτερη κορυφή του φάσματος ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5% (ίση με 2,30 sec) και όχι στην περίοδο στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη αιχμή της ψευδο-ταχύτητας (που είναι ίση με 0,72 sec). Στο σχήμα 5.2c συγκρίνεται η μορφή του παλμού, όπως εξάγεται με βάση την παραπάνω μεθοδολογία, με τη χρονοϊστορία ταχύτητας της αρχικής καταγραφής και η ταύτιση είναι ικανοποιητική.



Σχήμα 5.2: Καταγραφή Petrolia από το σεισμό στο Cape Mendocino, 1992: (a) Φάσμα συνέλιξης $S_d \times S_v$, (b) Φάσμα ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5%, (c) χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας και ο υπολογισμένος δεσπόζων παλμός (Mimoglou 2014).

5.5 Νέα μέθοδος ταξινόμησης των εδαφικών κινήσεων

Μέχρι πρότινος, η κατηγοριοποίηση των εδαφικών κινήσεων σε παλμικές ή μη παλμικές έχει βασιστεί στην υπόθεση ότι η ενέργεια μιας παλμικής εδαφικής κίνησης συγκεντρώνεται στο χρονικό διάστημα εκδήλωσης του παλμού. Αυτό υπονοεί ότι η επιβαλλόμενη στις κατασκευές παραμόρφωση συγκεντρώνει ενέργεια σε ένα ή λίγους υστερητικούς κύκλους.

Όσον αφορά την κατηγοριοποίηση αυτή, διαφορετικά κριτήρια έχουν οριστεί από διαφορετικούς ερευνητές. Ο *Baker (2007)* πρότεινε ένα παλμικό δείκτη ο οποίος λαμβάνει υπόψη το λόγο της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας *PGV* της αρχικής καταγραφής προς τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα *PGV* της εναπομένουσας καταγραφής (μετά την αφαίρεση του παλμού ταχυτήτων από την αρχική καταγραφή) καθώς και το λόγο των ενεργειών της αρχικής και της εναπομένουσας κίνησης. Όσον αφορά τον τελευταίο, ο δείκτης των ενεργειών προκύπτει από το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της εδαφικής ταχύτητας. Αυτός ο παλμικός δείκτης παίρνει τιμές από 0 έως 1. Εάν η τιμή του είναι μεγαλύτερη από 0.85, η καταγραφή θεωρείται παλμική, ενώ αν είναι μικρότερη από 0.15, η καταγραφή θεωρείται μη παλμική. Για ενδιάμεσες τιμές η μέθοδος δεν είναι αποτελεσματική.

Ένας παρόμοιος δείκτης προτάθηκε από τους *Zhai et al. (2013)*, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που εμπεριέχεται στον παλμό της ταχύτητας προς τη συνολική ενέργεια της καταγραφής. Εάν ο λόγος αυτός είναι μεγαλύτερος από 0.3 η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως παλμική. Ένα εμφανές μειονέκτημα της διαδικασίας αυτής είναι ότι λαμβάνει υπόψη μόνο ένα κύκλο της εδαφικής κίνησης, ενώ ο αριθμός των κύκλων μπορεί να είναι μεγαλύτερος.

Η νέα μέθοδος που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό κάνει χρήση της νεοεισαχθείσας παραμέτρου *CAD* (Cumulative Absolute Displacement) (*Taflampas et al. 2009*), σε αναλογία με τη παράμετρο *CAV* (Cumulative Absolute Velocity) (*EPRI 1991*) η οποία ορίζεται ως το χρονικό ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής της εδαφικής ταχύτητας, όπως περιγράφηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, δηλαδή:

$$CAD = \int_0^{t_{tot}} |v_g| dt \quad (1)$$

Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται στην παραδοχή ότι για μια αρμονική κίνηση ενός αριθμού κύκλων, η οποία επιβάλλεται ως διέγερση βάσης σε ένα μονοβάθμιο ταλαντωτή χωρίς απόσβεση (*undamped SDOF oscillator*), υπάρχει μια σταθερή σχέση μεταξύ της φασματικής μετακίνησης στο συντονισμό για μηδενική απόσβεση και του *CAD*, η οποία εκφράζεται ως (*Mimoglou et al. 2014*):

$$\frac{S_{d,0}(T_{res})}{CAD} = \frac{\pi}{4} \quad (2)$$

Η εξίσωση 2 υπαινίσσεται ότι για εδαφικές κινήσεις που χαρακτηρίζονται από παλμούς ταχύτητας, το φάσμα απόκρισης μετακίνησης για μηδενική απόσβεση, το οποίο αποτελεί μια προσέγγιση του φάσματος *Fourier* της εδαφικής ταχύτητας, θα πρέπει να εμφανίζει μια μεγάλη επαύξηση κοντά στην περίοδο του παλμού T_p και ο λόγος $S_{d,0}(T_p)/CAD$ θα πρέπει να είναι κοντά στην τιμή $\pi/4$. Αντιθέτως, για μη παλμικές εδαφικές κινήσεις, το φάσμα *Fourier* της εδαφικής ταχύτητας είναι πιο επίπεδο, με αποτέλεσμα να προκύπτει μια τιμή του λόγου $S_{d,0}(T_p)/CAD$ σημαντικά

μικρότερη από $\pi/4$. Για τον υπολογισμό αυτού του δείκτη προτείνεται το CAD να μην υπολογίζεται για όλη τη χρονοϊστορία της εδαφικής κίνησης, αλλά για ένα μικρότερο χρονικό διάστημα, από τη χρονική στιγμή t_{min} μέχρι τη στιγμή t_{max} , όπου t_{min} είναι η χρονική στιγμή στην οποία η εδαφική ταχύτητα υπερβαίνει την τιμή $0.4 \cdot PGV$ για πρώτη φορά και t_{max} είναι η χρονική στιγμή που η εδαφική ταχύτητα υπερβαίνει την τιμή $0.4 \cdot PGV$ για τελευταία φορά, δηλαδή:

$$CAD = \int_{t_{min}}^{t_{max}} |v_g| dt \quad (3)$$

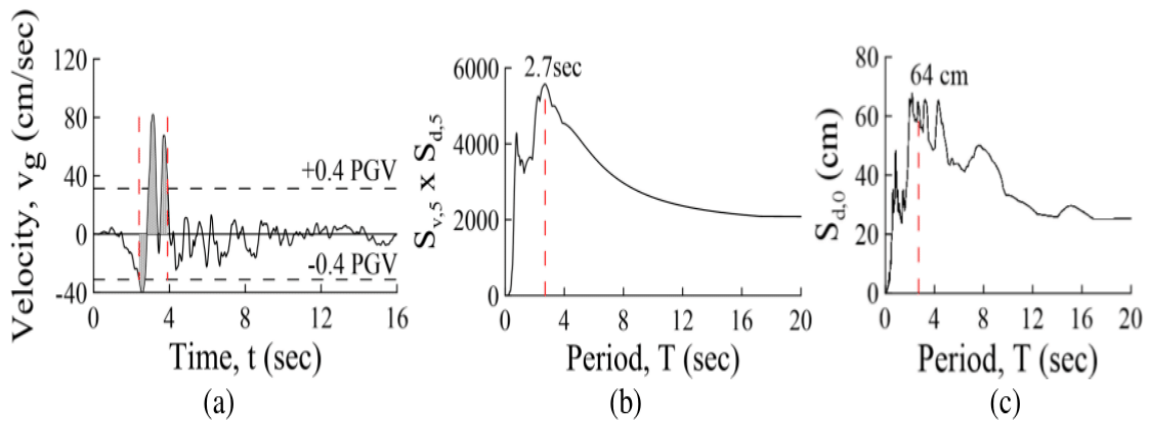
Είναι εμφανές από τα παραπάνω ότι ο λόγος $S_{d,o}(T_p)/CAD$, όπου $S_{d,o}(T_p)$ είναι η τιμή της φασματικής μετακίνησης για μηδενική απόσβεση που αντιστοιχεί στην τιμή της δεσπόζουσας περιόδου του παλμού T_p και CAD όπως ορίζεται στην εξίσωση (3) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης του αν μια καταγραφή είναι παλμική ή μη παλμική. Όπως ορίστηκε στην εξίσωση (3) το όριο για αυτή την κατηγοριοποίηση μπορεί να τεθεί σε μια τιμή κάπως μικρότερη από $\pi/4$. Με βάση τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από αυτή τη μέθοδο και τις μεθόδους των *Baker (2007)* και *Zhai et al. (2013)* που αναφέρθηκαν προηγουμένως, προτείνεται το όριο να τίθεται σε μια τιμή κοντά στο $\pi/5$ ($= 0.628$).

Πιο συγκεκριμένα, το προτεινόμενο κριτήριο είναι το εξής:

- Αν ο λόγος $S_{d,o}(T_p)/CAD$ είναι μεγαλύτερος από 0.65, η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως *παλμική*.
- Αν ο λόγος $S_{d,o}(T_p)/CAD$ είναι μικρότερος από 0.55, η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως *μη παλμική*.
- Οι καταγραφές για τις οποίες ο λόγος παίρνει τιμές $0.55 < S_{d,o}(T_p)/CAD < 0.65$ θεωρούνται *ασαφείς*.

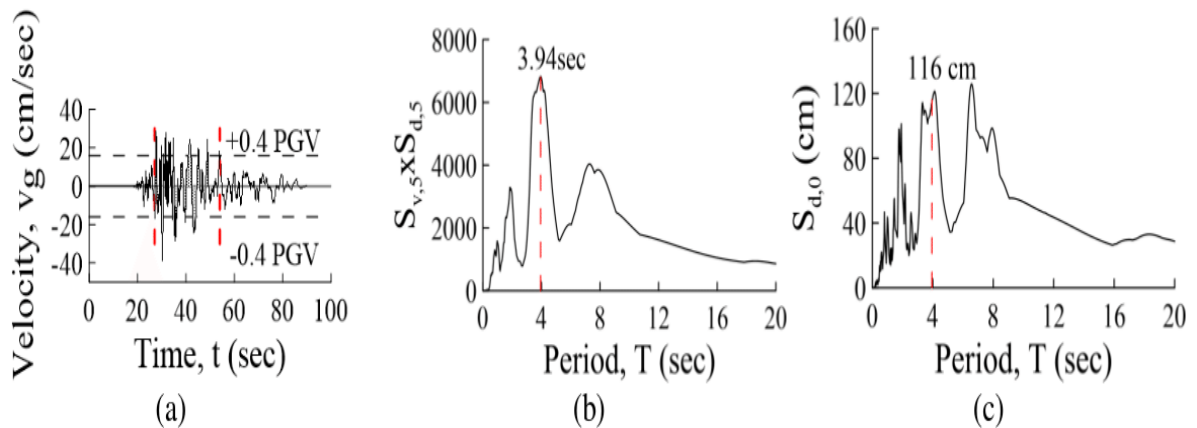
Ως παράδειγμα, εφαρμόζεται η προτεινόμενη μέθοδος σε μια γνωστή παλμική καταγραφή από το σεισμό στο *Cape Mendocino (Petrolia), 1992*. Στην περίπτωση αυτή είναι:

$t_{min} = 2.4 \text{ sec}$ και $t_{max} = 3.9 \text{ sec}$ (σχήμα 5.3) και η εφαρμογή της εξίσωσης (3) δίνει $CAD = 75.04 \text{ cm}$. Η περίοδος του παλμού υπολογίζεται από την κορυφή του φάσματος συνέλιξης $S_d \times S_v$ για απόσβεση 5% και είναι ίση με: $T_p = 2.7 \text{ sec}$. (σχήμα 5.3). Η τιμή της φασματικής μετακίνησης για μηδενική απόσβεση που αντιστοιχεί στην περίοδο του παλμού είναι: $S_{d,o}(T_p) = 64 \text{ cm}$. Συνεπώς, ο λόγος $S_{d,o}(T_p)/CAD = 0.85$, είναι σημαντικά μεγαλύτερος από 0,65, και η καταγραφή κατατάσσεται ως παλμική.



Σχήμα 5.3: Σεισμός του Cape Mendocino, 1992: (a) χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας. Οι σκιασμένες επιφάνειες υποδεικνύουν το τμήμα της καταγραφής για το οποίο υπολογίζεται το CAD σύμφωνα με την εξίσωση (3), (b) Φάσμα συνέλιξης $S_{d \times S_v}$ για απόσβεση 5%. (c) Φάσμα απόκρισης μετατόπισης για μηδενική απόσβεση.

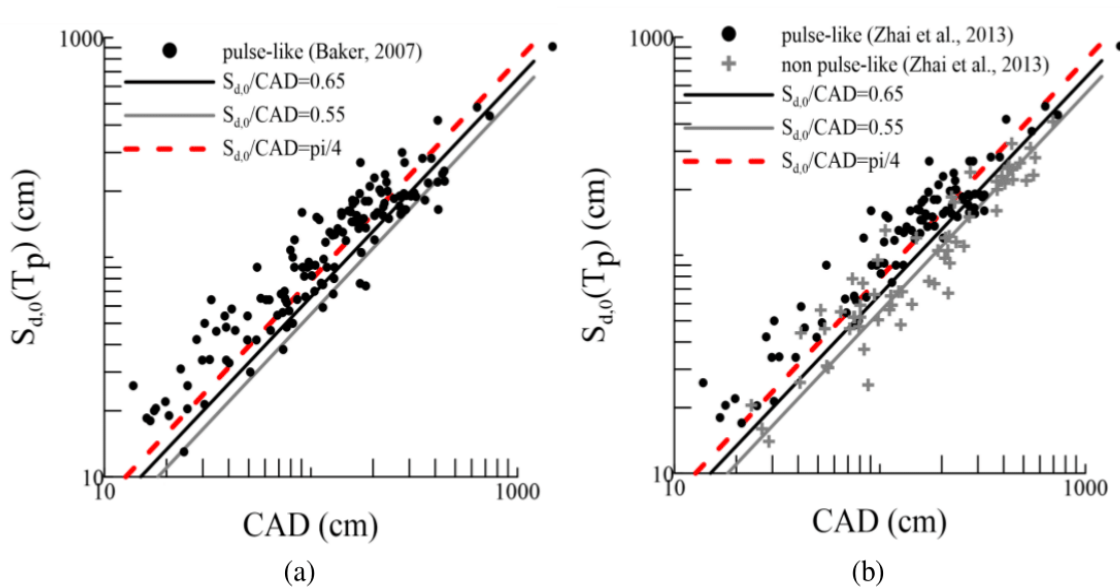
Ως ένα δεύτερο παράδειγμα, θεωρείται μια μη παλμική καταγραφή και συγκεκριμένα η καταγραφή CHY036 από το σεισμό του Chi-Chi 1999. Στην περίπτωση αυτή είναι: $t_{min} = 27 \text{ sec}$ και $t_{max} = 54 \text{ sec}$ (σχήμα 5.4) και εφαρμογή της εξίσωσης (3) δίνει $CAD = 235 \text{ cm}$. Το φάσμα συνέλιξης $S_d \times S_v$ για απόσβεση 5% παρουσιάζει τη μέγιστη αιχμή του για περίοδο $T_p = 3.94 \text{ sec}$ (σχήμα 5.4) και από το φάσμα απόκρισης της μετατόπισης για μηδενική απόσβεση βρίσκεται ότι: $S_{d,0}(T_p) = 116 \text{ cm}$. Συνεπώς, είναι: $S_{d,0}(T_p)/CAD = 0.49 < 0.55$ συνεπώς η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως μη παλμική.



Σχήμα 5.4: Καταγραφή CHY036 από το σεισμό στο Chi-Chi, 1999: (a) χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας, (b) Φάσμα συνέλιξης $S_{d \times S_v}$ για απόσβεση 5%, (c) φάσμα απόκρισης μετατόπισης για μηδενική απόσβεση.

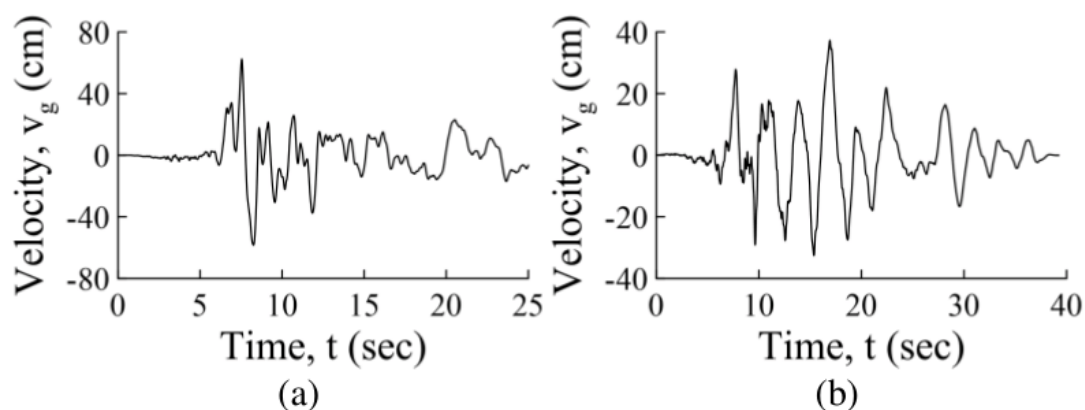
5.6 Σύγκριση με άλλες μεθόδους

Η μεθοδολογία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο αυτό εφαρμόστηκε σε 91 καταγραφές που έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές από το Baker (2007) και σε ένα σύνολο 160 καταγραφών που χρησιμοποιήθηκαν από τους Zhai et al. (2013). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα 5.5a και 5.5b αντίστοιχα, στο επίπεδο $S_{d,0}(T_p)$ - CAD, στο οποίο οι μαύρες κουκίδες αντιστοιχούν σε παλμικές καταγραφές και οι γκρι σταυροί σε μη παλμικές, ανάλογα με την κατηγοριοποίηση που έγινε στις αρχικές δημοσιεύσεις των δύο ερευνητών. Στα ίδια σχήματα εμφανίζονται οι γραμμές που αντιστοιχούν στα όρια της μεθόδου που αναφέρθηκαν παραπάνω, $S_{d,0}(T_p)/CAD = 0.55$ και $S_{d,0}(T_p)/CAD = 0.65$. Επίσης, δείχνεται η γραμμή που αντιστοιχεί στις τιμές με: $S_{d,0}(T_p)/CAD = \pi/4$ για περαιτέρω σύγκριση.



Σχήμα 5.5: $S_{d,0}(T_p)$ ως προς το CAD για τις καταγραφές που έχουν εξεταστεί από τους (a) Baker (2007) και (b) Zhai et al. (2013). Οι μαύρες κουκίδες αντιστοιχούν σε παλμικές καταγραφές και οι γκρι σταυροί σε μη παλμικές σύμφωνα με την ταξινόμηση που έχει γίνει στις αρχικές δημοσιεύσεις.

Είναι εμφανές ότι στις περισσότερες περιπτώσεις οι μαύρες κουκίδες βρίσκονται πάνω από την ευθεία $S_{d,0}(T_p)/CAD = 0.65$ και οι γκρι σταυροί βρίσκονται κάτω από την ευθεία $S_{d,0}(T_p)/CAD = 0.55$. Υπάρχουν λίγες μόνο περιπτώσεις στις οποίες η μεθοδολογία έρχεται σε αντίθεση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του Baker και των Zhai et al. Δύο παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων εμφανίζονται στο σχήμα 5.6 για τις καταγραφές Hollister City Hall (σχήμα 5.6a) και Sunnyvale - Colton Ave. (σχήμα 5.6b) του σεισμού στο Loma Prieta (1989), οι οποίες έχουν χαρακτηριστεί ως μη παλμικές από τους Zhai et al και δεν αναφέρονται από τον Baker (2007) ως παλμικές. Για αυτές τις καταγραφές ο λόγος $S_{d,0}(T_p)/CAD$ παίρνει τις τιμές 1.22 και 0.76 αντίστοιχα, οι οποίες είναι σημαντικά μεγαλύτερες από 0.65 και συνεπώς χαρακτηρίζονται ως παλμικές σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο. Αυτές οι καταγραφές προφανώς εμπεριέχουν σημαντικούς παλμούς, όπως μπορεί να γίνει ορατό και από τις χρονοϊστορίες της εδαφικής ταχύτητας που φαίνεται στο σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6: Χρονοϊστορίες της εδαφικής ταχύτητας για τις καταγραφές: (a) Hollister City Hall και (b) Sunnyvale - Colton Ave. από το σεισμό στο Loma Prieta, 1989.

Πίνακας 5.1: Παλμικές καταγραφές (Kardoutsou et al. 2014).

No.	NGA No.	Earthquake Name	Year	Station	M_w	Closest dist. (km)
1	77	San Fernando	1971	Pacoima Dam (upper left abut)	6.61	1.81
2	126	Gazli, USSR	1976	Karakyr	6.80	5.46
3	143	Tabas, Iran	1978	Tabas	7.35	2.05
4	150	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #6	5.74	3.11
5	158	Imperial Valley-06	1979	Aeropuerto Mexicali	6.53	0.34
6	159	Imperial Valley-06	1979	Agrarias	6.53	0.65
7	161	Imperial Valley-06	1979	Brawley Airport	6.53	10.42
8	170	Imperial Valley-06	1979	EC County Center FF	6.53	7.31
9	171	Imperial Valley-06	1979	EC Meloland Overpass FF	6.53	0.07
10	173	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #10	6.53	6.17
11	174	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #11	6.53	12.45
12	178	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #3	6.53	12.85
13	179	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #4	6.53	7.05
14	180	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #5	6.53	3.95
15	181	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #6	6.53	1.35
16	182	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #7	6.53	0.56
17	183	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #8	6.53	3.86
18	184	Imperial Valley-06	1979	El Centro Differential Array	6.53	5.09
19	185	Imperial Valley-06	1979	Holtville Post Office	6.53	7.65
20	250	Mammoth Lakes-06	1980	Long Valley Dam (Upr L Abut)	5.94	
21	292	Irpinia, Italy-01	1980	Sturno	6.90	10.84
22	316	Westmorland	1981	Parachute Test Site	5.90	16.66
23	338	Coalinga-01	1983	Parkfield - Fault Zone 14	6.36	29.48
24	407	Coalinga-05	1983	Oil City	5.77	
25	415	Coalinga-05	1983	Transmitter Hill	5.77	
26	418	Coalinga-07	1983	Coalinga-14th & Elm (Old CHP)	5.21	
27	451	Morgan Hill	1984	Coyote Lake Dam (SW Abut)	6.19	0.53
28	459	Morgan Hill	1984	Gilroy Array #6	6.19	9.86
29	495	Nahanni, Canada	1985	Site 1	6.76	9.60
30	496	Nahanni, Canada	1985	Site 2	6.76	4.93
31	503	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 C00	6.32	
32	508	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 M07	6.32	
33	527	N. Palm Springs	1986	Morongo Valley	6.06	12.07
34	529	N. Palm Springs	1986	North Palm Springs	6.06	4.04
35	568	San Salvador	1986	Geotech Investig Center	5.80	6.30

36	569	San Salvador	1986	National Geographical Inst	5.80	6.99
37	585	Baja California	1987	Cerro Prieto	5.50	
38	615	Whittier Narrows-01	1987	Downey - Co Maint Bldg	5.99	20.82
39	645	Whittier Narrows-01	1987	LB - Orange Ave	5.99	24.54
40	723	Superstition Hills-02	1987	Parachute Test Site	6.54	0.95
41	723	Superstition Hills-02	1987	Parachute Test Site	6.54	0.95
42	738	Loma Prieta	1989	Alameda Naval Air Stn Hanger	6.93	71.00
43	753	Loma Prieta	1989	Corralitos	6.93	3.85
44	758	Loma Prieta	1989	Emeryville - 6363 Christie	6.93	76.97
45	764	Loma Prieta	1989	Gilroy - Historic Bldg.	6.93	10.97
46	766	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #2	6.93	11.07
47	767	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #3	6.93	12.82
48	768	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #4	6.93	14.34
49	776	Loma Prieta	1989	Hollister - South & Pine	6.93	27.93
50	777	Loma Prieta	1989	Hollister City Hall	6.93	27.60
51	778	Loma Prieta	1989	Hollister Diff. Array	6.93	24.82
52	779	Loma Prieta	1989	LGPC	6.93	3.88
53	783	Loma Prieta	1989	Oakland - Outer Harbor Wharf	6.93	74.26
54	787	Loma Prieta	1989	Palo Alto - SLAC Lab	6.93	30.86
55	802	Loma Prieta	1989	Saratoga - Aloha Ave	6.93	8.50
56	803	Loma Prieta	1989	Saratoga - W Valley Coll.	6.93	9.31
57	806	Loma Prieta	1989	Sunnyvale - Colton Ave.	6.93	24.23
58	821	Erzican, Turkey	1992	Erzincan	6.69	4.38
59	825	Cape Mendocino	1992	Cape Mendocino	7.01	6.96
60	828	Cape Mendocino	1992	Petrolia	7.01	8.18
61	829	Cape Mendocino	1992	Rio Dell Overpass - FF	7.01	14.33
62	838	Landers	1992	Barstow	7.28	34.86
63	848	Landers	1992	Coolwater	7.28	19.74
64	900	Landers	1992	Yermo Fire Station	7.28	23.62
65	952	Northridge-01	1994	Beverly Hills - 12520 Mulhol	6.69	18.36
66	959	Northridge-01	1994	Canoga Park - Topanga Can	6.69	14.70
67	963	Northridge-01	1994	Castaic - Old Ridge Route	6.69	20.72
68	982	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant	6.69	5.43
69	983	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant Generator	6.69	5.43
70	1003	Northridge-01	1994	LA - Saturn St	6.69	27.01
71	1004	Northridge-01	1994	LA - Sepulveda VA Hospital	6.69	8.44
72	1009	Northridge-01	1994	LA - Wadsworth VA Hospital North	6.69	23.60
73	1012	Northridge-01	1994	LA 00	6.69	19.07
74	1013	Northridge-01	1994	LA Dam	6.69	5.92
75	1044	Northridge-01	1994	Newhall - Fire Sta	6.69	5.92
76	1045	Northridge-01	1994	Newhall - W Pico Canyon Rd.	6.69	5.48
77	1050	Northridge-01	1994	Pacoima Dam (downstr)	6.69	7.01
78	1051	Northridge-01	1994	Pacoima Dam (upper left)	6.69	7.01
79	1052	Northridge-01	1994	Pacoima Kagel Canyon	6.69	7.26
80	1054	Northridge-01	1994	Pardee - SCE	6.69	7.46
81	1063	Northridge-01	1994	Rinaldi Receiving Sta	6.69	6.50
82	1077	Northridge-01	1994	Santa Monica City Hall	6.69	26.45
83	1080	Northridge-01	1994	Simi Valley - Katherine Rd	6.69	13.42
84	1084	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta	6.69	5.35
85	1085	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta East	6.69	5.19
86	1086	Northridge-01	1994	Sylmar - Olive View Med FF	6.69	5.30
87	1116	Kobe, Japan	1995	Shin-Osaka	6.90	19.15
88	1120	Kobe, Japan	1995	Takatori	6.90	1.47
89	1158	Kocaeli, Turkey	1999	Duzce	7.51	15.37
90	1161	Kocaeli, Turkey	1999	Gebze	7.51	10.92
91	1182	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY006	7.62	9.77

92	1193	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY024	7.62	9.64
93	1194	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY025	7.62	19.09
94	1198	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY029	7.62	10.97
95	1201	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY034	7.62	14.82
96	1202	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY035	7.62	12.65
97	1231	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY080	7.62	2.69
98	1244	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY101	7.62	9.96
99	1403	Chi-Chi, Taiwan	1999	NSY	7.62	13.15
100	1410	Chi-Chi, Taiwan	1999	TAP003	7.62	102.39
101	1471	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU015	7.62	49.81
102	1472	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU017	7.62	54.28
103	1475	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU026	7.62	56.12
104	1476	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU029	7.62	28.05
105	1479	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU034	7.62	35.69
106	1482	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU039	7.62	19.90
107	1483	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU040	7.62	22.08
108	1484	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU042	7.62	26.32
109	1485	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU045	7.62	26.00
110	1486	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU046	7.62	16.74
111	1487	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU047	7.62	35.00
112	1489	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU049	7.62	3.78
113	1491	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU051	7.62	7.66
114	1493	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU053	7.62	5.97
115	1494	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU054	7.62	5.30
116	1496	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU056	7.62	10.50
117	1503	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU065	7.62	0.59
118	1510	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU075	7.62	0.91
119	1511	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU076	7.62	2.76
120	1513	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU079	7.62	10.97
121	1515	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU082	7.62	5.18
122	1519	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU087	7.62	7.00
123	1523	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU094	7.62	54.53
124	1528	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU101	7.62	2.13
125	1529	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU102	7.62	1.51
126	1530	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU103	7.62	6.10
127	1532	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU105	7.62	17.18
128	1542	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU117	7.62	25.44
129	1545	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU120	7.62	7.41
130	1548	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU128	7.62	13.15
131	1550	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU136	7.62	8.29
132	1595	Chi-Chi, Taiwan	1999	WGK	7.62	9.96
133	1596	Chi-Chi, Taiwan	1999	WNT	7.62	1.84
134	1605	Duzce, Turkey	1999	Duzce	7.14	6.58
135	1629	St Elias, Alaska	1979	Yakutat	7.54	80.00
136	1634	Manjil, Iran	1990	Abhar	7.37	75.58
137	1752	Northwest China-03	1997	Jiashi	6.10	
138	1853	Yountville	2000	Napa Fire Station #3	5.00	
139	2457	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY024	6.20	19.65
140	2495	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY080	6.20	22.37
141	2627	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	TCU076	6.20	14.66
142	3317	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY101	6.30	35.97
143	3548	Loma Prieta	1989	Los Gatos - Lexington Dam	6.93	5.02

Πίνακας 5.2: Μη παλμικές καταγραφές (Kardoutsou et al. 2014).

No.	NGA No.	Earthquake Name	Year	Station	M_w	Closest dist. (km)
1	6	Imperial Valley-02	1940	El Centro Array #9	6.95	6.09
2	160	Imperial Valley-06	1979	Bonds Corner	6.53	2.68
3	368	Coalinga-01	1983	Pleasant Valley P.P. - yard	6.36	8.41
4	558	Chalfant Valley-02	1986	Zack Brothers Ranch	6.19	7.58
5	725	Superstition Hills-02	1987	Poe Road (temp)	6.54	11.16
6	729	Superstition Hills-02	1987	Wildlife Liquef. Array	6.54	23.85
7	765	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #1	6.93	9.64
8	864	Landers	1992	Joshua Tree	7.28	11.03
9	901	Big Bear-01	1992	Big Bear Lake - Civic Center	6.46	
10	949	Northridge-01	1994	Arleta - Nordhoff Fire Sta	6.69	8.66
11	1048	Northridge-01	1994	Northridge - 17645 Saticoy St	6.69	12.09
12	1082	Northridge-01	1994	Sun Valley - Roscoe Blvd	6.69	10.05
13	1087	Northridge-01	1994	Tarzana - Cedar Hill A	6.69	15.60
14	1106	Kobe, Japan	1995	KJMA	6.90	0.96
15	1111	Kobe, Japan	1995	Nishi-Akashi	6.90	7.08
16	1141	Dinar, Turkey	1995	Dinar	6.40	3.36
17	1176	Kocaeli, Turkey	1999	Yarimca	7.51	4.83
18	1180	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY002	7.62	24.98
19	1197	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY028	7.62	3.14
20	1203	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY036	7.62	16.06
21	1463	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU003	7.62	86.57
22	1478	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU033	7.62	40.89
23	1488	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU048	7.62	13.55
24	1495	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU055	7.62	6.36
25	1500	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU061	7.62	17.19
26	1501	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU063	7.62	9.80
27	1507	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU071	7.62	5.31
28	1509	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU074	7.62	13.46
29	1517	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU084	7.62	11.24
30	1521	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU089	7.62	8.88
31	1527	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU100	7.62	11.39
32	1533	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU106	7.62	14.99
33	1534	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU107	7.62	16.01
34	1535	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU109	7.62	13.08
35	1536	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU110	7.62	11.60
36	1538	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU112	7.62	27.50
37	1543	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU118	7.62	26.84
38	1547	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU123	7.62	14.93
39	1549	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU129	7.62	1.84
40	1551	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU138	7.62	9.79
41	1602	Duzce, Turkey	1999	Bolu	7.14	12.04
42	2734	Chi-Chi, Taiwan-04	1999	CHY074	6.20	6.20
43	3474	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	TCU079	6.30	10.05

Πίνακας 5.3: Αμφιλεγόμενες καταγραφές (Kardoutsou et al. 2014).

No.	NGA No.	Earthquake Name	Year	Station	M_w	Closest dist. (km)
1	319	Westmorland	1981	Westmorland Fire Sta	5.90	6.50
2	540	N. Palm Springs	1986	Whitewater Trout Farm	6.06	6.04
3	721	Superstition Hills-02	1987	El Centro Imp. Co. Cent	6.54	18.20
4	727	Superstition Hills-02	1987	Superstition Mtn Camera	6.54	5.61
5	741	Loma Prieta	1989	BRAN	6.93	10.72
6	752	Loma Prieta	1989	Capitola	6.93	15.23
7	759	Loma Prieta	1989	Foster City - APEEL 1	6.93	43.94
8	811	Loma Prieta	1989	WAHO	6.93	17.47
9	879	Landers	1992	Lucerne	7.28	2.19
10	953	Northridge-01	1994	Beverly Hills - 14145 Mulhol	6.69	17.15
11	960	Northridge-01	1994	Canyon Country - W Lost Cany	6.69	12.44
12	1080	Northridge-01	1994	Simi Valley - Katherine Rd	6.69	13.42
13	1119	Kobe, Japan	1995	Takarazuka	6.90	0.27
14	1147	Kocaeli, Turkey	1999	Ambarli	7.51	69.62
15	1195	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY026	7.62	29.53
16	1238	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY092	7.62	22.70
17	1246	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY104	7.62	18.04
18	1462	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU	7.62	5.18
19	1477	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU031	7.62	30.18
20	1480	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU036	7.62	19.84
21	1481	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU038	7.62	25.44
22	1490	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU050	7.62	9.51
23	1492	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU052	7.62	0.66
24	1497	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU057	7.62	11.84
25	1498	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU059	7.62	17.13
26	1499	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU060	7.62	8.53
27	1502	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU064	7.62	16.62
28	1504	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU067	7.62	0.64
29	1505	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU068	7.62	0.32
30	1506	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU070	7.62	19.02
31	1508	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU072	7.62	7.03
32	1512	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU078	7.62	8.20
33	1514	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU081	7.62	55.49
34	1526	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU098	7.62	47.67
35	1531	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU104	7.62	12.89
36	1537	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU111	7.62	22.14
37	1540	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU115	7.62	21.78
38	1541	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU116	7.62	12.40
39	1546	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU122	7.62	9.35
40	1553	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU141	7.62	24.21
41	1633	Manjil, Iran	1990	Abbar	7.37	12.56
42	1787	Hector Mine	1999	Hector	7.13	11.66
43	2114	Denali, Alaska	2002	TAPS Pump Station #10	7.90	2.74

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΠΕΞΕΓΓΡΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται η επεξεργασία 149 σεισμικών καταγραφών από τη βάση δεδομένων του προγράμματος *NGA (Next Generation Attenuation)* οι οποίες έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές με σκοπό να ερευνησουμε κατά πόσο η παλμική κίνηση εμφανίζεται στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα και να μελετήσουμε αν μπορούμε να εισάγουμε μία νέα μέθοδο χαρακτηρισμού μιας κίνησης ως παλμική ή μη. Οι καταγραφές αυτές προέρχονται από 149 διαφορετικούς καταγραφικούς σταθμούς και αφορούν στο σύνολό τους 4 διαφορετικά σεισμικά γεγονότα. Οι περιπτώσεις που εξετάζονται αφορούν τους σεισμούς του *Northridge* το 1994, του *Imperial Valley* το 1979 και του *Loma Prieta* το 1989 στην *Καλιφόρνια* των *Η.Π.Α.*, καθώς και του *Chi-Chi* στο *Ταϊβάν* το 1999.

6.2 Κριτήρια ταξινόμησης των καταγραφών

Για την ταξινόμηση των καταγραφών σε παλμικές (*pulse like*) και μη παλμικές (*non pulse like*) έχει εφαρμοστεί η μέθοδος όπως έχει προταθεί από τους ερευνητές *B. Καρδούτσου, Ι. Ταφλαμπάς, Ι. Ψυχάρης (2014)* και βασίζεται στην τιμή της νεοεισαχθείσας έννοιας *CAD (Taflampas et al. 2009)* όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το μέγεθος *CAD* ορίζεται ως το χρονικό ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής της εδαφικής ταχύτητας, όπως περιγράφηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, δηλαδή:

$$CAD = \int_{t_{min}}^{t_{max}} |v_g| dt$$

Για τον υπολογισμό αυτού του δείκτη το *CAD* υπολογίστηκε από τη χρονική στιγμή t_{min} μέχρι τη στιγμή t_{max} , όπου t_{min} είναι η χρονική στιγμή στην οποία η εδαφική ταχύτητα υπερβαίνει την τιμή $0.4 \cdot PGV$ για πρώτη φορά και t_{max} είναι η χρονική στιγμή που η εδαφική ταχύτητα υπερβαίνει την τιμή $0.4 \cdot PGV$ για τελευταία φορά. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή 149 καταγραφές από τη βάση δεδομένων *NGA* εμφάνισαν λόγο $Sd,0(Tp)/CAD$ μεγαλύτερο από 0.65 και χαρακτηρίστηκαν ως παλμικές.

6.3 Υπολογισμός της ενέργειας Energy Flux

Για τις 149 καταγραφές που κατηγοριοποιήθηκαν ως παλμικές πραγματοποιήθηκε αλλαγή διεύθυνσης σε όλες τις γωνίες με βήμα 10° γύρω από το ρήγμα της αρχικής καταγραφής. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ενέργεια (*Energy Flux*) που εκλύει κάθε στραμμένη καταγραφή με την βοήθεια του λογισμικού *SeismoSignal* της εταιρίας *Seismosoft*. Η ενέργεια κάθε καταγραφής υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της εδαφικής ταχύτητας *CSV (Cumulative Squared Velocity)* στο τέλος της εδαφικής κίνησης.

$$Energy\ Flux = \int_0^t v g^2 dt$$

Μετά από τον υπολογισμό της εκάστοτε ενέργειας για όλες τις γωνίες κάθε καταγραφής υπολογίστηκε ο λόγος της μέγιστης τιμής προς την ελάχιστη τιμή του *Energy Flux*. Οι τιμές του λόγου *maxEF/minEF* παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

6.4 Προσδιορισμός του σημαντικού παλμού σε κάθε γωνία γύρω από το ρήγμα

Για την εύρεση των σημαντικών παλμών εφαρμόζεται η μέθοδος των *P. Mimoglou, I. Psycharis, I. Taflampas (2014)* που περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 4, στην οποία ο εντοπισμός του παλμού προκύπτει μέσω κυματικής ανάλυσης και για τη μαθηματική του περιγραφή γίνεται χρήση του κυματιδίου των *Mavroeidis and Papageorgiou (2003)*.

Για το χαρακτηρισμό μιας καταγραφής ως παλμικής τίθενται τα παρακάτω κριτήρια:

- Η ταξινόμηση γίνεται με βάση τον πρώτο (δεσπόζων) παλμό κάθε καταγραφής.

Ο συντελεστής συσχέτισης του πρώτου παλμού με την αρχική καταγραφή είναι κατ'

- ελάχιστο ίσος με $r = 0,65$.

Οι περίοδοι των παλμών T_p προσδιορίζονται από τις κορυφές του φάσματος συνέλιξης $S_d \times S_v$ για 5% απόσβεση. Για την υπό εξέταση εδαφική κίνηση παράγεται το φάσμα συνέλιξης με πολλαπλασιασμό των φασμάτων ταχύτητας και μετακίνησης για λόγο ιξώδους απόσβεσης 5%. Αν και τα φάσματα ταχύτητας και μετακίνησης για μηδενική απόσβεση αποτελούν επαρκείς περιβάλλουσες των φασμάτων Fourier επιτάχυνσης και ταχύτητας αντίστοιχα, γίνεται χρήση των φασμάτων για απόσβεση 5%, με στόχο την εξομάλυνση των κορυφών τους που αντιστοιχούν σε υψηλό συχνοτικό περιεχόμενο (υψίσυχνες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης). Εντοπίζεται η περίοδος που αντιστοιχεί στην κορυφή του φάσματος συνέλιξης και τίθεται ίση με T_p . Οι περίοδοι T_p καθώς και η μέγιστες τιμές των συντελεστών συσχέτισης κάθε στραμμένης καταγραφής παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

6.5 Επιβεβαίωση του παλμικού περιεχομένου με βάση την τιμή του λόγου $S_{d,0}(T_p)/CAD$

Για τις καταγράφες που προκύπτουν παλμικές εφαρμόζεται η διαδικασία που περιγράφηκε

στο κεφάλαιο 5, σύμφωνα με την οποία μια εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται ως παλμική,

εάν ικανοποιείται η συνθήκη $S_{d,0}(T_p)/CAD > 0,65$, όπου $S_{d,0}(T_p)$ η τιμή του φάσματος μετακίνησης για μηδενική απόσβεση που αντιστοιχεί στη δεσπόζουσα περίοδο του παλμού

και CAD η *Αθροιστική Απόλυτη Μετακίνηση* (*Taflampas et al. 2009*) για εκείνο το τμήμα της καταγραφής όπου η εδαφική ταχύτητα υπερβαίνει για πρώτη και τελευταία φορά την τιμή $0,4 \cdot PGV$. Η περίοδος του παλμού T_p υπολογίζεται ως η μέγιστη αιχμή του φάσματος

συνέλιξης $S_d \times S_v$ για απόσβεση 5%, όπως έχει αναφερθεί στα κεφάλαια 4 και 5. Στην πλειονότητα των καταγραφών επιβεβαιώνεται η ύπαρξη παλμού ταχύτητας. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής αυτής παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

6.6 Ομαδοποίηση των παλμικών σε τέσσερα σεισμικά γεγονότα

Οι παλμικές καταγραφές που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους ομαδοποιήθηκαν σε τέσσερα κύρια σεισμικά γεγονότα του *Northridge* (1994), του *Imperial Valley* (1979), του *Loma Prieta* (1989) καθώς και του *Chi-Chi* (1999) με σκοπό την σύγκριση και την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων. Επομένως, μετά την ομαδοποίηση καταλήξαμε σε 92 παλμικές καταγραφές των οποίων τα διαγράμματα παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα επεξεργασίας καταγραφών *Imperial Valley-06* (1979)

NGA No.	M _w	Closest dist.(km)	Final Angle	T _p	maxE.F/minE.F	max CC	max S _d /CAD _p
158	6.53	0.34	278	1.16	5.47	0.73	1.38
159	6.53	0.65	320	0.82	6.76	0.82	1.43
161	6.53	10.42	98	4.54	2.08	0.74	3.27
170	6.53	7.31	321	3.66	2.50	0.84	1.10
173	6.53	6.17	273	3.66	2.18	0.77	2.12
174	6.53	12.45	183	7.34	2.43	0.69	1.27
178	6.53	12.85	183	3.86	2.08	0.87	1.06
179	6.53	7.05	183	8.64	3.87	0.93	1.50
180	6.53	3.95	183	7.42	2.36	0.92	1.12
181	6.53	1.35	183	3.78	5.41	0.95	1.10
182	6.53	0.56	183	3.6	3.54	0.91	1.16
183	6.53	3.86	183	4.84	2.85	0.84	1.26
184	6.53	5.09	53	6.06	2.30	0.76	1.33

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα επεξεργασίας καταγραφών *Loma Prieta* (1989)

NGA No.	M _w	Closest dist.(km)	Final Angle	T _p	maxE.F/minE.F	max CC	max S _d /CAD _p
732	6.93	43.23	85	1.12	2.32	0.83	1.60
738	6.93	71.00	52	2.3	3.47	0.74	1.64
753	6.93	3.85	128	0.72	1.58	0.60	0.94
758	6.93	76.97	132	1.46	3.28	0.83	1.30
764	6.93	10.97	32	1.5	2.77	0.81	1.87
766	6.93	11.07	128	1.48	5.38	0.85	1.09
767	6.93	12.82	128	2.02	2.03	0.78	1.69
768	6.93	14.34	128	3.5	1.74	0.62	1.65
776	6.93	27.93	128	5.18	2.70	0.60	1.50
777	6.93	27.60	38	5.06	3.40	0.61	1.11
779	6.93	3.88	128	3.12	7.11	0.68	0.73
783	6.93	74.26	128	1.54	2.06	0.77	1.30

787	6.93	30.86	142	3.08	3.29	0.67	1.09
802	6.93	8.50	128	5.88	2.57	0.75	1.56
803	6.93	9.31	128	6.66	2.56	0.83	1.66

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα επεξεργασίας καταγραφών Northridge-01 (1994)

NGA No.	M _w	Closest dist.(km)	Final Angle	T _p	maxE.F/minE.F	max CC	max S _d /CAD _p
959	6.69	14.70	16	2.16	2.30	0.65	0.90
963	6.69	20.72	32	1.76	14.00	0.59	1.10
982	6.69	5.43	100	2.66	1.24	0.85	1.17
1003	6.69	27.01	102	1.6	1.51	0.62	2.34
1004	6.69	8.44	238	1.76	1.12	0.75	0.82
1009	6.69	23.60	203	2.6	2.36	0.62	1.41
1012	6.69	19.07	122	0.74	1.29	0.64	2.84
1013	6.69	5.92	58	2.72	1.31	0.85	1.11
1044	6.69	5.92	32	2.78	3.77	0.60	1.12
1045	6.69	5.48	76	2.54	2.54	0.92	1.14
1050	6.69	7.01	-53	3.28	3.74	0.63	3.30
1051	6.69	7.01	18	0.94	3.96	0.77	0.90
1052	6.69	7.26	32	0.9	1.47	0.64	2.01
1054	6.69	7.46	122	1.26	2.20	0.85	1.39
1063	6.69	6.50	106	3.34	3.65	0.86	2.31
1077	6.69	26.45	32	2.3	1.71	0.72	1.61
1080	6.69	13.42	122	0.94	1.51	0.70	0.67
1084	6.69	5.35	70	2.84	1.82	0.73	1.24
1085	6.69	5.19	104	3.06	1.72	0.82	1.68
1086	6.69	5.30	32	2.62	3.36	0.83	1.29

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα επεξεργασίας καταγραφών Chi-Chi, Taiwan (1999)

NGA No.	M _w	Closest dist.(km)	Final Angle	T _p	maxE.F/minE.F	max CC	max S _d /CAD _p
1182	7.62	9.77	5	3.38	1.52	0.61	1.66
1193	7.62	9.64	85	5.92	1.39	0.76	0.86
1194	7.62	19.09	85	4.7	2.04	0.62	0.78
1198	7.62	10.97	5	5.55	2.77	0.76	0.82
1202	7.62	12.65	85	1.52	1.44	0.68	1.03
1231	7.62	2.69	85	1.02	2.37	0.79	0.92
1244	7.62	9.96	85	6.3	2.28	0.85	1.70

1403	7.62	13.15	85	4.95	2.89	0.91	0.87
1410	7.62	102.39	85	2.94	1.80	0.72	0.97
1471	7.62	106.87	5	7.9	4.00	0.87	0.98
1472	7.62	105.66	5	7.35	5.05	0.84	0.82
1475	7.62	56.12	85	7.15	5.08	0.90	0.85
1476	7.62	28.05	85	5.3	1.90	0.92	0.87
1479	7.62	35.69	85	8	4.13	0.84	1.05
1480	7.62	19.84	85	5.2	1.51	0.88	0.95
1482	7.62	19.90	5	8.45	2.21	0.85	0.99
1483	7.62	22.08	85	5.65	1.17	0.88	1.18
1484	7.62	26.32	85	7.55	1.92	0.83	1.17
1485	7.62	26.00	85	6.1	2.84	0.86	1.36
1486	7.62	16.74	85	7.25	2.38	0.88	1.10
1487	7.62	35.00	85	10.45	3.21	0.79	1.12
1489	7.62	3.78	85	9.25	1.27	0.85	0.96
1491	7.62	7.66	85	11.25	1.29	0.80	0.79
1493	7.62	5.97	85	10.35	1.84	0.81	0.90
1494	7.62	5.30	85	11.3	1.35	0.80	0.85
1496	7.62	10.50	85	11.7	1.82	0.76	0.85
1499	7.62	8.53	85	10.1	2.91	0.77	0.79
1503	7.62	0.59	85	5.3	2.34	0.71	0.72
1510	7.62	0.91	85	6.95	3.36	0.81	2.30
1511	7.62	2.76	85	5	1.65	0.68	1.31
1515	7.62	5.18	85	11.1	1.49	0.80	0.99
1519	7.62	7.00	85	9.15	1.40	0.86	1.13
1523	7.62	54.53	85	5.5	3.86	0.88	0.94
1526	7.62	47.67	85	7.8	4.42	0.85	0.83
1528	7.62	2.13	85	8.4	2.59	0.84	1.02
1529	7.62	1.51	85	8.4	1.81	0.75	1.06
1530	7.62	6.10	85	8.15	5.58	0.85	0.91
1532	7.62	17.18	85	11.3	2.22	0.71	0.78
1542	7.62	25.44	85	5.9	1.80	0.73	0.99
1548	7.62	13.15	85	5.25	2.03	0.89	1.12
1550	7.62	8.29	5	8.85	3.00	0.90	0.97
1595	7.62	9.96	85	6.45	2.24	0.85	1.12
1596	7.62	1.84	85	5.75	2.00	0.62	1.68

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

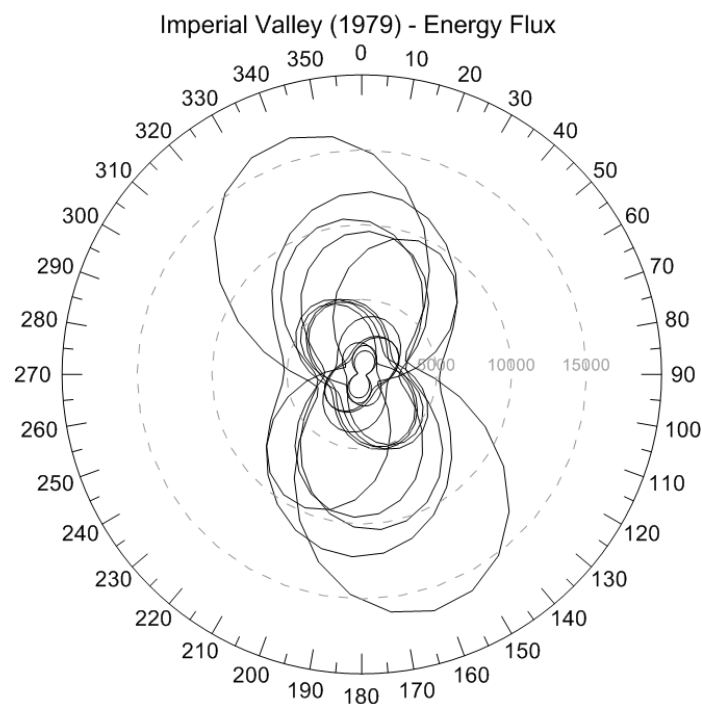
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Διαγράμματα Energy Flux

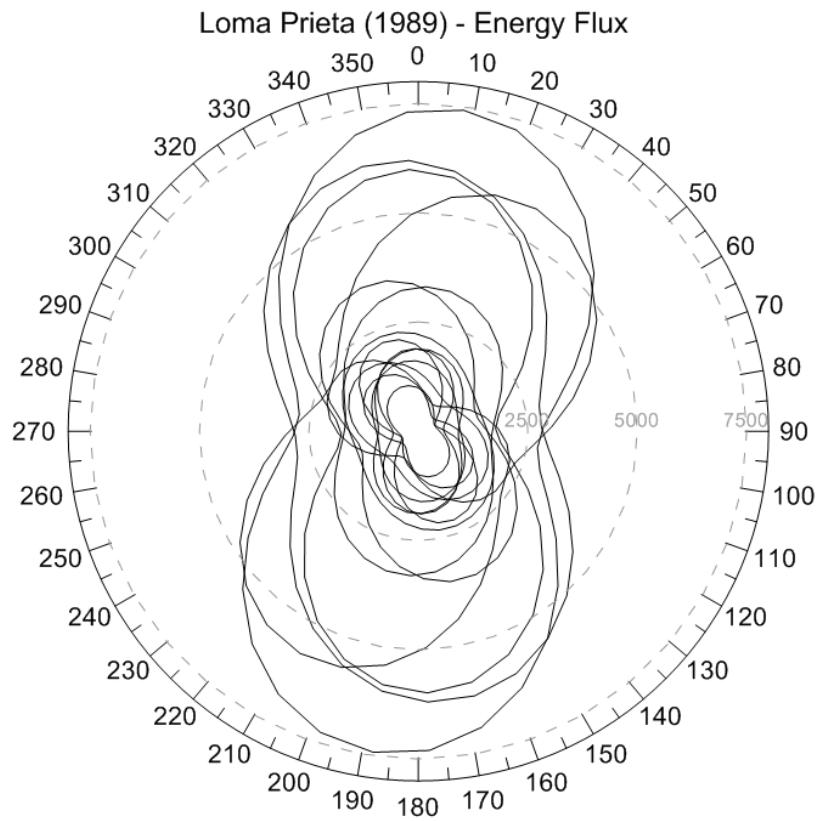
Από τα διαγράμματα *Energy Flux* για τα τέσσερα σεισμικά γεγονότα παρατηρήθηκε ότι οι μέγιστες τιμές της ενέργειας εμφανίζονται σε ένα εύρος γωνιών πολύ κοντά στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα ενώ οι ελάχιστες τιμές εντοπίζονται κοντά στην παράλληλη συνιστώσα. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει τις υποθέσεις πολλών ερευνητών οι οποίοι υποστηρίζουν ότι τα φαινόμενα κατευθυντικότητας είναι εντονότερα στην κάθετη συνιστώσα και επειδή η κάθετη συνιστώσα βρίσκεται πιο κοντά στην προβολή του ρήματος στο οριζόντιο επίπεδο αναμένεται να υπάρχουν μεγάλες παλμικές κινήσεις στη διεύθυνση αυτή.

Ακόμη, η αισθητή διαφορά στις τιμές του *Energy Flux* στην κάθετη και παράλληλη συνιστώσα εκφράζεται με το λόγο $\max EF / \min EF$. Παρατηρείται ότι οι στραμμένες καταγραφές που εμφανίζουν λόγο $\max EF / \min EF \geq 2,5$ χαρακτηρίζονται ως παλμικές. Για το λόγο αυτό εξετάζεται στη συνέχεια η αποτελεσματικότητα χρήσης του λόγου αυτού ως δείκτης ύπαρξης παλμού για τον χαρακτηρισμό μιας κίνησης ως παλμική ή μη.

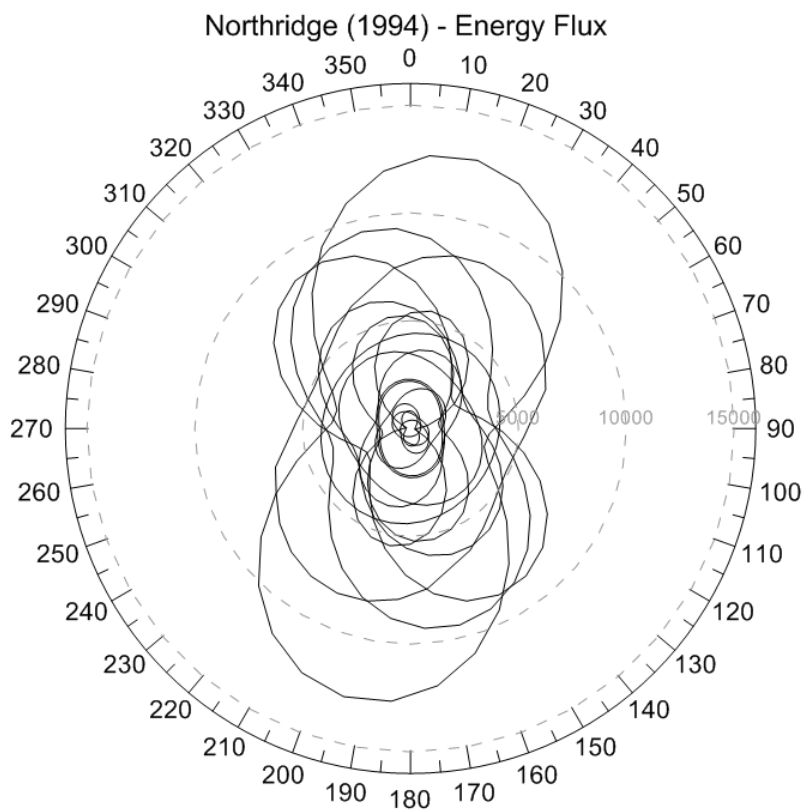
Επίσης, είναι εμφανές ότι οι τιμές του *Energy Flux* επηρεάζονται από το τύπο του ρήματος και την απόσταση του σταθμού καταγραφής από την επιφάνεια διάρρηξης. Οι σεισμικές κινήσεις που καταγράφηκαν σε σταθμούς οι οποίοι απέχουν μικρή απόσταση από το ρήγμα εμφανίζουν μέγιστες τιμές *Energy Flux*.



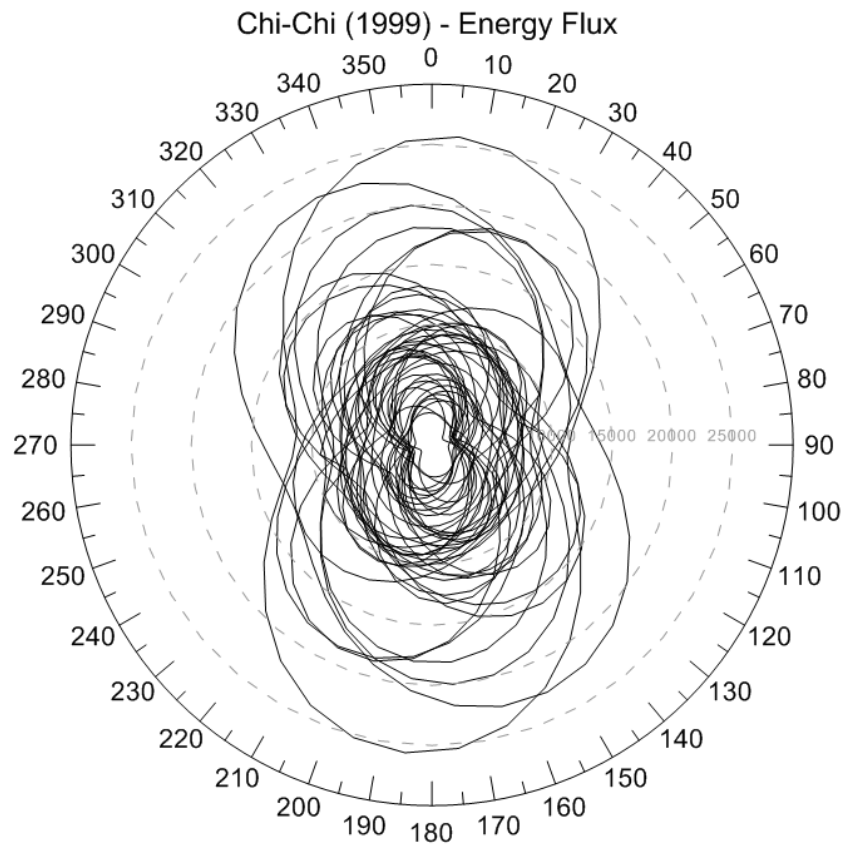
Σχήμα 7.1: Διάγραμμα Energy Flux για το Imperial Valley (1979)



Σχήμα 7.2: Διάγραμμα Energy Flux για το Loma Prieta (1989)



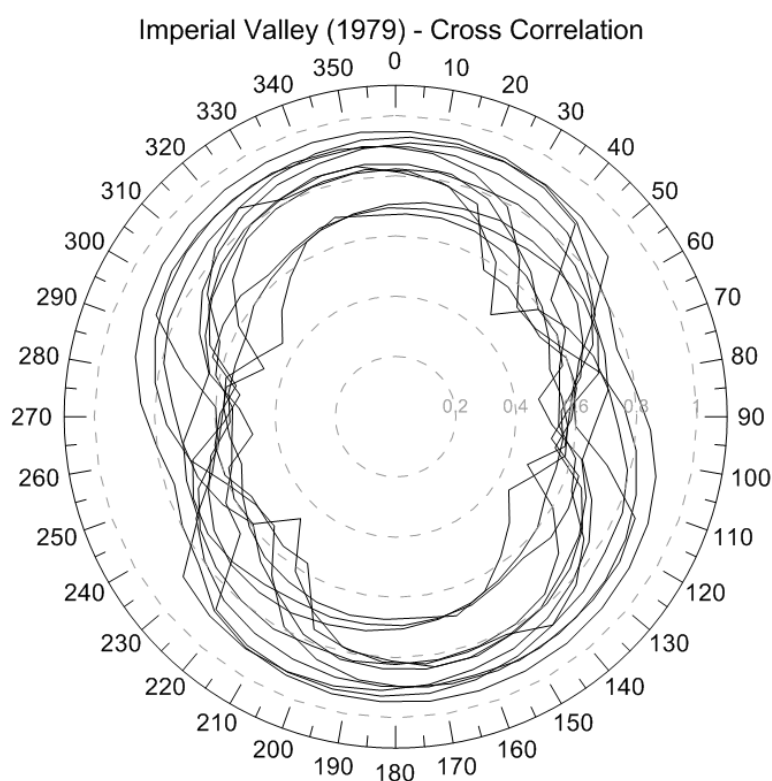
Σχήμα 7.3: Διάγραμμα Energy Flux για το Northridge (1994)



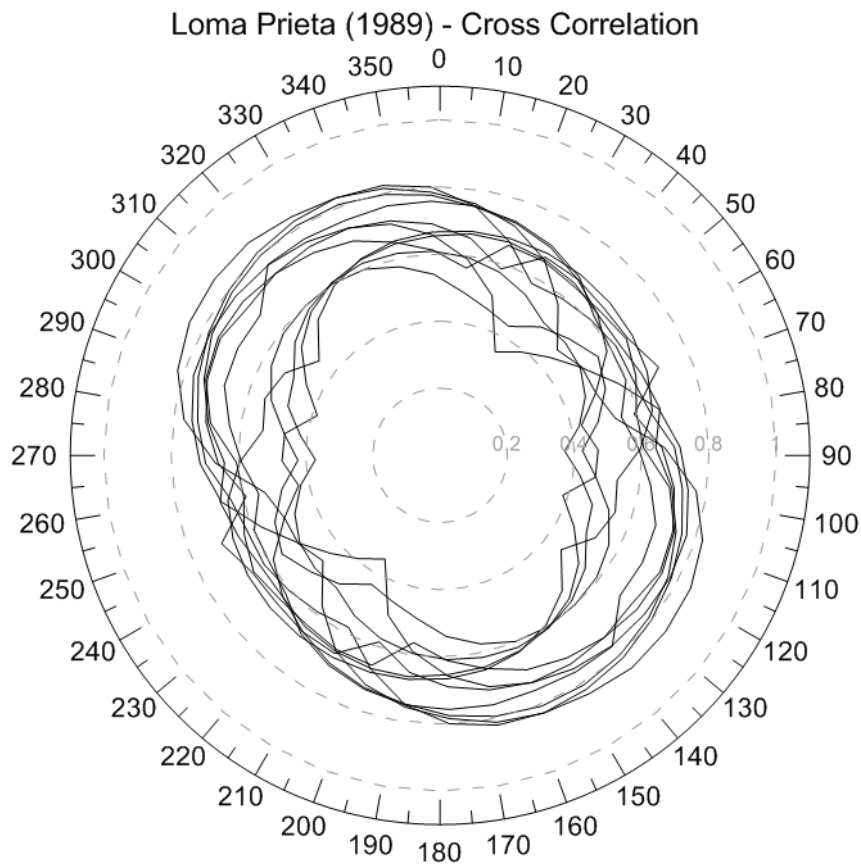
Σχήμα 7.4: Διάγραμμα *Energy Flux* για το *Chi-Chi* (1999)

7.2 Διαγράμματα Cross Correlation

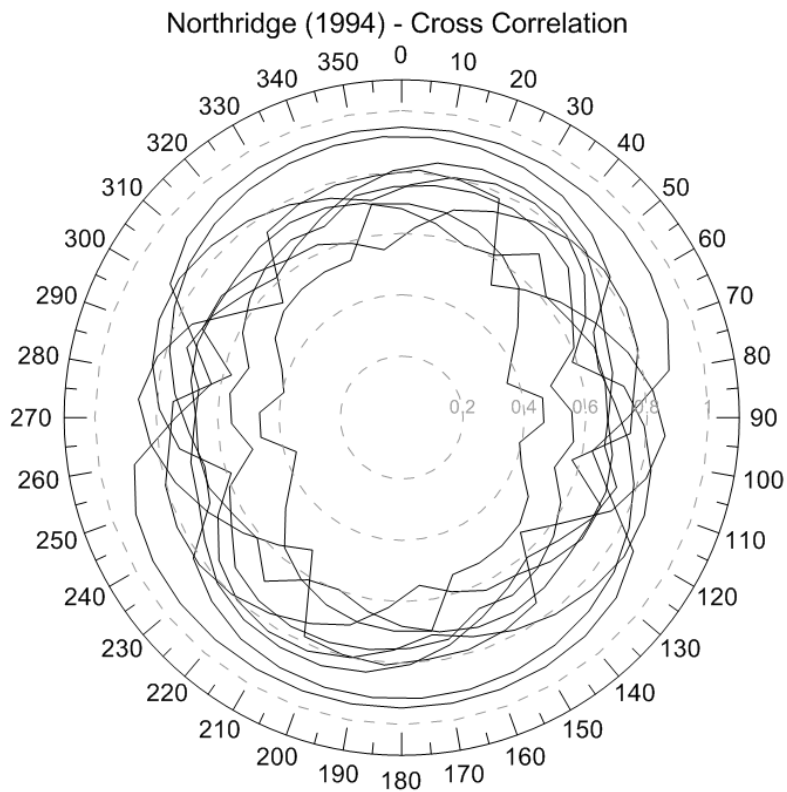
Με σκοπό να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα χρήσης του λόγου της μέγιστης ενέργειας προς την ελάχιστη $\max EF/\min EF$ ως δείκτης ύπαρξης παλμού συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου με τα αποτελέσματα άλλων μεθόδων ταξινόμησης που έχουν προταθεί από άλλους ερευνητές (*P. Mimoglou et al.*, 2012, *V. Kardoutsou et al.*, 2014). Παρατηρήθηκε ότι οι συντελεστές συσχέτισης των στραμμένων καταγραφών δε παρουσιάζουν αισθητή διαφορά μεταξύ κάθετης και παράλληλης στο ρήγμα συνιστώσες. Επομένως, η μέθοδος υπολογισμού της τιμής της ενέργειας *Energy Flux* είναι αποτελεσματικότερη στην υπόδειξη της παλμικής κίνησης στην κάθετη συνιστώσα. Παρόλα αυτά η μέθοδος ταξινόμησης των εδαφικών κινήσεων σε παλμικές και μη παλμικές όπως έχει προταθεί από τους *P. Mimoglou et al* (2014) επιβεβαιώνει τον παλμικό χαρακτήρα των καταγραφών με λόγο $\max EF/\min EF \geq 2,5$.



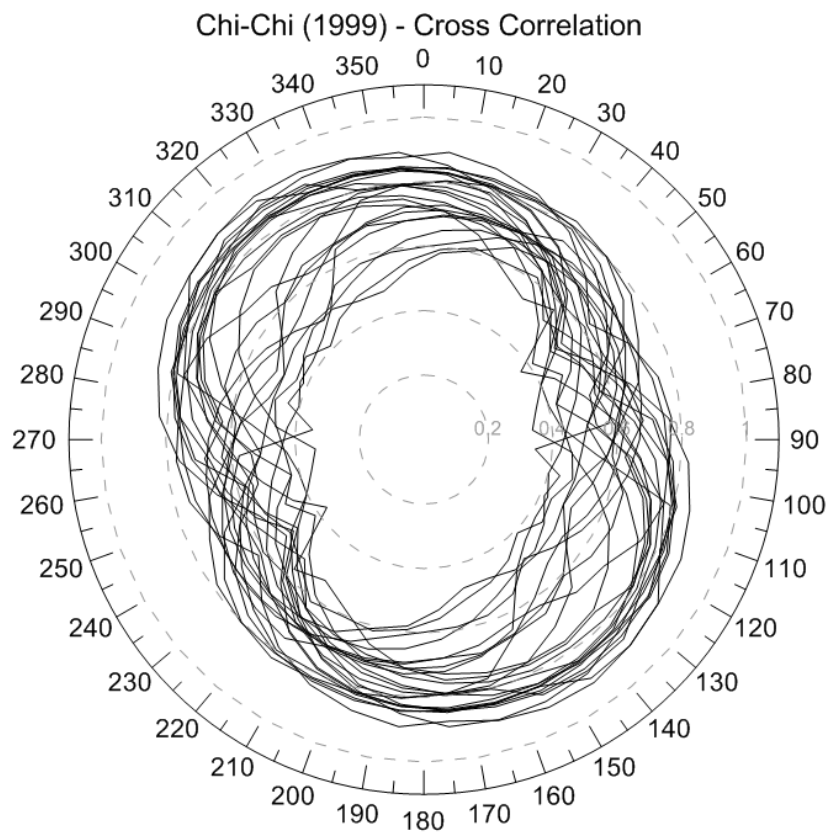
Σχήμα 7.5: Διάγραμμα Cross Correlation για το Imperial Valley (1979)



Σχήμα 7.6: Διάγραμμα Cross Correlation για το Loma Prieta (1989)



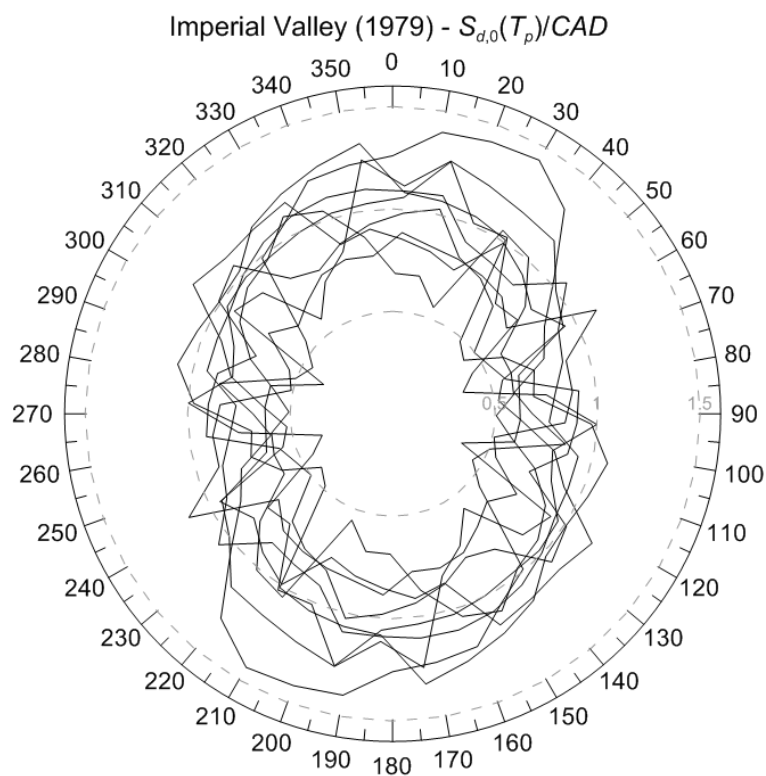
Σχήμα 7.7: Διάγραμμα Cross Correlation για το Northridge (1994)



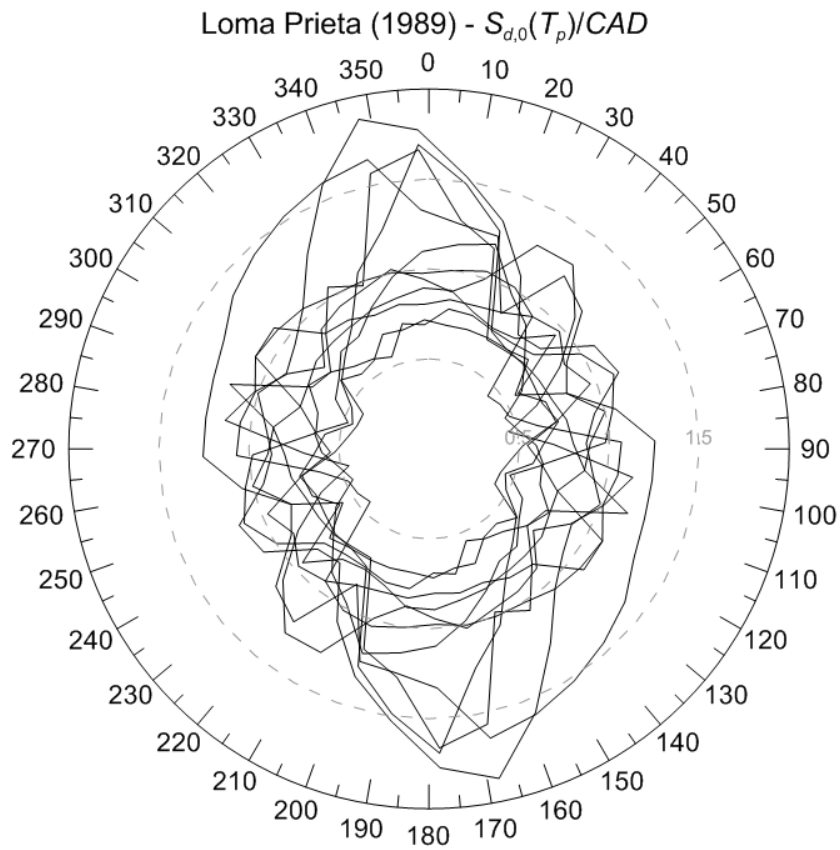
Σχήμα 7.8: Διάγραμμα Cross Correlation για το Chi-Chi (1999)

7.3 Διαγράμματα $S_{d,0}(T_p)/CAD$

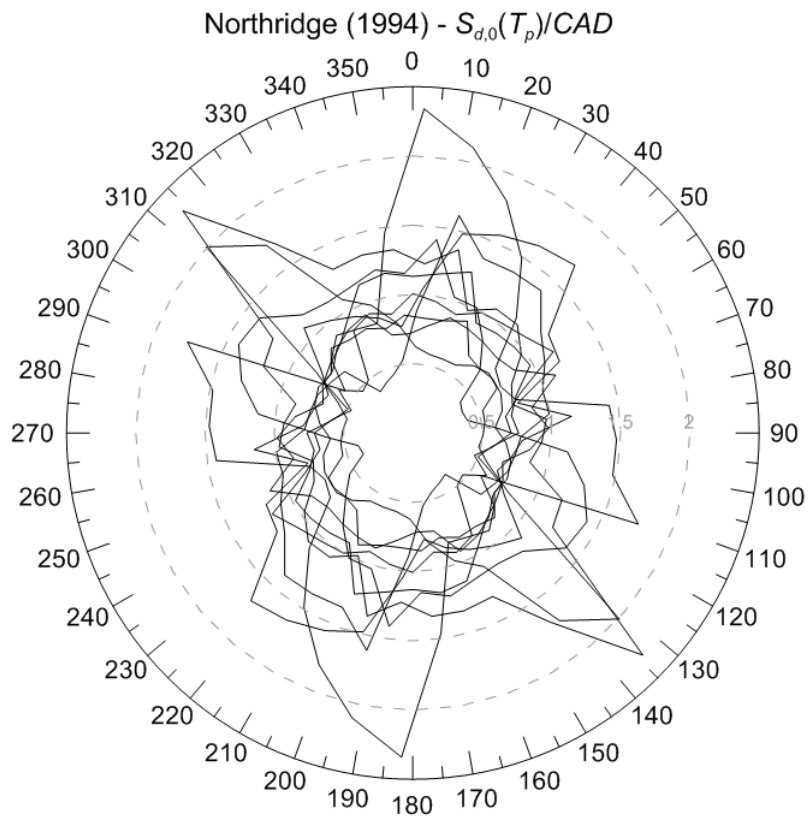
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι 149 καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία είχαν πρωτίστως χαρακτηριστεί ως παλμικές σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτάθηκε από τους *V. Kardoutsou, I. Taflampas, I. Psycharis* (2014). Στην πλειοψηφία επιβεβαιώνεται ο παλμικός χαρακτήρας των καταγραφών με λόγο $\max EF/\min EF \geq 2,5$. Παρόλα αυτά, παρατηρήθηκε ότι ο λόγος $S_{d,0}(T_p)/CAD$ των στραμμένων καταγραφών δε παρουσιάζουν αισθητή διαφορά μεταξύ κάθετης και παράλληλης στο ρήγμα συνιστώσες. Επομένως, η μέθοδος υπολογισμού της τιμής της ενέργειας *Energy Flux* είναι αποτελεσματικότερη στην υπόδειξη της παλμικής κίνησης στην κάθετη συνιστώσα.



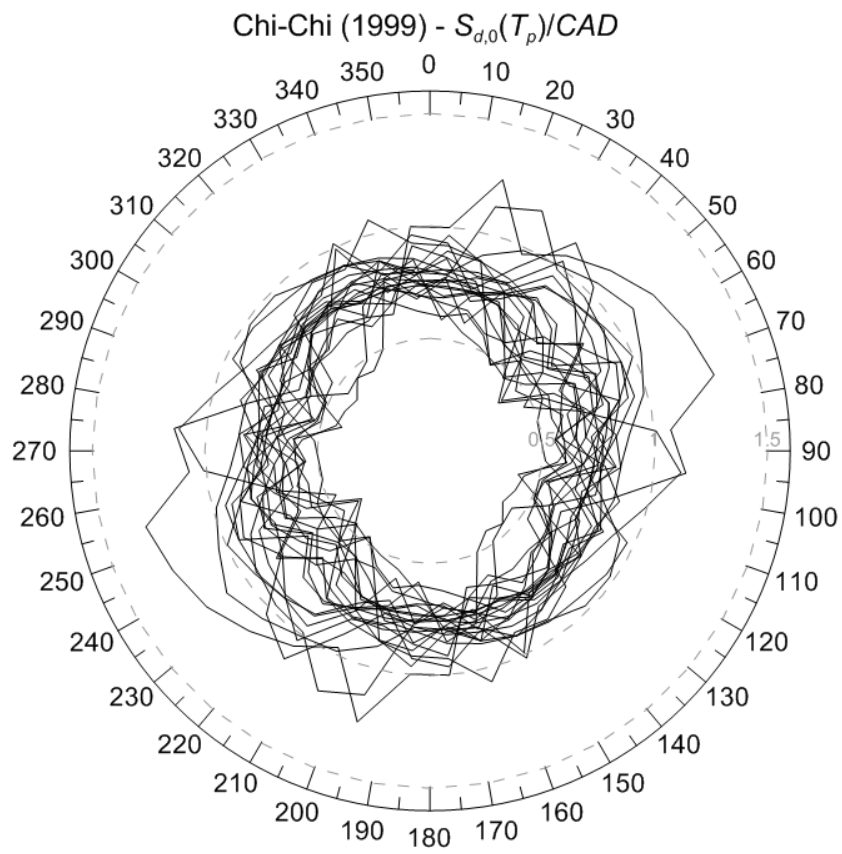
Σχήμα 7.9: Διάγραμμα $S_{d,0}(T_p)/CAD$ για το Imperial Valley (1979)



Σχήμα 7.10: Διάγραμμα $S_{d,0}(T_p)/CAD$ για το Loma Prieta (1989)



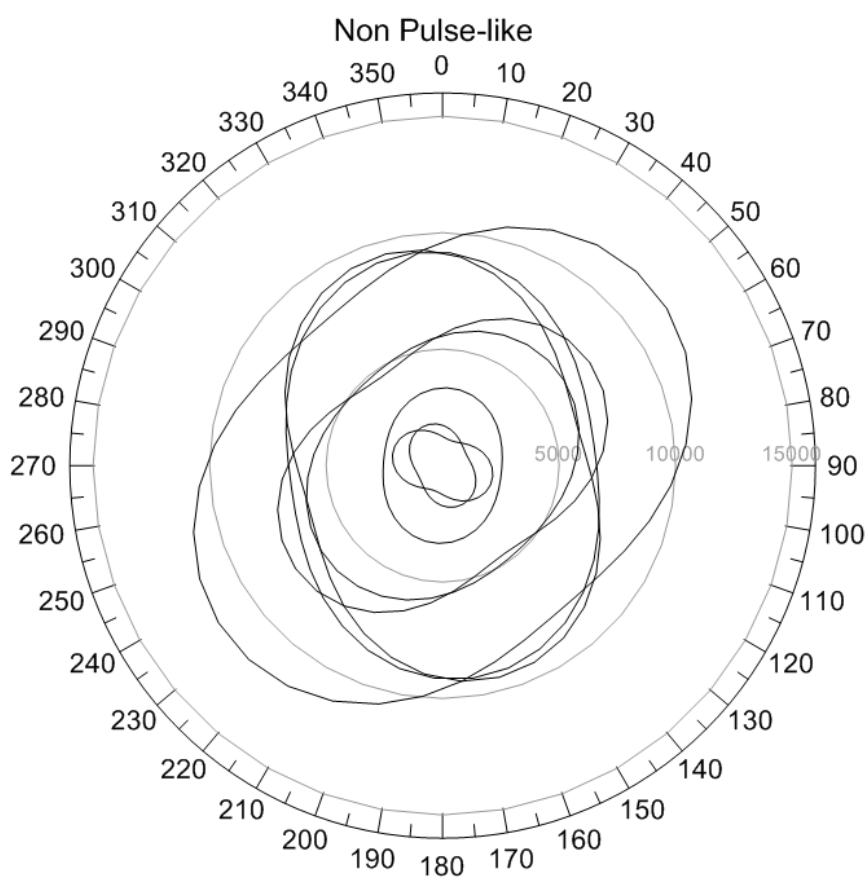
Σχήμα 7.11: Διάγραμμα $S_{d,0}(T_p)/CAD$ για το Northridge (1994)



Σχήμα 7.12: Διάγραμμα $S_{d,0}(T_p)/CAD$ για το Chi-Chi (1999)

7.4 Διαγράμματα μη παλμικών καταγραφών

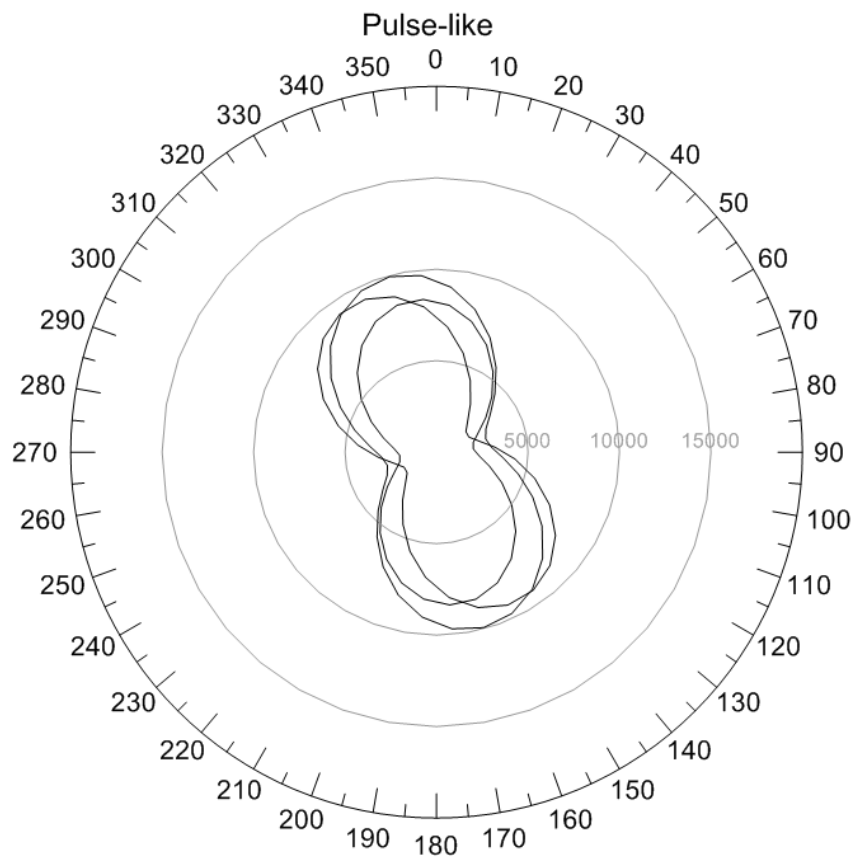
Επιλέχθηκε ένα υποσύνολο καταγραφών οι οποίες έχουν χαρακτηριστεί ως μη παλμικές σύμφωνα με τις μεθόδους που πρότειναν οι *P. Mimoglou et al.*(2012), *V. Kardoutsou et al.*(2014). Για εκείνες τις καταγραφές προσδιορίστηκαν οι τιμές του *Energy Flux*. Παρατηρείται ότι δεν είναι αισθητή η διαφορά των τιμών του *Energy Flux* μεταξύ της κάθετης και παράλληλης συνιστώσας. Επίσης ο αντίστοιχος λόγος $\max EF / \min EF$ προέκυψε μικρότερος από 2,5.



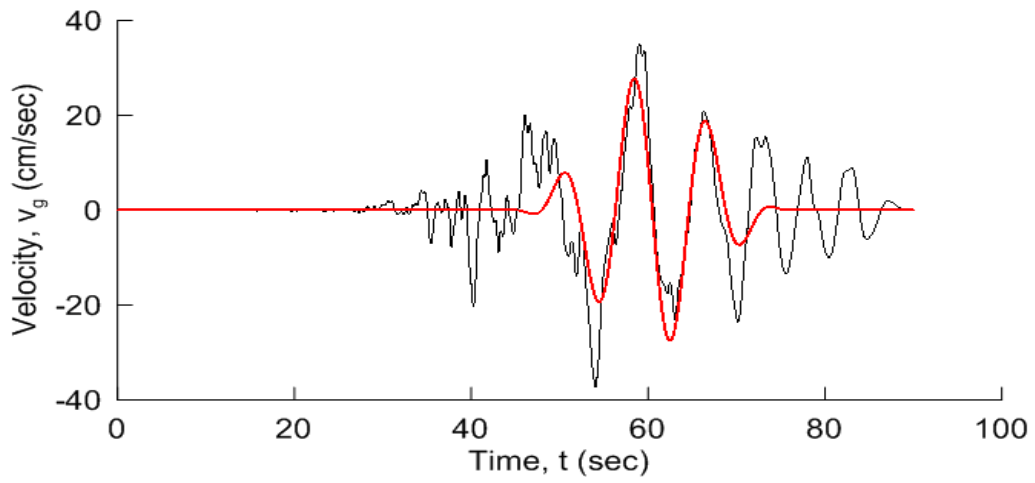
Σχήμα 7.13: Διάγραμμα μη παλμικών καταγραφών

7.5 Διαγράμματα παλμικών καταγραφών

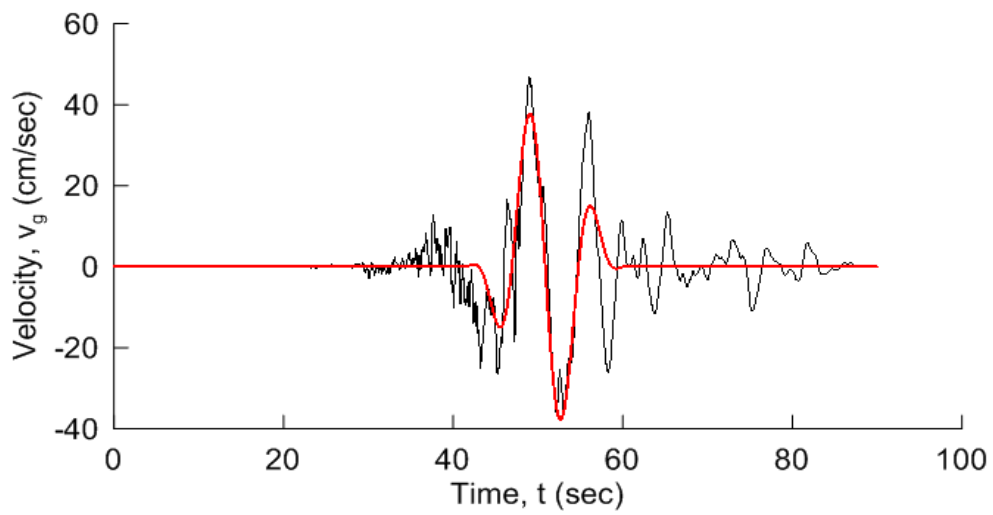
Ύστερα από την σύγκριση των καταγραφών που χαρακτηρίστηκαν ως μη παλμικές με βάση τη μεθόδους των *P. Mimoglou et al.*(2012), *V. Kardoutsou et al.*(2014) με τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου χρήσης του λόγου $\max EF/\min EF$ ως δείκτης ύπαρξης παλμού παρατηρήθηκε ότι η τελευταία υπερτερεί όσο αφορά τον εντοπισμό του παλμικού χαρακτηριστικό. Εντοπίστηκαν καταγραφές που παρουσίαζαν αισθητή διαφορά στις τιμές του *Energy Flux* μεταξύ της κάθετης και παράλληλης συνιστώσας με λόγο $\max EF/\min EF \geq 2,5$. Οι αναφερόμενες καταγραφές εξετάστηκαν ως προς τη χρονοϊστορία της ταχύτητας και εντοπίστηκε ο παλμός με αποτέλεσμα να χαρακτηριστούν ως παλμικές και να αμφισβητηθεί η αποτελεσματικότητα των υπάρχουσών μεθόδων χαρακτηρισμού των καταγραφών.



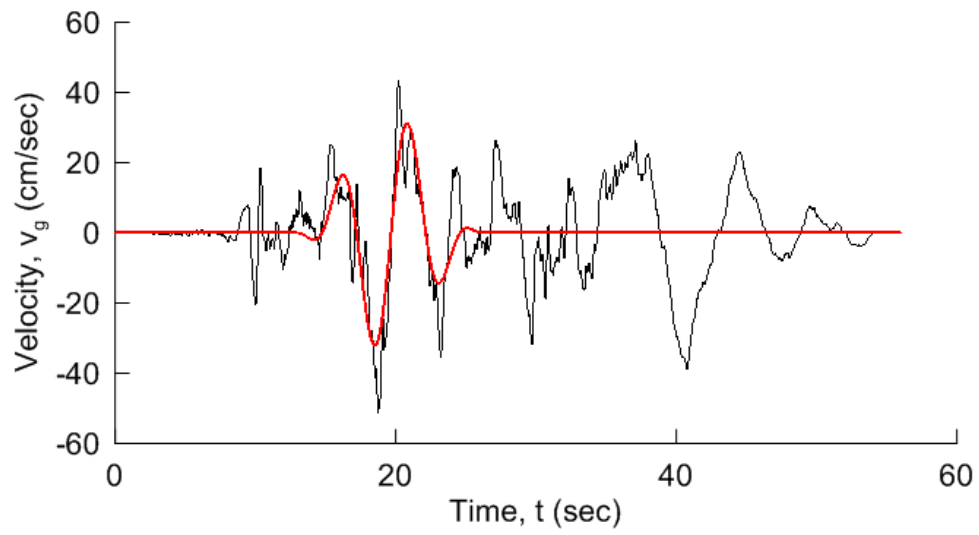
Σχήμα 7.14: Διάγραμμα μη παλμικών καταγραφών



Σχήμα 7.15: Χρονοϊστορία ταχύτητας καταγραφής 1463



Σχήμα 7.16: Χρονοϊστορία ταχύτητας καταγραφής 1478



Σχήμα 7.17: Χρονοϊστορία ταχύτητας καταγραφής 1495

Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] Baker J.W., **Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis**, 2007.
- [2] Mavroeidis G., Papageorgiou A., **Effect of Fault Rupture Characteristics on Near-Fault Strong Ground Motions**, 2010.
- [3] Mavroeidis G., Papageorgiou A., **Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions**, 2003
- [4] Mimoglou P, Psycharis I., Taflampas I., **Design-oriented simulation of near fault ground motions by a limited number of velocity pulses**, 2014.
- [5] Vassiliki Kardoutsou, Ioannis Taflampas, Ioannis Psycharis, **A New Method for the Classification of Ground Motions as Pulse-Like on Non Pulse-Like**, 2014.
- [6] Junio Iervolino, Allin Cornell, **Probability of Occurrence of Velocity Pulses in Near-Source Ground Motions**, 2008.
- [7] Rowshandel B., **Directivity Correction for the Next Generation Attenuation (NGA) Relations**, Earthquake Spectrum, Volume 26, May 2010.
- [8] Shahi S. K., Baker J. W., **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 No2, pp.742-755, April 2011.
- [9] Somerville P.G., **Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse**, Physics of the Earth and Planetary Interiors 137 (2003), 201-212.
- [10] ΙΩΑΝΝΗΣ Ν. ΨΥΧΑΡΗΣ, **ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΣΤΑΘΜΕΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ, ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑ ΤΟΥ 9ου ΕΞΑΜΗΝΟΥ - ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ 2**, 2010.