



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

Διερεύνηση συσχέτισης παραμέτρων της εδαφικής  
κίνησης κοντινού πεδίου με παλμούς  
κατευθυντικότητας

Investigation of the correlation of near-fault seismic  
ground motion parameters with directivity pulses

Καρδούτσου Βασιλική, Διπλωματούχος πολιτικός μηχανικός Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων Καθηγητής: Ι. Ψυχάρης, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Συνεπιβλέπων: Ι. Ταφλαμπάς, Dr. Πολιτικός Μηχανικός







**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»**

**Μεταπτυχιακή Εργασία**

**Διερεύνηση συσχέτισης παραμέτρων της εδαφικής κίνησης  
κοντινού πεδίου με παλμούς κατευθυντικότητας**

**Investigation of the correlation of near-fault seismic ground  
motion parameters with directivity pulses**

**Καρδούτσου Βασιλική, Διπλωματούχος πολιτικός μηχανικός Ε.Μ.Π.**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Ι. Ψυχάρης, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π  
Συνεπιβλέπων: Ι. Ταφλαμπάς, Dr. Πολιτικός Μηχανικός**

**Αθήνα, Φεβρουάριος 2013**





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την περάτωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας θα ήθελα να απευθύνω θερμές ευχαριστίες:

Στον επιβλέποντα Καθηγητή του τμήματος πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. κ. Ιωάννη Ψυχάρη, για την ανάθεση της μεταπτυχιακής εργασίας και την επιστημονική του καθοδήγηση.

Στον επιστημονικό συνεργάτη, Dr. Πολιτικό Μηχανικό κ. Ιωάννη Ταφλαμπά για τις ουσιαστικές παρατηρήσεις και συμβουλές του σε όλα τα στάδια εκπόνησης της μεταπτυχιακής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και ιδιαίτερα την αδερφή μου Στέλλα Καρδούτσου, καθώς και όσους βοήθησαν με οιονδήποτε τρόπο στην διαμόρφωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι σεισμοί κοντινού πεδίου με παλμό κατευθυντικότητας στη χρονοϊστορία ταχύτητας αποτελούν αντικείμενο μεγάλου ενδιαφέροντος στη σεισμολογία και στην αντισεισμική τεχνολογία. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων, γίνονται αρκετές προσπάθειες εντοπισμού του σημαντικού παλμού σε μια διέγερση κοντινού πεδίου, αλλά και προσδιορισμού των χαρακτηριστικών του όπως η δεσπόζουσα περίοδος του παλμού.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία παρουσιάζεται μια μέθοδος αναγνώρισης των σημαντικών παλμών σε καταγραφές κοντινού πεδίου, όπως αυτή εισήχθη από τους P.Mimoglou, I.Psycharis and I.Taflampas (2012). Στη συνέχεια διερευνάται κατά πόσο οι μέγιστες φασματικές τιμές των καταγραφών, πριν και μετά την αφαίρεση του παλμού, μπορούν να συσχετιστούν με χαρακτηριστικά όπως είναι το μέγεθος του σεισμού  $M_w$ , η κοντινότερη από το ρήγμα απόσταση CID (Closest Distance) και η χρονική διάρκεια του παλμού,  $\gamma$ . Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στον συντελεστή κατευθυντικότητας  $\xi$ , ο οποίος ορίστηκε από τον Rowshandel (2006) και εξαρτάται από τα γεωμετρικά και αζιμουθιακά χαρακτηριστικά του ρήγματος. Αναφορικά στον συντελεστή  $\xi$  μελετάται τόσο η συσχέτιση του με τις μέγιστες φασματικές τιμές ως προς τις αντίστοιχες εδαφικές, όσο και η αποτελεσματικότητά του ως δείκτης πρόβλεψης ύπαρξης παλμού σε μια σεισμική διέγερση. Στο τελευταίο μέρος της παρούσας εργασίας εστιάζουμε στη σημασία του ολοκληρώματος της απόλυτης εδαφικής ταχύτητας CAD, όπως αυτό εισήχθη από τους Taflampas et al (2008) και εισάγουμε ως δείκτη κατευθυντικότητας τον λόγο της μέγιστης φασματικής τιμής μετακίνησης για μηδενική απόσβεση ως προς την αντίστοιχη τιμή CAD μιας καταγραφής. Μια μικρή αναφορά γίνεται και στον συντελεστή της ισόχρονης θεωρίας  $\checkmark$  (Isochrone Theory) των Spudich et al (2004) και στο αν αυτός ο συντελεστής δείχνει να μπορεί να λειτουργεί ως συντελεστής κατευθυντικότητας.

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται 90 καταγραφές της βάσης δεδομένων NGA που χαρακτηρίστηκαν παλμικές από τον Baker (2007). Οι καταγραφές οφείλουν να πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια. Ειδικότερα, πρέπει η μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV να είναι μεγαλύτερη από 30cm/sec, και ο παλμός να φτάνει νωρίς στη χρονοϊστορία ταχύτητας. Από τις παραπάνω καταγραφές αφαιρείται αρχικά ο πρώτος σημαντικός παλμός και στη συνέχεια όλοι οι παλμοί από τη χρονοϊστορία ταχύτητας. Στη συνέχεια εξάγονται τα ελαστικά φάσματα σχεδιασμού ψευδοταχύτητας και μετακίνησης για απόσβεση 5% και υπολογίζονται οι λόγοι των μέγιστων φασματικών τιμών ως προς τις αντίστοιχες εδαφικές. Οι εδαφικές τιμές ψευδοταχύτητας και μετακίνησης υπολογίζονται από τις ασύμπτωτες των φασμάτων στις μεγάλες περιόδους. Η εξαγωγή των φασμάτων

γίνεται με τη χρήση του προγράμματος Seismosignal. Στους λόγους μετά την αφαίρεση του πρώτου και εν συνεχεία όλων των παλμών, στον παρανομαστή παραμένει η αρχική εδαφική ταχύτητα και μετακίνηση πριν την αφαίρεση του παλμού.

Διερευνάται κατά πόσο οι παραπάνω λόγοι μπορούν να συσχετιστούν με το μέγεθος του σεισμού  $M_w$ , την κοντινότερη από το ρήγμα απόσταση CID, τη διάρκεια των παλμών  $\gamma$  και το δείκτη κατευθυντικότητας Rowshandel  $\xi$ , πριν και μετά την αφαίρεση του παλμού, δημιουργώντας τα κατάλληλα διαγράμματα. Επίσης, ελέγχεται το αν μπορούν οι τιμές του Ευρωκώδικα 8 για τα ελαστικά φάσματα μετακίνησης για απόσβεση 5%, να καλύψουν επαρκώς τους προκύπτοντες λόγους. Για τον σκοπό αυτό, οι τιμές των ελαστικών φασματικών μετακίνησης σχεδιασμού του EC8 κανονικοποιούνται κατάλληλα, διαιρώντας την αντίστοιχη φασματική τιμή με την εδαφική μετακίνηση, όπως αυτή ορίζεται από τον κανονισμό.

Ειδικότερα για τον συντελεστή κατευθυντικότητας  $\xi$  γίνεται περεταίρω διερεύνηση της καταλληλότητας του ως δείκτης ύπαρξης παλμού σε μια καταγραφή. Θετικές τιμές του συντελεστή  $\xi$  αντιστοιχούν σε διεγέρσεις εμπροσθεν κατευθυντικότητας, ενώ αρνητικές σε περιπτώσεις όπισθεν. Ο συντελεστής  $\xi$  υπολογίστηκε για κάθε μια καταγραφή με τη χρήση ενός απλού προγράμματος στη γλώσσα Fortran.

Στο τελευταίο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας εισάγεται ως δείκτης πρόβλεψης της ύπαρξης παλμού ο λόγος της μέγιστης φασματικής τιμής μετακίνησης για μηδενική απόσβεση ως προς το ολοκλήρωμα της απόλυτης εδαφικής ταχύτητας CAD. Σε έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή με αρμονική διέγερση στη βάση του, η θεωρητική τιμή του λόγου της μέγιστης φασματικής τιμής μετακίνησης στον συντονισμό για μηδενική απόσβεση, ως προς το CAD είναι  $\pi/4$ . Τιμές του λόγου των καταγραφών μεγαλύτερες η κοντά στο  $\pi/4$  ίσως υποδεικνύουν την ύπαρξη παλμού στις καταγραφές κοντινού πεδίου. Ο λόγος  $\max SD_{0\%}/CAD$  υπολογίζεται για τις 90 παλμικές καταγραφές του Baker και για 43 μη παλμικές προκειμένου να εξαχθούν τα αποτελέσματα.

Τέλος, μελετάται σε αρχικό βέβαια στάδιο, η αποτελεσματικότητα του συντελεστή  $\zeta'$  ως δείκτης κατευθυντικότητας.

Από την επεξεργασία των δεδομένων και των καταγραφών προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα.

### **Λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική**

- Στα ελαστικά φάσματα ταχύτητας των παλμικών κινήσεων για απόσβεση 5%, ο μέσος όρος του λόγου της μέγιστης φασματικής ταχύτητας προς την εδαφική είναι ίσος με 2.14 ενώ μειώνεται με την αφαίρεση του πρώτου σημαντικού παλμού σε 1.40, ως προς την αρχική εδαφική ταχύτητα. Μετά την αφαίρεση όλων των παλμών από τη χρονοϊστορία ταχύτητας ο λόγος πέφτει ακόμα περισσότερο και ο λόγος λαμβάνει την τιμή 1.17.
- Στα ελαστικά φάσματα μετακίνησης των παλμικών κινήσεων για απόσβεση 5%, ο μέσος όρος του λόγου της μέγιστης φασματικής ταχύτητας προς την εδαφική είναι ίσος με 1.97 ενώ μειώνεται με την αφαίρεση του πρώτου σημαντικού παλμού σε 1.08, ως προς την αρχική εδαφική μετακίνηση. Μετά την αφαίρεση όλων των παλμών από τη χρονοϊστορία ταχύτητας ο λόγος πέφτει ακόμα περισσότερο και ο λόγος λαμβάνει την τιμή 0.85 κάτι που σημαίνει ότι ο παλμός αντιστοιχεί σε τόσο μεγάλο κομμάτι της χρονοϊστορίας ώστε η εναπομένουσα καταγραφή να δίνει φασματικές τιμές κάτω από την τιμή της αρχικής εδαφικής μετακίνησης.
- Οι λόγοι της μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική των φασμάτων ψευδοταχύτητας και μετακίνησης ακολουθούν την ευθεία  $y = x$  πριν την αφαίρεση των παλμών, ενώ απλώνονται ελαφρά με την αφαίρεση όλων των σημαντικών παλμών από τη χρονοϊστορία ταχύτητας των καταγραφών.
- Ο λόγος της μέγιστης φασματικής τιμής ψευδοταχύτητας πριν και μετά την αφαίρεση όλων των παλμών είναι σχεδόν ίδιος με τον λόγο των μέγιστων φασματικών τιμών μετακίνησης και είναι 2.04 και 2.57 αντίστοιχα. Θα μπορούσαν οι τιμές αυτές να συσχετιστούν με τον συντελεστή 2.5 των Newmark & Hall, 1969, McGuire, (1975) που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ενεργής φασματικής τιμής.

### **Μέγεθος του σεισμού $M_w$ και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική**

- Ο λόγος της μέγιστης φασματικής τιμής, προς την εδαφική, τόσο για τα φάσματα ταχύτητας, όσο και για τα φάσματα μετακίνησης πριν και μετά την αφαίρεση του παλμού, είναι ανεξάρτητος του μεγέθους του σεισμού.

### **Χρονική διάρκεια παλμών $\gamma$ και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική**

- Ο λόγος της μέγιστης φασματικής τιμής, προς την εδαφική, τόσο για τα φάσματα ταχύτητας, όσο και για τα φάσματα μετακίνησης πριν και μετά την αφαίρεση του παλμού, είναι ανεξάρτητος της διάρκειας  $\gamma$  των παλμών.

### **Κοντινότερη απόσταση από το ρήγμα και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική**

- Ο λόγος της μέγιστης φασματικής τιμής, προς την εδαφική, τόσο για τα φάσματα ταχύτητας, όσο και για τα φάσματα μετακίνησης πριν και μετά την αφαίρεση του παλμού, φαίνεται να είναι ανεξάρτητος της κοντινότερης απόστασης από το ρήγμα, CID.

### **Συντελεστής κατευθυντικότητας $\xi$ (Rowshandel 2006)**

- Ο λόγος της μέγιστης φασματικής τιμής, προς την εδαφική, τόσο για τα φάσματα ταχύτητας, όσο και για τα φάσματα μετακίνησης πριν και μετά την αφαίρεση του παλμού, φαίνεται να είναι ανεξάρτητος του συντελεστή κατευθυντικότητας  $\xi$
- Ο συντελεστής κατευθυντικότητας  $\xi$  δείχνει να μην μπορεί να είναι αποτελεσματικός ως συντελεστής κατευθυντικότητας, καθώς στις παλμικές καταγραφές μόνο το 54% υπολογίζονται να έχουν θετικό  $\xi$ , ενώ θα έπρεπε σε όλες τις καταγραφές η τιμή να είναι μεγαλύτερο του μηδενός.

### **Ευρωκώδικας 8**

- Οι αντίστοιχες τιμές του Ευρωκώδικα 8 φαίνεται να επαρκούν στις καταγραφές, τόσο πριν όσο και μετά την αφαίρεση των σημαντικών παλμών από τη χρονοϊστορία ταχύτητας.

### **Λόγος $\max SD_{0\%}/CAD$**

- Οι παλμικές καταγραφές έχουν τιμή του λόγου  $\max SD_{0\%}/CAD$  μεγαλύτερη από 0.47 και μάλιστα δείχνουν να ακολουθούν μια κανονική κατανομή με μέση τιμή 0.86 και τυπική απόκλιση 0.23.

- Οι μη παλμικές καταγραφές έχουν τιμή του λόγου  $\max SD_{0\%}/CAD$  μεγαλύτερη από 0.33 και μάλιστα δείχνουν να ακολουθούν μια κανονική κατανομή με μέση τιμή 0.56 και τυπική απόκλιση 0.18.
- Το μεγαλύτερο ποσοστό των παλμικών καταγραφών και συγκεκριμένα το 80% έχει τιμές του λόγου μεγαλύτερες του 0.6
- Το μεγαλύτερο ποσοστό των μη παλμικών καταγραφών και συγκεκριμένα το 80%, λαμβάνει τιμές του λόγου μικρότερες από 0.6 .
- Υπάρχει μια περιοχή αλληλοεπικάλυψης για τις παλμικές και μη καταγραφές στα εύρη του λόγου  $\max SD/CAD$  από 0.45 μέχρι περίπου 0.9
- Πέντε (5) τιμές των μη παλμικών καταγραφών σύμφωνα με τον Baker με λόγο μεγαλύτερο του 0.6, αποδείχτηκαν παλμικές.
- Ο λόγος  $\max SD_{0\%}/CAD$  δείχνει να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης πρόβλεψης ύπαρξης παλμού για μια καταγραφή κοντινού πεδίου

### **Ολοκλήρωμα απόλυτης εδαφικής ταχύτητας CAD**

- Στα διαγράμματα του CAD συναρτήσεϊ του χρόνου, στο κομμάτι ύπαρξης παλμού, η κλίση του διαγράμματος είναι πολύ εντονότερη στις παλμικές καταγραφές, ενώ η κλίση της καμπύλης στις μη παλμικές καταγραφές είναι ομαλότερη.
- Ο χρόνος έναρξης και λήξης της έντονης κλίσης αντιστοιχεί στο χρόνο έναρξης και λήξης του παλμού στη χρονοϊστορία ταχύτητας. Οι παραπάνω λοιπόν χρονικές στιγμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήριο για τον χρόνο άφιξης του παλμού στις χρονοϊστορίες ταχύτητας

### **Συντελεστής κατευθυντικότητας $\zeta'$**

- Ο συντελεστής  $\zeta'$  δεν φαίνεται να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης κατευθυντικότητας.





## EXTENDED SUMMARY

The investigation of the parameters influencing the design response spectra, as well as the near-fault ground motion, has become urgent in recent years.

Ground motions, with a pulse at the beginning of the velocity time history, belong to a special class of ground motion. This type of ground motion is observed at sites located near the fault and it is believed to be caused primarily by forward directivity effects. Forward directivity occurs when the fault rupture propagates towards a site at a rupture velocity close to the velocity of seismic shear waves. As a result, the seismic energy at the site is concentrated in a single large pulse, predominant in the ground velocity time history.

In this thesis we present a method for identification of important pulses in near-fault records, as inserted by P.Mimoglou, I.Psycharis and I.Taflampas (2012). Then it is investigated whether the maximum spectral values of the recordings before and after the extraction of the pulse can be associated with characteristics such as the magnitude of the earthquake  $M_w$ , the closest Distance from the fault CID and the duration of the pulse  $\gamma$ . Particular attention is given to the directivity factor  $\xi$ , who was nominated by Rowshandel (2006) and depends on the geometric characteristics of the fault. Regarding the coefficient  $\xi$  we examine both the correlation of the maximum spectral values divided by the respective ground values, and its effectiveness as a pulse indicator. In the last part of this paper we focus on the importance of the integral of the absolute ground velocity CAD, as introduced by Taflampas et al (2008) and we introduce the ratio of maximum spectral displacement for zero damping divided by the corresponding value of CAD. A brief reference is made for the coefficient of isochronal theory  $\tilde{c}'$  (Isochrone Theory) of Spudich et al (2004) and we examine whether this factor seems to be working as directivity factor.

To get our results 90 records of NGA database characterized as pulse-like from Baker (2007), are used. The records must follow certain criteria. Specifically the maximum ground velocity PGV must be greater than 30cm/sec, and the pulse must arrive early in the velocity time history. From these records we initially removed the first significant pulse and then all the pulses from the velocity time history. Then we computed the pseudo-velocity and displacement spectra for 5% damping and the ratios of maximum spectral values divided by the ground values are calculated.. The spectra are computed using the Seismosignal software.

We investigate whether the above ratios can be correlated with the magnitude of the earthquake  $M_w$ , the closest distance from the fault CID, the pulse duration  $\gamma$  and the Rowshandel directivity factor  $\xi$ , before and after the extraction of the pulse,

creating the appropriate diagrams. Also, we check whether the values of elastic response spectra of Eurocode 8 for 5% damping are able to cover adequately the computed ratios. For this purpose, the values of elastic spectral displacement of EC8 are appropriately normalized by dividing the corresponding spectral value by the ground displacement.

Especially for the directivity factor  $\xi$  further investigation is made in order to find out whether it can be efficiently used as a pulse indicator. Positive values of the coefficient  $\xi$  correspond to forward directivity phenomenon, while negative ones correspond to backward directivity phenomenon. The factor  $\xi$  was calculated by using a simple program in the FORTRAN language.

At the last part of this thesis the ratio of maximum spectral displacement for zero damping divided by the integral of the absolute ground velocity CAD is introduced as pulse indicator. In a single oscillator with harmonic excitation at its base, the theoretical value of the ratio for zero damping is  $\pi / 4$ . Records with values close or above  $\pi / 4$  may indicate the presence of a pulse in velocity time history. For this purpose the ratio  $\max SD_{0\%} / CAD$  is calculated for the 90 pulse-like records of Baker and for 43 non pulse-like.

Finally, the effectiveness of the coefficient  $\tilde{c}'$  as an indicator of directivity is investigated.

From the processing of our data and records we get the following results.

### **Ratio of maximum spectral values divided by the corresponding ground values**

- At the elastic velocity response spectra of pulse-like records for 5% damping, the average ratio of maximum spectral velocity divided by the ground velocity equals 2.14 and by removing the first significant pulse is reduced at 1.40, for the initial ground velocity. After removing all the pulses from the velocity time history the ratio is further reduced and takes the value 1.17.
- At the elastic displacement response spectra of pulse-like records for 5% damping, the average ratio of maximum spectral displacement divided by the ground displacement, equals 1.97 and by removing the first significant pulse is reduced at 1.08, for the initial ground displacement. After removing all the pulses from the velocity time history the ratio is further reduced and takes the value 0.85
- The ratio of maximum spectral values towards the corresponding ground values for the velocity and displacement response spectra, follow the line  $y = x$

- The ratio of maximum spectral values of pseudo velocity before and after the removal of all pulses is almost the same as the ratio of maximum spectral values of displacement and is 2.04 and 2.57 respectively. These values could be correlated with the rate of 2.5 that Newmark & Hall, 1969, McGuire, (1975) used to calculate the effective spectral values.

#### **Earthquake Magnitude $M_w$ and ratio of maximum spectral values divided by the corresponding ground values**

- The ratio of the maximum spectral value divided by the ground value, is independent of the magnitude of the earthquake for both the pseudo-velocity and displacement spectra, before and after the extraction of the pulses.

#### **Pulse duration $\gamma$ and ratio of maximum spectral values divided by the corresponding ground values**

- The ratio of the maximum spectral value divided by the ground value is independent of pulse duration  $\gamma$  for both the pseudo-velocity and displacement spectra, before and after the extraction of the pulses.

#### **Closest distance to fault and ratio of maximum spectral values divided by the corresponding ground values**

- The ratio of the maximum spectral value divided by the ground value, is independent of the closest distance to the fault for both the pseudo-velocity and displacement spectra, before and after the extraction of the pulses.

#### **Directivity factor $\xi$ (Rowshandel 2006)**

- The ratio of the maximum spectral value divided by the ground value, is independent of the  $\xi$  factor for both the pseudo-velocity and displacement spectra, before and after the extraction of the pulses.
- It is obvious than the directivity factor  $\xi$  cannot be used as directivity factor, as for the pulse-like records, only the 54% get positive values of  $\xi$

## **Eurocode 8**

- The corresponding displacement values of Eurocode 8 seem cover sufficiently the computed ratios before and after the extraction of the pulses from the velocity time history.

## **Ratio $\max SD_{0\%} / CAD$**

- The pulse-like records get values of  $\max SD_{0\%} / CAD$  greater than 0.47 and they seem to follow a normal distribution with mean value 0.86 and standard deviation 0.23.
- The non pulse-like records get values of  $\max SD_{0\%} / CAD$  greater than 0.33 and they seem to follow a normal distribution with mean value 0.56 and standard deviation 0.18.
- The majority of pulse-like records, in particular 80% gets values of the ratio greater than 0.6
- The majority of non-pulse recordings and in particular 80%, gets values of the ratio smaller than 0.6.
- There is an overlap region for pulse and non-pulse like records for the ratio  $\max SD / CAD$  from 0.45 to about 0.9
- Fifty percent of non-pulse records according to Baker get ratio values greater than 0.6
- The ratio  $\max SD_{0\%} / CAD$  can be used as a pulse indicator for the records.

## **Integral of the absolute ground velocity CAD**

- In the diagrams of CAD function the slope of the line corresponding to the pulse is more intense at the pulse-like records than the slope of the non-pulse like records.
- The starting and the ending time of the intense slope correspond to the starting and ending time of the pulse at the velocity time history. These times can be used as a criterion for the arrival time of the pulse at the velocity time history.

## **Directivity coefficient $\tilde{c}'$**

- The coefficient  $\tilde{c}'$  probably cannot be used as a directivity factor.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### Κεφάλαιο 1 – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

1.1	Εισαγωγή	3
1.1.1	Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας	3
1.1.2	Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου	7
1.2	Μοντέλα προσομοίωσης σεισμών κοντινού πεδίου	13
1.3	Μεταβολή των ιδιοτήτων του παλμού της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου συναρτήσει του μεγέθους του σεισμού	19

### Κεφάλαιο 2 – ΝΕΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΠΟΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

2.1	Εισαγωγή	29
2.2	Η βάση δεδομένων και τα μοντέλα απομείωσης	29
2.3	Αλληλεπιδράσεις του προγράμματος και αναθεωρήσεις	32

### Κεφάλαιο 3 – ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

3.1	Εισαγωγή	37
3.2	Το μοντέλο προσομοίωσης των Shahi-Baker για το κοντινό πεδίο	38
3.2.1	Αναγνώριση της ύπαρξης παλμικής κίνησης	38
3.2.2	Ανάπτυξη μοντέλων υπολογισμού της οριζόντιας φασματικής επιτάχυνσης	41
3.2.3	Περίοδος παλμού	48
3.2.4	Επαύξηση της φασματικής επιτάχυνσης λόγω του παλμού κατευθυντικότητας	50

### Κεφάλαιο 4 – ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΝΕΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΠΟΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ (NGA) – Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ $\xi$

4.1	Εισαγωγή	57
4.2	Το μοντέλο κατευθυντικότητας του Rowshandel	59
4.2.1	Ο συντελεστής κατευθυντικότητας $\xi$	59
4.2.2	Περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού του συντελεστή κατευθυντικότητας $\xi$	60

## **Κεφάλαιο 5 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΙΣΟΧΡΟΝΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ**

5.1 Εισαγωγή	65
5.2 Ο ισόχρονος συντελεστής κατευθυντικότητας IDP - ζ'	67

## **Κεφάλαιο 6 – ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΚΥΜΑΤΙΔΙΑ – Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΒΑΚΕΡ**

6.1 Εισαγωγή	73
6.2 Αιτίες δημιουργίας παλμού ταχύτητας	74
6.3 Επιλογή της διαδικασίας ταξινόμησης	74
6.4 Ανάλυση με κυματίδια	75
6.5 Ταξινόμηση των χρονοϊστοριών	77
6.6 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού	82

## **Κεφάλαιο 7 – ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ ΣΤΗ ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΝΕΛΙΞΗΣ**

7.1 Εισαγωγή	89
7.2 Προσδιορισμός της περιόδου των σημαντικών παλμών	89
7.3 Καθορισμός των παραμέτρων των κυματιδίων	93
7.4 Μεθοδολογία προσδιορισμού του παλμού στη χρονοϊστορία ταχύτητας	96

## **Κεφάλαιο 8 – ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΠΑΛΜΟΥΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ**

8.1 Εισαγωγή	101
8.2 Περιγραφή της διαδικασίας επεξεργασίας των παλμικών καταγραφών	102
8.3 Διερεύνηση της συσχέτισης των παραμέτρων της κατευθυντικότητας με τα χαρακτηριστικά των παλμικών κινήσεων κοντινού πεδίου	108
8.3.1 Μέγεθος σεισμού και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική	110
8.3.2 Χρονική διάρκεια παλμών $\gamma$ και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική	113
8.3.3 Κοντινότερη απόσταση από το ρήγμα CID και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική	116

8.3.4 Συντελεστής κατευθυντικότητας $\xi$ και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική	120
8.3.5 Ολοκλήρωμα της απόλυτης εδαφικής ταχύτητας CAD	127
8.3.6 Ο ισόχρονος συντελεστής κατευθυντικότητας $\tilde{c}'$	138

<b>Κεφάλαιο 9 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>139</b>
----------------------------------	------------

**ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

**ΠΙΝΑΚΕΣ**

<b>Πίνακας 1.1:</b> Παράγοντες που χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις απλοποιημένες εδαφικές κινήσεις ημιτονικού παλμού (Rodriguez - Marek 2000)	10
<b>Πίνακας 1.2:</b> Τροποποίηση παραμέτρων εδαφικής κίνησης για την εκτίμηση της επίδρασης της κατευθυντικότητας. Οι παράμετροι $X$ , $Y$ , $\theta$ , $\phi$ ορίστηκαν στο σχήμα 1. 5. Οι τροποποιήσεις φαίνονται στο σχήμα 1	14
<b>Πίνακας 1.3:</b> Παράμετροι του μοντέλου Rodriguez - Marek (2000) για την PHV	15
<b>Πίνακας 1.4:</b> Παράμετροι του μοντέλου Rodriguez-Marek (2000) για την περίοδο του παλμού	17
<b>Πίνακας 1.5:</b> Αριθμός παλμών ( $N_p$ ) 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. (Rodriguez-Marek2000)	19
<b>Πίνακας 6.1:</b> Παλμικές καταγραφές της βάσης δεδομένων NGA (Baker 2007)	85
<b>Πίνακας 8.1:</b> Παλμικές καταγραφές σύμφωνα με τον Baker (2007) από τη βάση δεδομένων NGA και τα βασικά χαρακτηριστικά τους σύμφωνα με τη μέθοδο των Mimoglou et al (2012)	103
<b>Πίνακας 8.2:</b> Μέσος όρος τιμών επαύξησης των φασμάτων για απόσβεση 5%	108
<b>Πίνακας 8.3:</b> Μέσος όρος λόγων επαύξησης για απόσβεση 5%	108
<b>Πίνακας 8.4:</b> Τιμές του συντελεστή $S$ και των περιόδων $T_B$ , $T_C$ , και $T_D$ ανάλογα με την κατηγορία του εδάφους	122
<b>Πίνακας 8.5:</b> Μέση τιμή των τιμών $\max SD/CAD$ για τις παλμικές και μη παλμικές καταγραφές.	133
<b>Πίνακας 8.6:</b> Μέση τιμή των τιμών $\max SD/CAD$ για τις παλμικές και μη παλμικές καταγραφές μετά την αφαίρεση των καταγραφών που αποδείχτηκαν παλμικές	137



## ΣΧΗΜΑΤΑ

- Σχήμα 1.1:** 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). 4
- Σχήμα 1.2:** 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. 5
- Σχήμα 1.3:** Σχηματικό διάγραμμα των προσανατολισμών της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και για ρήγμα κατακόρυφης βύθισης 6
- Σχήμα 1.4:** 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 6
- Σχήμα 1.5:** Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να ερμηνεύσουν τις συνθήκες κατευθυντικότητας της διάρρηξης (Somerville et al 1997a) 8
- Σχήμα 1.6:** Προβλέψεις από τη σχέση των Somerville et al (1997a) μεταξύ διαφορετικών συνθηκών κατευθυντικότητας 8
- Σχήμα 1.7:** Απλοποιημένοι παλμοί που έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές 9
- Σχήμα 1.8:** Παράγοντες που χρειάζονται για να καθορίσουν την παράλληλη και την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα για απλοποιημένους παλμούς ταχύτητας. Τα σύμβολα N, P αντιστοιχούν στις κάθετες και παράλληλες κινήσεις ως προς τη διεύθυνση του ρήγματος αντίστοιχα (Rodriguez - Marek 2000) 11
- Σχήμα 1.9:** 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 11
- Σχήμα 1.10:** Απλοποιημένη αναπαράσταση ημιτονικού παλμού για εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Η PHV (μέγιστη οριζόντια ταχύτητα) για παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα αντιστοιχεί στο 50% της PHV κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (Rodriguez-Marek 2000) 12

- Σχήμα 1.11:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης για εκτίμηση της PHV με σχέσεις προτεινόμενες από διάφορους ερευνητές με στοιχεία από βάσεις δεδομένων σεισμών κοντινού πεδίου και με το φαινόμενο της εμπρόσθιας κατευθυντικότητας (Rodriguez - Marek 2000) 16
- Σχήμα 1.12:** Σύγκριση μοντέλου Rodriguez-Marek (2000) με σχέσεις που αναπτύχθηκαν από Somerville (1998) για την Tv και από Alavi και Kranwinkler (2000) για την Tv-p (Rodriguez-Marek 2000) 18
- Σχήμα 1.13:** Μοντέλο Rodriguez-Marek για την εκτίμηση της περιόδου του παλμού για βράχο και έδαφος. Οι έντονες καμπύλες αναπαριστούν τη μέση τιμή και οι λεπτές τις τυπικές αποκλίσεις (Rodriguez-Marek 2000) 18
- Σχήμα 1.14α:** Καταγραφές παλμών ταχύτητας στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα τριών σεισμών μέτριου μεγέθους (αριστερή στήλη) και τριών σεισμών μεγάλου μεγέθους (δεξιά στήλη) σχεδιασμένοι σε ίδια κλίμακα 20
- Σχήμα 1.14β:** Αντίστοιχα φάσματα των χρονοϊστοριών του σχήματος 14 α συγκρινόμενα με τον κανονισμό UBC 1994 21
- Σχήμα 1.15:** Φασματικές ταχύτητες παλμών κάθετα στο ρήγμα ενδιάμεσων (αριστερά) και ισχυρότερων (δεξιά) σεισμών 22
- Σχήμα 1.16:** Φασματικές μετακινήσεις παλμών στην κάθετη συνιστώσα του ρήγματος ενδιάμεσων (αριστερά) και ισχυρών (δεξιά) σεισμών 23
- Σχήμα 1.17:** Διαβάθμιση με το μέγεθος απλών παλμών ταχύτητας που αντιπροσωπεύουν κινήσεις κοντινού πεδίου (αριστερά) και τα αντίστοιχα φάσματα επιταχύνσεων (κέντρο) και ταχυτήτων (δεξιά) 24
- Σχήμα 1.18:** Μοντέλο φασματικής απόκρισης κοντινού πεδίου σε απόσταση 5km για βράχο (αριστερά) και εδαφικό σχηματισμό (δεξιά). Πάνω: μοντέλο χωρίς κατευθυντικότητα των Abrahamson & Silva (1997), μέση: μοντέλο διευρυμένης συχνότητας κατευθυντικότητας των Somerville et al (1997) και κάτω: μοντέλο κατευθυντικότητας σε στενή ζώνη συχνοτήτων του Somerville (2003) 25
- Σχήμα 2.1:** Κατανομή καταγραφών εδαφικής κίνησης της νέας βάσης δεδομένων ανάλογα με το μέγεθος και την απόσταση από το ρήγμα 30
- Σχήμα 3.1:** Απεικόνιση της διαδικασίας που χρησιμοποιεί ο Baker (2007) για την αποκοπή του μεγαλύτερου παλμού 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 39

- 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 40
- 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 44
- Σχήμα 3.4:** Σχήμα που επεξηγεί τις απαιτούμενες παραμέτρους για τη λογιστική παλινδρόμηση για (α) ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και (b) ρήγμα μη οριζόντιας ολίσθησης. Παρουσιάζεται επίσης η γωνία  $\alpha$  μεταξύ της διεύθυνσης ενδιαφέροντος και της διεύθυνσης του ρήγματος 45
- Σχήμα 3.5:** Χάρτης του σεισμού του Imperial Valley που απεικονίζει (α) ισοϋψείς πιθανότητας εμφάνισης παλμού για δεδομένη διάρρηξη και (b) περιοχές όπου παρατηρήθηκε παλμική εδαφική κίνηση 46
- Σχήμα 3.6:** Χάρτης του σεισμού του Northridge που απεικονίζει (α) ισοϋψείς πιθανότητας εμφάνισης παλμού για δεδομένη διάρρηξη και (b) περιοχές όπου παρατηρήθηκε παλμική εδαφική κίνηση 46
- Σχήμα 3.7:** Απεικόνιση της πιθανότητας εμφάνισης παλμού σε γωνία  $\alpha$  δεδομένου του παλμού σε κάποια θέση για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και μη 48
- Σχήμα 3.8:** Περίοδος του παλμού σχετιζόμενη με το σεισμικό μέγεθος για εδαφικές κινήσεις χαρακτηριζόμενες ως παλμικές 49
- Σχήμα 3.9:** Παρατηρούμενες τιμές  $\epsilon$  της απομένουσας εδαφικής κίνησης 50
- Σχήμα 3.10:** Συντελεστής ενίσχυσης των φασματικών επιταχύνσεων λόγω της παρουσίας των παλμικών χαρακτηριστικών στις εδαφικές κινήσεις. (α) γραφική παράσταση των παραγόμενων εξισώσεων μαζί με τις παρατηρήσεις πεδίου και (b) μέση ενίσχυση λόγω της καταγραφής παλμών σε διάφορες διευθύνσεις 51
- Σχήμα 3.11:** της τυπικής απόκλισης των υπολοίπων από προβλέψεις του παλμικού φάσματος  $\sigma_{InSa,pulse}$  προς την τυπική απόκλιση  $\sigma_{InSa,gmm}$  του μοντέλου των Boore και Atkinson (2008). 53
- Σχήμα 4.1:** Α) Σχηματικό διάγραμμα της γεωμετρίας και του προσανατολισμού του ρήγματος ως προς την υπό μελέτη θέση, Β) διεύθυνση της διάρρηξης (ολίσθησης) και προσανατολισμός ως προς τη θέση  $j$  και το σημείο του ρήγματος  $i$  (Rowshandel 2006) 60

<b>Σχήμα 5.1.α:</b> Περιβάλλουσες του χρόνου διάρρηξης (Spudich et al 2004)	66
<b>Σχήμα 5.1.β:</b> Περιβάλλουσες του χρόνου διάδοσης των S κυμάτων (Spudich et al 2004)	66
<b>Σχήμα 5.1.γ:</b> Περιβάλλουσες του χρόνου άφιξης (Spudich et al 2004)	66
<b>Σχήμα 5.2:</b> Η διάρρηξη και η γεωμετρία της θέσης (Spudich et al 2004)	68
<b>Σχήμα 6.1:</b> Παραδείγματα κάθετων στο ρήγμα συνιστωσών σε σεισμούς κοντινού πεδίου (Baker 2007)	73
<b>Σχήμα 6.2:</b> Πρότυπα μητρικά κυματίδια(Baker 2007)	75
<b>Σχήμα 6.3:</b> Μετασχηματισμοί κυματιδίων (Baker 2007)	76
<b>Σχήμα 6.4:</b> Περιγραφή της διαδικασίας αφαίρεσης παλμού (Baker 2007)	78
<b>Σχήμα 6.5:</b> Περιγραφή της διαδικασίας αφαίρεσης παλμού (Baker 2007)	79
<b>Σχήμα 6.6:</b> Παλμός στην αρχή της χρονοϊστορίας. α,β)χρονοϊστορία ταχύτητας και παλμού ,γ) CSV (Baker 2007)	80
<b>Σχήμα 6.7:</b> Παλμός στο τέλος της χρονοϊστορίας. α,β)χρονοϊστορία ταχύτητας και παλμού ,γ) CSV(Baker2007)	81
<b>Σχήμα 6.8:</b> Εδαφική κίνηση με μικρή PGV που εμφανίζεται ως παλμική και αποκλείεται (Baker 2007)	81
<b>Σχήμα 6.9:</b> Κυματίδιο Daubechies και ημιτονικό κύμα με περίοδο ίση με τη μέγιστη της κυματομορφής από το φάσμα Fourier (Baker 2007)	83
<b>Σχήμα 7.1:</b> Καταγραφή G06-320 (Coyote Lake) 1979 α)χρονοϊστορία ταχύτητας, β)PSV 5% (Mimoglou et al 2012)	90
<b>Σχήμα 7.2:</b> 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, 2012)	91
<b>Σχήμα 7.3:</b> Φάσματα συνέλιξης και προσδιορισμός της περιόδου $T_i$ για τις καταγραφές)G06-320 (Coyote Lake), β) PCD-164 San Fernando (Mimoglou et al, 2012)	92
<b>Σχήμα 7.4:</b> Σχέση μεταξύ της μέγιστης φασματικής μετακίνησης $S_{dmax}$ και CAD για κυματίδιο M&P και διάφορες τιμές $\gamma$ και $\nu$ . α)μηδενική απόσβεση, β) απόσβεση 5%.(Mimoglou et al 2012)	95

- Σχήμα 8.1:** Διάγραμμα συσχέτισης της επαύξησης στα φάσματα μετακίνησης και ταχύτητας, α)με παλμό, β)με αφαίρεση όλων των παλμών 109
- Σχήμα 8.2:** Φασματική επαύξηση ταχύτητας για απόσβεση 5% συναρτήσει του μεγέθους του σεισμού, α)αρχική καταγραφή, β)καταγραφή με αφαίρεση 1<sup>ου</sup> παλμού, γ)καταγραφή με αφαίρεση όλων των παλμών 111
- Σχήμα 8.3:** Φασματική επαύξηση μετακίνησης για απόσβεση 5% συναρτήσει του μεγέθους του σεισμού, α)αρχική καταγραφή, β)καταγραφή με αφαίρεση 1<sup>ου</sup> παλμού, γ)καταγραφή με αφαίρεση όλων των παλμών 112
- Σχήμα 8.4:** Φασματική επαύξηση ταχύτητας για απόσβεση 5% συναρτήσει της διάρκειας του παλμού, α)αρχική καταγραφή, β)καταγραφή με αφαίρεση 1<sup>ου</sup> παλμού, γ)καταγραφή με αφαίρεση όλων των παλμών, δ) λόγος φασμάτων 114
- Σχήμα 8.5:** Φασματική επαύξηση μετακίνησης για απόσβεση 5% συναρτήσει της διάρκειας του παλμού, α)αρχική καταγραφή, β)καταγραφή με αφαίρεση 1<sup>ου</sup> παλμού, γ)καταγραφή με αφαίρεση όλων των παλμών, δ) λόγος φασμάτων 116
- Σχήμα 8.6:** Ορισμός των αποστάσεων σύμφωνα με την βάση δεδομένων NGA (NGA documentation) 116
- Σχήμα 8.7:** Φασματική επαύξηση ταχύτητας για απόσβεση 5% συναρτήσει της κοντινότερης απόστασης από το ρήγμα, α)αρχική καταγραφή, β)καταγραφή με αφαίρεση 1<sup>ου</sup> παλμού, γ)καταγραφή με αφαίρεση όλων των παλμών, δ) λόγος φασμάτων 118
- Σχήμα 8.8:** Φασματική επαύξηση μετακίνησης για απόσβεση 5% συναρτήσει της κοντινότερης απόστασης από το ρήγμα, α)αρχική καταγραφή, β)καταγραφή με αφαίρεση 1<sup>ου</sup> παλμού, γ)καταγραφή με αφαίρεση όλων των παλμών, δ) λόγος φασμάτων 119
- Σχήμα 8.9:** Σχηματική απεικόνιση παραμέτρων υπολογισμού του συντελεστή κατευθυντικότητας  $\xi$  (Rowshandel 2006) 120
- Σχήμα 8.10:** Το μοντέλο των Zeng and Anderson (2000) για το ρήγμα του σεισμού του Northridge (1994) (Rowshandel database 2006). 121
- Σχήμα 8.11:** Ελαστικό Φάσμα Απόκρισης EC8 122
- Σχήμα 8.12:** Φασματική επαύξηση ταχύτητας για απόσβεση 5% συναρτήσει του συντελεστή κατευθυντικότητας  $\xi$ , α)αρχική καταγραφή, β)καταγραφή με αφαίρεση 1<sup>ου</sup> παλμού, γ)καταγραφή με αφαίρεση όλων των παλμών, δ) λόγος φασμάτων 124

<b>Σχήμα 8.13:</b> Φασματική επαύξηση μετακίνησης για απόσβεση 5% συναρτήσει του συντελεστή κατευθυντικότητας $\xi$ , α)αρχική καταγραφή, β)καταγραφή με αφαίρεση 1 <sup>ου</sup> παλμού, γ)καταγραφή με αφαίρεση όλων των παλμών, δ) λόγος φασμάτων	126
<b>Σχήμα 8.14:</b> Διάγραμμα CAD για μια παλμική καταγραφή. Με έντονη μαύρη γραμμή απεικονίζεται το κομμάτι που αντιστοιχεί στον παλμό.	128
<b>Σχήμα 8.15:</b> Ποσοστά εμφάνισης των παλμικών καταγραφών ανά ομάδα τιμών του λόγου maxSD/CAD με α)βήμα 0.1, β)με βήμα 0.05	129
<b>Σχήμα 8.16:</b> Ιστόγραμμα τιμών του λόγου maxSD/CAD για τις παλμικές καταγραφές	130
<b>Σχήμα 8.17:</b> Ποσοστά εμφάνισης των μη παλμικών καταγραφών ανά ομάδα τιμών του λόγου maxSD/CAD με α)βήμα 0.1, β)με βήμα 0.05	131
<b>Σχήμα 8.18:</b> Ιστόγραμμα τιμών του λόγου maxSD/CAD για τις μη παλμικές καταγραφές	131
<b>Σχήμα 8.19:</b> Ποσοστά εμφάνισης των παλμικών και μη παλμικών καταγραφών ανά ομάδα τιμών του λόγου maxSD/CAD	132
<b>Σχήμα 8.20:</b> Αθροιστικές καμπύλες των παλμικών και μη παλμικών καταγραφών ανά ομάδα τιμών του λόγου maxSD/CAD	133
<b>Σχήμα 8.21:</b> Διάγραμμα CAD για μια παλμική και μη παλμική καταγραφή. Με έντονη μαύρη γραμμή απεικονίζεται το κομμάτι που αντιστοιχεί στον παλμό της παλμικής καταγραφής	133
<b>Σχήμα 8.22:</b> Τιμές του λόγου maxSD/CAD για το σύνολο των καταγραφών	134
<b>Σχήμα 8.23:</b> Χρονοϊστορία ταχύτητας καταγραφής 960	134
<b>Σχήμα 8.24:</b> Χρονοϊστορία ταχύτητας καταγραφής 1054	135
<b>Σχήμα 8.25:</b> Χρονοϊστορία ταχύτητας καταγραφής 1077	135
<b>Σχήμα 8.26:</b> Χρονοϊστορία ταχύτητας καταγραφής 1116	136
<b>Σχήμα 8.27:</b> Χρονοϊστορία ταχύτητας καταγραφής 1116	136
<b>Σχήμα 8.28:</b> Ποσοστά εμφάνισης των παλμικών και μη παλμικών καταγραφών ανά ομάδα τιμών του λόγου maxSD/CAD μετά την αφαίρεση των καταγραφών που αποδείχτηκαν παλμικές	137
<b>Σχήμα 8.29:</b> Αθροιστικές καμπύλες των παλμικών και μη παλμικών καταγραφών ανά ομάδα τιμών του λόγου maxSD/CAD μετά την αφαίρεση των καταγραφών που αποδείχτηκαν παλμικές	137

# Κεφάλαιο 1

## ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

---

### 1.1 Εισαγωγή

1.1.1 Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας

1.1.2 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου

### 1.2 Μοντέλα προσομοίωσης σεισμών κοντινού πεδίου

1.3 Μεταβολή των ιδιοτήτων του παλμού της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου  
συναρτήσει του μεγέθους του σεισμού





## 1.1 Εισαγωγή

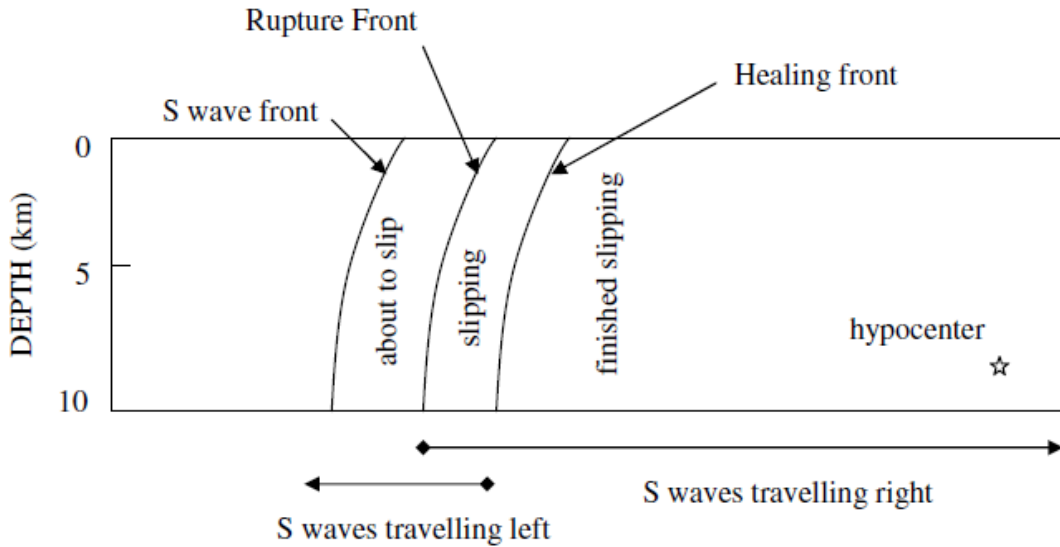
Οι εδαφικές κινήσεις κοντά σ' ένα ρήγμα μπορεί διαφέρουν σημαντικά από εκείνες που βρίσκονται μακριά από αυτό. Στην περιοχή που βρίσκεται κοντά στη σεισμική πηγή τα στοιχεία της εδαφικής κίνησης καθορίζονται από το μηχανισμό διάρρηξης, την κατεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης σε σχέση με την περιοχή και τις πιθανές μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις ως αποτέλεσμα της ολίσθησης του ρήγματος. Η περιοχή αυτή ονομάζεται κοντινό πεδίο και ορίζεται ως η ζώνη σε απόσταση μικρότερη των 20-60 km από την περιοχή του ρήγματος.

### 1.1.1 Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας

Η έμπροσθεν κατευθυντικότητα (forward directivity) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η διάδοση της διάρρηξης και η κατεύθυνση της ολίσθησης στο ρήγμα γίνονται προς την ίδια περιοχή. Αυτό συμβαίνει επειδή η ταχύτητα της διάρρηξης στο ρήγμα είναι σχεδόν ίδια με την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων του βράχου κοντά στην πηγή. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1.1 για μηχανισμό οριζόντιας ολίσθησης όπου 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 που χαρακτηρίζεται από μεγάλο εύρος ανάμεσα στις μεγάλες περιόδους και τη μικρή διάρκεια.

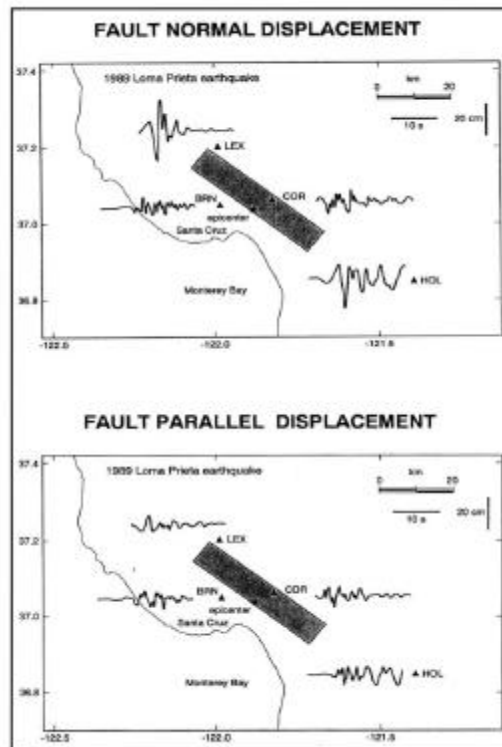
Στην περίπτωση που η διάδοση της διάρρηξης είναι αντίθετη από την μελετούμενη περιοχή, η άφιξη κάθε παλμού επιμέρους σεισμικής διάρρηξης γίνεται στο τέλος του προηγούμενου του. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται όπισθεν κατευθυντικότητα (backward directivity) και χαρακτηρίζεται από κινήσεις με σχετικά μεγάλη διάρκεια και μικρό εύρος. Η «ουδέτερη κατευθυντικότητα» (neutral directivity) εμφανίζεται όταν η ρήξη δεν είναι ούτε προς ούτε μακριά από την περιοχή.

Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας απαντάται στις οριζόντιες καταγραφές που είναι κάθετες προς τη ρηξιγενή ζώνη. Οι παλμοί κατευθυντικότητας είναι εμφανείς στη χρονοϊστορία ταχύτητας.



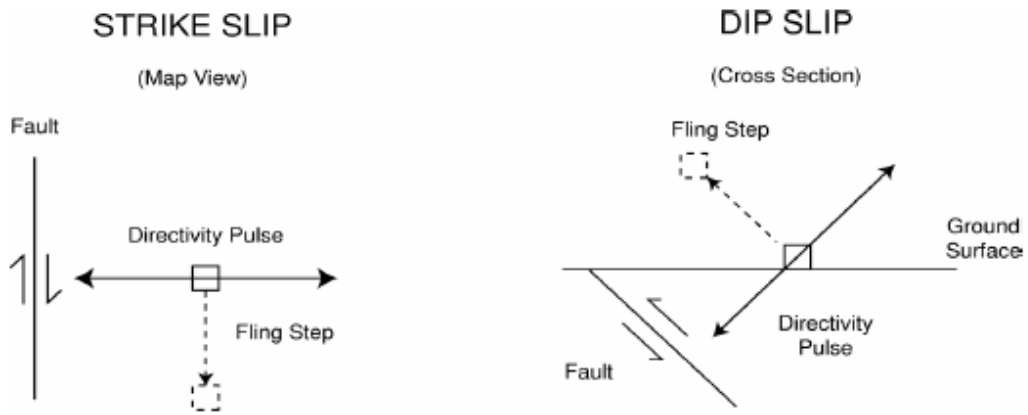
**Σχήμα 1.1:** Σχηματικό διάγραμμα επίδρασης της κατευθυντικότητας της διάρρηξης για οριζόντιο ρήγμα ολίσθησης. Η διάρρηξη αρχίζει στο υπόκεντρο και διαδίδεται με ταχύτητα περίπου ίση με το 80% της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Η εικόνα παρουσιάζει ένα στιγμότυπο του μετώπου της ρήξης σε μια δεδομένη στιγμή (από Somerville et al 1997a).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα των εδαφικών μετατοπίσεων που επηρεάζονται από την κατευθυντικότητα είναι οι μετατοπίσεις που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του σεισμού στο Loma Prieta του 1989 και παρουσιάζονται στο σχήμα 1.2. Στο επίκεντρο του σεισμού οι οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις είναι μέτριες τόσο στις κάθετες όσο και στις παράλληλες με το ρήγμα συνιστώσες κάτι που αποδίδεται στην όπισθεν κατευθυντικότητα. Στα άκρα του ρήματος παρ' όλα αυτά η έμπροσθεν κατευθυντικότητα αναγκάζει τις οριζόντιες εδαφικές κινήσεις στην κάθετη διεύθυνση του ρήματος να είναι παλμικές και πολύ μεγαλύτερες από τις κινήσεις των παραλλήλων συνιστωσών του ρήματος, οι οποίες είναι παρόμοιες με εκείνες κοντά στο επίκεντρο. Οι μεγάλες παλμικές κινήσεις εμφανίζονται μόνο στην κάθετη με το ρήγμα συνιστώσα (fault normal) και μόνο μακριά από το επίκεντρο.

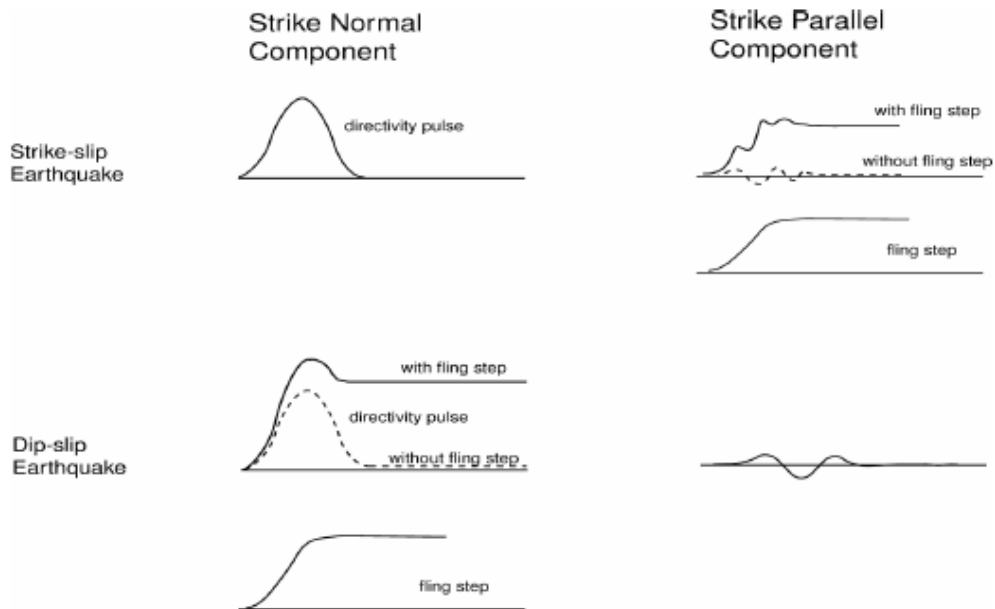


**Σχήμα 1.2:** Αποτελέσματα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες μετακινήσεων του σεισμού του Loma Prieta του 1989 για τις κάθετες (άνω) και τις παράλληλες (κάτω) στο ρήγμα συνιστώσες. EERI, 1995.

Στις σύγχρονες ψηφιακές καταγραφές των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου παρατηρούνται μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις. Οι εν λόγω στατικές μετατοπίσεις καλούνται παραμένουσες μετακινήσεις (fling step) και είναι αποτέλεσμα της συνολικής ολίσθησης του ρήγματος. Οι μετακινήσεις αυτές εμφανίζονται παράλληλα στη διεύθυνση ολίσθησης και δε συνδέονται άμεσα με τις προαναφερθείσες δυναμικές μετακινήσεις που καλούνται παλμός κατευθυντικότητας της διάρρηξης. Στα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης ο παλμός κατευθυντικότητας εμφανίζεται στην κάθετη συνιστώσα ενώ η παραμένουσα μετακίνηση στην παράλληλη. 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 1.3, ενώ οι χρονοϊστορίες στις οποίες αυτές εμφανίζονται μαζί και χωριστά παρουσιάζονται στο σχήμα 1.4.



**Σχήμα 1.3:** Σχηματικό διάγραμμα των προσανατολισμών της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και για ρήγμα κατακόρυφης βύθισης

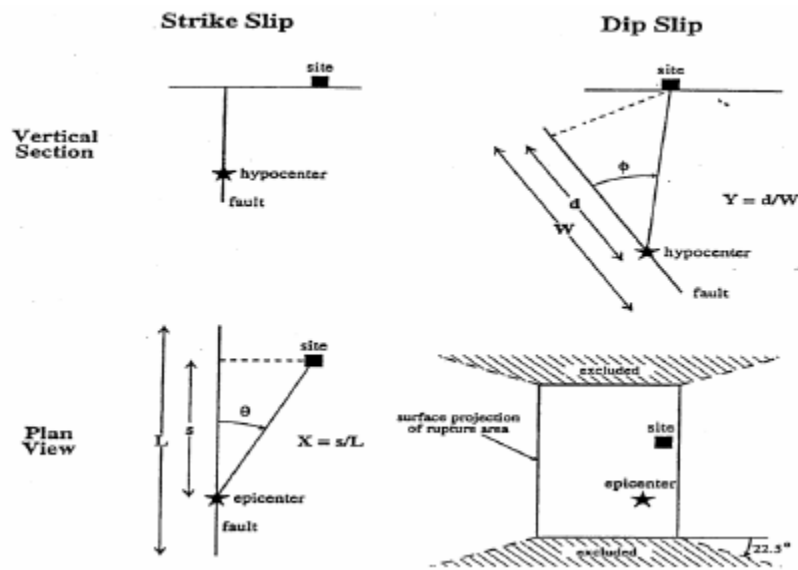


**Σχήμα 1.4:** Σχηματικό διάγραμμα των χρονοϊστοριών για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα κατακόρυφης βύθισης στο οποίο η παραμένουσα μετακίνηση και ο παλμός κατευθυντικότητας παρουσιάζονται μαζί και χωριστά

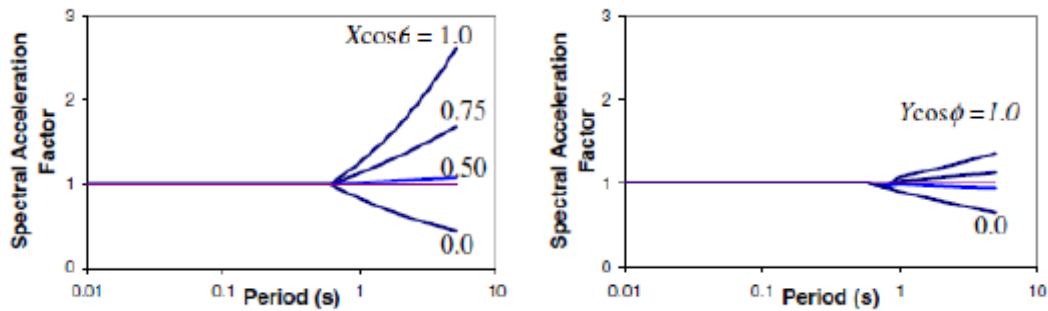
### 1.1.2 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου

Οι Somerville et al (1997a) μελέτησαν τις συνθήκες που οδηγούν σε έμπροσθεν και όπισθεν κατευθυντικότητα. Οι καταγραφές που έχουν επηρεαστεί από το φαινόμενο της έμπροσθεν κατευθυντικότητας παρουσιάζουν ενίσχυση των φασματικών τιμών στην περιοχή των μεσαίων και μεγάλων περιόδων, με την αύξηση αυτή να είναι εντονότερη όσο μεγαλύτερο είναι το τμήμα της ρηγμάτωσης που μεσολαβεί μεταξύ της εστίας και της θέσης καταγραφής. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5, η διαφοροποίηση στην επίδραση της κατευθυντικότητας εξαρτάται από δύο παράγοντες, τη γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της διάδοσης της διάρρηξης και της κατεύθυνσης των κυμάτων που ταξιδεύουν από το ρήγμα στην περιοχή ( $\theta$  για τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και  $\varphi$  για τα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης), και από το μέρος της επιφάνειας διάρρηξης του ρήγματος που βρίσκεται μεταξύ του υποκέντρου και της εξεταζόμενης περιοχής ( $X$  για τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και  $Y$  για τα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης). Τα σημαντικότερα αποτελέσματα έμπροσθεν κατευθυντικότητας προκύπτουν για τις μικρότερες γωνίες μεταξύ της εξεταζόμενης θέσης και του ίχνους του ρήγματος και για τα μεγαλύτερα μέρη του διερρηγμένου ρήγματος μεταξύ της θέσης και του υποκέντρου.

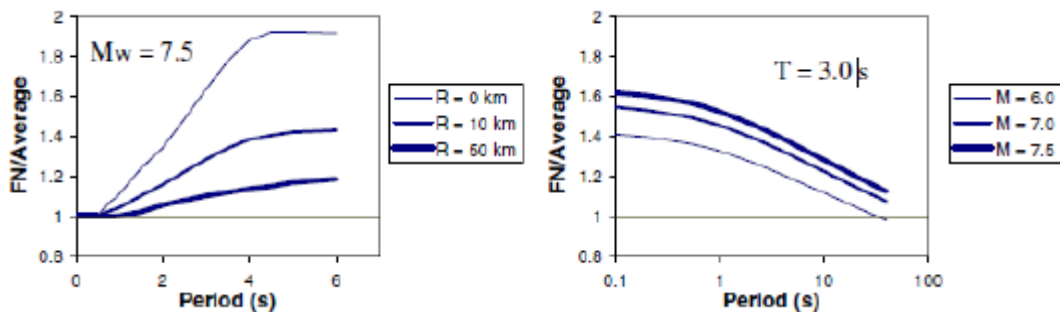
Για να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα της κατευθυντικότητας οι Somerville et al (1997a) συσχέτισαν τις ανηγμένες προς ένα μέσο φάσμα τιμές των φασμάτων απόκρισης (με 5% απόσβεση) με τις γεωμετρικές παραμέτρους που καθορίζονται στο σχήμα 1.5. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 1.6. Οι παράμετροι εδαφικής κίνησης που τροποποιούνται είναι τα μέσα οριζόντια φάσματα απόκρισης και ο λόγος των φασμάτων απόκρισης για την κάθετη και την παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα.



Σχήμα 1.5: Οι 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



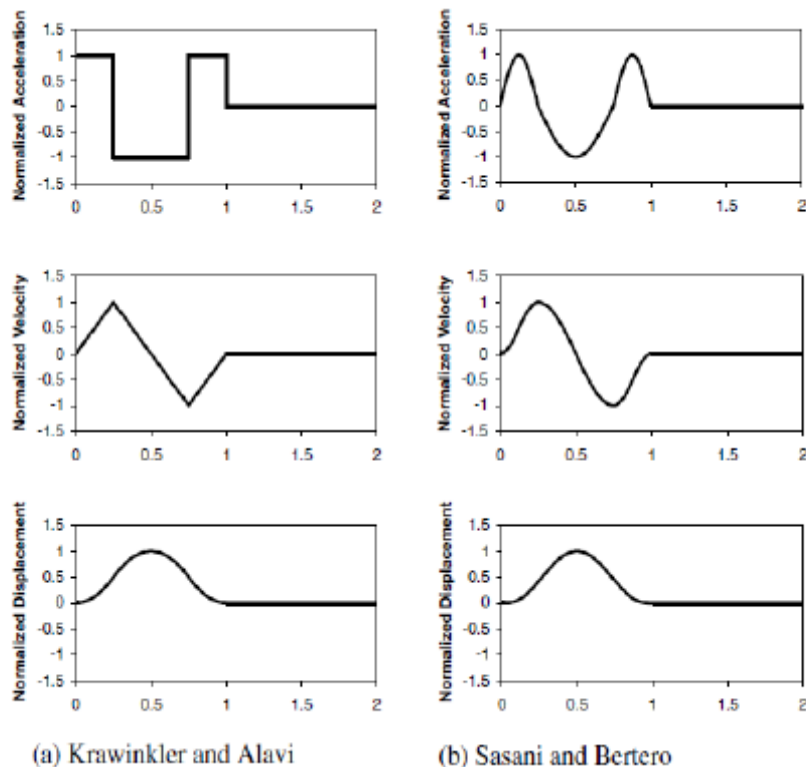
β) Αναλογία οριζόντιας φασματικής απόκρισης κάθετη στη ρήξη προς τη μέση οριζόντια για συνθήκες εμπρόσθιας κατευθυντικότητας ( $X \cos \theta = 1$ ).

Σχήμα 1.6: Προβλέψεις από τη σχέση των Somerville et al (1997a) μεταξύ διαφορετικών συνθηκών κατευθυντικότητας.

Οι έρευνες για την απόκριση των κατασκευών στους σεισμούς κοντινού πεδίου έδειξαν ότι μια αντιπροσωπευτική χρονοϊστορία των κινήσεων είναι προτιμητέα από μια αντιπροσώπευση ενός φάσματος απόκρισης (π.χ. Somerville (1998), Alavi και Kranwinkler (2000), Sasani και Bertero (2000), Rodriguez- Marek (2000)). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις εδαφικές κινήσεις που επηρεάζονται από τα φαινόμενα της κατευθυντικότητας και της παραμένουσας μετακίνησης, η ενέργεια συγκεντρώνεται σε έναν ή περισσότερους παλμούς με απλή μορφή στη χρονοϊστορία ταχύτητας.

Οι μελέτες Kranwinkler και Alavi (1998) και Sasani και Bertero (2000) έχουν δείξει ότι οι απλουστευμένες θεωρήσεις του παλμού ταχύτητας μπορούν να «συλλάβουν» τα εμφανή χαρακτηριστικά γνωρίσματα απόκρισης των κατασκευών που υποβάλλονται στις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Μερικοί απλουστευμένοι παλμοί παρουσιάζονται στο σχήμα 1.7.

Στον πίνακα 1.1 δίνονται οι ορισμοί των παραμέτρων εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, οι οποίοι διευκρινίζονται στο σχήμα 1.8. Ένας απλός χαρακτηρισμός είναι δυνατός με τη χρήση της μέγιστης οριζόντιας ταχύτητας (PHV), της κατά προσέγγιση περιόδου δεσπόζοντος παλμού ( $T_v$ ) και του αριθμού σημαντικών ημιπαλμών της κίνησης στη μεγαλύτερη κάθετη διεύθυνση στο ρήγμα.



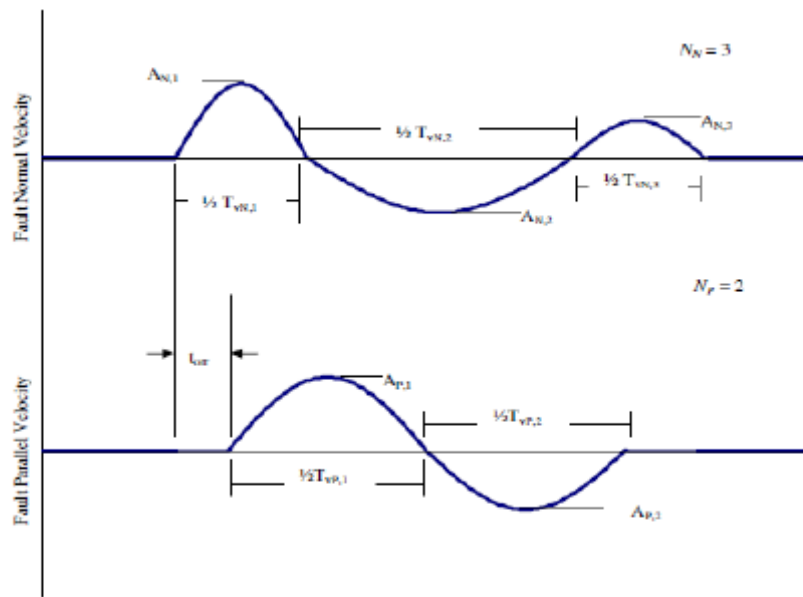
**Σχήμα 1.7:** Απλοποιημένοι παλμοί που έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές

Ο προσδιορισμός της περιόδου του παλμού χρησιμοποιεί είτε το χρόνο που χρειάζονται οι τιμές να διέλθουν από το μηδενικό άξονα (zero crossing time) είτε το χρόνο στον οποίο η ταχύτητα ισούται με το 10% της μέγιστης ταχύτητας για αυτό τον παλμό. Βέβαια ένας βαθμός αβεβαιότητας υφίσταται 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 στον υπολογισμό της από τα σημεία μηδενισμού. Οι Krapwinkler και Alavi (1998) προσδιορίζουν τον παλμό ταχύτητας από μια σαφή και σφαιρική κορυφή αιχμής στο φάσμα απόκρισης ταχύτητας της εδαφικής κίνησης. Ως εκ τούτου, αυτή η εκτίμηση της ισοδύναμης περιόδου παλμού ( $T_{v-p}$ ) είναι σχετικά σαφής. Για τις μονοπαλμικές κινήσεις αυτοί οι διαφορετικοί ορισμοί της περιόδου του παλμού παρέχουν κατά προσέγγιση ισοδύναμα αποτελέσματα. Συνολικά, ο λόγος μεταξύ της  $T_v$  και της  $T_{v-p}$  είναι 0.84 με μια τυπική απόκλιση 0.28 (Rodriguez-Marek 2000). Η σύμπτωση της  $T_v$  για μια εδαφική κίνηση σεισμού δείχνει ότι ο παλμός ταχύτητας περιέχει την ενέργεια σε μια συγκεκριμένη ζώνη περιόδων.

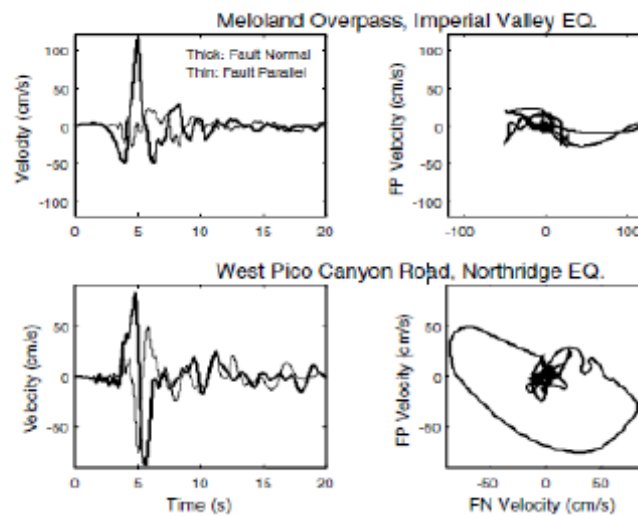
Parameter	Abbreviation	Methodology to obtain parameter
Number of significant pulses.	$N$	Number of half-cycle pulses in the velocity-time history with amplitudes at least 50% of the peak ground velocity of the record.
Pulse period.	$T_{v,i}$	For each half sine pulse, $T_{v,i} = 2(t_2 - t_1)$ , where $t_1$ 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	$PHV_{PIN}$	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	$t_{DT}$	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).

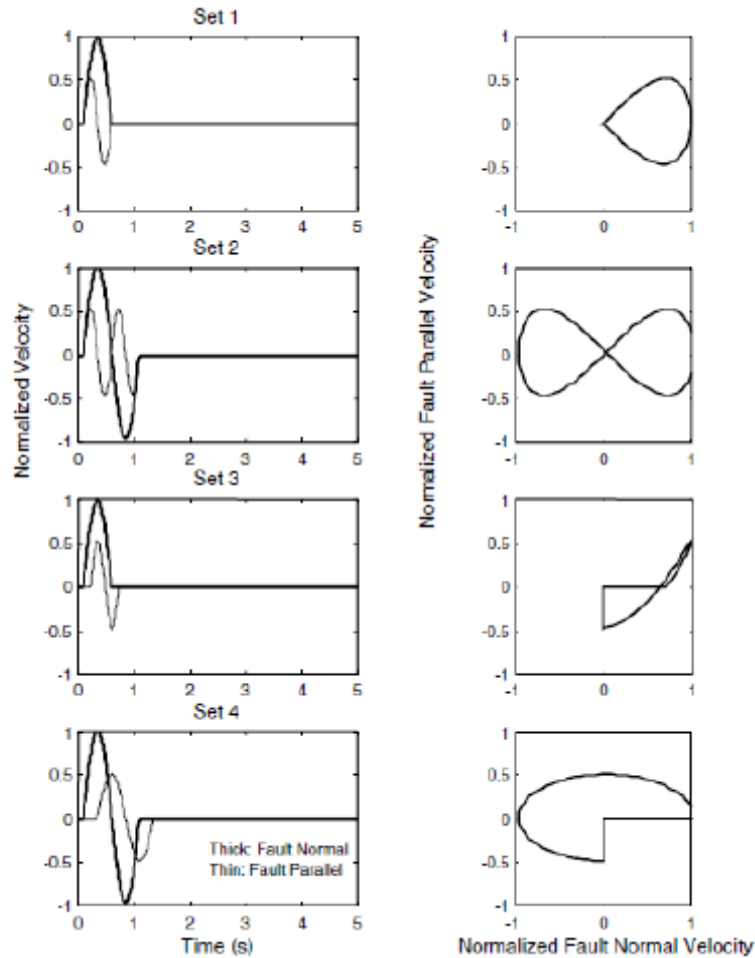




**Σχήμα 1.8:** Παράγοντες που χρειάζονται για να καθορίσουν την παράλληλη και την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα για απλοποιημένους παλμούς ταχύτητας. Τα σύμβολα  $N$ ,  $P$  αντιστοιχούν στις κάθετες και παράλληλες κινήσεις ως προς τη διεύθυνση του ρήγματος αντίστοιχα (Rodriguez - Marek 2000).



**Σχήμα 1.9:** 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 1.10:** Απλοποιημένη αναπαράσταση ημιτονικού παλμού για εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Η PHV (μέγιστη οριζόντια ταχύτητα) για παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα αντιστοιχεί στο 50% της PHV κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (Rodriguez-Marek 2000).

Οι μελέτες απόκρισης των κατασκευών στις κινήσεις κοντινού πεδίου έχουν εστιάσει στα αποτελέσματα της μεγαλύτερης κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (π.χ. Alani και Kranwinkler 2000). Εντούτοις, υπάρχουν εφαρμογές για τις οποίες η παράλληλη συνιστώσα στο ρήγμα μπορεί να είναι επίσης σημαντική. Μη γραμμικές αναλύσεις εδαφικής απόκρισης από τον Rodriguez - Marek (2000) δείχνουν ότι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες μπορούν να έχουν επιπτώσεις στις τιμές της PHV και της  $T_v$  και στις δυο διευθύνσεις. Δυο κινήσεις κοντινού πεδίου με τις σημαντικά διαφορετικές κινήσεις της παράλληλης συνιστώσας στο ρήγμα παρουσιάζονται στο σχήμα 1.9. Επιπρόσθετη έρευνα επιτρέπει να διακριθούν τα αποτελέσματα της δόνησης δυο διευθύνσεων στην απόκριση του εδάφους και των κατασκευών στη ζώνη κοντινού ρήγματος όπου οι δύο συνιστώσες της οριζόντιας εδαφικής κίνησης μπορούν να διαφέρουν σημαντικά. Από μια εξέταση καταγεγραμμένων κινήσεων κοντινού πεδίου που παρουσιάζουν την εμπρόσθια κατευθυντικότητα από τον Rodriguez - Marek

(2000), διαπιστώθηκε ότι οι απλουστευμένες κινήσεις που παρουσιάστηκαν στο σχήμα 1.10 θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να ερευνηθεί η σημασία της δόνησης δυο διευθύνσεων στις μελλοντικές μελέτες. Εάν είναι σημαντικές στη συμπεριφορά των κατασκευών, οι κατακόρυφες κινήσεις στη ζώνη κοντινού πεδίου μπορεί να πρέπει να υπολογιστούν επίσης.

## **1.2 Μοντέλα προσομοίωσης σεισμών κοντινού πεδίου**

### **Φασματική επιτάχυνση**

Οι Somerville et al (1997a) και ο Abrahamson (2000) παρουσίασαν μοντέλα για την τροποποίηση των φασμάτων απόκρισης με απόσβεση  $\zeta=5\%$  μέσω της σχέσης απόσβεσης Abrahamson και Silva (1997). Τα μοντέλα αναπτύχθηκαν με παλινδρόμηση μεταβλητών αυτής της σχέσης απόσβεσης στις γεωμετρικές παραμέτρους του κοντινού πεδίου του ρήγματος (σχήμα 1.5). 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 φαίνονται 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 Abrahamson και Silva (1996). Το μοντέλο αναπτύχθηκε με παλινδρόμηση μεταβλητών αυτής της σχέσης απόσβεσης στις γεωμετρικές παραμέτρους του κοντινού πεδίου του ρήγματος (σχήμα 1.5). Το μοντέλο ισχύει για τη διάρκεια του γεωμετρικού μέσου και των δυο οριζόντιων συνιστωσών. Ένα παρόμοιο μοντέλο αναπτύχθηκε από το Liu (2001) για τον ισοδύναμο αριθμό ομοειδών κύκλων (N). Οι λεπτομέρειες των μοντέλων διάρκειας και αριθμού (N) φαίνονται στις 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 $T_m y$ Where $T_m = 0$ for $m \leq 6$ and $T_m = 1 + (m - 6.5) / 0.5$ for $6.5 > m > 6$  $r < 30$ km For $r > 30$ , replace $y$ with $T_d y$ 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, $\phi$ for dip-slip, $0 < \xi < 90^\circ$ $C_1, C_2, C_3$ function of period. Given separately for cases in which dependence on $\xi$ is included, and cases in which dependence on $\xi$ is ignored.
5-75% sig. duration: Ratio of data/model (Somerville et al., 1997a)	Bias in duration of acceleration with respect to Abrahamson and Silva (1996)	Strike-Slip faults: $y = C_1 + C_2 X \cos \theta$  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 παραμέτρων εδαφικής κίνησης για την εκτίμηση της επίδρασης της κατευθυντικότητας. Οι παράμετροι  $X, Y, \theta, \phi$  ορίστηκαν στο σχήμα 1. 5. Οι τροποποιήσεις φαίνονται στο σχήμα 1. 6

### Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα (PHV)

Η PHV επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος του σεισμού, την απόσταση από το ρήγμα και τις εδαφικές συνθήκες της υπό εξέταση περιοχής. Ο Somerville (1998) πρότεινε τη χρήση μιας διγραμμικής σχέσης μεταξύ του λογαρίθμου PHV, του μεγέθους και του λογαρίθμου της απόστασης. Ο Somerville (1998) εκτέλεσε μια ανάλυση παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας τα στοιχεία από 15 καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες που αυξήθηκαν από 12 τεχνητές χρονοϊστορίες. Οι καταγραφές αντιστοιχούν σε μεγέθη  $m=6.2-7$  και απόσταση  $r=0-10$ km. Για να αποφύγει τις μη ρεαλιστικές προβλέψεις της PHV στις μικρές αποστάσεις ο Somerville (1998) χρησιμοποίησε μια ελάχιστη απόσταση των 3km. Η σχέση του Somerville (1998) για την PHV κοντά στο ρήγμα είναι:

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

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

Μια παρόμοια μελέτη που συσχετίζει την PHV, το μέγεθος και την απόσταση παρουσιάστηκε από τους Alavi και Kranwinkler (2000) βασισμένη στο ίδιο σύνολο

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

$$\ln(\text{PHV}) = a + b m + c \ln(r^2 + d^2) + \eta_i + \epsilon_{ij} \quad (3)$$

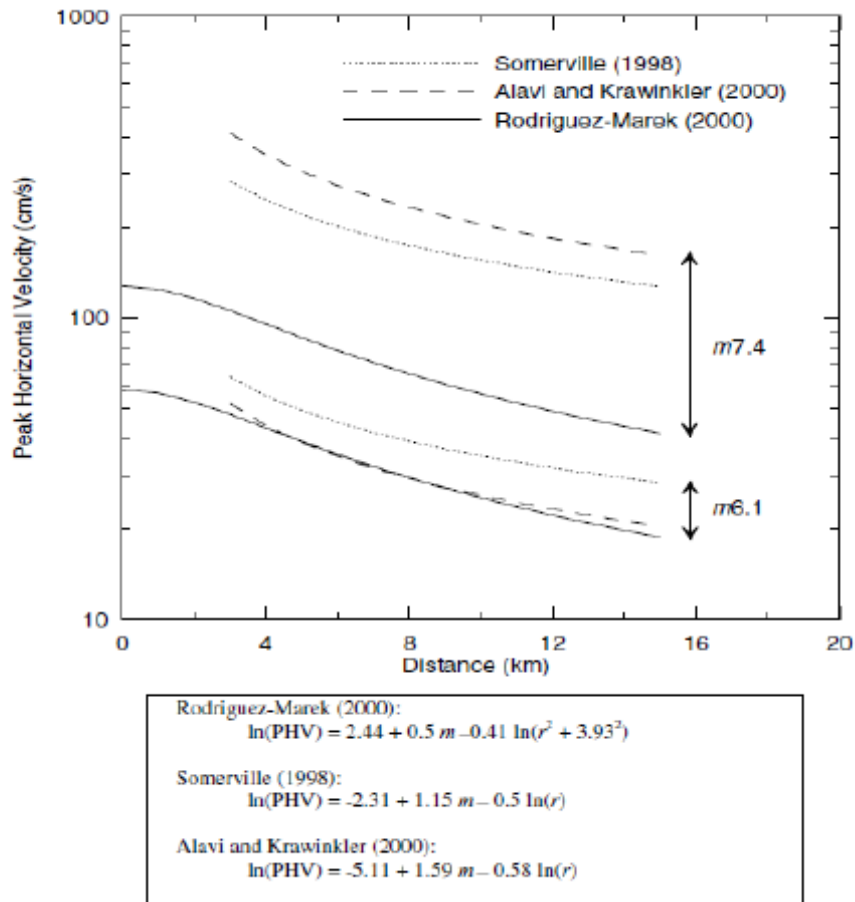
όπου η PHV είναι σε μονάδες cm/s, τα  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  είναι οι παράμετροι, το  $r$  είναι η ελάχιστη απόσταση από το ρήγμα, το  $m$  είναι το μέγεθος και τα  $\eta_i$  και  $\epsilon_{ij}$  είναι οι όροι σφάλματος.

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

Data Set	$a$	$b$	$c$	$d$	$\sigma$	$\tau$	$\sigma_{total}$
All Motions	2.44	0.50	-0.41	3.93	0.47	0.41	0.62
Rock	1.46	0.61	-0.38	3.93	0.53	0.25	0.50
Soil	3.86	0.30	-0.42	3.93	0.43	0.41	0.59

**Πίνακας 1.3:** Παράμετροι του μοντέλου Rodriguez - Marek (2000) για την PHV

Το σχήμα 1.11 συγκρίνει τη σχέση που προτάθηκε από τον Rodriguez - Marek (2000) με τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν 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.



**Σχήμα 1.11:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης για εκτίμηση της PHV με σχέσεις προτεινόμενες από διάφορους ερευνητές με στοιχεία από βάσεις δεδομένων σεισμών κοντινού πεδίου και με το φαινόμενο της εμπρόσθιας κατευθυντικότητας (Rodriguez - Marek 2000).

### Περίοδος παλμού

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

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

όπου η  $T_v$  είναι η περίοδος του μεγαλύτερου κύκλου της κίνησης και το  $m$  είναι το μέγεθος. Σε μια μεγαλύτερη μελέτη των διανομών ολίσθησης που χρησιμοποιούν τα μοντέλα ολίσθησης για 15 σεισμούς οι Somerville et al (1999) παρέχουν την εξίσωση:

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

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):

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

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

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

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

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

$$\ln(T_{v-p})_{ij} = a + b m + \eta_i + \epsilon_{ij} \quad (8)$$

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

Εκτιμήσεις παρέχονται για την περίοδο του παλμού,  $T_v$ , και τη δεσπόζουσα 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  $r < 20\text{km}$ .

Το σχήμα 1.12 συγκρίνει τη σχέση που πρόσφατα προτάθηκε από τον Rodriguez - Marek (2000) με τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν από τον Somerville (1998) και τους Alavi και Kranwinkler (2000). Οι σχέσεις του Rodriguez - Marek (2000) για τις  $T_v$  και  $T_{v-p}$  δίνουν μικρότερες περιόδους παλμού από τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν από τον Somerville(1998) για το  $T_v$  και από τους Alavi και Kranwinkler(2000) για το  $T_{v-p}$ . Οι διαφορές δεν είναι τόσο μεγάλες για μεγάλα μεγέθη σεισμού  $m > 7$ , όπου υπάρχουν αβεβαιότητες στην εκτίμηση της περιόδου του παλμού.

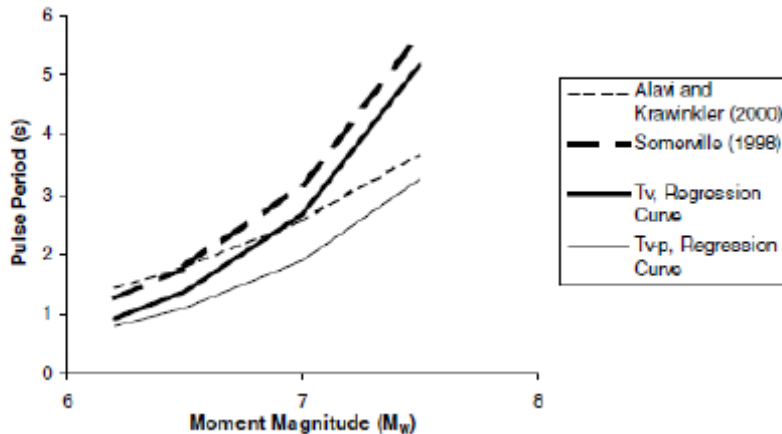
α)  $T_v$

Data Set	<i>a</i>	<i>b</i>	$\sigma$	$\tau$	$\sigma_{total}$
All Motions	-8.33	1.33	0.36	0.40	0.54
Rock	-11.10	1.70	0.31	0.41	0.51
Soil	-5.81	0.97	0.32	0.40	0.51

β)  $T_{v-p}$

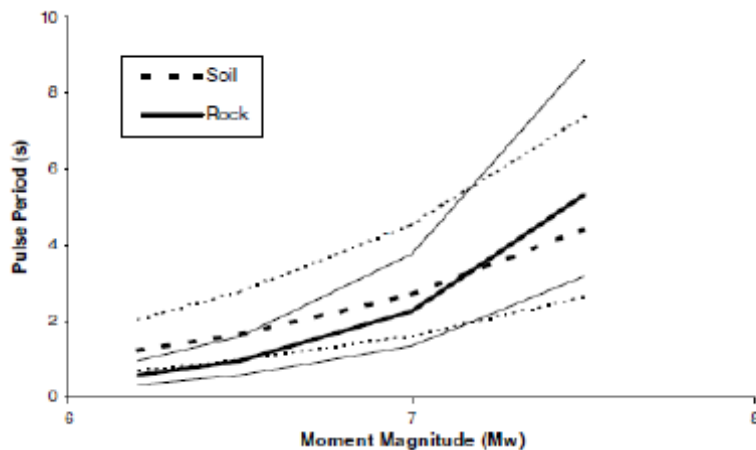
Data Set	<i>a</i>	<i>b</i>	$\sigma$	$\tau$	$\sigma_{total}$
All Motions	-6.92	1.08	0.48	0.45	0.66
Rock	-9.53	1.42	0.37	0.61	0.71
Soil	-5.66	0.91	0.41	0.45	0.61

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



**Σχήμα 1.12:** Σύγκριση μοντέλου Rodriguez-Marek (2000) με σχέσεις που αναπτύχθηκαν από Somerville (1998) για την  $T_v$  και από Alavi και Krawinkler (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) για περίοδο του παλμού για το βράχο και το έδαφος (σχήμα 1.13). Η διαφορά μεταξύ των τιμών της περιόδου του παλμού για βράχο και έδαφος είναι μικρή για τα μεγάλα μεγέθους γεγονότα ( $m > 7$ ), αλλά η περίοδος του παλμού είναι μεγαλύτερη επί εδαφών απ' ό,τι για περιοχές βράχου για τα γεγονότα με χαμηλότερα μεγέθη. Η εξέταση των ταξινομημένων κατά ζεύγη σταθμών βράχου και εδάφους και τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων απόκρισης επιβεβαιώνουν αυτή την παρατήρηση (Rodriguez-Marek 2000).



**Σχήμα 1.13:** Μοντέλο Rodriguez-Marek για την εκτίμηση της περιόδου του παλμού για βράχο και έδαφος. Οι έντονες καμπύλες αναπαριστούν τη μέση τιμή και οι λεπτές τις τυπικές αποκλίσεις (Rodriguez-Marek 2000).

### Αριθμός σημαντικών παλμών

Ο αριθμός των παλμών της κίνησης (καλούμενος ως αριθμός σημαντικών παλμών  $N_v$ ) ορίζεται ως ο αριθμός ημικύκλων ταχύτητας που έχουν εύρη τουλάχιστον 50% της μέγιστης ταχύτητας της εδαφικής κίνησης (πίνακας 1.2). Για τον υπολογισμό του αριθμού σημαντικών παλμών ταχύτητας μόνο η κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της κίνησης εξετάζεται. Ο αριθμός σημαντικών παλμών στην κάθετη συνιστώσα 48



καταγραφών 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 παλμών ημιτόνου στη χρονοϊστορία της ταχύτητας να συνδέεται με τον αριθμό ετερογενών διαρρήξεων (asperities) σ' ένα ρήγμα, ο οποίος στη συνέχεια να συνδέεται με τη διανομή ολίσθησης ρήγματος. Δεν υπάρχει κανένα μοντέλο διαθέσιμο για την πρόβλεψη του αριθμού 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 τιμή που χρησιμοποιείται για σεισμούς.

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)
<b>Totals</b>		<b>48</b>	<b>7 (0)</b>	<b>24 (10)</b>	<b>7 (13)</b>	<b>10 (25)</b>

**Πίνακας 1.5:** Αριθμός παλμών ( $N_v$ ) 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. (Rodriguez-Marek 2000)

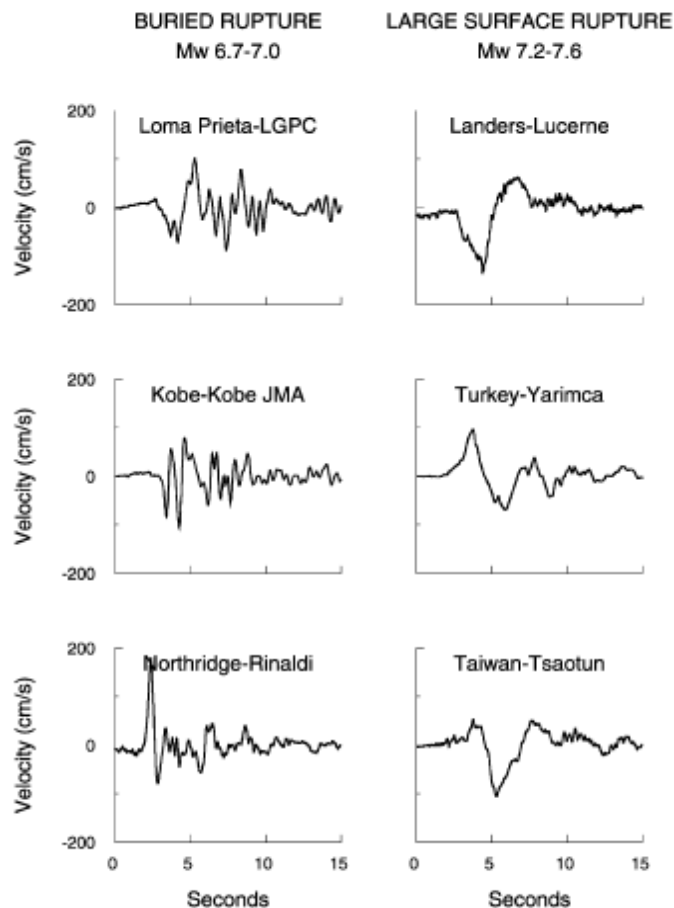
### 1.3 Μεταβολή των ιδιοτήτων του παλμού της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου συναρτήσει του μεγέθους του σεισμού

Όλα τα υπάρχοντα μοντέλα κίνησης του εδάφους υποθέτουν μονοτονική ενίσχυση των φασματικών τιμών σε όλες τις περιόδους με την αύξηση του μεγέθους. Παρ' όλα αυτά, κάποιες καταγραφές κοντινού πεδίου όπως είναι οι καταγραφές στην Τουρκία και στην Ταϊβάν, επιβεβαιώνουν ότι ο παλμός κατευθυντικότητας που εμφανίζεται στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα καταλαμβάνει μια στενή ζώνη συχνοτήτων και η περίοδος του αυξάνεται με την αύξηση του σεισμικού μεγέθους. Αυτή εξάρτηση του μεγέθους από την περίοδο του παλμού είναι εύλογη θεωρητικά καθώς η περίοδος του παλμού σχετίζεται με παραμέτρους της πηγής όπως ο χρόνος άφιξης (διάρκεια της ολίσθησης ενός σημείου του ρήγματος) και με τις διαστάσεις του ρήγματος, οι οποίες γενικά αυξάνονται με την αύξηση του μεγέθους του σεισμού. Αυτή η εξάρτηση του μεγέθους από την περίοδο του παλμού προκαλεί μια αιχμή στο φάσμα απόκρισης της οποίας η περίοδος αυξάνεται με το μέγεθος ώστε εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου προερχόμενες από μικρούς σεισμούς δύνανται να υπερβούν αυτές των ισχυρότερων

σεισμών σε ενδιάμεσες περιόδους (περίπου 1sec). Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις Somerville (2003) που σχετίζουν την περίοδο της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας του παλμού ταχύτητας με έμπροσθεν κατευθυντικότητα με το μέγεθος του εκάστοτε σεισμού και ένα μοντέλο φάσματος επιταχύνσεων που περιλαμβάνει τη μεταβολή του σεισμικού μεγέθους ως εξάρτηση από την περίοδο της αιχμής του φάσματος.

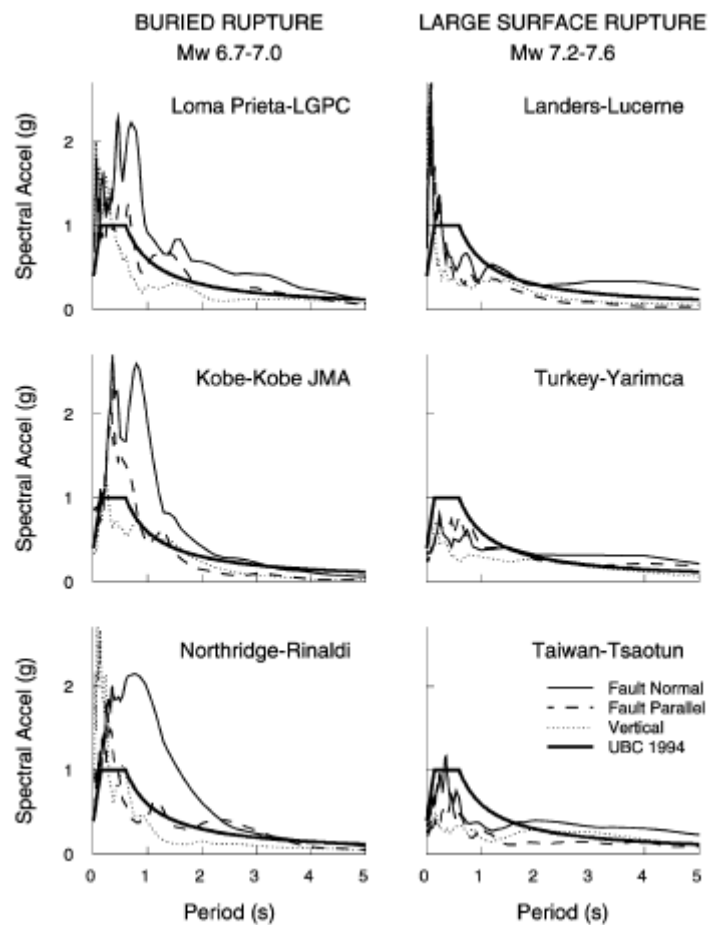
Οι ισχυροί σεισμοί της Τουρκίας και της Ταϊβάν που αποδεικνύουν την εξάρτηση της περιόδου του παλμού κοντινού πεδίου από το σεισμικό μέγεθος, χαρακτηρίζονται από ασθενείς καταγραφές στις μικρές και ενδιάμεσες περιόδους (0,1-3sec), ασθενέστερες από τις καταγραφές σεισμών μικρότερου μεγέθους ( $M_w=6.7-7$ ), κάτι που οδήγησε σε επανεκτίμηση των σχέσεων του Somerville 1999.

Στο σχήμα 1.14α παρουσιάζονται στα αριστερά καταγραφές σεισμών μεγέθους  $M_w=6.7-7$  και δεξιά καταγραφές ισχυρότερων σεισμών  $M_w=7.2-7.6$  και στην 1.14β τα αντίστοιχα φάσματά τους.



**Σχήμα 1.14α:** Καταγραφές παλμών ταχύτητας στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα τριών σεισμών μέτριου μεγέθους (αριστερή στήλη) και τριών σεισμών μεγάλου μεγέθους (δεξιά στήλη) σχεδιασμένοι σε ίδια κλίμακα

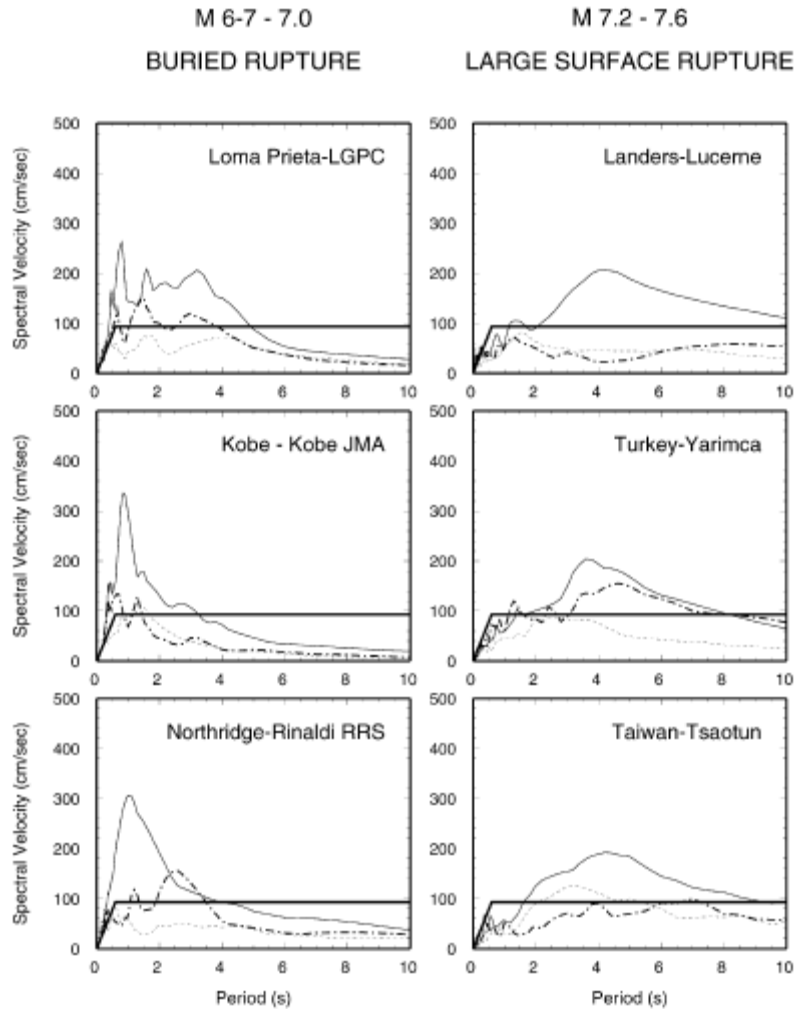
Η φύση στενών περιόδων αυτών των φασμάτων προκαλεί μικρές αιχμές στο φάσμα απόκρισης. Τονίζεται ότι η παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα αναμένεται μικρότερη από την κάθετη λόγω απουσίας της κατευθυντικότητας, κάτι που φαίνεται στα φάσματα. Το φάσμα του κανονισμού UBC 1994 χρησιμοποιείται ως μέτρο σύγκρισης και παρατηρείται ότι το φάσμα των ισχυρών σεισμών (δεξιά στήλη) είναι συμβατό με το φάσμα του κανονισμού στις ενδιάμεσες περιόδους των 0.5 έως 2sec ενώ από τα 4sec και άνω οι τιμές του ξεπερνούν αυτές του κανονισμού. Όσον αφορά τους σεισμούς μικρότερου μεγέθους (αριστερή στήλη) η συμπεριφορά τους είναι πολύ διαφορετική αφού το φάσμα είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό του κανονισμού στις ενδιάμεσες περιόδους των 0.5-2.5sec και όμοιο με το φάσμα του κανονισμού στις μεγαλύτερες περιόδους.



**Σχήμα 1.146** : Αντίστοιχα φάσματα των χρονοϊστοριών του σχήματος 14 α συγκρινόμενα με τον κανονισμό UBC 1994.

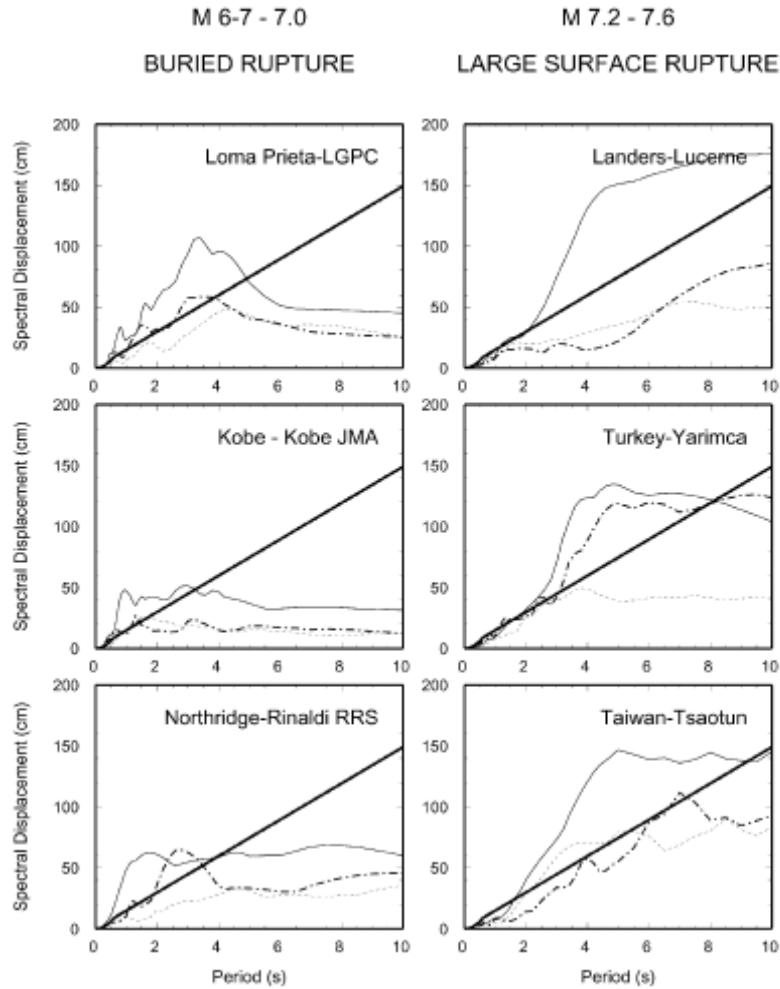
Τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης παρουσιάζονται καλύτερα στα σχήματα 1.15 και 1.16 που απεικονίζουν τα φάσματα ταχυτήτων και μετακινήσεων αντίστοιχα των παλμών του σχήματος 1.14α και αποδεικνύουν ότι η μεταβολή του σεισμικού μεγέθους είναι εμφανής, κάτι που δε λαμβάνεται υπόψη στα μέχρι στιγμής υπάρχοντα μοντέλα συμπεριλαμβανομένου και αυτού των Somerville et al (1997), τα

οποία υποθέτουν ότι οι φασματικές ενισχύσεις αυξάνονται μονοτονικά σε όλες τις περιόδους.



**Σχήμα 1.15:** Φασματικές ταχύτητες παλμών κάθετα στο ρήγμα ενδιάμεσων (αριστερά) και ισχυρότερων (δεξιά) σεισμών

Παρ' όλα αυτά, αυτά τα χαρακτηριστικά είναι φυσική επίπτωση του περιορισμού του παλμού προς κατευθυντικότητα σε στενή ζώνη περιόδων. Η περίοδος του παλμού κοντινού πεδίου σχετίζεται με τις παραμέτρους της σεισμικής πηγής όπως τη διάρκεια ολίσθησης ενός σημείου στο ρήγμα και τις διαστάσεις της πηγής που αυξάνονται με το μέγεθος του σεισμού. Οι κινήσεις κοντινού πεδίου δε μπορούν να περιγραφούν επακριβώς από ένα ομοιόμορφα αυξανόμενο φάσμα σταθερού σχήματος επειδή το σχήμα των ενδιάμεσων και μεγάλων περιόδων αλλάζει καθώς αυξάνεται το επίπεδο του φάσματος με την αύξηση του σεισμικού μεγέθους.



**Σχήμα 1.16:** Φασματικές μετακινήσεις παλμών στην κάθετη συνιστώσα του ρήγματος ενδιάμεσων (αριστερά) και ισχυρών (δεξιά) σεισμών

Οι Somerville (1998), Somerville et al (2000) και Alavi & Krawinkler (2000) παρήγαγαν εξισώσεις συσχετισμού της περιόδου με την ενίσχυση του παλμού κατευθυντικότητας της ταχύτητας στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα. Οι καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των εξισώσεων αυτών απείχαν έως και 10km από το ρήγμα και η περίοδος προέκυψε ανεξάρτητη από την απόσταση από το ρήγμα. Οι εν λόγω εξισώσεις τροποποιήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις πρόσφατες καταγραφές των σεισμών του Chi - Chi (1999), της Ταϊβάν και του Kocaeli στην Τουρκία και προέκυψαν ξεχωριστές σχέσεις καταγραφών κοντινού πεδίου για βράχο και εδαφικό σχηματισμό. Αυτές οι συσχετίσεις χρησιμοποιούν την περίοδο  $T_{dir}$  του μεγαλύτερου κύκλου της κυματομορφής της ταχύτητας που καταγράφηκε σε σταθμούς κοντά στο ρήγμα λαμβάνοντας υπόψη την πρόσω κατευθυντικότητα. Τα δεδομένα σε βράχο συμβαδίζουν με την παραδοχή της περιόδου του παλμού  $T_{dir}$  αυξανομένης αναλογικά με το μήκος του ρήγματος και τις σχέσεις των Somerville et al (1999) και δίνουν περίοδο παλμού:

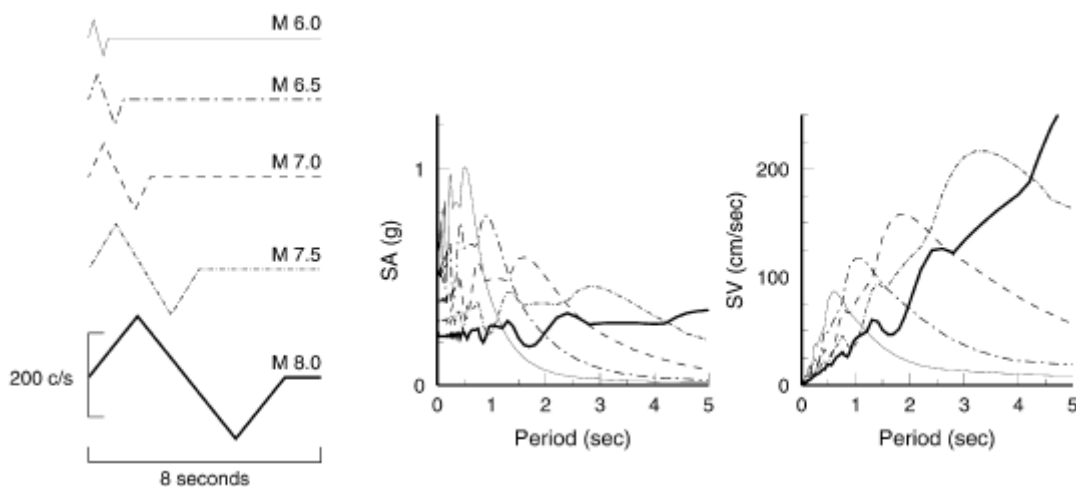
$$\text{Log}_{10}T_{dir} = -3.17 + 0.5M_w$$

Η επίδραση του εδαφικού στρώματος γενικότερα αυξάνει τη μέγιστη τιμή ταχύτητας και την περίοδο της κίνησης εισαγωγής (input motion). Το ποσοστό της αύξησης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κίνησης εισαγωγής, το πάχος και τις φυσικές ιδιότητες του εδαφικού στρώματος. Η εξίσωση της περιόδου παλμού για έδαφος είναι:

$$\log_{10} T_{dir} = -2.02 + 0.346M_w.$$

Οι εν λόγω γραμμικές σχέσεις για βράχο και έδαφος εξισώνονται για  $M_w=7.4$  και αναμένεται ότι η σχέση για έδαφος είναι στην πραγματικότητα κεκαμμένη και συναληθεύει με την εξίσωση για βράχο σε μεγέθη άνω των  $M_w=7.4$ , ενώ έχει μικρότερες τιμές περιόδου παλμού σε μεγέθη 7.4 και άνω.

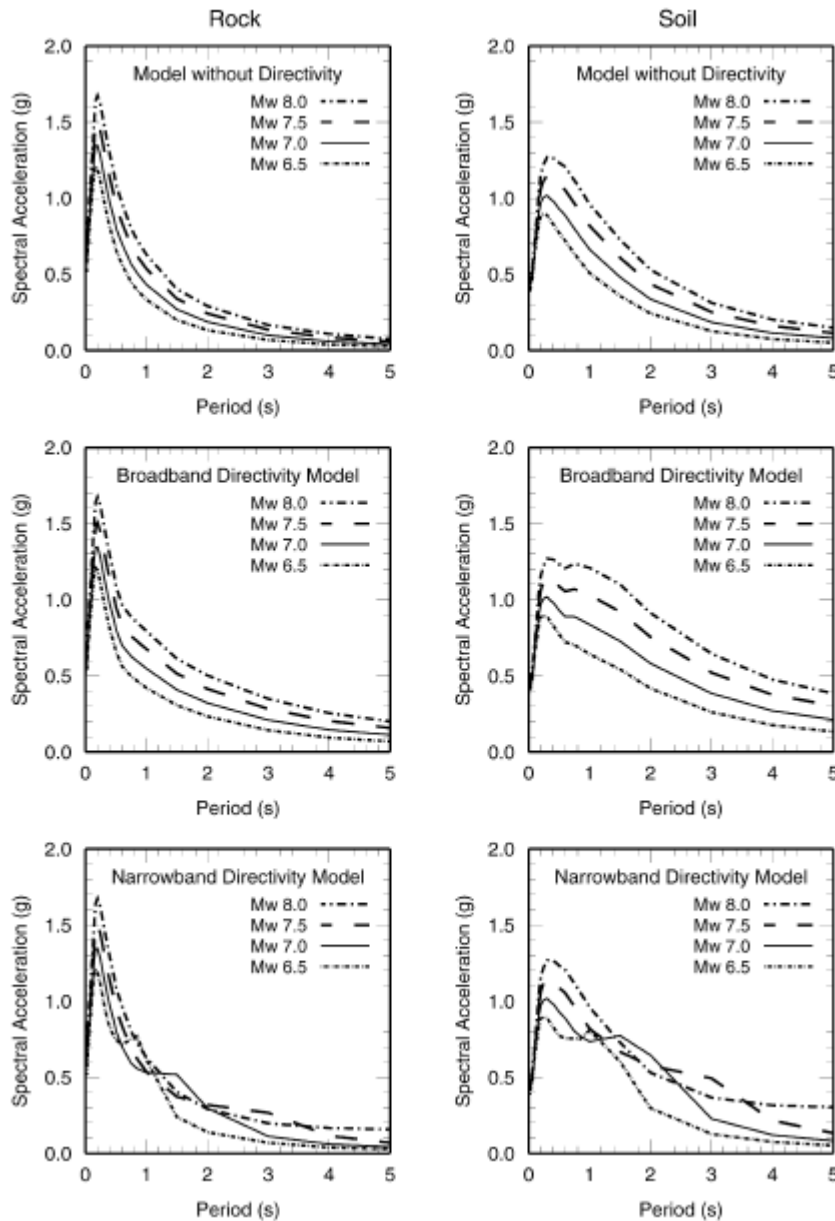
Στο σχήμα 1.17 παρουσιάζεται ένας τριγωνικός παλμός ταχύτητας και το αντίστοιχο φάσμα επιταχύνσεων και ταχυτήτων για διάφορα μεγέθη. Προκύπτει ότι το ελαστικό φάσμα απόκρισης παρουσιάζει αιχμές που σχετίζονται με την περίοδο του παλμού. Εξαιτίας αυτών των αιχμών το φάσμα δεν αυξάνεται μονοτονικά με το μέγεθος σε όλες τις περιόδους, όπως συμβαίνει στα συμβατικά μοντέλα εδαφικής κίνησης. Αντίθετα, το φάσμα ασθενέστερων σεισμών είναι ισχυρότερο από το φάσμα μεγαλύτερων σεισμών σε μια περιοχή περιόδων.



**Σχήμα 1.17:** Διαβάθμιση με το μέγεθος απλών παλμών ταχύτητας που αντιπροσωπεύουν κινήσεις κοντινού πεδίου (αριστερά) και τα αντίστοιχα φάσματα επιταχύνσεων (κέντρο) και ταχυτήτων (δεξιά).

Τέλος, στο σχήμα 1.18 γίνεται σύγκριση του φάσματος απόκρισης σε βράχο και έδαφος του παρόντος μοντέλου του Somerville (2003) με προηγούμενα μοντέλα των Abrahamson & Silva (1997) που δεν περιλαμβάνει την επίδραση της κατευθυντικότητας και των Somerville et al (1997) που το φαινόμενο της κατευθυντικότητας βασίζεται στη μονοτονική αύξηση των χαρακτηριστικών της εδαφικής κίνησης με την αύξηση του μεγέθους σε όλες τις φασματικές περιόδους. Το νέο μοντέλο του Somerville (2003) παράγει μεγαλύτερο φάσμα απόκρισης στην

περιοχή περιόδων μεταξύ 0.5-2sec για σεισμούς μεγέθους μικρότερου των  $M_w=7.5$  και μικρότερο φάσμα απόκρισης σε όλες τις περιόδους για σεισμούς μεγαλύτερους του  $M_w=7.5$ , συγκρινόμενο με το μοντέλο των Somerville et al (1997).



**Σχήμα 1.18:** Μοντέλο φασματικής απόκρισης κοντινού πεδίου σε απόσταση 5km για βράχο (αριστερά) και εδαφικό σχηματισμό (δεξιά). Πάνω: μοντέλο χωρίς κατευθυντικότητα των Abrahamson & Silva (1997), μέση: μοντέλο διευρυμένης συχνότητας κατευθυντικότητας των Somerville et al (1997) και κάτω: μοντέλο κατευθυντικότητας σε στενή ζώνη συχνοτήτων του Somerville (2003).





# Κεφάλαιο 2

## ΝΕΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΠΟΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

---

- 2.1 Εισαγωγή
- 2.2 Η βάση δεδομένων και τα μοντέλα απομείωσης
- 2.3 Αλληλεπιδράσεις του προγράμματος και αναθεωρήσεις



## 2.1 Εισαγωγή

Το ερευνητικό κέντρο αντισεισμικής τεχνολογίας του Ειρηνικού σε συνεργασία με το γεωλογικό ερευνητικό κέντρο των Ηνωμένων Πολιτειών και το αντισεισμικό κέντρο της νότιας Καλιφόρνια οργάνωσαν ένα ερευνητικό πρόγραμμα, γνωστό ως νέα γενιά μοντέλων απομείωσης (Next Generation Attenuation - NGA). Κύριος στόχος του προγράμματος ήταν η ανάπτυξη σχέσεων πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης για επιφανειακούς σεισμούς των δυτικών Ηνωμένων πολιτειών και όμοιων ενεργών σεισμικά περιοχών. Κατά τη διάρκεια του προγράμματος δημιουργήθηκαν πέντε ανεξάρτητα εργαζόμενες ερευνητικές ομάδες, με συνεχή επικοινωνία κατά την εκπόνηση της μελέτης, για την παραγωγή διαφορετικών μοντέλων εδαφικής κίνησης. Η εργασία των ομάδων αφορούσε κατά κύριο λόγο την ανάπτυξη ενός μοντέλου εδαφικής κίνησης από κάθε ομάδα ερευνητών καθώς και τη δημιουργία μιας εκτεταμένης βάσης δεδομένων των καταγεγραμμένων σεισμικών κινήσεων συμπεριλαμβανομένων πληροφοριών για τη διαδικασία της καταγραφής της κίνησης, τα εδαφικά χαρακτηριστικά των σταθμών καταγραφής αλλά τις υπάρχουσες σεισμικές πηγές.

Οι ερευνητές που συμμετείχαν στο πρόγραμμα είχαν ήδη δημιουργήσει προϋπάρχοντα και ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα της εδαφικής κίνησης. Παρακάτω δίνονται τα ονόματα των ερευνητών και τα μοντέλα που εξήγαγαν.

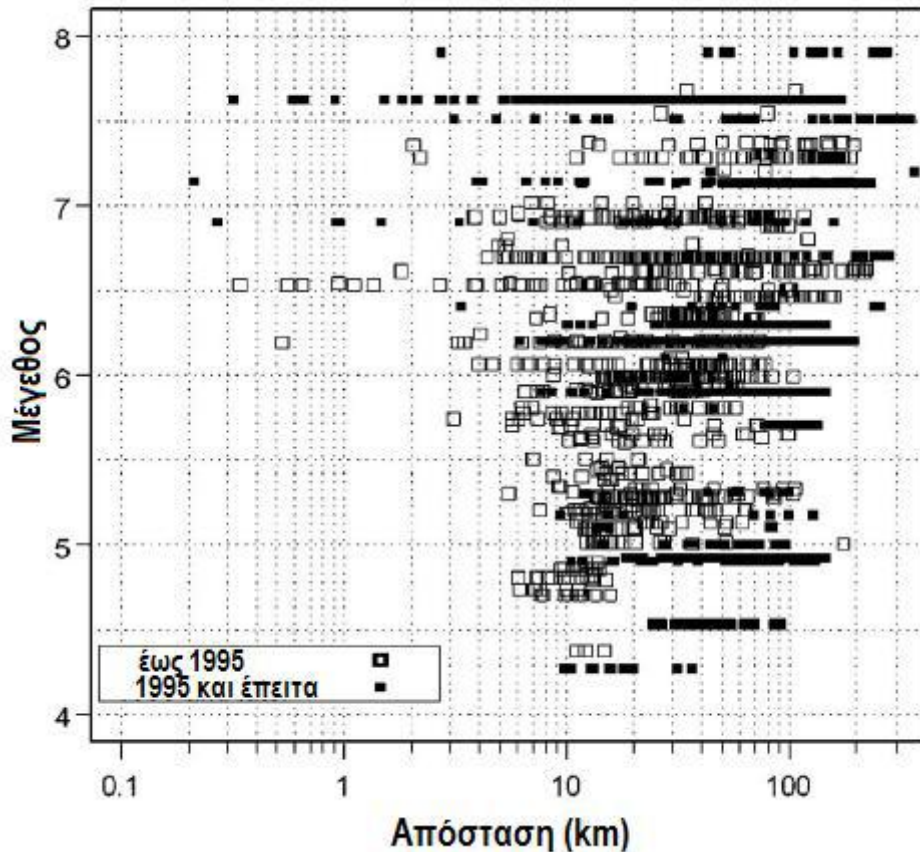
- Norman Abrahamson and Water Silva - Abrahamson and Silva 1997
- David Boore and Gail Atkinson - Boore et al. 1997
- Kenneth Campbell and Yousef Bozorgnia -Campbell 1997, Campbell and Bozorgnia 2003
- Brian Chiou and Robert Youngs, επαναπροσαρμογή του μοντέλου των Sadigh et al. - 1993,1997
- I.M. Idriss -Idriss 1991

## 2.2 Η βάση δεδομένων και τα μοντέλα απομείωσης

Κάθε ομάδα επιστημόνων είχε στη διάθεση της μια κοινή παγκόσμια βάση δεδομένων που συμπεριλάμβανε ισχυρούς σεισμούς και μετασεισμούς. Η κάθε ερευνητική ομάδα είχε δικαίωμα να εφαρμόσει τα δικά της κριτήρια για την επιλογή των καταγραφών, των συναρτήσεων και των μεταβλητών που θα χρησιμοποιούσε για να εξάγει το μοντέλο πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης. Για να ικανοποιήσουν όμως τις ανάγκες της αντισεισμικής κοινότητας, τα πέντε μοντέλα έπρεπε να είναι εφαρμόσιμα για απόσταση

από το ρήγμα μεταξύ 0 και 200 km, για εύρος σεισμικού μεγέθους από 5 έως 8.5 για τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και για 5 μέχρι 8 για τα ρήγματα κανονικής ή ανάστροφης βύθισης. Επίσης οι φασματικές τιμές έπρεπε να δίνονται σε εύρος περιόδων 0 με 10 sec.

Οι ερευνητές επεξέτειναν τη βάση δεδομένων του αντισεισμικού ερευνητικού κέντρου του ειρηνικού και τα πρόσθετα δεδομένα που χρησιμοποίησαν παρουσιάζονται στο σχήμα 2.1 μαζί με τα ήδη υπάρχοντα. Οι νέοι καταγραφέντες σεισμικοί κραδασμοί στο Hector Mine της Καλιφόρνιας (1999), στο Kocaeli και το Duzce της Τουρκίας (1999), στο Chi-Chi της Ταϊβάν (1999) καθώς και οι πέντε ισχυροί μετασεισμοί από τις δονήσεις στο βουνό Nenapa της Καλιφόρνια (2003) και Denali στην Αλάσκα περιλαμβάνονται στις νέες καταγραφές. Η επεκταθείσα βάση δεδομένων περιλαμβάνει 173 σεισμούς, 1456 καταγραφικούς σταθμούς και 3551 καταγραφές με πολλαπλές συνιστώσες.



**Σχήμα 2.1:** Κατανομή καταγραφών εδαφικής κίνησης της νέας βάσης δεδομένων ανάλογα με το μέγεθος και την απόσταση από το ρήγμα

Όπως προαναφέρθηκε, κάθε μελετητική ομάδα αποφασίστηκε να χρησιμοποιήσει ένα υποσύνολο δεδομένων κατά τη δική της κρίση. Οι παράγοντες που ελήφθησαν υπόψη από τις εκάστοτε ομάδες ώστε να οριστικοποιήσουν τα χρησιμοποιούμενα δεδομένα ήταν:

- πιθανές καταγραφές από διαφορετικό τεκτονικό περιβάλλον

- σεισμοί μη καλά προσδιορισμένοι ως προς το μέγεθος, την απόσταση από το ρήγμα κλπ
- καταγραφές με προβλήματα ή ερωτήματα σχετικά με την ποιότητά τους
- καταγραφές μη αντιπροσωπευτικές συνθηκών ελευθέρου πεδίου (πχ καταγραφές σε βάσεις άκαμπτων ψηλών κτηρίων, άκαμπτων θεμελιώσεων ή ακροβάθρων)
- καταγραφές μετασεισμών

Η πιο σημαντική απόφαση για την κάθε ερευνητική ομάδα ήταν το αν θα συμπεριλάβει τις καταγραφές από την κύρια σεισμική δόνηση στο Chi-Chi, μεγέθους M7.6 (421 καταγραφές) και των αντίστοιχων μετασεισμών (1392 καταγραφές). Τελικά, όλες οι ομάδες αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν τα δεδομένα της κύριας δόνησης και τρεις από τις πέντε να χρησιμοποιήσουν επιπρόσθετα τα μετασεισμικά δεδομένα.

Όπως περιγράφεται και από τους Chiou et al (2008), ακολουθήθηκε συγκεκριμένη διαδικασία εκτίμησης των τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία των καταγραφών, σεβόμενοι τις φασματικές τιμές των δεδομένων. Αξιολογήθηκε η μικρότερη χρησιμοποιούμενη συχνότητα κάθε καταγραφής και συστάθηκαν χρησιμοποιούμενες τιμές στη βάση δεδομένων. Οι περισσότερες καταγραφές στράφηκαν ώστε να δημιουργηθούν οι κάθετες και παράλληλες στο ρήγμα συνιστώσες και η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε και για τις καταγραφές που καθόριζαν εξ ολοκλήρου τη μέση οριζόντια συνιστώσα, ανεξαρτήτως των δυο καταγεγραμμένων οριζοντίων συνιστωσών (Boore et al. 2006). Άλλες μετρήσεις της οριζόντιας σεισμικής κίνησης συμπεριλαμβανομένης και της μέτρησης του σεισμικού μεγέθους της μέγιστης οριζόντιας συνιστώσας σε συνδυασμό με τη μέση οριζόντια συνιστώσα αξιολογήθηκαν και από τους ερευνητές των νέων μοντέλων αλλά και από άλλους, συμπεριλαμβανομένων των Beyer και Bommer (2006), Campbell και Bozorgnia (2007;2008), Watson-Lamprey και Boore (2007) και Huang et al. (2008).

Κατά τη συλλογή, εκτίμηση και επέκταση των σεισμικών δεδομένων λήφθηκαν υπόψη τα ακόλουθα:

- χαρακτηρισμός της κατάστασης του πεδίου χρησιμοποιώντας διαφορετικές παραμέτρους και συστήματα κατάταξης όπως αυτό της διατμητικής εδαφικής ταχύτητας  $V_s > 30$ , την κατάταξη NEHRP, την κατάταξη επιφανειακής γεωλογίας και αυτή του γεωμητώου.
- εκτίμηση της  $V_{st30}$  χρησιμοποιώντας συσχετίσεις σε σταθμούς όπου δεν είχαν καταγραφεί τιμές της διατμητικής εδαφικής ταχύτητας (μόνο στο 30% των σταθμών καταγραφής υπήρχαν μετρήσεις)
- συστηματική και σχετική αξιολόγηση των σεισμικών μεγεθών, του τύπου του ρήγματος, της γεωμετρίας της διάρρηξης, της κατηγοριοποίησης των σταθμών καταγραφής ως ανάντη και κατόντη, των παραμέτρων της κατευθυντικότητας

σύμφωνα με τις παραμέτρους των Somerville et al. (1997) και Spudlich και Chiou (2008) και των αποστάσεων πηγής - θέσης καταγραφής

- εκτίμηση του βάθους της σεισμικής διάρρηξης
- συλλογή βαθών μέχρι το βράχο με κατηγοριοποίηση ως προς τη διατμητική ταχύτητα σε ομάδες  $V_s=1, 1.5$  και  $2.5$  km/sec στις θέσεις καταγραφής
- συλλογή των χαρακτηριστικών της λεκάνης αν η καταγραφή βρίσκεται εντός της

Μια ακόμη σημαντική παράμετρος ήταν η εκτίμηση της  $V_{St30}$  στις θέσεις καταγραφών, βασιζόμενη σε συσχετίσεις με την καταμετρημένη διατμητική ταχύτητα σε άλλες θέσεις και σε εξαρτήσεις από τη γεωλογία της περιοχής και από τα εδαφικά χαρακτηριστικά. Οι μελέτες που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της εν λόγω παραμέτρου συμπεριλαμβάνουν δεδομένα από τους σεισμούς του Northridge στην Καλιφόρνια (1994) και δεδομένα καταγεγραμμένων ταχυτήτων στην ευρύτερη περιοχή από το γεωλογικό ισοτιπούτο της περιοχής. Παρόμοιες συσχετίσεις έγιναν για την εκτίμηση των εδαφικών ταχυτήτων συμπεριλαμβάνοντας δεδομένα από το σεισμό και τους μετασεισμούς του Chi-Chi στην Ταϊβάν (1999).

Η τελική βάση δεδομένων αποτελείται από 128 στήλες που περιλαμβάνουν τις απαραίτητες παραμέτρους περιγραφής για κάθε μία από τις 3551 καταγραφές.

Τα τελικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν ήταν τα παρακάτω:

- Boore-Atkinson, 2008
- Campbell-Bozorgnia NGA, 2008
- Chiou-Youngs, 2008
- Idriss, 2007
- Abrahamson-Silva, 2010

### 2.3 Αλληλεπιδράσεις του προγράμματος και αναθεωρήσεις

Το πρόγραμμα διήρκησε συνολικά πέντε χρόνια ξεκινώντας από μια συνάντηση όλων των επιστημόνων τον Οκτώβριο του 2002. Δημιουργήθηκαν συνολικά 81 -82 μονοήμερες συναντήσεις στην καθεμιά από τις οποίες συμμετείχαν περίπου 40-80 επιστήμονες και μηχανικοί κατά τη χρονική περίοδο 2003-2005. Οι αρχικές συναντήσεις εστίαζαν κυρίως στη συνολική διάρθρωση του προγράμματος και στη δημιουργία μιας ενιαίας βάσης δεδομένων, ενώ οι επόμενες στα δημιουργούμενα μοντέλα απομείωσης της εδαφικής κίνησης. Υπήρξαν πέντε ομάδες εργασίας, καθεμιά από τις οποίες αποτελούνταν από περίπου 4-13 επιστήμονες και μηχανικούς. Οι ομάδες συναντιόνταν αρκετά συχνά με σκοπό την επιθεώρηση των αποτελεσμάτων και τη συζήτηση των κυρίων ζητημάτων και

καθεμιά έπαιρνε ανεξάρτητα αποφάσεις σχετικά με το μοντέλο της εδαφικής κίνησης και τις μεθόδους και παραδοχές προσομοίωσης. Όμως, λόγω των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ομάδων τα τελικά μοντέλα της εδαφικής κίνησης έχουν πάρα πολλές ομοιότητες.

Το γεωλογικό ινστιτούτο Ηνωμένων Πολιτειών (USGS) διεξήγαγε έλεγχο των προτεινόμενων νέων μοντέλων απομείωσης. Η έρευνα εστίασε στην πιθανή ένταξη των νέων μοντέλων στους εθνικούς χάρτες εκτίμησης σεισμικού κινδύνου και κατάληξε στην υιοθέτηση μερικών από αυτά. Πολλές παρελθοντικές εκτιμήσεις του σεισμικού κινδύνου παρουσιάζουν αβεβαιότητες στην προσομοίωση της εδαφικής κίνησης καθώς χρησιμοποιούν συνδυασμό δημοσιευμένων ερευνών - σχέσεων. Η ασαφής (ή μερικές φορές σαφής) υπόθεση αυτής της μεθόδου είναι ότι σχέσεις διαφορετικών ερευνητών εκπροσωπούν διαφορετικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης της πηγής του σεισμικού κραδασμού, της κατεύθυνσης διάδοσης και των επιδράσεων του πεδίου. Λόγω της αλληλεπίδρασης των ομάδων έρευνας των νέων μοντέλων απομείωσης της εδαφικής κίνησης, το γεωλογικό ινστιτούτο συνέστησε ότι η χρήση των μέσων μοντέλων δεν μπορεί να υποθεθεί ότι εξαλείφει την επιστημονική αβεβαιότητα, η οποία πρέπει να ληφθεί ξεχωριστά υπόψη. Επιπρόσθετα, το ινστιτούτο ανέπτυξε μια ενισχυμένη διαδικασία ενσωμάτωσης της επιστημονικής αβεβαιότητας στα νέα μοντέλα απομείωσης εδαφικής κίνησης των εθνικών χαρτών.





# Κεφάλαιο 3

## ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

---

- 3.1 Εισαγωγή
- 3.2 Το μοντέλο προσομοίωσης των Shahi – Baker για το κοντινό πεδίο
  - 3.2.1 Αναγνώριση της ύπαρξης παλμικής κίνησης
  - 3.2.2 Ανάπτυξη μοντέλων υπολογισμού της οριζόντιας φασματικής επιτάχυνσης
  - 3.2.3 Περίοδος παλμού
  - 3.2.4 Επαύξηση της φασματικής επιτάχυνσης λόγω του παλμού κατευθυντικότητας



### 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 εμπροσθεν κατευθυντικότητας (Somerville et al. 1997, Somerville 2003 και 2005, Spudlich και Chίου2008). 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) που 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 (Tr) (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.

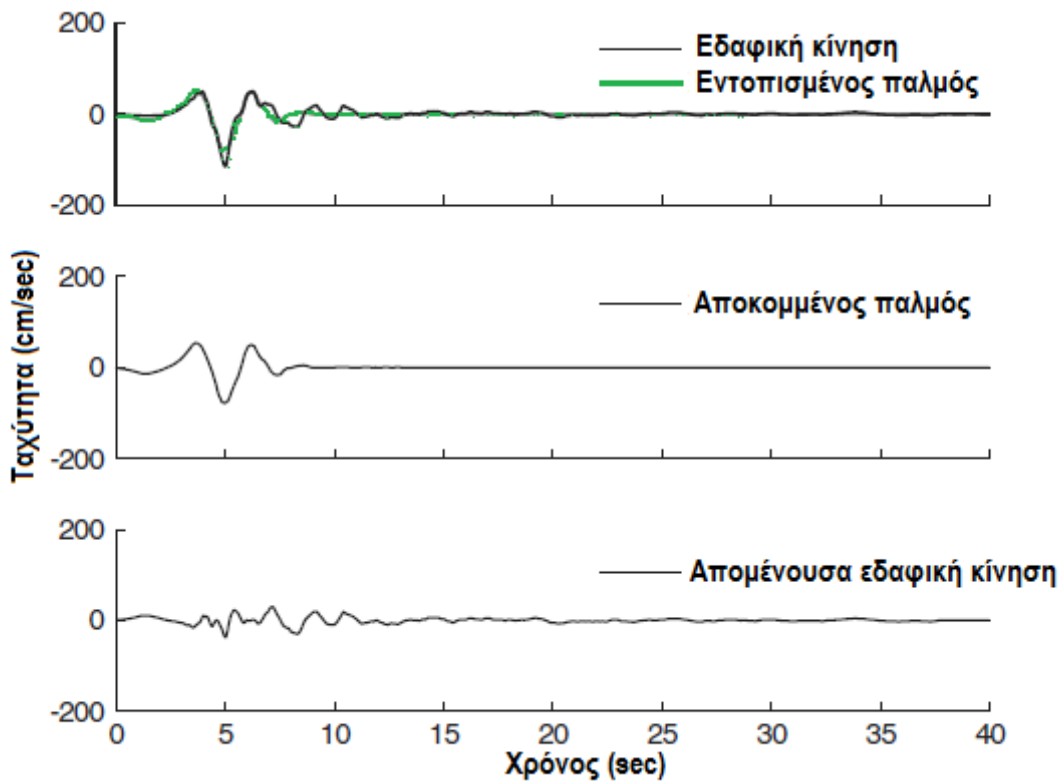
Η συνολική έρευνα περιλαμβάνει μοντέλα πρόβλεψης της πιθανότητας εμφάνισης παλμού για μια δεδομένη γεωμετρία πηγής και θέσης καταγραφής, την πιθανότητα παρατήρησης παλμού σε κάποια συγκεκριμένη διεύθυνση δεδομένου ότι έχει παρατηρηθεί ο παλμός σε κάποια θέση καταγραφής και την απόσβεση του φάσματος απόκρισης 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 συμπληρωθεί μια πιθανοτική μελέτη παλμικών εδαφικών κινήσεων χρειάζεται μια βιβλιοθήκη καταγραφών με κατηγοριοποίηση της εκάστοτε εδαφικής κίνησης ως παλμικής ή μη. Στο παρελθόν πολλοί ερευνητές κατηγοριοποίησαν τις καταγραφές χρησιμοποιώντας οπτικές ή ποσοτικές τεχνικές (Mavroeidis και Parageorgiou 2003, Somerville 2003, Fu και Menun 2004, Akkar et al 2005). Αυτές οι προσπάθειες όμως δεν περιέχουν μη παλμικές εδαφικές κινήσεις γι' αυτό αποτρέπουν την ανάλυση από τον προσδιορισμό της πιθανότητας εμφάνισης παλμού.

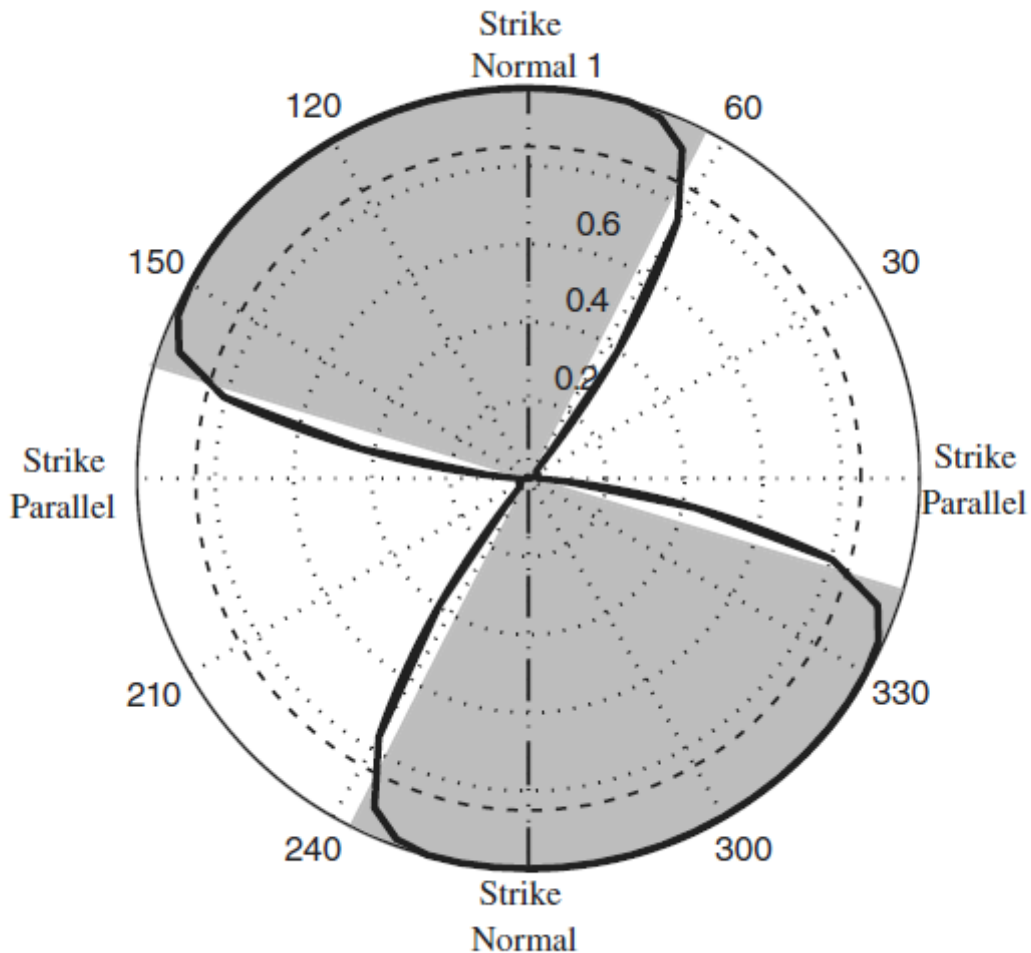
Στην προκειμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος εντοπισμού παλμού του Baker (2007) επειδή είναι εντελώς ποσοτική και επιτρέπει την κατηγοριοποίηση πολλών δεδομένων όπως αυτά της νέας βάσης δεδομένων (NGA database). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρησιμοποιεί κυματική ανάλυση ώστε να αποκόψει το παλμικό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



**Σχήμα 3.1:** Απεικόνιση της διαδικασίας που χρησιμοποιεί ο Baker (2007) για την αποκοπή του μεγαλύτερου παλμού 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.

Αν και οι παλμοί ταχύτητας που προέρχονται από το φαινόμενο της κατευθυντικότητας αναμένεται να εμφανιστούν στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της εδαφικής κίνησης (Somerville 1997), σε πολλές διαρρήξεις λόγω της ανώμαλης γεωμετρίας καθίσταται

δύσκολος ο προσδιορισμός της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας και 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 προσδιορίστηκε από τον Baker (2007) σε διάφορες διευθύνσεις γύρω από μια περιοχή (στις παλμικές εδαφικές κινήσεις εμφανίζονται μεγάλες τιμές συντελεστή εμφάνισης παλμού και σε διάφορες διευθύνσεις γύρω από τη θέση καταγραφής). Η παρουσιαζόμενη περίπτωση αποτελεί την απλή περίπτωση εμφάνισης παλμού γύρω από περιοχή ρήματος κανονικής διάρρηξης ενώ πιο περίπλοκες περιπτώσεις υφίστανται όταν η διεύθυνση του ρήματος κανονικής διάρρηξης δεν κείται στο εύρος διευθύνσεων όπου παρατηρούνται οι παλμοί (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 εμφάνισης της παλμικής κίνησης, οι εδαφικές καταγεγραμμένες κινήσεις περιστράφηκαν σε όλες τις διευθύνσεις και για καθεμιά διεύθυνση κατηγοριοποιήθηκαν ως παλμικές ή μη. Μια θέση, λοιπόν, θεωρείται ότι μπορεί να εμφανίσει παλμική κίνηση αν έστω και μια εδαφική κίνηση σε οποιαδήποτε διεύθυνση στη θέση αυτή είναι παλμική. Αυτό το μοντέλο περιστροφής και κατηγοριοποίησης εδαφικών κινήσεων σε κάθε διεύθυνση οδήγησε στην κατηγοριοποίηση 179 καταγραφών της νέας βάσης δεδομένων, οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ως παλμικές. Οι καταγραφές αυτές δίνονται στο παράρτημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η συγκεκριμένη μέθοδος κατηγοριοποίησης προσδιορίζει παλμούς μόνο στην οριζόντια διεύθυνση και ίσως να μη μπορεί να κατηγοριοποιήσει την κίνηση ως παλμική αν ο παλμός δε βρίσκεται στο οριζόντιο επίπεδο. Η κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση μπορεί να μη βρίσκεται στο οριζόντιο επίπεδο για ορισμένα ρήγματα μη κανονικής ολίσθησης, γι' αυτό τα μοντέλα για τα όλα τα ρήγματα μη κανονικής διάρρηξης που αναπτύχθηκαν στην παρούσα μελέτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο όταν υπάρχουν μικρής σημασίας παλμοί εκτός του οριζοντίου επιπέδου.

Η προηγούμενη έρευνα του Baker (2007) η οποία περιείχε μόνο εδαφικές κινήσεις που προέκυπταν από ρήγματα κανονικής διάρρηξης, προσδιόρισε 91 παλμικές κινήσεις της νέας βάσης δεδομένων. Οι περισσότερες από τις πρόσθετες εδαφικές κινήσεις της παρούσας μελέτης είχαν ένα διακριτό παλμικό χαρακτηριστικό στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα. Οι συγκεκριμένες καταγραφές δεν κατηγοριοποιήθηκαν ως παλμικές στην έρευνα του Baker (2007) επειδή το παλμικό χαρακτηριστικό βρισκόταν ελάχιστα εκτός των κατώτατων ορίων κατηγοριοποίησης της παρούσας έρευνας. Η παρουσία διακριτού παλμού στη χρονοϊστορία ταχυτήτων της κάθετης συνιστώσας των περισσότερων παλμικών καταγραφών υποδηλώνει ότι η επίδραση της κατευθυντικότητας μπορεί να είναι η κύρια αιτία της παλμικής κίνησης στη διεύθυνση αυτή.

### 3.2.2 Ανάπτυξη μοντέλων υπολογισμού της οριζόντιας φασματικής επιτάχυνσης

Η συμβατική εξίσωση προσδιορισμού της φασματικής επιτάχυνσης είναι η:

$$v s_a(x) = \sum_{i=1} v_i \iint P(Sa > x|m, r) \cdot f_i(m, r) \cdot dm \cdot dr \quad (1)$$

η οποία χρησιμοποιείται για την εύρεση του ετήσιου ρυθμού με τον οποίο η φασματική επιτάχυνση  $S_a$  σε μια θέση υπερβαίνει την τιμή  $x$ . Ο όρος  $P(Sa > x|m, r)$  δίνει την πιθανότητα η  $S_a$  σε μια συγκεκριμένη θέση να υπερβεί την τιμή  $x$  με την ταυτόχρονη εμφάνιση σεισμού μεγέθους  $m$  σε απόσταση  $r$ , η οποία μπορεί να προσδιοριστεί με οποιοδήποτε εδαφικό μοντέλο. Η συγκεκριμένη πιθανότητα αν πολλαπλασιαστεί με την πυκνότητα πιθανότητας εμφάνισης ενός σεισμού μεγέθους  $m$  σε απόσταση  $r$ ,  $f_i(m, r)$  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 μιας θέσης μπορεί να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας αυτή την πιθανότητα με το ρυθμό εμφάνισης των σεισμών στο ρήγμα  $v_i$  και αθροίζοντας για κάθε ρήγμα στην περιοχή της θέσης. Η πιθανότητα  $P(Sa > x | m, r)$  προέκυψε χρησιμοποιώντας ένα εδαφικό μοντέλο το οποίο γενικότερα αποτελεί συνάρτηση των παραμέτρων του μηχανισμού διάρρηξης, των χαρακτηριστικών της θέσης καταγραφής και άλλων παραμέτρων πέραν του σεισμικού μεγέθους και της απόστασης.

Οι επιδράσεις της παλμικής κίνησης μπορούν να συμπεριληφθούν στην ανάλυση σεισμικού κινδύνου χρησιμοποιώντας ένα τροποποιημένο μοντέλο εδαφικής κίνησης, το οποίο ερμηνεύει την επίδραση της ενίσχυσης των παλμών κατευθυντικότητας στις τιμές της φασματικής επιτάχυνσης. Επειδή οι επιδράσεις της κατευθυντικότητας εξαρτώνται κυρίως από τη γεωμετρία της πηγής και της θέσης καταγραφής, το εδαφικό μοντέλο ερμηνείας των παλμών πρέπει να είναι συνάρτηση της γεωμετρίας εκτός από 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  $P^*(Sa > x | m, r, z)$ , όπου το  $z$  αναπαριστά τις πληροφορίες για τη γεωμετρία της περιοχής. Αυτή η νέα πιθανότητα υπέρβασης όταν χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της εξίσωσης της φασματικής επιτάχυνσης μπορεί να δώσει το βαθμό υπέρβασης της  $Sa$  σε κάποια θέση, συναρτήσει του υπολογισμού της επίδρασης των παλμικών κινήσεων.

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

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

Η παρουσία ενός παλμικού χαρακτηριστικού της εδαφικής κίνησης ενισχύει ένα εύρος περιόδων του φάσματος απόκρισης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Αυτή η ενίσχυση της απόκρισης αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα υπέρβασης μιας συγκεκριμένης τιμής φασματικής επιτάχυνσης όταν η παλμική εδαφική κίνηση εμφανίζεται σε κάποια περιοχή. Για το λόγο αυτό, η προτεινόμενη εξίσωση (2) μπορεί να προκύψει διαχωρίζοντας την πιθανότητα  $P^*(Sa > x | m, r, z)$  σε δυο περιπτώσεις εξαρτώμενες από το αν εμφανίζεται ή όχι παλμική κίνηση. Οι συγκεκριμένες περιπτώσεις μπορούν αργότερα να συνδυαστούν ώστε να υπολογιστεί ο συνολικός βαθμός υπέρβασης.

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



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

όπου οι παλμικές εδαφικές κινήσεις έχουν μέση τιμή  $\mu_{\ln Sa, pulse}$  και τυπική απόκλιση  $\sigma_{\ln Sa, pulse}$ . Να σημειωθεί ότι τα  $\mu_{\ln Sa, pulse}$  και  $\sigma_{\ln Sa, pulse}$  είναι συναρτήσεις των  $m$ ,  $r$ ,  $Tr$  και άλλων παραγόντων αλλά η εξάρτησή τους έχει παραληφθεί με σκοπό να τονιστεί η επίδραση των νέων παραμέτρων της συγκεκριμένης έρευνας.

Όταν δεν παρατηρείται παλμός για τον υπολογισμό της φασματικής επιτάχυνσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί το τροποποιημένο εδαφικό μοντέλο της επόμενης εξίσωσης, αφού πρωτίστως γίνει η διόρθωσή του για την υπερεκτίμηση της κίνησης:

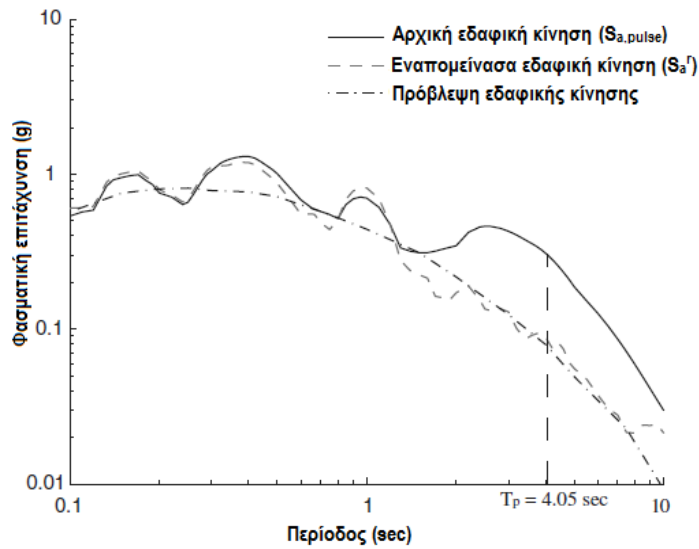
$$P(Sa > x|m, r, no pulse) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(x) - \mu_{\ln Sa, no pulse}}{\sigma_{\ln Sa, no pulse}}\right) \quad (4)$$

όπου η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση μπορούν να προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο τροποποιημένης 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 υπολοίπων που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη έρευνα είναι συμβατά με αυτή την υπόθεση.

Οι δυο αυτές υποπεριπτώσεις μπορούν να συνδυαστούν χρησιμοποιώντας το θεώρημα ολικής πιθανότητας (Benjamin και Cornell, 1970) ώστε να προκύψει η ολική πιθανότητα υπέρβασης  $Sa$  την τιμή  $x$  σε κάποια θέση ως:

$$P^*(Sa > x|m, r, z) = P(pulse|m, r, z) \cdot P(Sa > x|m, r, z, pulse) + (1 - P(pulse|m, r, z)) \cdot P(Sa > x|m, r, no pulse) \quad (5)$$

Όπως παρατηρείται στην εξίσωση (5) η πιθανότητα ύπαρξης παλμικής κίνησης σε μια περιοχή είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της φασματικής επιτάχυνσης. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για τον προσδιορισμό της πιθανότητας εμφάνισης παλμού δεδομένης της γεωμετρίας της πηγής και της θέσης καταγραφής, κατά το οποίο χρησιμοποιείται ένα γενικευμένο γραμμικό μοντέλο για την προσαρμογή των δεδομένων διωνυμικής κατανομής (Kutner et al. 2004).



**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.

Είναι ευρέως αποδεδειγμένο ότι το φαινόμενο πρόσω κατευθυντικότητας εξαρτάται από τη γεωμετρία της περιοχής καταγραφής. Οι Iervolino και Cornell (2008) απέδειξαν ότι οι παράμετροι  $r$ ,  $s$  και  $\theta$  για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και  $r$ ,  $d$  και  $\phi$  για όλους τους υπόλοιπους τύπους ρηγμάτων έχουν μεγαλύτερη ισχύ κατά τη λογιστική παλινδρόμηση για τον προσδιορισμό της εμφάνισης παλμού απ' ότι άλλες παράμετροι. Το σχήμα 3.4 παρουσιάζει γραφικά αυτές τις παραμέτρους. Στην προκειμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παράμετροι με αυτές των Iervolino και Cornell (2008) και διεξήχθη η λογιστική παλινδρόμηση χρησιμοποιώντας πληροφορίες από όλες τις θέσεις καταγραφής της νέας βάσης δεδομένων. Χρειάστηκε επαναπροσαρμογή των δεδομένων επειδή το μοντέλο των Iervolino και Cornell (2008) δίνει μόνο την πιθανότητα εμφάνισης παλμού στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα ενώ η συγκεκριμένη έρευνα χρειάζεται την πιθανότητα εμφάνισης σε οποιαδήποτε συνιστώσα. Βρέθηκε ότι μόνο οι παράμετροι  $r$  και  $s$  είναι στατιστικά σημαντικές στην περίπτωση ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης ενώ οι παράμετροι  $r$ ,  $d$  και  $\phi$  είναι σημαντικές για όλους τους υπόλοιπους τύπους ρηγμάτων. Τα αποτελέσματα της στατιστικής παλινδρόμησης συνοψίζονται στις εξισώσεις (6) και (7):

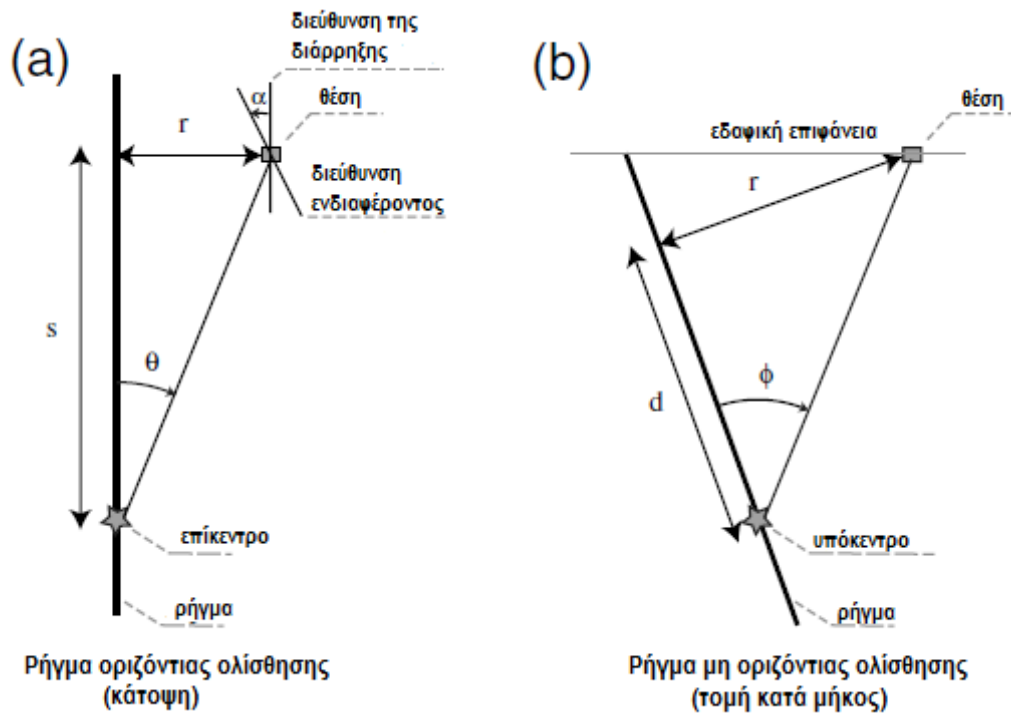
για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης

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

για όλους τους υπόλοιπους τύπους ρηγμάτων

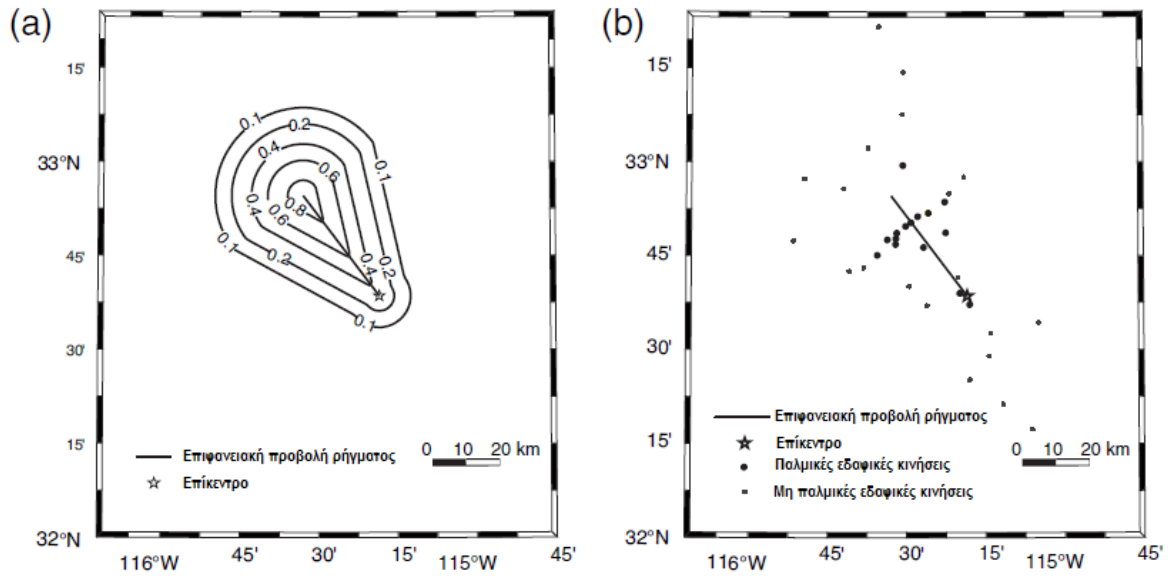
$$P(\text{pulse}|r, d, \phi) = \frac{1}{1 + e^{(0.128 + 0.055 \cdot r - 0.061 \cdot d + 0.036 \cdot \phi)}} \quad (7)$$

Οι μονάδες των  $r$ ,  $d$  και  $s$  είναι km ενώ του  $\phi$  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 0 έως 70km, του  $\phi$  από 0 έως 90 μοίρες και του  $s$  από 0.3km έως 143km.

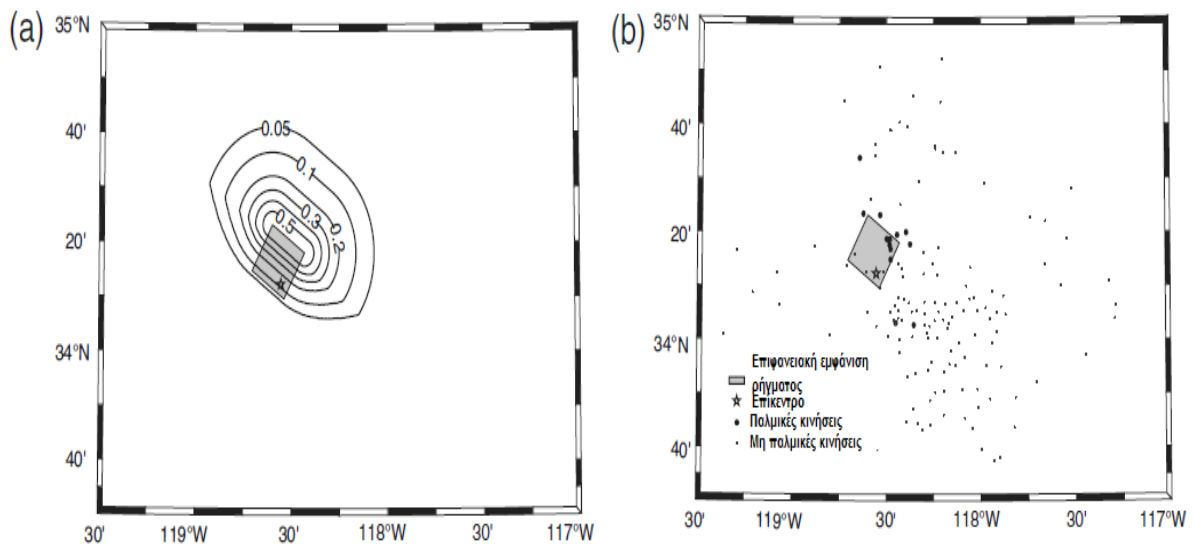


**Σχήμα 3.4:** Σχήμα που επεξηγεί τις απαιτούμενες παραμέτρους για τη λογιστική παλινδρόμηση για (α) ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και (β) ρήγμα μη οριζόντιας ολίσθησης. Παρουσιάζεται επίσης η γωνία  $\alpha$  μεταξύ της διεύθυνσης ενδιαφέροντος και της διεύθυνσης του ρήγματος.

Ένας χάρτης με τις προκύπτουσες πιθανότητες για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5a και για ένα ρήγμα μη οριζόντιας ολίσθησης στο σχήμα 3.6a. Οι ισοϋψείς των χαρτών συμβολίζουν την πιθανότητα εμφάνισης παλμού γύρω από τη διάρρηξη κατά το σεισμό του Imperial Valley και του Northridge. Οι συγκεκριμένοι χάρτες μπορούν να συγκριθούν με τους πραγματικούς για περιοχές όπου παρατηρήθηκε η παλμική εδαφική κίνηση, όπως φαίνεται στα αντίστοιχα σχήματα 3. 5b και 3. 6b. Το συγκεκριμένο μοντέλο προβλέπει αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης παλμού σε περιοχές όπου εμφανίζονται φαινόμενα κατευθυντικότητας, ενώ η μορφή των ισοϋψών φαίνεται να είναι όμοια με αυτή των πραγματικών παρατηρήσεων.



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



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

Η περιστροφή και η κατηγοριοποίηση των εδαφικών κινήσεων οδήγησε στην εύρεση των παλμικών κινήσεων σε ένα εύρος διευθύνσεων. Για τον υπολογισμό του σεισμικού κινδύνου μιας θέσης κοντά σε ρήγμα 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 ( $\alpha$ ) δεδομένου ότι ο παλμός εμφανίζεται σε κάποια θέση, άρα  $P(\text{pulse at } \alpha | \text{pulse})$ . Η γωνία  $\alpha$  είναι η μικρότερη γωνία που μπορεί να μετρηθεί σε σχέση με τη γωνία βύθισης του ρήγματος που λήφθηκε από τα δεδομένα της νέας βάσης δεδομένων. Το σχήμα 3.4a απεικονίζει ένα σχηματικό διάγραμμα στο οποίο φαίνεται η γωνία  $\alpha$ . Βρέθηκε 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 με παλμό στη γωνία  $\alpha$  για ρήματα οριζόντιας ολίσθησης και μη οριζόντιας ολίσθησης. Επίσης παρουσιάζονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μείωση των τετραγωνικών σφαλμάτων μεταξύ των δεδομένων που προέκυψαν από παρατηρήσεις και αυτών που προέκυψαν από τις εξισώσεις. Το μοντέλο περιγράφεται από τις εξισώσεις (8) και (9) για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και όλους τους υπόλοιπους τύπους ρηγμάτων αντίστοιχα:

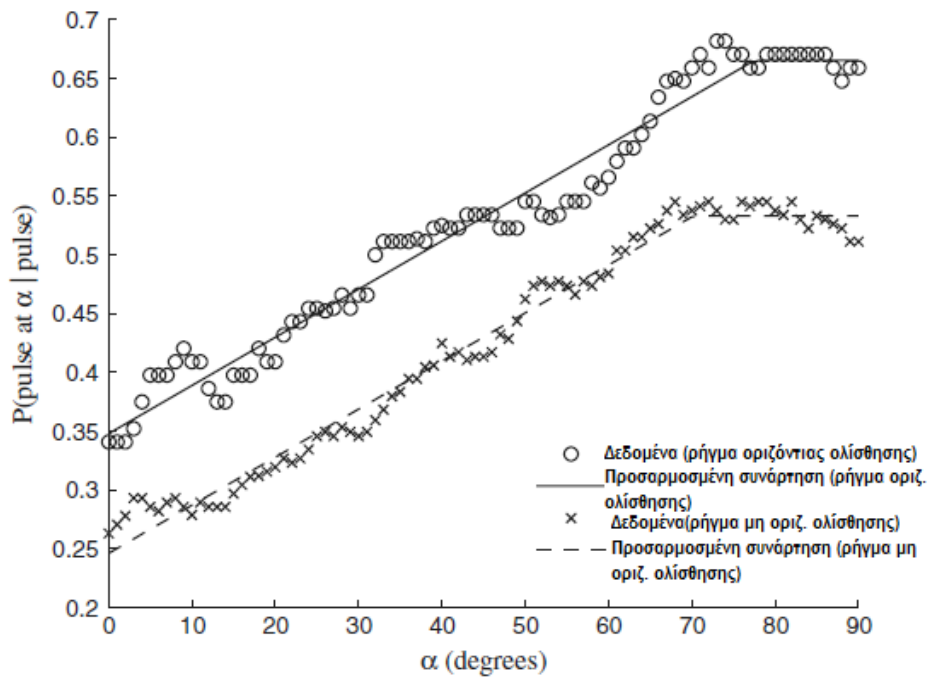
$$P(\text{pulse at } \alpha | \text{pulse}) = \min [0.67, 0.67 - 0.0041(77.5 - \alpha)] \quad (8)$$

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

Λόγω του εντονότερου φαινομένου κατευθυντικότητας στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα και του ότι η κάθετη συνιστώσα 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 επιβεβαίωσαν 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 όλες τις κατηγορίες ρηγμάτων (οριζόντιας ολίσθησης και μη). Η πιθανότητα εμφάνισης παλμικής κίνησης σε κάποια θέση με διεύθυνση  $\alpha$  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 καθορίζονται από τις εξισώσεις (6) έως (9).



**Σχήμα 3.7:** Απεικόνιση της πιθανότητας εμφάνισης παλμού σε γωνία  $\alpha$  δεδομένου του παλμού σε κάποια θέση για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και μη.

### 3.2.3 Περίοδος παλμού

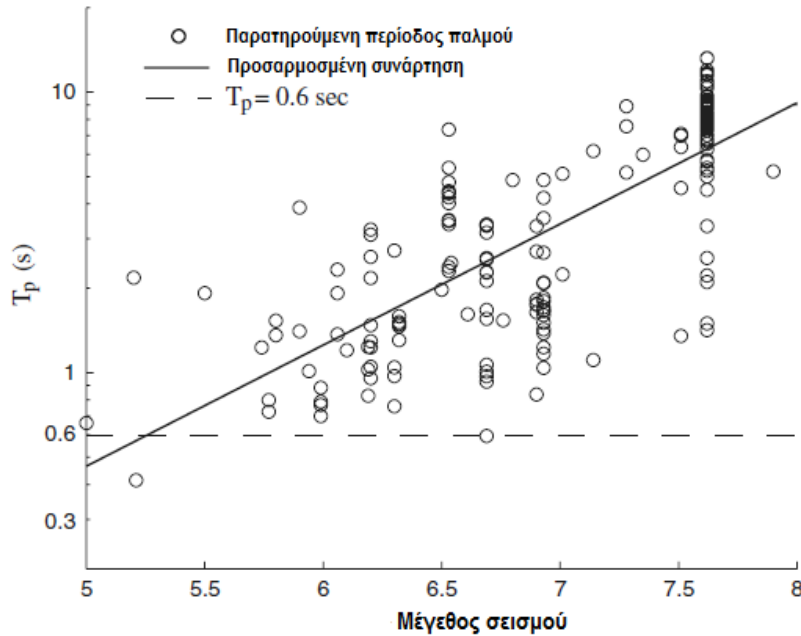
Η ενίσχυση της φασματικής επιτάχυνσης  $S_a$  λόγω της παρουσίας ενός παλμικού χαρακτηριστικού στην εδαφική κίνηση αποτελεί συνάρτηση της περιόδου του παλμού. Πολλοί ερευνητές στο παρελθόν ανακάλυψαν ότι η περίοδος του παλμού εξαρτάται από το σεισμικό μέγεθος, συνεπώς συμπεριέλαβαν αυτή τη σχέση στις εξισώσεις τους (Manroeidis και Parageorgiou 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 όλες τις παλμικές κινήσεις της παρούσας έρευνας.

Για τον καθορισμό της σχέσης 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 κατά 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 3.18 απεικονίζει τη σχέση της παρατηρούμενης περιόδου του παλμού  $T_p$  σε σχέση με το σεισμικό μέγεθος  $M$  της εξίσωσης (11).



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

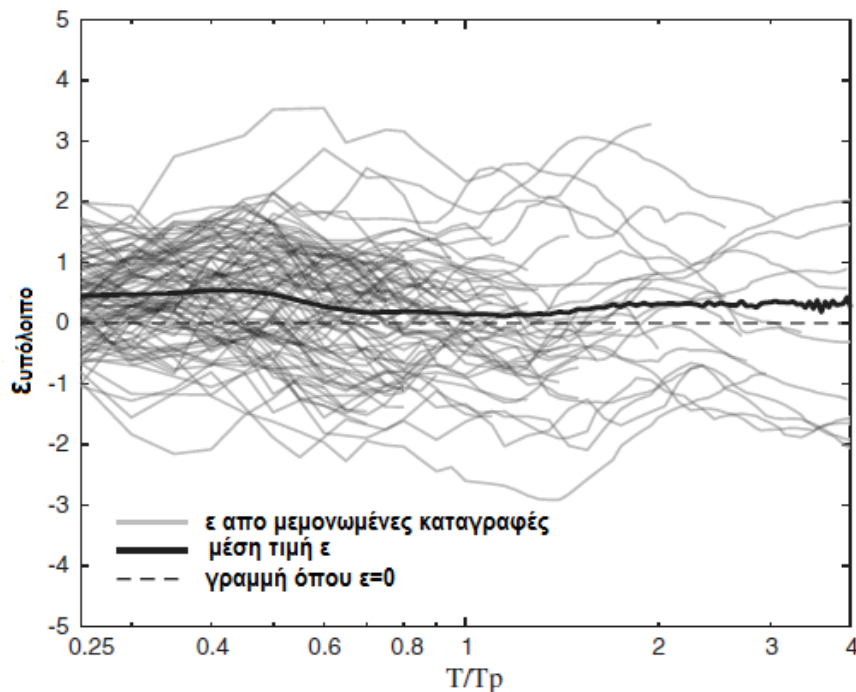
Τα υπόλοιπα του μοντέλου ακολουθούν κανονική κατανομή άρα η  $\ln T_p$  μπορεί να θεωρηθεί ότι ακολουθεί επίσης κανονική κατανομή (ή ότι η  $T_p$  ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή) σε σχέση με τη μέση τιμή  $\mu_{\ln T_p}$  που δίνεται από την εξίσωση (11) και την τυπική απόκλιση  $\sigma_{\ln T_p}$  που δίνεται από την εξίσωση (12). Από την εικόνα επίσης φαίνεται 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 επιδρούν σημαντικά στη σεισμική επικινδυνότητα. Για το λόγο αυτό, οι παρατηρήσεις με  $T_p < 0.6 \text{ sec}$  αγνοήθηκαν στα εν λόγω μοντέλα και στους μετέπειτα υπολογισμούς.

### 3.2.4 Επαύξηση της φασματικής επιτάχυνσης λόγω του παλμού κατευθυντικότητας

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

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

Ο όρος  $S_a^r$  είναι η φασματική επιτάχυνση της απομένουσας εδαφικής κίνησης, δηλαδή της κίνησης που απομένει μετά την αφαίρεση του παλμού και ο όρος  $Af$  είναι ο συντελεστής ενίσχυσης λόγω της παρουσίας του παλμού. Αυτή η προσομοίωση της εδαφικής κίνησης δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης της ενίσχυσης λόγω των παλμικών χαρακτηριστικών και της απομένουσας εδαφικής κίνησης σε κάποια θέση ξεχωριστά. Στο σχήμα 3.9 παρουσιάζονται τα υπόλοιπα  $\epsilon$  της εδαφικής κίνησης σύμφωνα με το μοντέλο των Boore και Atkinson (2008), όπου τα  $\epsilon$  συμβολίζουν τα τυποποιημένα υπόλοιπα του μοντέλου των Boore και Atkinson (2008).



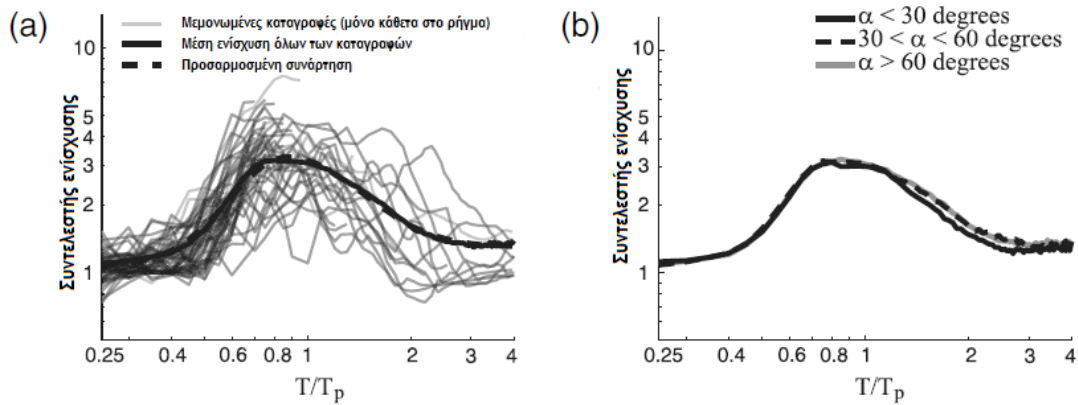
Σχήμα 3.9: Παρατηρούμενες τιμές  $\epsilon$  της απομένουσας εδαφικής κίνησης.



Στο σχήμα φαίνεται ότι τιμές των  $\varepsilon$  κοντά στο μηδέν υποδηλώνουν ότι το εδαφικό μοντέλο μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά την  $Sa'$  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 πολλές φορές ισχυρότερη από την παράλληλη, ακόμα και μετά την αφαίρεση του παλμού, άρα το αποτέλεσμα του σχήματος 3.9 είναι συμβατό με αυτό το εύρημα καθώς τα  $\varepsilon$  από την απομένουσα εδαφική κίνηση είναι θετικά (η εδαφική κίνηση είναι δηλαδή ισχυρότερη από την πρόβλεψη για τη μέση τιμή). Όμως, τα  $\varepsilon$  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  $\ln Sa'$  με την τιμή που προβλέπεται από τα παραδοσιακά προσομοιώματα εδαφικής κίνησης:

$$\ln Sa, pulse = \ln Af + \ln Sa, gmm \quad (14)$$

Ακόμη, στην παρούσα μελέτη υπολογίστηκαν μορφές εδαφικής ενίσχυσης καθώς επίσης και 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 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, χρησιμοποιώντας απομείωση των τετραγώνων των σφαλμάτων και εφαρμογή στα σεισμικά δεδομένα, επιλέχθηκε η εξής:

$$\begin{aligned}\mu_{lnAf} &= 1.131 \cdot \exp\left(-3.11 \cdot \left(\ln\left(\frac{T}{T_p}\right) + 0.127\right)^2 + 0.058\right) \quad \text{εαν } T \leq 0.88T_p \\ \mu_{lnAf} &= 0.896 \cdot \exp\left(-2.11 \cdot \left(\ln\left(\frac{T}{T_p}\right) + 0.127\right)^2 + 0.255\right) \quad \text{εαν } T > 0.88T_p\end{aligned} \quad (15)$$

Στο σχήμα 3.10a παρουσιάζεται η προσομοίωση σε συνάρτηση με τις παρατηρούμενες ενισχύσεις. Ενισχύσεις που υπολογίστηκαν για παλμικές κινήσεις σε διαφορετικές διευθύνσεις παρουσιάζονται στο σχήμα 3.10b από το οποίο συμπεραίνεται ότι το μοντέλο είναι σταθερό ανεξάρτητα από την αλλαγή της διεύθυνσης. Παρόμοιοι έλεγχοι απέδειξαν ότι η ενίσχυση λόγω της παρουσίας του παλμού παραμένει σταθερή με την αλλαγή των σεισμικών μεγεθών και του τύπου του ρήγματος. Μπορούμε επίσης να πούμε ότι:

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

Επειδή το τροποποιημένο εδαφικό μοντέλο της παρούσας μελέτης μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε παλμικές κινήσεις, αναμένεται ότι η τυπική απόκλιση του υποσυνόλου καταγραφών θα είναι μικρότερη από αυτή της συνολικής βάσης δεδομένων. Επίσης, επειδή το συγκεκριμένο μοντέλο εφαρμόζεται για εδαφική ενίσχυση προερχόμενη από το φαινόμενο 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:

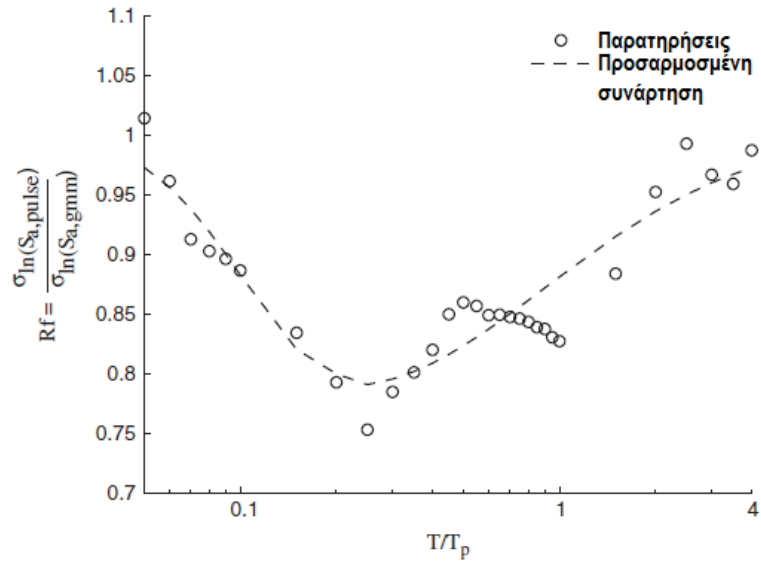
$$\sigma_{lnSa,pulse} = R_f \cdot \sigma_{lnSa,gmm}$$

όπου ο απομειωτικός συντελεστής  $R_f$  υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\begin{aligned}R_f &= 1 - 0.2 \cdot \exp\left(-0.96 \cdot \left(\ln\left(\frac{T}{T_p}\right) + 1.56\right)^2\right) \quad \text{εαν } T \leq 0.21T_p \\ R_f &= 1 - 0.21 \cdot \exp\left(-0.24 \cdot \left(\ln\left(\frac{T}{T_p}\right) + 1.56\right)^2\right) \quad \text{εαν } T > 0.21T_p\end{aligned} \quad (17)$$

Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζεται ο λόγος της τυπικής απόκλισης των υπολοίπων του τροποποιημένου μοντέλου προς αυτές 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  $T_p > 0.6\text{sec}$ . Ας σημειωθεί ότι αυτό το όριο περιορίζει την

ενίσχυση της φασματικής επιτάχυνσης στις μικρές περιόδους, το οποίο είναι συμβατό με τα όρια που χρησιμοποιούνται σε άλλα μοντέλα προσομοίωσης.



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



# Κεφάλαιο 4

## ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΝΕΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΠΟΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ (NGA) – Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ $\xi$

---

### 4.1 Εισαγωγή

### 4.2 Το μοντέλο κατευθυντικότητας του Rowshandel

#### 4.2.1 Ο συντελεστής κατευθυντικότητας $\xi$

#### 4.2.2 Περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού του συντελεστή κατευθυντικότητας $\xi$



## 4.1 Εισαγωγή

Η διερεύνηση των χαρακτηριστικών των σεισμών κοντινού πεδίου είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον αντισεισμικό σχεδιασμό. Ένα σημαντικό στοιχείο για την βελτίωση του χαρακτηρισμού των σεισμικών διεγέρσεων είναι ο ρόλος που παίζει η διεύθυνση της διάρρηξης του ρήγματος, γνωστή ως κατευθυντικότητα. Ο όρος κατευθυντικότητα αναφέρεται στο αζιμούθιο και στις εξαρτώμενες μεταβλητές που είναι το πλάτος, η διάρκεια και το συχνοτικό περιεχόμενο της σεισμικής διέγερσης καθώς αυτές μεταβάλλονται λόγω της κατεύθυνσης της διάρρηξης. Το φαινόμενο αυτό, το οποίο παράγει ισχυρότερους σεισμικούς παλμούς στην εδαφική κίνηση με έμπροσθεν κατευθυντικότητα, έχει παρατηρηθεί σε πολλούς πρόσφατους σεισμούς μετρίου και μεγάλου μεγέθους. Η κατευθυντικότητα είναι γνωστή στην επιστημονική κοινότητα και έχει μελετηθεί σε μεγάλο βαθμό. Στις πρώτες θεωρητικές εργασίες ανήκουν οι έρευνες των Ben-Menahem (1961, 1962). Η πρώτη αφορά την επίδραση των επιφανειακών κυμάτων (Rayleigh και Love κύματα), ενώ η δεύτερη την επίδραση των κυμάτων S και P. Οι παραπάνω εργασίες απέδειξαν ότι οι διαστάσεις της σεισμικής πηγής και η ταχύτητα διάρρηξης έχουν μεγάλη επίδραση στο κύμα και στα φάσματα της σεισμικής διέγερσης. Συγκεκριμένα, η ενέργεια που διαδίδεται στην κατεύθυνση της διάρρηξης μπορεί να υπερβαίνει κατά πολύ την ενέργεια που παράγεται κατά την αντίθετη κατεύθυνση. Οι επιρροές της πηγής γίνονται εντονότερες όταν το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) είναι συγκρίσιμο με τις διαστάσεις της πηγής (L) ή όταν η περίοδος του κύματος (T) είναι συγκρίσιμη με τον χρόνο διάρρηξης ( $\tau_r$ ), κάτι που συμβαίνει όταν ο λόγος  $\tau_r/T \approx L/\lambda$  παίρνει μεγάλες τιμές.

Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας συνοδεύει τα κύματα P και S, καθώς και τα επιφανειακά κύματα, σε διαφορετικό όμως βαθμό και σε διαφορετικές αποστάσεις και θέσεις σε σχέση με την πηγή. Ωστόσο, για πρακτικές εφαρμογές μηχανικής στο κοντινό πεδίο, οι επιδράσεις των διατμητικών κυμάτων είναι αυτές που έχουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Στις καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες εδαφικής κίνησης, αυτή η εποικοδομητική παρέμβαση των διατμητικών κυμάτων εμφανίζεται συνήθως με μεγάλο παλμό ταχύτητας σε θέσεις κοντά στο ρήγμα και στην προς τα εμπρός κατεύθυνση της διάδοσης της διάρρηξης. Από την άλλη, σε θέσεις αντίθετες προς την κατεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης, η σεισμική ενέργεια φτάνει σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, δημιουργώντας χαμηλότερης συχνότητας κινήσεις με μικρότερα πλάτη.

Αυτές οι διαφορές στα χαρακτηριστικά της σεισμικής ενέργειας που φθάνουν σε θέσεις αντίθετες σε σχέση με την κατεύθυνση της διάρρηξης μπορούν να αποδειχθούν χρησιμοποιώντας το μοντέλο "Haskell", το οποίο είναι η απλούστερη μαθηματική

αναπαράσταση μιας σεισμικής πηγής.. Το μοντέλο χαρακτηρίζεται από τη σεισμική ροπή  $M(t)$ , η οποία είναι με τη μορφή μιας συνάρτησης δύο σκέλων. Η αντίστοιχη μετατόπιση μακρινού πεδίου είναι μια κίνηση με διάρκεια  $\tau_r$ , συχνά αναφερόμενη ως "χρόνος ανόδου" (Stein and Wysession 2003). Η πραγματική διάρκεια της διάρρηξης για ένα ρήγμα στο οποίο η διάρρηξη γίνεται σε όλο το μήκος του, εξαρτάται μόνο από το μήκος του ρήγματος  $L$  και την ταχύτητα διάρρηξης  $v_r$ . Ωστόσο, η αντιληπτή διάρκεια εξαρτάται από τη θέση της περιοχής σε σχέση με την κατεύθυνση της διάρρηξης, η οποία είναι η αζιμουθιακή τοποθεσία.. Για μια περιοχή σε αζιμουθιακή γωνία  $\theta$  σε σχέση με την πηγή και ταχύτητα διατμητικών κυμάτων  $v_s$ , η αντιληπτή διάρκεια διάρρηξης είναι

$$\tau_r = L(1/v_r - (\cos\theta)/v_s) \quad (1)$$

Εκ των πραγμάτων, εάν μια θέση βρίσκεται σε εμπροσθεν κατευθυντικότητα ( $\theta=0^\circ$ ) η διάρκεια διάρρηξης ελαχιστοποιείται, ενώ αντίθετα, σε κατάσταση όπισθεν κατευθυντικότητας, η διάρκεια διάρρηξης είναι η μέγιστη. Οι αντίστοιχες διάρκειες διάρρηξης δίνονται στους παρακάτω τύπους.

$$\tau_r = L(1/v_r - 1/v_s) \quad (2\alpha)$$

$$\tau_r = L(1/v_r + 1/v_s) \quad (2\beta)$$

Αυτή η διακύμανση στους χρόνους διάρρηξης οφείλεται στην κατευθυντικότητα. Η αύξηση του χρόνου στις περιπτώσεις εμπροσθεν κατευθυντικότητας και η μείωση αντίστοιχα στις περιπτώσεις όπισθεν κατευθυντικότητας συνοδεύεται με το αντίθετο φαινόμενο του πλάτους της εδαφικής κίνησης. Στις περιπτώσεις λοιπόν εμπροσθεν κατευθυντικότητας τα πλάτη είναι μεγαλύτερα συγκριτικά με τις αντίθετες καταστάσεις όπισθεν κατευθυντικότητας. Το φαινόμενο λοιπόν της κατευθυντικότητας δεν είναι απλά κάτι που εξαρτάται από την πηγή του ρήγματος, αλλά εξαρτάται και από την μελετώμενη θέση.

Όπως φαίνεται και από τις παραπάνω σχέσεις, η αντιληπτή διάρκεια διάρρηξης και το φαινόμενο της κατευθυντικότητας, εξαρτώνται από την ταχύτητα διάρρηξης και από την ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων. Ειδικότερα στο ενδιαφέρον του μηχανικού, η εξάρτηση συνδέεται με την ταχύτητα διάρρηξης  $v_r$  και την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων  $v_s$ . Σεισμοί με μεγάλη ταχύτητα διάρρηξης συνήθως απελευθερώνουν μεγαλύτερη σεισμική ενέργεια δημιουργώντας εδαφικές κινήσεις με μεγάλα πλάτη, ενώ διαρρήξεις με μικρότερη ταχύτητα καταλήγουν στην απελευθέρωση μικρότερης ενέργειας και σε εδαφικές κινήσεις που χαρακτηρίζονται από μικρότερα πλάτη.

Ένας φυσικός τρόπος διερεύνησης του φαινομένου της κατευθυντικότητας, είναι απλοποιώντας τις εξισώσεις των κυμάτων και αντλώντας από αυτές τα απαραίτητα στοιχεία. Σε αυτήν την κατεύθυνση κινείται η χρήση της ισόχρονης θεωρίας. Οι Sprudich



et Chiou (2008) χρησιμοποίησαν αυτήν τη προσέγγιση προκειμένου να βελτιώσουν το μοντέλο τους περί κατευθυντικότητας. Στη ισόχρονη θεωρία οι χαμηλόσυχνες συνιστώσες αγνοούνται και μόνο οι επιδράσεις των κυμάτων υψηλών συχνοτήτων λαμβάνονται υπ όψιν. Βέβαια η μέθοδος αυτή δίνει καλά αποτελέσματα σε περιπτώσεις θέσεων κοντά στο ρήγμα, όπου δεν έχουν αναπτυχθεί τα επιφανειακά κύματα.

Χρησιμοποιώντας εμπειρικά δεδομένα και καταγραφές, ο Somerville et al. (1997) μελέτησαν το φαινόμενο της κατευθυντικότητας, καταλήγοντας σε αντίστοιχα μοντέλα. Παρά την απλότητά του μοντέλου του Somerville, υπάρχουν θέματα που χρήζουν βελτίωσης. Το μοντέλο διακρίνει τους σεισμούς σε δύο κατηγορίες: ρήγματα καθαρά οριζόντιας ολίσθησης και ρήγματα κατακόρυφης μετακίνησης. Ως αποτέλεσμα το πλάτος και το μήκος της ολίσθησης σε περιπτώσεις ρημάτων κατακόρυφης μετακίνησης δεν μπορούν να συμπεριληφθούν. Ο Rowshandel (2006) μετέτρεψε το μοντέλο του Somerville σε μοντέλο που είναι ανεξάρτητο από τον τρόπο ολίσθησης. Στα αρχικά στάδια του προγράμματος NGA, ο Rowshandel χρησιμοποίησε τις καταγραφές από τη βάση δεδομένων της NGA, προκειμένου να καταλήξει σε σχέσεις για τα μοντέλα πρόβλεψης της κατευθυντικότητας.

## 4.2 Το μοντέλο κατευθυντικότητας του Rowshandel

### 4.2.1 Ο συντελεστής κατευθυντικότητας $\xi$

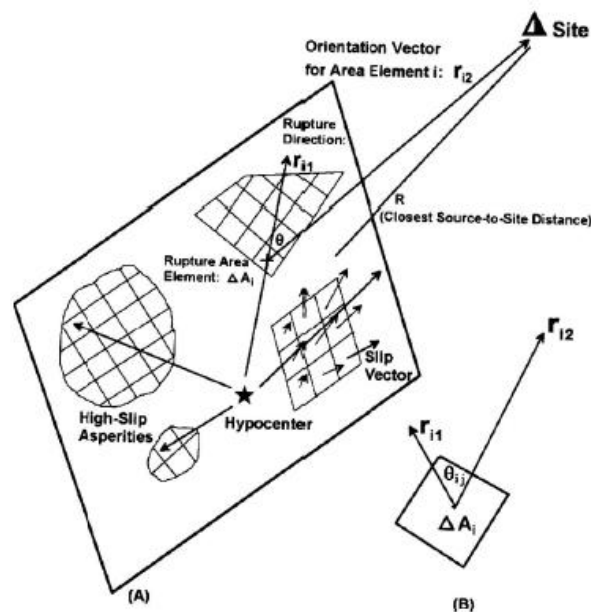
Το μοντέλο του Rowshandel στηρίζεται στην παραδοχή ότι η επίδραση της κατευθυντικότητας του ρήματος στην εδαφική κίνηση είναι ανάλογη του λόγου της επιφάνειας διάρρηξης προς την υπό μελέτη θέση προς την επιφάνεια διάρρηξης. Μάλιστα, η συνεισφορά είναι ανάλογη της ενεργούς επιφάνειας που έχει διεύθυνση προς την μελετώμενη θέση. Με τον παραπάνω ορισμό ο ενεργός συντελεστής κατευθυντικότητας σε συγκεκριμένη θέση  $\zeta$  και για συνολική επιφάνεια διάρρηξης  $A$  μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\xi = \frac{\sum \zeta_i \Delta A_i \vec{r}_1 \vec{r}_2}{\sum \Delta A_i} = \sum \zeta_i \Delta A_i \cos \theta_{ij} / A \quad (3)$$

όπου  $\Delta A_i$  είναι τμήμα της περιοχής του ρήματος προς την διεύθυνση που καθορίζεται από τα μοναδιαία διάνυσμα  $\vec{r}_1$ ,  $\vec{r}_2$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα που ορίζει την διεύθυνση από την περιοχή διάρρηξης προς την θέση  $\zeta$ ,  $\theta_{ij}$  είναι η γωνία που σχηματίζει η πηγή με την υπό μελέτη θέση, και η παράμετρος  $\zeta$  που περιέχεται στον τύπο δείχνει την ενεργό περιοχή διάρρηξης. Ο ρόλος αυτής της παραμέτρου είναι ουσιαστικά να συμπεριλάβει τυχόν υπάρχουσες ετερογένειες στην επιφάνεια της διάρρηξης. Λαμβάνεται μηδέν όταν η έκλυση ενέργειας κατά τη διάρρηξη είναι

μηδενική, ενώ ισούται με την μονάδα στην όταν μπορούμε να αγνοήσουμε τις επιδράσεις της ετερογένειας. Στην συγκεκριμένη εργασία ο συντελεστής  $\xi$  λαμβάνεται ίσος με την μονάδα, όπως θα δούμε και στα επόμενα κεφάλαια υπολογισμού του.

Ο συντελεστής  $\xi$  συμπεραίνουμε ότι καθόλα έχει γεωμετρική έκφραση. Δεδομένης λοιπόν της τοποθεσίας, της γεωμετρίας του ρήγματος και της θέσης του υποκέντρου είναι εύκολος ο υπολογισμός του συγκεκριμένου συντελεστή κατευθυντικότητας. Θεωρητικά η τιμή του λαμβάνει τιμές από  $-1$  μέχρι  $+1$ , με τις αρνητικές να αντιπροσωπεύουν την όπισθεν κατευθυντικότητα και τις θετικές την έμπροσθεν. Η οριακή τιμή  $+1$  υποδεικνύει ότι το 100% της διάρρηξης πραγματοποιείται με έμπροσθεν κατευθυντικότητα.



**Σχήμα 4.1:** Α) Σχηματικό διάγραμμα της γεωμετρίας και του προσανατολισμού του ρήγματος ως προς την υπό μελέτη θέση, Β) διεύθυνση της διάρρηξης (ολίσθησης) και προσανατολισμός ως προς τη θέση  $j$  και το σημείο του ρήγματος  $i$  (Rowshandel 2006)

#### 4.2.2 Περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού του συντελεστή κατευθυντικότητας $\xi$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή κατευθυντικότητας  $\xi$ , η περιοχή του ρήγματος διαιρείται σε  $N$  μικρότερα τμήματα, συνήθως 1 επί 1 τετραγωνικά χιλιόμετρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. Για κάθε περιοχή υπολογίζονται τα μοναδιαία διανύσματα  $r$ . Εναλλακτικά, η κατευθυντικότητα μπορεί να εκφραστεί με όρους ολίσθησης του

ρήγματος αντί για διεύθυνσης. Πρέπει σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι η διεύθυνση της ολίσθησης είναι ανεξάρτητη από τον μηχανισμό διάρρηξης του ρήγματος.

Επιπροσθέτως του συντελεστή κατευθυντικότητας  $\xi$ , υπάρχουν δύο ακόμα συντελεστές, ονομαζόμενοι C και  $C_0$  στο μοντέλο του Rowshandel που υπολογίζονται γραμμικά συνδέοντας το  $\xi$  με τις εναπομένουσες εδαφικές κινήσεις  $\delta$ :

$$\delta_j = C\xi_j + C_0 \quad (4)$$

Ως εκ τούτου, η επίδραση της κατευθυντικότητας στον λογαριθμικό χώρο είναι  $C\xi$ . Η παραπάνω μορφή συνάρτησης δύναται να χρησιμοποιηθεί στην ανάπτυξη νέων σχέσεων κατευθυντικότητας και στην βελτίωση των παλιών. Όταν χρησιμοποιείται για τη δημιουργία νέων σχέσεων, ο συντελεστής  $C_0$  απορροφάται στον ελεύθερο συντελεστή στη σχέση απομείωσης της εδαφικής κίνησης και η μόνη παράμετρος που εκφράζει πλέον την επίδραση της κατευθυντικότητας είναι ο συντελεστής C της εξίσωσης (4). Με άλλα λόγια ο συντελεστής  $C_0$  αντανακλά την επίδραση των δεδομένων και μόνο η παράμετρος C αντιπροσωπεύει την ευαισθησία της συμμετοχής των εδαφικών κινήσεων στη διάρρηξη. Οι παραπάνω συντελεστές επηρεάζονται από τις μετρήσεις των εδαφικών κινήσεων και ίσως και από άλλους παράγοντες, όπως το έδαφος ή ο βραχώδης τύπος. Όσον αφορά τις εδαφικές μετρήσεις, μεγαλύτερες περίοδοι δείχνουν ισχυρότερη εξάρτηση στην κατευθυντικότητα απ' ότι οι μικρότερες περίοδοι.



# Κεφάλαιο 5

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΙΣΟΧΡΟΝΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ

---

5.1 Εισαγωγή

5.2 Ο ισόχρονος συντελεστής κατευθυντικότητας IDP -  $\tilde{c}$



## 5.1 Εισαγωγή

Ως μέτρο κατευθυντικότητας με τη χρήση της ισόχρονης θεωρίας (Isochrone Theory) ορίζεται η παράμετρος  $c$  γνωστή ως ισόχρονη ταχύτητα (isochrone velocity). Η εδαφική μετατόπιση σε κοντινό, μεσαίας απόστασης και μακρινό πεδίο από τα κύματα  $S$  και  $P$  είναι γραμμική στην ισόχρονη ταχύτητα  $c$  για μια ορισμένη πηγή. Η ισόχρονη ταχύτητα ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση ως εξής:

$$c := \left| \nabla_s t_a(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s) \right|^{-1} \quad (1)$$

όπου  $x_s$  η θέση του σταθμού,  $x$  η θέση στο ρήγμα, και  $t_a(x, x_s)$  ο χρόνος άφιξης στη θέση  $x_s$  από ένα  $P$  ή  $S$  κύμα που ξεκινάει από το σημείο  $x$ . Απλοποιητικά, θεωρούμε ότι ταξιδεύουν μόνο  $S$  κύματα από την πηγή. Ο χρόνος άφιξης ορίζεται ως το άθροισμα του χρόνου διάρρηξης  $t_r$  και του χρόνου που κάνουν τα κύματα  $S$  να ταξιδέψουν  $t_s$  και συγκεκριμένα:

$$t_a(x, x_s) = t_r(x) + t_s(x, x_s) \quad (2)$$

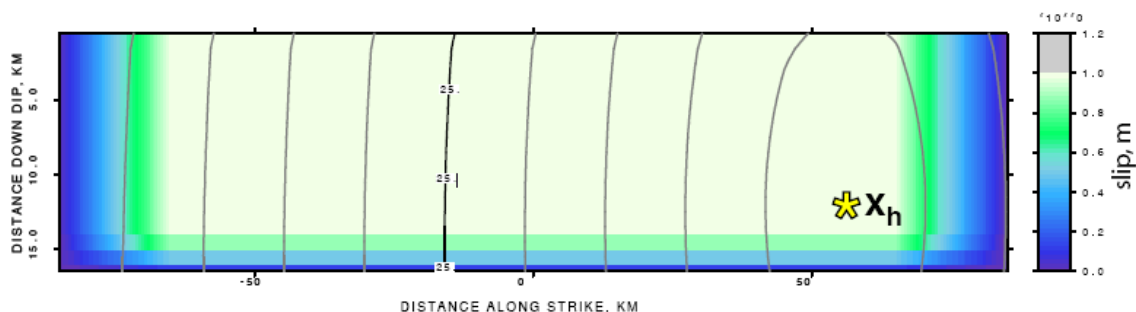
και θεωρούμε ότι η διάρρηξη κατευθύνεται διαμέσου ομοιόμορφου μέσου με ταχύτητα διάρρηξης  $v_r$ , ούτως ώστε:

$$t_r(x) = |x - x_h|/v_r \quad (3)$$

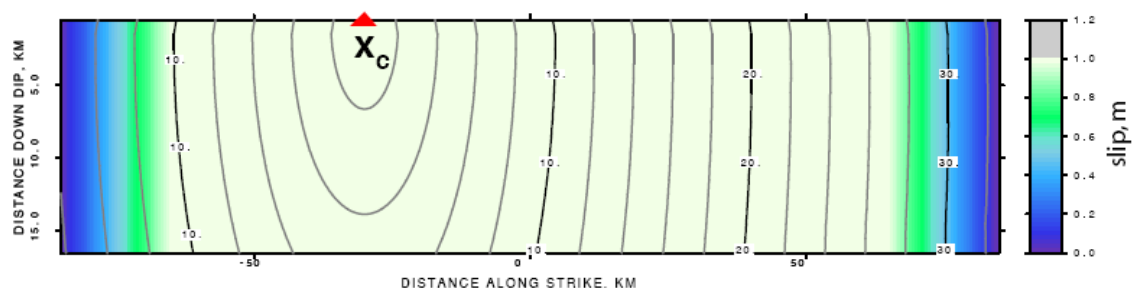
όπου  $x_h$  είναι η θέση του υποκέντρου. Υποθέτουμε ότι  $v_r < \beta$ , όπου  $\beta$  η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων στην περιοχή της πηγής.

Για καλύτερη κατανόηση της θεωρίας παρατίθεται στην παρούσα εργασία ένα αριθμητικό παράδειγμα που επιλύθηκε με τη χρήση του προγράμματος ISOSYN των Spudich and Xu (2003). Το ρήγμα είναι κατακόρυφο οριζόντιας ολίσθησης 170 χιλιομέτρων μήκους και 70 χιλιομέτρων πλάτους, με έναν σταθμό τοποθετημένο σε απόσταση ενός χιλιομέτρου από το ρήγμα και στα 30 χιλιόμετρα κατά την ολίσθηση.  $X_c$  είναι το σημείο του ρήματος που βρίσκεται σε κοντινότερη απόσταση από τον σταθμό. Στο σχήμα 5.1.α δίνονται οι περιβάλλουσες του χρόνου διάρρηξης  $t_r(x)$ , για μια ομοιογενώς επεκταμένη κυκλική διάρρηξη. Στο σχήμα 5.1.β απεικονίζεται η συνάρτηση διάδοσης  $t_s$  των κυμάτων  $S$  στο ρήγμα. Το σχήμα 5.1.γ δίνει τις περιβάλλουσες της συνάρτησης χρόνου άφιξης  $t_a(x, x_s)$  που είναι το άθροισμα του χρόνου διάρρηξης και του χρόνου που απαιτείται για να ταξιδέψουν και τα κύματα  $S$ . Η συνάρτηση του χρόνου άφιξης δίνει τον χρόνο που απαιτείται προκειμένου τα κύματα  $S$  να φτάσουν στη θέση του σταθμού. Για παράδειγμα, το κύμα  $S$  από το υπόκεντρο φτάνει σε 25.5sec από τη στιγμή της έναρξης. Τα κύματα  $S$  από την πάνω δεξιά γωνία του ρήματος φτάνουν στον σταθμό 44sec μετά την έναρξη και τα κύματα  $S$  από τη θέση  $X_c$  φτάνουν ύστερα από 32sec. Τα χρώματα στο σχήμα 5.1.γ δείχνουν την ισόχρονη ταχύτητα σε

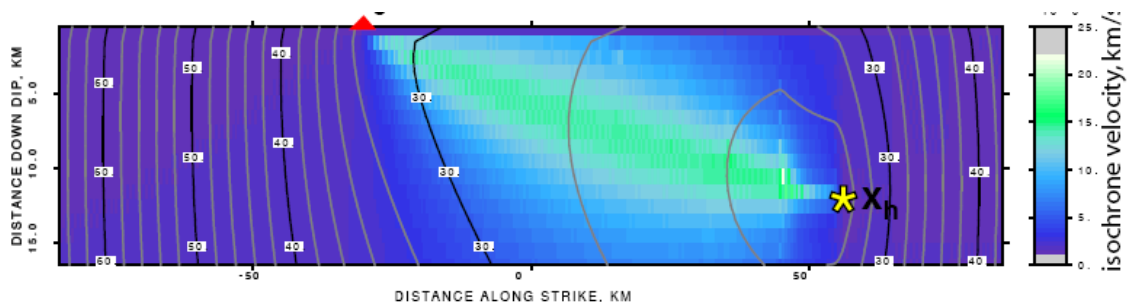
κάθε σημείο του ρήγματος. Η ισόχρονη ταχύτητα υπολογίζεται ως η διαφορά ανάμεσα σε δύο γειτονικές ισόχρονες καμπύλες διαιρούμενες με την διαφορά του χρόνου άφιξής τους. Οι εδαφικές κινήσεις είναι αναλογικές με την ισόχρονη ταχύτητα για τους παρακάτω λόγους. Θεωρήστε το κομμάτι του ρήγματος που βρίσκεται ανάμεσα από την καμπύλη των 26 και 32 sec. Όλα τα S κύματα σε αυτό το κομμάτι του ρήγματος, φτάνουν σε χρόνο ενός παραθύρου 6 δευτερολέπτων. Στη συνέχεια θεωρήστε ένα κομμάτι του ρήγματος μεταξύ των καμπυλών 32 και 38 sec. Όλα τα κύματα S επίσης φτάνουν σε χρόνο ενός παραθύρου 6 sec. Εμφανώς ένα αρκετά μεγαλύτερο κομμάτι του ρήγματος συνεισφέρει στη δημιουργία των S κυμάτων στο παράθυρο των 26-32 sec απ' ότι στο παράθυρο των 32-38sec. Η εδαφική κίνηση λοιπόν είναι μεγαλύτερη στο τμήμα 26-32sec. Το παραπάνω παράδειγμα αποτελεί την κινηματική ερμηνεία της κατευθυντικότητας.



Σχήμα 5.1.α: Περιβάλλουσες του χρόνου διάρρηξης (Spudich et al 2004)



Σχήμα 5.1.β: Περιβάλλουσες του χρόνου διάδοσης των S κυμάτων (Spudich et al 2004)



Σχήμα 5.1.γ: Περιβάλλουσες του χρόνου άφιξης (Spudich et al 2004)



## 5.2 Ο ισόχρονος συντελεστής κατευθυντικότητας IDP - ζ'

Σε ένα από τα σημαντικότερα άρθρα που έχουν παρουσιαστεί, ο Somerville et al (1997) (SSGA) απέδειξαν τις συσχετισμένες επιδράσεις της διάδοσης της διάρρηξης, της πηγής του σεισμικού γεγονότος, και συγκεκριμένων σεισμικών κινήσεων στους σεισμούς κοντινού πεδίου. Ο συνδυασμός των παραπάνω επιπτώσεων είναι γνωστός στην επιστημονική κοινότητα των μηχανικών με την ονομασία κατευθυντικότητα, παρά το γεγονός ότι στη σεισμολογική κοινότητα ο όρος αυτός συνδέεται μόνο με τις επιδράσεις της διάδοσης. Για την πρόβλεψη της επαύξεσης, της διάρκειας και της πόλωσης οι SSGA εισήγαγαν δύο συντελεστές πρόβλεψης,  $X\cos(\theta)$  για κατακόρυφα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και τον  $Y\cos(\phi)$  για τα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης.

Παρά τη σημασία και τη σημαντικότητα των δύο παραμέτρων, η χρήση τους οδήγησε σε αρκετά προβλήματα πρακτικής και θεωρητικής φύσης. Στο πρακτικό κομμάτι, το μοντέλο πρόβλεψης είναι μια ασυνεχής συνάρτηση του μεγέθους του σεισμού, των γωνιών του ρήματος και της απόστασης διάρρηξης. Επιπροσθέτως, δεν δίνει την δυνατότητα πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης γύρω από την περιοχή ενός ρήματος, γνωστή ως ουδέτερη ζώνη, ούτε σε ρήματα εκτός επιπέδου. Σε ότι αφορά το θεωρητικό υπόβαθρο, υπάρχει πολύ αδύναμη τεκμηρίωση των τελικών τύπων. Για μεγάλα ρήματα οριζόντιας ολίσθησης, ο συντελεστής  $X$  δηλώνει ότι η σεισμική κίνηση αυξάνεται προοδευτικά γύρω από την περιοχή του ρήματος, κάτι που έρχεται σε ευθεία σύγκρουση με τον χάρτη του σεισμού του San Francisco το 1906. Ο Abrahamson (2000) τροποποίησε το μοντέλο SSGA για να αποφύγει τα δημιουργούμενα προβλήματα σταθεροποιώντας το  $X\cos(\theta)$  στην τιμή 0.4 και εισάγοντας παράλληλα εξομαλύνσεις προκειμένου να απαλείψει τις ασυνέχειες που προκαλεί το μέγεθος του σεισμού στο προαναφερθέν μοντέλο. Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο Rowshandel (2006) έξυπνα γενίκευσε τους όρους  $X$  και  $\theta$  και διεύρυνε την εφαρμογή του μοντέλου SSGA εισάγοντας τον συντελεστή κατευθυντικότητας  $\xi$ . Βασικό όμως μειονέκτημα την προσπάθεια του αποτέλεσε το γεγονός ότι απαιτείται πλήρης ορισμός των συντεταγμένων και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ρήματος, για κάθε θέση εφαρμογής.

Η ισόχρονη θεωρία μας δίνει την δυνατότητα να εισάγουμε νέους συντελεστές πρόβλεψης της κατευθυντικότητας, στην υπολογιστική σεισμολογία. Η συγκεκριμένη θεωρία, όπως είδαμε και στην υποενότητα της εισαγωγής, απλοποιεί τα συνθετικά σειсмоγραφήματα σε αναλυτικές εκφράσεις από τις οποίες μπορούμε να δούμε ποιοι είναι οι παράγοντες και πως αυτοί συμβάλουν στο φαινόμενο της κατευθυντικότητας. Στο μοντέλο της ισόχρονης θεωρίας τρεις βασικοί παράγοντες είναι αυτοί που αναγνωρίζονται. Οι συντελεστές αυτοί, πίσω από τον όρο κατευθυντικότητα, δεν είναι

άλλοι από την κατανομή της ολίσθησης, του τρόπου πόλωσης και προσανατολισμού και της ισόχρονης ταχύτητας.

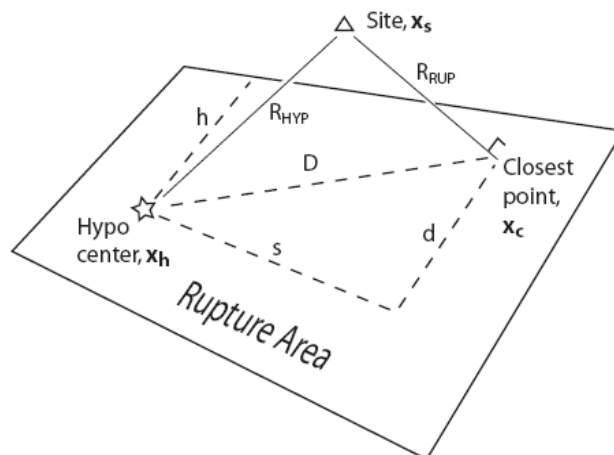
Ο συντελεστής κατευθυντικότητας που προκύπτει από τους παραπάνω τρεις παράγοντες δίνεται στην βιβλιογραφία ως IDP (Isochrone Directivity Predictor) και υπολογίζεται ως εξής:

$$IDP = CRS_r \quad (4)$$

$$C = \frac{\min(\tilde{c}', 2.45) - 0.8}{(2.45 - 0.8)} \quad (5)$$

$$S = \ln[\min(75, \max(s, h))] \quad (6)$$

Όλοι οι παραπάνω όροι αναφέρονται στη θέση  $x_s$ , όπως αυτή έχει οριστεί στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου και όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5.2. Επίσης ορίζονται οι αποστάσεις  $s$ ,  $x_h$ ,  $x_c$ , και  $h$  σε km.



**Σχήμα 5.2:** Η διάρρηξη και η γεωμετρία της θέσης (Spudich et al 2004)

Ο υπολογισμός της ταχύτητας  $\tilde{c}'$  (isochrone velocity ratio) δίνεται στη συνέχεια του κεφαλαίου. Η μεταβλητή  $C$  είναι μια κανονικοποιημένη μορφή της  $\tilde{c}'$ , έχοντας εύρος τιμών  $[0,1]$ . Το  $R_{ri}$  ορίζεται στη συνέχεια, λαμβάνοντας βέβαια τιμές από 0 μέχρι 1. Στις παραπάνω εξισώσεις (4), (5) και (6) το  $S$  έχει το ρόλο του  $X$ , και το  $C$  του  $\cos(\theta)$ . Ο συντελεστής  $R_{ri}$  εκφράζει την ουδέτερη ζώνη του ρήγματος και είναι σημαντικός στις περιπτώσεις ανάστροφων γεγονότων.

Ο λόγος ισόχρονης ταχύτητας  $\tilde{c}'$  είναι μια προσέγγιση της ισόχρονης ταχύτητας, όπως αυτή περιγράφεται από τους Spudich και Frazer (1984), η οποία εντοπίζει την σεισμική επαύξηση κατευθυντικότητας σε ένα ρήγμα. Έχει το βασικό πλεονέκτημα να μπορεί να καθορίζεται οπουδήποτε στην επιφάνεια της γης για ρήγματα κατακόρυφα και μη χρησιμοποιώντας αποστάσεις που προκύπτουν από αποτελέσματα απλών μετρήσεων.

Οι Spudich et al. (2004) όρισαν ότι ο λόγος  $\tilde{c}'$  είναι ανάλογος της απόστασης  $D$  όπως αυτή δίνεται στο σχήμα 5.2 ανάμεσα στο υπόκεντρο και στο κοντινότερο σημείο, διαιρούμενη από την διαφορά του χρόνου άφιξης των κυμάτων  $S$  στα δύο αυτά σημεία. Το φυσικό νόημα των παραπάνω είναι αρκετά απλό. Όλη η εκλυόμενη ενέργεια ανάμεσα στο υπόκεντρο και στο κοντινότερο σημείο φθάνει σε ένα χρονικό διάστημα, το οποίο αν είναι αρκετά μικρό δίνει αρκετά μεγαλύτερη ενέργεια, με αποτέλεσμα τη δημιουργία παλμού και την επαύξηση των φασματικών τιμών. Ο συντελεστής  $\tilde{c}'$  δίνεται στην λίστα των καταγραφών της βάσης δεδομένων του προγράμματος NGA και υπολογίζεται ως εξής:

$$\tilde{c}' := \left( \frac{\beta}{v_r} - \frac{(R_{HYP} - R_{RUP})}{D} \right)^{-1}, \quad D > 0, \tilde{c}' = v_r / \beta, D = 0 \quad (7)$$

Όπου η ταχύτητα διάρρηξης είναι η  $v_r$  και  $\beta$  είναι η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων στην περιοχή της πηγής. Θεωρούμε ότι μια καλή προσέγγιση του λόγου  $v_r / \beta$  αποτελεί η τιμή 0.8 (Spudich and Chiou, 2008), για τους περισσότερους σεισμούς. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής  $\tilde{c}'$  εξαρτάται μόνο από τη θέση του υποκέντρου, της περιοχής και του κοντινότερου στην περιοχή σημείου. Οι τιμές που μπορεί να λάβει ο συντελεστής είναι

$$\frac{v_r}{\beta} \leq \tilde{c}' \leq \left( \frac{\beta}{v_r} - 1 \right)^{-1}$$

Και μάλιστα για την τιμή 0.8 του λόγου  $v_r / \beta$ , ο  $\tilde{c}'$  έχει εύρος τιμών από 0.8 έως 4. Στις περιπτώσεις όπισθεν κατευθυντικότητας δίνεται ο συντελεστής όπισθεν κατευθυντικότητας, ο οποίος ορίζεται ως  $\tilde{c}' = \left( \frac{\beta}{v_r} + 1 \right)^{-1} = 0.44$  για λόγο  $v_r / \beta = 0.8$ . Από τα παραπάνω γίνεται εμφανές ότι ο συντελεστής  $\tilde{c}'$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης πρόβλεψης της κατευθυντικότητας, με τις μέγιστες τιμές να αποδεικνύουν την ύπαρξη παλμού.

Τέλος, ο συντελεστής  $R_{ri}$  δίνεται από την σχέση:

$$R_{ri} = \max \left( \sqrt{R_u^2 + R_t^2}, \varepsilon \right) \quad (8)$$

όπου  $R_t$  και  $R_u$  είναι οι συντελεστές ακτινοβολίας για κατακόρυφη και μη ολίσθηση αντίστοιχα, με μια στάθμη ύδατος  $\varepsilon = 0.2$  να γεμίζει τους κόμβους.



# Κεφάλαιο 6

## ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΚΥΜΑΤΙΔΙΑ – Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΒΑΚΕΡ

---

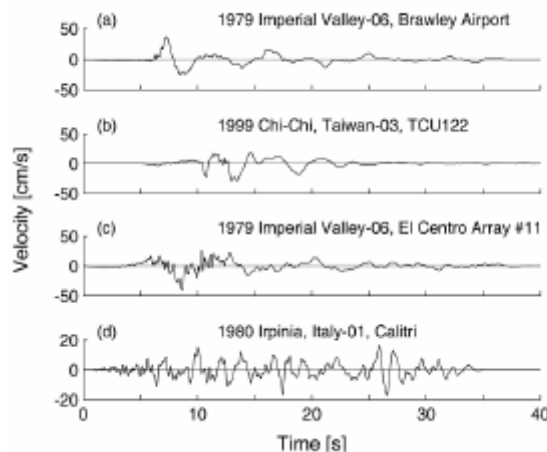
- 6.1 Εισαγωγή
- 6.2 Αιτίες δημιουργίας παλμού ταχύτητας
- 6.3 Επιλογή της διαδικασίας ταξινόμησης
- 6.4 Ανάλυση με κυματίδια
- 6.5 Ταξινόμηση των χρονοϊστοριών
- 6.6 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού



## 6.1 Εισαγωγή

Οι σεισμοί κοντινού πεδίου που περιέχουν ισχυρό παλμό στη χρονοϊστορία ταχύτητας αποτελούν αντικείμενο μεγάλου ενδιαφέροντος στη σεισμολογία και στην αντισεισμική τεχνολογία. Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται η μέθοδος ποσοτικής ταξινόμησης των σεισμών κοντινού πεδίου και ο διαχωρισμός των χρονοϊστοριών σε παλμικές ή μη, όπως αυτή προτάθηκε από τον Baker (2007).

Οι επιλεγμένες χρονοϊστορίες των προηγούμενων ετών χαρακτηρίζονται ως παλμικές εξαιτίας της ύπαρξης ενός μεγάλου ορατού παλμού στη χρονοϊστορία ταχύτητας όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1.α. ή επειδή η γεωμετρία της περιοχής του ρήγματος καθόριζε την πιθανότητα να εμφανιστεί παλμός κατευθυντικότητας. Ο χαρακτηρισμός των καταγραφών ως παλμικών ή μη με τους προαναφερθέντες τρόπους προϋποθέτει την κρίση του ερευνητή και μπορεί να οδηγήσει σε αμφιλεγόμενα συμπεράσματα, όπως υποδεικνύεται στο σχήμα 6.1.β και 6.1.γ. .



**Σχήμα 6.1:** Παραδείγματα κάθετων στο ρήγμα συνιστωσών σε σεισμούς κοντινού πεδίου (Baker 2007)

Η διαδικασία που προτάθηκε από τον Baker είναι βασισμένη στην ανάλυση με κυματίδια και στοχεύει στην αναγνώριση και στη συνέχεια στην αφαίρεση του παλμού από την χρονοϊστορία ταχύτητας. Στην περίπτωση που ο αφαιρούμενος παλμός είναι μεγάλος συγκριτικά με τις εναπομείνουσες τιμές ταχύτητας, η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως παλμική. Ο προσδιορισμός της περιόδου του παλμού είναι επίσης ένα αντικείμενο που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο.

## 6.2 Αιτίες δημιουργίας παλμού ταχύτητας

Σύμφωνα με τον Baker (2007) μια σεισμική κίνηση θεωρείται παλμική όταν περιέχει στη χρονοϊστορία της έναν, δύο ή και τρεις παλμούς που φτάνουν νωρίς στην χρονοϊστορία ταχύτητας και έχουν μεγάλο πλάτος. Η κύρια αιτία δημιουργίας τέτοιων παλμών είναι το φαινόμενο της κατευθυντικότητας στην περιοχή κοντινού πεδίου. Έμπροσθεν κατευθυντικότητα λέγεται το φαινόμενο κατά το οποίο η διάρρηξη κατευθύνεται προς τη θέση καταγραφής με μια ταχύτητα ίση με την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων και η διεύθυνση ολίσθησης του ρήγματος είναι επίσης προς τη θέση καταγραφής. Η έμπροσθεν κατευθυντικότητα συναντάται στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της εδαφικής κίνησης. Η επιρροή της μετακίνησης που είναι γνωστή ως fling step αγνοείται.

Επιπλέον λόγοι δημιουργίας παλμών στη χρονοϊστορία ταχύτητας αφορούν στη γεωμετρία του ρήγματος και στη διεπιφάνεια με την εδαφική κρούστα. Εάν μια περιοχή είναι τοποθετημένη κοντά σε ασπερίτη, τότε μπορεί να δημιουργηθεί παλμός κατά τη δημιουργία των κυμάτων από εκείνη τη θέση.

## 6.3 Επιλογή της διαδικασίας ταξινόμησης

Όταν χρησιμοποιείται μια μέθοδος ταξινόμησης είναι απαραίτητο να οριστούν ορισμένα κριτήρια επιλογής. Συγκεκριμένα, η μέθοδος πρέπει να είναι ικανή να διαχωρίζει μια παλμική από μια μη παλμική καταγραφή και να μην απαιτεί κριτική σκέψη προκειμένου να μην υπάρχουν περιθώρια λάθους και αμφισβήτησης.

Οι παραπάνω στόχοι επιτυγχάνονται με τη χρήση ενός σχετικά απλού μοντέλου. Πολλοί ερευνητές έχουν αναπτύξει αρκετά περίπλοκα μοντέλα (Fu and Menum 2004, Manroeidis and Parageorgiou 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 αρκετές διαφορετικές μορφές εδαφικών συνθηκών, αλλά καταλήξαμε στην κατηγοριοποίησή τους σε πέντε ομάδες.

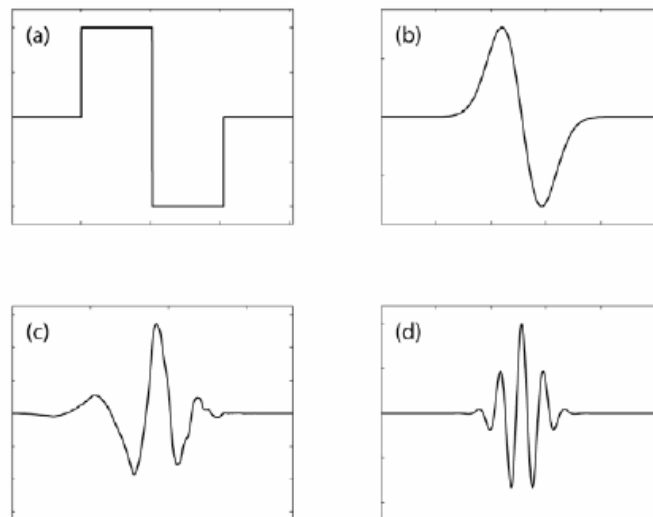
Τα παραπάνω μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι μια ανάλυση με τη χρήση κυματιδίων είναι κατάλληλη για την ταξινόμηση των εδαφικών κινήσεων. Είναι συμφέρουσα υπολογιστικά, ποσοτική και αξιόπιστη. Οι παλμοί ταχύτητας μπορούν πολύ εύκολα να εντοπιστούν και να αφαιρεθούν.



## 6.4 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. Υπάρχει ευρεία βιβλιογραφία που αφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο καθώς και αλγοριθμικές λεπτομέρειες. Μια βασική κατανόηση της μεθόδου μπορεί να επιτευχθεί μέσω της σύγκρισής της με την ανάλυση Fourier. Η ανάλυση Fourier αντιπροσωπεύει ένα σήμα χρησιμοποιώντας γραμμικό συνδυασμό από ημιτονικά κύματα, που το καθένα αντιπροσωπεύει ένα σήμα άπειρου μήκους και μιας μοναδικής συχνότητας. Αντίθετα, η ανάλυση με κυματίδια αποσυνθέτει ένα σήμα σε μικρότερα κυματίδια, ορισμένα στο χρόνο σε στενό εύρος συχνοτήτων. Για τα μη στάσιμα κύματα, όπως οι σεισμικές εδαφικές κινήσει, είναι προτιμότερο το σήμα να παρουσιάζεται ως άθροισμα κυματιδίων παρά ως άθροισμα στάσιμων ημιτονικών κυμάτων.

Τα κυματίδια είναι βασικές συναρτήσεις που ικανοποιούν ορισμένα μαθηματικά κριτήρια. Υπάρχουν αρκετά πρότυπα κυματίδια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποσύνθεση ενός σήματος. Το πρότυπο κυματίδιο ονομάζεται *μητρικό κυματίδιο (mother wavelet)* και επεξεργάζεται στο χρόνο προκειμένου να αποτελεί μια ομάδα βασικών συναρτήσεων. Ένας μεγάλος αριθμός θεωρητικών προσεγγίσεων μας οδηγεί στην επιλογή του μητρικού κυματιδίου, συμπεριλαμβάνοντας την ύπαρξη συμμετρίας, συμβατότητας, παραγώγων κτλ. Τα κυματίδια που χρησιμοποιούνται ευρέως δίνονται στο σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2: Πρότυπα μητρικά κυματίδια(Baker 2007)

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

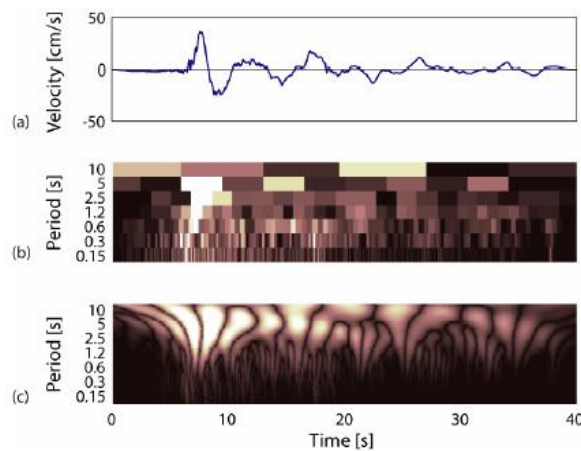
$$\Phi_{s,l}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Phi\left(\frac{t-l}{s}\right) \quad (1)$$

όπου  $\Phi(\ )$  είναι η μητρική συνάρτηση κυματιδίου,  $s$  είναι η παράμετρος κλιμακοποίησης που διαστέλλει το κυματίδιο, και  $l$  είναι η παράμετρος που μεταφράζει το κυματίδιο στο χρόνο. Οποιοδήποτε σήμα  $f(t)$  μπορεί να παρουσιαστεί ως γραμμικός συνδυασμός από βασικές συναρτήσεις και οι συντελεστές για την γραμμική ανάλυση μπορούν να υπολογιστούν από το ακόλουθα ολοκλήρωμα συνέλιξης, το οποίο είναι πανομοιότυπο αναφορικά με την ανάλυση Fourier.

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

Για να αναλύσουμε ψηφιακά σήματα όπως οι χρονοϊστορίες ταχύτητας, χρησιμοποιείται η εξίσωση (2) περισσότερο ως άθροισμα παρά ως ολοκλήρωμα.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες μετασχηματισμού κυματιδίων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ενός σήματος ανάλογα με τα επίπεδα και τις θέσεις στις οποίες υπολογίζονται οι συντελεστές. Ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου (continuous wavelet transform) υπολογίζει τους συντελεστές κυματιδίου που σχετίζονται με κάθε τιμή ολοκληρώματος από κάθε επίπεδο και παραμέτρους θέσης. Η παραπάνω διαδικασία παρέχει λεπτομερή πληροφορία για το συχνοτικό περιεχόμενο του σήματος. Ένα ψηφιακό όμως σήμα μήκους  $n$ , μπορεί να περιγραφεί πλήρως χρησιμοποιώντας έναν μειωμένο αριθμό συντελεστών. Στην περίπτωση ορθογωνικών κυματιδίων, μόνο  $n$  κυματίδια απαιτούνται για την πλήρη περιγραφή του σήματος. Ο διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίου (discrete wavelet transform), παρέχει τους  $n$  συντελεστές που περιγράφουν τα πλάτη των  $n$  κυματιδίων σε διάφορες θέσεις και επίπεδα. Ένα παράδειγμα των δυο μετασχηματισμών δίνεται στο σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3: Μετασχηματισμοί κυματιδίων (Baker 2007)

Στην περίπτωση που ένα μητρικό κυματίδιο αντιπροσωπεύει επαρκώς το επιθυμητό σχήμα, τότε λιγότεροι από  $n$  συντελεστές απαιτούνται για την περιγραφή του σήματος. Κάποιοι από τους συντελεστές θα είναι μεγάλοι και τα κυματίδιά τους θα αντιπροσωπεύουν το κυρίως μέρος του σήματος, ενώ άλλοι θα είναι κοντά στο μηδέν και θα αντιστοιχούν σε πολύ μικρό μέρος. Η παραπάνω παρατήρηση είναι σημαντική για τον εξής λόγο: εάν ένα σημαντικό μέρος της χρονοϊστορίας της εδαφικής κίνησης περιγράφεται από ένα ή δύο 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, καθώς υπολογίζονται περισσότεροι από τους απαιτούμενους συντελεστές, παραταύτα μπορεί να προσδιορίσει την περίοδο και τη θέση του παλμού της καταγραφής κοντινού πεδίου. Αντίθετα με τον διακριτό μετασχηματισμό, ο συνεχής δεν επηρεάζεται στην περίπτωση περισσότερων μηδενικών στην αρχή ή στο τέλος της χρονοϊστορίας, κάτι που είναι σημαντικό στην περίπτωση που δημιουργήθηκε πρόβλημα με το μηχάνημα καταγραφής.

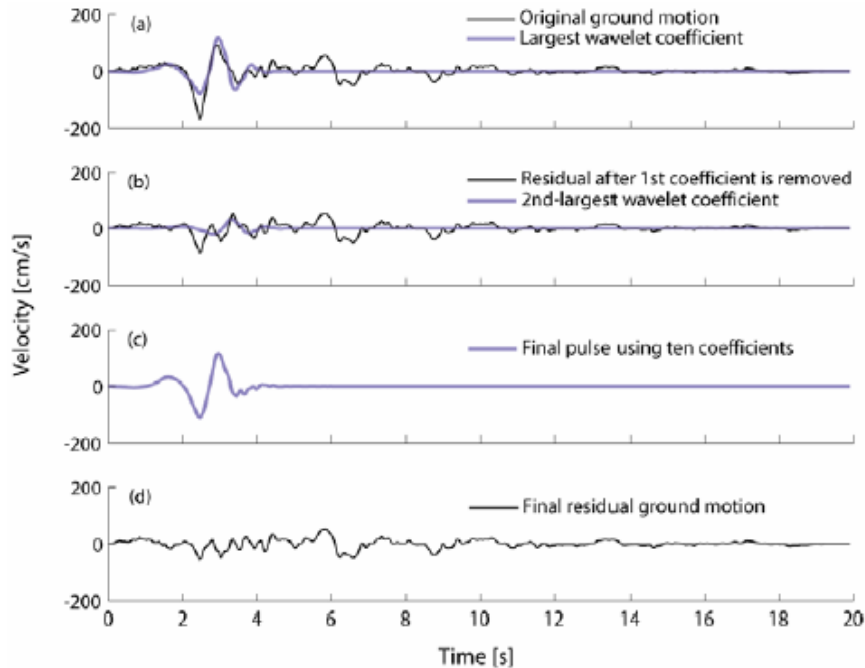
## 6.5 Ταξινόμηση των χρονοϊστοριών

Η διαδικασία που περιγράφεται στην παρούσα ενότητα χρησιμοποιεί την ανάλυση με κυματίδια προκειμένου να αναγνωρίσει τις σεισμικές εδαφικές κινήσεις που περιέχουν παλμό στη χρονοϊστορία 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 χρονοϊστορίας και να έχουν μεγάλη τιμή μέγιστης ταχύτητας.

### Αφαίρεση του παλμού ταχύτητας

Για κάθε μελετώμενη εδαφική κίνηση, αφαιρείται ο μεγαλύτερος παλμός χρησιμοποιώντας την αποσύνθεση του κύματος με την ανάλυση των κυματιδίων, όπως αυτή περιγράφηκε παραπάνω. Το κυματίδιο  $c$  από το σχήμα 6.2 χρησιμοποιείται ως μητρικό καθώς το σχήμα του αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά αυτού του είδους τους παλμούς. Για να αξιολογηθεί μια σεισμική εδαφική κίνηση, αρχικά υπολογίζεται ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου από τη χρονοϊστορία ταχύτητας και αναγνωρίζεται η συνιστώσα με τις μεγαλύτερες τιμές. Τα κυματίδια που συνδέονται με

αυτούς τους συντελεστές αναγνωρίζουν την περίοδο και τη θέση του παλμού όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 6.4



**Σχήμα 6.4:** Περιγραφή της διαδικασίας αφαίρεσης παλμού (Baker 2007)

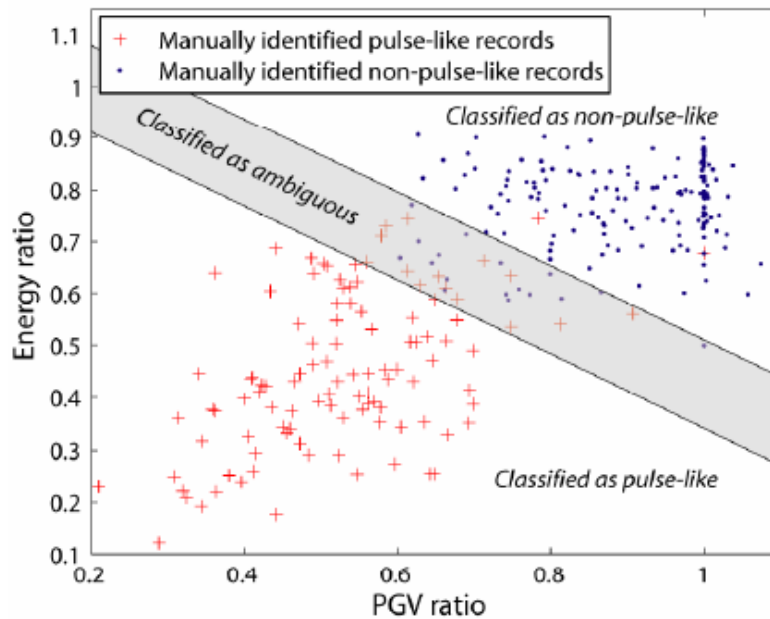
Το κυματίδιο αφαιρείται από την εδαφική κίνηση και υπολογίζεται ο συνεχής μετασχηματισμός για την εναπομείνασα εδαφική κίνηση. Σε αυτό το στάδιο επιλέγονται κυματίδια που έχουν την ίδια θέση και περίοδο με αυτό που εντοπίστηκε από τη μεγαλύτερη συνιστώσα. Δέκα κυματίδια είναι ικανοποιητικές για την περιγραφή του παλμού.

Χρησιμοποιώντας αυτή τη διαδικασία ένας παλμός μπορεί να αφαιρεθεί από οποιαδήποτε εδαφική κίνηση είτε υπάρχει, είτε όχι παλμός κατευθυντικότητας. Πρέπει να οριστεί ένα κριτήριο λοιπόν για το αν ο παλμός θα θεωρείται σημαντικός ή όχι.

### Προσδιορισμός της σημαντικότητας του αφαιρούμενου παλμού

Η αρχική και η εναπομείνασα εδαφική κίνηση χρησιμοποιούνται για να προβλέψουμε εάν η κίνηση χαρακτηρίζεται ως παλμική ή μη. Για την πραγματοποίηση αυτής της ταξινόμησης χρησιμοποιούνται αρκετοί δείκτες που καθορίζουν τη σημαντικότητα του παλμού. Αρχικά επιλέγονται οι συνιστώσες των καταγραφών από τη βάση δεδομένων NGA που είναι κάθετες στο ρήγμα, από σεισμούς μεγέθους μεγαλύτερου από 5.5 και

καταγεγραμμένες μέσα σε μια ακτίνα 30km από το γεγονός. Μια ποικιλία συντελεστών συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους των συντελεστών από την αποσύνθεση των κυματιδίων, των φασματικών τιμών και ενεργειακών δεδομένων, θεωρείται απαραίτητη. Δύο δείκτες εύκολοι στον υπολογισμό και στη χρήση χρησιμοποιούνται εν τέλει για τον προσδιορισμό της σημαντικότητας του παλμού: η μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV) και ο λόγος της ενέργειας της εναπομείνουσας χρονοϊστορίας ως προς την αρχική. Οι δείκτες αυτοί θα αναφέρονται ως λόγος PGV και λόγος ενέργειας. Τα παραπάνω περιγράφονται στο σχήμα 6.5.



Σχήμα 6.5: Περιγραφή της διαδικασίας αφαίρεσης παλμού (Baker 2007)

Ο Baker (2007) προχώρησε στη συνέχεια στη δημιουργία ενός δείκτη που προβλέπει την ύπαρξη ή όχι παλμού σε μια σεισμική εδαφική κίνηση.

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

Οι τιμές του P.I. κυμαίνονται από μηδέν έως ένα με τις μεγάλες τιμές να υποδεικνύουν την ύπαρξη παλμού. Καταγραφές με τιμές πάνω από 0.85 και κάτω από 0.15 χαρακτηρίζονται αντίστοιχα ως παλμικές και μη.

### Αποκλεισμός των παλμών που φτάνουν στο τέλος της χρονοϊστορίας

Η έως τώρα διαδικασία εντοπίζει και αφαιρεί τους παλμούς από τη χρονοϊστορία ταχύτητας, οι παλμοί όμως αυτοί μπορεί να δημιουργούνται από διάφορα αίτια. Στόχος του Baker ήταν να αφαιρέσει μόνο τους παλμούς που οφείλονται στο

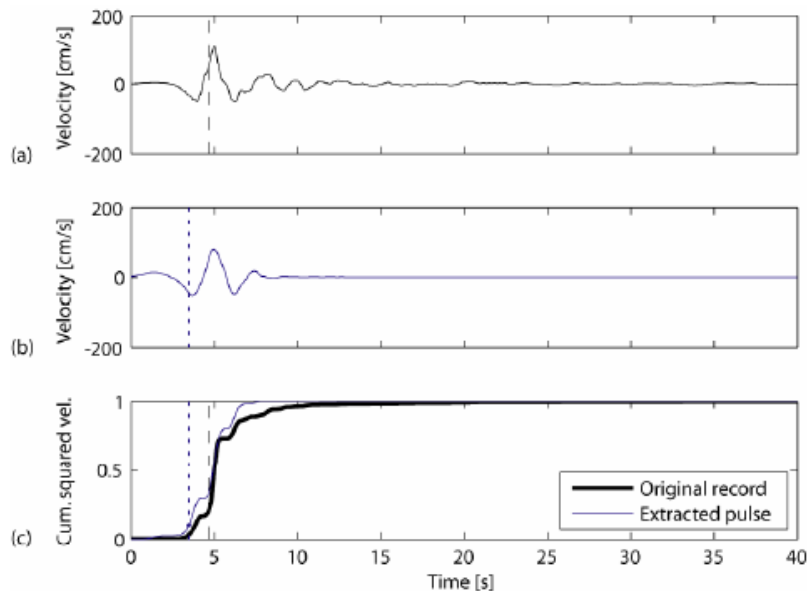
φαινόμενο της κατευθυντικότητας στους σεισμούς κοντινού πεδίου. Οι παλμοί αυτοί είναι αυτοί που φτάνουν νωρίς στη χρονοϊστορία της ταχύτητας και για αυτό το λόγο εισήγαγε ένα κριτήριο αποκλεισμού των παλμών που φτάνουν αργά.

Οι παλμοί που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μπορούν να εντοπιστούν υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας της αρχικής καταγραφής και του αφαιρεθέντος παλμού. Συγκεκριμένα σε μια χρονική στιγμή  $t$  το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας υπολογίζεται ως εξής:

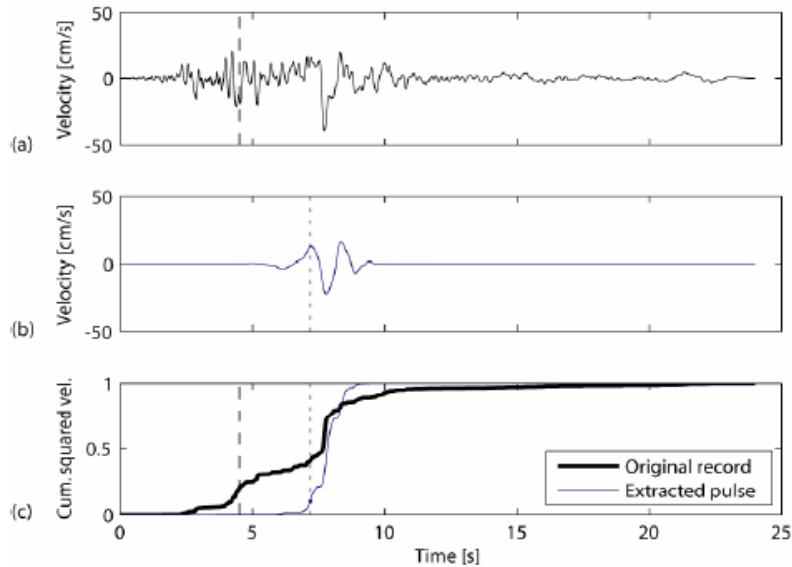
$$CSV(t) = \int_0^t V^2(u) du \quad (4)$$

όπου  $V(u)$  είναι η ταχύτητα της εδαφικής κίνησης τη στιγμή  $u$ . Υπολογίζοντας το παραπάνω ολοκλήρωμα προσδιορίζουμε για την αρχική χρονοϊστορία και για τον παλμό το ποσοστό  $x\%$  του συνολικού CSV. Οι χρόνοι αυτοί στους οποίους επιτυγχάνονται τα ποσοστά  $x$  συμβολίζονται ως  $t_{x\%,orig}$  και  $t_{x\%pulse}$  για το αρχικό σήμα και τον παλμό αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τον Baker οι παλμοί που φτάνουν νωρίς στη χρονοϊστορία της ταχύτητας έχουν τιμές  $t_{20\%orig}$  μεγαλύτερες από το χρόνο  $t_{10\%pulse}$ . Το παραπάνω κριτήριο διασφαλίζει ότι ένα σημαντικό ποσοστό του παλμού έχει εκδηλωθεί πριν ακόμα αναπτυχθεί σημαντικό μέρος της ενέργειας της αρχικής χρονοϊστορίας. Παραδείγματα παλμών που έρχονται στην αρχή και στο τέλος της καταγραφής δίνονται στο παρακάτω σχήματα.



**Σχήμα 6.6:** Παλμός στην αρχή της χρονοϊστορίας. α,β) χρονοϊστορία ταχύτητας και παλμού, γ) CSV (Baker 2007)

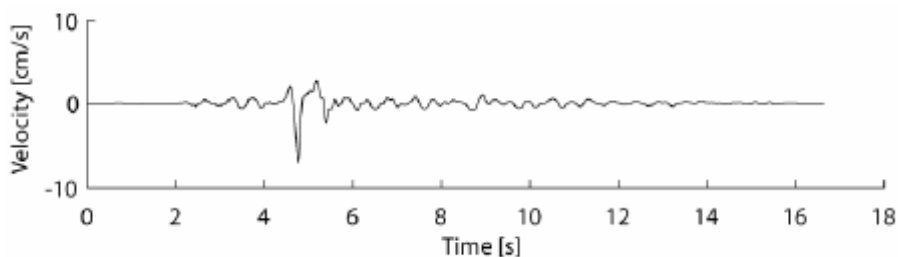


**Σχήμα 6.7:** Παλμός στο τέλος της χρονοϊστορίας. α,β) χρονοϊστορία ταχύτητας και παλμού, γ) CSV (Baker 2007)

Το κατά πόσον ο παλμός που φτάνει αργότερα στη χρονοϊστορία ταχύτητας πρέπει να αποκλειστεί είναι αντικείμενο αμφισβήτησης και βαθύτερης εξέτασης.

### Αποκλεισμός των εδαφικών κινήσεων με μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV) <math>< 30\text{cm/s}</math>

Η τελευταία κατάσταση που τίθεται υπό μελέτη από τον Baker είναι οι σεισμοί μικρής έντασης που εμφανίζουν παλμό στη χρονοϊστορία ταχυτήτων τους. Αυτό παρατηρείται για παράδειγμα σε σεισμικές κινήσεις μικρής διάρκειας και μικρού μεγέθους που έχουν ανακλάσεις κατά τη διάρκεια διάδοσης των κυμάτων. Για παράδειγμα η σεισμική κίνηση στο σχήμα 6.8 είναι μεγέθους 5.1 και μπορούμε να καταλάβουμε ότι ο παλμός δημιουργείται κυρίως από τη μικρής διάρκειας κίνηση παρά από το φαινόμενο της κατευθυντικότητας.



**Σχήμα 6.8:** Εδαφική κίνηση με μικρή PGV που εμφανίζεται ως παλμική και αποκλείεται (Baker 2007)

Για τον αποκλεισμό των παραπάνω καταγραφών αγνοούμε τις σεισμικές εδαφικές κινήσεις με PGV μικρότερη των 30cm/s. Το κριτήριο αυτό αποκλείει αυτόματα και τις καταγραφές μακρινού πεδίου.

Τα τρία κριτήρια που περιγράφηκαν στην παρούσα ενότητα οδήγησαν τον Baker στον χαρακτηρισμό 90 καταγραφών από τη βάση δεδομένων της NGA ως παλμικές. Οι καταγραφές αυτές δίνονται στον πίνακα 6.1. στο τέλος του κεφαλαίου. Τα κριτήρια για την τελική ταξινόμηση συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία:

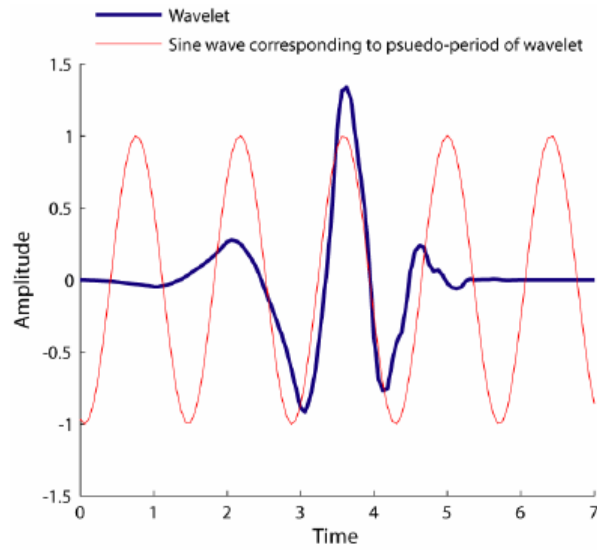
1. Ο δείκτης παλμού P.I πρέπει να λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 0.85
2. Για τον παλμό που φτάνει νωρίς στην χρονοϊστορία της ταχύτητας ισχύει ότι οι τιμές του χρόνου  $t_{20\%orig}$  είναι μεγαλύτερες από το χρόνο  $t_{10\%pulse}$ .
3. Η αρχική εδαφική κίνηση έχει  $PGV > 30\text{cm/s}$

## 6.6 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού

Η περίοδος του παλμού της ταχύτητας είναι μια κρίσιμη και σημαντική παράμετρος για την κοινότητα των μηχανικών. Αρκετές προσπάθειες έχουν γίνει κατά τη διάρκεια των προηγούμενων ετών για τον προσδιορισμό της περιόδου του παλμού. Ο Baker μελετώντας την δεσπόζουσα συχνότητα του χρησιμοποιούμενου κυματιδίου για τον εντοπισμό του παλμού προβαίνει στον υπολογισμό της περιόδου του παλμού.

Δεν υπάρχει κάποιος αυστηρά καθορισμένος τρόπος για τον προσδιορισμό της περιόδου από το κυματίδιο όπως γίνεται με την ανάλυση Fourier στα ημιτονικά σήματα, αλλά η περίοδος που σχετίζεται με την μέγιστη τιμή του πλάτους Fourier ενός κυματιδίου δύναται να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό μιας ψευδοπεριόδου. Για την καλύτερη κατανόηση δίνεται ένα παράδειγμα στο σχήμα 6.9. όπου απεικονίζεται ένα ημιτονικό σήμα με περίοδο ίση με την περίοδο του μέγιστου πλάτους Fourier. Η ψευδοπερίοδος της μεγαλύτερης συνιστώσας του κυματιδίου χρησιμοποιείται ως η περίοδος παλμού της εδαφικής κίνησης. Οι περίοδοι των παλμών ταχύτητας για τις καταγραφές που χαρακτηρίστηκαν ως παλμικές από τον Baker δίνονται στον πίνακα 6.1 στο τέλος του κεφαλαίου.





**Σχήμα 6.9:** Κυματίδιο *Daubechies* και ημιτονικό κύμα με περίοδο ίση με τη μέγιστη της κυματομορφής από το φάσμα *Fourier* (Baker 2007)

Record Sequence Number	EQID	Earthquake Name	Station Name	Earthquake Magnitude	Tp (sec)
77	0030	San Fernando	Pacoima Dam (upper left abut)	6.61	1.6
150	0048	Coyote Lake	Gilroy Array #6	5.74	1.2
158	0050	Imperial Valley-06	Aeropuerto Mexicali	6.53	2.4
159	0050	Imperial Valley-06	Agrarias	6.53	2.3
161	0050	Imperial Valley-06	Brawley Airport	6.53	4.0
170	0050	Imperial Valley-06	EC County Center FF	6.53	4.5
171	0050	Imperial Valley-06	EC Meloland Overpass FF	6.53	3.3
173	0050	Imperial Valley-06	El Centro Array #10	6.53	4.5
174	0050	Imperial Valley-06	El Centro Array #11	6.53	7.4
178	0050	Imperial Valley-06	El Centro Array #3	6.53	5.2
179	0050	Imperial Valley-06	El Centro Array #4	6.53	4.6
180	0050	Imperial Valley-06	El Centro Array #5	6.53	4.0
181	0050	Imperial Valley-06	El Centro Array #6	6.53	3.8
182	0050	Imperial Valley-06	El Centro Array #7	6.53	4.2
183	0050	Imperial Valley-06	El Centro Array #8	6.53	5.4
184	0050	Imperial Valley-06	El Centro Differential Array	6.53	5.9
185	0050	Imperial Valley-06	Holtville Post Office	6.53	4.8
250	0061	Mammoth Lakes-06	Long Valley Dam (Upr L Abut)	5.94	1.1
292	0068	Irpinia, Italy-01	Sturmo	6.90	3.1

316	0073	Westmorland	Parachute Test Site	5.90	3.6
407	0080	Coalinga-05	Oil City	5.77	0.7
415	0080	Coalinga-05	Transmitter Hill	5.77	0.9
418	0082	Coalinga-07	Coalinga-14th & Elm (Old CHP)	5.21	0.4
451	0090	Morgan Hill	Coyote Lake Dam (SW Abut)	6.19	1.0
459	0090	Morgan Hill	Gilroy Array #6	6.19	1.2
503	0100	Taiwan SMART1(40)	SMART1 C00	6.32	1.6
508	0100	Taiwan SMART1(40)	SMART1 M07	6.32	1.6
529	0101	N. Palm Springs	North Palm Springs	6.06	1.4
568	0108	San Salvador	Geotech Investig Center	5.80	0.9
615	0113	Whittier Narrows-01	Downey - Co Maint Bldg	5.99	0.8
645	0113	Whittier Narrows-01	LB - Orange Ave	5.99	1.0
723	0116	Superstition Hills-02	Parachute Test Site	6.54	2.3
738	0118	Loma Prieta	Alameda Naval Air Stn Hanger	6.93	2.0
766	0118	Loma Prieta	Gilroy Array #2	6.93	1.7
783	0118	Loma Prieta	Oakland - Outer Harbor Wharf	6.93	1.8
802	0118	Loma Prieta	Saratoga - Aloha Ave	6.93	4.5
821	0121	Erzican, Turkey	Erzincan	6.69	2.7
828	0123	Cape Mendocino	Petrolia	7.01	3.0
838	0125	Landers	Barstow	7.28	8.9
879	0125	Landers	Lucerne	7.28	5.1
900	0125	Landers	Yermo Fire Station	7.28	7.5
982	0127	Northridge-01	Jensen Filter Plant	6.69	3.5
983	0127	Northridge-01	Jensen Filter Plant Generator	6.69	3.5
1009	0127	Northridge-01	LA - Wadsworth VA Hospital North	6.69	2.4
1013	0127	Northridge-01	LA Dam	6.69	1.7
1045	0127	Northridge-01	Newhall - W Pico Canyon Rd.	6.69	2.4
1050	0127	Northridge-01	Pacoima Dam (downstr)	6.69	0.5
1051	0127	Northridge-01	Pacoima Dam (upper left)	6.69	0.9
1063	0127	Northridge-01	Rinaldi Receiving Sta	6.69	1.2
1084	0127	Northridge-01	Sylmar - Converter Sta	6.69	3.5
1086	0127	Northridge-01	Sylmar - Olive View Med FF	6.69	3.1
1119	0129	Kobe, Japan	Takarazuka	6.90	1.4
1120	0129	Kobe, Japan	Takatori	6.90	1.6
1161	0136	Kocaeli, Turkey	Gebze	7.51	5.9
1182	0137	Chi-Chi, Taiwan	CHY006	7.62	2.6
1202	0137	Chi-Chi, Taiwan	CHY035	7.62	1.4
1244	0137	Chi-Chi, Taiwan	CHY101	7.62	4.8
1410	0137	Chi-Chi, Taiwan	TAP003	7.62	3.4
1476	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU029	7.62	6.4
1477	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU031	7.62	6.2
1479	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU034	7.62	8.6
1480	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU036	7.62	5.4
1481	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU038	7.62	7.0

1483	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU040	7.62	6.3
1484	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU042	7.62	9.1
1486	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU046	7.62	8.6
1489	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU049	7.62	11.8
1493	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU053	7.62	12.9
1494	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU054	7.62	10.5
1496	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU056	7.62	12.9
1499	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU060	7.62	12.0
1503	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU065	7.62	5.7
1505	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU068	7.62	12.2
1510	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU075	7.62	5.1
1511	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU076	7.62	4.0
1515	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU082	7.62	9.2
1519	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU087	7.62	9.0
1526	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU098	7.62	7.5
1528	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU101	7.62	10.0
1529	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU102	7.62	9.7
1530	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU103	7.62	8.3
1531	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU104	7.62	12.0
1548	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU128	7.62	9.0
1550	0137	Chi-Chi, Taiwan	TCU136	7.62	10.3
1752	0155	Northwest China-03	Jiashi	6.10	1.3
1853	0160	Yountville	Napa Fire Station #3	5.00	3.2
2457	0172	Chi-Chi, Taiwan-03	CHY024	6.20	1.4
2495	0172	Chi-Chi, Taiwan-03	CHY080	6.20	0.9
2627	0172	Chi-Chi, Taiwan-03	TCU076	6.20	2.8
3317	0175	Chi-Chi, Taiwan-06	CHY101	6.30	0.7

**Πίνακας 6.1:** Παλμικές καταγραφές της βάσης δεδομένων NGA (Baker 2007)



# Κεφάλαιο 7

## ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ ΣΤΗ ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΝΕΛΙΞΗΣ

---

- 7.1 Εισαγωγή
- 7.2 Προσδιορισμός της περιόδου των σημαντικών παλμών
- 7.3 Καθορισμός των παραμέτρων των κυματιδίων
- 7.4 Μεθοδολογία προσδιορισμού του παλμού στη χρονοϊστορία ταχύτητας

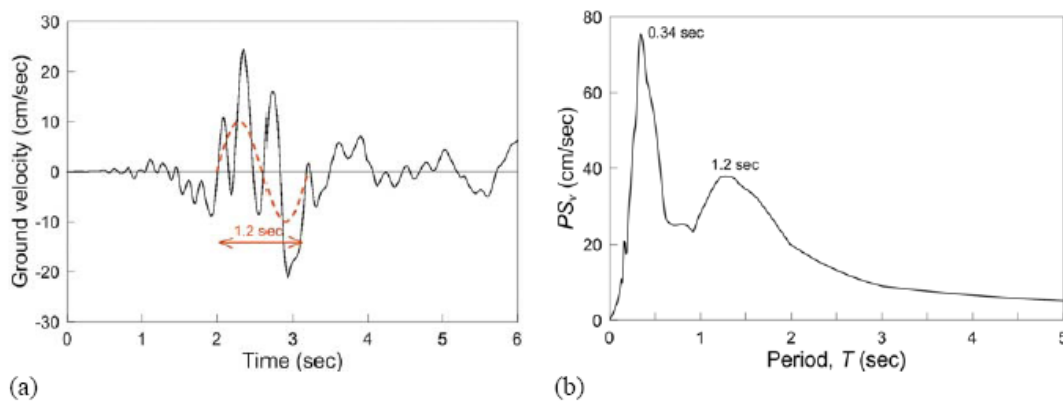


## 7.1 Εισαγωγή

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, η οποία χρησιμοποιήθηκε και για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, 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.

## 7.2 Προσδιορισμός της περιόδου των σημαντικών παλμών

Ο πιο συνήθης τρόπος προσδιορισμού της περιόδου  $T_p$  του παλμού κατευθυντικότητας ήταν από τη μέγιστη τιμή του φάσματος ψευδοταχύτητας (PSV) για απόσβεση 5%. Παραταύτα, η ακρίβεια αυτής της μεθόδου αμφισβητείται από αρκετούς ερευνητές (Rodriguez-Marek 2000, Baker 2007). Ένα παράδειγμα στο οποίο αποδεικνύεται η ανεπάρκεια της συγκεκριμένης μεθόδου δίνεται στο σχήμα 7.1 για την καταγραφή G06-320 (Gilroy Array #6) του Coyote Lake (1979), μεγέθους 5.7. Στο σχήμα 7.1.α. παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας. Είναι εμφανές ότι χαρακτηρίζεται από έναν παλμό με περίοδο 1.2 sec. Η ίδια τιμή υπολογίστηκε και από τον Baker (2007) στο προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Από την άλλη πλευρά η περίοδος που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του φάσματος ψευδοταχύτητας για απόσβεση 5% είναι ίση με 0.34sec (σχήμα 7.1.β.) ενώ η κορυφή που αντιστοιχεί σε περίοδο 1.2 sec είναι σαφώς μικρότερου πλάτους.



**Σχήμα 7.1:** Καταγραφή G06-320 (Coyote Lake) 1979 α)χρονοϊστορία ταχύτητας, β)PSV 5% (Mimoglou et al 2012)

Είναι γνωστό ότι οι φασματικές τιμές Fourier της εδαφικής ταχύτητας μπορούν να είναι ίσες με το αντίστοιχο φάσμα ταχυτήτων, εάν το τελευταίο συμβαίνει στο τέλος της εδαφικής κίνησης (Hudson 1979). Εκ των πραγμάτων, το φάσμα ταχύτητας για μηδενική απόσβεση θεωρείται ως περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης.

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

Όπου  $\tilde{\alpha}_g(\omega)$  είναι τα πλάτη του φάσματος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης  $\alpha_g(t)$  και  $S_{v,0}(\omega)$  είναι το φάσμα ταχύτητας για μηδενική απόσβεση.

Αντίστοιχα μπορεί να αποδειχτεί ότι το φάσμα μετακίνησης για μηδενική απόσβεση είναι μια περιβάλλουσα του φάσματος ταχύτητας Fourier. Όντως, για  $\xi=0$  μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το φάσμα ταχύτητας ταυτίζεται με το φάσμα ψευδοταχύτητας με εξαίρεση τις τιμές που αντιστοιχούν στις μεγάλες περιόδους. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι  $S_{v,0}(\omega) = \omega S_{d,0}(\omega)$ , όπου  $S_{d,0}(\omega)$  είναι το φάσμα μετακίνησης για μηδενική απόσβεση. Διαιρώντας λοιπόν και τα δύο μέλη της σχέσης (1) με το  $\omega$  και λαμβάνοντας υπόψη ότι  $\frac{\tilde{\alpha}_g(\omega)}{\omega} = \tilde{v}_g(\omega)$ , όπου  $\tilde{v}_g(\omega)$  το φάσμα Fourier της εδαφικής ταχύτητας, έχουμε:

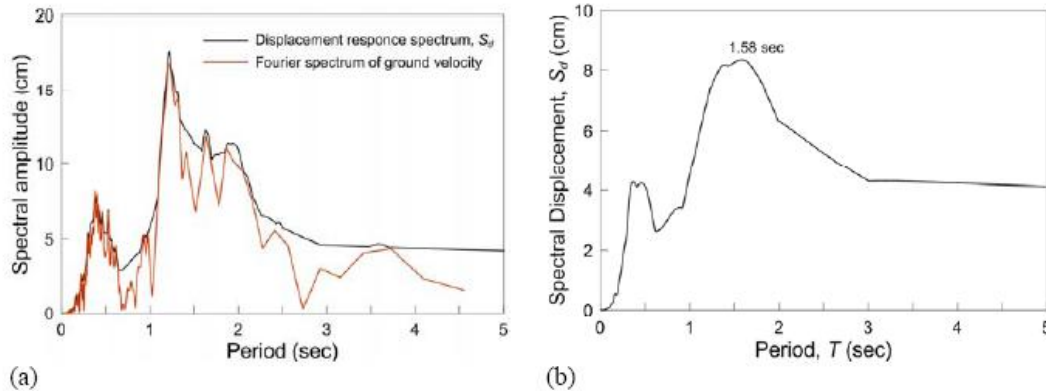
$$\tilde{v}_g(\omega) \leq S_{d,0}(\omega) \quad (2)$$

κάτι που δείχνει ότι το φάσμα μετακινήσεων είναι περιβάλλουσα καμπύλη του φάσματος Fourier για την εδαφική ταχύτητα. Ένα παράδειγμα δίνεται στο σχήμα 7.2.α για την ίδια καταγραφή του Coyote Lake.

Βασιζόμενοι στην παραπάνω παρατήρηση και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο παλμός κατευθυντικότητας είναι δεσπόμενος στη χρονοϊστορία ταχύτητας, θα ήταν λογικό να προσδιορίσουμε την περίοδο  $T_p$  από το φάσμα μετακίνησης. Προκύπτει ότι  $T_p=1.58\text{sec}$



από το σχήμα 7.2.β., η οποία είναι κοντά στην τιμή 1.2sec όπως αυτή εξήχθη από τη χρονοϊστορία ταχύτητας.



**Σχήμα 7.2:** 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, 2012)

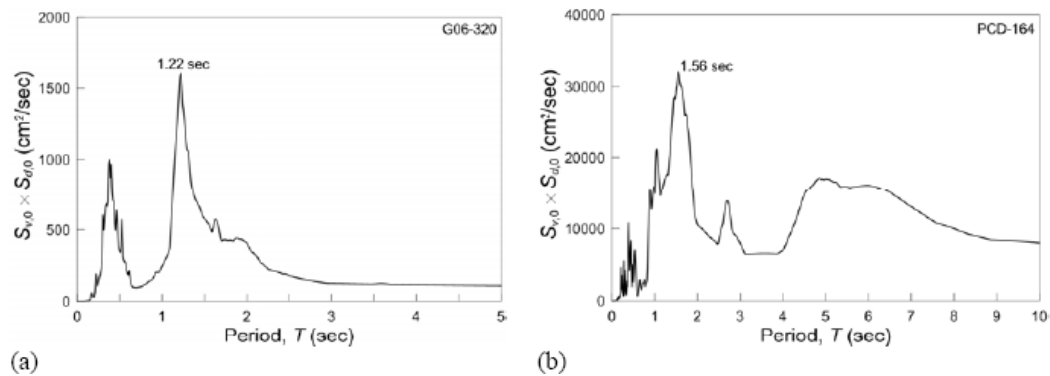
Αυτός ο εναλλακτικός ορισμός της περιόδου του παλμού  $T_p$  δεν μπορεί να γενικευτεί, καθώς υπάρχουν παραδείγματα στα οποία δεν έχει ισχύ.

Οι σημαντικοί παλμοί που οφείλονται στο φαινόμενο της κατευθυντικότητας συσχετίζονται και με το φάσμα ταχύτητας αλλά και με το φάσμα μετακίνησης. Ειδικότερα, από τη στιγμή που η συνιστώσα κοντινού πεδίου που περιέχει τον παλμό επηρεάζει και την εδαφική ταχύτητα και επιτάχυνση, σε διαφορετικό βέβαια βαθμό, η εξέχουσα περίοδος  $T_i$  θα ξεχωρίζει στο ολοκλήρωμα συνέλιξης των δύο αυτών χρονοϊστοριών. Ως συνέπεια η κορυφή της συνέλιξης της επιτάχυνσης και της ταχύτητας θα αντιστοιχεί στον παλμό κατευθυντικότητας.

Είναι γνωστό ότι το φάσμα Fourier του ολοκληρώματος συνέλιξης ισούται με το φάσμα Fourier της συνέλιξης των σημάτων. Από την άλλη πλευρά, όπως προαναφέρθηκε, το φάσμα ταχύτητας για μηδενική απόσβεση αποτελεί την περιβάλλουσα του φάσματος εδαφικής επιτάχυνσης Fourier και το φάσμα μετακίνησης για μηδενική απόσβεση είναι αντίστοιχα η περιβάλλουσα του φάσματος Fourier ταχύτητας. Χρησιμοποιώντας αυτές τις ιδιότητες, το φάσμα Fourier του ολοκληρώματος συνέλιξης μπορεί να υπολογιστεί ως γινόμενο των  $S_{v,0}(\omega) \times S_{a,0}(\omega)$  το οποίο θα αναφέρεται πλέον ως *φάσμα συνέλιξης*. (convolution spectrum). Αντίστοιχα η περίοδος του παλμού κατευθυντικότητας, μπορεί πλέον να υπολογιστεί από τις κορυφές του φάσματος συνέλιξης.

Ένα παράδειγμα δίνεται στο σχήμα 7.3. στο οποίο δίνονται τα φάσματα συνέλιξης δύο καταγραφών. Οι καταγραφές είναι οι G06-320 Coyote Lake και PCD-164 San Fernando για τις οποίες υπολογίζονται από τη χρονοϊστορία ταχύτητας περίοδοι παλμού 1.2 και

1.6 sec αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι ο υπολογισμός της περιόδου του παλμού από το φάσμα συνέλιξης μας οδηγεί σε σωστά και αξιόπιστα αποτελέσματα.



**Σχήμα 7.3:** Φάσματα συνέλιξης και προσδιορισμός της περιόδου  $T_i$  για τις καταγραφές G06-320 (Coyote Lake), β) PCD-164 San Fernando (Mimoglou et al, 2012)

Η χρήση του φάσματος συνέλιξης επιτρέπει τον εντοπισμό πρόσθετων παλμών πέραν του βασικού παλμού κατευθυντικότητας, στις μεσαίες και μεγάλες περιόδους. Το γεγονός ότι ίσως απαιτούνται περισσότεροι του ενός παλμού για τον προσδιορισμό της εδαφικής κίνησης είχε σημειωθεί και από τους Manroeidis and Parageorgiou (2003). Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητος ο συνδυασμός περισσότερων κυματιδίων προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική αναπαράσταση της αρχικής καταγραφής.

Οι επιπλέον παλμοί εμφανίζονται ως δευτερεύουσες κορυφές στο φάσμα συνέλιξης και μπορούν να αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες ή μικρότερες περιόδους από τον πρώτο παλμό. Για αυτόν τον λόγο προτείνεται να ακολουθείται η παραπάνω διαδικασία στην εναπομένουσα χρονοϊστορία μετά την αφαίρεση του πρώτου παλμού για τον προσδιορισμό και των δευτερευόντων παλμών. Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφτεί μέχρι τον εντοπισμό όλων των σημαντικών παλμών της σεισμικής κίνησης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είναι όλοι οι παλμοί που εντοπίζονται σημαντικοί. Είναι απαραίτητο λοιπόν να θεσπιστούν κάποια κριτήρια για να αποφασίσουμε εάν κάποιος παλμός θα είναι αποδεκτός ως σημαντικός ή θα απορριφθεί.

Το πρώτο κριτήριο αφορά τον χρόνο άφιξης του παλμού στη χρονοϊστορία ταχύτητας και είναι το ίδιο με αυτό που προτείνεται από τον Baker (2007) και αναλύεται λεπτομερώς στο κεφάλαιο 6 της παρούσας εργασίας. Για τους δευτερεύοντες παλμούς το κριτήριο έχει τροποποιηθεί ως εξής: Όλοι οι επόμενοι παλμοί οι οποίοι ξεκινούν πριν το τέλος του προηγούμενου παλμού θεωρούνται σημαντικοί στην περίπτωση που

$t_{10\%,pulse,i} < t_{20\%,orig}$ . Για αυτόν τον λόγο, παλμοί που τροποποιούν το υπερισχόν κυματίδιο πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη.

Για τους παλμούς που ικανοποιούν το παραπάνω κριτήριο εισάγεται ένα δεύτερο κριτήριο προκειμένου να κρατήσουμε μόνο τους σημαντικούς. Βασίζεται στην επίδραση κάθε πρόσθετου παλμού στο φάσμα ταχύτητας. Το συσσωρευτικό φάσμα ταχύτητας  $CS_v$  χρησιμοποιείται το οποίο ορίζεται παρακάτω.

$$CS_v = \int_0^{T_{max}} PS_{v,\xi}(T) dT \quad (3)$$

Όπου,  $PS_{v,\xi}(T)$  είναι το φάσμα της ψευδοταχύτητας για την επιθυμητή τιμή απόσβεσης  $\xi$  στην περίοδο  $T$  και  $T_{max}$  είναι η μέγιστη περίοδος του φάσματος. Μια καλή τιμή για το  $T_{max}$  είναι τα 20sec.

Αρχικά υπολογίζεται το  $CS_{v,sim,i}$  για την προσομοιωμένη εδαφική κίνηση που έχει δημιουργηθεί από τη σύνθεση όλων των  $i$  παλμών και στη συνέχεια υπολογίζεται το  $CS_{v,sim,(i-1)}$  αποκλείοντας τον παλμό  $i$ . Ο παλμός  $i$  θεωρείται σημαντικός στην περίπτωση που συνεισφέρει στο  $CS_{v,sim}$  περισσότερο από 5%:

$$\frac{CS_{v,dim,i} - CS_{v,sim,(i-1)}}{CS_{v,sim,(i-1)}} \geq 5\% \quad (4)$$

Στην περίπτωση που ο παλμός δεν τηρεί το παραπάνω κριτήριο, απορρίπτεται,

Ένα ακόμα κριτήριο εισάγεται προκειμένου να καθοριστεί εάν η διαδικασία θα σταματήσει, το οποίο βασίζεται στην επίτευξη του της προσέγγισης του στοχευμένου φάσματος ταχύτητας. Η διαδικασία σταματάει όταν ένα μεγάλο ποσοστό, γύρω στο 90% του  $CS_v$  της αρχικής καταγραφής έχει προσεγγιστεί από τους μέχρι τώρα παλμούς.

$$\frac{CS_{v,dim,i}}{CS_{v,orig}} \geq 90\% \quad (5)$$

### 7.3 Καθορισμός των παραμέτρων των κυματιδίων

Η μεθοδολογία που περιγράφεται στην παρούσα ενότητα αντιπροσωπεύει κάθε σημαντικό παλμό που εντοπίζεται με την προηγούμενη διαδικασία με ένα κυματίδιο και η εδαφική κίνηση προσομοιώνεται με αυτά τα κυματίδια. Χρησιμοποιείται το κυματίδιο που προτείνεται από τους Mavroudis and Papageorgiou (2003) και θα αναφέρεται ως κυματίδιο M&P.

Το κυματίδιο M&P παράγεται από αρμονικής ταλάντωσης σήμα και μια κατάλληλα σχεδιασμένη περιβάλλουσα. Τέσσερις παράμετροι χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του παλμού

1. Η περίοδος  $T_p$  της αρμονικής ταλάντωσης του κυματιδίου.
2. Το πλάτος  $A$  της περιβάλλουσας, το οποίο σχετίζεται με το πλάτος της χρονοϊστορίας ταχύτητας.
3. Η διάρκεια  $\gamma$  του κυματιδίου, η οποία μετράει τον αριθμό των ταλαντώσεων και ορίζεται ως  $\gamma = t_{tot}/T_p$ , με  $\gamma > 1$ , και  $t_{tot}$  τη διάρκεια του κυματιδίου.
4. Η διαφορά φάσης  $\nu$ .

Χρησιμοποιώντας αυτές τις παραμέτρους, η επιτάχυνση  $a_p(t)$  και η ταχύτητα  $v_p(t)$  του κυματιδίου μπορούν να υπολογιστούν από τις παρακάτω εξισώσεις (Mavroudis and Parageorgiou (2003) ).

$$a_p(t) = \begin{cases} -\frac{A\pi}{\gamma T_p} \left[ \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{\gamma T_p}(t-t_0)\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_p}(t-t_0)+\nu\right)}{\gamma \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_p}(t-t_0)+\nu\right)} \cdot \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\gamma T_p}(t-t_0)\right)\right] \right], & t_0 - \frac{\gamma}{2}T_p \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2}T_p \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$v_p(t) = \begin{cases} \frac{A}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\gamma T_p}(t-t_0)\right) \right] \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_p}(t-t_0)+\nu\right), & t_0 - \frac{\gamma}{2}T_p \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2}T_p \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

όπου  $t_0$  είναι ο χρόνος που καθορίζει την εποχή του μέγιστου της περιβάλλουσας.

Προκειμένου να ανατεθεί ένα κυματίδιο M&P σε κάθε σημαντικό παλμό  $i$ , η  $T_p$  τίθεται ίση με την  $T_i$ . Ο προσδιορισμός των υπολοίπων παραμέτρων του κυματιδίου  $A$ ,  $\gamma$  και  $\nu$ , επιτυγχάνεται με τη χρήση της νέας παραμέτρου CAD (Cumulative Absolute Displacement) που ισούται με το ολοκλήρωμα της απόλυτης εδαφικής ταχύτητας και εισήχθη από τους Taflampas et al. (2009) σε αναλογία με το CAV. Δεδομένου ότι η εδαφική ταχύτητα συσχετίζεται με τη σεισμική ενέργεια στη θέση της καταγραφής, η σημαντική διάρκεια της σεισμικής κίνησης λογικά συσχετίζεται με την απότομη κλίση του χρονικού ολοκληρώματος της απόλυτης ταχύτητας. Για αυτόν τον λόγο εισήχθη το CAD το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$CAD = \int_0^{t_{tot}} |v_g| dt \quad (8)$$

Ας θεωρήσουμε μια αρμονική εδαφική κίνηση με πλάτος  $d_{g,max}$ , η οποία εφαρμόζεται ως ταλάντωση στη βάση ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή. Στο συντονισμό, το πλάτος της απόκρισης της ταλάντωσης είναι σχεδόν γραμμικό με τον αριθμό των κύκλων και για μια διέγερση  $\gamma$  κύκλων η μέγιστη απόκριση είναι (Clough and Penzien 1975):

$$S_{d,0}(T_{res}) = \pi \gamma d_{g,max} \quad (9)$$

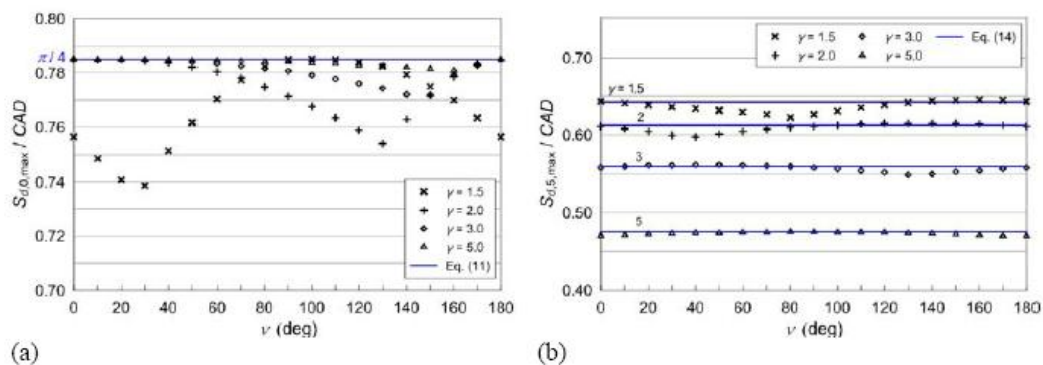
Από την άλλη πλευρά η τιμή του CAD στο τέλος του  $\gamma$  κύκλου της αρμονικής διέγερσης είναι:

$$CAD = 4\gamma d_{g,max} \quad (10)$$

Ως εκ τούτου, για μια αρμονική διέγερση  $\gamma$  κύκλων υπάρχει μια σταθερή σχέση μεταξύ της φασματικής μετακίνησης για μηδενική απόσβεση στο συντονισμό και του CAD, το οποίο μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\frac{S_{d,0}(T_{res})}{CAD} = \frac{\pi}{4} \quad (11)$$

Ακόμα και στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ένα κυματίδιο ένα κυματίδιο M&P αντί για μια καθαρά αρμονική διέγερση, η εξίσωση (11) συνεχίζει να κρατά κατά προσέγγιση την τιμή της, με ικανοποιητική ακρίβεια. Αυτό απεικονίζεται εμφανώς στο σχήμα 7.4 στο οποίο ο λόγος της φασματικής τιμής μετακίνησης στο συντονισμό για μηδενική απόσβεση ως προς το CAD έχει σχεδιαστεί για διαφορά φάσης  $\nu$  και  $\gamma=1.5, 2.0, 3.0$  και  $5.0$ . Τα αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα της περιόδου  $T_r$  και του πλάτους  $A$ . Είναι προφανές ότι ο λόγος είναι κοντά στην τιμή  $\pi/4$ , ειδικά για τους παλμούς μεγάλης διάρκειας. Στη συνέχεια της παρούσας εργασίας θα διερευνηθεί κατά πόσο ο λόγος αυτός μπορεί να αποτελέσει δείκτη ύπαρξης παλμού σε μια χρονοϊστορία.



**Σχήμα 7.4:** Σχέση μεταξύ της μέγιστης φασματικής μετακίνησης  $S_{dmax}$  και CAD για κυματίδιο M&P και διάφορες τιμές  $\gamma$  και  $\nu$ . α) μηδενική απόσβεση, β) απόσβεση 5%. (Mimoglou et al 2012)

Δεδομένου ότι  $PS_v=(2\pi/T)S_d$  ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις για μηδενική και διάφορη του μηδενός απόσβεση, όπως αυτές έχουν αποδειχτεί από τους Π. Μίμογλου, Ι. Ψυχάρη και Ι.Ταφλαμπά (2012):

$$\frac{PS_{v,0,max}}{CAD} = \frac{\pi^2}{2T\rho} , \xi=0 \quad (12)$$

$$\frac{PS_{v,\xi,max}}{CAD} = \frac{\pi(1-e^{-2\pi\gamma\xi})[1+(\gamma-1)\xi]}{4\gamma\xi T\rho} , \xi \neq 0 \quad (13)$$

Για το κυματίδιο M&P η τιμή του CAD σχετίζεται άμεσα με το πλάτος A και το περιεχόμενο διάρκειας  $\gamma$ , καθώς ισχύει η σχέση:

$$CAD=\gamma A T\rho/\pi \quad (14)$$

Αντικαθιστώντας το CAD στις εξισώσεις (12) και (13) μπορούμε να υπολογίσουμε το πλάτος A.

$$A_i = \frac{2PS_{v,0}(Ti')}{\pi\gamma_i} , \xi=0 \quad (15)$$

$$A_i = \frac{4\xi PS_{v,\xi}(Ti')}{(1-e^{-2\pi\gamma_i\xi})[1+(\gamma_i-1)\xi]} , \xi \neq 0 \quad (16)$$

Όπου το  $i$  υποδεικνύει το κυματίδιο που αντιστοιχεί στην περίοδο  $T_i$  και  $PS_{v,0}(Ti')$  και  $PS_{v,\xi}(Ti')$  είναι οι κορυφές των φασμάτων ταχύτητας. Εάν το φάσμα ψευδοταχύτητας δεν έχει κορυφή στην περίοδο  $T_i$ , τότε όπου  $T_i'$  θέτουμε  $T_i$ . Αξίζει να τονιστεί ότι ο όρος εδαφική κίνηση ισχύει μόνο για τον πρώτο παλμό, ενώ στη συνέχεια εννοούμε την εναπομένουσα καταγραφή μετά την αφαίρεση του παλμού.

Για τον υπολογισμό του πλάτους A του κυματιδίου η τιμή του  $\gamma$  πρέπει να είναι γνωστή.

#### 7.4 Μεθοδολογία προσδιορισμού του παλμού στη χρονοϊστορία ταχύτητας

Βασιζόμενοι στο θεωρητικό υπόβαθρο που περιγράφεται στις προηγούμενες ενότητες, δημιουργήθηκε μια ευθεία μεθοδολογία για τον προσδιορισμό των σημαντικών παλμών και των παραμέτρων του αντίστοιχου κυματιδίου M&P που περιγράφει

καλύτερα την εδαφική κίνηση. Η μεθοδολογία μπορεί πολύ εύκολα να προγραμματιστεί με έναν απλό κώδικα και αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

1. Για την καταγραφή που θέλουμε να μελετήσουμε παράγουμε το φάσμα συνέλιξης πολλαπλασιάζοντας τα φάσματα ταχύτητας και μετακίνησης για μηδενική απόσβεση.
2. Προσδιορίζουμε την περίοδο που αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη κορυφή του φάσματος συνέλιξης και θέτουμε αυτήν την τιμή ίση με  $T_1$ .
3. Υπολογίζουμε το φάσμα ψευδο-ταχύτητας για την επιθυμητή τιμή απόσβεσης  $\xi$  (συνήθως  $\xi=5\%$ ), και προσδιορίζουμε την περίοδο  $T_1'$  που είναι κοντά στην  $T_1$  και αντιστοιχεί σε ένα τοπικό ακρότατο του φάσματος, με τιμή  $PS_{v,j,max}(T_1')$ . Στην περίπτωση που δεν υπάρχει μέγιστο κοντά στο  $T_1$  θέτουμε  $T_1'=T_1$ . Η ταχύτητα και όχι η μετακίνηση προτείνεται να χρησιμοποιείται σε βήματα, καθώς είναι ξεκάθαρες οι κορυφές, ειδικά στις μικρές περιόδους.
4. Θέτουμε μια μέγιστη τιμή  $\gamma_{max}$  για την διάρκεια του κυματιδίου M&P. Καθώς η διάρκεια του κυματιδίου είναι γνωστή εκ των προτέρων, απαιτούνται όλες οι πιθανές τιμές μεταξύ των τιμών 1 και  $\gamma_{max}$  για το  $\gamma$ , προκειμένου να προσδιοριστεί το κατάλληλο κυματίδιο που ταιριάζει καλύτερα στην εδαφική κίνηση. Για παλμούς κατευθυντικότητας σε σεισμούς κοντινού πεδίου θέτουμε  $\gamma_{max} = 5$ . Σε κάποιες περιπτώσεις απαιτείται και  $\gamma_{max} = 10$ . Προτείνεται ένα βήμα  $\Delta\gamma=0.1$  για τον προσδιορισμό της τιμής του  $\gamma$ .  
Για κάθε τιμή  $\gamma$  υπολογίζεται και η αντίστοιχη τιμή  $A$  χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (15) ή (16).
5. Για κάθε ζεύγος  $(A_j, \gamma_j)$  που προσδιορίστηκε στο βήμα 4 και για τιμές διαφοράς φάσης  $\nu$  από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$ , παράγουμε το κυματίδιο M&P από τις εξισώσεις (6) και (7) θέτοντας  $T_p=T_1'$  και αφήνοντας το  $t_0$  ως παράμετρο. Προτείνεται βήμα  $\Delta\nu=5^\circ$ . Απορρίπτουμε όλα τα κυματίδια που η μέγιστη επιτάχυνση, ταχύτητα ή μετακίνηση είναι μεγαλύτερη από την PGA, PGV ή PGD αντίστοιχα.
6. Για κάθε αποδεκτό κυματίδιο που υπολογίστηκε στο βήμα 5 και για τιμές  $t_0$  από  $t_0=\gamma_j T_1'/2$  έως  $t_0=t_{max}-\gamma_j T_1'/2$  με το  $t_{max}$  να αντιστοιχεί στο τέλος της εδαφικής κίνησης, υπολογίζουμε τη συσχέτιση μεταξύ της χρονοϊστορίας ταχύτητας του κυματιδίου από την εξίσωση (7) και της χρονοϊστορίας ταχύτητας της καταγραφής. Διαλέγουμε το κυματίδιο με τη μεγαλύτερη συσχέτιση και καθορίζουμε τις παραμέτρους  $A_1, \gamma_1, \nu_1$  και  $t_{0,1}$ . Υπολογίζουμε το χρόνο έναρξης  $t_{p,1}=t_{0,1}-\gamma_1 T_1'/2$ . Σε αυτό το σημείο οφείλουμε να σημειώσουμε ότι εάν τιμή της συσχέτισης είναι αρκετά μικρή, πρέπει να προβληματιστούμε για το κατά πόσον η καταγραφή μας μπορεί να θεωρηθεί παλμική.
7. Υπολογίζουμε το  $CSV_{orig}(t)$  για την αρχική καταγραφή χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3) και προσδιορίζουμε τον χρόνο  $t_{20\%,orig}$  ως τον χρόνο που η αρχική

- κίνηση φτάνει το 20% του συνολικού CSV. Στη συνέχεια υπολογίζουμε το  $CS_{v,orig}$ , χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4) για την επιθυμητή τιμή της  $T_{max}$ .
8. Ελέγχουμε εάν το κυματίδιο του βήματος 6 αντιστοιχεί σε παλμό που φτάνει αργά στη χρονοϊστορία ταχύτητας και αν συμβαίνει αυτό απορρίπτεται. Υπολογίζουμε τη συνάρτηση  $CSV_{pulse1}(t)$  για τον παλμό και ορίζουμε το  $t_{10\%,pulse1}$  ως το χρόνο στον οποίο ο παλμός φτάνει το 10% του συνολικού CSV. Εάν  $t_{10\%,pulse1} > t_{20\%,orig}$  απορρίπτουμε τον παλμό και προχωράμε στο βήμα 10. Εάν όχι συνεχίζουμε στο βήμα 9.
  9. Υπολογίζουμε το  $CS_{v,sim}$  για το επιλεγμένο κυματίδιο και τον λόγο  $CS_{v,sim}/CS_{v,orig}$ . Εάν ο λόγος είναι μεγαλύτερος του 90% δεν απαιτούνται επιπλέον παλμοί και η διαδικασία σταματά. Εάν όχι, προχωράμε στο βήμα 10.

Τα παρακάτω βήματα επαναλαμβάνονται για όλους τους επιπλέον παλμούς μέχρι το κριτήριο στο βήμα 14 να ικανοποιείται.

10. Υπολογίζουμε την εναπομένουσα εδαφική κίνηση αφαιρώντας τον παλμό και αυτή πλέον ενέχει τη θέση της εδαφικής κίνησης στα επόμενα βήματα.
11. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 1 έως 6 και προσδιορίζουμε τον νέο παλμό  $i$ .
12. Ελέγχουμε εάν το νέο κυματίδιο  $i$  αντιστοιχεί σε παλμό που φτάνει αργά στη χρονοϊστορία ταχύτητας και αναλόγως απορρίπτεται ή γίνεται αποδεκτός.
  - i. Ελέγχουμε εάν ο παλμός ξεκινάει πριν το τέλος του πρώτου παλμού, δηλαδή εάν  $t_{p,i} = t_{0,i} - \gamma_i T_i' / 2$  είναι μικρότερο από  $t_{0,1} + \gamma_1 T_1' / 2$ . Εάν ο παλμός ξεκινάει πριν το τέλος του προηγούμενου εξετάζουμε αυτόνομα εάν ικανοποιεί και το κριτήριο του Baker (2007). Σε αυτήν την περίπτωση πηγαίνουμε στο βήμα 13, αλλιώς συνεχίζουμε με το βήμα 12.
  - ii. Υπολογίζουμε το  $CSV_{pulse,i}(t)$  για το  $i$ -οστό κυματίδιο και ελέγχουμε με το κριτήριο  $t_{10\%,pulse1} > t_{20\%,orig}$  του βήματος 8 εάν ο παλμός φτάνει αργά ή όχι. Εάν ναι ξεκινάμε πάλι με το βήμα 10, αλλιώς συνεχίζουμε.
13. Κρατάμε τον παλμό  $i$  μαζί με όλους τους υπόλοιπους παλμούς και προσδιορίζουμε τη σειρά των κυματιδίων για την προσομοίωση της εδαφικής κίνησης.
14. Υπολογίζουμε το  $CS_{v,sim,i}$  για την προσομοιωμένη κίνηση και προχωράμε στους παρακάτω ελέγχους.
  - i. Υπολογίζουμε τις διαφορές  $\Delta CS_v = CS_{v,sim,i} - CS_{v,sim(i-1)}$  και ελέγχουμε εάν ο λόγος  $\Delta CS_v / CS_{v,sim(i-1)} < 5\%$ . Εάν ναι ο παλμός είναι ασήμαντος και απορρίπτεται. Εάν είναι σημαντικός συνεχίζουμε με το βήμα 14.
  - ii. Υπολογίζουμε τον λόγο  $CS_{v,sim,i} / v_{orig}$ . Εάν είναι μεγαλύτερος του 90% δεν απαιτούνται επιπλέον παλμοί. Εάν όχι γυρίζουμε στο βήμα 10.

Στο τέλος της διαδικασίας κρατάμε τους εντοπισμένους παλμού με φθίνουσα σειρά. Η όλη διαδικασία μπορεί εύκολα να προγραμματιστεί και να κωδικοποιηθεί.



# Κεφάλαιο 8

## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΠΑΛΜΟΥΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

---

- 8.1 Εισαγωγή
- 8.2 Περιγραφή της διαδικασίας επεξεργασίας των παλμικών καταγραφών
- 8.3 Διερεύνηση της συσχέτισης των παραμέτρων της κατευθυντικότητας με τα χαρακτηριστικά των παλμικών κινήσεων κοντινού πεδίου
  - 8.3.1 Μέγεθος σεισμού και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική
  - 8.3.2 Χρονική διάρκεια παλμών  $\gamma$  και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική
  - 8.3.3 Κοντινότερη απόσταση από το ρήγμα (CID) και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική
  - 8.3.4 Συντελεστής κατευθυντικότητας  $\xi$  και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική
  - 8.3.5 Ολοκλήρωμα της απόλυτης εδαφική ταχύτητας CAD
  - 8.3.6 Ο ισόχρονος συντελεστής κατευθυντικότητας  $\tilde{\epsilon}$



## 8.1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση των χαρακτηριστικών των σεισμικών εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου που παρουσιάζουν παλμό κατευθυντικότητας στη χρονοϊστορία ταχύτητας στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα και ειδικότερα, η διερεύνηση των χαρακτηριστικών των παλμών και της επαύξεσης που δημιουργείται στα φάσματα μετακίνησης και ταχύτητας.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν καταγραφές από τη βάση δεδομένων NGA καθώς και συντελεστές κατευθυντικότητας που έχουν ανά καιρούς προταθεί από ερευνητές στην επιστημονική κοινότητα των μηχανικών.

Από τις καταγραφές της βάσης δεδομένων NGA εστίασαμε στις 90 καταγραφές που χαρακτηρίζονται σύμφωνα με τον Baker (2007) ως παλμικές. Οι καταγραφές αυτές επεξεργάστηκαν κατάλληλα προκειμένου να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με την επιρροή των παλμών κατευθυντικότητας στα ελαστικά φάσματα σχεδιασμού, αλλά και να διερευνήσουμε κατά πόσον υπάρχει συσχέτιση με τους συντελεστές κατευθυντικότητας, το μέγεθος του σεισμού και τα φυσικά χαρακτηριστικά των παλμών, όπως είναι η χρονική διάρκεια γ.

Ειδικότερα, από τους παλμούς αφαιρέθηκαν οι σημαντικοί παλμοί κατευθυντικότητας με τη μέθοδο που όρισαν οι Π.Μίμογλου, Ι.Ψυχάρης και Ι.Ταφλαμπάς το 2012 και η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 7. Στη συνέχεια εξήχθησαν τα ελαστικά φάσματα σχεδιασμού ψευδο-ταχύτητας και μετακίνησης για απόσβεση 5% πριν και μετά την αφαίρεση του παλμού και διαιρέθηκαν καταλλήλως προκειμένου να υπολογίσουμε την επαύξεση που προκαλείται από τον παλμό κατευθυντικότητας. Οι τιμές των λόγων επαύξεσης που προέκυψαν ελέγχονται για το αν μπορούν να συσχετιστούν με τις παραμέτρους και τους συντελεστές των παλμών αλλά και του φαινομένου της κατευθυντικότητας. Είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι οι καταγραφές στράφηκαν σε κατάλληλες γωνίες προκειμένου να επεξεργαστούμε τις κάθετες στο ρήγμα συνιστώσες, καθώς αυτές είναι που παρουσιάζουν τον παλμό κατευθυντικότητας στους σεισμούς κοντινού πεδίου.

Χρήσιμη ήταν η σύγκριση των τιμών της επαύξεσης με τις τιμές του Ευρωκώδικα 8 για τα φάσματα μετακίνησης με απόσβεση 5%, καθώς άπτεται άμεσα στο αντικείμενο της κοινότητας των μηχανικών.

Διερευνάται επίσης στο παρόν κεφάλαιο και η αποτελεσματικότητα της παραμέτρου CAD ως δείκτης κατευθυντικότητας σε οποιαδήποτε καταγραφή γνωρίζουμε το επιταχυνσιογράφημα.

Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε ξεκινώντας από το μέγεθος του σεισμού και στη συνέχεια από τα αζιμουθιακά χαρακτηριστικά της κατευθυντικότητας και συγκεκριμένα από τον συντελεστή κατευθυντικότητας  $\xi$  που σχετίζεται με την γεωμετρία του ρήγματος και από την κοντινότερη στο ρήγμα απόσταση CID (Closest Distance). Η διερεύνηση αφορά στα φάσματα ταχύτητας και στη συνέχεια στα φάσματα μετακίνησης. Δεδομένου ότι το φάσμα μετακίνησης μιας καταγραφής αποτελεί την περιβάλλουσα του φάσματος ταχύτητας Fourier όπως αποδείχτηκε και στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην συγκεκριμένη κατηγορία φασμάτων. Καθώς αποδείξαμε ότι ο λόγος της τιμής του φάσματος μετακίνησης στον συντονισμό για μηδενική απόσβεση προς το CAD έχει σταθερή τιμή στις παλμικές καταγραφές διερευνάται κατά πόσον ο λόγος αυτός μπορεί να αποτελέσει δείκτη ύπαρξης παλμού σε μια καταγραφή κοντινού πεδίου.

## 8.2 Περιγραφή της διαδικασίας επεξεργασίας των παλμικών καταγραφών

Για την εξαγωγή των συμπερασμάτων στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι 90 καταγραφές της βάσης δεδομένων NGA που χαρακτηρίστηκαν ως παλμικές από τον Baker (2007) με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Οι ανωτέρω καταγραφές πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια τα οποία ορίστηκαν στο αντίστοιχο κεφάλαιο και είναι τα εξής:

1. Ο δείκτης παλμού P.I (Pulse Indicator) πρέπει να λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 0.85
2. Για τον παλμό που φτάνει νωρίς στην χρονοϊστορία της ταχύτητας ισχύει ότι οι τιμές του χρόνου  $t_{20\%orig}$  είναι μεγαλύτερες από το χρόνο  $t_{10\%pulse}$ .
3. Η αρχική εδαφική κίνηση έχει  $PGV > 30 \text{ cm/s}$

Πρώτο στάδιο της διαδικασίας ήταν να στραφούν οι καταγραφές προκειμένου να επεξεργαστούμε την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα, καθώς είναι αυτή που παρουσιάζει τον παλμό κατευθυντικότητας στη χρονοϊστορία ταχύτητας. Στη συνέχεια, στις στραμμένες πλέον καταγραφές, εντοπίστηκαν οι σημαντικοί παλμοί κατευθυντικότητας με την μεθοδολογία η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Στον πίνακα 8.1 που ακολουθεί δίνονται οι στραμμένες καταγραφές και τα βασικά χαρακτηριστικά τους, και συγκεκριμένα οι περίοδος  $T_p$  των παλμών και η χρονική διάρκεια  $\gamma$  όπως υπολογίστηκαν από την μεθοδολογία του 7<sup>ου</sup> κεφαλαίου.

No.	Record Sequence Number	Παλμός	Tp (sec)	γ
1	77	1	5.29	1.9
		2	1.49	1.7
2	150	1	2.03	1.9
		2	1.07	7.4
		3	0.82	1.7
		4	0.63	11.0
3	158	1	2.75	3.2
		2	1.60	7.0
		3	1.19	8.1
4	159	1	1.88	2.1
5	161	1	9.01	4.1
		2	4.64	4.6
		3	2.69	4.1
6	170	1	6.39	4.9
		2	3.44	1.7
		3	2.23	6.9
7	171	1	2.86	1.9
8	173	1	5.53	2.7
		2	3.81	1.7
9	174	1	7.17	3.2
		2	1.24	1.6
10	178	1	4.27	1.8
11	179	1	4.01	2.0
		2	2.15	1.4
12	180	1	3.08	2.6
		2	0.93	4.5
13	181	1	3.43	2.2
14	182	1	3.29	2.3
		2	0.78	4.8
15	183	1	4.61	2.0
16	184	1	6.06	1.9
		2	3.91	1.5
17	185	1	4.22	1.7
		2	1.13	5.9
18	250	1	0.82	2.4
		2	0.62	1.6
19	292	1	2.82	2.3
20	316	1	7.51	4.4
		2	4.57	5.5
		3	2.70	2.7
		4	0.89	5.9
21	407	1	2.75	1.5
		2	1.10	1.5
		3	0.56	3.3
22	415	1	1.04	1.3
		2	0.74	3.2
		3	0.45	2.4
23	418	1	0.64	1.5

		2	0.30	2.7
<b>24</b>	451	1	3.05	2.0
		2	1.40	7.6
		3	0.71	4.4
<b>25</b>	459	1	1.16	2.6
<b>26</b>	503	1	2.84	8.2
		2	1.58	13.2
		3	1.26	2.4
<b>27</b>	508	1	1.23	1.9
<b>28</b>	529	1	1.07	1.9
<b>29</b>	568	1	1.89	3.1
		2	0.68	4.3
<b>30</b>	615	1	1.20	1.6
		2	0.73	2.8
<b>31</b>	645	1	1.07	1.5
		2	0.71	2.8
<b>32</b>	723	1	5.38	3.2
		2	1.86	2.0
<b>33</b>	738	1	2.24	2.4
		2	1.02	4.9
<b>34</b>	766	1	3.0	2.2
		2	1.46	5.2
		3	1.27	1.6
		4	0.70	7.4
<b>35</b>	783	1	1.98	5.8
		2	1.48	8.2
		3	0.69	3.9
<b>36</b>	802	1	3.01	1.5
		2	2.22	1.3
<b>37</b>	821	1	2.88	5.9
		2	2.24	1.9
		3	1.10	4.4
<b>38</b>	828	1	2.26	1.8
		2	0.71	3.2
<b>39</b>	838	1	6.43	1.8
		2	3.56	4.7
		3	1.72	3.0
		4	0.75	2.0
<b>40</b>	879	1	10.92	1.8
		2	4.07	1.6
		3	2.59	1.4
<b>41</b>	900	1	6.99	2.1
		2	1.34	4.0
<b>42</b>	982	1	2.86	3.4
		2	1.04	2.6
<b>43</b>	983	1	2.56	3.8
		2	2.00	1.2
<b>44</b>	1009	1	2.28	2.1
		2	1.87	2.2
<b>45</b>	1013	1	4.54	2.8
		2	1.29	1.6
<b>46</b>	1045	1	2.97	1.6

		2	2.03	1.5
		3	1.38	1.7
47	1050	1	3.15	3.3
		2	1.08	1.8
		3	0.44	2.7
48	1051	1	3.46	2.6
		2	0.73	1.9
49	1063	1	3.01	4.8
		2	1.51	1.7
		3	1.05	1.8
50	1084	1	3.01	1.5
		2	2.70	3.5
		3	1.14	9.3
51	1086	1	3.76	1.7
		2	2.41	3.9
		3	1.41	6.1
52	1119	1	1.84	1.8
53	1120	1	1.80	11.3
		2	1.23	5.0
54	1161	1	9.08	2.2
		2	3.90	3.4
55	1182	1	5.13	3.4
		2	1.87	2.3
		3	1.41	1.5
56	1202	1	2.90	11.8
		2	1.36	3.1
		3	0.83	11.5
57	1244	1	4.89	2.9
		2	2.15	3.2
58	1410	1	11.00	1.5
		2	4.28	5.9
		3	2.69	7.7
		4	1.16	4.1
59	1476	1	7.63	1.6
		2	4.46	3.7
		3	3.15	1.5
60	1477	1	11.01	1.9
		2	7.58	3.0
		3	3.88	4.6
61	1479	1	7.49	2.7
		2	4.49	1.6
62	1480	1	8.85	4.1
		2	4.13	1.6
		3	3.56	1.9
63	1481	1	7.62	1.9
		2	4.40	2.1
64	1483	1	11.41	1.8
		2	5.64	2.0
65	1484	1	7.43	3.4
		2	3.35	1.8
		3	1.49	1.3
66	1486	1	7.78	2.5
		2	4.79	2.3

		3	2.81	2.6
<b>67</b>	1489	1	9.16	2.2
		2	3.02	1.4
<b>68</b>	1493	1	9.55	2.2
		2	3.10	3.5
		3	1.14	1.6
<b>69</b>	1494	1	11.11	1.8
		2	4.39	4.0
<b>70</b>	1496	1	11.32	2.1
		2	4.39	2.3
<b>71</b>	1499	1	10.80	2.1
		2	4.79	4.0
		3	3.21	2.4
<b>72</b>	1503	1	10.36	2.4
		2	4.75	3.7
		3	1.96	12.2
		4	1.14	7.8
<b>73</b>	1505	1	9.30	2.1
		2	2.59	2.0
<b>74</b>	1510	1	13.54	1.4
		2	4.43	1.6
		3	1.78	3.2
<b>75</b>	1511	1	5.59	1.8
		2	3.37	1.7
<b>76</b>	1515	1	10.59	1.8
		2	4.47	4.1
<b>77</b>	1519	1	11.11	2.0
		2	3.80	1.7
		3	2.37	7.1
<b>78</b>	1526	1	8.31	2.3
		2	5.09	2.7
		3	4.44	2.9
		4	2.24	14.9
<b>79</b>	1528	1	8.64	2.1
		2	4.77	6.6
		3	2.66	3.9
<b>80</b>	1529	1	7.66	2.3
		2	2.51	2.2
<b>81</b>	1530	1	7.21	2.0
		2	2.61	8.0
<b>82</b>	1531	1	10.66	2.4
		2	5.32	1.6
		3	4.15	9.7
		4	1.19	3.9
<b>83</b>	1548	1	13.01	1.7
		2	7.30	3.4
		3	4.19	5.1
<b>84</b>	1550	1	8.35	5.4
		2	5.73	7.8
		3	3.53	3.2
<b>85</b>	1752	1	1.91	1.6
		2	0.86	3.1
<b>86</b>	2457	1	7.55	3.6
		2	4.09	3.0



		3	3.17	1.9
		4	2.59	2.8
<b>87</b>	2495	1	1.90	1.9
		2	1.10	3.7
<b>88</b>	2627	1	2.42	6.5
		2	0.83	1.5
<b>89</b>	3317	1	3.61	8.2
		2	2.30	2.7
<b>90</b>	1853	1	0.62	1.8

**Πίνακας 8.1:** Παλμικές καταγραφές σύμφωνα με τον Baker (2007) από τη βάση δεδομένων NGA και τα βασικά χαρακτηριστικά τους σύμφωνα με τη μέθοδο των Mimoglou et al (2012)

Αρχικά υπολογίστηκαν τα φάσματα ταχύτητας και μετακίνησης για απόσβεση 5% για τις στραμμένες καταγραφές και υπολογίστηκε σε κάθε περίπτωση ο λόγος της μέγιστης φασματικής τιμής ως προς την αντίστοιχη εδαφική. Οι εδαφικές τιμές προσδιορίζονται από την τιμή της ασύμπτωτης στο αντίστοιχο φάσμα, ή από την μέγιστη απόλυτη τιμή από την αντίστοιχη χρονοϊστορία. Ο λόγος αυτός, αποτελεί ουσιαστικά την επαύξηση που προκαλείται στο φάσμα, στην περίπτωση που δεν είχαμε παλμό στη χρονοϊστορία ταχύτητας, από τους παλμούς κατευθυντικότητας

Στη συνέχεια αφαιρέθηκε ο πρώτος και πιο σημαντικός παλμός από τις στραμμένες καταγραφές με τη χρήση της μεθόδου που περιγράφεται στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Για τα προκύπτοντα φάσματα από από τις εναπομένουσες χρονοϊστορίες υπολογίζεται πάλι ο λόγος της μέγιστης φασματικής τιμής για απόσβεση 5% ως προς την αντίστοιχη εδαφική. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στην περίπτωση αφαίρεσης του παλμού ως εδαφικές τιμές λαμβάνονται οι εδαφικές τιμές της αρχικής καταγραφής.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται, αφού όμως αυτήν τη φορά αφαιρέσουμε από τις καταγραφές το σύνολο των σημαντικών παλμών.

Όταν αναφερόμαστε στα φάσματα ταχύτητας εννοούμε τα φάσματα ψευδο-ταχύτητας, καθώς αυτά υπολογίστηκαν και για μικρές τιμές απόσβεσης ταυτίζονται με τα φάσματα ταχύτητας της καταγραφής.

Σκοπός μας είναι να διερευνήσουμε κατά πόσον η επαύξηση των φασμάτων με παλμό και μετά την αφαίρεση του σημαντικού και εν συνεχεία όλων των παλμών, συσχετίζεται με βασικά στοιχεία και χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας, όπως είναι το μέγεθος του σεισμού, ο συντελεστής κατευθυντικότητας  $\xi$  του Rowshandel, η χρονική διάρκεια  $\gamma$  των παλμών και η κοντινότερη από το ρήγμα απόσταση. Για την επίτευξη του σκοπού μας δημιουργήσαμε τα αντίστοιχα διαγράμματα τα οποία δίνονται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Θεωρήσαμε σημαντικό τα αποτελέσματα μας να μπορούν να συσχετιστούν άμεσα και με το αντικείμενο του μηχανικού, γι' αυτό και έγινε μια προσπάθεια να συγκρίνουμε τις τιμές που προέκυψαν από τα φάσματα μετακίνησης για απόσβεση 5% με τις

αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από το φάσμα σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8 (EC8), αφού βέβαια υπέστησαν κατάλληλη κανονικοποίηση.

### 8.3 Διερεύνηση της συσχέτισης των παραμέτρων της κατευθυντικότητας με τα χαρακτηριστικά των παλμικών κινήσεων κοντινού πεδίου

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 8.2 της μεταπτυχιακής εργασίας υπολογίστηκαν οι λόγοι της μέγιστης φασματικής τιμής για απόσβεση 5% ς προς την αντίστοιχη εδαφική για τα φάσματα ψευδοταχύτητας και μετακίνησης και διερευνήθηκε η συσχέτισή τους με διάφορους παράγοντες που ίσως επηρεάζουν την επαύξηση των φασματικών τιμών.

Αρχικά θα εστιάσουμε στη μεταβολή του λόγου της μέγιστης φασματικής τιμής για απόσβεση 5% ως προς την εδαφική αφαιρώντας τον πρώτο και στη συνέχεια όλους τους παλμούς από την καταγραφή. Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται οι μέσοι όροι της επαύξησης για κάθε περίπτωση στα αντίστοιχα φάσματα

Λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την αντίστοιχη εδαφική			
Είδος φάσματος (5%)	Αρχική καταγραφή	Με αφαίρεση 1 <sup>ου</sup> παλμού	Με αφαίρεση όλων των παλμών
Φάσμα ψευδοταχύτητας	2.14	1.40	1.17
Φάσμα μετακίνησης	1.97	1.08	0.85

Πίνακας 8.2: Μέσος όρος τιμών επαύξησης των φασμάτων για απόσβεση 5%

Παρατηρούμε ότι η μεταβολή είναι σημαντική μετά την αφαίρεση του πρώτου παλμού και γίνεται ακόμα μεγαλύτερη αφαιρώντας όλους τους παλμούς, τόσο στα φάσματα ταχύτητας, όσο και στα φάσματα μετακίνησης.

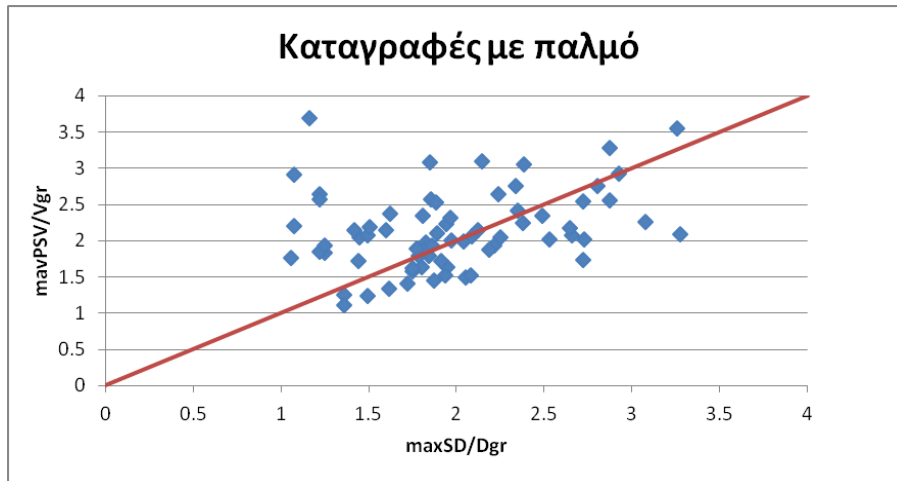
Υπολογίζεται επίσης ο λόγος της επαύξησης της αρχικής καταγραφής και της καταγραφής χωρίς κανέναν παλμό. Δεδομένου ότι ο παρανομαστής είναι ίδιος, ουσιαστικά υπολογίζουμε τον λόγο της μέγιστης φασματικής τιμής με και χωρίς παλμό.

Είδος φάσματος (5%)	Λόγος επαύξησης με/χωρίς παλμό
Φάσμα ψευδο-ταχύτητας	2.04
Φάσμα μετακίνησης	2.57

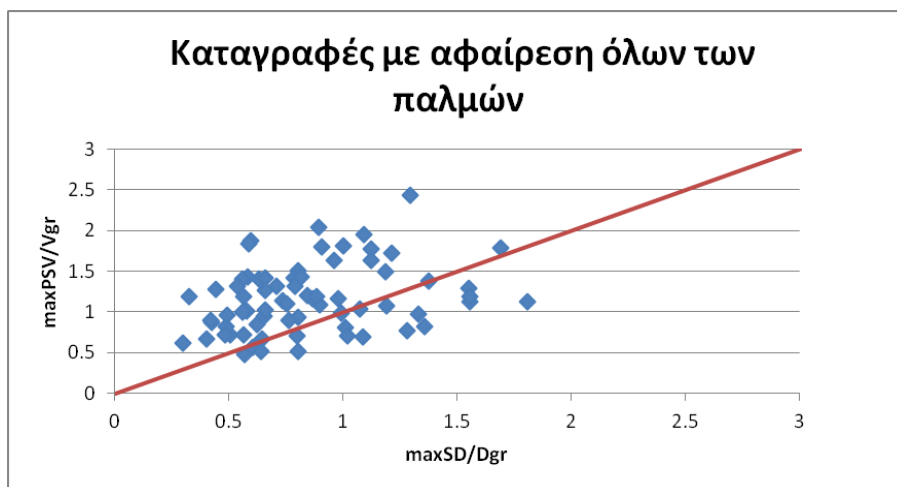
Πίνακας 8.3: Μέσος όρος λόγων επαύξησης για απόσβεση 5%

Είναι εμφανές ότι οι παλμοί στις χρονοϊστορίες ταχύτητας σχεδόν διπλασιάζουν τις μέγιστες φασματικές τιμές, ενώ παρατηρούμε ότι η επαύξηση για τα φάσματα ταχύτητας είναι κοντά σε αυτήν των φασμάτων μετακίνησης. Για να καταστεί πιο εμφανές το παραπάνω συμπέρασμα, σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα που σχετίζουν την επαύξηση των μετακινήσεων με των ταχυτήτων, έχοντας στον οριζόντιο και

κατακόρυφο άξονα τα δύο αυτά μεγέθη. Είναι ευδιάκριτο ότι στην περίπτωση των αρχικών καταγραφών, η νοητή γραμμή που ενώνει τα σημεία του διαγράμματος, ακολουθεί την ευθεία  $y=x$ , δηλαδή των  $45^\circ$ . Με την αφαίρεση των παλμών, φαίνεται πάλι να ακολουθούμε τη διχοτόμο της γωνίας αλλά οι τιμές απλώνονται περισσότερο στο χώρο.



(α)



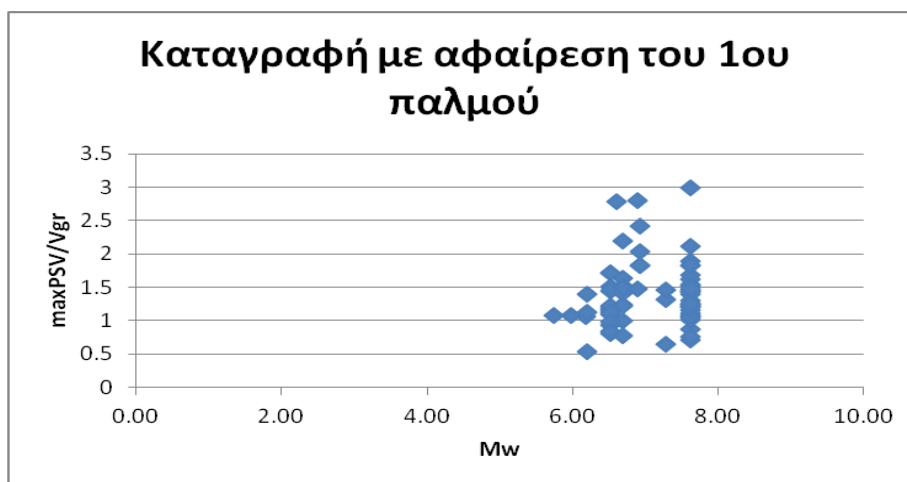
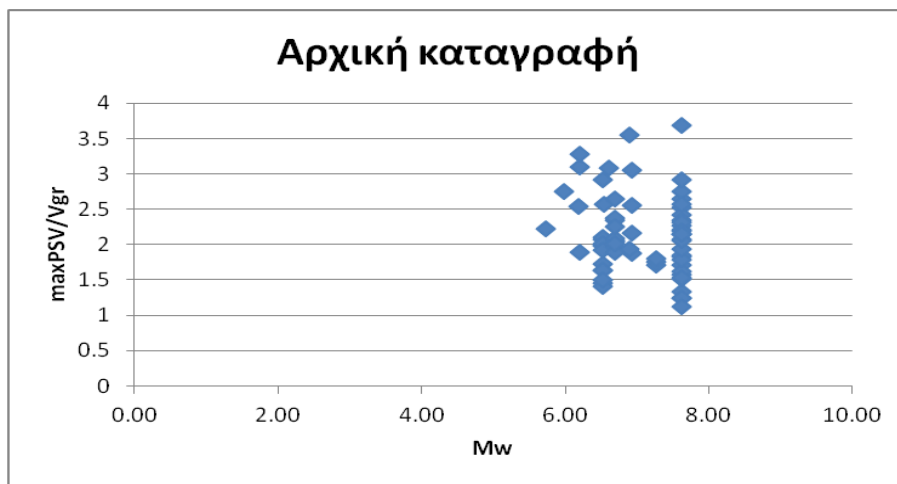
(β)

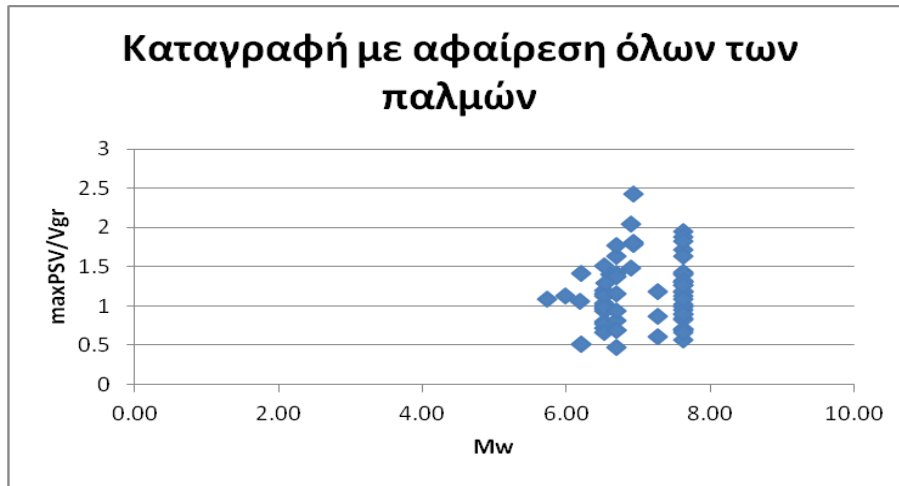
**Σχήμα 8.1:** Διάγραμμα συσχέτισης της επαύξησης στα φάσματα μετακίνησης και ταχύτητας, α) με παλμό, β) με αφαίρεση όλων των παλμών

### 8.3.1 Μέγεθος σεισμού και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική

Αρχικά διερευνήθηκε η περίπτωση κατά την οποία το μέγεθος του σεισμού επηρεάζει την φασματική επαύξηση πριν και μετά την αφαίρεση των παλμών. Για τον λόγο αυτό σχεδιάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα τα οποία στον οριζόντιο άξονα έχουν το μέγεθος του σεισμού και στον κατακόρυφο την τιμή της επαύξησης των φασμάτων.

#### Ελαστικά φάσματα ταχύτητας



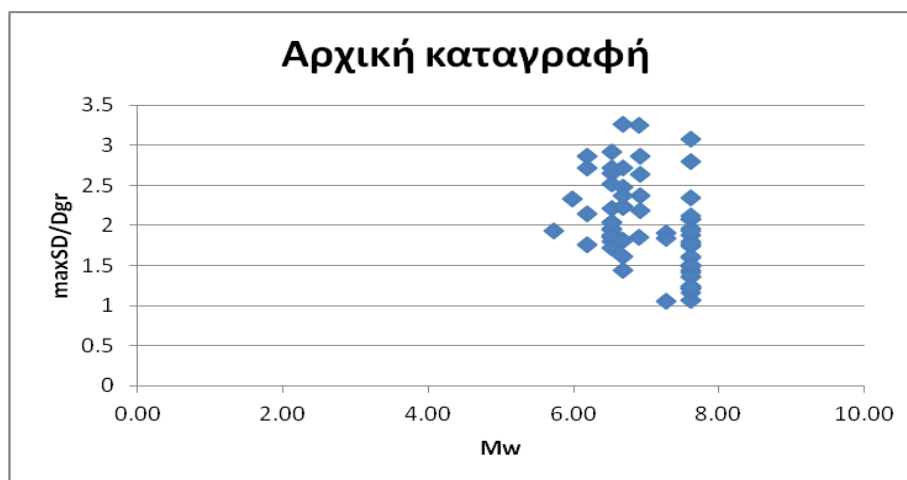


(γ)

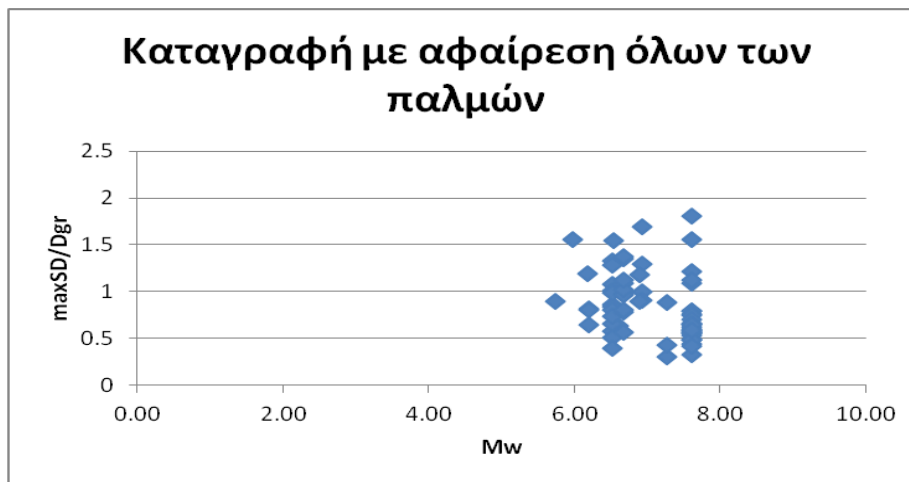
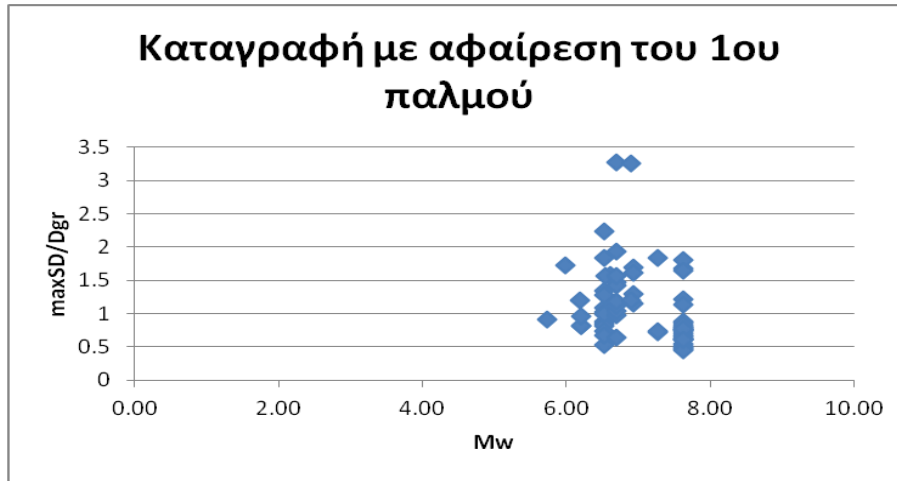
**Σχήμα 8.2:** Φασματική επαύξηση ταχύτητας για απόσβεση 5% συναρτήσει του μεγέθους του σεισμού, α) αρχική καταγραφή, β) καταγραφή με αφαίρεση 1<sup>ου</sup> παλμού, γ) καταγραφή με αφαίρεση όλων των παλμών

Παρατηρούμε από τα παραπάνω διαγράμματα ότι ο λόγος της μέγιστης φασματικής ψευδοταχύτητας προς την εδαφική μειώνεται με την αφαίρεση του πρώτου παλμού και μεταβάλλεται ακόμα περισσότερο όταν αφαιρεθούν όλοι οι παλμοί από την στραμμένη καταγραφή. Συγκεκριμένα οι μέσοι όροι των τιμών προκύπτουν αντίστοιχα 2.14, 1.4, 1.17. Αξιοσημείωτο των παραπάνω διαγραμμάτων αποτελεί το γεγονός ότι η τιμή της επαύξησης έχει μεγάλο εύρος τιμών σε ένα μέγεθος σεισμού, κάτι που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο λόγος της μέγιστης φασματικής τιμών προς την εδαφική είναι σε κάθε περίπτωση ανεξάρτητη του μεγέθους του σεισμού.

### Ελαστικά φάσματα μετακίνησης



(α)



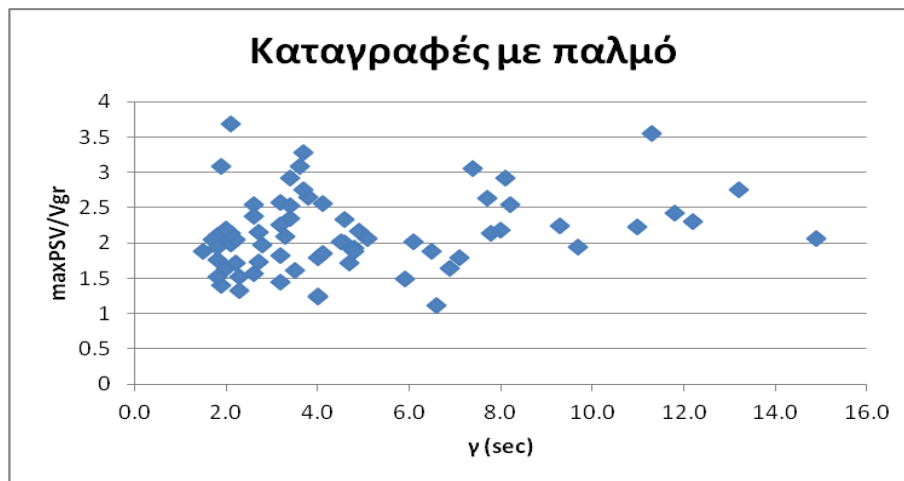
**Σχήμα 8.3:** Φασματική επαύξηση μετακίνησης για απόσβεση 5% συναρτήσει του μεγέθους του σεισμού, α)αρχική καταγραφή, β)καταγραφή με αφαίρεση 1<sup>ου</sup> παλμού, γ)καταγραφή με αφαίρεση όλων των παλμών

Τα συμπεράσματα είναι ακριβώς τα ίδια και με τα φάσματα ψευδο-ταχύτητας, απλά διαφέρουν οι μέσοι όροι των τιμών των διαγραμμάτων και ειδικότερα είναι 1.97, 1.08, 0.85 αντίστοιχα.

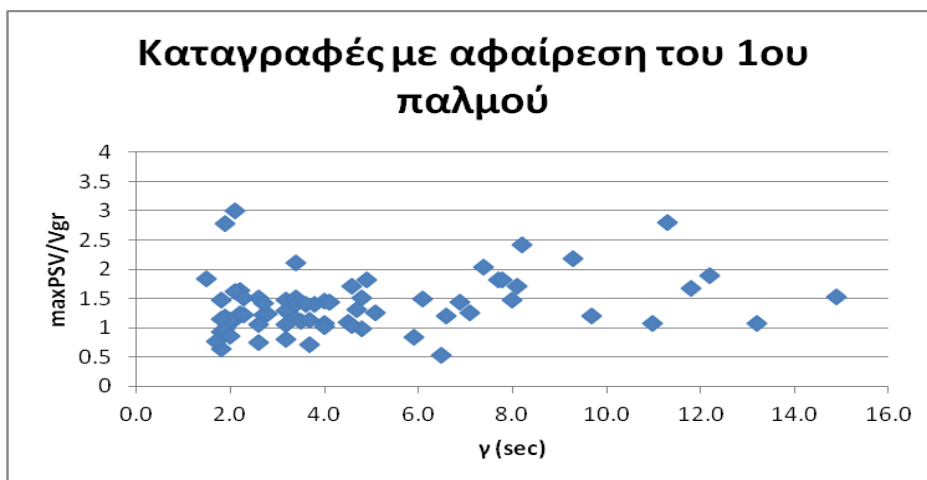
### 8.3.2 Χρονική διάρκεια παλμών $\gamma$ και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική

Ως χρονική διάρκεια των παλμών  $\gamma$  ορίζεται  $\gamma = t_{tot}/T_p$ , όπου  $t_{tot}$  η συνολική διάρκεια της χρονοϊστορίας και  $T_p$  η περίοδος του κάθε παλμού. Εκ των πραγμάτων σε κάθε παλμό αντιστοιχεί μια διάρκεια  $\gamma$ . Στην ενότητα αυτή διερευνάται το κατά πόσον η χρονική διάρκεια των παλμών επηρεάζει ή όχι την φασματική επαύξηση, καθώς θα περιμέναμε ότι παλμοί με μεγάλη διάρκεια και πλάτη αντιστοιχούν σε μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Για την κάθε καταγραφή ορίσαμε ως  $\gamma$  το μέγιστο  $\gamma$  που προκύπτει από έναν από τους σημαντικούς παλμούς της και δίνεται στον πίνακα 8.1.

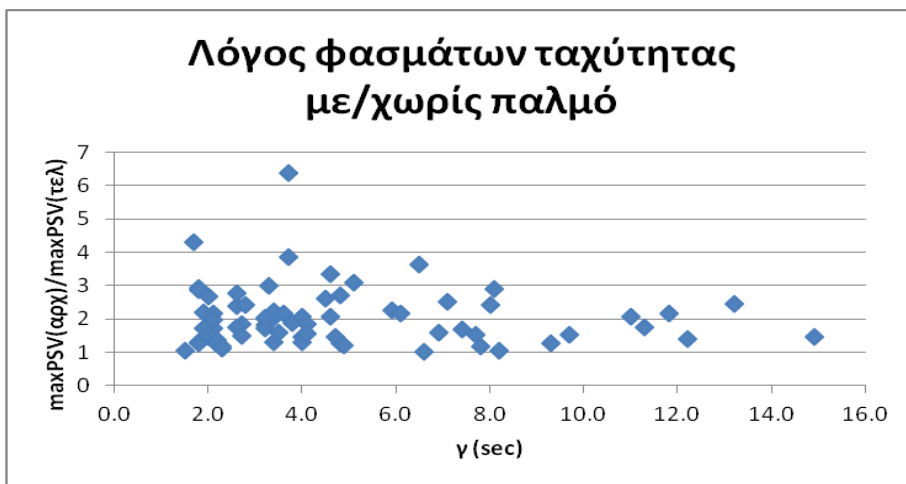
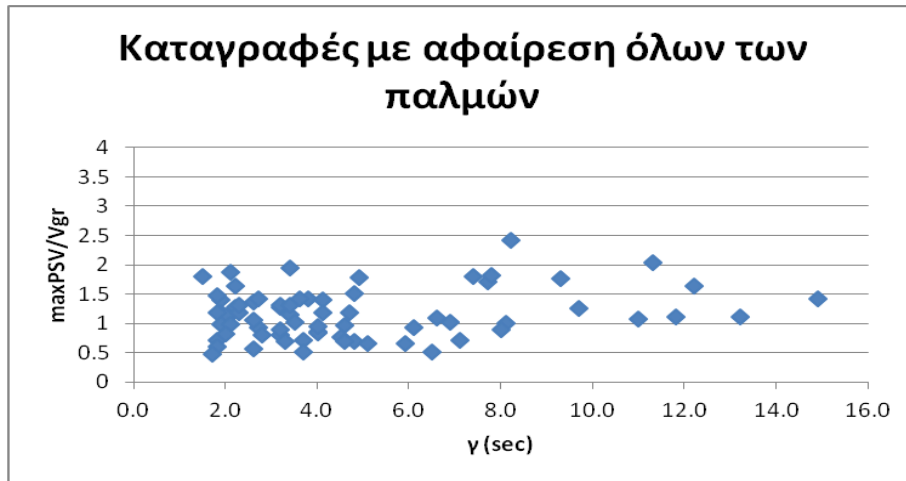
#### Ελαστικά φάσματα ταχύτητας



(α)



(β)

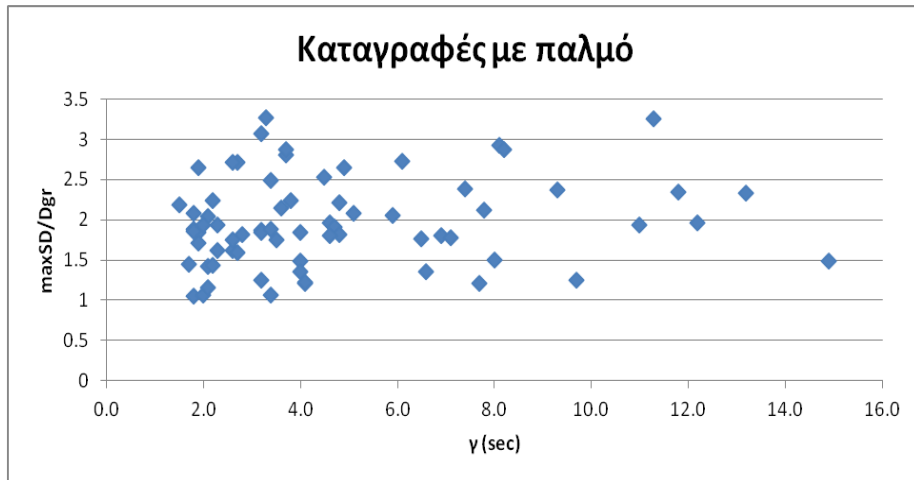


**Σχήμα 8.4:** Φασματική επαύξηση ταχύτητας για απόσβεση 5% συναρτήσει της διάρκειας του παλμού, α) αρχική καταγραφή, β) καταγραφή με αφαίρεση 1<sup>ου</sup> παλμού, γ) καταγραφή με αφαίρεση όλων των παλμών, δ) λόγος φασμάτων

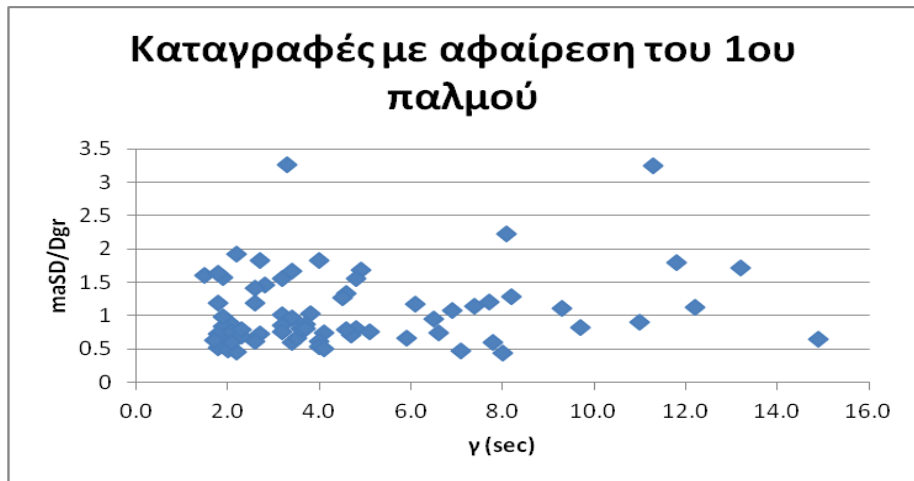
Παρατηρούμε ότι τα σημεία που αντιστοιχούν στην κάθε καταγραφή, δεν φαίνεται να ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη καμπύλη ή ευθεία, ούτε μια λογική μεταβολής ανάλογη με τη μεταβολή της χρονικής διάρκειας  $\gamma$ . Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι τα υπό μελέτη μεγέθη είναι ασυσχέτιστα.



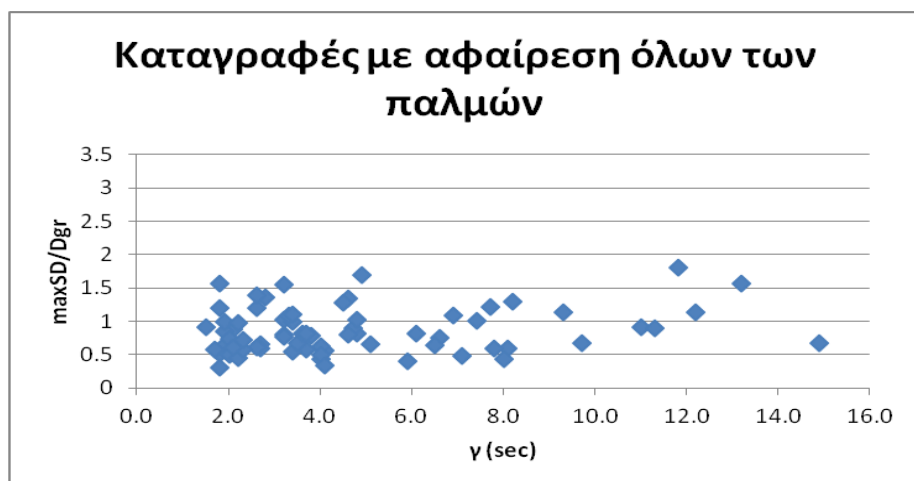
Ελαστικά φάσματα μετακίνησης



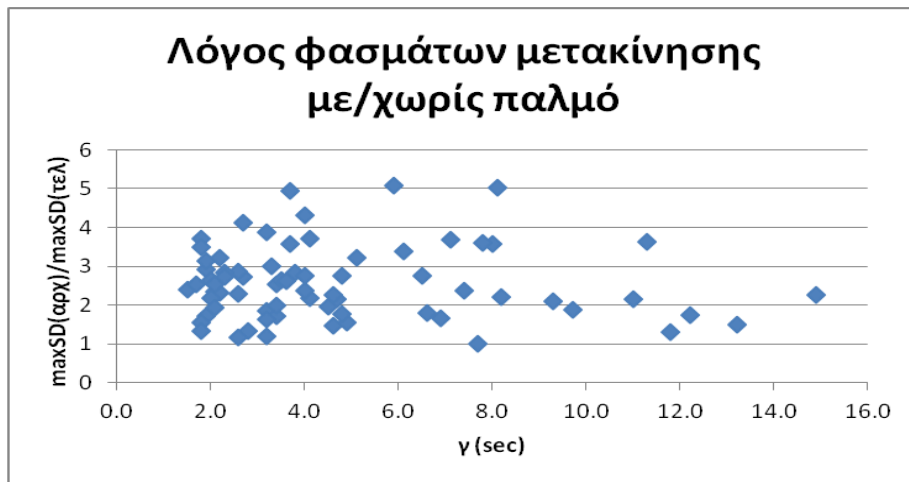
(α)



(β)



(γ)



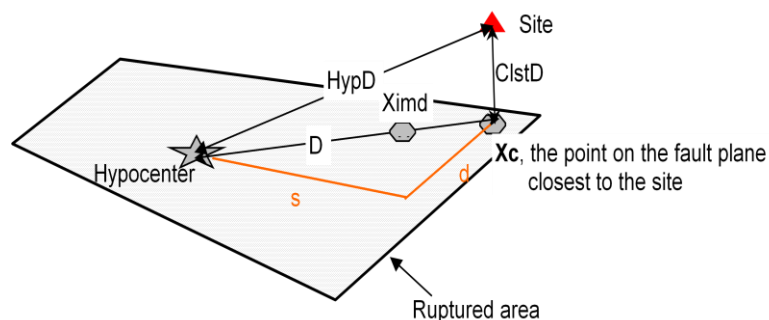
(δ)

**Σχήμα 8.5:** Φασματική επαύξηση μετακίνησης για απόσβεση 5% συναρτήσει της διάρκειας του παλμού, α)αρχική καταγραφή, β)καταγραφή με αφαίρεση 1<sup>ου</sup> παλμού, γ)καταγραφή με αφαίρεση όλων των παλμών, δ) λόγος φασμάτων

Παρατηρούμε όπως και στην περίπτωση των φασμάτων ταχύτητας ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της χρονικής διάρκειας των παλμών και της φασματικής επαύξησης.

### 8.3.3 Κοντινότερη απόσταση από το ρήγμα CID και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική

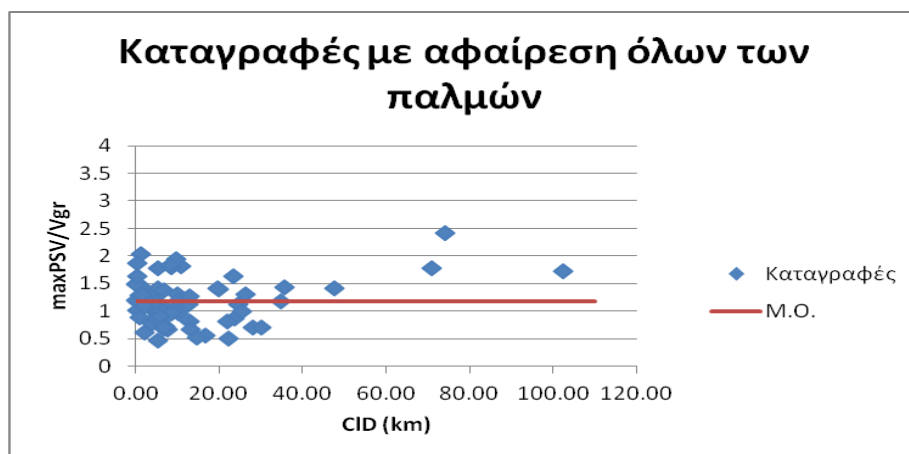
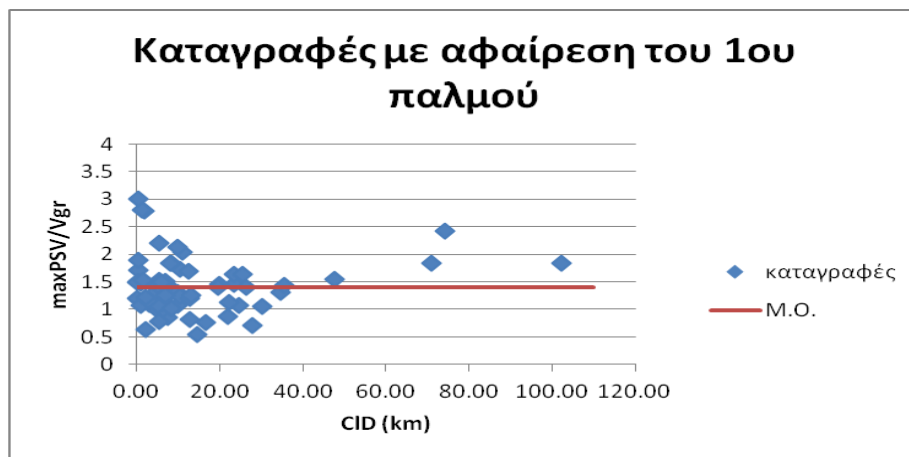
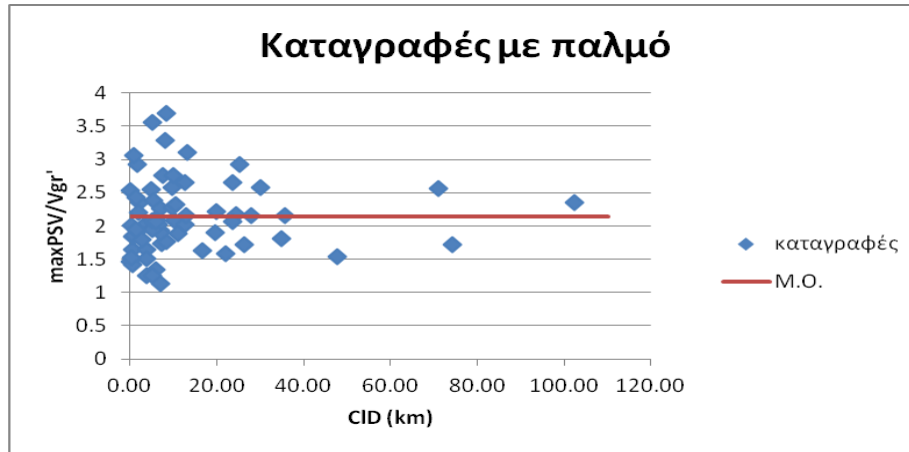
Στην ενότητα αυτή γίνεται διερεύνηση της συσχέτισης των φασματικών τιμών με την κοντινότερη απόσταση από το ρήγμα και συγκεκριμένα την CID (Closest Distance) όπως αυτή δίνεται στη βάση δεδομένων NGA. Ως CID ορίζεται η απόσταση που δίνεται στο παρακάτω σχήμα.

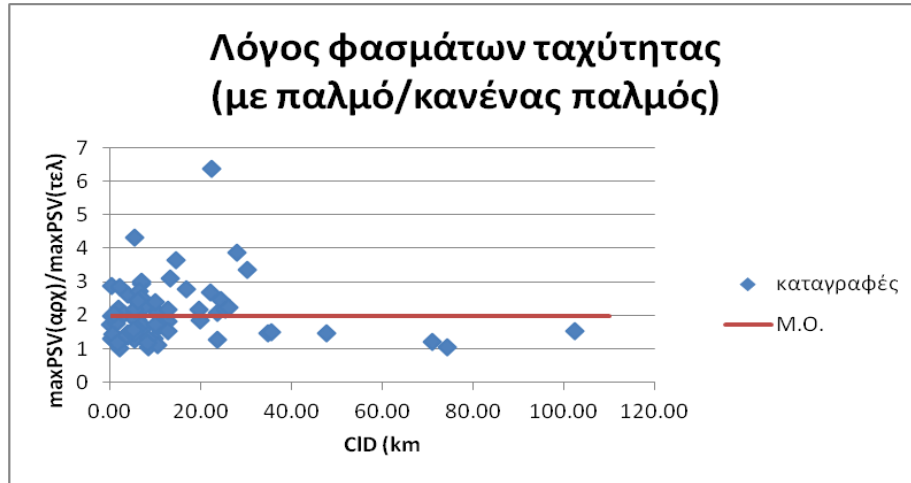


**Σχήμα 8.6:** Ορισμός των αποστάσεων σύμφωνα με την βάση δεδομένων NGA (NGA documentation)

Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται είναι αντίστοιχα με της ενότητας 8.3.2.

### Ελαστικά φάσματα ταχύτητας

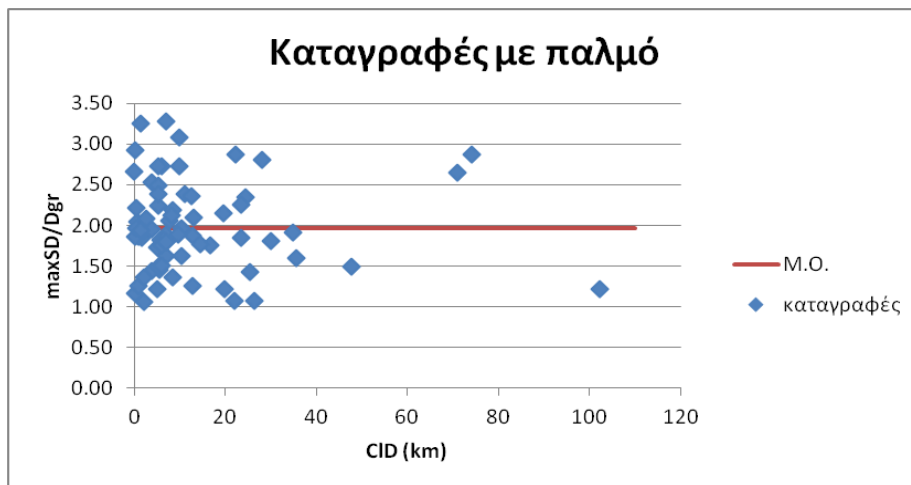




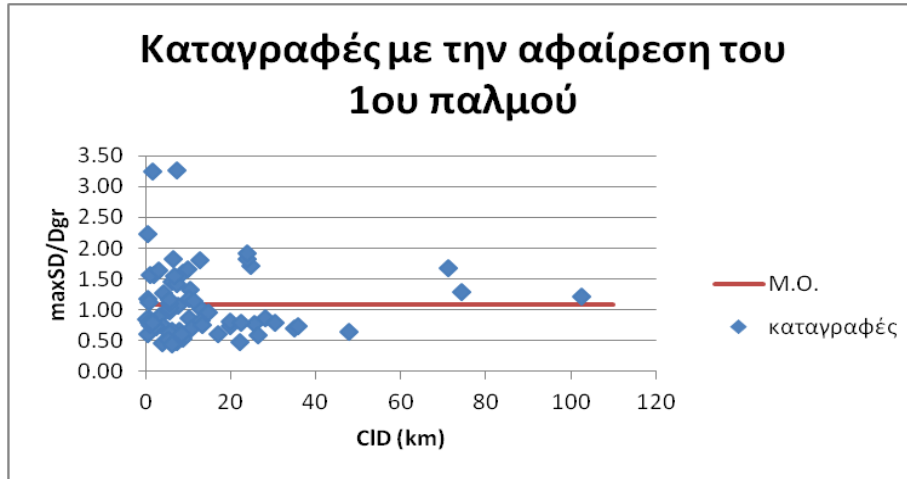
(δ)

**Σχήμα 8.7:** Φασματική επαύξηση ταχύτητας για απόσβεση 5% συναρτήσει της κοντινότερης απόστασης από το ρήγμα, α) αρχική καταγραφή, β) καταγραφή με αφαίρεση 1<sup>ου</sup> παλμού, γ) καταγραφή με αφαίρεση όλων των παλμών, δ) λόγος φασμάτων

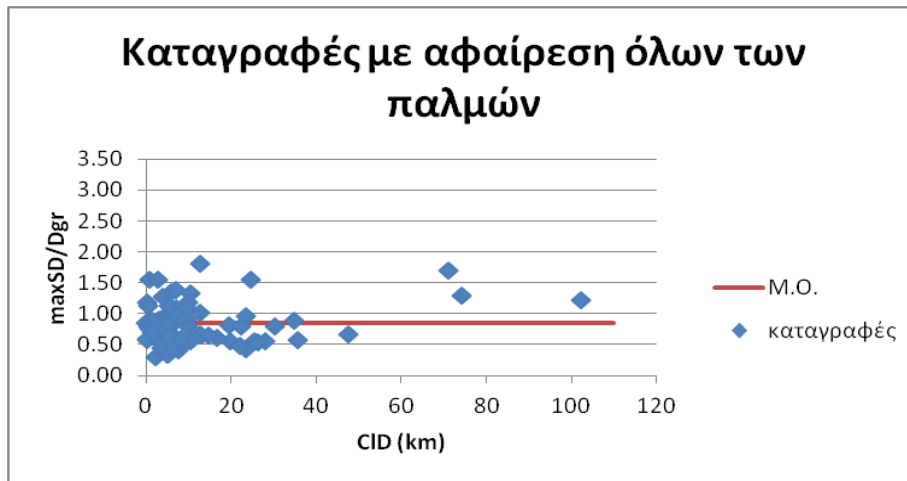
#### Ελαστικά φάσματα μετακίνησης



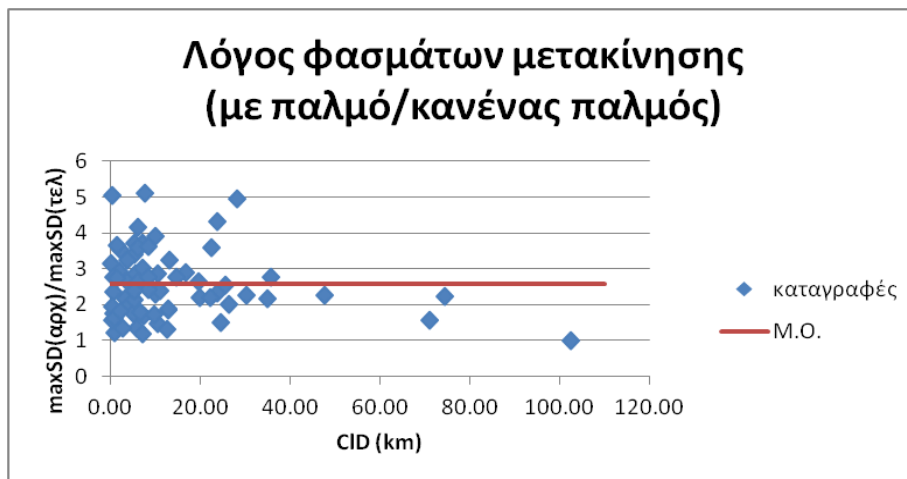
(α)



(β)



(γ)



(δ)

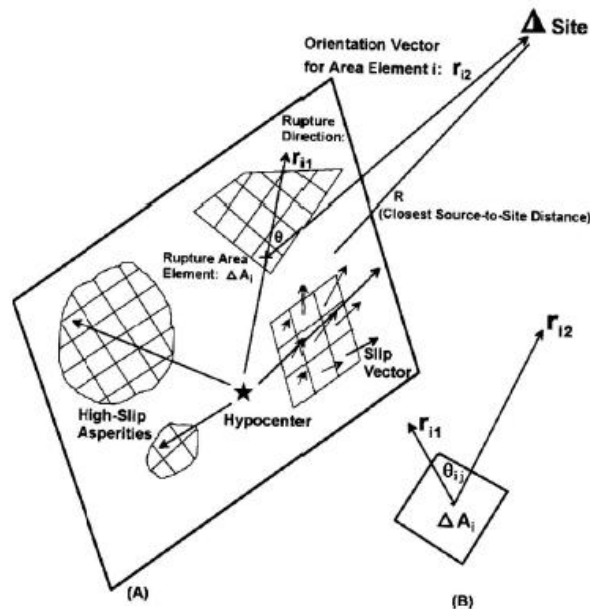
**Σχήμα 8.8:** Φασματική επαύξηση μετακίνησης για απόσβεση 5% συναρτήσει της κοντινότερης απόστασης από το ρήγμα, α)αρχική καταγραφή, β)καταγραφή με αφαίρεση 1<sup>ου</sup> παλμού, γ)καταγραφή με αφαίρεση όλων των παλμών, δ) λόγος φασμάτων

### 8.3.4 Συντελεστής κατευθυντικότητας $\xi$ και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική

Στο παρόν υποκεφάλαιο διερευνάται η συσχέτιση μεταξύ του δείκτη κατευθυντικότητας  $\xi$  που ορίστηκε από τον Rowshandel το 2006, με το λόγο της μέγιστης φασματικής τιμής με την αντίστοιχη εδαφική για τα φάσματα ψευδοταχύτητας και μετακίνησης. Ο συντελεστής  $\xi$  και ο τρόπος υπολογισμού του περιγράφεται αναλυτικά στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο και ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\xi = \frac{\sum \zeta_i \Delta A_i \overline{r_1 r_2}}{\sum \Delta A_i} = \sum \zeta_i \Delta A_i \cos \theta_{ij} / A \quad (3)$$

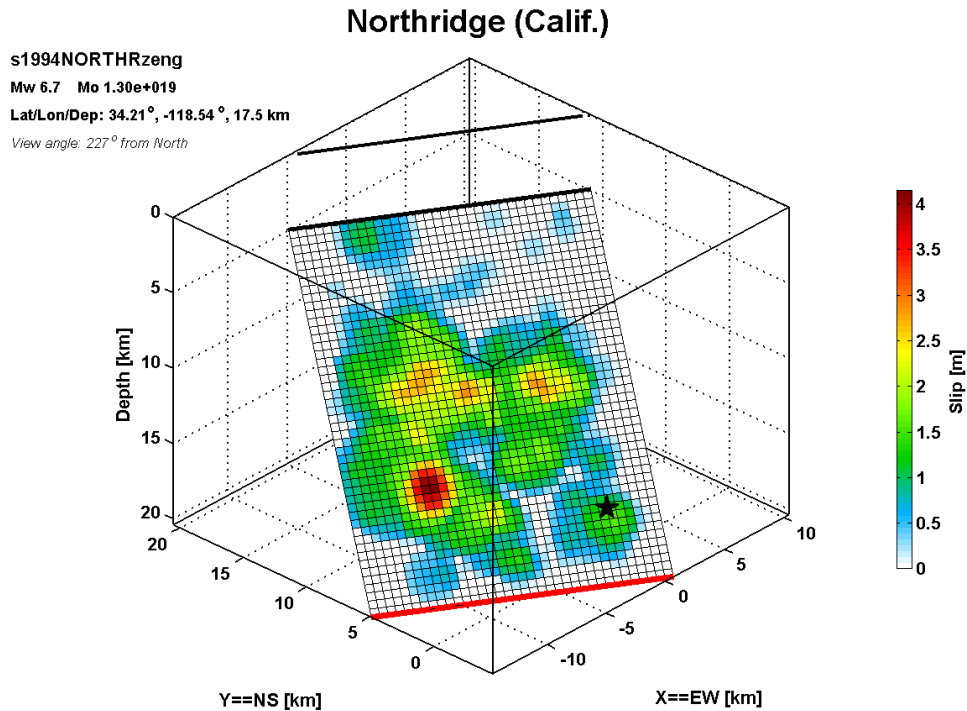
Στο σχήμα 8.9 που ακολουθεί απεικονίζονται οι παράμετροι και τα διανύσματα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή κατευθυντικότητας  $\xi$ .



**Σχήμα 8.9:** Σχηματική απεικόνιση παραμέτρων υπολογισμού του συντελεστή κατευθυντικότητας  $\xi$  (Rowshandel 2006)

Για τον υπολογισμό του συντελεστή  $\xi$  είναι απαραίτητα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ρήγματος και οι συντεταγμένες της θέσης καταγραφής. Η περιοχή του ρήγματος διαιρείται σε  $N$  μικρότερα τμήματα ανάλογα με την ακρίβεια που επιθυμούμε και υπολογίζονται τη γωνία  $\theta$  των μοναδιαίων διανυσμάτων και οι επιφάνειες  $\Delta A$  και  $A$ . Η διαδικασία υπολογισμού αυτοματοποιήθηκε καθώς προγραμματίστηκε σε ένα απλό πρόγραμμα σε γλώσσα Fortran. Ο αλγόριθμος δίνεται στο παράρτημα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Τα δεδομένα που απαιτήθηκαν λήφθηκαν από τη βάση δεδομένων του Rowshandel, ο οποίος περιγράφει πλήρως το ρήγμα και τη γεωμετρία του. Συγκεκριμένα για τα γεωμετρικά στοιχεία και τις συντεταγμένες του ρήγματος

ακολουθήσαμε το μοντέλο Zeng and Anderson (2000) το οποίο είναι αρκετά λεπτομερές και χωρίζει την επιφάνεια του ρήγματος σε μικρότερα κομμάτια που δίνουν ικανοποιητική ακρίβεια στους υπολογισμούς μας. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται ένα τέτοιο παράδειγμα για το ρήγμα του Northridge.

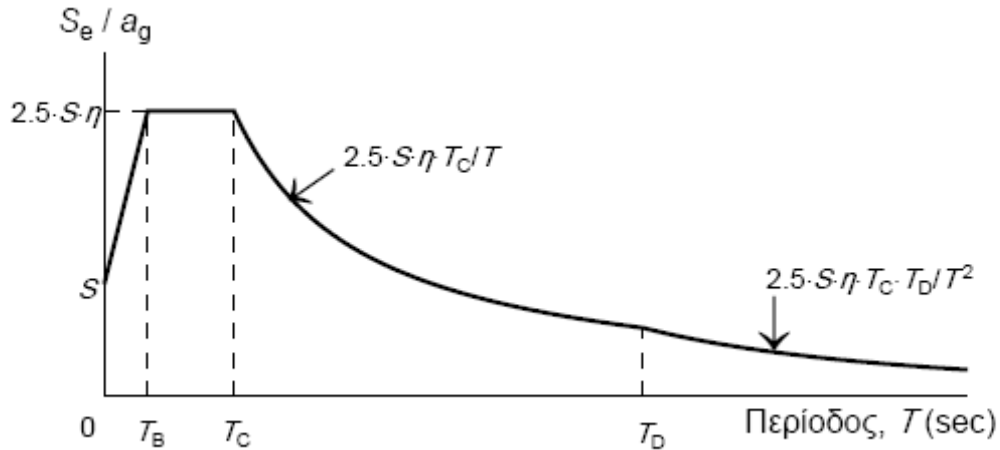


**Σχήμα 8.10:** Το μοντέλο των Zeng and Anderson (2000) για το ρήγμα του σεισμού του Northridge (1994) (Rowshandel database 2006).

Οι τιμές του συντελεστή  $\xi$  υπολογίστηκαν για τις 90 καταγραφές που χαρακτηρίζονται ως παλμικές από τη βάση δεδομένων NGA και ο πίνακας με τις τιμές του  $\xi$  και των λόγων επαύξησης δίνονται στο παράρτημα.

## Ευρωκώδικας 8

Θεωρήθηκε σημαντικό στοιχείο της διαδικασίας να συμπεριληφθούν στα διαγράμματα της παρούσας ενότητας για τα φάσματα της μετακίνησης με απόσβεση 5%, τα αντίστοιχα σημεία του EC8 προκειμένου να γίνει σύγκριση με τις τιμές του κανονισμού και να αποφανθούμε εάν ο κανονισμός επαρκεί ή όχι για την επαύξηση στα φάσματα μετακίνησης στις παλμικές καταγραφές. Το ελαστικό φάσμα μετακίνησης του EC8 υπολογίστηκε από το φάσμα σχεδιασμού των επιταχύνσεων διαιρώντας τις τιμές με το  $\omega^2$ . Το ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης σχεδιασμού του EC8 δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



**Σχήμα 8.11:** Ελαστικό Φάσμα Απόκρισης EC8

Οι εξισώσεις που το περιγράφουν είναι οι εξής:

$$\text{Για } 0 \leq T \leq T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (n \cdot 2.5 - 1) \right]$$

$$\text{Για } T_B \leq T \leq T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot n \cdot 2.5$$

$$\text{Για } T_C \leq T \leq T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot n \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C}{T}$$

$$\text{Για } T_D \leq T \leq 4 \text{ sec} \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot n \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2}$$

Όπου:  $\alpha_g = \gamma_I \cdot a_{gr}$

$$n = \sqrt{\frac{10}{\zeta + 5}} \geq 0.55$$

Se: ελαστική φασματική απόκριση

και S ο συντελεστής εδάφους.

Οι τιμές των συντελεστών δίνονται από τον πίνακα 8.4

Κατηγορία Εδάφους	$T_B$ (sec)	$T_C$ (sec)	$T_D$ (sec)	S
A	0.15	0.40	2.50	1.00
B	0.15	0.50	2.50	1.20
C	0.20	0.60	2.50	1.15
D	0.20	0.80	2.50	1.35
E	0.15	0.50	2.50	1.40

**Πίνακας 8.4:** Τιμές του συντελεστή S και των περιόδων  $T_B$ ,  $T_C$  και  $T_D$  ανάλογα με την κατηγορία του εδάφους

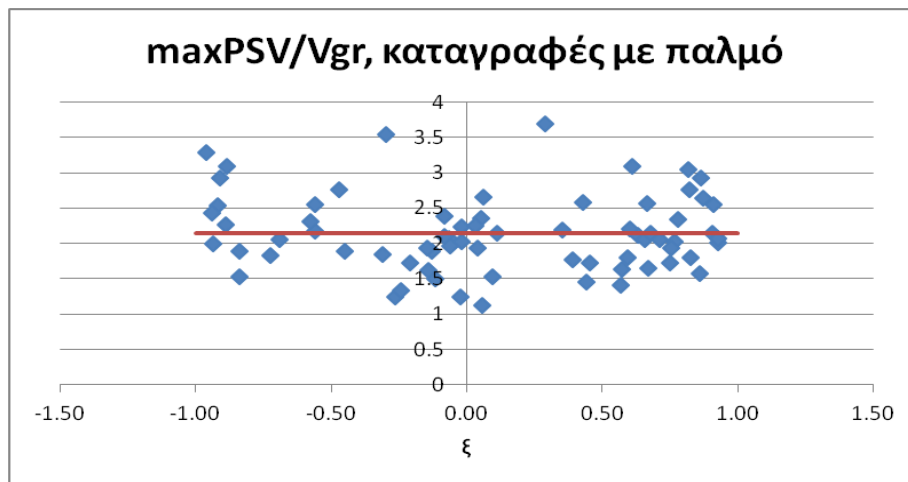


Δεδομένου ότι οι μέγιστες φασματικές τιμές διαιρούνται με τις αντίστοιχες φασματικές έπρεπε να κανονικοποιηθεί κατάλληλα το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού των μετακινήσεων. Προκειμένου να γίνει αυτό υπολογίστηκε η εδαφική τιμή μετακίνησης όπως αυτή δίνεται από τον κανονισμό, και συγκεκριμένα  $dg=0.025a_gST_cT_D$ . Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 καταλήγουμε στην εδαφική μετακίνηση σε αρκετές μεγάλες περιόδους κάτι που μας επιτρέπει να θεωρήσουμε ότι η εδαφική μετακίνηση αντιστοιχεί σε περιόδους μεγαλύτερες των 30sec. Η κάθε τιμή του EC8 για κάθε καταγραφή στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζεται με ένα σημείο, το οποίο προέκυψε με την εξής διαδικασία:

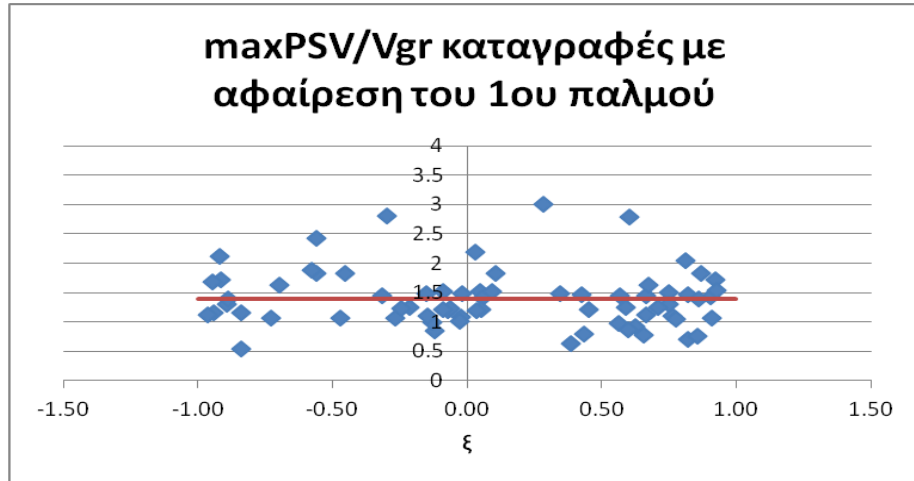
- Υπολογίστηκε η ελαστική φασματική τιμή επιτάχυνσης σχεδιασμού για την περίοδο στην οποία η καταγραφή λαμβάνει την μέγιστη φασματική τιμή της και διαιρέθηκε με το αντίστοιχο  $\omega^2$ .
- Οι παραπάνω τιμές κανονικοποιήθηκαν διαιρημένες με την εδαφική μετακίνηση dg.

Στα παρακάτω σχήματα δίνονται τα εξαγόμενα διαγράμματα για τα φάσματα ψευδο-ταχύτητας και τα φάσματα μετακίνησης.

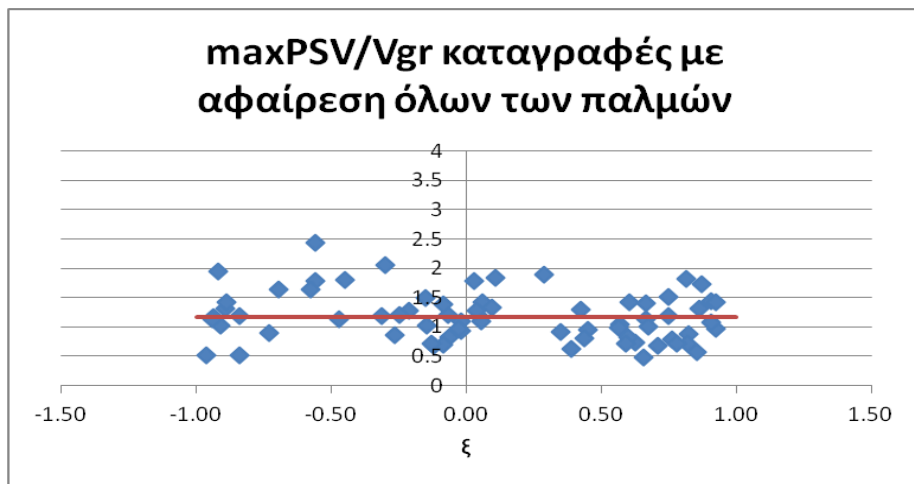
#### Ελαστικά φάσματα ταχύτητας



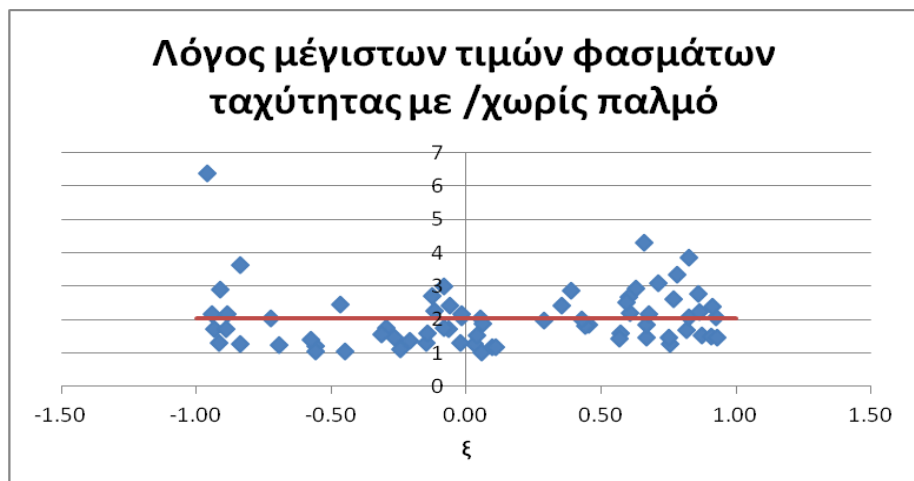
(α)



(β)



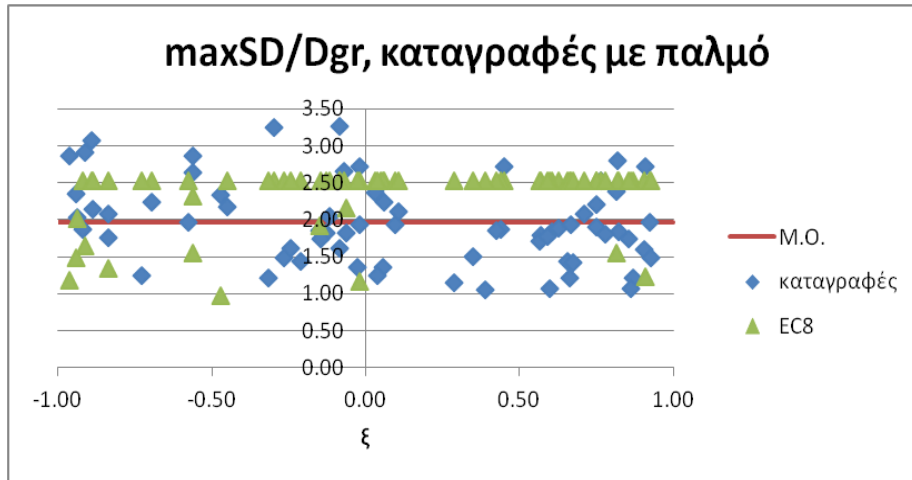
(γ)



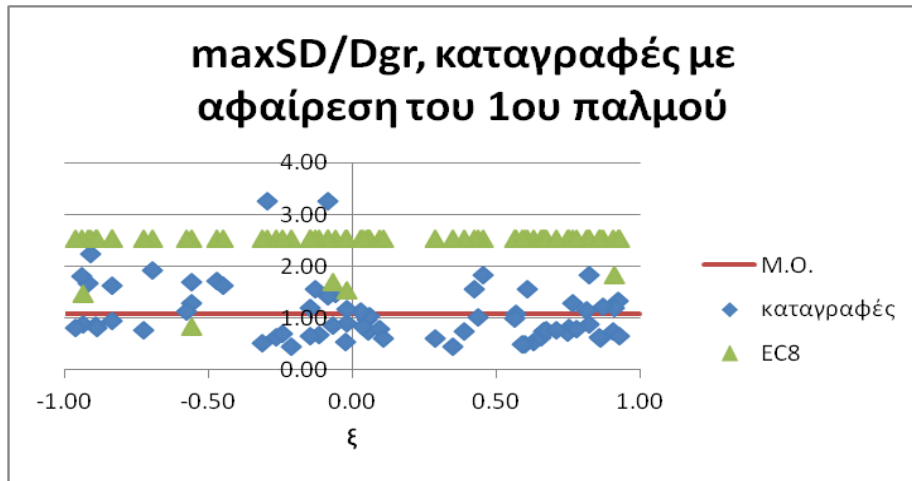
(δ)

**Σχήμα 8.12:** Φασματική επαύξηση ταχύτητας για απόσβεση 5% συναρτήσει του συντελεστή κατευθυντικότητας  $\xi$ , α) αρχική καταγραφή, β) καταγραφή με αφαίρεση 1<sup>ου</sup> παλμού, γ) καταγραφή με αφαίρεση όλων των παλμών, δ) λόγος φασμάτων

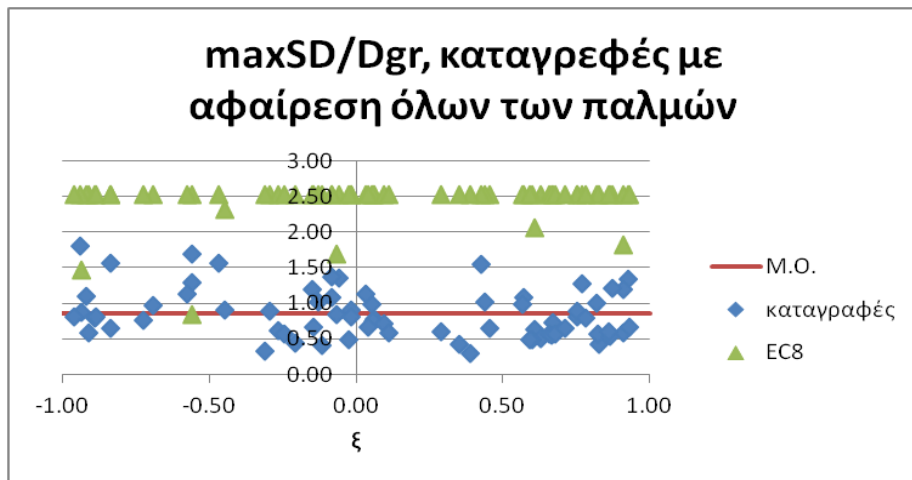
Ελαστικά φάσματα μετακίνησης



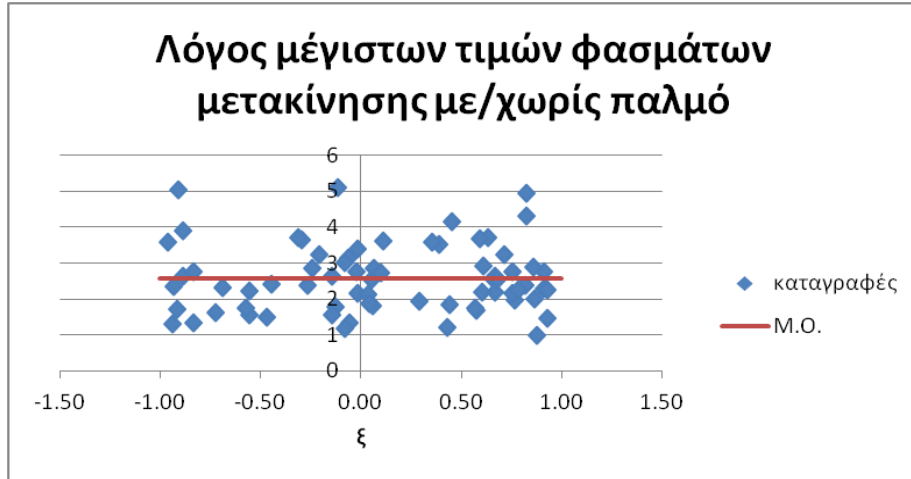
(α)



(β)



(γ)



(δ)

**Σχήμα 8.13:** Φασματική επαύξηση μετακίνησης για απόσβεση 5% συναρτήσει του συντελεστή κατευθυντικότητας  $\xi$ , α) αρχική καταγραφή, β) καταγραφή με αφαίρεση 1<sup>ου</sup> παλμού, γ) καταγραφή με αφαίρεση όλων των παλμών, δ) λόγος φασμάτων

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές ότι ο συντελεστής κατευθυντικότητας  $\xi$  δεν συσχετίζεται με την επαύξηση που προκαλείται από τους παλμούς κατευθυντικότητας ούτε στα φάσματα ψευδο-ταχύτητας, ούτε στα φάσματα μετακίνησης. Αξίζει να τονιστεί ότι ο συντελεστής  $\xi$  λαμβάνει θετικές τιμές στις περιπτώσεις έμπροσθεν κατευθυντικότητας και αρνητικές στην όπισθεν κατευθυντικότητα. Παραταύτα, ενώ οι καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν είναι παλμικές με έμπροσθεν κατευθυντικότητα, ο συντελεστής κατευθυντικότητας είναι θετικός σε ποσοστό 54% των καταγραφών, κάτι που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο συντελεστής  $\xi$  δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης ύπαρξης παλμού σε μια σεισμική εδαφική κίνηση.

Σε ότι αφορά στον κανονισμό και συγκεκριμένα στις τιμές του EC8, παρατηρούμε ότι τα αντίστοιχα σημεία των διαγραμμάτων καλύπτουν επαρκώς τις καταγραφές, συμπεραίνοντας ότι το φάσμα μετακινήσεων του EC8 επαρκεί στις συγκεκριμένες περιπτώσεις εδαφικής κίνησης.

### 8.3.5 Ολοκλήρωμα της απόλυτης εδαφικής ταχύτητας CAD

Η μέχρι τώρα πραγματοποιούμενη διερεύνηση απέδειξε ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της φασματικής επαύξεσης και των φυσικών και αζιμουθιακών χαρακτηριστικών των καταγραφών. Στην παρούσα ενότητα διερευνάται η σημασία του ολοκληρώματος της απόλυτης εδαφικής ταχύτητας CAD και συγκεκριμένα επικεντρωνόμαστε στο κατά πόσον ο λόγος της μέγιστης φασματικής τιμής μετακίνησης μια καταγραφής για μηδενική απόσβεση προς την τιμή του CAD μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης ύπαρξης παλμού.

Ο συντελεστής CAD ορίστηκε στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, υπενθυμίζονται όμως τα σημαντικά σημεία που μας οδήγησαν στην περαιτέρω διερεύνηση με τη χρήση της συγκεκριμένης παραμέτρου.

Ο συντελεστής CAD ορίζεται ως το ολοκλήρωμα της απόλυτης εδαφικής ταχύτητας και συγκεκριμένα:

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

Ας θεωρήσουμε μια αρμονική εδαφική κίνηση με πλάτος  $d_{g,max}$ , η οποία εφαρμόζεται ως ταλάντωση στη βάση ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή. Στο συντονισμό, το πλάτος της απόκρισης της ταλάντωσης είναι σχεδόν γραμμικό με τον αριθμό των κύκλων και για μια διέγερση  $\gamma$  κύκλων η μέγιστη απόκριση είναι (Clough and Penzien 1975):

$$S_{d,0}(T_{res}) = \pi \gamma d_{g,max} \quad (2)$$

Από την άλλη πλευρά η τιμή του CAD στο τέλος του  $\gamma$  κύκλου της αρμονικής διέγερσης είναι:

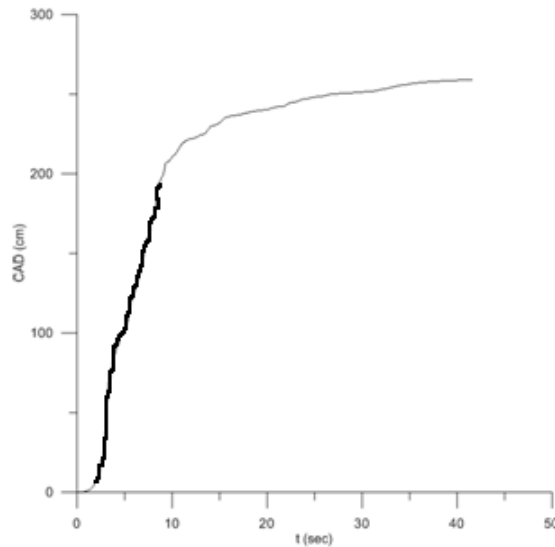
$$CAD = 4\gamma d_{g,max} \quad (3)$$

Ως εκ τούτου, για μια αρμονική διέγερση  $\gamma$  κύκλων υπάρχει μια σταθερή σχέση μεταξύ της φασματικής μετακίνησης για μηδενική απόσβεση στο συντονισμό και του CAD, το οποίο μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

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

Η εξίσωση (4) μας οδηγεί σε μια πολύ σημαντική θεώρηση που μένει να αποδειχτεί. Οι καταγραφές με παλμό κατευθυντικότητας στη χρονοϊστορία ταχύτητας τους θα έχουν λόγο μέγιστης φασματικής τιμής για μηδενική απόσβεση προς CAD περίπου ίσο με  $\pi/4$  ή 0.785. Στην περίπτωση που μια τέτοια λογική έχει υπαρκτή βάση, θα μπορούσε ο παραπάνω λόγος να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης ύπαρξης παλμού σε μια σεισμική εδαφική κίνηση.

Εάν σε μια παλμική καταγραφή σχεδιάσουμε το διάγραμμα του CAD συναρτήσει του χρόνου παρατηρούμε ότι σχηματίζεται με περιοχή έντονης κλίσης. Η περιοχή αυτή αντιστοιχεί στο CAD του παλμού και όσο πιο έντονη είναι η κλίση, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια που απελευθερώνεται. Στον λόγο  $\max SD/CAD$ , χρησιμοποιείται η τιμή του CAD του τμήματος της έντονης κλίσης.



**Σχήμα 8.14:** Διάγραμμα CAD για μια παλμική καταγραφή. Με έντονη μαύρη γραμμή απεικονίζεται το κομμάτι που αντιστοιχεί στον παλμό.

Για τις 90 καταγραφές του Baker (2007) που χαρακτηρίζονται ως παλμικές υπολογίζεται μέσω ενός προγράμματος σε γλώσσα Fortran το CAD και εξάγονται τα ελαστικά φάσματα μετακίνησης για μηδενική απόσβεση. Οι μέγιστες φασματικές τιμές για κάθε καταγραφή διαιρούνται με την αντίστοιχη τιμή του CAD και έχουμε τον λόγο  $\max SD_{0\%}/CAD$  για κάθε έναν σεισμό.

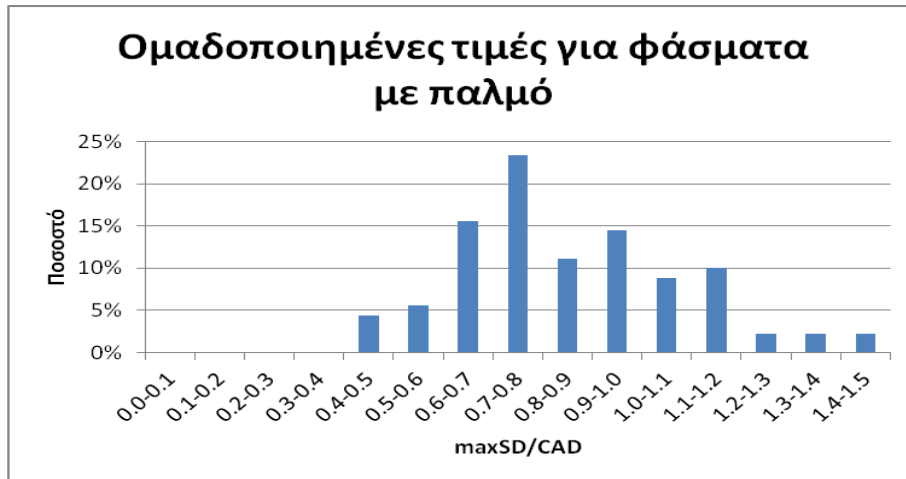
Προκειμένου να αποδείξουμε ότι ο λόγος  $\max SD_{0\%}/CAD$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης ύπαρξης παλμού σε μια καταγραφή, χρησιμοποιούμε 43 καταγραφές από τη βάση δεδομένων της NGA οι οποίες δεν θεωρούνται παλμικές σύμφωνα με τα κριτήρια του Baker. Είναι σημαντικό οι μη παλμικές καταγραφές να πληρούν το κριτήριο της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας, δηλαδή η PGV να είναι μεγαλύτερη από 30cm/sec προκειμένου να αποφύγουμε τους μικρού μεγέθους σεισμούς που μπορεί να δημιουργούν παλμό στη χρονοϊστορία της ταχύτητας.

Οι καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν και οι τιμές των λόγων που υπολογίστηκαν δίνονται στο παράρτημα της μεταπτυχιακής εργασίας.

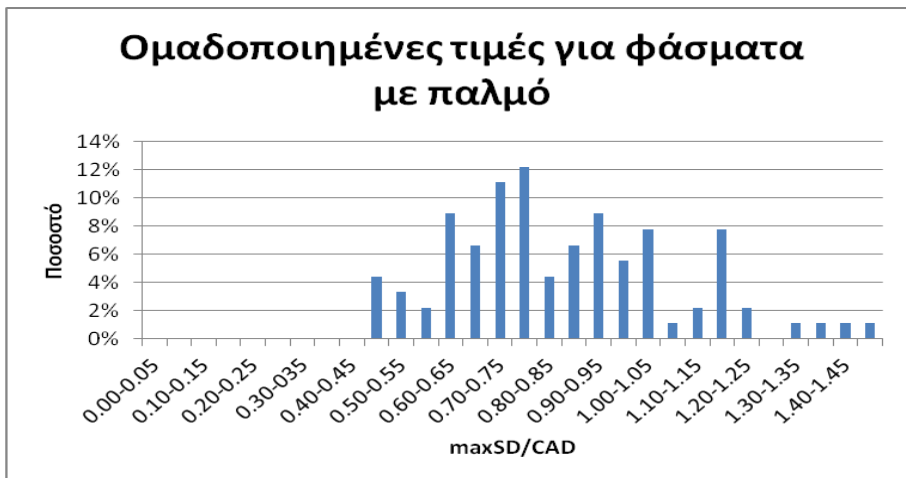
Για το σύνολο των καταγραφών εξάγουμε τα ιστογράμματα και τις αθροιστικές καμπύλες προκειμένου να οδηγηθούμε στα συμπεράσματά μας.

## Καταγραφές με παλμό

Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι αθροιστικές κατανομές, τα ιστογράμματα και τα διαγράμματα με ομαδοποίηση των τιμών για τις 90 παλμικές καταγραφές.



(α)

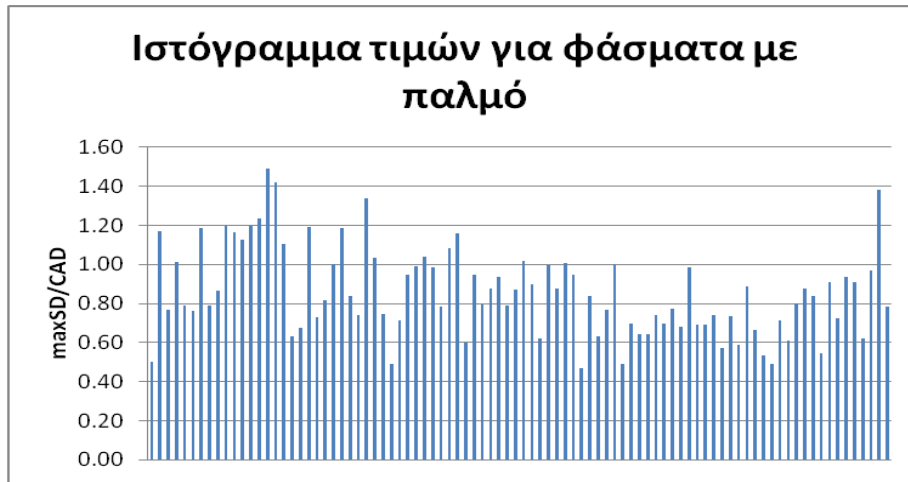


(β)

**Σχήμα 8.15:** Ποσοστά εμφάνισης των παλμικών καταγραφών ανά ομάδα τιμών του λόγου  $\max SD_0\%/CAD$  με α)βήμα 0.1, β)με βήμα 0.05

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η ελάχιστη τιμή του λόγου  $\max SD_0\%/CAD$  ανήκει στο εύρος των τιμών 0.40 με 0.45 ενώ η μέγιστη στο 1.40-1.50. Ειδικότερα η μέγιστη τιμή είναι 1.49 και η ελάχιστη 0.47. Ο μέσος όρος των τιμών είναι 0.86 με μια τυπική απόκλιση 0.23. Παρατηρούμε ότι η πλειοψηφία των τιμών βρίσκονται κοντά στην τιμή 0.785 δηλαδή στην τιμή  $\pi/4$  που αποδείξαμε θεωρητικά. Το μεγαλύτερο μάλιστα ποσοστό των τιμών βρίσκονται ανάμεσα στο εύρος 0.70-0.80 και φαίνεται να ακολουθούν μια κανονική κατανομή με κέντρο την μέση τιμή τους.

Στο ιστόγραμμα που ακολουθούν δίνονται οι τιμές του λόγου για κάθε μεμονωμένη καταγραφή.



Σχήμα 8.16: Ιστόγραμμα τιμών του λόγου  $maxSD/CAD$  για τις παλμικές καταγραφές

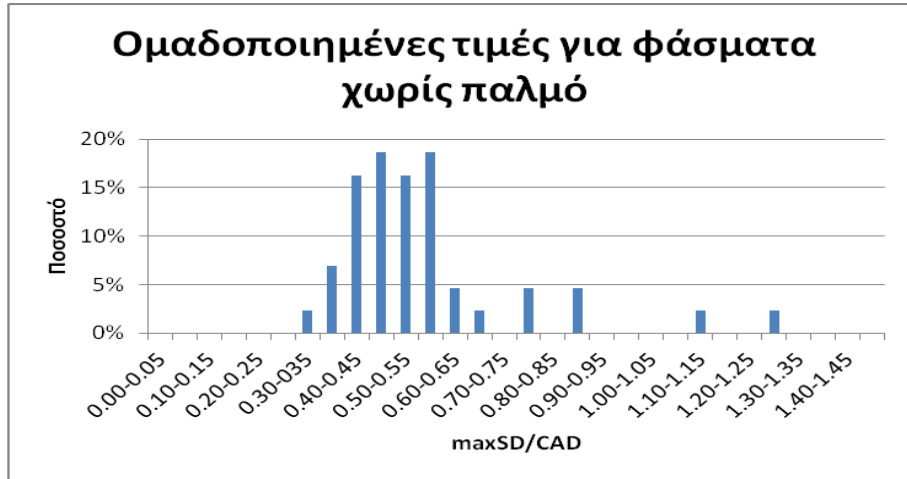
#### Καταγραφές χωρίς παλμό

Στα παρακάτω σχήματα δίνονται και τα αντίστοιχα διαγράμματα για τις μη παλμικές καταγραφές από τη βάση δεδομένων της NGA.



(α)



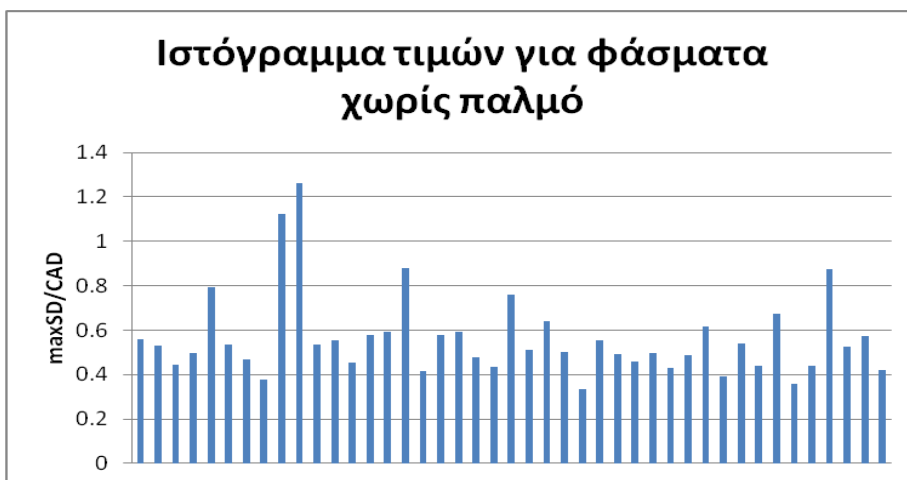


(β)

**Σχήμα 8.17:** Ποσοστά εμφάνισης των μη παλμικών καταγραφών ανά ομάδα τιμών του λόγου  $\max SD/CAD$  με α) βήμα 0.1, β) με βήμα 0.05

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η ελάχιστη τιμή του λόγου  $\max SD_{0\%}/CAD$  ανήκει στο εύρος των τιμών 0.30 με 0.40 ενώ η μέγιστη στο 1.20-1.30. Ειδικότερα η μέγιστη τιμή είναι 1.26 και η ελάχιστη 0.33. Οι πολύ μεγάλες βέβαια τιμές αμφισβητούνται για το κατά πόσον είναι παλμικές. Ο μέσος όρος των τιμών είναι 0.56 με μια τυπική απόκλιση 0.18. Το μεγαλύτερο μάλιστα των τιμών βρίσκονται ανάμεσα στο εύρος 0.40-0.60, συγκεκριμένα το 60% και φαίνεται και σε αυτήν την περίπτωση να ακολουθούν μια κανονική κατανομή με κέντρο την μέση τιμή τους.

Στο ιστόγραμμα που ακολουθούν δίνονται οι τιμές του λόγου για κάθε μεμονωμένη καταγραφή.

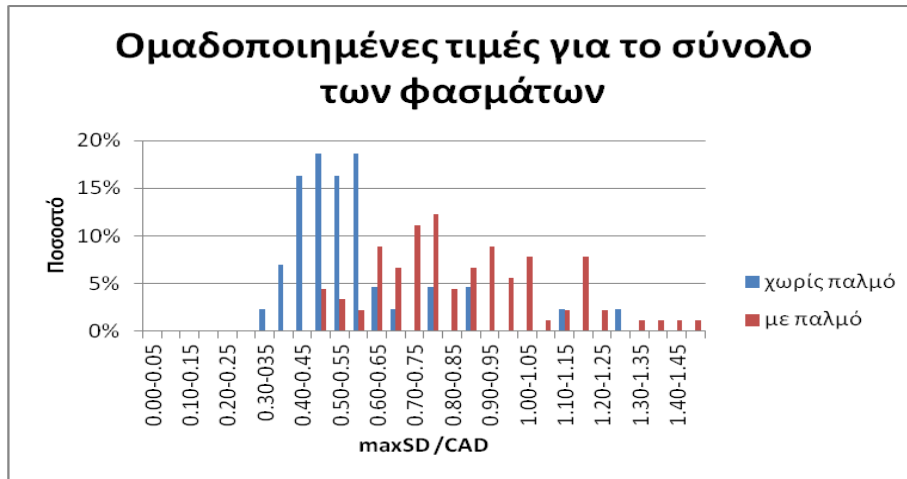


**Σχήμα 8.18:** Ιστόγραμμα τιμών του λόγου  $\max SD/CAD$  για τις μη παλμικές καταγραφές

### Συγκεντρωτικά διαγράμματα και πίνακες

Στα παρακάτω διαγράμματα γίνεται σύγκριση των τιμών των παλμικών καταγραφών και των καταγραφών χωρία παλμό στη χρονοϊστορία ταχύτητας τους σύμφωνα με τον Baker (2007)

Συγκεκριμένα παρουσιάζεται το διάγραμμα με τις ομαδοποιημένες τιμές και τα ποσοστά εμφάνισης των καταγραφών για κάθε κλάση.



**Σχήμα 8.19:** Ποσοστά εμφάνισης των παλμικών και μη παλμικών καταγραφών ανά ομάδα τιμών του λόγου maxSD/CAD

Παρατηρούμε ότι υπάρχει ένας σαφής διαχωρισμός στις τιμές του λόγου για τις παλμικές και τις μη παλμικές κινήσεις. Συγκεκριμένα οι παλμικές λαμβάνουν αρκετά μεγαλύτερες τιμές, ε μια περιοχή όμως αλληλοεπικάλυψης κυρίως στα εύρη τιμών 0.45-0.65. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι μια τιμή με λόγο μικρότερο από 0.45 δεν έχει παλμό στη χρονοϊστορία ταχύτητας ενώ αντίστοιχα μια καταγραφή με λόγο μεγαλύτερο από 0.75 μπορεί να θεωρηθεί παλμική. Ιδιαίτερη προσοχή θα δοθεί στη συνέχεια για τις μη παλμικές κινήσεις που δίνουν τιμές του λόγου μεγαλύτερες από 0.75 και ειδικά στις δύο καταγραφές που δίνουν μοναδιαίες τιμές.

Τα παραπάνω συμπεράσματα μπορούν να γίνουν περισσότερο κατανοητά και στα σχήματα που ακολουθούν.

Ειδικότερα στις αθροιστικές καμπύλες παρατηρούμε ότι η καμπύλη των καταγραφών χωρία παλμό είναι τοποθετημένη αριστερά σε θέση με την καμπύλη των καταγραφών με παλμό, κάτι που είναι αναμενόμενο. Το 80% των μη παλμικών καταγραφών δίνουν λόγους κάτω από το 0.6, ενώ το 80% των παλμικών λαμβάνουν τιμές μεγαλύτερες από την τιμή αυτή. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στα ποσοστά των τιμών που είναι μικρότερες ή υπερβαίνουν την θεωρητική τιμή του λόγου  $\pi/4$ . Συγκεκριμένα, το 50% των παλμικών καταγραφών υπερβαίνει την τιμή  $\pi/4$ , ενώ το 70% σχεδόν των μη παλμικών καταγραφών είναι κάτω από αυτή.



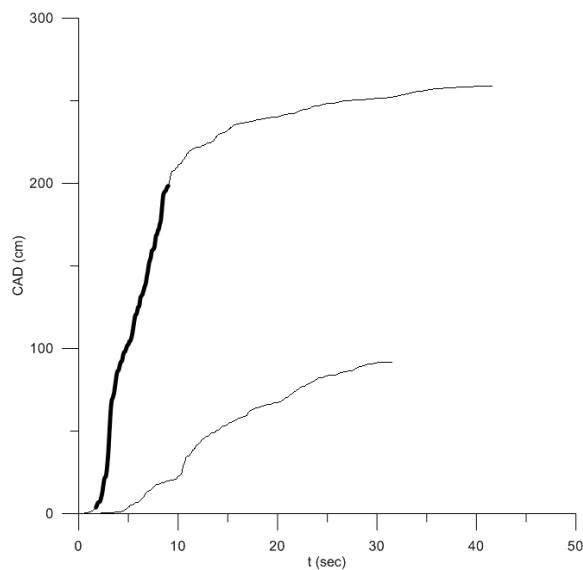
**Σχήμα 8.20:** Αθροιστικές καμπύλες των παλμικών και μη παλμικών καταγραφών ανά ομάδα τιμών του λόγου  $\max SD/CAD$

Στη συνέχεια δίνεται ο πίνακας 8.5 στον οποίο συγκεντρώνονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των λόγων  $\max SD_{0\%}/CAD$  για τις παλμικές και μη καταγραφές.

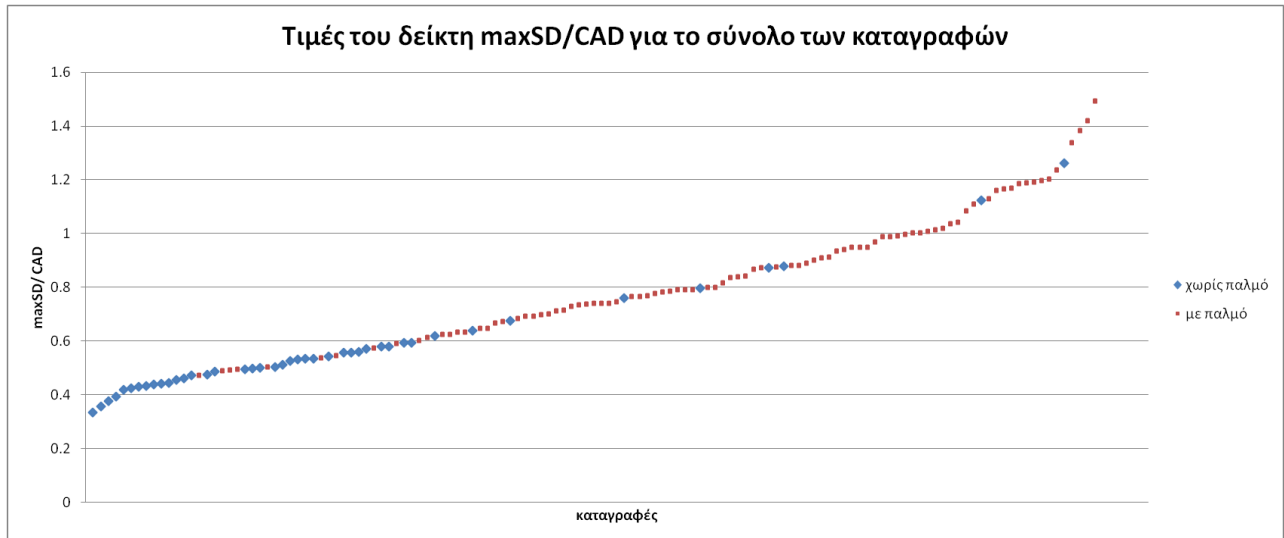
Καταγραφές	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
Παλμικές	0.86	0.23
Μη παλμικές	0.56	0.18

**Πίνακας 8.5:** Μέση τιμή των τιμών  $\max SD/CAD$  για τις παλμικές και μη παλμικές καταγραφές.

Στην περίπτωση των μη παλμικών κινήσεων αναμένουμε στο διάγραμμα του CAD συναρτήσει του χρόνου η κλίση της καμπύλης να είναι αρκετά μικρότερη συγκριτικά με την αντίστοιχη για μια καταγραφή με παλμό στη χρονοϊστορία ταχύτητας. Στο παρακάτω διάγραμμα μπορούμε ενδεικτικά να δούμε το διάγραμμα του CAD για μια μη παλμική καταγραφή.



**Σχήμα 8.21:** Διάγραμμα CAD για μια παλμική και μη παλμική καταγραφή. Με έντονη μαύρη γραμμή απεικονίζεται το κομμάτι που αντιστοιχεί στον παλμό της παλμικής καταγραφής.

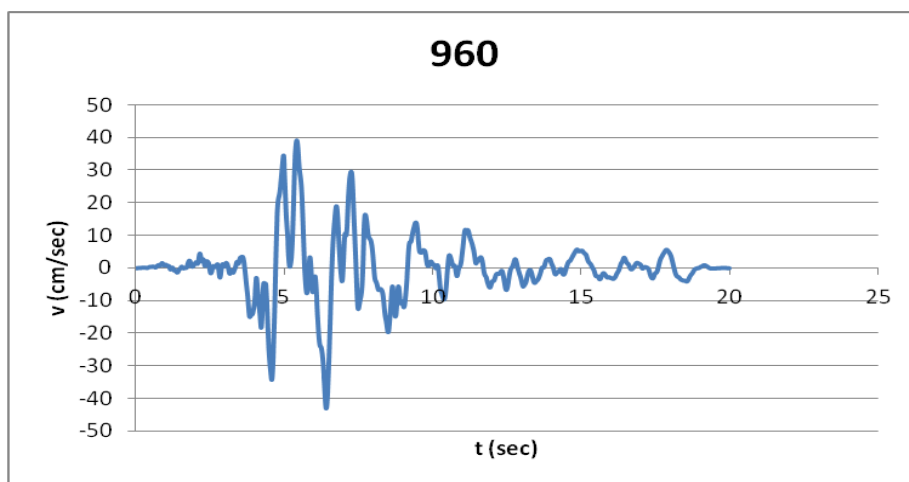


**Σχήμα 8.22:** Τιμές του λόγου  $\max SD/CAD$  για το σύνολο των καταγραφών

Το παραπάνω διάγραμμα καθιστά ακόμη πιο εμφανή τα μέχρι τώρα συμπεράσματα, καθώς φαίνεται να υπάρχει συσσώρευση των παλμικών και μη παλμικών καταγραφών σε συγκεκριμένες περιοχές του λόγου  $\max SD/CAD$  ενώ παράλληλα βλέπουμε και την περιοχή αλληλοεπικάλυψης.

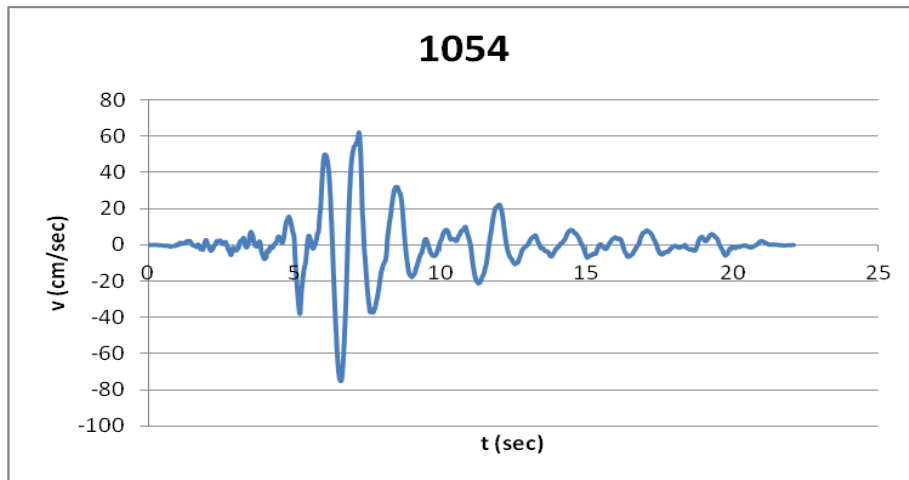
Στο σημείο αυτό ακολουθεί περαιτέρω διερεύνηση των καταγραφών που χαρακτηρίζονται ως μη παλμικές από τον Baker αλλά παρουσιάζουν λόγο  $\max SD/CAD$  μεγαλύτερο του 0.6. Οι καταγραφές αυτές είναι οι 960, 1054, 1077, 1116 και 1231 της βάσης δεδομένων NGA. Για κάθε μία από αυτές τις καταγραφές θα ελέγξουμε τις ιστορίες ταχύτητας για να διαπιστώσουμε εάν έχουν ή όχι παλμό κατευθυντικότητας.

### Καταγραφή 960 (λόγος 0.78)



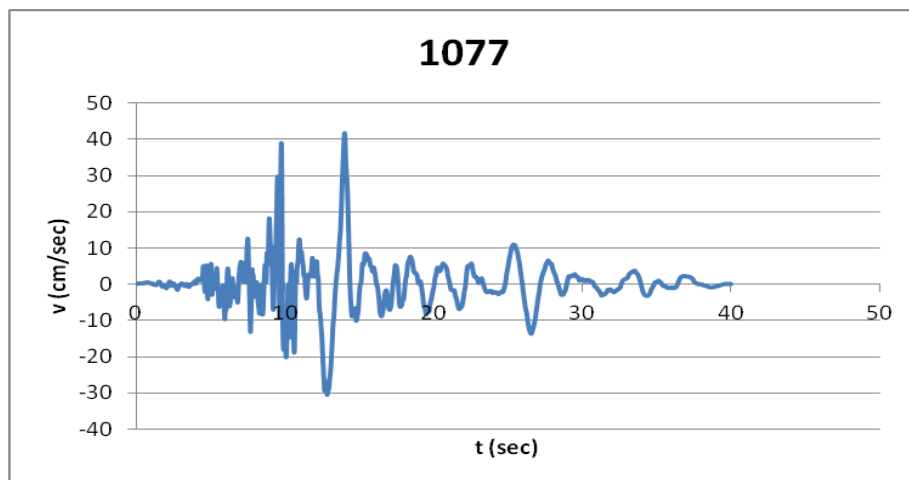
**Σχήμα 8.23:** Χρονοϊστορία ταχύτητας καταγραφής 960

**Καταγραφή 1054 (λόγος 1.12)**

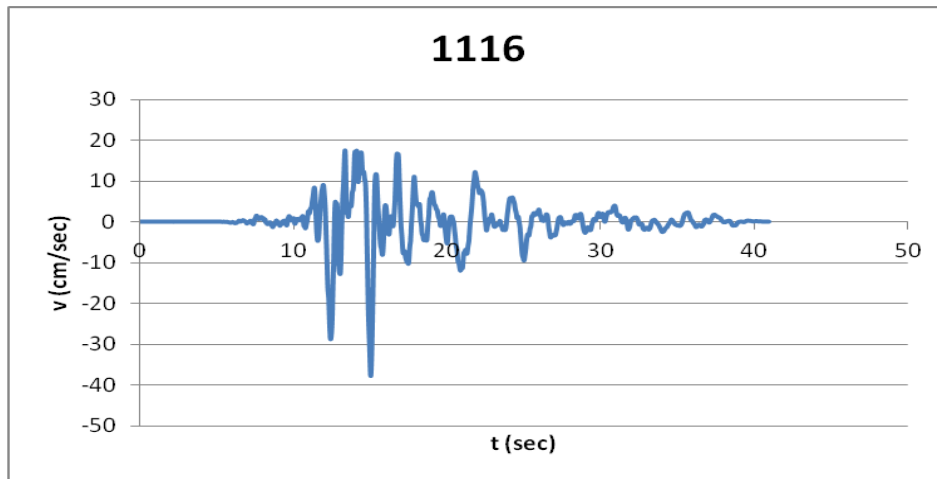
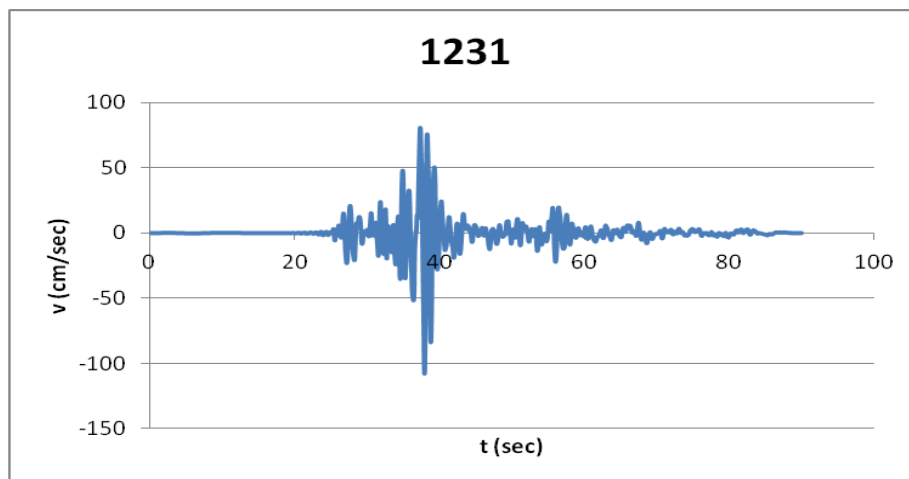


*Σχήμα 8.24: Χρονοϊστορία ταχύτητας καταγραφής 1054*

**Καταγραφή 1077 (λόγος 1.26)**



*Σχήμα 8.25: Χρονοϊστορία ταχύτητας καταγραφής 1077*

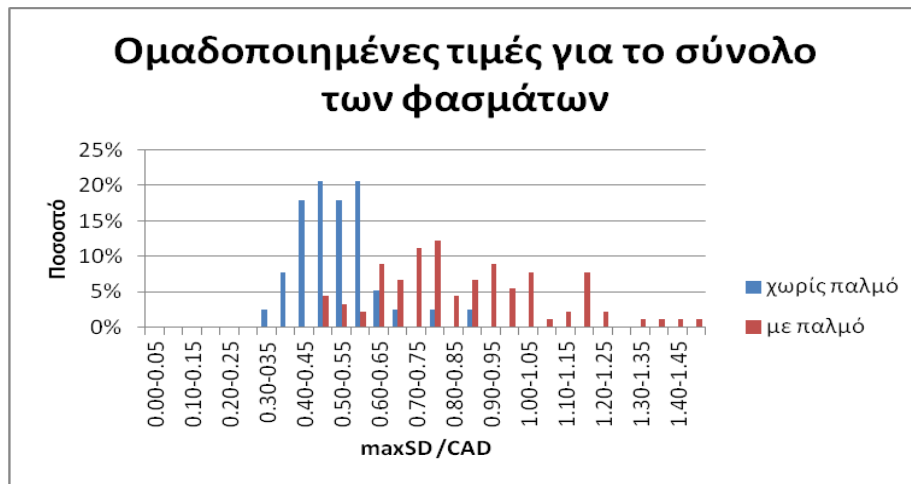
**Καταγραφή 1116 (λόγος 0.88)***Σχήμα 8.26: Χρονοϊστορία ταχύτητας καταγραφής 1116***Καταγραφή 1231 (λόγος 0.76)***Σχήμα 8.27: Χρονοϊστορία ταχύτητας καταγραφής 1116*

Από τις παραπάνω χρονοϊστορίες παρατηρούμε ότι οι καταγραφές 960, 154, 1077 και 1116 έχουν παλμό ο οποίος μάλιστα δεν φτάνει αργά στη χρονοϊστορία ταχύτητας. Το κριτήριο λοιπόν του Baker για τον χαρακτηρισμό μια κίνησης ως παλμικής ή μη επιδέχεται βελτιώσεις, ενώ για ακόμα μια φορά επιβεβαιώνουμε την αποτελεσματικότητα του λόγου  $\max SD/CAD$  ως δείκτη ύπαρξης παλμού. Αφαιρώντας αυτές τις καταγραφές από την ομάδα των μη παλμικών καταγραφών καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα.

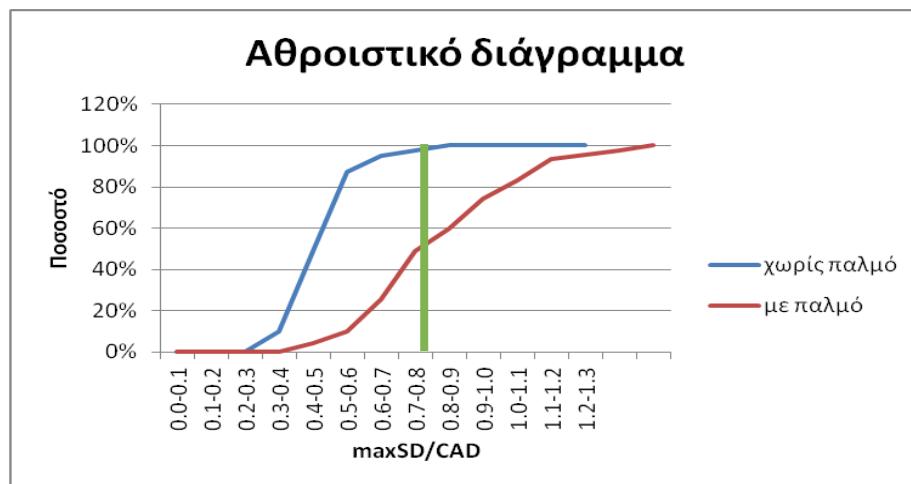
Καταγραφές	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
Παλμικές	0.86	0.23
Μη παλμικές	0.52	0.11

**Πίνακας 8.6:** Μέση τιμή των τιμών  $\max\text{SD}/\text{CAD}$  για τις παλμικές και μη παλμικές καταγραφές μετά την αφαίρεση των καταγραφών που αποδείχτηκαν παλμικές

Τα νέα διαγράμματα δίνονται στα επόμενα σχήματα



**Σχήμα 8.28:** Ποσοστά εμφάνισης των παλμικών και μη παλμικών καταγραφών ανά ομάδα τιμών του λόγου  $\max\text{SD}/\text{CAD}$  μετά την αφαίρεση των καταγραφών που αποδείχτηκαν παλμικές



**Σχήμα 8.29:** Αθροιστικές καμπύλες των παλμικών και μη παλμικών καταγραφών ανά ομάδα τιμών του λόγου  $\max\text{SD}/\text{CAD}$  μετά την αφαίρεση των καταγραφών που αποδείχτηκαν παλμικές

Παρατηρούμε ότι το νέο αθροιστικό διάγραμμα για τις μη παλμικές καταγραφές μετατοπίζεται προς τα αριστερά.

### 8.3.6. Ο ισόχρονος συντελεστής κατευθυντικότητας $\tilde{c}'$

Στο τελευταίο μέρος του παρόντος κεφαλαίου πραγματοποιείται μια αρχική διερεύνηση αναφορικά στην αποτελεσματικότητα του δείκτη  $\tilde{c}'$  ως συντελεστή κατευθυντικότητας, όπως αυτός ορίστηκε από τους Sprudich et al (2004) στην ισόχρονη θεωρία. Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο της παρούσας εργασίας δόθηκε ο ορισμός του συντελεστή και καθορίστηκε το εύρος τιμών του. Για τις περιπτώσεις έμπροσθεν κατευθυντικότητας λαμβάνει τιμές από 0.8 έως 4, ενώ στις περιπτώσεις όπισθεν κατευθυντικότητας η τιμή του συντελεστή βρίσκεται κοντά στο 0.44.

Για τις παλμικές και μη καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, ελέγχθηκαν τα εύρη τιμών του συντελεστή  $\tilde{c}'$ , ο οποίος δίνεται για κάθε μία καταγραφή στη βάση δεδομένων NGA flatfile. Όλες οι καταγραφές χωρίς κανέναν διαχωρισμό δίνουν τιμές του λόγου από 0.8 έως 4, ενώ και μη παλμικές καταγραφές πλησιάζουν την τιμή του 4. Συμπεραίνουμε λοιπόν σε ένα πρώτο στάδιο ότι ο λόγος  $\tilde{c}'$  δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης κατευθυντικότητας.



# Κεφάλαιο 9

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---



## Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της συσχέτισης των χαρακτηριστικών των σεισμών κοντινού πεδίου με παλμό στη χρονοϊστορία ταχύτητάς τους, με τα χαρακτηριστικά της κατευθυντικότητας. Αρχικά μελετήσαμε τη συσχέτιση με το μέγεθος του σεισμού, καθώς διεγέρσεις μεγαλύτερου μεγέθους αναμένουμε να δίνουν μεγαλύτερες τιμές φασματικής επαύξησης. Στη συνέχεια εστιάσαμε στα αζιμουθιακά χαρακτηριστικά και συγκεκριμένα στην κοντινότερη απόσταση από το ρήγμα (Closest Distance CID), και στον συντελεστή κατευθυντικότητας  $\xi$  ο οποίος εισήχθη από τον Rowshandel (2006) και εξαρτάται από τα γεωμετρικά και αζιμουθιακά χαρακτηριστικά του ρήγματος και της θέσης καταγραφής. Διερευνήθηκε ακόμη και η αποτελεσματικότητα του συντελεστή  $\xi$  ως δείκτης κατευθυντικότητας και ειδικότερα, ως δείκτης πρόβλεψης ύπαρξης παλμού στη χρονοϊστορία ταχύτητας μιας σεισμικής διέγερσης, για την οποία έχουμε όλες τις συντεταγμένες και τα γεωμετρικά στοιχεία του ρήγματος και της υπό μελέτη θέσης. Τελευταίο στάδιο της εργασίας ήταν η εισαγωγή ενός νέου δείκτη ύπαρξης παλμού, του λόγου της μέγιστης φασματικής τιμής μετακίνησης για μηδενική απόσβεση, ως προς το ολοκλήρωμα της απόλυτης εδαφικής ταχύτητας, CAD.

Για την επίτευξη των προαναφερθέντων στόχων εξήχθησαν τα ελαστικά φάσματα μετακίνησης και ψευδο-ταχύτητας για τις 90 καταγραφές της βάσης δεδομένων NGA, οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ως παλμικές από τον Baker με τη μέθοδο που εισήγαγε το 2007. Προκειμένου μια καταγραφή να θεωρείται παλμική πρέπει ο παλμός να μην φτάνει στο τέλος στη χρονοϊστορία ταχύτητας, η μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV να ξεπερνά τα 30cm/sec και οι τιμές του δείκτη πρόβλεψης παλμού P.I. του Baker (2007) να είναι μεγαλύτερες του 0.85.

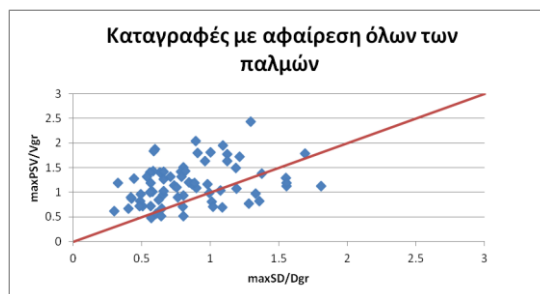
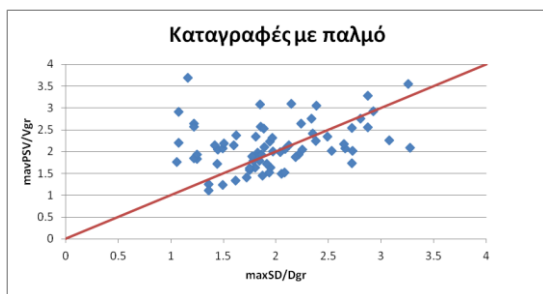
Οι παραπάνω καταγραφές υπέστησαν επεξεργασία σύμφωνα με τη μέθοδο προσδιορισμού των σημαντικών παλμών κατευθυντικότητας των ερευνητών Π. Μίμογλου, Ι. Ψυχάρη και Ι.Ταφλαμπά. Συγκεκριμένα, εντοπίστηκαν οι σημαντικοί παλμοί της κάθε καταγραφής και αφαιρέθηκε ο πρώτος και στη συνέχεια όλοι οι παλμοί από τη χρονοϊστορία ταχύτητας. Εξήχθησαν τα ελαστικά φάσματα ψευδο-ταχύτητας και μετακίνησης για απόσβεση 5% για τις καταγραφές με παλμό και για τις εναπομένουσες καταγραφές από την αφαίρεση του 1<sup>ου</sup> και όλων των σημαντικών παλμών. Ο υπολογισμός των φασμάτων έγινε με τη χρήση του προγράμματος Seismosignal. Υπολογίστηκαν οι λόγοι της μέγιστης φασματικής τιμής προς την αντίστοιχη εδαφική για κάθε περίπτωση και διερευνήθηκε η συσχέτιση του λόγου με το μέγεθος του σεισμού, της κοντινότερης από το ρήγμα απόστασης, της διάρκειας  $\gamma$  των παλμών και του συντελεστή κατευθυντικότητας  $\xi$ . Ο συντελεστής  $\xi$  υπολογίστηκε με τη χρήση ενός προγράμματος σε γλώσσα Fortran για κάθε διέγερση.

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας μελετήθηκε η αποτελεσματικότητα του λόγου της μέγιστης φασματικής τιμής μετακίνησης για μηδενική απόσβεση ως προς το ολοκλήρωμα της απόλυτης εδαφικής ταχύτητας CAD ως δείκτης πρόβλεψης παλμού. Ειδικότερα για τις 90 παλμικές καταγραφές του Baker και για 43 μη παλμικές καταγραφές από τη βάση δεδομένων της NGA με PGV μεγαλύτερη των 30cm/sec, υπολογίστηκε ο λόγος  $\max SD/CAD$  και σχεδιάστηκαν τα κατάλληλα διαγράμματα προκειμένου να οδηγηθούμε στα επιθυμητά αποτελέσματα. Θεωρητική αφορμή αποτέλεσε το γεγονός ότι σε μια αρμονική διέγερση μονοβάθμιου συστήματος, ο λόγος της φασματικής μετακίνησης για μηδενική απόσβεση στο συντονισμό, ως προς την τιμή του CAD δίνει σταθερή τιμή και συγκεκριμένα ισούται με  $\pi/4$  ή αλλιώς 0.785.

Μετά το πέρας των αναλύσεων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων καταλήξαμε στα κάτωθι συμπεράσματα τα οποία παρουσιάζονται συνοδευόμενα από τα κατάλληλα σχήματα.

#### **Λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική**

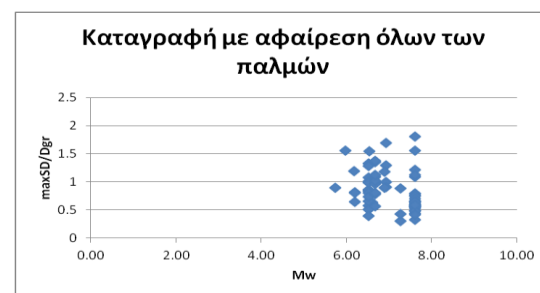
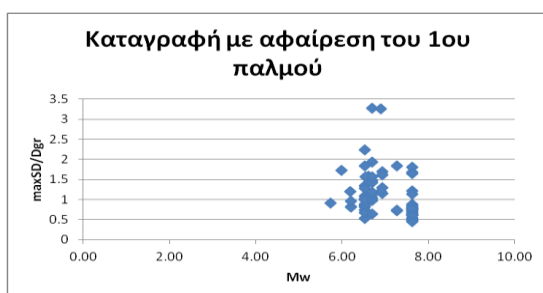
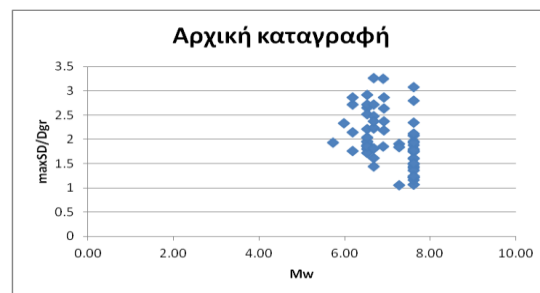
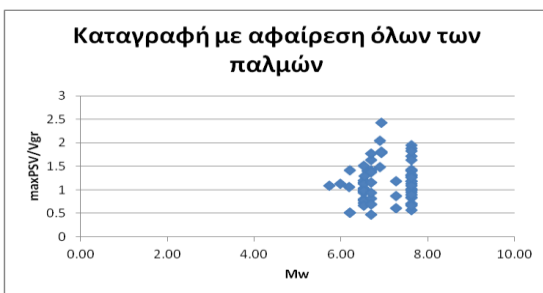
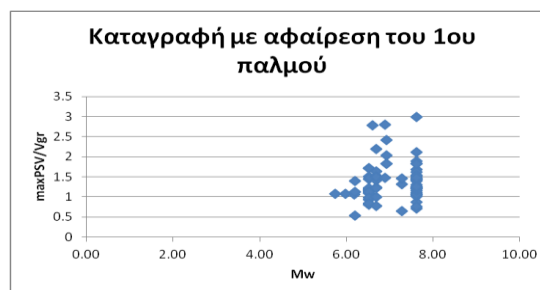
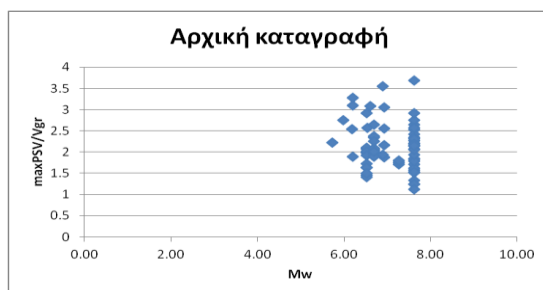
- Στα ελαστικά φάσματα ταχύτητας των παλμικών κινήσεων για απόσβεση 5%, ο μέσος όρος του λόγου της μέγιστης φασματικής ταχύτητας προς την εδαφική είναι ίσος με 2.14 ενώ μειώνεται με την αφαίρεση του πρώτου σημαντικού παλμού σε 1.40, ως προς την αρχική εδαφική ταχύτητα. Μετά την αφαίρεση όλων των παλμών από τη χρονοϊστορία ταχύτητας ο λόγος πέφτει ακόμα περισσότερο και ο λόγος λαμβάνει την τιμή 1.17.
- Στα ελαστικά φάσματα μετακίνησης των παλμικών κινήσεων για απόσβεση 5%, ο μέσος όρος του λόγου της μέγιστης φασματικής ταχύτητας προς την εδαφική είναι ίσος με 1.97 ενώ μειώνεται με την αφαίρεση του πρώτου σημαντικού παλμού σε 1.08, ως προς την αρχική εδαφική μετακίνηση. Μετά την αφαίρεση όλων των παλμών από τη χρονοϊστορία ταχύτητας ο λόγος πέφτει ακόμα περισσότερο και ο λόγος λαμβάνει την τιμή 0.85 κάτι που σημαίνει ότι ο παλμός αντιστοιχεί σε τόσο μεγάλο κομμάτι της χρονοϊστορίας ώστε η εναπομένουσα καταγραφή να δίνει φασματικές τιμές κάτω από την τιμή της αρχικής εδαφικής μετακίνησης.
- Οι λόγοι της μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική των φασμάτων ψευδοταχύτητας και μετακίνησης ακολουθούν την ευθεία  $y = x$  πριν την αφαίρεση των παλμών, ενώ απλώνονται ελαφρά με την αφαίρεση όλων των σημαντικών παλμών από τη χρονοϊστορία ταχύτητας των καταγραφών.



- Ο λόγος της μέγιστης φασματικής τιμής ψευδοταχύτητας πριν και μετά την αφαίρεση όλων των παλμών είναι σχεδόν ίδιος με τον λόγο των μέγιστων φασματικών τιμών μετακίνησης και είναι 2.04 και 2.57 αντίστοιχα. Θα μπορούσαν οι τιμές αυτές να συσχετιστούν με τον συντελεστή 2.5 των Newmark & Hall, 1969, McGuire, (1975) που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ενεργής φασματικής τιμής.

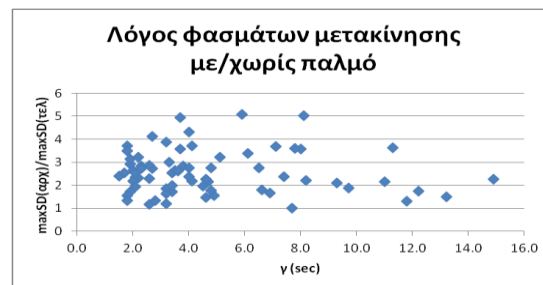
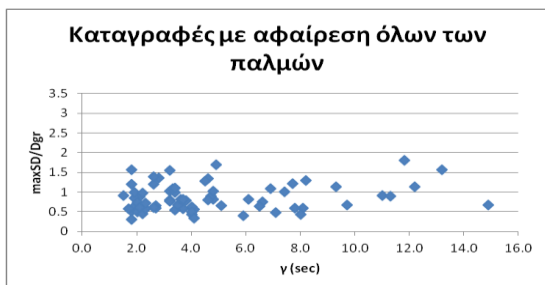
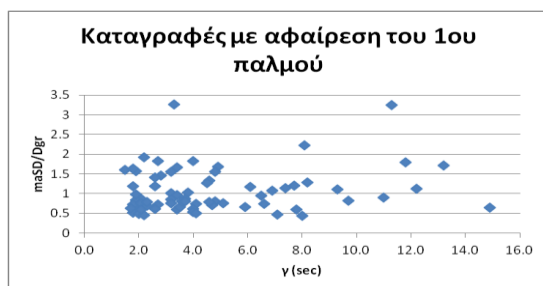
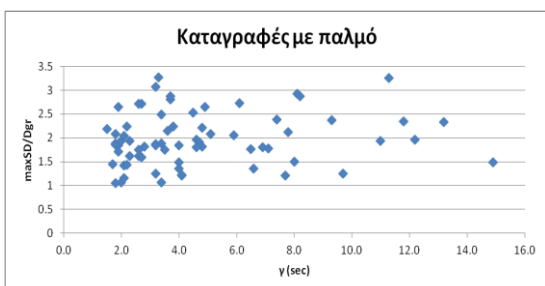
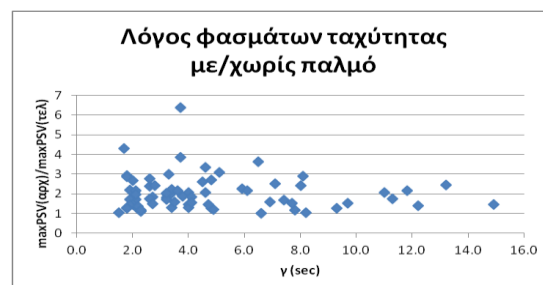
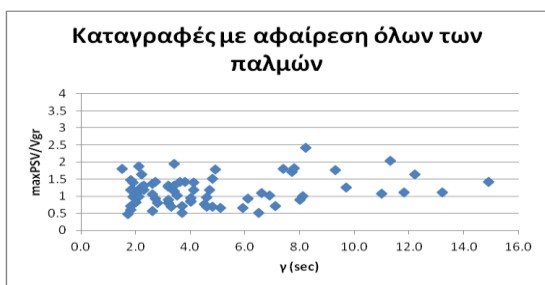
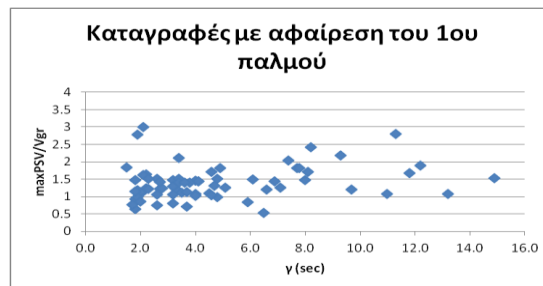
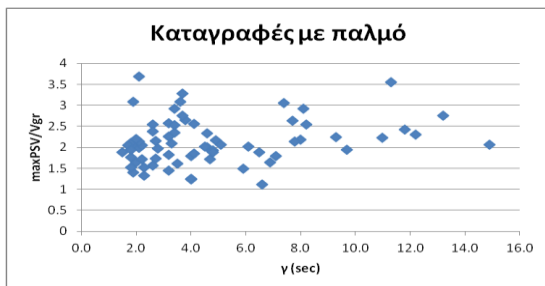
### Μέγεθος του σεισμού $M_w$ και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική

- Ο λόγος της μέγιστης φασματικής τιμής, προς την εδαφική, τόσο για τα φάσματα ταχύτητας, όσο και για τα φάσματα μετακίνησης πριν και μετά την αφαίρεση του παλμού, είναι ανεξάρτητος του μεγέθους του σεισμού.



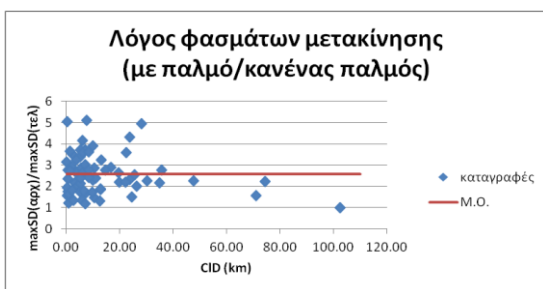
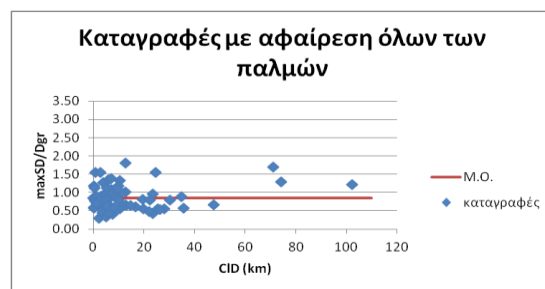
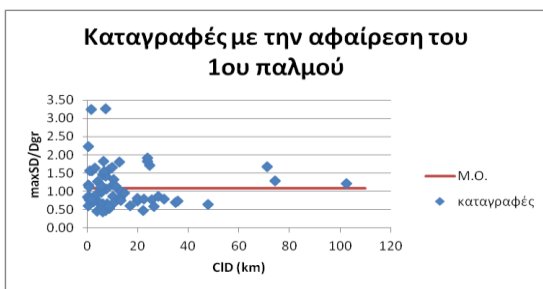
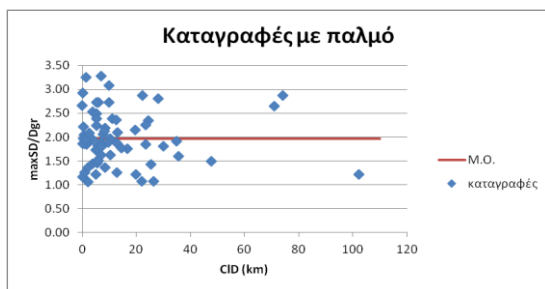
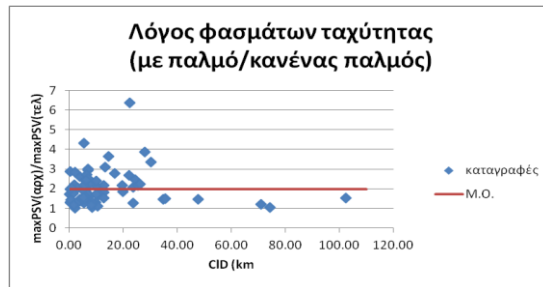
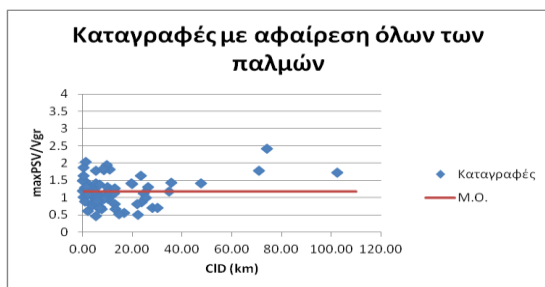
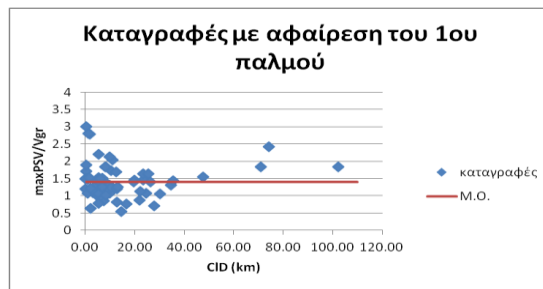
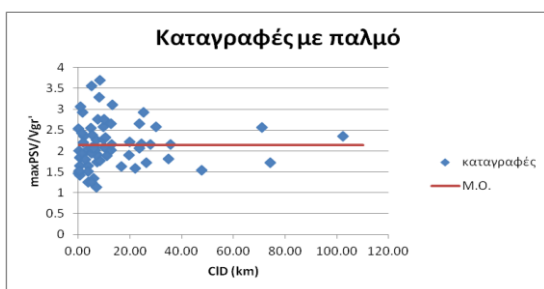
Χρονική διάρκεια παλμών  $\gamma$  και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική

- Ο λόγος της μέγιστης φασματικής τιμής, προς την εδαφική, τόσο για τα φάσματα ταχύτητας, όσο και για τα φάσματα μετακίνησης πριν και μετά την αφαίρεση του παλμού, είναι ανεξάρτητος της διάρκειας  $\gamma$  των παλμών.



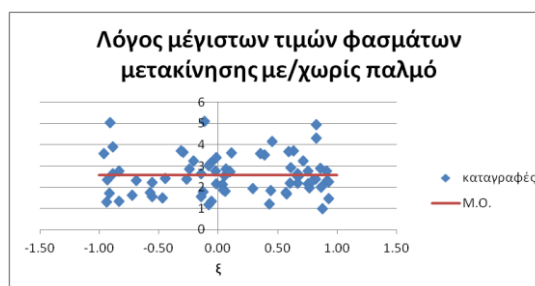
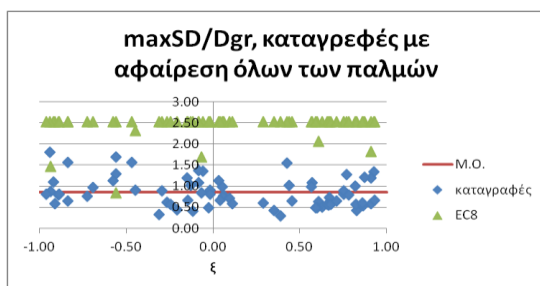
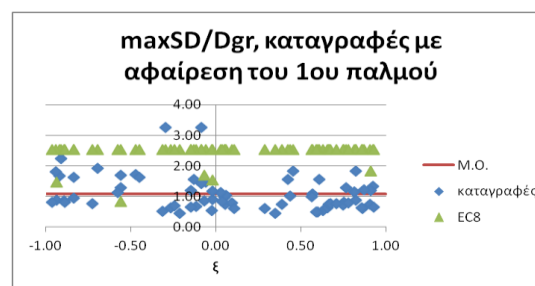
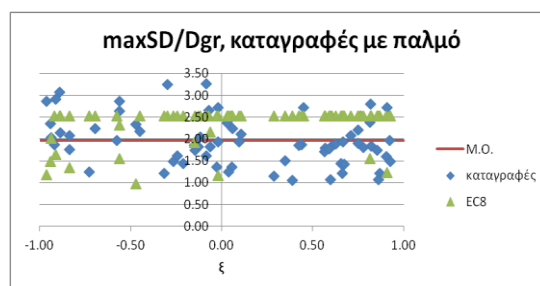
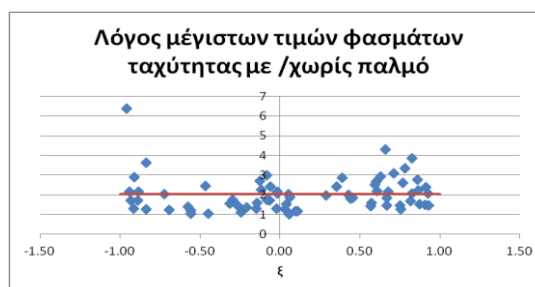
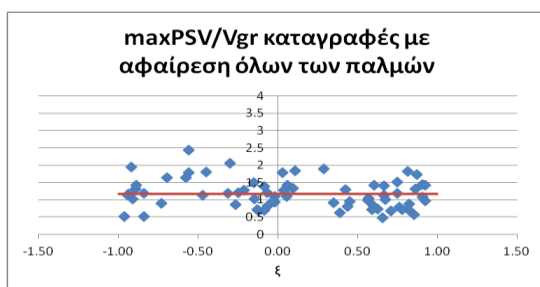
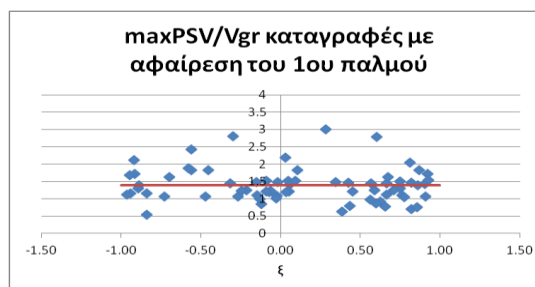
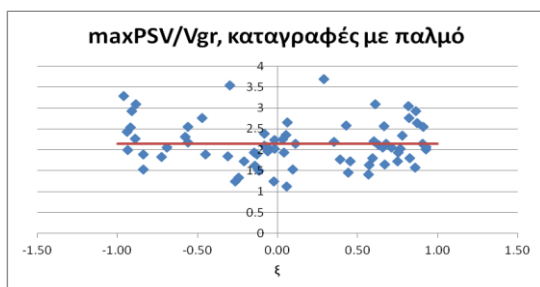
**Κοντινότερη απόσταση από το ρήγμα και λόγος μέγιστης φασματικής τιμής προς την εδαφική**

- Ο λόγος της μέγιστης φασματικής τιμής, προς την εδαφική, τόσο για τα φάσματα ταχύτητας, όσο και για τα φάσματα μετακίνησης πριν και μετά την αφαίρεση του παλμού, φαίνεται να είναι ανεξάρτητος της κοντινότερης απόστασης από το ρήγμα, CID.



### Συντελεστής κατευθυντικότητας $\xi$ (Rowshandel 2006) - Ευρωκώδικας 8

- Ο λόγος της μέγιστης φασματικής τιμής, προς την εδαφική, τόσο για τα φάσματα ταχύτητας, όσο και για τα φάσματα μετακίνησης πριν και μετά την αφαίρεση του παλμού, φαίνεται να είναι ανεξάρτητος του συντελεστή κατευθυντικότητας  $\xi$
- Οι αντίστοιχες τιμές του Ευρωκώδικα 8 φαίνεται να επαρκούν στις καταγραφές, τόσο πριν όσο και μετά την αφαίρεση των σημαντικών παλμών από τη χρονοϊστορία ταχύτητας.
- Ο συντελεστής κατευθυντικότητας  $\xi$  δείχνει να μην μπορεί να είναι αποτελεσματικός ως συντελεστής κατευθυντικότητας, καθώς στις παλμικές καταγραφές μόνο το 54% υπολογίζονται να έχουν θετικό  $\xi$ , ενώ θα έπρεπε σε όλες τις καταγραφές η τιμή να είναι μεγαλύτερο του μηδενός.

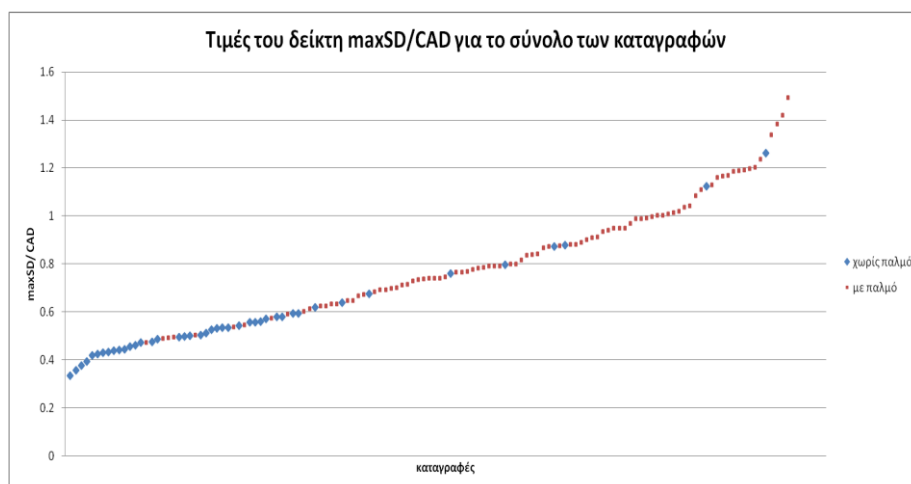




### Λόγος $\max SD_{0\%}/CAD$

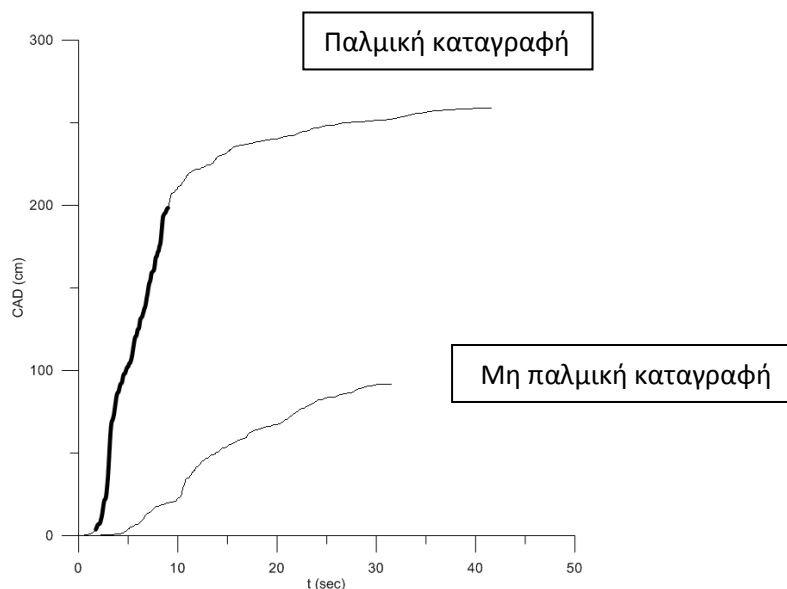
- Οι παλμικές καταγραφές έχουν τιμή του λόγου  $\max SD_{0\%}/CAD$  μεγαλύτερη από 0.47 και μάλιστα δείχνουν να ακολουθούν μια κανονική κατανομή με μέση τιμή 0.86 και τυπική απόκλιση 0.23.
- Οι μη παλμικές καταγραφές έχουν τιμή του λόγου  $\max SD_{0\%}/CAD$  μεγαλύτερη από 0.33 και μάλιστα δείχνουν να ακολουθούν μια κανονική κατανομή με μέση τιμή 0.56 και τυπική απόκλιση 0.18.
- Το μεγαλύτερο ποσοστό των παλμικών καταγραφών και συγκεκριμένα το 80% έχει τιμές του λόγου μεγαλύτερες του 0.6
- Το μεγαλύτερο ποσοστό των μη παλμικών καταγραφών και συγκεκριμένα το 80%, λαμβάνει τιμές του λόγου μικρότερες από 0.6 .
- Υπάρχει μια περιοχή αλληλοεπικάλυψης για τις παλμικές και μη καταγραφές στα εύρη του λόγου  $\max SD/CAD$  από 0.45 μέχρι περίπου 0.9
- Πέντε (5) τιμές των μη παλμικών καταγραφών σύμφωνα με τον Baker με λόγο μεγαλύτερο του 0.6, αποδείχτηκαν παλμικές.
- Ο λόγος  $\max SD_{0\%}/CAD$  δείχνει να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης πρόβλεψης ύπαρξης παλμού για μια καταγραφή κοντινού πεδίου.





### Ολοκλήρωμα απόλυτης εδαφικής ταχύτητας CAD

- Στα διαγράμματα του CAD συναρτήσεως του χρόνου, στο κομμάτι ύπαρξης παλμού, η κλίση του διαγράμματος είναι πολύ εντονότερη στις παλμικές καταγραφές, ενώ η κλίση της καμπύλης στις μη παλμικές καταγραφές είναι ομαλότερη.
- Ο χρόνος έναρξης και λήξης της έντονης κλίσης αντιστοιχεί στο χρόνο έναρξης και λήξης του παλμού στη χρονοϊστορία ταχύτητας. Οι παραπάνω λοιπόν χρονικές στιγμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήριο για τον χρόνο άφιξης του παλμού στις χρονοϊστορίες ταχύτητας.



### Συντελεστής κατευθυντικότητας $\zeta'$

- Ο συντελεστής  $\zeta'$  δεν φαίνεται να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης κατευθυντικότητας.

# Αναφορές



- Baker J.W., **Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis**, 2007
- Boore D.M., Atkinson G.M., **Boore Atkinson NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters**, 2007
- Campbell K.W., Bozorgnia Y., **Cambell - Bozorgnia NGA Empirical Ground Motion Model for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and SA at Selected Spectral Periods Ranging from 0.01-10.0 Seconds**, October 2006
- Campbell K.W., Bozorgnia Y., **Next Generation Attenuation (NGA) Empirical Ground Motion Models: Can they be used in Europe?**, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva 2006
- Cauzzi C et al, **Broadband (0.05 to 20s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records**, 2008
- CEN (Comite Europeen de Normalisation) (2004), **Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings** (EN 1998-1), Brussels, May 2004
- Chiou B., Darragh R., Gregor N., Silva W., **NGA Project Strong-Motion Database**
- Faccioli E., Paolucci R., Rey J., **Displacement Spectra for Long Period**, Earthquake Spectra, Vol.20, May 2004
- Goulet C., Abrahamson N., Bozorgnia Y., **NGA - East Final Project Plan**, 2011
- Kakkamanos J. K., Baise L., **Model Validations and Comparisons of the Next Generation Attenuation of Ground Motions (NGA-West) Project**, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.101, No. 1, pp. 160-175, February 2011
- Martin Mai P., **Ground Motion Complexity and Scaling in the Near Field of Earthquake Ruptures**, ETH Zurich, Switzerland
- Martin Mai, Mena Banu, **Selection and quantification of Near-fault velocity pulses due to Source Directivity**, Georisk, Vol.5, March 2011
- Mavroeidis G., Papageorgiou A., **Effect of Fault Rupture Characteristics on Near-Fault Strong Ground Motions**, 2010

- 
- Mavroeidis G., Papageorgiou A., **Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions**, 2003
  - Mimoglou P., Psycharis I., Taflampas I., **Design-oriented simulation of near fault ground motions by a limited number of velocity pulses**, 2012
  - Psycharis I., Sideri M., Taflampas I., **Effect of soil conditions on the characteristics of near-field ground motion**, 2011
  - Rodriguez-Marek A., Bray J., **Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region**, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24 (2004), 815-825
  - Rodriguez-Marek A., **Near-Fault Seismic Site Response**, 2000
  - Rowshandel B., **Directivity Correction for the Next Generation Attenuation (NGA) Relations**, Earthquake Spectrum, Volume 26, May 2010
  - Rowshandel B., **Incorporating Source Rupture Characteristics into Ground-Motion Hazard Analysis Models**, Seismological Research Letters, Volume 77, 2006
  - Rupakhety R., Sidurdsson S.U., Papageorgiou A.S., Sigbjornsson, **Quantification of ground - motion parameters and response spectra in the near-fault region**, Springer Science and Business Media B.V. 2011
  - Sehhati R., **Probabilistic Seismic Demand Analysis for the near-fault Zone**, December 2008
  - Shabestari K.T., Yamazaki F., Saita J., Matsuoka M., **Estimation of the spatial distribution of ground motion parameters for the recent earthquakes in Japan**, Technophysics 390, 193-204, 2004
  - 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
  - Somerville P.G., **Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse**, Physics of the Earth and Planetary Interiors 137 (2003), 201-212

- 
- Spudich P et al, **A Formulation of Directivity for Earthquake Sources Using Isochrone Theory**, 2004
  
  - Spudich P et al, **Directivity in NGA Earthquake Ground Motions: Analysis Using Isochrone Theory**, Earthquake Spectra, Volume 24, February 2008
  - Stewart J.P., Chiou S.J., Bray J.D., Graves R.W., Somerville P.G., Abrahamson N.A., **Ground Motion Evaluation Procedures for Performance-Based Design**, Peer Report 2001/09, University of California Berkeley
  
  - Taflampas I.M, Spyrakos C.C, Maniatakis Ch.A., **A new definition of strong motion duration and related parameters affecting the response of medium-long period structures**, 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, China, October 2008
  
  - Towhata I., **Geotechnical Earthquake Engineering**, Springer editions, 2008
  
  - Yamanda M., et al, **Statistical Features of Short-Period and Long-Period Near-Source Ground Motions**, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol99, December 2009





# Παράρτημα Α

Πίνακες δεδομένων



Record Sequence Number	Earthquake Magnitude	ClstD (km)	$\xi$ (Rowshandel)	maxD/Dgr	maxD/Dγραρχ. με αφαίρεση 1ου παλμού	maxD/Dγραρχ. χωρίς παλμό	maxV/Vgr	maxV/Vγραρχ. με αφαίρεση 1ου παλμού	maxV/Vγραρχ. χωρίς παλμό	Αριθμός παλμών	$\gamma$ max (sec)
77	6.61	1.81	0.60718	1.84	1.57	0.63	3.09	2.79	1.41	2	1.9
150	5.74	3.11	-0.01958	1.94	0.90	0.90	2.24	1.09	1.09	4	11.0
158	6.53	0.34	-0.91162	2.92	2.24	0.58	2.93	1.72	1.01	3	8.1
159	6.53	0.65	-0.93708	2.04	0.87	0.87	2.00	1.16	1.16	1	2.1
161	6.53	10.42	0.92522	1.97	1.33	1.33	2.01	1.72	0.97	3	4.6
170	6.53	7.31	0.57015	1.80	1.08	1.08	1.64	1.45	1.03	3	6.9
171	6.53	0.07	-0.06768	2.66	0.84	0.84	2.08	1.20	1.20	1	1.9
173	6.53	6.17	0.45286	2.72	1.84	0.66	1.74	1.22	0.95	2	2.7
178	6.53	12.85	0.43870	1.87	1.01	1.01	1.46	0.81	0.81	1	3.2
179	6.53	7.05	0.62871	1.89	0.53	0.51	2.11	0.93	0.72	2	1.8
180	6.53	3.95	0.76556	2.53	1.28	1.28	2.02	1.10	0.78	2	4.5
182	6.53	0.56	0.75145	2.22	0.81	0.81	1.93	1.51	1.51	2	4.8
183	6.53	3.86	0.66689	1.94	0.74	0.74	1.65	1.13	1.13	1	2.0
184	6.53	5.09	0.56615	1.72	0.99	0.99	1.41	0.98	0.98	2	1.9
185	6.53	7.65	-0.11707	2.05	0.67	0.40	1.50	0.85	0.67	2	5.9
459	6.19	9.86	0.90965	2.72	1.19	1.19	2.55	1.07	1.07	1	2.6
645	5.99	24.54	-0.4704	2.34	1.73	1.56	2.76	1.08	1.13	2	13.2
723	6.54	0.95	0.4262	1.85	1.57	1.55	2.58	1.48	1.29	2	3.2
738	6.93	71.00	-0.5593	2.65	1.69	1.69	2.17	1.83	1.78	2	4.9
766	6.93	11.07	0.8160	2.38	1.15	1.00	3.06	2.05	1.81	4	7.4



783	6.93	74.26	-0.5594	2.87	1.30	1.30	2.56	2.43	2.43	3	8.2
802	6.93	8.50	-0.4493	2.19	1.62	0.91	1.89	1.84	1.80	2	1.5
838	7.28	34.86	0.7503	1.91	0.71	0.88	1.72	1.32	1.19	4	4.7
879	7.28	2.19	0.3887	1.06	0.73	0.30	1.77	0.64	0.62	3	1.8
900	7.28	23.62	0.8244	1.84	1.84	0.43	1.80	1.46	0.87	2	4.0
982	6.69	5.43	0.0509	2.49	0.97	0.98	2.35	1.53	1.16	2	3.4
983	6.69	5.43	0.0605	2.24	1.04	0.79	2.65	1.41	1.42	2	3.8
1009	6.69	23.60	-0.6936	2.25	1.92	0.96	2.05	1.64	1.64	2	2.2
1013	6.69	5.92	-0.0604	1.82	1.47	1.36	1.98	1.24	0.82	2	2.8
1045	6.69	5.48	0.6574	1.44	0.63	0.57	2.06	0.78	0.48	3	1.7
1050	6.69	7.01	-0.0847	3.27	3.27	1.09	2.10	1.22	0.70	3	3.3
1051	6.69	7.01	-0.0847	1.62	1.42	1.38	2.38	1.52	1.37	2	2.6
1063	6.69	6.50	-0.1289	1.82	1.55	1.02	1.89	1.00	0.70	3	4.8
1084	6.69	5.35	0.0311	2.38	1.12	1.12	2.26	2.20	1.78	3	9.3
1086	6.69	5.30	-0.0181	2.73	1.17	0.80	2.02	1.50	0.93	3	6.1
1119	6.90	0.27	-0.14852	1.86	1.19	1.19	1.94	1.49	1.49	1	1.8
1120	6.90	1.47	-0.29702	3.25	3.25	0.90	3.55	2.81	2.04	2	11.3
1182	7.62	9.77	-0.91780	1.88	1.67	1.09	2.54	2.12	1.95	3	3.4
1202	7.62	12.65	-0.94180	2.35	1.81	1.81	2.43	1.69	1.13	3	11.8
1244	7.62	9.96	-0.89083	3.08	0.87	0.79	2.27	1.31	1.31	2	3.2
1410	7.62	102.4	0.87219	1.22	1.22	1.22	2.65	1.83	1.72	4	7.7
1476	7.62	28.05	0.82166	2.80	0.88	0.57	2.76	0.71	0.71	3	3.7
1477	7.62	30.18	0.77957	1.80	0.80	0.80	2.34	1.05	0.70	3	4.6
1479	7.62	35.69	0.90676	1.60	0.73	0.58	2.15	1.43	1.43	2	2.7
1480	7.62	19.84	0.66534	1.22	0.75	0.56	2.57	1.45	1.40	3	4.1



1481	7.62	25.44	0.67663	1.42	0.77	0.56	2.15	1.63	1.00	2	2.1
1483	7.62	22.08	0.59952	1.07	0.49	0.49	2.21	0.87	0.83	2	2.0
1484	7.62	26.32	0.86406	1.07	0.60	0.54	2.92	1.40	1.31	3	3.4
1486	7.62	16.74	0.85710	1.75	0.62	0.61	1.58	0.76	0.57	3	2.6
1489	7.62	3.78	-0.21041	1.44	0.46	0.44	1.72	1.25	1.27	2	2.2
1493	7.62	5.97	-0.14466	1.75	0.66	0.66	1.62	1.11	1.02	3	3.5
1494	7.62	5.30	-0.26597	1.49	0.63	0.62	1.24	1.08	0.85	2	4.0
1496	7.62	10.50	-0.24424	1.62	0.71	0.57	1.34	1.23	1.19	2	2.3
1499	7.62	8.53	-0.02490	1.36	0.54	0.49	1.26	1.02	0.96	3	4.0
1503	7.62	0.59	-0.57549	1.97	1.13	1.12	2.32	1.89	1.64	4	12.2
1505	7.62	0.32	0.28770	1.16	0.61	0.60	3.70	3.00	1.88	2	2.1
1510	7.62	0.91	-0.72736	1.25	0.76	0.76	1.84	1.07	0.90	3	3.2
1511	7.62	2.76	-0.83751	2.08	1.64	1.56	1.53	1.16	1.19	2	1.8
1515	7.62	5.18	-0.31343	1.22	0.51	0.33	1.85	1.45	1.18	2	4.1
1519	7.62	7.00	0.59064	1.78	0.48	0.48	1.80	1.26	0.71	3	7.1
1526	7.62	47.67	0.92747	1.50	0.65	0.66	2.07	1.55	1.42	4	14.9
1528	7.62	2.13	0.05670	1.36	0.74	0.75	1.12	1.21	1.10	3	6.6
1529	7.62	1.51	0.09550	1.93	0.79	0.71	1.53	1.52	1.32	2	2.3
1530	7.62	6.10	0.35020	1.50	0.45	0.42	2.20	1.49	0.90	2	8.0
1531	7.62	12.89	0.03770	1.25	0.83	0.66	1.94	1.21	1.27	4	9.7
1548	7.62	13.15	0.71083	2.09	0.76	0.65	2.07	1.26	0.67	3	5.1
1550	7.62	8.29	0.10878	2.12	0.60	0.59	2.15	1.83	1.83	3	7.8
2457	6.20	19.65	-0.88754	2.15	0.82	0.82	3.10	1.40	1.42	2	3.6
2495	6.20	22.37	-0.96205	2.87	0.80	0.80	3.29	1.13	0.52	2	3.7
2627	6.20	14.66	-0.83751	1.77	0.96	0.64	1.89	0.54	0.52	2	6.5

**Πίνακας Α1:** Παλμικές καταγραφές και τιμές του λόγου της μέγιστης φασματικής τιμής προς την αντίστοιχη εδαφική πριν και μετά την αφαίρεση των παλμών





Record Sequence Number	CAD (cm)	max SD (0%) (cm)	SD 0%(Tres) /CAD	starting time (sec)	finishing time (sec)	totalCAD (cm)	c'
77	179.2903	90	0.50	2.39	8.50	258.75	1.85
150	19.6725	23	1.17	2.09	2.90	45.17	3.12
158	78.3711	60	0.77	2.39	8.95	91.88	3.54
159	57.2304	58	1.01	7.28	11.21	125.58	3.22
161	101.4249	80	0.79	6.76	21.40	151.97	2.61
170	125.5463	96	0.76	5.26	12.87	219.98	2.20
171	90.2945	107	1.19	3.64	6.30	216.85	3.95
173	173.0968	137	0.79	5.08	17.48	231.32	2.28
174	113.2946	98	0.87	7.00	15.47	202.63	1.73
178	74.9785	90	1.20	6.16	10.92	173.74	1.63
179	154.6867	180	1.16	4.11	7.45	309.69	2.13
180	181.5530	205	1.13	4.90	9.20	344.65	2.66
181	184.0885	220	1.20	5.00	7.95	355.91	3.39
182	151.3490	187	1.24	4.61	8.11	278.85	3.73
183	113.9104	170	1.49	4.64	8.26	257.33	2.74
184	107.8829	153	1.42	4.74	8.42	265.12	2.48
185	124.5944	138	1.11	4.59	9.45	225.91	1.81
250	44.2480	28	0.63	3.42	7.49	82.80	-
292	148.5729	100	0.67	4.70	12.11	205.38	2.47
316	89.0663	106	1.19	9.39	14.04	212.38	1.68
407	30.0419	22	0.73	2.02	3.88	66.50	-
415	51.4356	42	0.82	2.49	6.09	89.92	-
418	12.9659	13	1.00	2.53	3.27	40.64	-
451	47.1094	56	1.19	3.15	4.77	111.02	3.78
459	44.0679	37	0.84	1.66	6.96	78.60	3.87
503	63.6226	47	0.74	6.59	16.79	104.62	-
508	26.9001	36	1.34	10.91	12.36	78.44	-
529	51.2039	53	1.04	2.32	5.58	94.87	2.60
568	67.0973	50	0.75	0.93	4.80	93.80	3.03
615	22.2972	11	0.49	4.24	18.71	33.55	0.93
645	29.4873	21	0.71	5.36	11.78	54.26	0.91
723	158.4227	150	0.95	9.64	13.53	343.69	3.33
738	55.5494	55	0.99	9.22	15.56	103.10	2.61
766	67.2204	70	1.04	3.50	6.80	130.73	3.33
783	67.8304	67	0.99	12.30	17.72	128.24	2.59
802	123.9129	97	0.78	4.66	12.88	188.42	3.50
821	121.9545	132	1.08	2.47	5.14	242.50	2.09
828	72.4804	84	1.16	2.42	4.38	201.38	1.11
838	109.6967	66	0.60	14.00	31.14	146.83	2.93
879	243.3315	231	0.95	8.73	12.66	406.59	2.72
900	175.4221	140	0.80	14.10	21.94	293.35	3.30
982	214.7146	188	0.88	3.10	9.14	320.34	2.41
983	172.5521	162	0.94	3.03	8.91	254.90	2.41
1009	82.3266	65	0.79	5.24	20.57	149.17	1.29
1013	91.8286	80	0.87	2.60	7.01	160.59	2.12
1045	115.8796	118	1.02	4.11	6.10	232.96	3.08
1050	35.5463	32	0.90	3.34	6.90	65.07	3.97
1051	102.5826	64	0.62	3.70	7.80	174.97	3.97
1063	132.7391	132	0.99	2.17	5.80	253.52	1.89
1084	273.0416	240	0.88	2.75	9.95	509.95	2.47
1086	154.7365	156	1.01	3.52	7.60	277.34	3.56

1119	66.4865	63	0.95	4.52	6.80	142.12	3.97
1120	296.9750	140	0.47	2.11	14.71	400.78	3.41
1161	178.8009	150	0.84	4.69	12.70	234.58	2.23
1182	153.1580	97	0.63	10.14	20.27	253.17	3.22
1202	91.0675	70	0.77	33.40	42.88	237.96	3.44
1244	349.5273	350	1.00	36.34	44.29	712.85	1.87
1410	203.0240	100	0.49	17.03	38.01	341.53	2.79
1476	301.4071	210	0.70	41.77	55.58	443.43	2.72
1477	390.5476	252	0.65	41.98	70.01	467.72	2.57
1479	294.1928	190	0.65	40.01	55.86	397.91	2.85
1480	378.4991	280	0.74	35.73	62.11	468.41	3.43
1481	348.5522	244	0.70	38.95	66.09	442.94	3.36
1483	309.5013	240	0.78	40.15	59.31	431.92	3.21
1484	292.4640	200	0.68	40.91	60.43	392.72	2.84
1486	172.0095	170	0.99	34.59	46.22	276.05	2.86
1489	361.7772	250	0.69	32.84	57.65	446.23	2.87
1493	277.2232	192	0.69	32.71	57.83	378.82	2.64
1494	286.2212	212	0.74	31.84	49.68	445.61	2.65
1496	330.8470	190	0.57	29.13	58.01	431.48	2.21
1499	334.8510	247	0.74	35.43	55.41	441.06	2.46
1503	854.7874	505	0.59	26.64	50.71	1121.24	3.79
1505	471.9440	420	0.89	32.76	47.00	919.33	3.36
1510	419.7258	280	0.67	27.43	47.59	637.60	3.71
1511	283.8298	152	0.54	6.10	32.67	359.57	3.50
1515	409.0784	200	0.49	27.28	61.28	499.14	2.65
1519	310.9368	222	0.71	33.61	55.69	395.34	2.45
1526	351.0340	215	0.61	41.23	62.47	473.66	2.83
1528	381.4903	305	0.80	12.23	32.34	462.62	3.43
1529	363.8799	320	0.88	11.17	23.14	528.43	3.53
1530	358.6923	300	0.84	34.53	49.39	519.61	3.11
1531	305.7383	167	0.55	30.45	60.21	379.42	2.29
1548	397.7818	362	0.91	40.79	54.40	586.74	2.61
1550	346.4665	252	0.73	14.64	37.62	405.13	2.88
1752	20.3423	19	0.93	5.40	6.91	52.16	-
1853	25.2987	23	0.91	12.80	15.66	55.45	-
2457	123.4769	77	0.62	10.55	20.92	168.14	2.37
2495	73.3933	71	0.97	10.21	12.58	123.77	3.41
2627	20.2586	28	1.38	10.01	10.63	73.68	3.46
3317	121.1471	95	0.78	18.83	35.16	177.08	2.56

**Πίνακας Α2:** CAD και c' για τις παλμικές καταγραφές

Record Sequence Number	CAD	max SD (0%) (cm)	SD 0%(Tres) /CAD	starting time	finish time	totalCAD
949	93.1578	52	0.56	3.02	14.76	179.01
952	45.1017	24	0.53	2.86	8.38	79.84
953	128.4357	57	0.44	3.15	12.03	182.97
959	114.2181	57	0.50	2.97	18.34	142.56
960	71.6530	57	0.80	3.82	8.74	110.45
1003	50.6759	27	0.53	6.57	17.07	91.86
1012	36.1555	17	0.47	8.75	15.14	72.54
1048	175.2482	66	0.38	3.40	24.79	193.58
1054	102.4033	115	1.12	5.12	8.68	178.38
1077	68.2178	86	1.26	8.94	14.28	165.64
1080	88.0597	47	0.53	4.01	11.84	112.62
1081	32.3481	18	0.56	9.88	15.11	63.25
1082	112.2602	51	0.45	3.47	22.42	133.55
1087	117.5738	68	0.58	6.78	10.98	292.84
1111	109.5232	65	0.59	5.96	16.45	161.33
1116	47.8753	42	0.88	12.19	16.84	109.69
1141	203.7926	85	0.42	2.83	19.17	235.08
1176	362.0681	210	0.58	8.95	24.60	452.13
1194	540.6810	320	0.59	34.18	74.20	641.46
1195	567.9506	270	0.48	34.85	77.47	637.87
1203	288.9482	125	0.43	27.00	54.29	426.95
1231	171.0794	130	0.76	34.86	39.43	426.68
1462	235.4073	120	0.51	16.61	36.34	333.58
1478	297.4526	190	0.64	43.14	58.77	426.90
1500	378.3843	190	0.50	35.85	68.90	469.17
1507	320.1361	107	0.33	23.57	51.79	378.89
1508	234.2816	130	0.55	31.36	46.67	397.20
1509	222.9368	110	0.49	36.29	45.29	378.34
1521	228.5809	105	0.46	23.00	51.79	286.62
1527	302.0912	150	0.50	30.02	56.93	380.94
1534	512.4321	220	0.43	31.39	73.67	573.59
1535	453.7748	220	0.48	31.11	62.62	574.43
1536	453.7748	280	0.62	31.11	62.62	574.43
1538	536.2401	210	0.39	41.11	84.05	596.49
1540	480.6756	260	0.54	38.04	81.34	569.22
1543	434.2915	190	0.44	36.70	82.96	475.14
1545	356.5162	240	0.67	28.56	54.97	558.37
1547	561.9304	200	0.36	31.59	82.36	597.87
1549	363.9734	160	0.44	25.74	25.74	473.08
1596	131.7000	115	0.87	10.62	20.68	327.41
1602	142.6285	75	0.53	9.15	17.80	229.80
1605	332.7912	190	0.57	3.19	22.64	382.59
1629	354.9985	150	0.42	15.03	60.52	438.01

**Πίνακας A3:** CAD για τις μη παλμικές καταγραφές

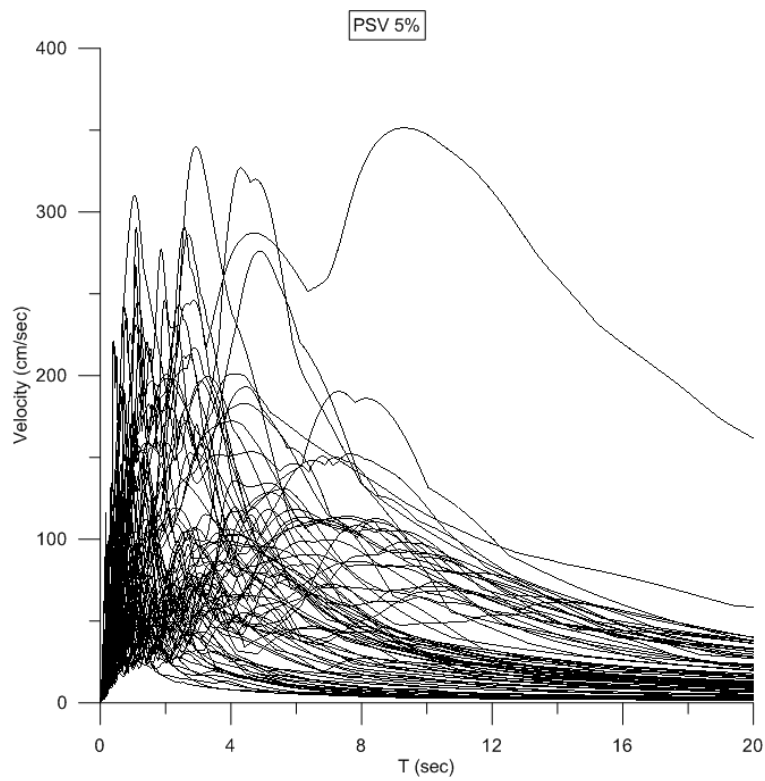


# Παράρτημα Β

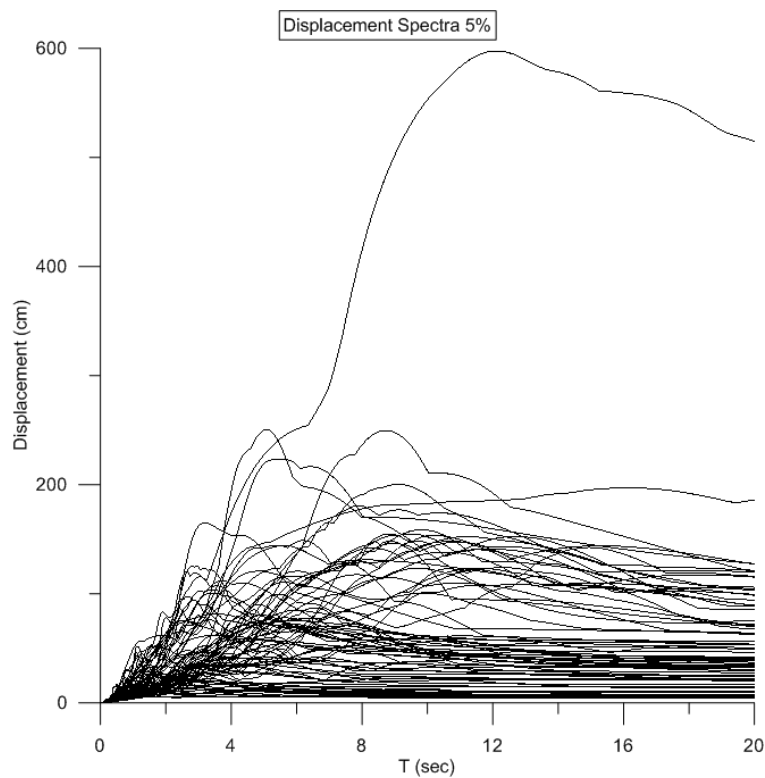
Διαγράμματα



### Συγκεντρωτικά Διαγράμματα- Φάσματα ταχύτητας και μετακίνησης (5%)

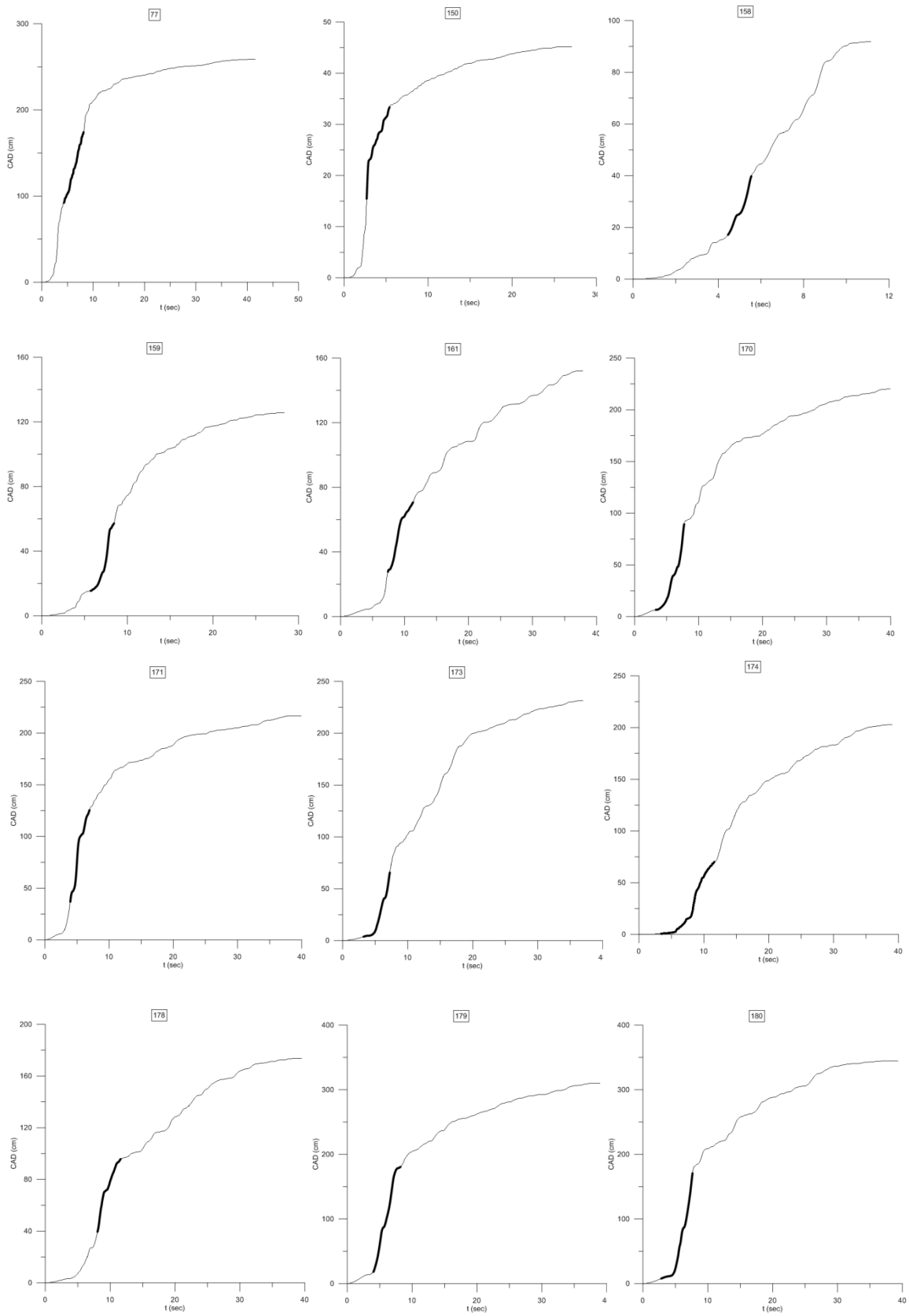


**Σχήμα B1:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα ελαστικών φασμάτων ψευδοταχύτητας (5%) για τις παλμικές καταγραφές

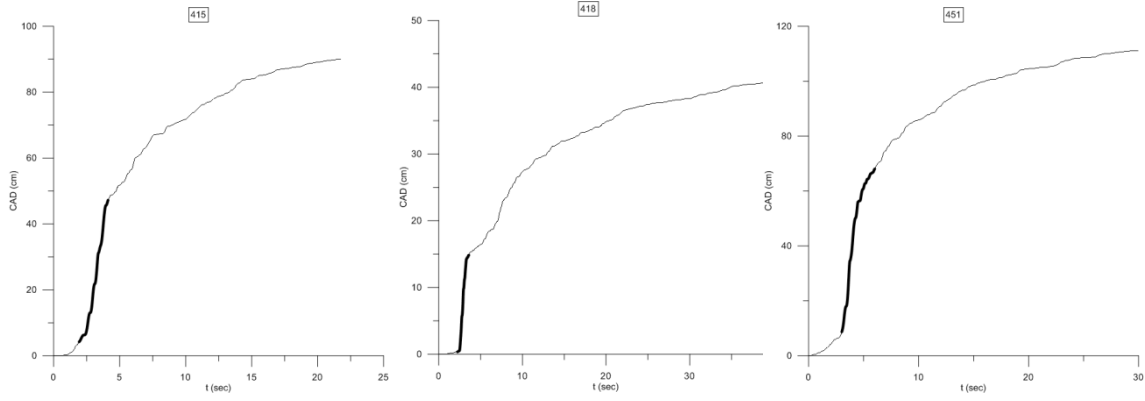
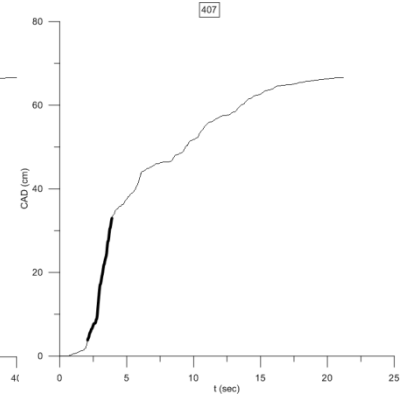
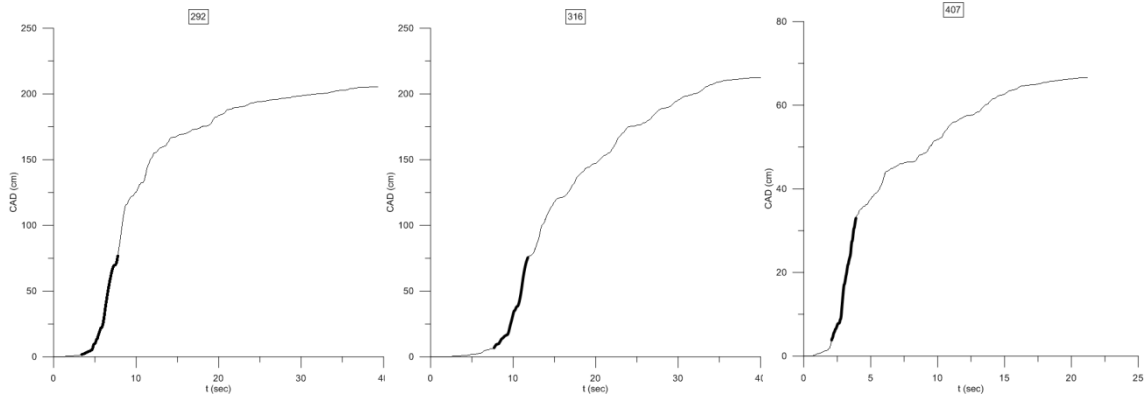
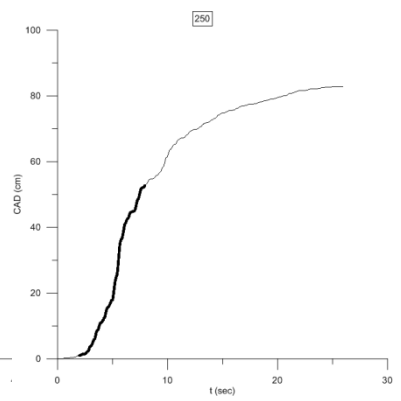
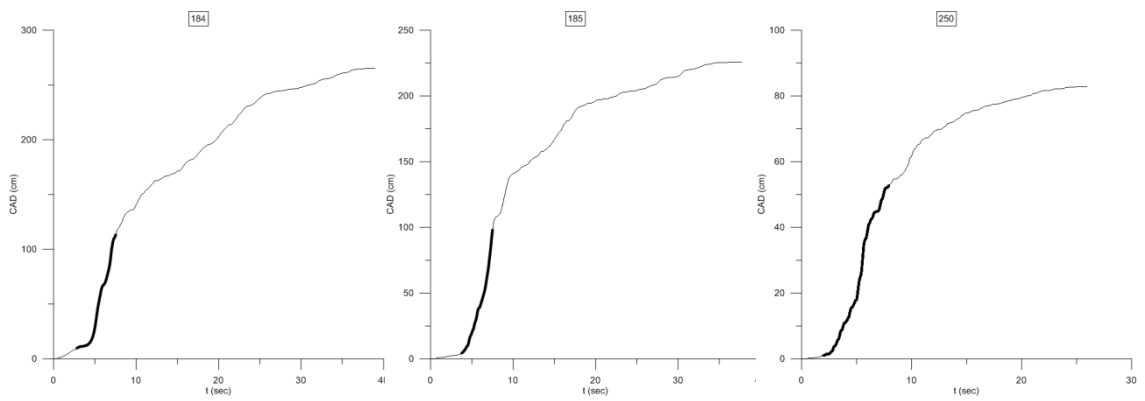
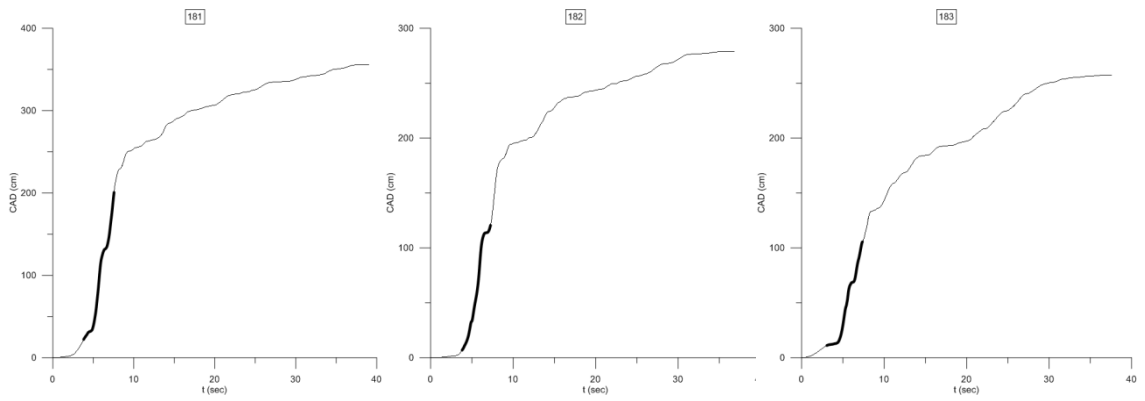


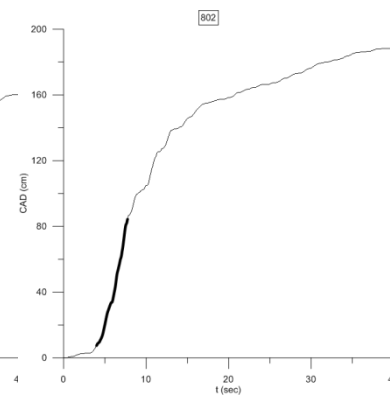
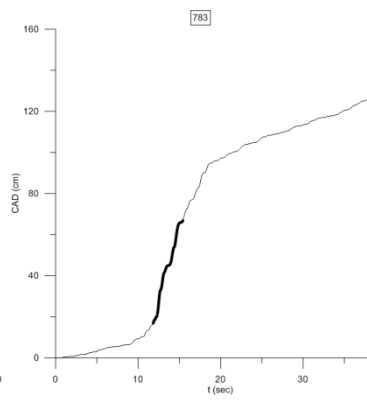
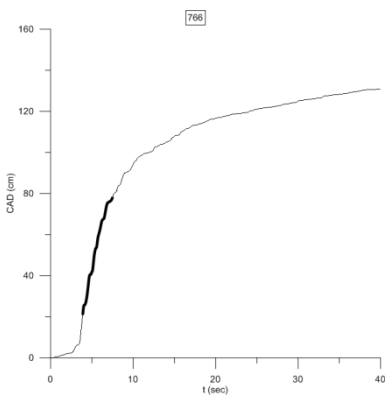
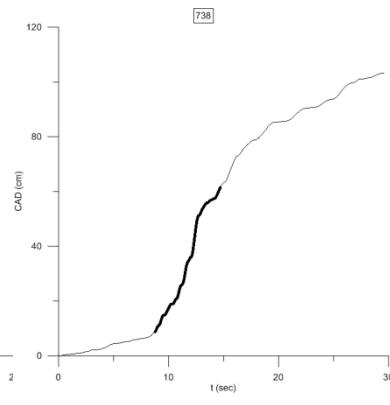
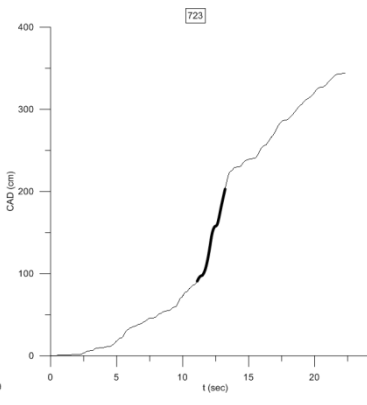
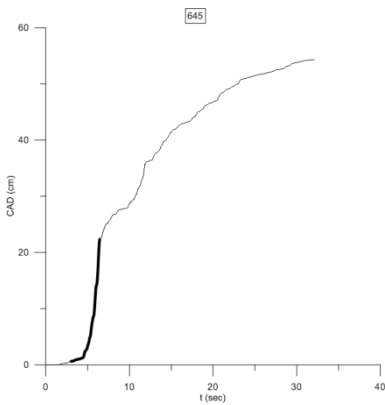
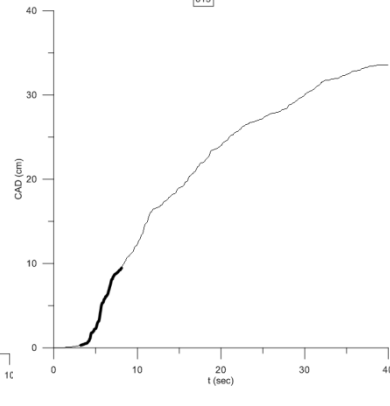
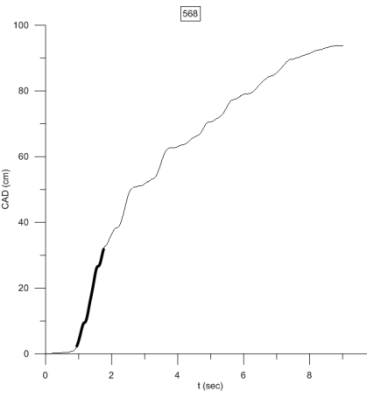
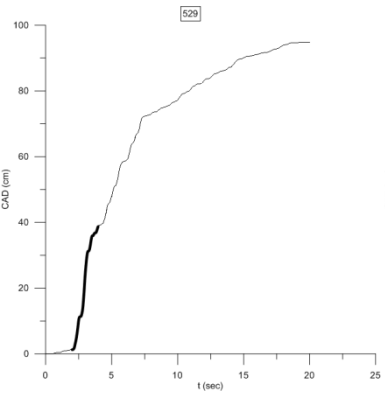
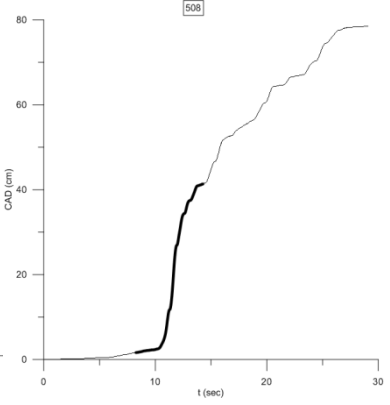
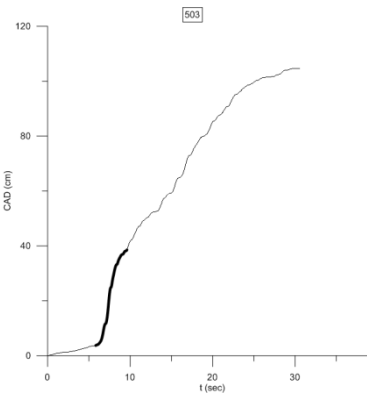
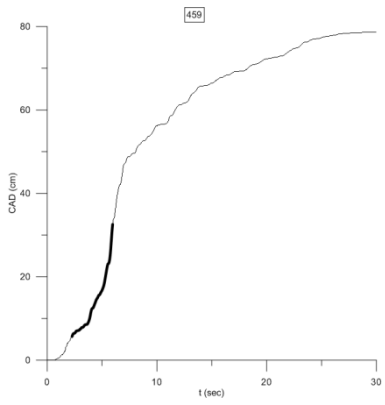
**Σχήμα B2:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα ελαστικών φασμάτων μετακίνησης (5%) για τις παλμικές καταγραφές

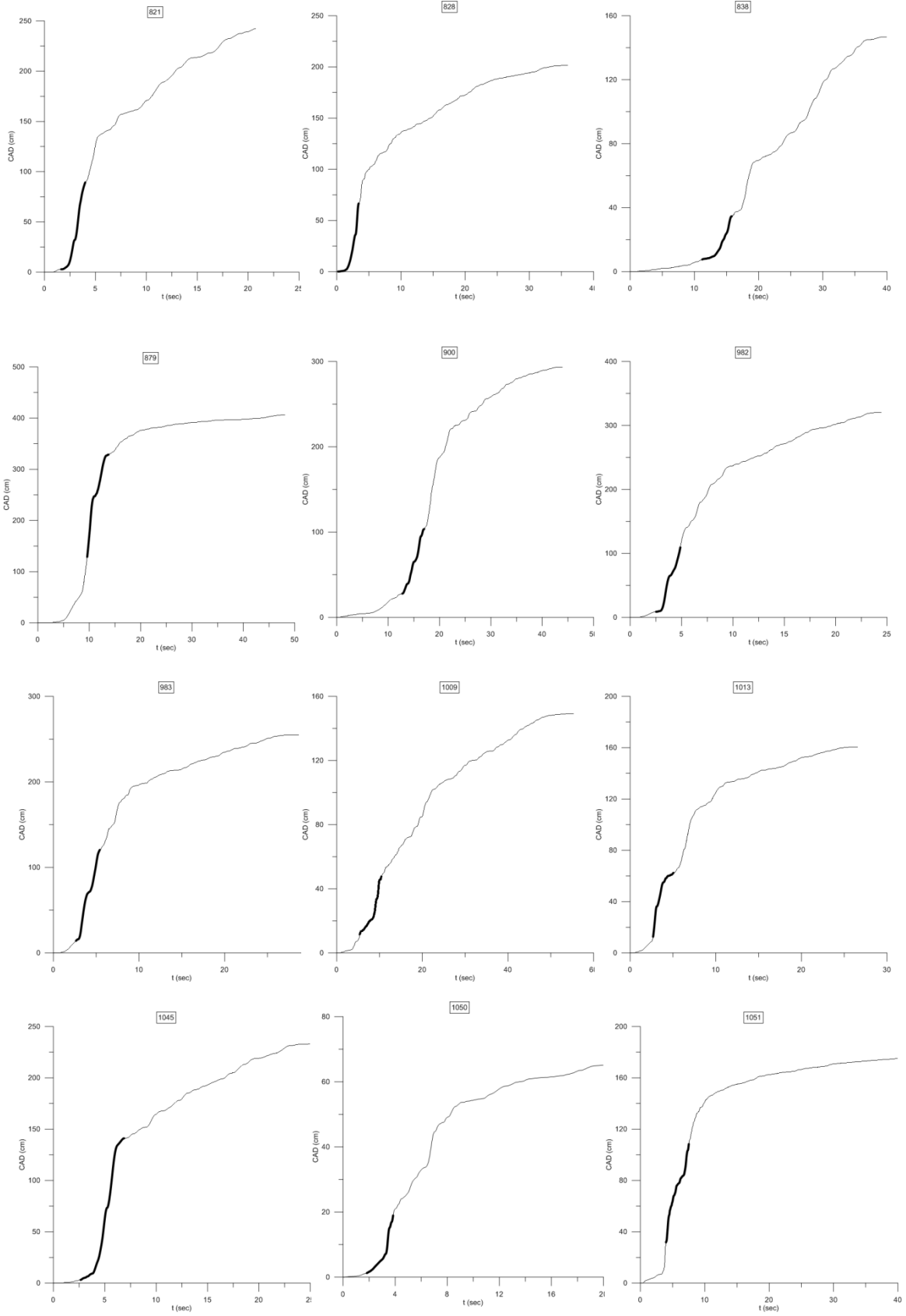
## Διαγράμματα CAD για τις παλμικές καταγραφές

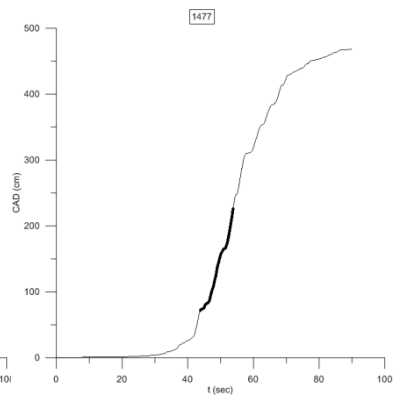
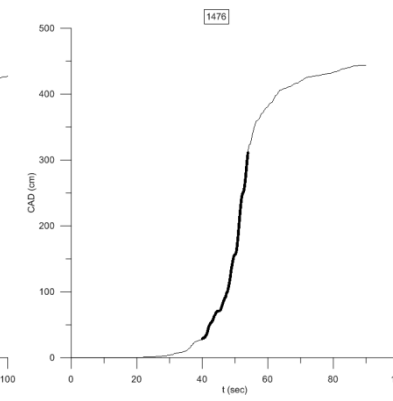
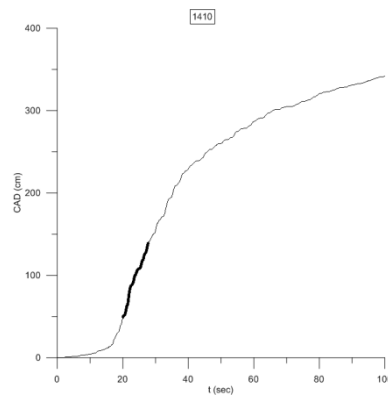
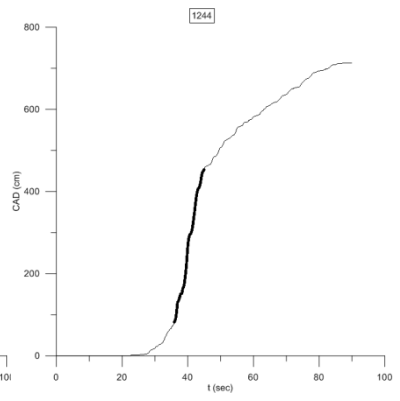
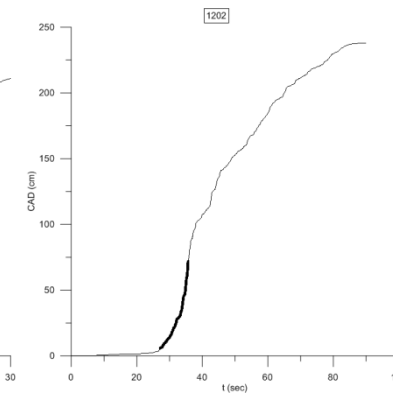
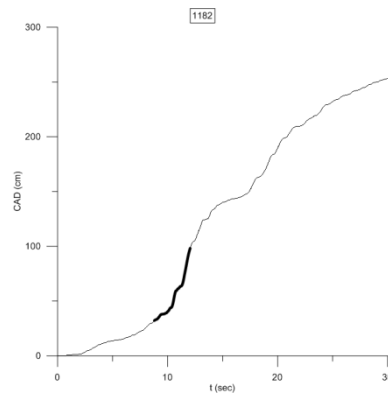
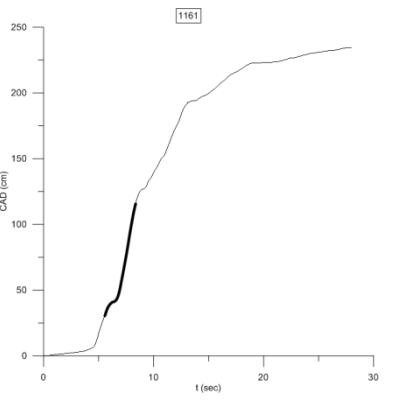
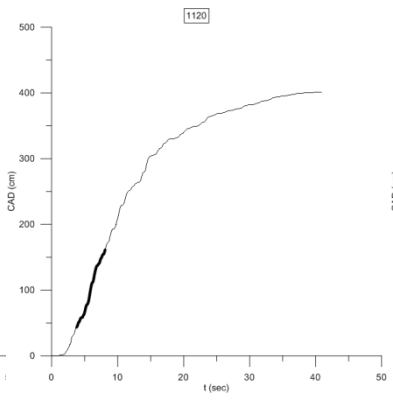
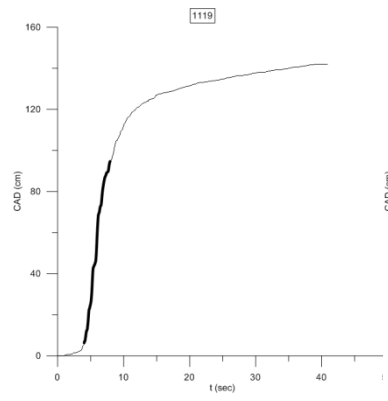
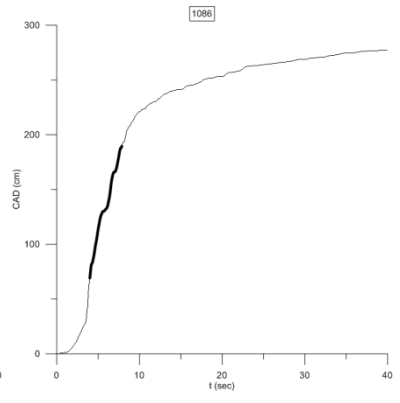
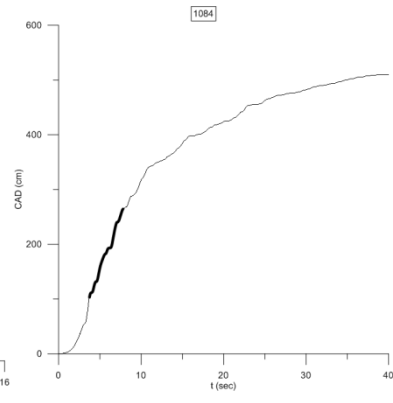
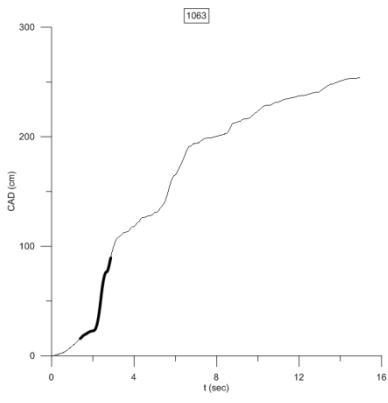


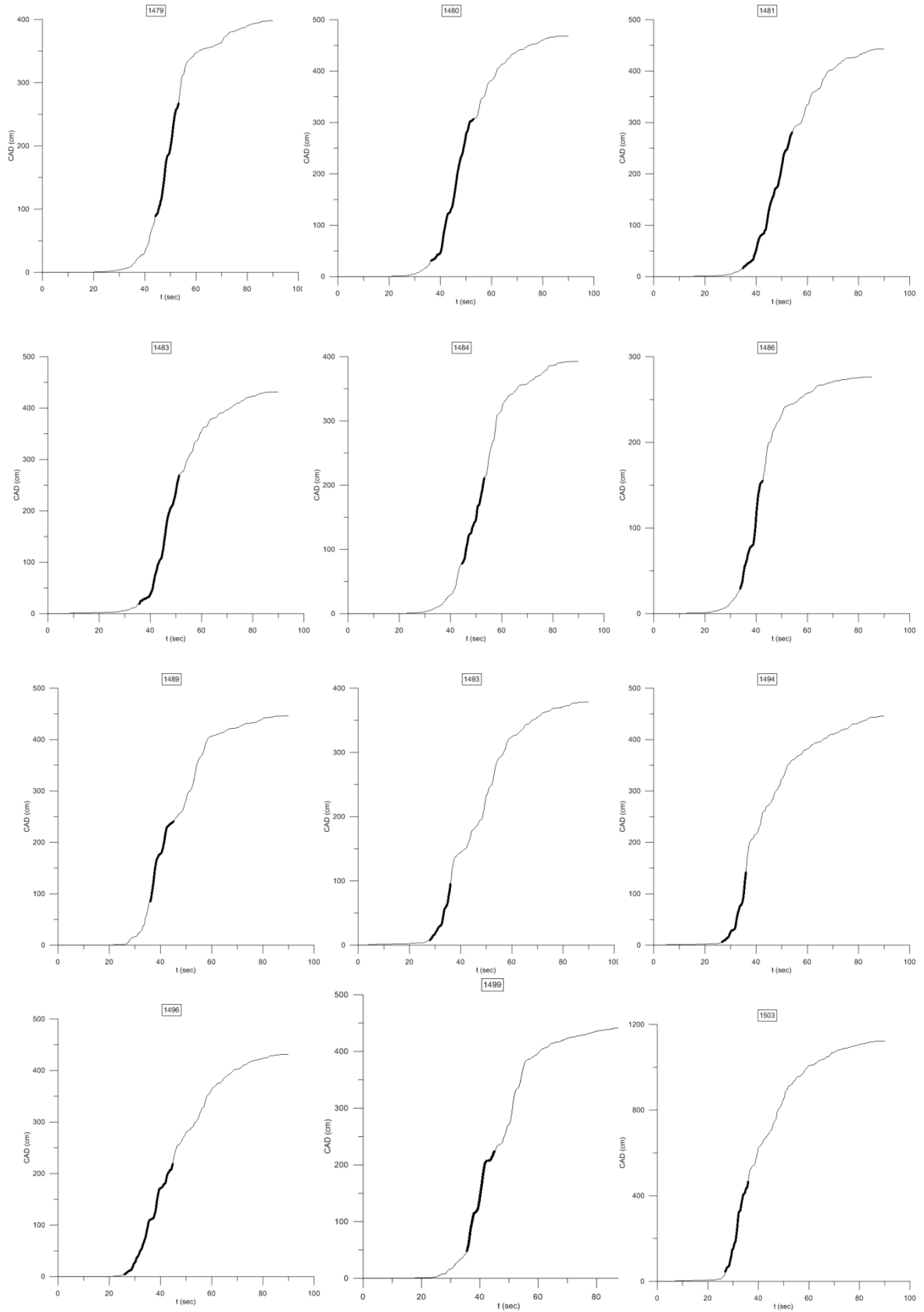


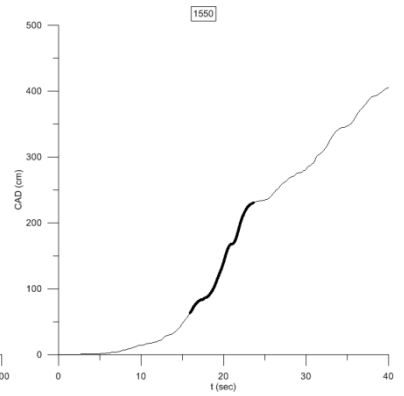
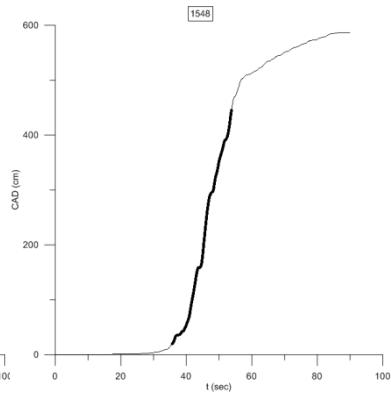
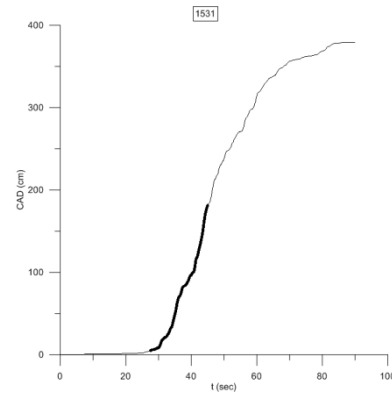
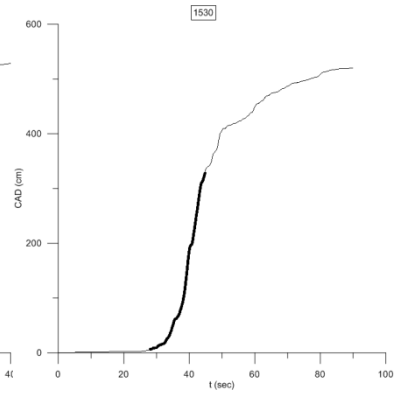
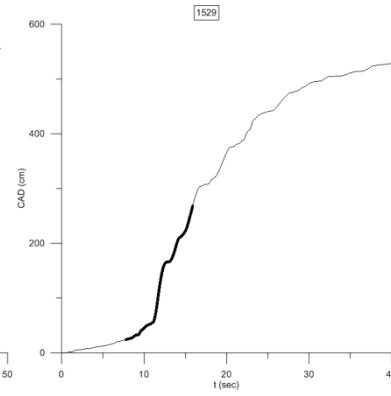
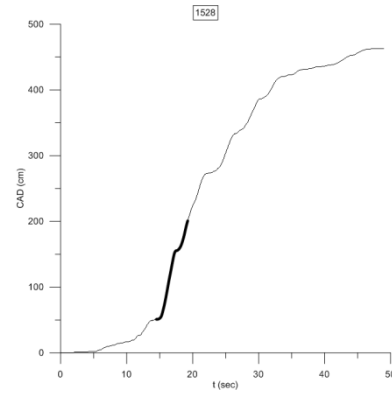
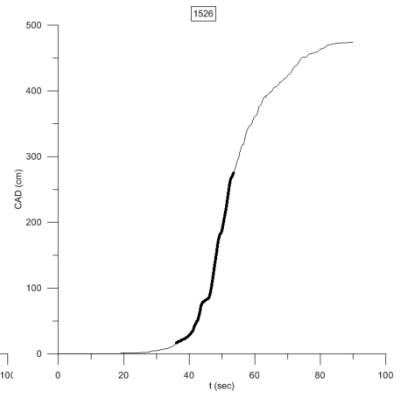
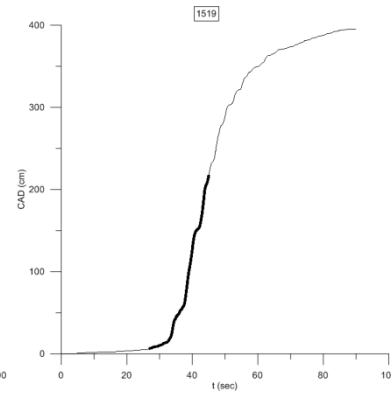
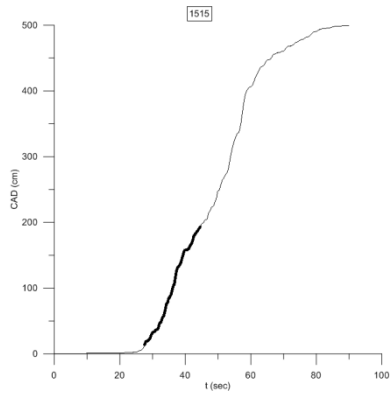
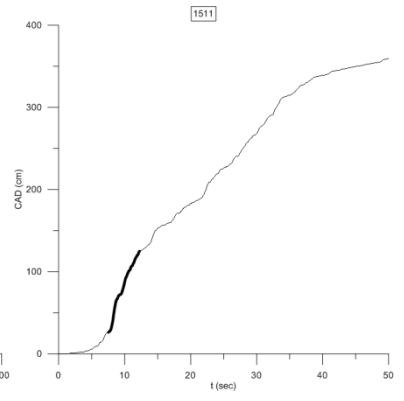
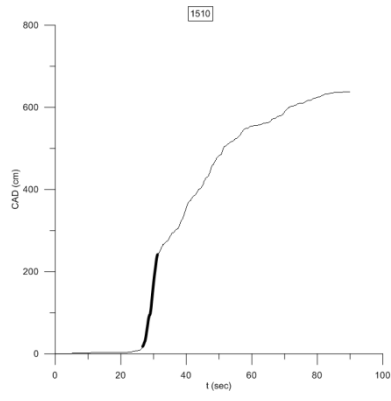
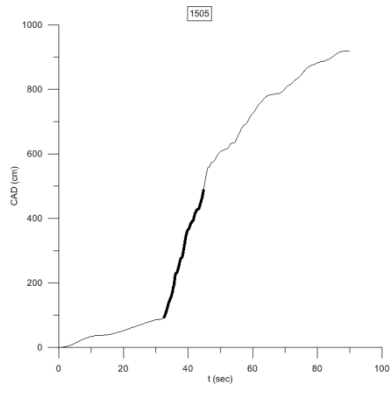


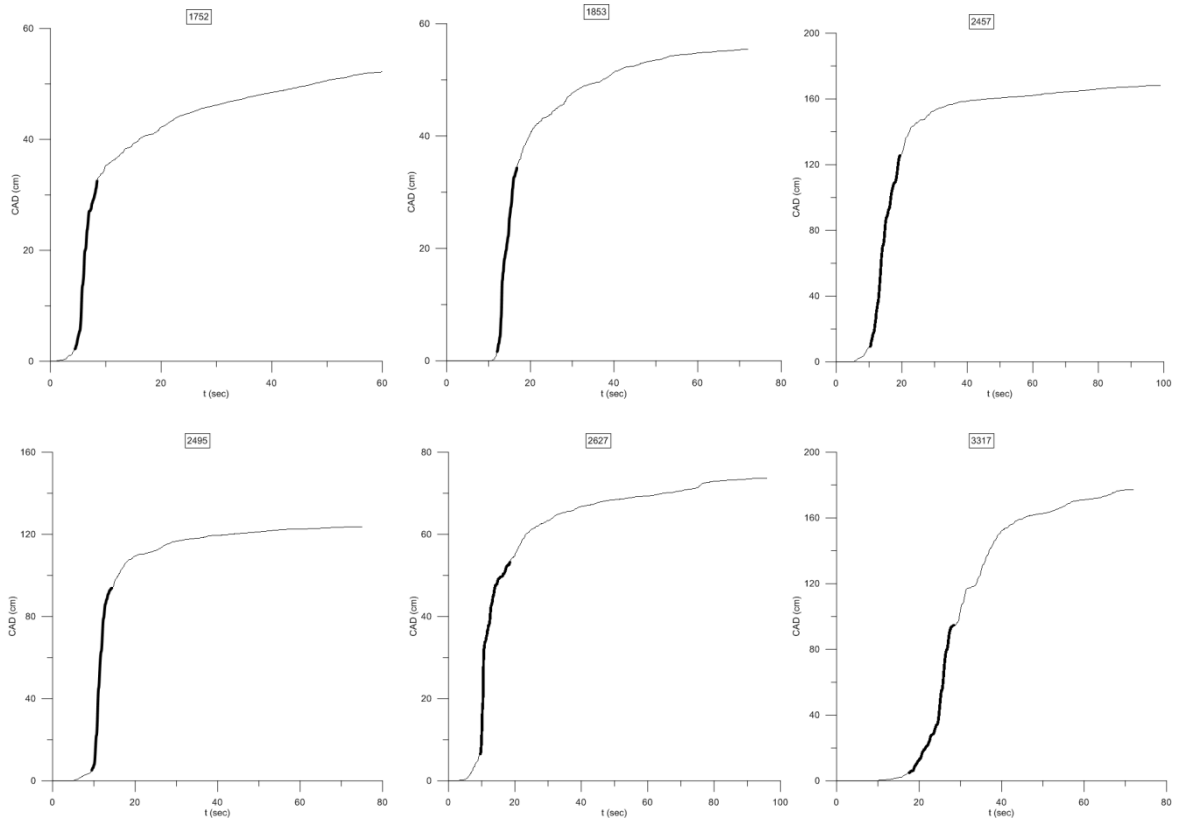






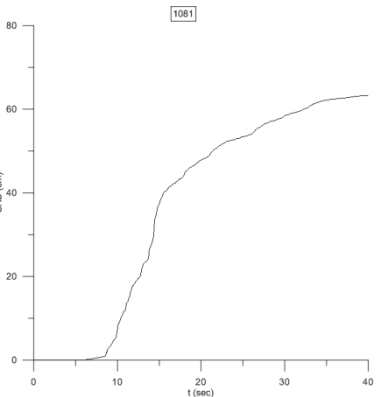
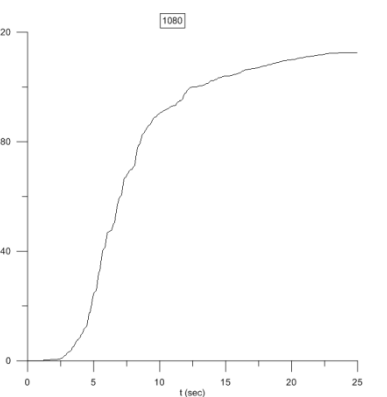
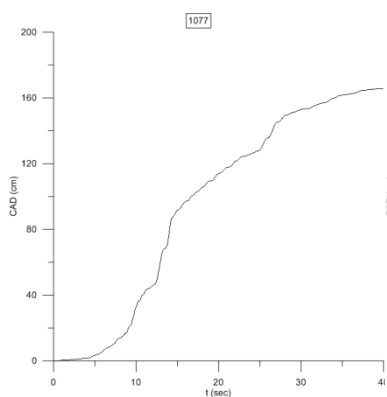
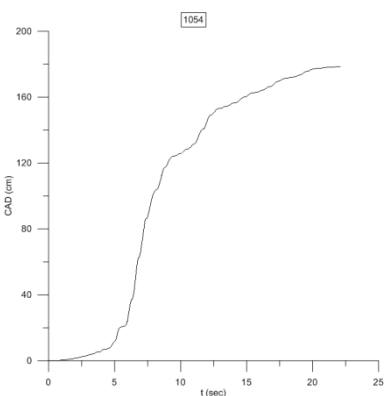
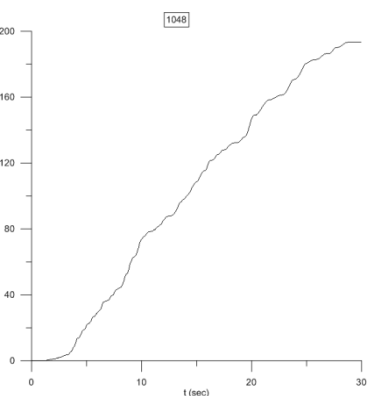
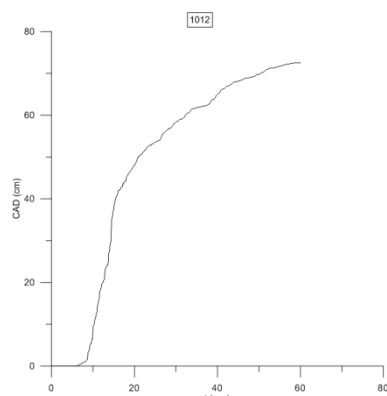
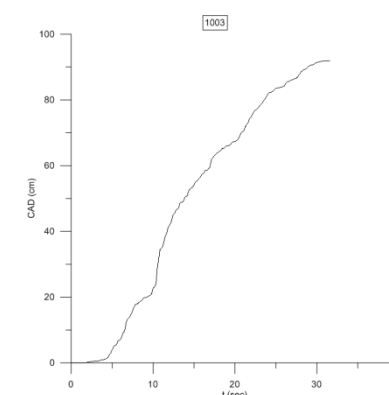
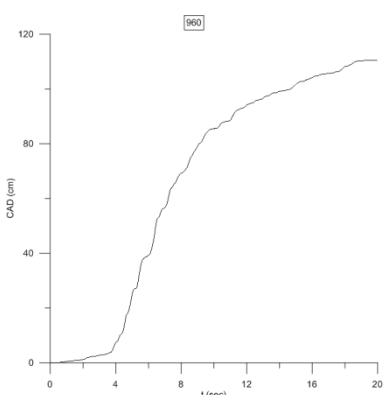
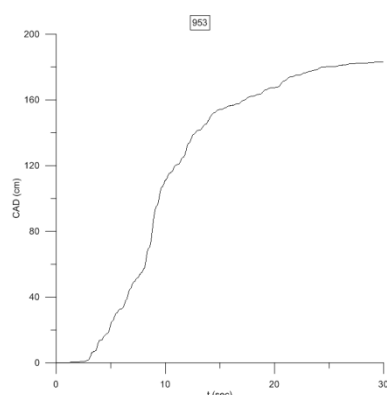
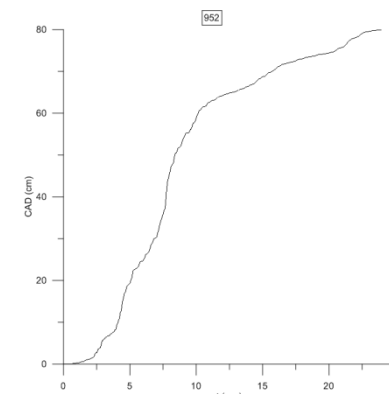
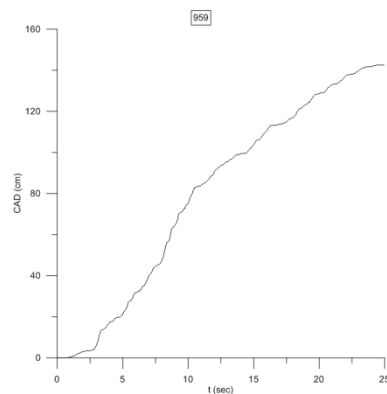
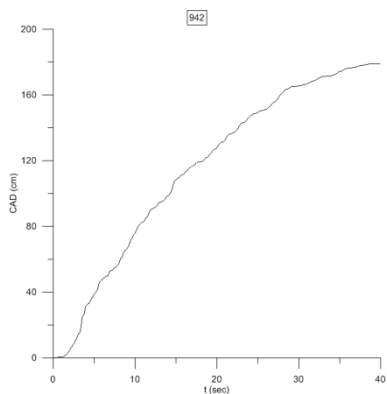




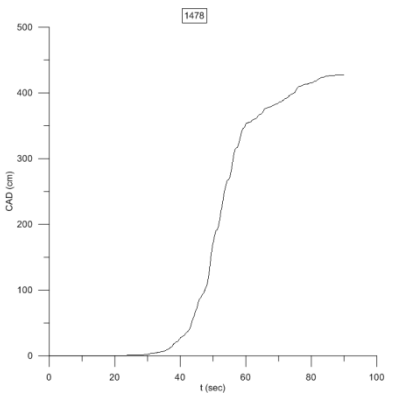
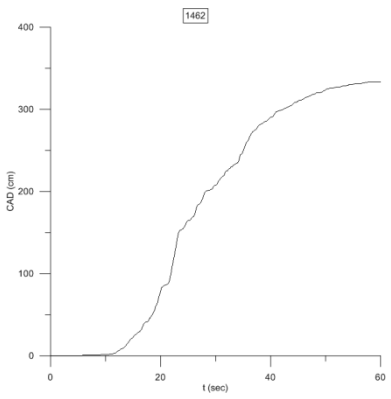
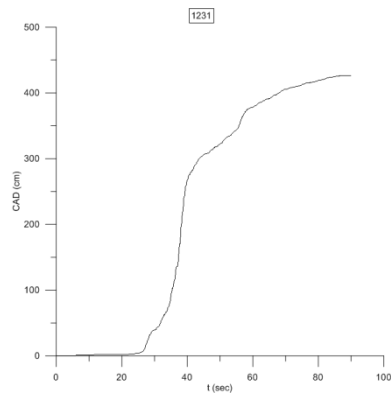
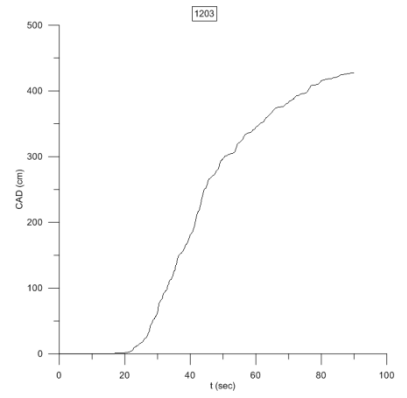
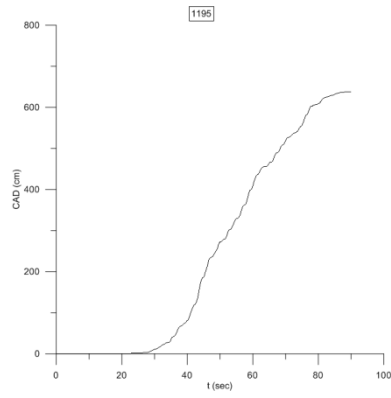
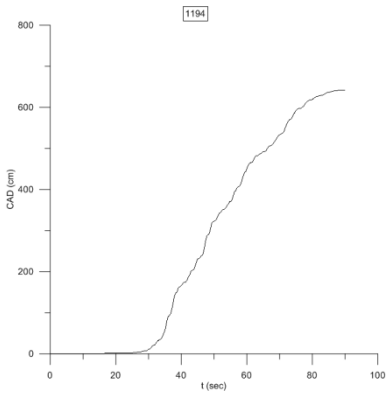
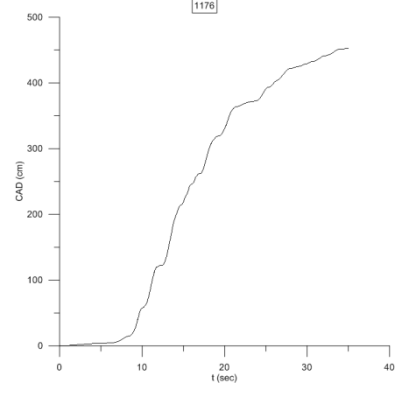
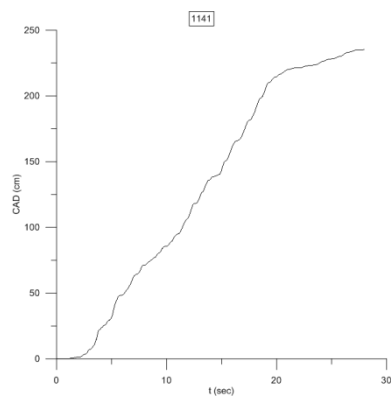
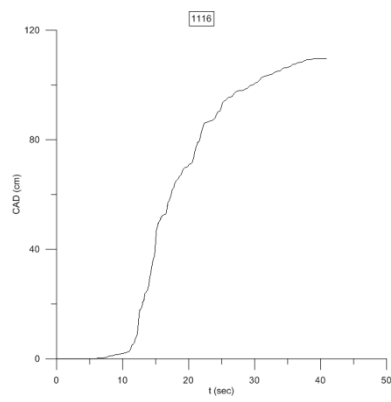
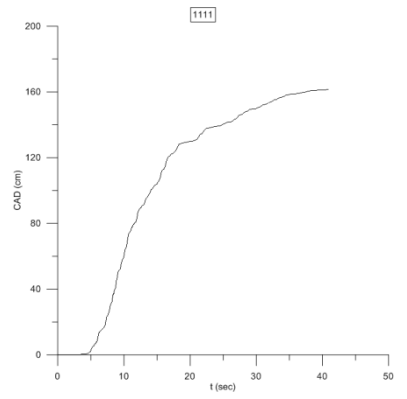
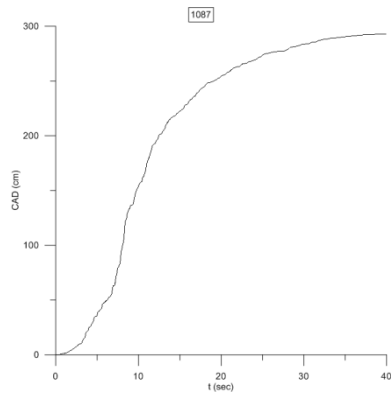
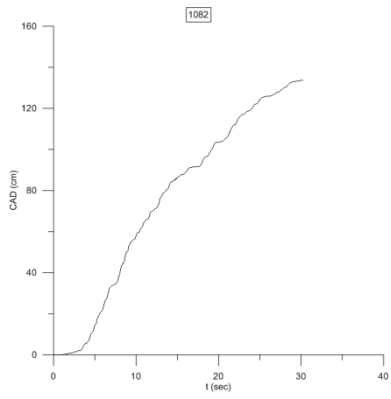


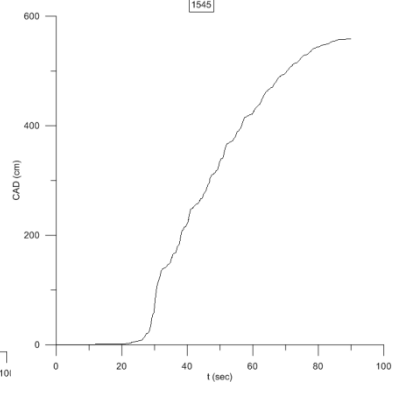
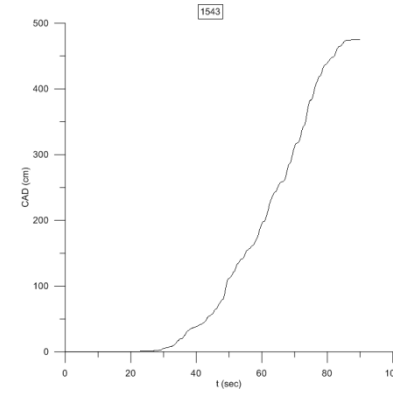
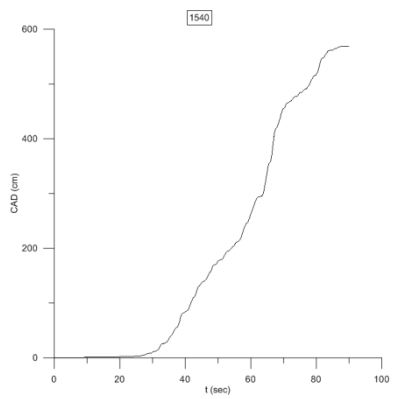
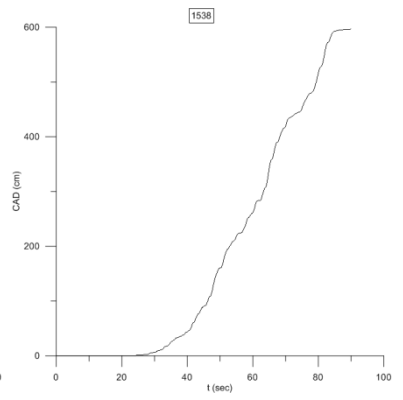
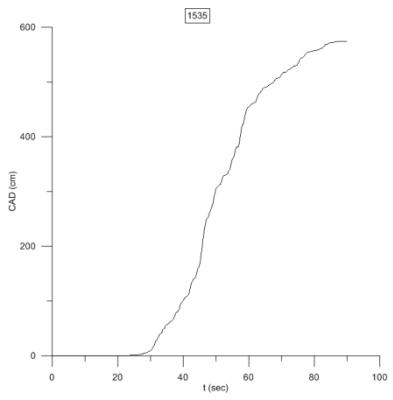
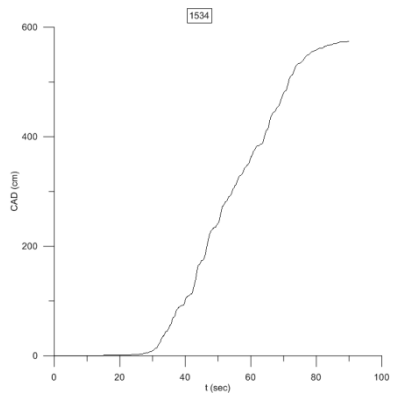
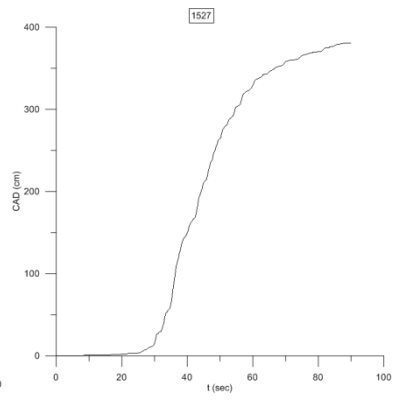
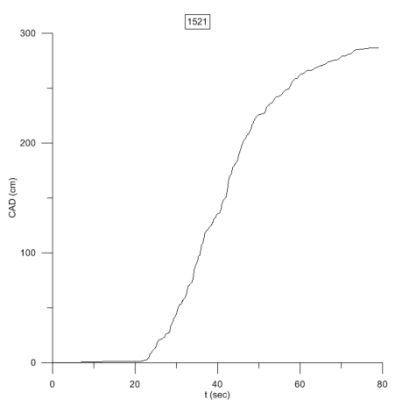
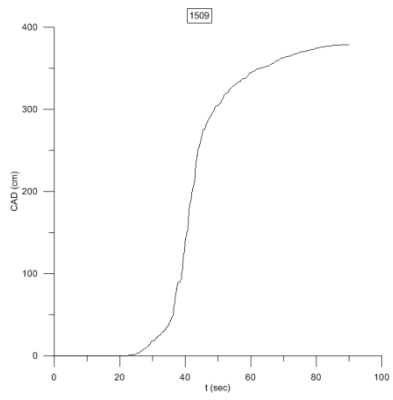
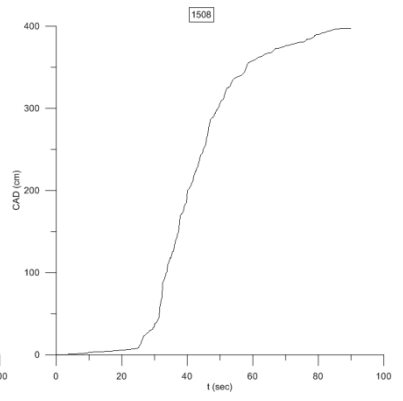
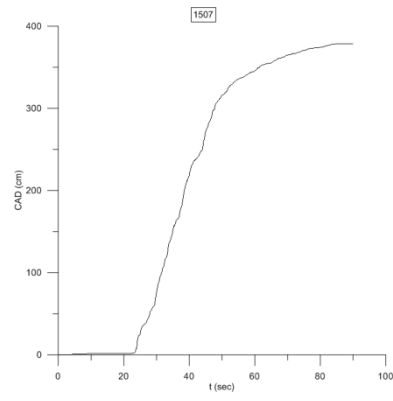
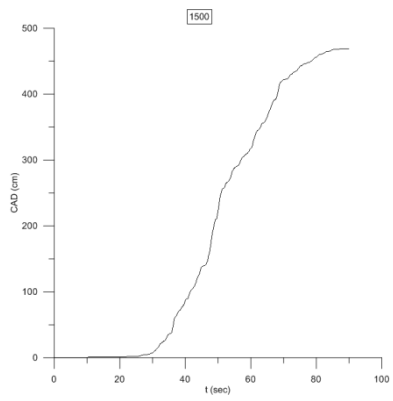
**Σχήμα Β3-93:** Διαγράμματα CAD συναρτήσει του χρόνου για τις παλμικές καταγραφές. Με μαύρη έντονη γραμμή αντιστοιχεί στο τμήμα του παλμού

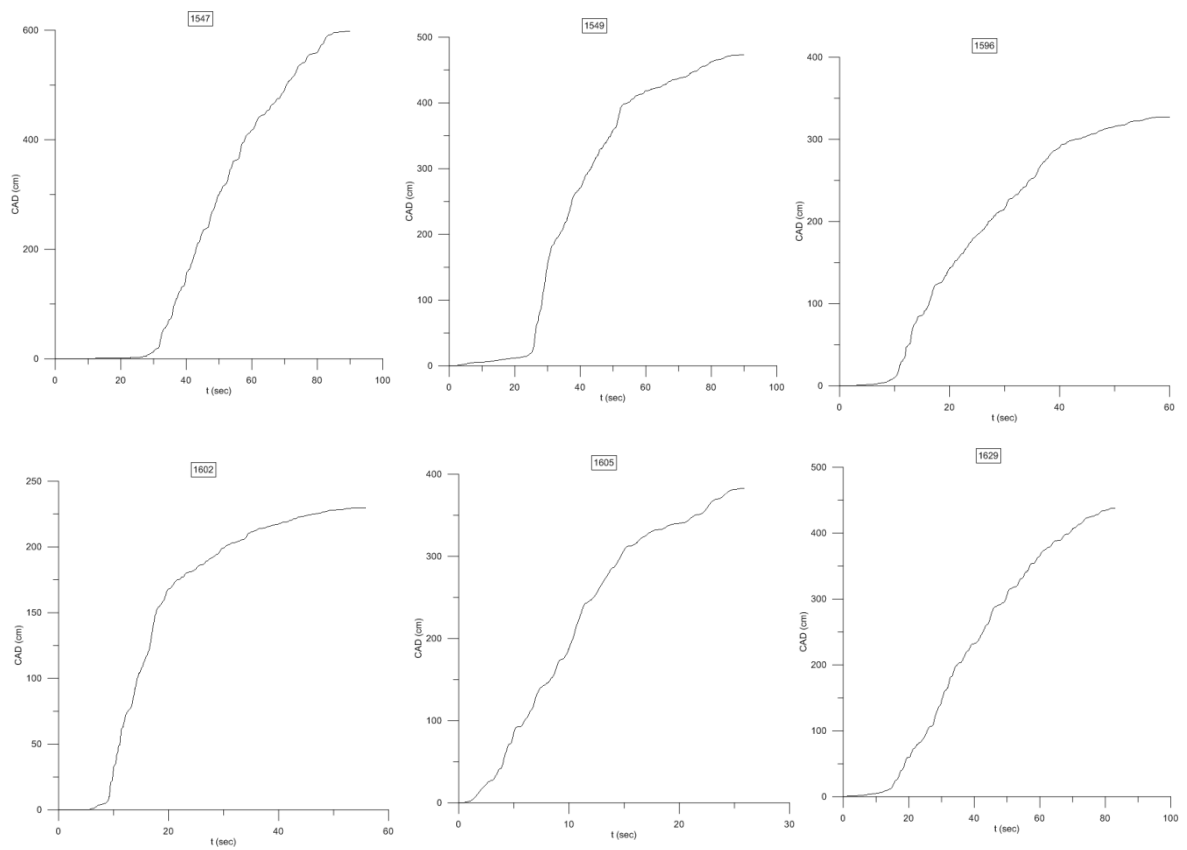
## Διαγράμματα CAD για τις μη παλμικές καταγραφές











**Σχήμα Β94-137:** Διαγράμματα CAD συναρτήσει του χρόνου για τις μη παλμικές καταγραφές.



# Παράρτημα Γ

Προγράμματα



## Πρόγραμμα υπολογισμού του συντελεστή Rowshandel ξ

```
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
```

```
DIMENSION GLAT(20000),GLON(20000),X(20000),Y(20000)
```

```
DIMENSION Z(20000),SLIP(20000),GLAT1(20000),GLON1(20000)
```

```
OPEN(2,FILE="DATA1.DAT")
```

```
OPEN(4,FILE="DATA2.DAT")
```

```
OPEN(3,FILE="REST2.DAT",STATUS="REPLACE")
```

```
OPEN(5,FILE="REST1.DAT",STATUS="REPLACE")
```

```
READ(*,*)GLATH,GLONH,ZH
```

```
READ(*,*) LF,ALIM
```

```
K=1
```

```
223
```

```
READ(4,*,END=111)GLAT1(K),GLON1(K)
```

```
K=K+1
```

```
GO TO 223
```

```
111
```

```
NK=K-1
```

```
I=1
```

```
SLMAX=0.0
```

```
100
```

```
READ(2,*,END=200)GLAT(I),GLON(I),X(I),Y(I),Z(I),SLI
```

```
P(I)
```

```
IF(SLIP(I).GT.SLMAX) SLMAX=SLIP(I)
```

```
C
```

```
Z(I)=-Z(I)
```

```
I=I+1
```

```
C
```

```
WRITE(3,*)SLMAX
```

	GO TO 100
200	NI=I-1
C	WRITE(*,*)SLMAX
	DO 333 K=1,NK
	ALF=LF+K-1
	GLONS=GLON1(K)
	GLATS=GLAT1(K)
	ZS=0.
	XS=X(1)/(GLON(1)-GLONH)
	XS=XS*(GLONS-GLONH)
C	WRITE(3,*)XS,X(1),GLON(1),GLONH,GLONS
	YS=Y(1)/(GLAT(1)-GLATH)
	YS=YS*(GLATS-GLATH)
	WRITE(3,*)XS,YS
	J=0
	SLM=SLMAX*ALIM
	SCOS=0.
	DO 101 I=1,NI
	IF (SLIP(I).LT.SLM) GO TO 101
	J=J+1
	A1=X(I)
	A2=Y(I)
	A3=Z(I)-ZH
	B1=XS-X(I)
	B2=YS-Y(I)
	B3=ZS-Z(I)



```
101      R1=A1*B1+A2*B2+A3*B3
        R2=(A1**2.+A2**2.+A3**2.)**0.5
        R3=(B1**2.+B2**2.+B3**2.)**0.5
        A1COS=R1/(R2*R3)
        SCOS=SCOS+A1COS
        WRITE(*,222)X(I),Y(I),Z(I),SLIP(I),A1COS
        WRITE(3,222)X(I),Y(I),Z(I),SLIP(I),A1COS
        CONTINUE
        AJ=J
        AKSI=SCOS/AJ
        WRITE(3,*)ALF,AKSI
        WRITE(5,*)ALF,AKSI
333      CONTINUE
222      FORMAT(5F15.5)
        STOP
        END
```

