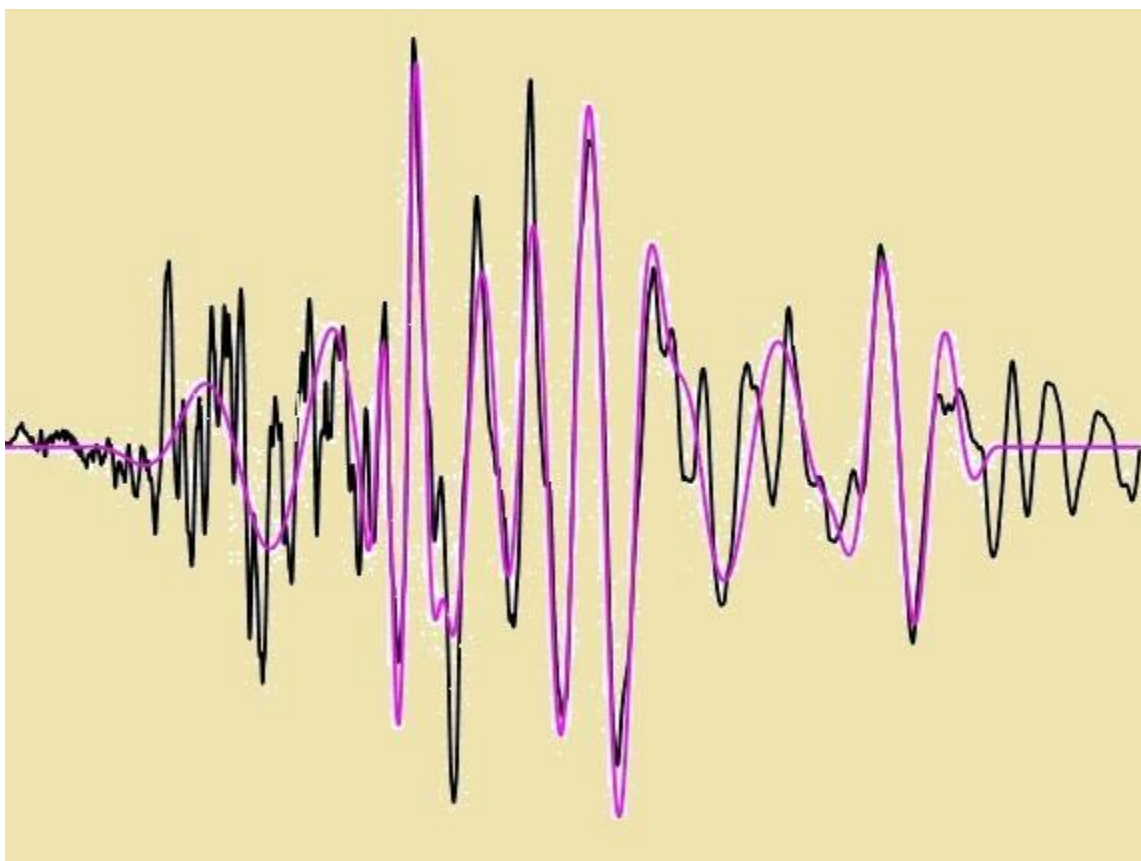




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΠΜΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία  
ΠΑΛΜΟΙ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΜΕΣΑΙΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΓΙΑ  
ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΕΙΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΚΑΙ Η  
ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ



Επιμέλεια: ΧΟΡΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ - ΖΕΡΝΤΗΣ ΜΠΛΕΡΙΜ  
Επιβλέπων: Ιωάννης Ν. Ψυχάρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Συνεπιβλέπων: Ιωάννης Ταφλαμπάς, Dr. Πολιτικός Μηχανικός

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2016



## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τον κύκλο των μεταπτυχιακών μας σπουδών θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά όλους όσους συνέβαλαν στην περάτωση της παρούσας εργασίας.

Κατ' αρχάς, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τους επιβλέποντες της μεταπτυχιακής μας εργασίας τον επιστημονικό συνεργάτη Dr. Πολιτικό Μηχανικό Ιωάννη Ταφλαμπά και τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. Ιωάννη Ν. Ψυχάρη, για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και την πολύτιμη και ουσιαστική βοήθεια και καθοδήγησή τους.

Την υποψήφια Διδάκτορα Ε.Μ.Π. Βασιλική Καρδούτσου για το ειλικρινές ενδιαφέρον και τη βοήθειά της στις δυσκολίες που αντιμετωπίσαμε.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ από καρδιάς στις οικογένειές μας για την αγάπη και τη στήριξή τους σε κάθε μας βήμα.

*Χόρτη Γεωργία  
Ζέρντης Μπλερίμ-Αντρέας  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αθήνα 2016*



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι εδαφικές κινήσεις κοντά στην περιοχή ενός ρήγματος έχουν μεγάλο ενδιαφέρον για το μηχανικό καθώς αυξάνουν τις ανελαστικές απαιτήσεις των κατασκευών. Κοντά στο ρήγμα, οι εδαφικές κινήσεις επηρεάζονται από το μηχανισμό διάρρηξης και τα φαινόμενα κατευθυντικότητας. Στην παρούσα εργασία γίνεται εντοπισμός αυτών των φαινομένων για 483 σεισμικές καταγραφές που αντιστοιχούν σε 65 σεισμούς μεσαίου μεγέθους, οι οποίοι σημειώθηκαν σε περιοχές του ελλαδικού χώρου και των παρακείμενων περιοχών.

Αρχικά περιγράφεται το φαινόμενο της κατευθυντικότητας και οι γεωμετρικές παράμετροι του μηχανισμού διάρρηξης που έχουν συσχετιστεί με τις δεσπόζουσες περιόδους των σημαντικών παλμών της εδαφικής κίνησης. Τα χαρακτηριστικά των παλμών ταχύτητας που μπορεί να υπάρχουν σε μια εδαφική κίνηση παρουσιάζουν ενδιαφέρον, ώστε η μορφή τους να μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά και μια κίνηση να μπορεί να ταξινομηθεί ως «παλμική» ή «μη παλμική».

Στη συνέχεια περιγράφεται η ποσοτική μέθοδος ταξινόμησης του Baker (2007), στην οποία οι σημαντικοί παλμοί μιας εδαφικής κίνησης αναγνωρίζονται και εξάγονται μέσω κυματικής ανάλυσης. Κατόπιν, παρουσιάζεται η μέθοδος ταξινόμησης που χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή, όπως προτάθηκε από τους ερευνητές P. Mimoglou, I. Psycharis, I. Taflampas (2014), στην οποία οι σημαντικοί παλμοί μιας εδαφικής κίνησης εξάγονται μέσω κυματικής ανάλυσης και η μαθηματική περιγραφή τους γίνεται με το κυματιδίον που χρησιμοποιούν στις έρευνές τους οι Mavroudis and Papageorgiou (2003). Οι περίοδοι των παλμών  $T_p$  προσδιορίζονται από τις κορυφές του φάσματος συνέλιξης  $S_d \times S_v$  για 5% απόσβεση, ενώ τα χαρακτηριστικά του κυματιδίου  $A$ ,  $\gamma$ ,  $\nu$  και υπολογίζονται μέσω της έννοιας της Αθροιστικής Απόλυτης Μετακίνησης (CAD -Taflampas et al. 2009) για ένα μέρος της εδαφικής κίνησης. Ακολούθως προσδιορίζεται η συσχέτιση μεταξύ της ιστορίας ταχύτητας του κυματιδίου  $v_p(t)$  και της ιστορίας της εδαφικής ταχύτητας της καταγραφής  $v_g(t)$ . Έπειτα, περιγράφεται μια μέθοδος ταξινόμησης των εδαφικών κινήσεων σε παλμικές και μη παλμικές, όπως εισήχθη από τους ερευνητές V. Kardoutsou, I. Taflampas, I. Psycharis (2014).

Ακολούθως, πραγματοποιείται η ταξινόμηση των 483 σεισμικών καταγραφών, κάνοντας χρήση της μεθόδου των Mimoglou et al. (2014). Όσον αφορά στον ελλαδικό χώρο, για σεισμούς που σημειώθηκαν πριν το 2000 χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα καταγραφών από την Hellenic Accelerogram Database (HEAD), ενώ για σεισμούς μετά το 2000 από στην ιστοσελίδα του ΙΤΣΑΚ (Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών). Για τους σεισμούς που σημειώθηκαν εκτός του ελλαδικού χώρου χρησιμοποιήθηκαν καταγραφές από την ESM (European Strong Motion Database). Η ταξινόμηση πραγματοποιείται με βάση τον πρώτο παλμό κάθε καταγραφής και μία ταξινομείται ως παλμική, εάν ο συντελεστής συσχέτισης του παλμού με την εδαφική κίνηση είναι ίσος ή μεγαλύτερος του 0,6 και η αρχική εδαφική κίνηση έχει μέγιστη εδαφική ταχύτητα  $PGV > 10\text{cm/s}$ .

Τέλος, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τα αποτελέσματα των αναλύσεων και προτείνονται τροποποιήσεις στα φάσματα του Ευρωκώδικα 8, ώστε να ληφθούν υπόψιν τα φαινόμενα κατευθυντικότητας.



## ABSTRACT

The ground motions at near fault sites are of great interest for the structural engineer, as they may put extreme inelastic demands on structures. Near the fault, the ground motions are influenced by the rupture mechanism and the so called directivity phenomena. In this postgraduate thesis, the effects of near fault directivity in 483 seismic records are investigated. These records refer to 65 medium-sized earthquakes that occurred in Greece and the adjacent region.

At first, the phenomenon of near fault directivity is described, along with geometric parameters of the rupture mechanism and the magnitude of the seismic event that have been correlated to the dominant periods of the significant pulses of the ground motion. The characteristics of the velocity pulses that may be inherent in a ground motion are of interest, so that one can describe their shape and classify the ground motion as “pulse like” or “non pulse like”, accordingly to its “pulse like” content.

Next, the quantitative classification method of Baker (2007) is described, in which the significant pulses of a ground motion are identified and extracted through wavelet analysis. Then, the classification method that is used in this thesis is described, as it is introduced by the researchers P. Mimoglou, I. Psycharis, I. Taflampas (2014), in which the significant pulses of a ground motion are extracted through wavelet analysis and their mathematical presentation is described by the wavelet used by Mavroeidis and Papageorgiou (2003). The pulse periods  $T_p$  are determined by the peaks of the convolution spectrum  $S_d \times S_v$ , for 5% damping, while the characteristics of the wavelet  $A$ ,  $\gamma$ ,  $v$  and  $t_0$  are computed using the Cumulative Absolute Displacement (CAD - Taflampas et al. 2009) for a part of the ground motion. Then, the correlation between the velocity time history of the wavelet  $v_P(t)$  and the ground velocity time history of the original record  $v_g(t)$  is determined. Following, another method for the classification of near fault ground motions to “pulse like” and “non pulse like” is described, as it is introduced by the researchers V. Kardoutsou, I. Taflampas, I. Psycharis (2014).

In sequel, the classification of 483 records is implemented, using the aforementioned method of Mimoglou et al. (2014). As regards Greece, this set of records was found in the HEAD (Hellenic Accelerogram Database), for earthquakes that occurred before the year 2000 and in ITSAK's website (Institute of Engineering Seismology and Earthquake Engineering), for earthquakes after that year. For earthquakes that occurred outside the Greek region, records from the ESM (European Strong Motion Database) were used. The classification is performed using the first dominant pulse of each record and one is classified as “pulse like” if the correlation coefficient of the pulse with the original motion is 0,6 and above and the peak ground velocity of the original motion is  $PGV > 10\text{cm/s}$ .

Finally, conclusions are drawn regarding to the analysis' results and modifications in Eurocode's spectra are suggested, in order to take directivity phenomena into account.





## Περιεχόμενα

1	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ .....	1
1.1	Εισαγωγή.....	1
1.2	Ρήγματα.....	1
1.2.1	Ενεργά ρήγματα.....	1
1.2.2	Βασικοί τύποι ρηγμάτων.....	1
1.2.3	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός ρήγματος .....	2
1.3	Φαινόμενα κατευθυντικότητας.....	3
1.4	Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου .....	7
1.4.1	Εξέταση του φαινομένου σε δύο διευθύνσεις.....	12
2	ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕΣΩ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ – Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΒΑΚΕΡ.....	15
2.1	Εισαγωγή.....	15
2.2	Αίτια δημιουργίας παλμών ταχύτητας .....	15
2.3	Μέθοδος κατάταξης των καταγραφών σε παλμικές και μη .....	16
2.4	Ανάλυση με κυματίδια.....	16
2.5	Ταξινόμηση των χρονοϊστοριών.....	19
2.5.1	Απομόνωση του παλμού ταχύτητας.....	19
2.5.2	Προσδιορισμός της βαρύτητας του αφαιρούμενου παλμού .....	21
2.5.3	Απόρριψη παλμών που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία ταχύτητας.....	22
2.5.4	Απόρριψη των εδαφικών κινήσεων με $PGV < 30 \text{ cm/s}$ .....	23
2.6	Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού .....	24
2.7	Εντοπισμός παλμών σε ένα εύρος προσανατολισμών .....	29
3	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ ΜΕΣΩ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΝΕΛΙΞΗ.....	35
3.1	Εισαγωγή.....	35
3.2	Προσδιορισμός των περιόδων των σημαντικών παλμών.....	36
3.3	Προσδιορισμός των παραμέτρων των κυματιδίων.....	40
3.4	Προτεινόμενη Μεθοδολογία σε Βήματα.....	43
4	ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 8 .....	45
4.1	Εδαφικές συνθήκες και κατηγορίες εδάφους.....	45
4.2	Φάσμα σχεδιασμού επιτάχυνσης.....	47
4.2.1	Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση .....	47
4.2.2	Φάσμα σχεδιασμού στην οριζόντια διεύθυνση.....	49
4.3	Φάσμα σχεδιασμού μετατόπισης.....	51
5	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	53
5.1	Εισαγωγή.....	53
5.2	Προσδιορισμός των παλμών μέσω κυματικής ανάλυσης .....	54

5.3	Ταξινόμηση των καταγραφών σε παλμικές και μη και εξαγωγή παλμών.....	57
5.4	Ελαστικά φάσματα απόκρισης.....	63
5.5	Το ενεργειακό κριτήριο ως δείκτης επιλογής των σημαντικών παλμών.....	69
5.6	Ανελαστικά φάσματα απόκρισης.....	76
5.7	Σύγκριση με τον Ευρωκώδικα 8.....	84
5.8	Στατιστική επεξεργασία φασμάτων.....	89
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	98
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	104

# **1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ**

## **1.1 Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι καταγραφές κοντινού πεδίου και τα χαρακτηριστικά που τις διακρίνουν. Τα τελευταία χρόνια με την πύκνωση των δικτύων επιταχυνσιογράφων γύρω από τα ενεργά ρήγματα έγινε δυνατή η παρατήρηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της εδαφικής κίνησης σε κοντινό ως προς τα ρήγματα πεδίο. Οι λεγόμενες καταγραφές κοντινού πεδίου έδειξαν σημαντικές διαφοροποιήσεις στα ελαστικά και ανελαστικά φάσματα απόκρισης και κατ'επέκταση στις σεισμικές φορτίσεις. Αρχικά, περιγράφονται οι τρεις βασικοί μηχανισμοί διάρρηξης. Κατόπιν, αναλύεται ο τρόπος γένεσης των παλμών κατευθυντικότητας και η διαφοροποίηση της επιρροής του φαινομένου σε περιοχές με διαφορετικές σχετικές θέσεις ως προς την επιφάνεια του ρήγματος. Επίσης, περιγράφονται οι βασικές παράμετροι που σχετίζονται με το φαινόμενο της κατευθυντικότητας, όπως έχουν διατυπωθεί από ερευνητές που έχουν ασχοληθεί εκτεταμένα με τις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου και αποτελούν πλέον βιβλιογραφία για την κατανόηση και αντιμετώπιση του εν λόγω φαινομένου.

## **1.2 Ρήγματα**

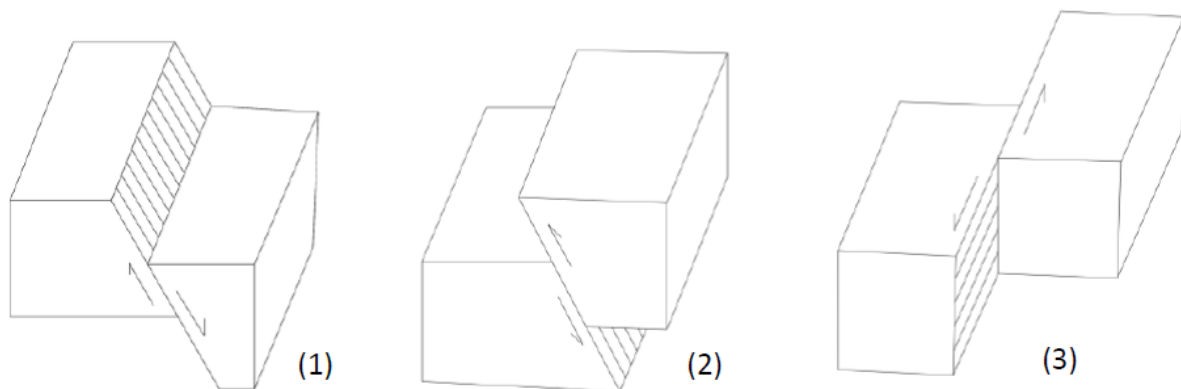
Τα ρήγματα αποτελούν ασυνέχειες του φλοιού της γης, οι οποίες έχουν προκληθεί από σεισμικά γεγονότα που έχουν συμβεί στο παρελθόν και στις οποίες αναμένεται στο μέλλον να εμφανιστούν πάλι σεισμοί. Ανάλογα με τη μορφή της σχετικής ολίσθησης των τεμαχών εκατέρωθεν της διάρρηξης και την γωνία που σχηματίζει η διάρρηξη ως προς το οριζόντιο επίπεδο, διακρίνονται τρία βασικά είδη ρηγμάτων: (1) κανονικά ρήγματα, (2) ανάστροφα ρήγματα και (3) ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης.

### **1.2.1 Ενεργά ρήγματα**

Ένα σεισμοτεκτονικό ρήγμα θεωρείται ενεργό όταν εμφανίζει μέσο ιστορικό ρυθμό ολίσθησης τουλάχιστον 1 mm/έτος και υφιστάμενες τοπογραφικές μαρτυρίες σεισμογόνου δραστηριότητας εντός της Ολόκαινης Περιόδου (στα τελευταία 11000 χρόνια), όπως ορίζεται στην §3.2.2.3 του Ευρωκώδικα 8 - Μέρος 2.

### **1.2.2 Βασικοί τύποι ρηγμάτων**

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα ρήγματα μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: (1) κανονικά ρήγματα, (2) ανάστροφα ρήγματα και (3) ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, οι οποίες απεικονίζονται στο σχήμα 1.1.



**Σχήμα 1.1 Βασικοί τύποι ρηγμάτων (1) Κανονικό ρήγμα, (2) Ανάστροφο ρήγμα, (3) Ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης**

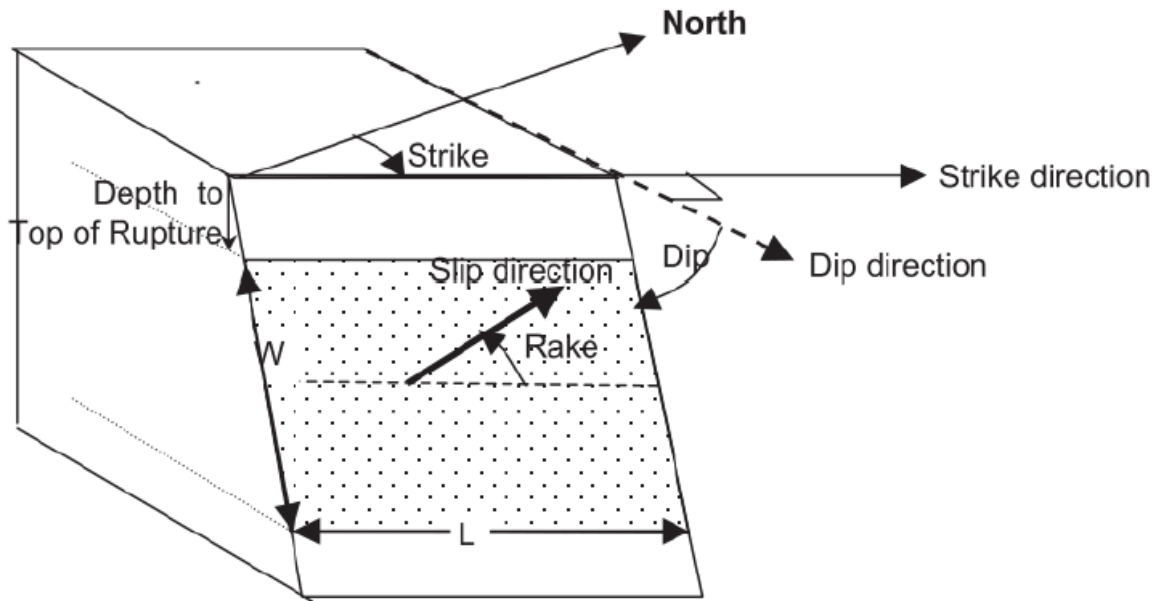
Στα κανονικά και στα ανάστροφα ρήγματα, που συχνά αναφέρονται στη βιβλιογραφία ενιαία ως ρήγματα κεκλιμένης ολίσθησης ή ρήγματα κατακόρυφης βύθισης (dip-slip faults), η διάρρηξη του πετρώματος κλίνει προς τα κάτω και το πέτρωμα μετακινείται προς τα πάνω ή προς τα κάτω κατά μήκος της διάρρηξης. Στο κανονικό ρήγμα (normal fault), το άνω τεμάχιο κινείται προς τα κάτω (εφελκυστικό πεδίο τάσεων). Στο ανάστροφο ρήγμα (reverse fault), το πέτρωμα και στις δύο πλευρές του ρήγματος συμπιέζεται ισχυρά. Οι συμπιεστικές δυνάμεις ωθούν το υπερκείμενο τεμάχιο να κινηθεί προς τα πάνω και το υποκείμενο τεμάχιο ωθείται προς τα κάτω (θλιπτικό πεδίο τάσεων).

Στο ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης (strike-slip fault), η διάρρηξη εκτείνεται κατακόρυφα μέσα στο πέτρωμα και τα τεμάχια των πετρωμάτων κατά μήκος του ρήγματος ολισθαίνουν το ένα ως προς το άλλο οριζόντια (διατμητικό πεδίο τάσεων). Τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης ανάλογα με τη φορά με την οποία ολισθαίνουν τα επιμέρους τεμάχια, χαρακτηρίζονται ως δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα.

Οι βασικοί αυτοί τύποι ρηγμάτων αναφέρονται και ως μηχανισμοί διάρρηξης του ρήγματος (rupture mechanisms) και αποτελούν ένα μόνο υποσύνολο ανάμεσα σε ένα πλήθος πιο πολύπλοκων μηχανισμών.

### 1.2.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός ρήγματος

Στο σχήμα 1.2 απεικονίζονται κάποιες παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη γεωμετρία και τον τύπο ενός ρήγματος.



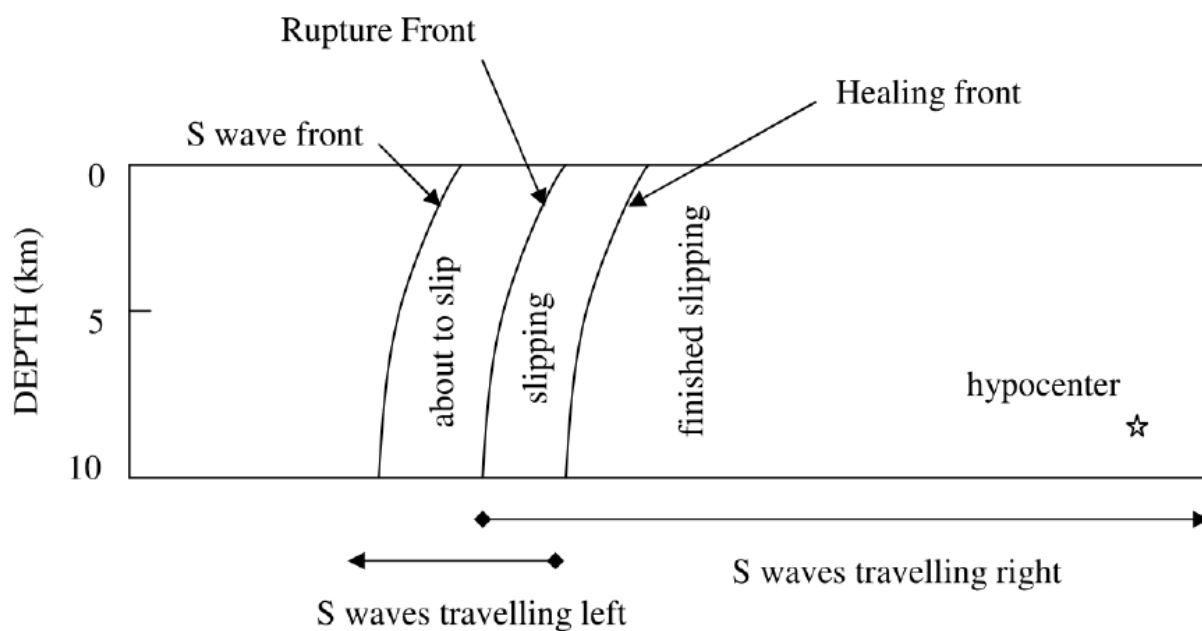
**Σχήμα 1.2 Γεωμετρικές παράμετροι ενός ρήγματος (NGA Database Documentation File)**

Η τομή του επιπέδου ενός ρήγματος με ένα οριζόντιο επίπεδο σχηματίζει μια ευθεία (Strike). Η δεξιόστροφη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στον γεωγραφικό βορρά και στη θετική φορά του ίχνους του ρήγματος (δηλαδή το αζιμούθιο του ίχνους του ρήγματος) ονομάζεται γωνία διεύθυνσης  $\varphi$  (trace angle), ενώ η γωνία  $\theta$  ανάμεσα στο οριζόντιο επίπεδο και το επίπεδο του ρήγματος είναι η γωνία βύθισης ή κλίση (dip angle). Η γωνία διεύθυνσης παίρνει τιμές εντός του εύρους  $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$ , ενώ η γωνία βύθισης παίρνει τιμές εντός του εύρους  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ . Τα ανάστροφα ρήγματα με γωνία  $\theta \leq 45^\circ$  παίρνουν την ονομασία Thrust.

Η διάσταση  $L$  παράλληλα στη Strike διεύθυνση αποτελεί το μήκος του ρήγματος, ενώ η διάσταση  $W$  μετράται επί της επιφάνειας διάρρηξης από το ανώτερο τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης μέχρι το κατώτερο και αποτελεί το πλάτος του ρήγματος. Η γωνία ολίσθησης (rake angle) μετράται πάνω στο επίπεδο του ρήγματος και σχηματίζεται μετρώντας αριστερόστροφα από τη Strike διεύθυνση μέχρι τη διεύθυνση μέσης ολίσθησης της επιφάνειας διάρρηξης και παίρνει τιμές εντός του εύρους  $0^\circ \leq \lambda \leq 360^\circ$ . Με βάση τη γωνία Rake αναγνωρίζεται ο τύπος του μηχανισμού διάρρηξης, αν δηλαδή το ρήγμα είναι κανονικό, ανάστροφο ή οριζόντιας ολίσθησης.

### 1.3 Φαινόμενα κατευθυντικότητας

Οι εδαφικές κινήσεις κοντά στην περιοχή της διάρρηξης ενός ρήγματος μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από τις αντίστοιχες κινήσεις που καταγράφονται μακριά από την περιοχή του ρήγματος. Η περιοχή που βρίσκεται κοντά στη σεισμική πηγή, η οποία καλείται ζώνη κοντινού πεδίου (Near Field Zone) θεωρείται ότι βρίσκεται σε μια ακτίνα 20-60 χιλιομέτρων μακριά από την περιοχή της επιφάνειας διάρρηξης, ανάλογα με το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος. Μέσα στην περιοχή του κοντινού πεδίου, τα στοιχεία της εδαφικής κίνησης επηρεάζονται σημαντικά από τον μηχανισμό γένεσης του σεισμού, την κατεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης ως προς την θέση καταγραφής και τις πιθανές μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις που οφείλονται στην ολίσθηση του ρήγματος. Αυτές οι παράμετροι παίζουν καθοριστικό ρόλο στα φαινόμενα κατευθυντικότητας της διάρρηξης (rupture directivity) και Στατική μόνιμη παραμόρφωση (fling step). Τα εδαφικά προσομοιώματα που χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθούν οι σεισμικές κινήσεις ενός ρήγματος, θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά των κινήσεων κοντινού πεδίου που αναφέρθηκαν ανωτέρω.



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

Ανάλογα με την κατεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης σε σχέση με μια εξεταζόμενη θέση προκύπτουν διαφορετικές εκφάνσεις του φαινομένου της κατευθυντικότητας. Η έμπροσθεν κατευθυντικότητα (forward directivity) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η διάδοση της διάρρηξης και η κατεύθυνση της ολίσθησης του ρήγματος πραγματοποιούνται προς την ίδια διεύθυνση και οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων έχει περίπου την ίδια τιμή με την ταχύτητα διάρρηξης. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1.3 για έναν μηχανισμό οριζόντιας ολίσθησης, όπου το μέτωπο της διάρρηξης διαδίδεται μακριά από το υπόκεντρο προς μια θέση, η ενέργεια η οποία εκλύεται από τις διαδοχικές ολισθήσεις του ρήγματος, συσσωρεύεται κοντά στο μέτωπο της διάρρηξης. Το μέτωπο των κυμάτων φτάνει ως ένας παλμός της κίνησης που χαρακτηρίζεται από μεγάλο εύρος, μικρή διάρκεια και μεσαία προς μεγάλη δεσπόζουσα περίοδο. Λόγω της πύλωσης των διατμητικών κυμάτων, η παλμική αυτή κίνηση είναι ιδιαίτερα έντονη στην κάθετη στο ίχνος του ρήγματος συνιστώσα της εδαφικής κίνησης.

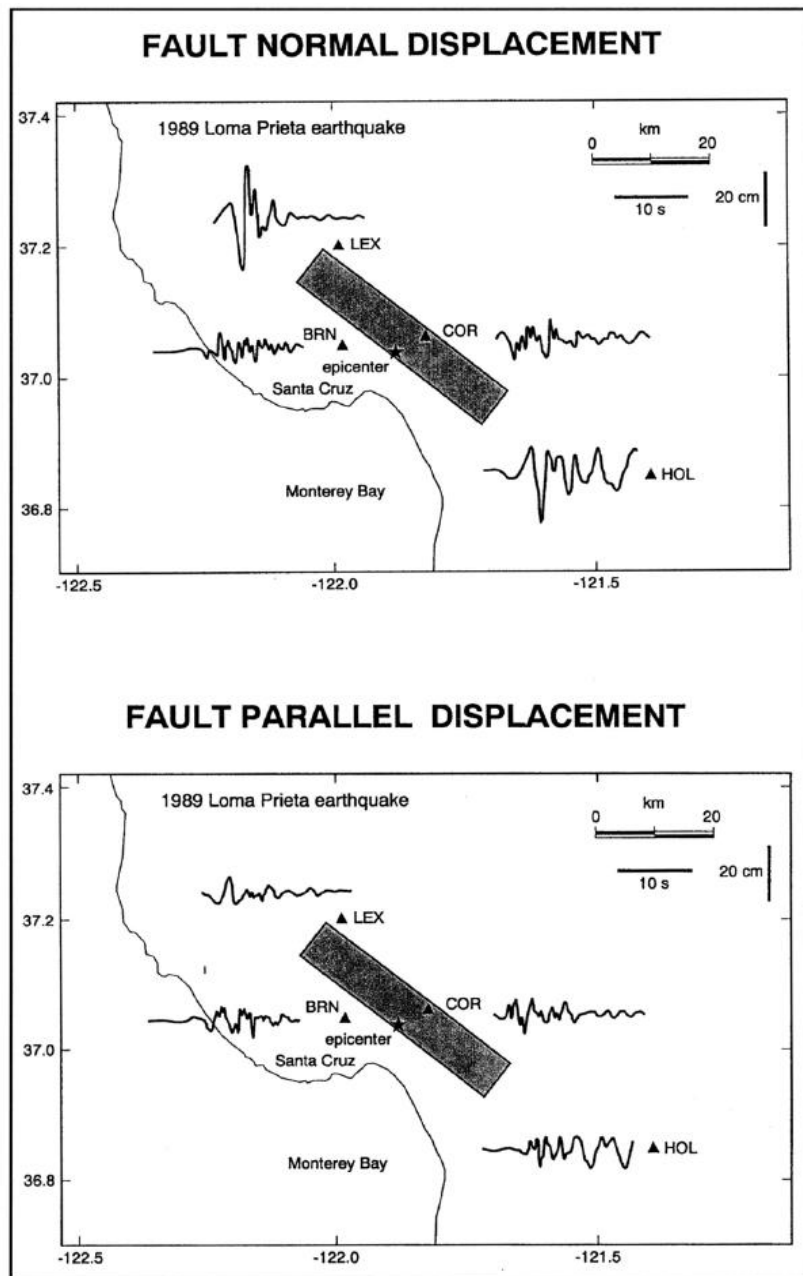
Στην περίπτωση που η διάδοση της διάρρηξης είναι αντίθετη από την εξεταζόμενη θέση, η άφιξη κάθε παλμού από τις επιμέρους ολισθήσεις, γίνεται στο τέλος του προηγούμενου του. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται όπισθεν κατευθυντικότητα (backward directivity) και χαρακτηρίζεται από κινήσεις μικρού σχετικά εύρους και μεγάλης σχετικά διάρκειας.

Η ουδέτερη κατευθυντικότητα (neutral directivity) εμφανίζεται σε θέσεις που βρίσκονται στο πλάι της επιφάνειας διάρρηξης του ρήγματος και επομένως, η διάρρηξη δεν διαδίδεται ούτε προς, ούτε μακριά από την περιοχή.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της επίδρασης του φαινομένου της κατευθυντικότητας στις εδαφικές μετακινήσεις, παρουσιάζεται στο σχήμα 1.4 και αφορά το σεισμό στο Loma Prieta το 1989. Στο επίκεντρο του σεισμού καταγράφονται μέτριες οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις τόσο στην παράλληλη (fault parallel), όσο και στην κάθετη (fault normal) συνιστώσα του ρήγματος, το οποίο αποδίδεται στο φαινόμενο της όπισθεν κατευθυντικότητας. Όμως στα άκρα του ρήγματος, λόγω της έμπροσθεν κατευθυντικότητας παρατηρούνται έντονες οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις στην κάθετη συνιστώσα του ρήγματος, ενώ στην παράλληλη με το ρήγμα συνιστώσα οι εδαφικές μετακινήσεις έχουν παρόμοιες τιμές με αυτές κοντά στο επίκεντρο. Οι μεγάλες παλμικές κινήσεις

παρατηρούνται μόνο στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα και μόνο μακριά από το επίκεντρο.

Τα φαινόμενα κατευθυντικότητας που προκαλούνται από την διάρρηξη ενός ρήγματος, παρατηρούνται τόσο σε περιπτώσεις ρηγμάτων α. οριζόντιας ολίσθησης (strike slip), όσο και β. κεκλιμένης ολίσθησης (dip slip). Στην περίπτωση ρηγμάτων κεκλιμένης μετακίνησης, φαινόμενα έμπροσθεν κατευθυντικότητας εμφανίζονται σε θέσεις που βρίσκονται κοντά στην οριζόντια προβολή του ανωτέρω τμήματος του ρήγματος. Όπως συμβαίνει και στους μηχανισμούς οριζόντιας ολίσθησης, η διάδοση της διατμητικής μετατόπισης σε ένα ανάστροφο ρήγμα προκαλεί παλμό κατευθυντικότητας σε διεύθυνση κάθετα στην διάρρηξη του ρήγματος (Somerville et al. 1997a).



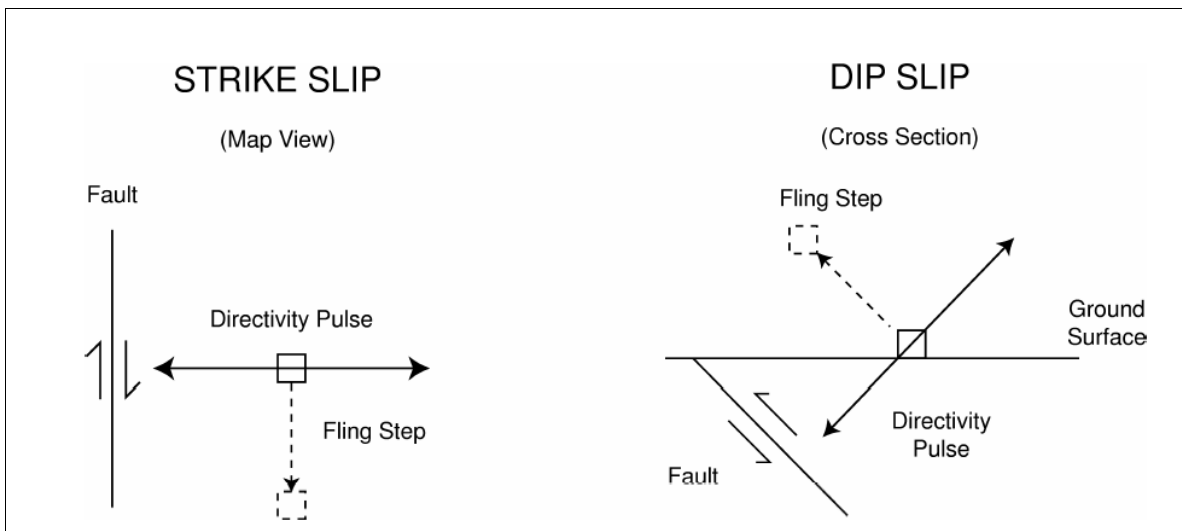
**Σχήμα 1.4** Αποτελέσματα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες μετακινήσεων του σεισμού του Loma Prieta του 1989 για τις κάθετες (άνω) και τις παράλληλες (κάτω) στο ρήγμα συνιστώσες, EERI, 1995

Στις σύγχρονες ψηφιακές καταγραφές των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου παρατηρούνται μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις, λόγω του στατικού πεδίου παραμόρφωσης του σεισμού. Οι εν λόγω στατικές μετακινήσεις, καλούνται παραμένουσες μετακινήσεις (fling step) και είναι αποτέλεσμα

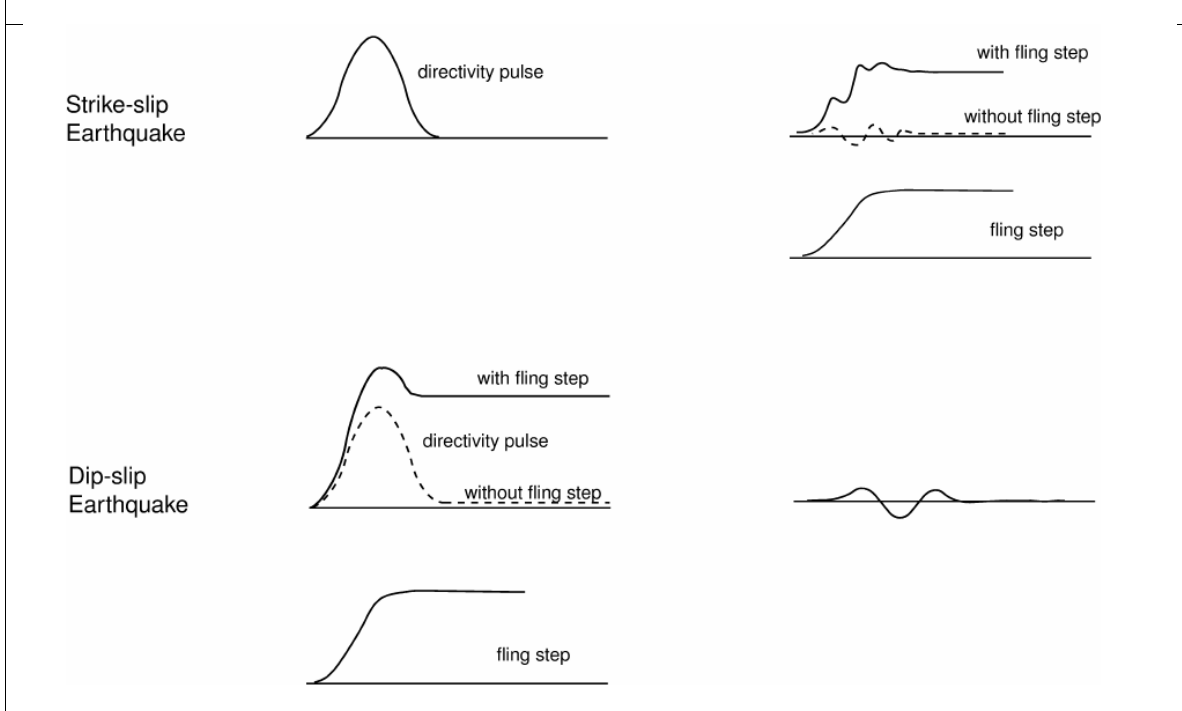
της συνολικής ολίσθησης του σεισμού. Οι μετακινήσεις αυτές εμφανίζονται παράλληλα στη διεύθυνση ολίσθησης και δε συνδέονται άμεσα με τις προαναφερθείσες δυναμικές μετατοπίσεις που οφείλονται στους παλμούς κατευθυντικότητας. Στα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα εμφανίζονται ισχυροί παλμοί κατευθυντικότητας, ενώ στην παράλληλη προς το ρήγμα συνιστώσα υπάρχει μια μόνιμη στατική παραμόρφωση. Στα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης κάθετα στην διεύθυνση του ρήγματος καταγράφεται μια εδαφική κίνηση η οποία αποτελεί σύνθεση του παλμού κατευθυντικότητας και της ολίσθησης του ρήγματος.

Ο προσανατολισμός τόσο του παλμού κατευθυντικότητας, όσο και της παραμένουσας μετακίνησης για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και κατακόρυφης βύθισης φαίνονται στο σχήμα 1.5 ,ενώ στο σχήμα 1.6 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες χρονοϊστορίες.





**Σχήμα 1.5** Σχηματικό διάγραμμα των προσανατολισμών της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα κεκλιμένης ολίσθησης



**Σχήμα 1.6** Χρονοϊστορίες για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα κεκλιμένης ολίσθησης, στο οποίο φαίνονται οι επιρροές της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας μαζί και χωριστά

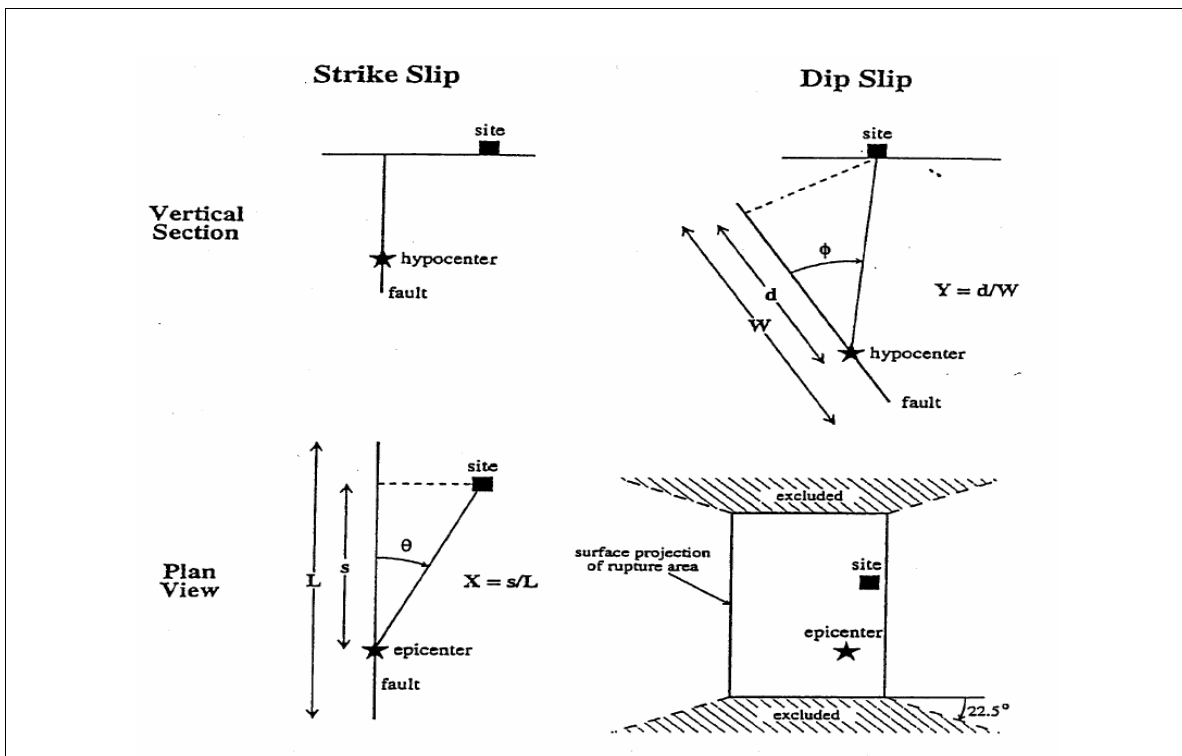
Καταγραφές κοντινού πεδίου σε περιπτώσεις οριζοντίου ρήγματος και ρήγματος βύθισης, κάθετα και παράλληλα στο ίχνος του ρήγματος( Stewart et al, 2001)

#### 1.4 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου

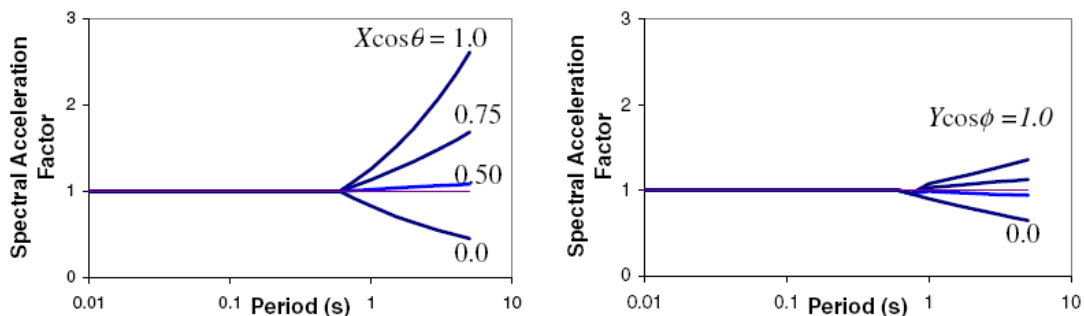
Οι Somerville et al. (1997a) μελέτησαν τις συνθήκες υπό τις οποίες εμφανίζονται τα φαινόμενα της έμπροσθεν και όπισθεν κατευθυντικότητας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.7 , η διαφοροποίηση

στην επίδραση του φαινομένου της κατευθυντικότητας εξαρτάται αφενός μεν από την γωνία η οποία σχηματίζεται μεταξύ της διεύθυνσης στην οποία διαδίδεται η διάρρηξη και της διεύθυνσης των κυμάτων που μεταφέρονται από το ρήγμα στην εξεταζόμενη θέση (  $\theta$  για τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και  $\varphi$  για τα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης), αφετέρου δε από το τμήμα της επιφάνειας διάρρηξης που βρίσκεται μεταξύ της εξεταζόμενης θέσης και του υποκέντρου (  $X$  για τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και  $Y$  για τα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης). Τα φαινόμενα της έμπροσθεν κατευθυντικότητας έχουν μεγαλύτερη επίδραση (μεγαλύτερη ενίσχυση των φασματικών τιμών στην περιοχή των μεσαίων και μεγάλων περιόδων) σε περιπτώσεις στις οποίες έχουμε μικρές γωνίες μεταξύ της εξεταζόμενης θέσης και του ρήματος, δηλαδή η θέση πλησιάζει την ρηγμάτωση και μεσολαβεί μεγάλο τμήμα ρηγμάτωσης μεταξύ της εστίας και της θέσης καταγραφής, λόγω της ενέργειας που συσσωρεύεται από τις διαδοχικές ολισθήσεις.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι ακόμα και αν υπάρχουν οι γεωμετρικές προϋποθέσεις εμφάνισης των φαινομένων της έμπροσθεν κατευθυντικότητας, οι επιπτώσεις της μπορεί να μην συμβούν. Αυτό μπορεί να γίνει στην περίπτωση που ένας καταγραφικός σταθμός βρίσκεται στο τελευταίο τμήμα ενός ρήματος και η διάρρηξη διαδίδεται προς το σταθμό, αλλά η ολίσθηση συγκεντρώνεται κοντά στο τέλος του ρήματος όπου βρίσκεται ο σταθμός.



Σχήμα 1.7 Παράμετροι που σχετίζονται με την διάρρηξη και καθορίζουν το εύρος στα φαινόμενα της πρόσω κατευθυντικότητας (Somerville et al, 1997)



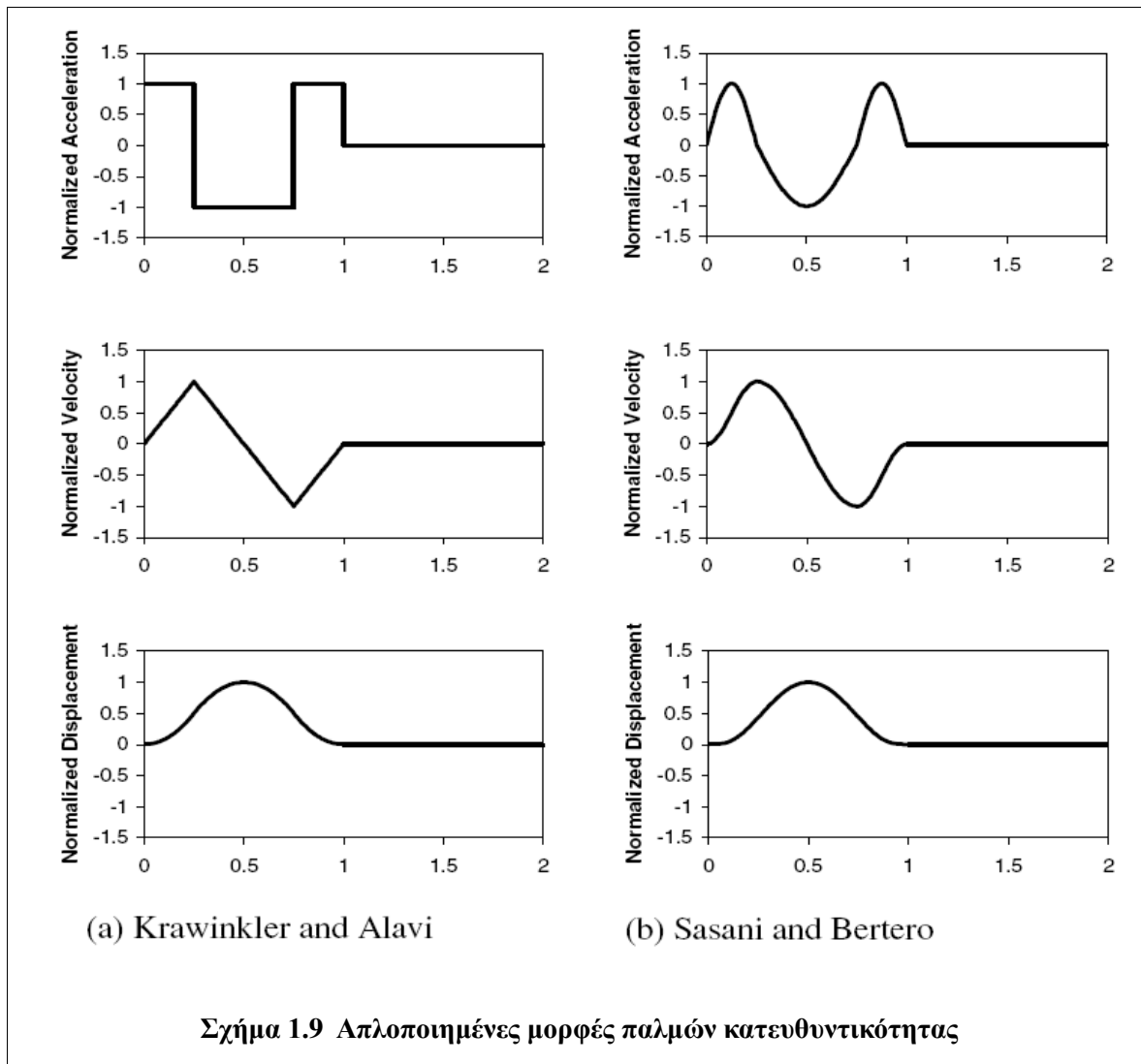
Σχήμα 1.8 Επίπτωση των παραμέτρων της διάρρηξης στην φασματική μεγέθυνση σε σχέση με συνήθεις καταγραφές (Somerville et al, 1997)

Για να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα της κατευθυντικότητας, οι Somerville et al. (1997a) συσχέτισαν τις ανηγμένες προς ένα μέσο φάσμα τιμές των φασμάτων απόκρισης για απόσβεση 5%, με τις γεωμετρικές παραμέτρους που φαίνονται στο σχήμα 1.7, τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο σχήμα 1.8. 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.

Οι έρευνες για την απόκριση των κατασκευών σε σεισμούς κοντινού πεδίου έδειξαν ότι η απεικόνιση των εδαφικών κινήσεων με τη μορφή χρονοϊστορίας είναι προτιμότερη από μια απεικόνιση με τη μορφή φάσματος απόκρισης (Somerville 1998, Alavi and Krawinkler 2000, Sasani and Bertero 2000, Rodriguez-Marek 2000). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις εδαφικές κινήσεις που επηρεάζονται από τα φαινόμενα κατευθυντικότητας και της παραμένουσας

μετακίνησης, η ενέργεια συγκεντρώνεται σε μερικούς παλμούς στη χρονοϊστορία των ταχυτήτων.

Μελέτες των Krawinkler and Alavi (1998) και Sasani and Bertero (2000), έδειξαν ότι τα εμφανή χαρακτηριστικά γνωρίσματα της απόκρισης των κατασκευών που υποβάλλονται σε κινήσεις κοντινού πεδίου, μπορούν να προσεγγισθούν με απλοποιημένες μορφές των παλμών της εδαφικής ταχύτητας. Στο σχήμα 1.9 παρουσιάζονται ορισμένοι απλοποιημένοι παλμοί που έχουν προταθεί από ερευνητές και θεωρούνται αντιπροσωπευτικοί των παλμών ταχύτητας σε ένα σεισμό κοντινού πεδίου.

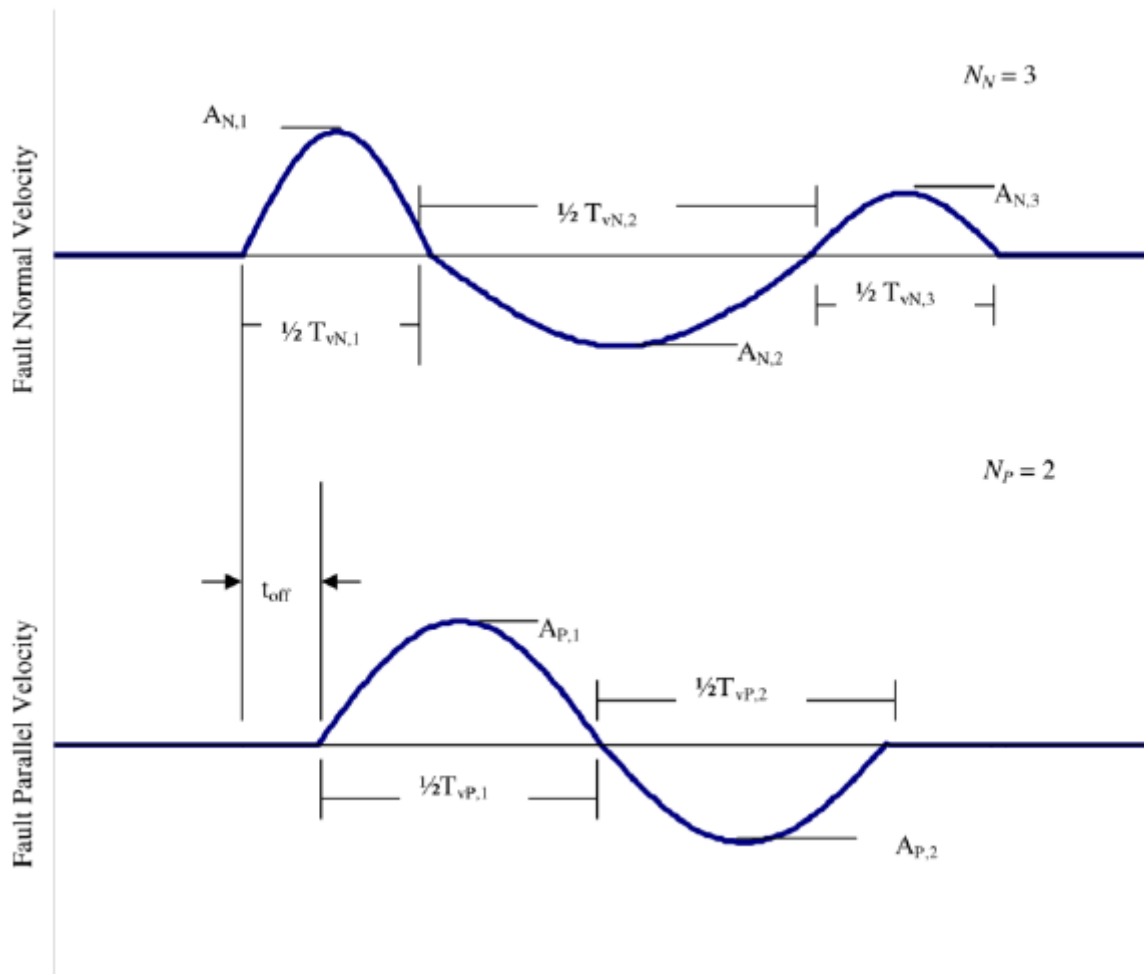


Οι απλοποιημένες χρονοϊστορίες των παλμών κατευθυντικότητας καθορίζονται από τον αριθμό των ημίκυκλων που ισοδυναμούν με τους παλμούς της εδαφικής κίνησης, την περίοδο κάθε ημίκυκλου και το αντίστοιχο εύρος.

Στον πίνακα 1.1 ορίζονται οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν της εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου, οι οποίες απεικονίζονται γραφικά στο σχήμα 1.10. Επομένως ένας απλός προσδιορισμός της εδαφικής κίνησης είναι δυνατός με την εκτίμηση της μέγιστης οριζόντιας ταχύτητας PHV (Peak Horizontal Velocity), της δεσπόζουσας περιόδου του παλμού  $T_v$  και του αριθμού των σημαντικών ημίκυκλων της κίνησης στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνσης.

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

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



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

Ο καθορισμός της περιόδου γίνεται με τον προσδιορισμό της διάρκειας του παλμού, είτε βάσει των σημείων στα οποία μηδενίζεται η ταχύτητα (zero crossing time), είτε των σημείων στα οποία η ταχύτητα ισούται με το 10% της μέγιστης ταχύτητας του παλμού. Βέβαια υπάρχει ένας βαθμός αβεβαιότητας στην εκτίμηση της περιόδου του παλμού, όμως η αβεβαιότητα που προκύπτει από την επεξεργασία των σεισμολογικών μεταβλητών είναι σαφώς μεγαλύτερη.

Οι Krawinkler and Alavi (1998) προσδιορίζουν την παρουσία παλμών ταχύτητας, όταν υπάρχει μια σαφής και σφαιρική κορυφή αιχμής στο φάσμα απόκρισης ταχύτητας της εδαφικής κίνησης. Όμως αυτή η εκτίμηση της ισοδύναμης περιόδου του παλμού ( $T_{v-p}$ ) είναι ασαφής.

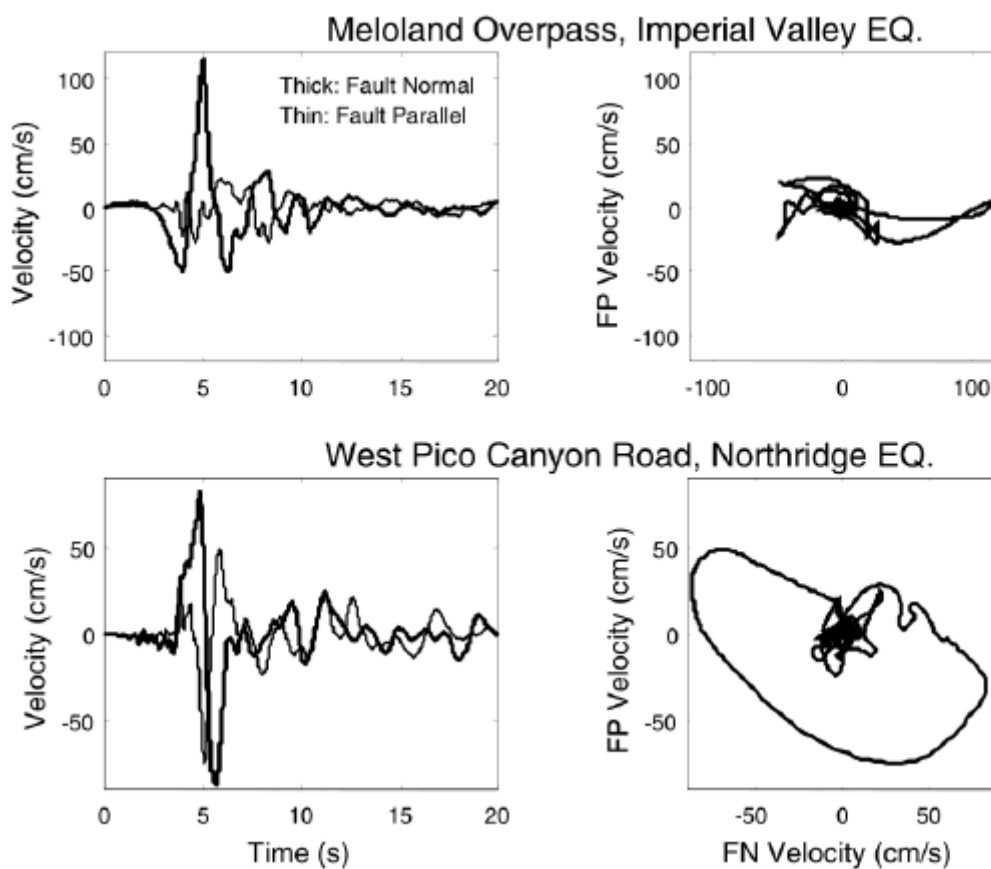
Για σεισμικές κινήσεις που περιέχουν μόνο έναν σημαντικό παλμό αυτοί οι διαφορετικοί ορισμοί δίνουν παραπλήσια αποτελέσματα, όμως για πιο πολύπλοκες καταγραφές τα αποτελέσματα μπορεί να αποκλίνουν σημαντικά.

#### 1.4.1 Εξέταση του φαινομένου σε δύο διευθύνσεις

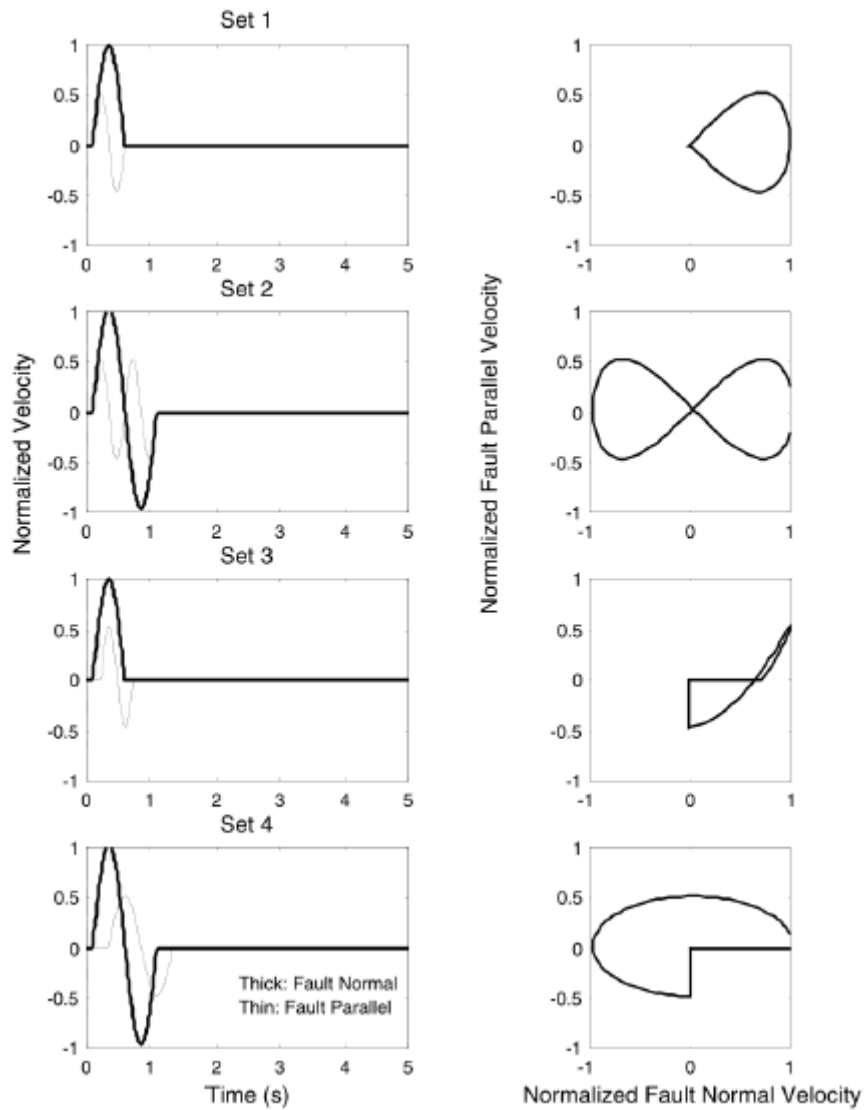
Οι μελέτες απόκρισης των κατασκευών στις σεισμικές κινήσεις κοντινού πεδίου έχουν επικεντρωθεί στις επιπτώσεις της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (π.χ. Krawinkler and Alavi 2000). Εντούτοις, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες η παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα μπορεί να είναι επίσης σημαντική. Για παράδειγμα, μείωση της δυσκαμψίας του εδάφους λόγω της απόκρισης του

στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα, μπορεί να οδηγήσει στην εκδήλωση μεγαλύτερων παραμορφώσεων στη διεύθυνση της παράλληλης στο ρήγμα συνιστώσας. Μη γραμμικές αναλύσεις εδαφικής απόκρισης από τον Rodriguez-Marek (2000) δείχνουν ότι οι τοπικές εδαφικές μπορεί να έχουν επιπτώσεις στις τιμές της  $T_v$  και της  $PHV$  και στις δυο διευθύνσεις.

Στο σχήμα 1.11 παρουσιάζονται δυο κινήσεις κοντινού πεδίου με σημαντικά διαφορετικές κινήσεις στην παράλληλη στο ρήγμα διεύθυνση. Επιπρόσθετη έρευνα δίνει την δυνατότητα να διακριθούν τα αποτελέσματα της δόνησης δυο διευθύνσεων στην απόκριση του εδάφους και των κατασκευών εντός της ζώνης κοντινού πεδίου όπου οι δύο συνιστώσες της οριζόντιας κίνησης μπορούν να διαφέρουν σημαντικά. Σε μια έρευνα που έγινε από τον Rodriguez-Marek (2000) σε καταγραφές που εμφανίζεται το φαινόμενο της έμπροσθεν κατευθυντικότητας, διαπιστώθηκε ότι οι απλουστευμένες κινήσεις που παρουσιάζονται στο σχήμα 1.12 θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να ερευνηθεί η σημασία της διαξονικής καταπόνησης σε μελλοντικές κατασκευές. Εάν είναι σημαντική στην συμπεριφορά των κατασκευών, μπορεί να πρέπει να υπολογιστεί και η κατακόρυφη συνιστώσα της εδαφικής κίνησης.



Σχήμα 1.11 Χρονοϊστορίες ταχύτητας και οριζόντια τροχιακά σχέδια της κάθετης (FN) και της παράλληλης (FP) στο ρήγμα συνιστώσας για δύο καταγραφές κοντινού πεδίου



**Σχήμα 1.12** Απλοποιημένες αναπαραστάσεις ημιτονικού παλμού για εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Η μέγιστη οριζόντια ταχύτητα (PHV) για παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα αντιστοιχεί στο 50% της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (Rodriguez-Marek 2000)



## **2 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕΣΩ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ – Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ BAKER**

### **2.1 Εισαγωγή**

Ανά τα χρόνια αρκετοί ερευνητές ανέπτυξαν μοντέλα προσομοίωσης της εδαφικής κίνησης για σεισμούς κοντινού πεδίου. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια ποσοτική μέθοδος εντοπισμού των σημαντικών παλμών που εμπεριέχονται στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας εδαφικής κίνησης, λόγω του φαινομένου της κατευθυντικότητας στην ζώνη κοντινού πεδίου. Παρουσιάζεται επίσης μια μέθοδος που εισήχθη από τον Baker (2007) η οποία κατατάσσει τις καταγραφές των εδαφικών κινήσεων σε παλμικές και μη παλμικές. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται κυματική ανάλυση για την εξαγωγή του μεγαλύτερου παλμού ταχύτητας μιας δεδομένης εδαφικής κίνησης. Το μέγεθος του εξαγόμενου παλμού συγκρίνεται με την αρχική καταγραφή για την ανάπτυξη ενός ποσοτικού κριτηρίου κατηγοριοποίησης μιας εδαφικής κίνησης σε παλμική ή μη.

Οι εδαφικές κινήσεις στις οποίες υπάρχουν παλμοί στην αρχή της χρονοϊστορίας της ταχύτητας ανήκουν σε μια κατηγορία κινήσεων που προκαλούν σημαντικές καταστροφές στις κατασκευές.

Για τον προσδιορισμό του υποσυνόλου αυτών των παλμικών κινήσεων, που παρατηρούνται συνήθως σε περιοχές που βρίσκονται κοντά στο ρήγμα και οφείλονται κατά κύριο λόγο στην παρουσία των φαινομένων κατευθυντικότητας, ορίζονται δύο κριτήρια α) ο παλμός φτάνει νωρίς στη χρονοϊστορία της εδαφικής κίνησης και β) το απόλυτο μέγεθος του παλμού ταχύτητας είναι μεγάλο. Η περίοδος του παλμού ταχύτητας είναι μια σημαντική παράμετρος για τους μηχανικούς και υπολογίζεται εύκολα ως μέρος της διαδικασίας.

Η προσπάθεια κατάταξης των καταγραφών σε παλμικές και μη, είναι χρήσιμη για ένα μεγάλο εύρος σεισμολογικών θεμάτων και θεμάτων μηχανικής που επηρεάζονται από τα φαινόμενα κατευθυντικότητας, όπως είναι η πιθανοτική ανάλυση εκτίμησης σεισμικού κινδύνου, η δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης απομείωσης των εδαφικών κινήσεων και οι μη γραμμικές αναλύσεις σε κατασκευές.

Η μέθοδος του Baker δίνει αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα και καθώς αποτελεί μια εντελώς ποσοτική κλειστή μαθηματική διαδικασία, επιτρέπει την επεξεργασία μιας μεγάλης βάσης δεδομένων. Σε αντίθεση με παλαιότερες τεχνικές με τις οποίες η ανίχνευση των παραμέτρων του σημαντικού παλμού γίνεται με οπτικά κριτήρια και το αποτέλεσμα εναπόκειται στην υποκειμενική αντίληψη του φαινομένου από τον εκάστοτε ερευνητή.

Οι παλμικές αυτές κινήσεις αυξάνουν τις σεισμικές απαιτήσεις των κατασκευών και προκαλούν εκτεταμένες βλάβες, όπως παρατηρήθηκε σε διάφορους σεισμούς. Τα συμβατικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την πιθανοτική ανάλυση σεισμικού κινδύνου δε λαμβάνουν υπόψη την παλμική κίνηση και επομένως μπορεί να υποεκτιμούν τον σεισμικό κίνδυνο σε περιοχές κοντινού πεδίου όπου αναμένεται η εμφάνιση παλμού. Η παραμένουσα μετακίνηση του εδάφους (fling step) που αποτελεί άλλο ένα χαρακτηριστικό του κοντινού πεδίου δε λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα μελέτη.

### **2.2 Αίτια δημιουργίας παλμών ταχύτητας**

Στις έρευνες του Baker μια εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται ως παλμική όταν στη χρονοϊστορία της ταχύτητας εμφανίζονται ένας, δύο ή τρεις παλμοί, οι οποίοι φτάνουν νωρίς στη χρονοϊστορία και έχουν μεγάλο πλάτος. Η παρουσία των παλμών αυτών όπως αναφέραμε και προηγουμένως οφείλεται κυρίως στο φαινόμενο της κατευθυντικότητας λόγω της διάρρηξης ενός ρήγματος στην περιοχή κοντινού πεδίου. Όπως περιγράφηκε στο πρώτο κεφάλαιο η πρόσω κατευθυντικότητα (forward directivity) εμφανίζεται όταν η διάρρηξη κατευθύνεται σε μια θέση καταγραφής με ταχύτητα περίπου ίση με την ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων και η διεύθυνση ολίσθησης του ρήγματος είναι επίσης προς την θέση αυτή. Η έμπροσθεν κατευθυντικότητα

εμφανίζεται στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της εδαφικής κίνησης και για τα οριζόντια ολίσθησης ρήγματα και για τα κατακόρυφης βύθισης. Η επιρροή της παραμένουσας μετακίνησης δε θεωρείται σημαντική για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του φαινομένου της κατευθυντικότητας και ως εκ τούτου δε λαμβάνεται υπόψη στη διαδικασία που περιγράφεται σε αυτό το κεφάλαιο.

Παλμοί στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας εδαφικής κίνησης μπορούν να εμφανιστούν και λόγω άλλων φαινομένων εκτός της κατευθυντικότητας. Για παράδειγμα, αν μια θέση βρίσκεται πάνω σε τραχεία διεπιφάνεια επί της επιφάνειας ολίσθησης του ρήγματος, τότε τα σεισμικά κύματα που οφείλονται στην τραχύτητα μπορεί να δώσουν παλμούς που θα μοιάζουν με παλμούς κατευθυντικότητας. Επίσης σε πολύπλοκους εδαφικούς σχηματισμούς όπως το άκρο μιας γεωλογικής λεκάνης, μπορεί να δημιουργηθούν παλμοί ταχύτητας από την παρέμβαση των σεισμικών κυμάτων στη δομή του εδάφους και τη διέλευση τους από αυτό (basin effects).

## 2.3 Μέθοδος κατάταξης των καταγραφών σε παλμικές και μη

Μια μέθοδος κατάταξης των καταγραφών, είναι απαραίτητο να εμπεριέχει κάποια καλώς ορισμένα κριτήρια, ώστε να είναι σε θέση να διακρίνει αν μια μορφή που εμφανίζεται στην χρονοϊστορία της ταχύτητας είναι παλμός ή όχι. Όπως θα δούμε παρακάτω, η μέθοδος εγγενώς δεν έχει δυαδικό χαρακτήρα, δηλαδή το αποτέλεσμα που δίνει για μια εδαφική κίνηση δεν είναι εκ των προτέρων της μορφής Παλμική ή Μη παλμική. Αντιθέτως, η μέθοδος χρησιμοποιεί δείκτες οι οποίοι εκφράζουν το κατά πόσο μια καταγραφή είναι ή όχι παλμική και ορίζει ένα όριο (threshold), με βάση το οποίο εξάγεται το συμπέρασμα δυαδικού τύπου Παλμική ή Μη παλμική.

Ακόμη, θα πρέπει να απαιτεί ελάχιστη παρέμβαση ή κριτική σκέψη από τον ερευνητή, ώστε να υπάρχει συνέπεια στα αποτελέσματα που προκύπτουν από ερευνητή σε ερευνητή και να μην υπάρχουν περιθώρια λάθους ή αμφισβήτησης.

Για να επιτευχθούν όσα αναφέρονται παραπάνω, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί ένα σχετικά απλό μοντέλο για την περιγραφή της μορφής του παλμού. Αν και άλλοι μελετητές έχουν αναπτύξει λεπτομερή μοντέλα περιγραφής του παλμού (Fu and Menun 2004, Mavroeidis and Papageorgiou 2003), στις μελέτες του Baker προτιμάται μια απλή αναπαράσταση του παλμού, ώστε να είναι πιο εύκολα εφαρμόσιμη στην αυτόματη ταξινόμηση ενός μεγάλου πλήθους καταγραφών. Μια αναλογία όσον αφορά τη συσχέτιση του φαινομένου με τον εκάστοτε τύπο του εδάφους θα ήταν χρήσιμη, αφού από θέση σε θέση υπάρχουν διαφορετικές και πολύπλοκες γεωλογικές συνθήκες, που μπορούν να περιγραφούν με αναλυτικά εδαφικά προσομοιώματα. Αλλά για την απλοποίηση της μεθόδου και τη χρήση της σε πρακτικές εφαρμογές, όπως επίσης και την ελαχιστοποίηση των λαθών, επιλέγονται τέσσερις με πέντε κατηγορίες εδάφους.

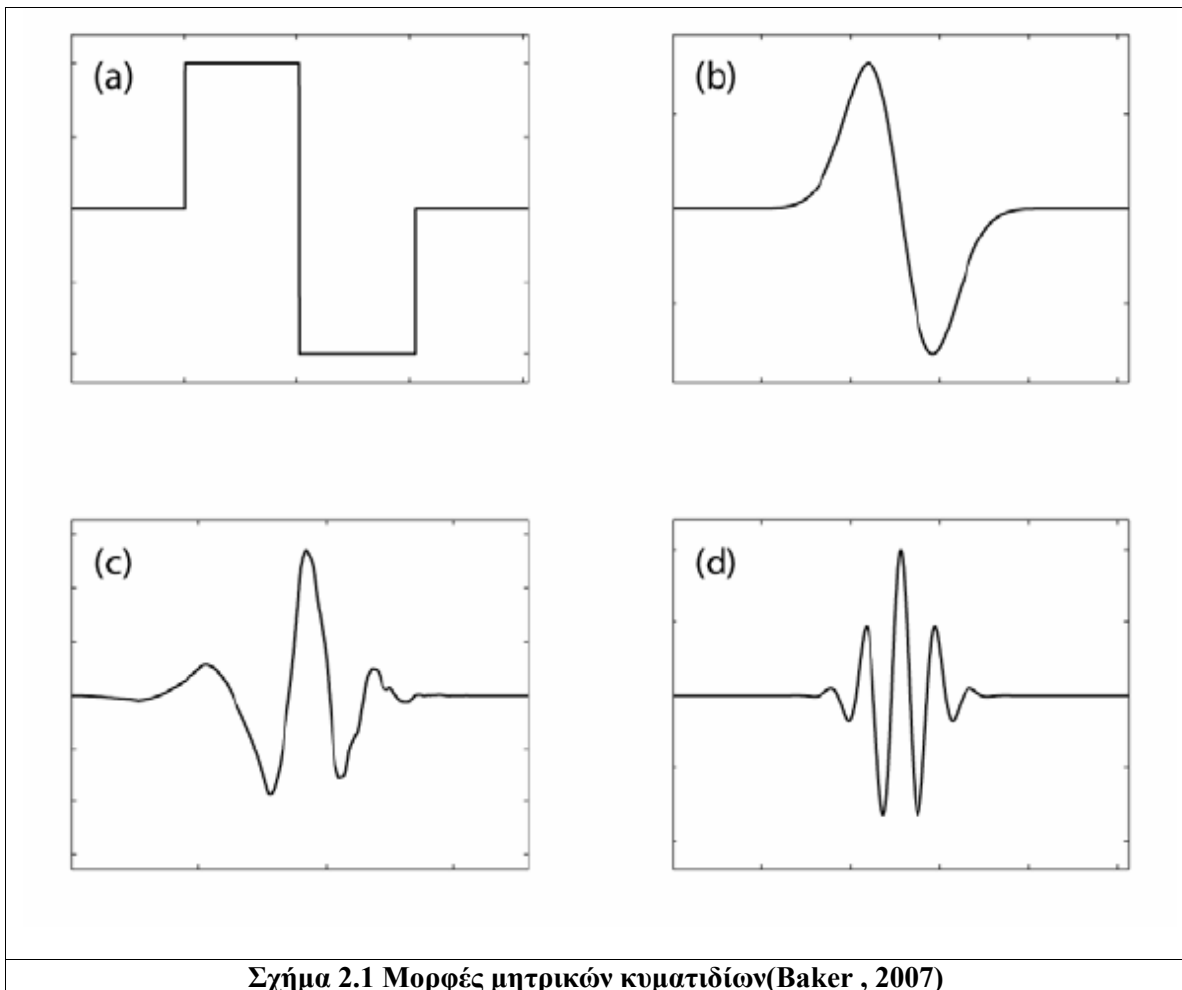
Το συμπέρασμα που εξάγεται από τα παραπάνω είναι ότι η χρήση της κυματικής ανάλυσης για τον εντοπισμό των παλμών ταχύτητας είναι κατάλληλη για την ταξινόμηση των εδαφικών κινήσεων, αφού η πρώτη απαιτεί ελάχιστο υπολογιστικό χρόνο, έχει ποσοτικό χαρακτήρα και συνεπώς είναι αρκετά αξιόπιστη. Οι παλμοί ταχύτητας μπορούν εύκολα να εντοπιστούν και να αποκοπούν από τη χρονοϊστορία, ώστε να χρησιμοποιηθούν για την κατηγοριοποίηση των εδαφικών κινήσεων σε παλμικές ή μη και παρέχοντας δεδομένα για μια παραμετρική διερεύνηση των ιδιοτήτων τους.

## 2.4 Ανάλυση με κυματίδια

Η κυματική ανάλυση (wavelet analysis) έχει σημειώσει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία 25 χρόνια, τόσο σε θεωρητικό, όσο και σε πρακτικό επίπεδο, αφού έχει διερευνηθεί η χρησιμότητά της σε ένα αρκετά ευρύ φάσμα προβλημάτων. Πλέον είναι διαθέσιμη μια ευρεία βιβλιογραφία που αφορά τα θεωρητικά στοιχεία της μεθόδου, καθώς και προγραμματιστικές λεπτομέρειες (Mallat 1999). Η μέθοδος μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα μέσω της σύγκρισής της με την ανάλυση Fourier. Η ανάλυση Fourier αναπαριστά ένα σήμα χρησιμοποιώντας ένα γραμμικό συνδυασμό ημιτονικών

αρμονικών με άπειρη διάρκεια και συγκεκριμένη συχνότητα. Αντίθετα, η ανάλυση με κυματίδια καταλήγει σε μία σειρά κυματιδίων, που το καθένα είναι εντοπισμένο χρονικά και χαρακτηρίζεται από μία στενή περιοχή συχνοτήτων. Για μη στάσιμα κύματα, όπως είναι και οι σεισμικές εδαφικές κινήσεις, είναι προτιμότερη η απεικόνιση του σήματος ως ένα άθροισμα κυματιδίων, από ότι ως ένα άθροισμα στάσιμων ημιτονικών κυμάτων.

Τα κυματίδια είναι βασικές συναρτήσεις που ικανοποιούν συγκεκριμένες μαθηματικές απαιτήσεις. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρκετά πρότυπα κυματίδια για την αποσύνθεση ενός σήματος (σχήμα 2.1). Η πρότυπη συνάρτηση που θα αναφέρεται ως μητρικό κυματίδιο (mother wavelet), κλιμακώνεται και μεταφέρεται στο χρόνο για να σχηματιστεί μια σειρά βασικών συναρτήσεων. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός θεωρητικών παραγόντων για την επιλογή ενός χρηστικού μητρικού κυματιδίου, όπως είναι η ορθογωνικότητα, η συμβατότητα, ο διαθέσιμος αριθμός παραγώγων, η συμμετρία κ.α. (Mallat 1999). Τα κυματίδια που απεικονίζονται στο σχήμα 2.1 χρησιμοποιούνται ευρέως και θεωρούνται κατάλληλα για το συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογών.



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

$$\Phi_{s,l}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Phi\left(\frac{t-l}{s}\right) \quad (2.1)$$

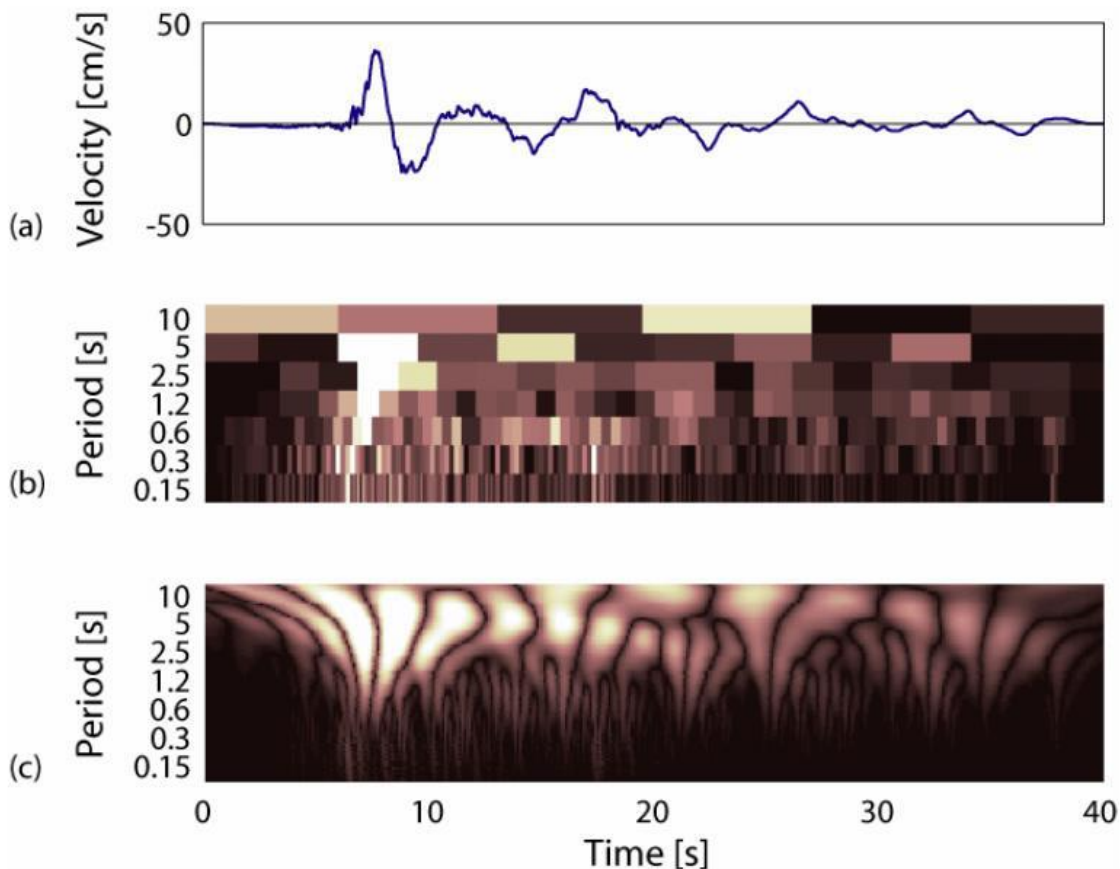
όπου  $\Phi_{s,l}(t)$  είναι η μητρική συνάρτηση του κυματιδίου,  $s$  είναι η παράμετρος κλίμακας που διαστέλλει το κυματίδιο, και  $l$  είναι η χωρική παράμετρος που μεταφέρει το κυματίδιο στο χρόνο. Οποιοδήποτε σήμα  $f(t)$  μπορεί να παρασταθεί ως ένας γραμμικός συνδυασμός βασικών συναρτήσεων και οι συντελεστές για το γραμμικό συνδυασμό μπορούν να υπολογιστούν από το ολοκλήρωμα συνέλιξης (convolution integral) που παρουσιάζεται παρακάτω και η σύλληψη της

μορφής του είναι ίδια με το μετασχηματισμό Fourier:

$$C_{s,l} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Phi_{s,l}(t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\frac{1}{\sqrt{s}}\Phi\left(\frac{t-l}{s}\right)dt(2.2)$$

Για την ανάλυση ψηφιακών κυμάτων, όπως η χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας εδαφικής κίνησης, η εξίσωση (2.2) εκφυλίζεται σε άθροισμα και δε χρησιμοποιείται ως ολοκλήρωμα, με τις αρχές όμως με τις οποίες ορίστηκε να είναι οι ίδιες.

Υφίστανται δύο προσεγγίσεις με τις οποίες πραγματοποιείται ο μετασχηματισμός κυματιδίων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ενός σήματος, ανάλογα με τον αριθμό των κλιμάκων και τον αριθμό των θέσεων για τους οποίους υπολογίζονται οι συντελεστές. Ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου (continuous wavelet transform) υπολογίζει τους συντελεστές του κυματιδίου που σχετίζονται με κάθε ακέραια τιμή των παραμέτρων κλίμακας και θέσης. Παρέχει έτσι λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά χρόνου-συχνότητας του σήματος. Ένα ψηφιακό όμως σήμα μήκους  $n$ , μπορεί να περιγραφεί πλήρως χρησιμοποιώντας έναν μειωμένο αριθμό συντελεστών. Αν τα κυματίδια είναι ορθογωνικά, τότε χρειάζονται ημόνο κυματίδια για την πλήρη περιγραφή οποιουδήποτε χρονικού σήματος μήκους  $n$ . Ο διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίου (discrete wavelet transform), παρέχει τους  $n$  συντελεστές που περιγράφουν το πλάτος των  $n$  κυματιδίων σε διάφορες κλίμακες και θέσεις. Αν το  $n$  μπορεί να εκφραστεί ως δύναμη του 2, τότε υπάρχει ένας αποτελεσματικός αλγόριθμος για την εκτέλεση των υπολογισμών, ανάλογος του μετασχηματισμού Fourier. Στο σχήμα 2.2 απεικονίζονται συνιστώσες από συνεχείς και διακριτούς μετασχηματισμούς κυματιδίων από ένα παράδειγμα μιας εδαφικής κίνησης, ώστε να παρουσιαστεί η διαφορά μεταξύ των δύο προσεγγίσεων.



Σχήμα 2.2 Μετασχηματισμοί κυματιδίων (Baker 2007)

Επίσης στην περίπτωση που το μητρικό κυματίδιο αντιπροσωπεύει επαρκώς το επιθυμητό σχήμα των χαρακτηριστικών που εξετάζονται, τότε απαιτούνται ακόμη λιγότεροι από  $n$  συντελεστές για την επαρκή περιγραφή του σήματος. Κάποιοι από τους συντελεστές θα είναι μεγάλοι και τα κυματίδια που τους αντιστοιχούν θα αναπαριστούν τα σημαντικά χαρακτηριστικά του σήματος. Πολλοί από τους άλλους συντελεστές θα είναι κοντά στο μηδέν επειδή τα κυματίδια που τους αντιστοιχούν θα αναπαριστούν σχετικά μικρά χαρακτηριστικά του σήματος. Αυτό το φαινόμενο διαμορφώνει τη βάση πολλών εφαρμογών απομάκρυνσης θορύβου από σήματα (de-noising applications) και συμπίεσης δεδομένων. Όσον αφορά την κυματική ανάλυση για την απομόνωση ενός παλμού από μια σεισμική καταγραφή, η χρησιμότητα της παραπάνω παρατήρησης έγκειται στο συμπέρασμα ότι εάν ένα σημαντικό ποσοστό της χρονοϊστορίας μιας εδαφικής κίνησης περιγράφεται από ένα ή λίγα κυματίδια ικανοποιητικά, δηλαδή με μεγάλες τιμές συντελεστών, τότε υποδεικνύεται η ύπαρξη παλμού στην καταγραφή.

Και οι δύο τύποι μετασχηματισμού κυματιδίων που περιγράφηκαν συνοπτικά παραπάνω έχουν χαρακτηριστικά που τους καθιστούν χρήσιμους για τη μέθοδο ταξινόμησης που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό. Ενώ ο συνεχής μετασχηματισμός έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος και παράγει πολλούς περισσότερους συντελεστές από αυτούς που απαιτούνται για την περιγραφή του σήματος, η υψηλότερη ανάλυση που παρέχει είναι χρήσιμη για τον ακριβή προσδιορισμό των μεγάλων συντελεστών της κίνησης, οι οποίες θα υποδείξουν την περίοδο και τη θέση του παλμού ταχύτητας σε μια καταγραφή κοντινού πεδίου.

Επιπλέον, σε αντίθεση με το διακριτό μετασχηματισμό, οι συντελεστές που προκύπτουν από το συνεχή μετασχηματισμό δεν επηρεάζονται από το εάν περιέχονται πολλά μηδενικά στην αρχή ή το τέλος του σήματος. Αυτό είναι χρήσιμο, αφού δεν είναι επιθυμητή η επεξεργασία συντελεστών που εξαρτώνται από χαρακτηριστικά άσχετα με την εδαφική κίνηση, όπως μπορεί να είναι η στιγμή στην οποία το καταγραφικό όργανο άρχισε ή τέλειωσε την καταγραφή. Τόσο ο διακριτός, όσο και ο συνεχής μετασχηματισμός, χρησιμοποιούνται στο κριτήριο ταξινόμησης που περιγράφεται παρακάτω.

## **2.5 Ταξινόμηση των χρονοϊστοριών**

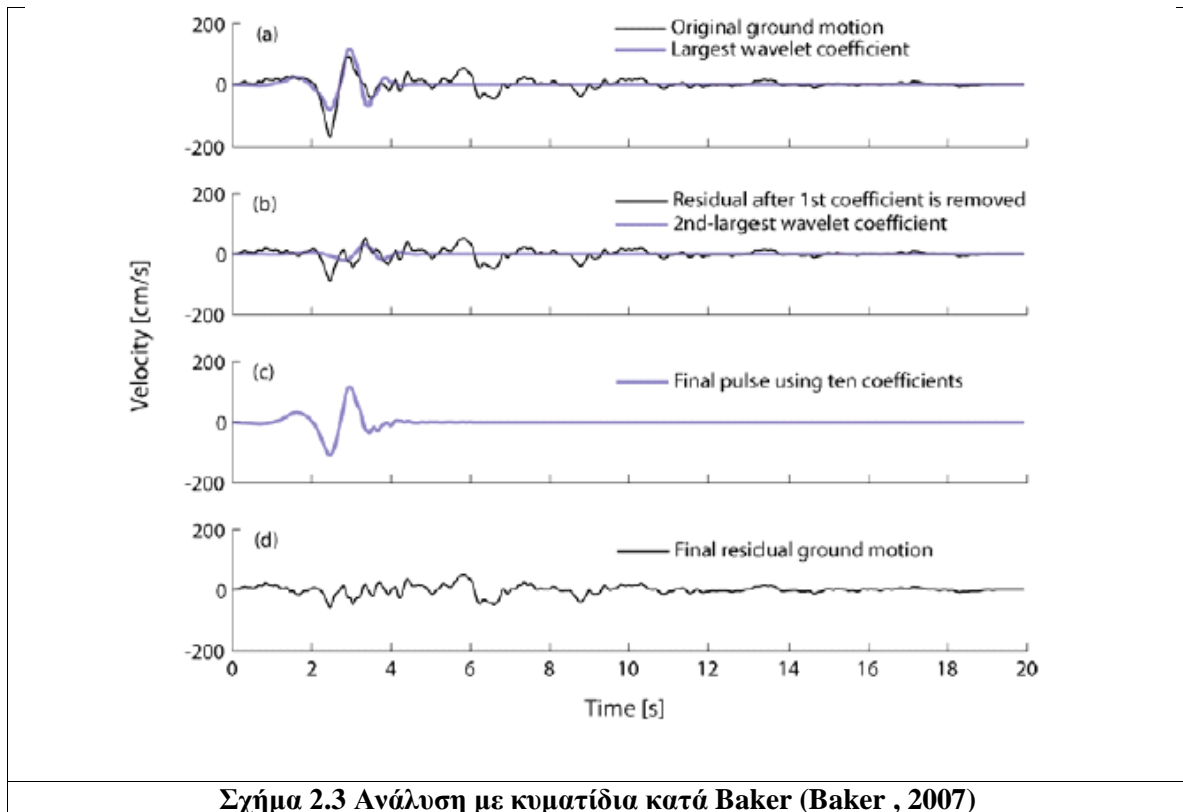
Η διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα αυτή χρησιμοποιεί την ανάλυση με κυματίδια για την αναγνώριση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου που εμπεριέχουν παλμούς ταχύτητας, όπως έχει προταθεί από τον Baker (2007). Ο μεγαλύτερος παλμός που εμφανίζεται σε κάθε εδαφική κίνηση αφαιρείται και ελέγχεται το κατά πόσο αναπαριστά ένα σημαντικό μέρος του σήματος.

Δύο επιπρόσθετα κριτήρια χρησιμοποιούνται προκειμένου να προσδιορισθεί κατά πόσον ο εξαγόμενος παλμός σχετίζεται με φαινόμενα κατευθυντικότητας. Το πρώτο αφορά στην χρονική στιγμή άφιξης του παλμού ο οποίος, προκειμένου να υπάρχει συσχέτιση με φαινόμενα κατευθυντικότητας, θα πρέπει να βρίσκεται στην αρχή του σήματος, και το δεύτερο κριτήριο αφορά στο μέγεθος της τιμής της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας όπου σαν ελάχιστο όριο της θεωρείται η τιμή των 30 cm/sec.

### **2.5.1 Απομόνωση του παλμού ταχύτητας**

Για τη μορφή του μητρικού κυματιδίου ο Baker (2007) επιλέγει το κυματίδιο Daubechies τέταρτης τάξης (προσδιορίζεται από τέσσερις παραμέτρους κλίμακας), το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα 2.1.c καθώς το σχήμα του προσεγγίζει ικανοποιητικά πολλούς παλμούς ταχύτητας σε καταγραφές σεισμών κοντινού πεδίου και συσχετίζεται καλύτερα με αυτές σε σχέση με άλλα μητρικά κυματίδια.

Για την ανάλυση της χρονοϊστορίας της ταχύτητας χρησιμοποιείται η μέθοδος του ολοκληρώματος συνέλιξης και προσδιορίζεται το κυματίδιο με τον μεγαλύτερο συντελεστή. Το αποτέλεσμα της συνέλιξης επιτρέπει τον προσδιορισμό της περιόδου και της θέσης του παλμού, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3 Ανάλυση με κυματίδια κατά Baker (Baker , 2007)

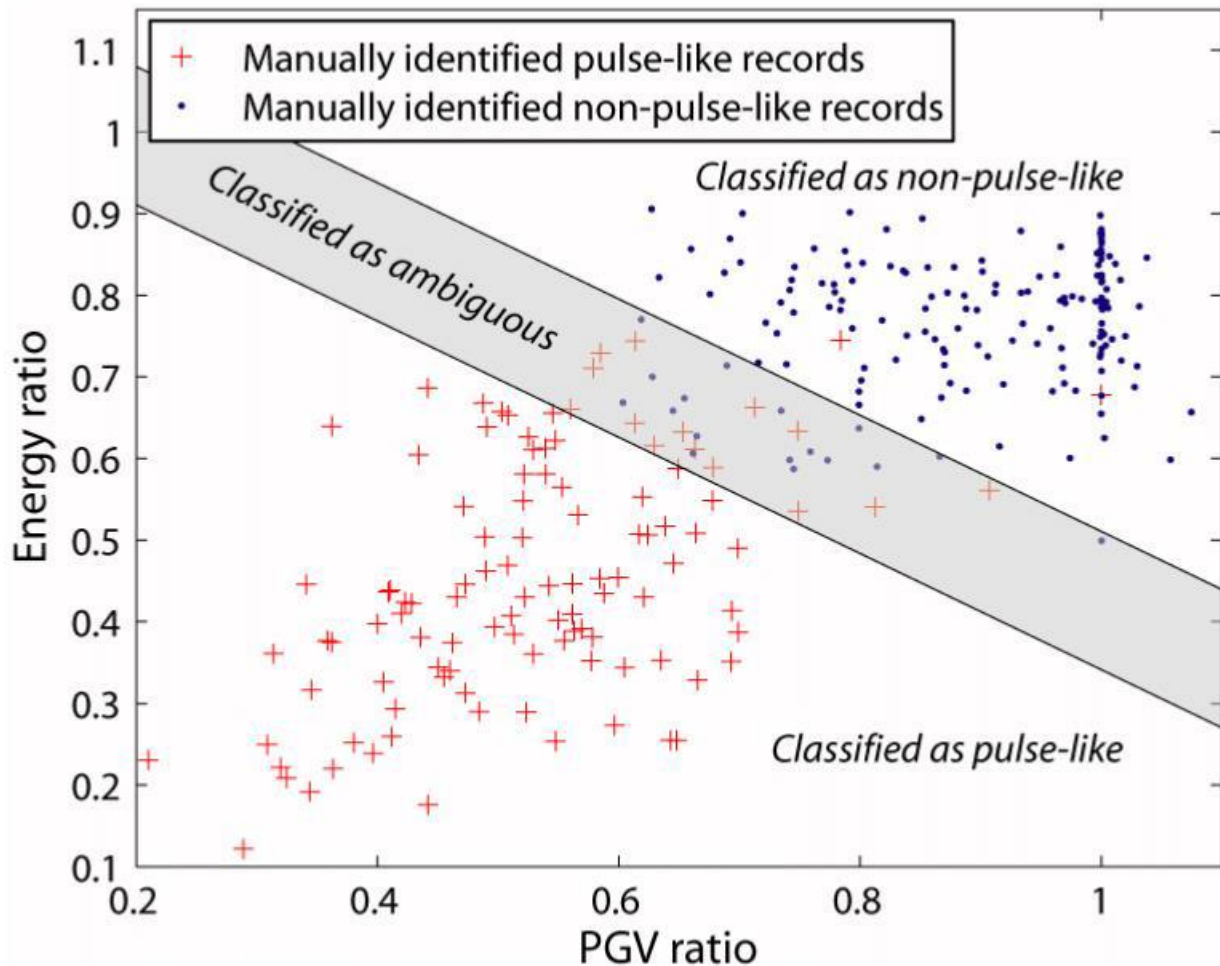
Σημειώνεται ότι ο συντελεστής ενός κυματιδίου είναι ανάλογος με την ενέργεια του κυματιδίου που του αντιστοιχεί, συνεπώς ο πρώτος παλμός που έχει το μεγαλύτερο συντελεστή, θα εμπεριέχει και την περισσότερη ενέργεια. Στη συνέχεια αφαιρείται ο παλμός από την χρονοϊστορία της ταχύτητας και υπολογίζεται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

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

Δέκα κυματίδια είναι ικανοποιητικά 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 η όχι.

## 2.5.2 Προσδιορισμός της βαρύτητας του αφαιρούμενου παλμού

Προκειμένου να εκτιμηθεί πόσο σημαντικός είναι ο εξαγόμενος παλμός σε σχέση με την αρχική καταγραφή, ο Baker χρησιμοποιεί δύο μεταβλητές που είναι εύκολες στον υπολογισμό τους, η πρώτη είναι ο λόγος της μέγιστης ταχύτητας του εναπομένου σήματος προς την μέγιστη εδαφική ταχύτητα της αρχικής καταγραφής και ονομάζεται "λόγος PGV" (PGVratio) και η δεύτερη είναι ο λόγος της ενέργειας του εναπομένου σήματος προς την ενέργεια της ιστορίας της εδαφικής ταχύτητας και ονομάζεται "λόγος ενεργειών" (Energyratio), όπου η ενέργεια θεωρείται ανάλογη του αθροίσματος των συντελεστών των αντιστοίχων κυματιδίων.



Σχήμα 2.4 Περιγραφή της διαδικασίας αφαίρεσης παλμού (Baker 2007)

Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των δύο αυτών δεικτών πρόβλεψης, επιτρέπει τη δημιουργία ενός δείκτη πρόβλεψης της ύπαρξης ή μη παλμού σε μια εδαφική κίνηση. Ο δείκτης αυτός καλείται από τον Baker ως Pulse Indicator (Παλμικός δείκτης) και προκύπτει από την εξής σχέση:

$$PulseIndicator = \frac{1}{1+e^{-23.3+14.3(PGVratio)+20.5(Energyratio)}} \quad (2.3)$$

Ο Παλμικός δείκτης παίρνει τιμές εντός του εύρους 0 και 1, με τις υψηλές τιμές να παρέχουν μια ισχυρή ένδειξη ότι η εξεταζόμενη καταγραφή εμπεριέχει σημαντικό παλμό ταχύτητας. Τα αποτελέσματα των προβλέψεων του Παλμικού δείκτη διαμορφώνουν ένα συνεχές φάσμα τιμών μεταξύ των ακραίων μηδέν και ένα. Για τον χαρακτηρισμό μιας καταγραφής ως «Παλμική» ή «Μη παλμική», προτείνονται δύο εσωτερικά όρια κατάταξης. Συνεπώς, για καταγραφές όπου ο Παλμικός δείκτης παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 0,85 ή μικρότερες από 0,15, αυτές κατατάσσονται ως Παλμικές και Μη παλμικές, αντίστοιχα. Οι εδαφικές κινήσεις που δίνουν ενδιάμεσες τιμές του

Pulse Indicator χαρακτηρίζονται ως Ασαφείς (Ambiguous) όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4.

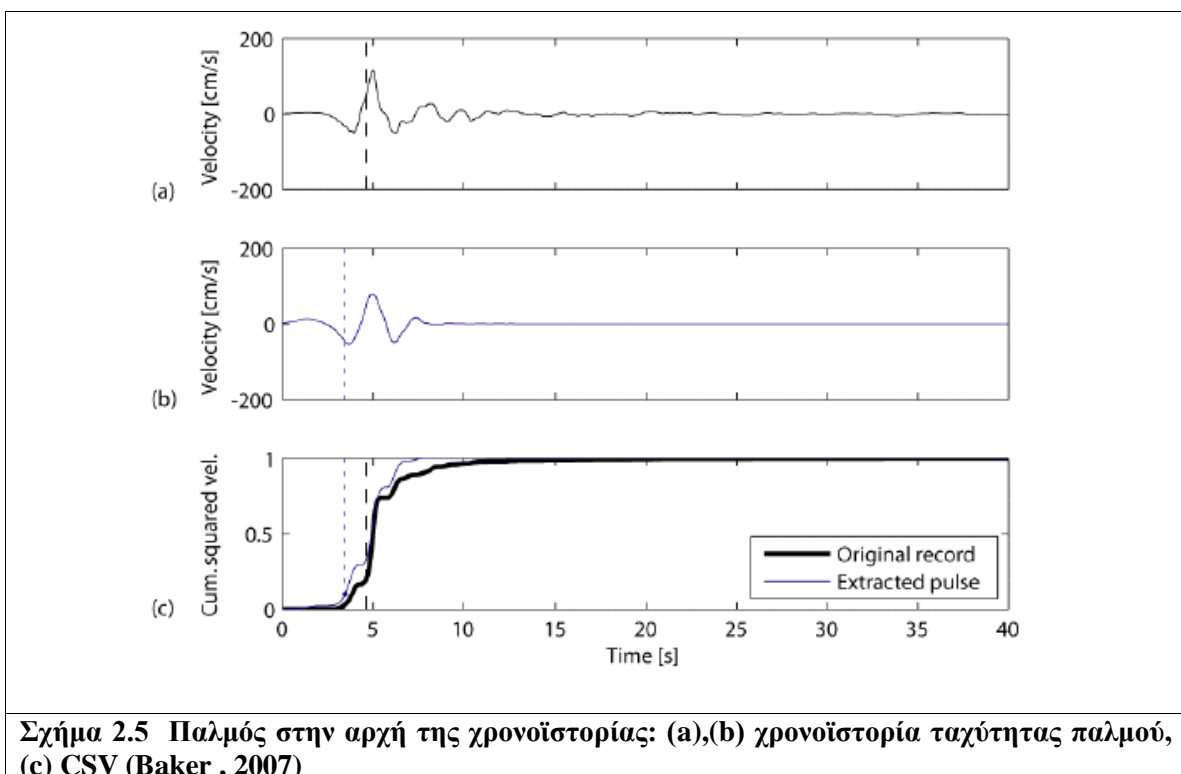
### 2.5.3 Απόρριψη παλμών που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία ταχύτητας

Ενώ οι καταγραφές που προέκυψε με την ανωτέρω διαδικασία ότι είναι παλμικές, εμπεριέχουν σημαντικό παλμό, δεν διευκρινίζεται αν ο εξαγόμενος αυτός παλμός οφείλεται σε φαινόμενα έμπροσθεν κατευθυντικότητας ή σε άλλους παράγοντες. Για να εντοπιστούν οι παλμοί που οφείλονται στο φαινόμενο της κατευθυντικότητας θα πρέπει να διατυπωθεί ένα κριτήριο για τον εντοπισμό των παλμών που φτάνουν νωρίς στη χρονοϊστορία της ταχύτητας, όπως αναφέρεται στις θεωρητικές σεισμολογικές μελέτες ότι συμβαίνει στους παλμούς που οφείλονται στην κατευθυντικότητα.

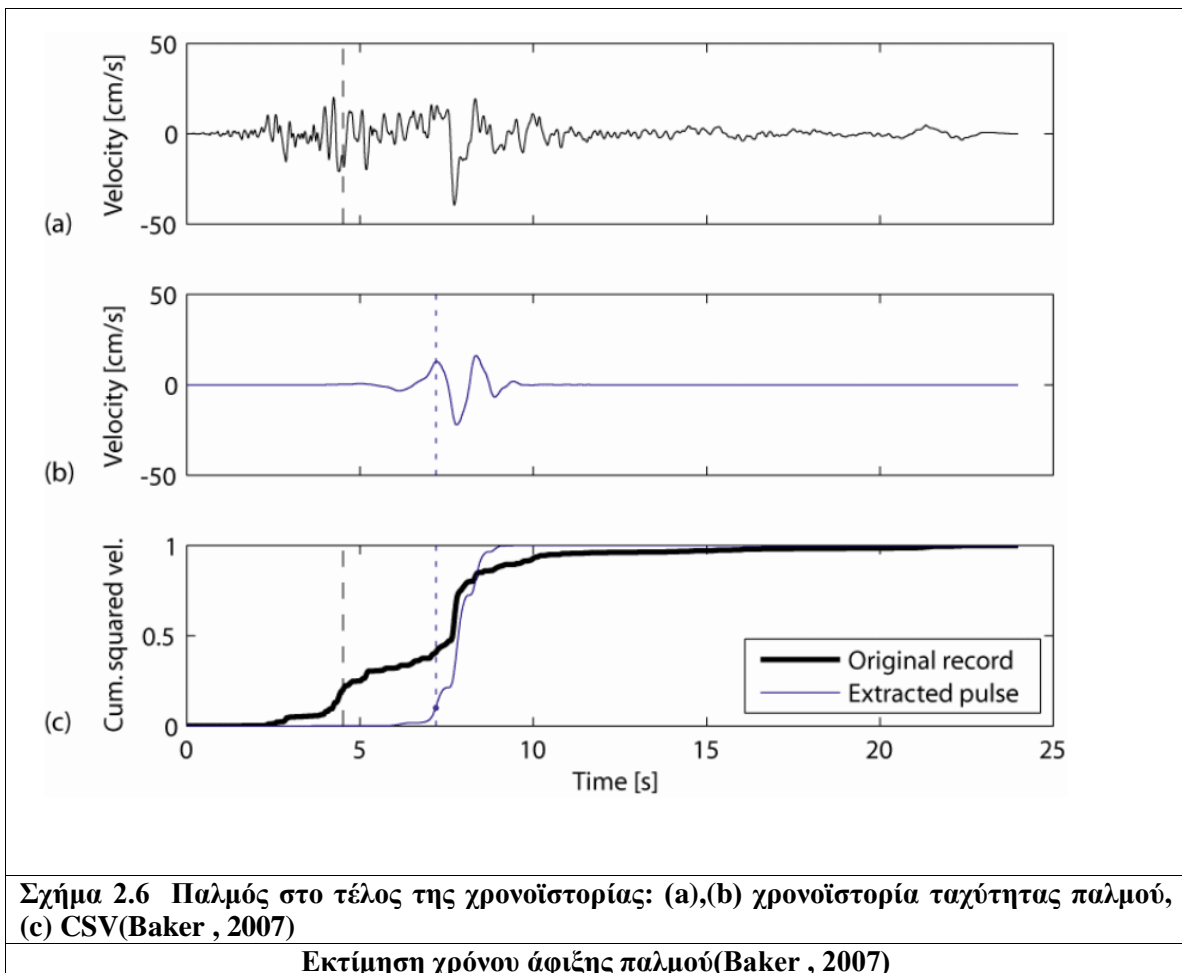
Για το λόγο αυτό ο Baker υπολογίζει το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας (Cumulative Squared Velocity ή CSV) της αρχικής καταγραφής και του εξαγόμενου παλμού. Σε μια τυχαία χρονική στιγμή  $t$  το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας υπολογίζεται ως:

$$CSV(t) = \int_0^t V^2(u) du \quad (2.4)$$

όπου  $V(u)$  είναι η ταχύτητα της εδαφικής κίνησης τη χρονική στιγμή  $u$ . Υπολογίζοντας το παραπάνω ολοκλήρωμα για την αρχική καταγραφή και για τον εξαγόμενο παλμό, καθορίζονται οι χρονικές στιγμές για τις οποίες καθένα φτάνει το  $x\%$  του συνολικού του CSV. Οι χρονικές αυτές στιγμές συμβολίζονται ως  $t_{x\%,orig}$  και  $t_{x\%,pulse}$  για την αρχική εδαφική κίνηση και για τον παλμό αντίστοιχα. Από την διερεύνηση του Baker προκύπτει ότι για να θεωρηθεί ότι ένας παλμός φτάνει νωρίς στη χρονοϊστορία της ταχύτητας, ο χρόνος  $t_{20\%,orig}$  στον οποίο το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της εδαφικής ταχύτητας λαμβάνει το 20% της συνολικής του τιμής, είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο  $t_{10\%,pulse}$  στον οποίο το ολοκλήρωμα της χρονοϊστορίας του παλμού λαμβάνει το 10% της τελικής τιμής του. Το κριτήριο αυτό διασφαλίζει ότι ένα σημαντικό ποσοστό της ενέργειας του παλμού έχει εκδηλωθεί πριν ακόμα αναπτυχθεί σημαντικό μέρος της ενέργειας της αρχικής χρονοϊστορίας. Στα σχήματα 2.5 και 2.6 απεικονίζονται παραδείγματα παλμών που φτάνουν νωρίς και αργά στη χρονοϊστορία της εδαφικής κίνησης.



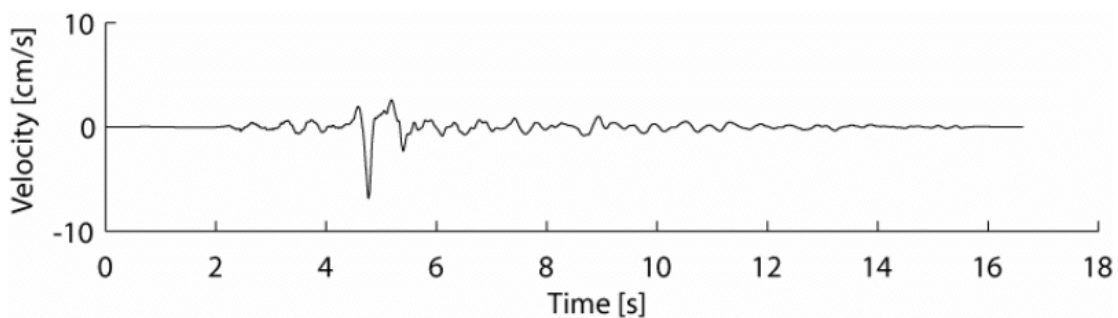




#### 2.5.4 Απόρριψη των εδαφικών κινήσεων με $PGV < 30 \text{ cm/s}$

Το τελευταίο κριτήριο που διατύπωσε ο Baker και σχετίζεται με το εύρος της εδαφικής ταχύτητας απορρίπτει καταγραφές που έχουν προκύψει από σεισμικά γεγονότα μικρής έντασης, οι οποίες εμφανίζουν παλμικές μορφές στη χρονοϊστορία της ταχύτητας. Αυτό παρατηρείται για παράδειγμα σε σεισμικές κινήσεις σύντομης διάρκειας και μικρού μεγέθους που εμφανίζουν ανακλάσεις κατά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων.

Στο σχήμα 2.7 απεικονίζεται μια εδαφική κίνηση μεγέθους 5.1, για την οποία υποδεικνύεται ότι η εμφάνιση του παλμού ταχύτητας μπορεί να οφείλεται στη σύντομη διάρκεια της εδαφικής κίνησης και όχι στο φαινόμενο της κατευθυντικότητας.



**Σχήμα 2.7 Εδαφική κίνηση με μικρή PGV που εμφανίζεται ως παλμική και αποκλείεται (Baker 2007)**

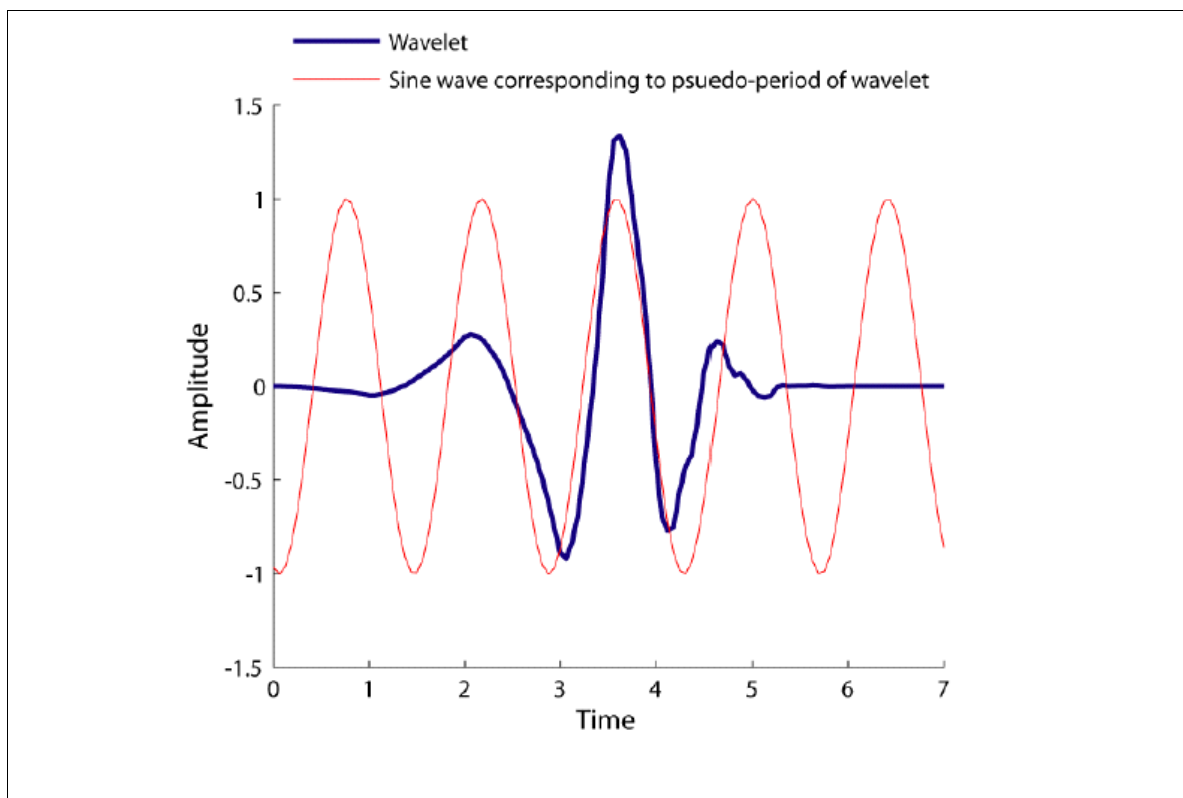
Τα τρία κριτήρια που περιγράφηκαν στην ενότητα αυτή μπορούν να συνδυαστούν με διάφορους τρόπους για τη δημιουργία ενός υποσυνόλου παλμικών εδαφικών κινήσεων. Για τη δημιουργία ενός τέτοιου υποσυνόλου, ο Baker εξέτασε όλες τις καταγραφές της βάσης δεδομένων NGA στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση και κατέληξε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

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

## 2.6 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού

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

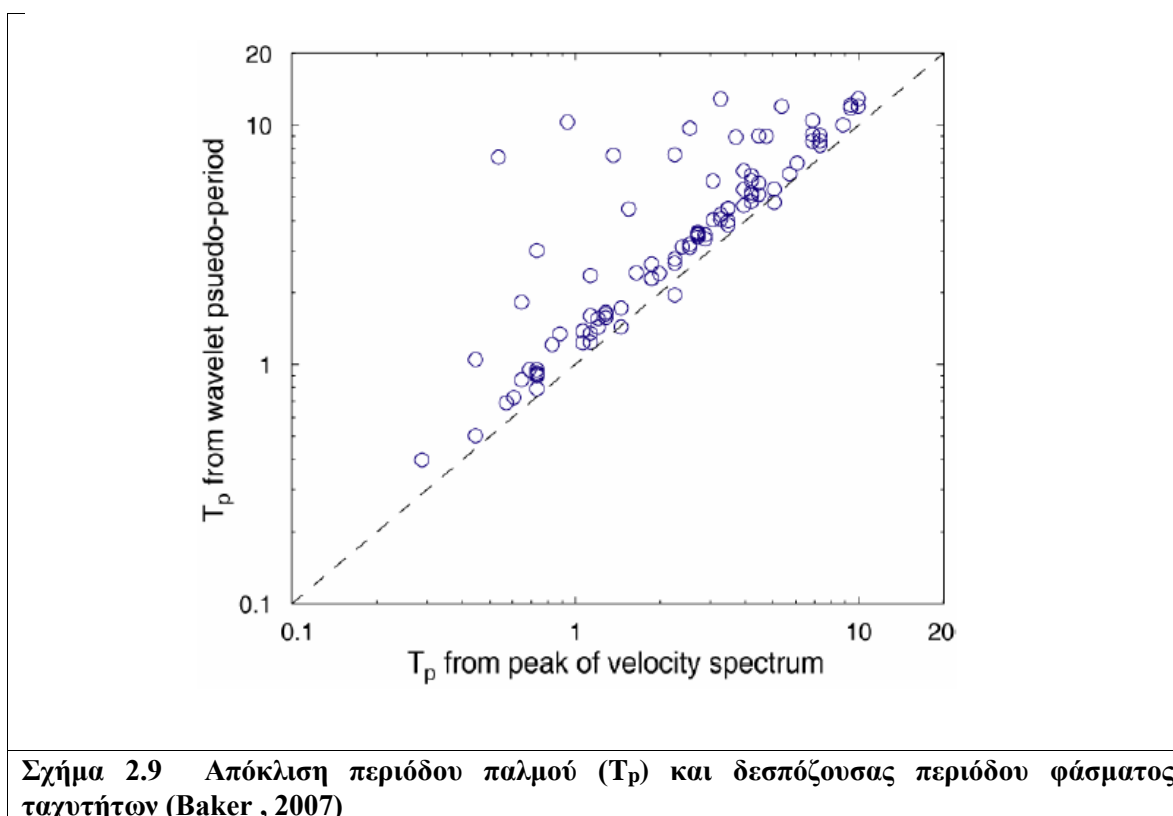
Δεν υπάρχει μια ξεκάθαρα ορισμένη έννοια για την περίοδο του κυματιδίου, όπως υπάρχει για τα ημιτονικά κύματα που προκύπτουν με ανάλυση Fourier. Όμως για τον υπολογισμό μιας ψευδο-περιόδου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η περίοδος που σχετίζεται με το μέγιστο πλάτος Fourier ενός κυματιδίου. Στο σχήμα 2.8 δείχνεται το παράδειγμα ενός κυματιδίου συγκριτικά με ένα ημιτονικό σήμα που έχει περίοδο ίση με εκείνη στην οποία παρατηρείται το μεγαλύτερο πλάτος Fourier του κυματιδίου. Η ψευδο-περίοδος της μεγαλύτερης συνιστώσας του κυματιδίου χρησιμοποιείται ως η περίοδος παλμού της εδαφικής κίνησης. Με τον τρόπο αυτό όμως ακυρώνεται η αρχική παραδοχή για καλύτερη αξιοπιστία των κυματιδίων έναντι των αρμονικών Fourier, δεδομένου ότι η μέθοδος καταλήγει στην επιλογή της αρμονικής που προσεγγίζει με την μεγαλύτερη ακρίβεια το κυματίδιο που προέκυψε από την προτεινόμενη διαδικασία.



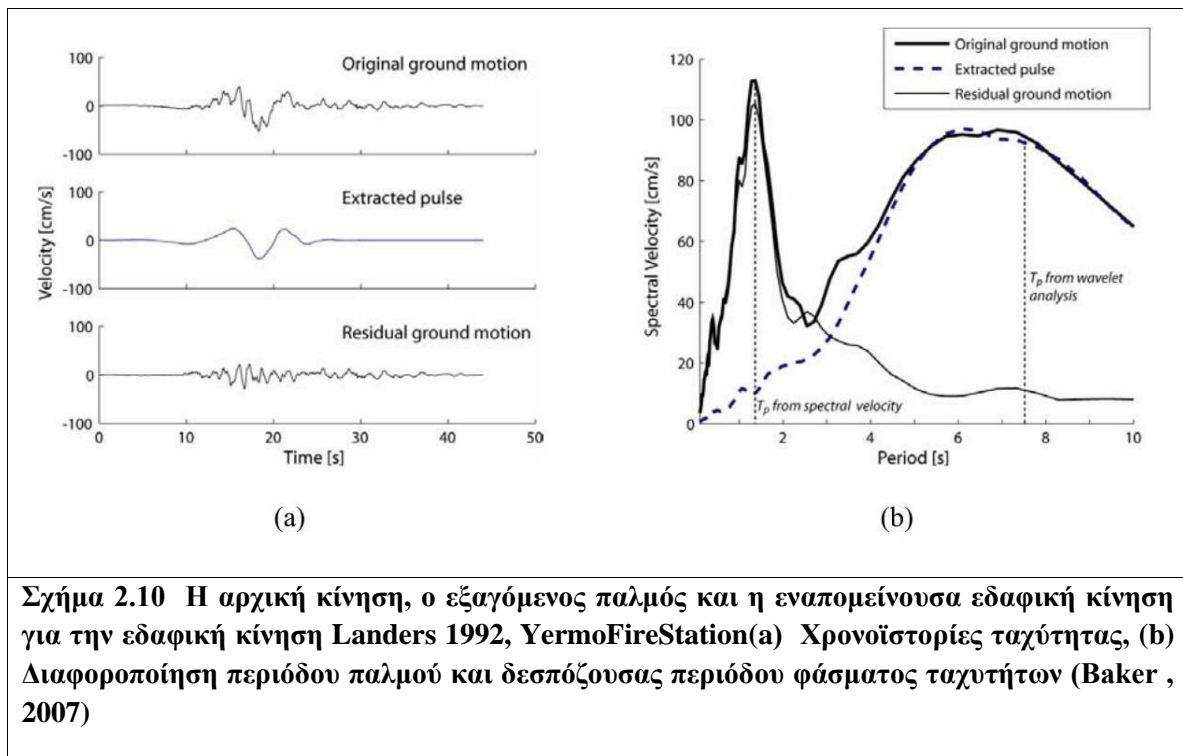
Σχήμα 2.8 Κυματίδιο Daubechies και αντίστοιχη αρμονική Fourier (Baker 2007)

Έχουν προταθεί πολλές διαφορετικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της περιόδου του παλμού ταχύτητας. Κάποιες από αυτές λαμβάνουν υπόψη τους χρόνους διαδοχικών μηδενισμών των τιμών της ταχύτητας του κυματιδίου ή κάνουν χρήση μη γραμμικής βελτιστοποίησης, ώστε να γίνει παρεμβολή ενός περικομμένου ημιτόνου μέσα στον παλμό (Akkar et al. 2005, Bray and Rodriguez-Marek 2004, Mavroeidis and Papageorgiou 2003, Menun and Fu 2002). Οι μέθοδοι αυτές εμπεριέχουν ένα βαθμό υποκειμενικότητας του χρήστη όσον αφορά τα σημεία μηδενισμού σε περιπτώσεις που η καταγραφή έχει θόρυβο, ή όσον αφορά την επιλογή λογικών σημείων έναρξης του παλμού, ώστε να συγκλίνει η βελτιστοποίηση, γι' αυτό και δεν χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις του Baker.

Η πλέον διαδεδομένη, μέχρι στιγμής, μέθοδος προσδιορισμού της περιόδου του παλμού, είναι η επιλογή της περιόδου στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της φασματικής ταχύτητας της εδαφικής κίνησης. Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα των περιόδων που προκύπτουν από την μέθοδο του Baker ως προς τις περιόδους που προκύπτουν από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος ταχύτητας. Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις έχουμε σύγκλιση μεταξύ των περιόδων που προτείνονται από τις δύο μεθόδους. Όμως υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις στις οποίες οι περίοδοι διαφέρουν σημαντικά και συγκεκριμένα η περίοδος που προκύπτει από την κυματική ανάλυση, η οποία θεωρείται η δόκιμη τιμή, είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή που δίνεται από το φάσμα ταχυτήτων.



Στις περιπτώσεις αυτές, η περίοδος που αντιστοιχεί στη μέγιστη φασματική ταχύτητα σχετίζεται γενικά με υψίσυχνες συνιστώσες της ταλάντωσης της εδαφικής κίνησης, ενώ η περίοδος του κυματιδίου σχετίζεται με τον ορατό παλμό ταχύτητας. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας περίπτωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 2.10, όπου οι κύριοι διαδοχικοί μηδενισμοί που σχετίζονται με τον παλμό της εδαφικής κίνησης απέχουν κατά 7,3 sec και η αιχμή της φασματικής ταχύτητας εμφανίζεται σε περίοδο 1,4 sec, ενώ η ψευδο-περίοδος του κυματιδίου είναι 7,5 sec και είναι εμφανές ότι ταιριάζει με την περίοδο του παλμού που αναγνωρίζεται οπτικά.



**Σχήμα 2.10** Η αρχική κίνηση, ο εξαγόμενος παλμός και η εναπομείνουσα εδαφική κίνηση για την εδαφική κίνηση Landers 1992, YermoFireStation(a) Χρονοϊστορίες ταχύτητας, (b) Διαφοροποίηση περιόδου παλμού και δεσπόζουσας περιόδου φάσματος ταχυτήτων (Baker , 2007)

Η προσέγγιση της περιόδου από τον Baker με χρήση της ψευδο-περιόδου του κυματιδίου θεωρείται αξιόπιστη σε σχέση με τις άλλες εναλλακτικές, αφού προκύπτει μέσα από μια αυτοματοποιημένη διαδικασία χωρίς υποκειμενικά κριτήρια, ενώ παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα από τη μέθοδο που αφορά τη μέγιστη αιχμή του φάσματος της ψευδο-ταχύτητας.

Μερικές άλλες μέθοδοι για τον υπολογισμό της περιόδου του παλμού ταχύτητας περιγράφονται στη συνέχεια.

Από την διερεύνηση των Manroeidis and Papageorgiou [2003], προκύπτει ότι η πλέον κρίσιμη παράμετρος για τον προσδιορισμό της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου, είναι η περίοδος  $T_p$ , που σχετίζεται με την διάρκεια του παλμού κατευθυντικότητας. Παρατηρώντας τα δεδομένα κοντινού πεδίου μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι η περίοδος του παλμού είναι ανεξάρτητη από την απόσταση της θέσης καταγραφής από το ρήγμα. Σαν συνέπεια αυτής της παραδοχής έχουν προκύψει διάφορες σχέσεις που συνδέουν το μέγεθος του σεισμού με την περίοδο του παλμού της ταχύτητας.

Η σχέση του Somerville (1998) για τον υπολογισμό της περιόδου του παλμού είναι:

$$\log T_p = -2.5 + 0.425 M_w$$

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

$$\log T_p = -3.0 + 0.5 M_w$$

Η περίοδος του παλμού της ταχύτητας είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη χρονική διάρκεια ανόδου  $t_R$ , η οποία μετρά την διάρκεια της ολίσθησης σε συγκεκριμένο σημείο του ρήγματος. Η σχέση μεταξύ της περιόδου του παλμού και της χρονικής διάρκειας  $t_R$  είναι:

$$T_p = 2.2 t_R$$

Οι Alavi and Krawinkler (2000) όρισαν την περίοδο του παλμού ως την δεσπόζουσα περίοδο στο φάσμα ψευδο-ταχυτήτων  $T_{p-v}$ . Η σχέση που πρότειναν είναι η εξής:

$$\log T_{p-v} = -1.76 + 0.31 M_w$$

Είναι χαρακτηριστικό ότι η σχέση των Alavi and Krawinkler δίνει μικρότερες τιμές από αυτές της σχέσης του Somerville και η απόκλιση γίνεται όλο και μεγαλύτερη με την αύξηση του μεγέθους σεισμικής ροπής. Η προτεινόμενη παραδοχή για την ισότητα των περιόδων  $T_p$  και  $T_{p-v}$  παραμένει ιδιαίτερα διαδεδομένη, παρά το γεγονός ότι παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις, ειδικά στην περίπτωση μεγάλων σεισμικών μεγεθών.

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

$$\ln(T_v)_{ij} = a + b * M_w + n_i + \varepsilon_{ij}$$

όπου είναι η περίοδος που αντιστοιχεί στον παλμό της ταχύτητας για την j-οστή καταγραφή του i-οστού γεγονότος, a και b οι παράμετροι της σχέσης,  $n_i$  το σφάλμα που σχετίζεται με την απόκλιση μεταξύ καταγραφών του ίδιου γεγονότος και  $\varepsilon_{ij}$  το σφάλμα που σχετίζεται με την απόκλιση μεταξύ γεγονότων.

Με βάση την προτεινόμενη γενική διατύπωση, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις για την περίοδο του παλμού και την δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος ταχυτήτων και για διάφορες κατηγορίες εδαφών:

$$\ln T_p = -8.33 + 1.33 * M_w \quad \text{για όλες τις κατηγορίες εδαφών}$$

$$\ln T_p = -11.10 + 1.70 * M_w \quad \text{για βράχο}$$

$$\ln T_p = -5.81 + 0.97 * M_w \quad \text{για μαλακό έδαφος}$$

$$\ln T_{v-p} = -6.92 + 1.08 * M_w \quad \text{για όλες τις κατηγορίες εδαφών}$$

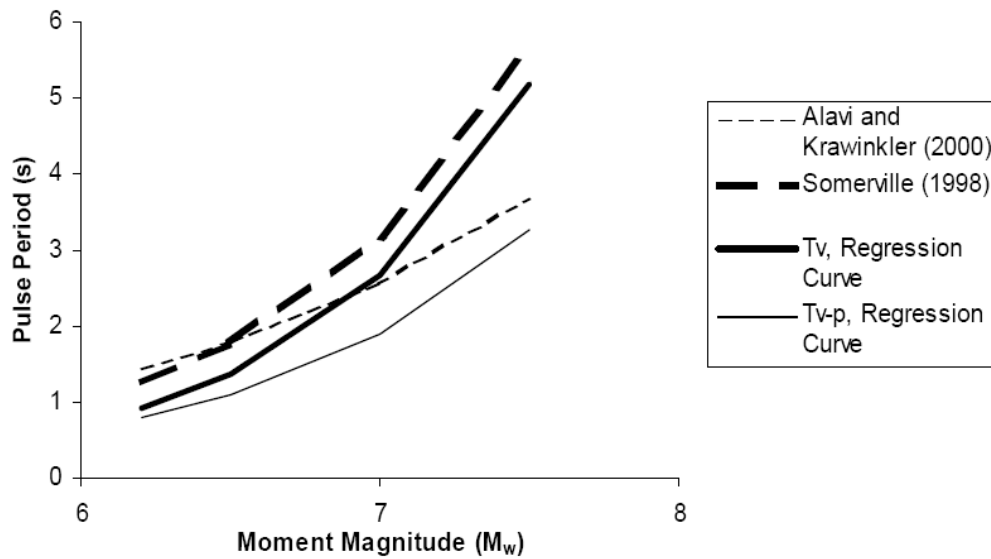
$$\ln T_{v-p} = -6.92 + 1.08 * M_w \quad \text{για βράχο}$$

$$\ln T_{v-p} = -6.92 + 1.08 * M_w \quad \text{για μαλακό έδαφος}$$

Χαρακτηριστικό στοιχείο για την ορθότητα επιλογής της περιόδου του παλμού κατευθυντικότητας είναι ότι οι σχέσεις εκτίμησης της δεσπόζουσας περιόδου του φάσματος ταχυτήτων  $T_{p-v}$  δίνουν σαφώς χαμηλότερες τιμές από τις σχέσεις υπολογισμού της περιόδου του παλμού  $T_p$ . Η διαφοροποίηση αυτή αυξάνεται όσο μεγαλώνουν τα αντίστοιχα σεισμικά μεγέθη.

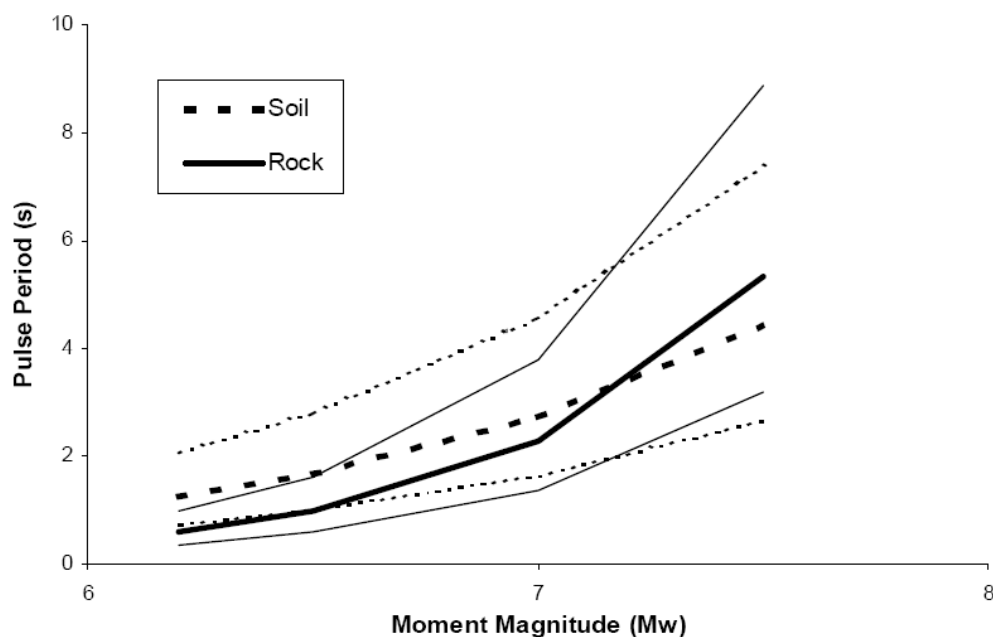
Οι τιμές των παραμέτρων υπολογίζονται για σεισμικά μεγέθη που κυμαίνονται 6.1 έως 7.4 και από καταγραφές σε θέσεις που απέχουν λιγότερο από 20 χιλιόμετρα από το επίπεδο του ρήγματος. Στο σχήμα 2.11 απεικονίζονται οι σχέσεις που προτάθηκαν από τον Rodriguez-Marek για τις περιόδους  $T_p$  και  $T_{p-v}$  και οι σχέσεις του Somerville για την  $T_p$  και των Alavi and Krawinkler για την  $T_{p-v}$ . Η σύγκριση της σχέσης του Rodriguez-Marek(2000) για την περίοδο  $T_p$  με αυτήν που προτείνει ο Somerville (1998) δίνει παρεμφερή αποτελέσματα, με την διαφορά ότι για μικρότερα μεγέθη η πρώτη σχέση παρουσιάζει μικρότερες εκτιμώμενες τιμές περιόδου. Από την σύγκριση της σχέσης του Rodriguez-Marek για την  $T_{v-p}$  με την σχέση των Alavi and Krawinkler διαπιστώνουμε επίσης

σύγκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων, με μικρότερες τιμές στην περιοχή μικρών σεισμικών μεγεθών για την σχέση Rodriguez-Marek, δηλαδή μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των δύο σχέσεων.



**Σχήμα 2.11** Σχέσεις υπολογισμού παλμού κατευθυντικότητας (Rodriguez-Marek, 2000)

Άλλη μια παρατήρηση σχετίζεται με την διαφοροποίηση της περιόδου ανάλογα με το έδαφος στην θέση καταγραφής. Η επίδραση των εδαφικών συνθηκών μπορεί να ερευνηθεί μέσω της χρήσης των σχέσεων υπολογισμού της περιόδου του παλμού του Rodriguez-Marek (2000) για το βράχο και το έδαφος (Σχήμα 2.12). Παρατηρούμε ότι η διαφορά μεταξύ των τιμών της περιόδου του παλμού για βράχο και έδαφος είναι μικρή για μεγάλα σεισμικά γεγονότα ( $M_w > 7$ ), όμως για γεγονότα μικρότερου μεγέθους η περίοδος του παλμού είναι μεγαλύτερη επί εδαφών από ότι για βραχώδεις περιοχές και μάλιστα η διαφορά αυτή είναι σημαντική και συγκρίσιμη με την τιμή της τυπικής απόκλισης.



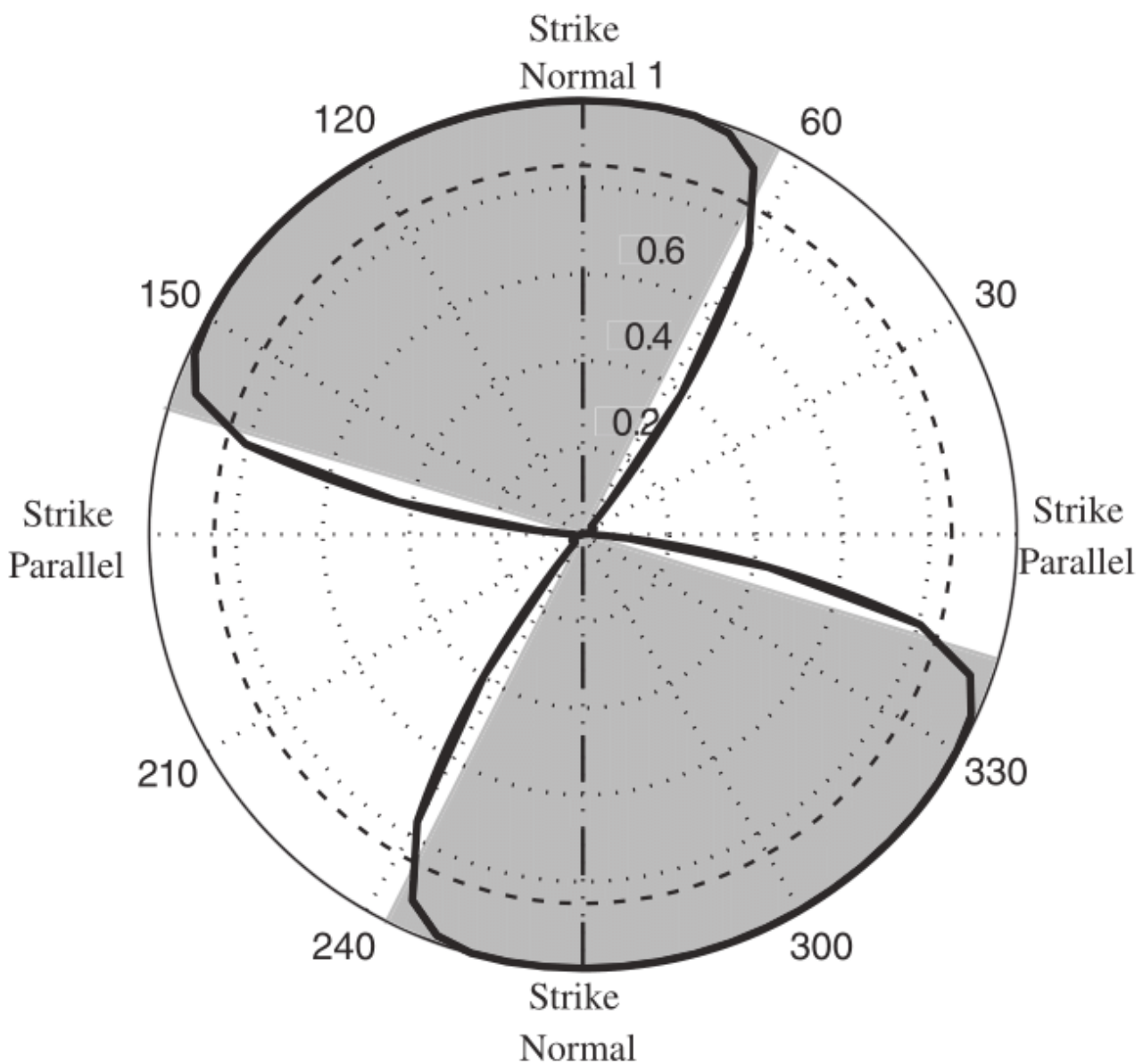
**Σχήμα 2.12** Σχέσεις υπολογισμού παλμού κατευθυντικότητας για διαφορετικές κατηγορίες εδάφους (Rodriguez-Marek, 2000)

## 2.7 Εντοπισμός παλμών σε ένα εύρος προσανατολισμών

Στην ενότητα αυτή θα αναφέρουμε τις βασικές παρατηρήσεις από το μοντέλο εκτίμησης σεισμικού κινδύνου των Shahi and Baker (2011), στο οποίο λαμβάνονται υπόψη και φαινόμενα κατευθυντικότητας.

Αν και οι παλμοί ταχύτητας που προέρχονται από το φαινόμενο της κατευθυντικότητας αναμένεται να εμφανιστούν στη συνιστώσα της εδαφικής κίνησης που είναι κάθετη στο ρήγμα (Sommerville 1997), σε πολλές περιπτώσεις καθίσταται δύσκολος ο προσδιορισμός της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας, λόγω της ανώμαλης γεωμετρίας της επιφάνειας διάρρηξης (Howard et al. 2005).

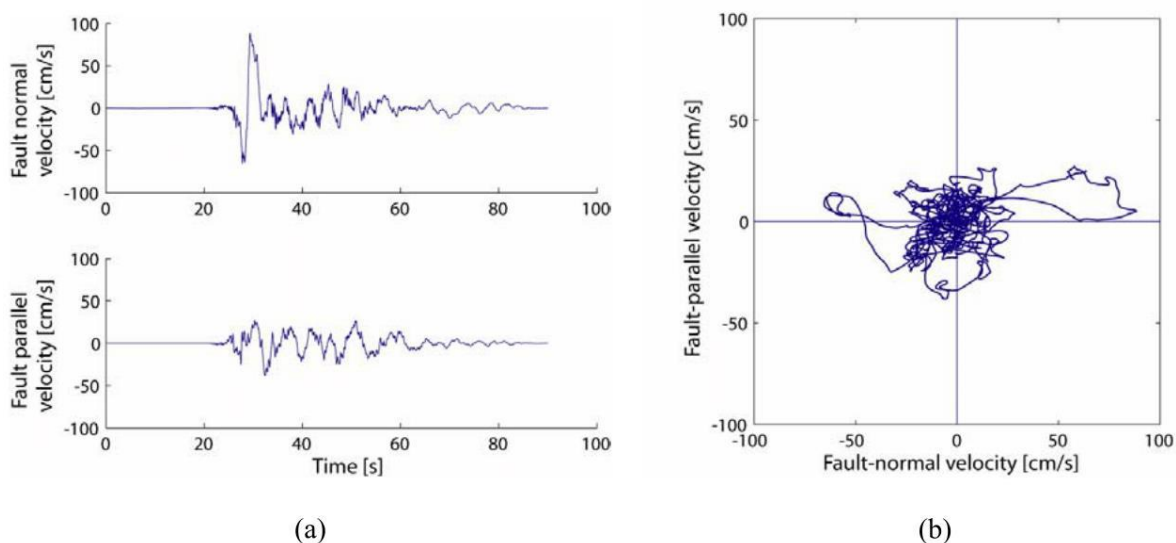
Στο σχήμα 2.13 παρουσιάζονται οι τιμές του παλμικού δείκτη (pulse indicator score) όπως έχει υπολογιστεί από τον Baker (2007) για μια θέση, σε διάφορες διευθύνσεις. Οι τιμές του παλμικού δείκτη δείχνουν ότι παλμικές εδαφικές κινήσεις εντοπίζονται σε ένα εύρος διευθύνσεων περί την κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση.



Σχήμα 2.13 Τιμές του παλμικού δείκτη συναρτήσει του προσανατολισμού για την καταγραφή EC Country Center από το σεισμό στο Imperial Valley του 1979. Οι σκιασμένες επιφάνειες υποδεικνύουν τις διευθύνσεις στις οποίες παρατηρήθηκε ένας σημαντικός παλμός

Προκειμένου να μελετηθούν οι διευθύνσεις στις οποίες παρατηρούνται παλμικές κινήσεις, οι καταγραφές περιστρέφονται σε όλες τις δυνατές διευθύνσεις και οι εδαφικές κινήσεις που προκύπτουν για κάθε διεύθυνση κατηγοριοποιείται ως παλμικές ή μη. Μια θέση θεωρείται ότι μπορεί να εμφανίσει παλμική κίνηση αν έστω και μια εδαφική κίνηση σε οποιαδήποτε διεύθυνση στην θέση αυτή είναι παλμική. Η συγκεκριμένη μέθοδος περιστροφής και κατηγοριοποίησης των καταγραφών αφορά μόνο την οριζόντια διεύθυνση και ίσως να μην είναι αποτελεσματική σε περιπτώσεις που ο παλμός βρίσκεται εκτός του οριζοντίου επιπέδου. Για ρήγματα μη οριζόντιας ολίσθησης, η κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση δε βρίσκεται στο οριζόντιο επίπεδο, όμως η ανωτέρω μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα στην περίπτωση που οι παλμοί εκτός του οριζοντίου επιπέδου είναι μικρής σημασίας.

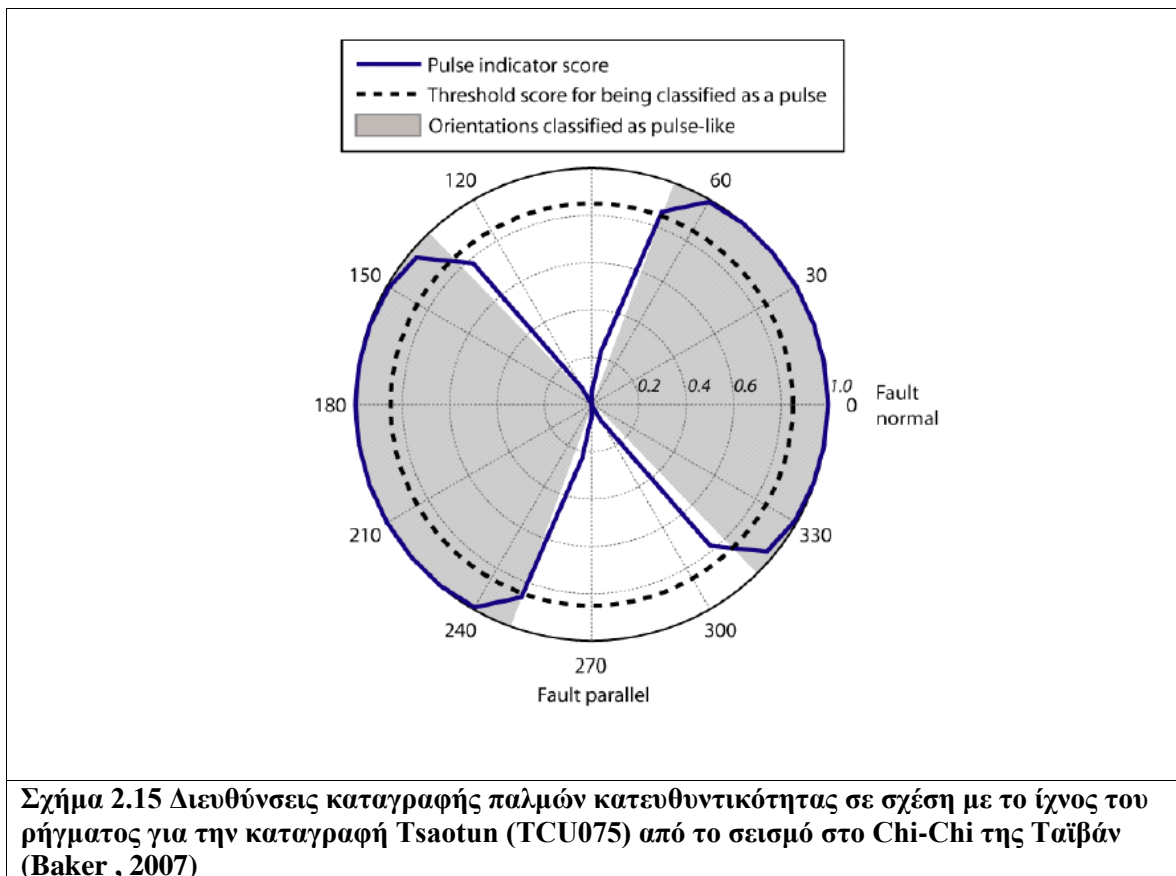
Ο Baker στις μελέτες του αναφέρει την εφαρμογή της διαδικασίας ταξινόμησης σε εδαφικές κινήσεις δύο συνιστωσών και παραθέτει το παράδειγμα της καταγραφής TCU075 στο Tsaotun από το σεισμικό γεγονός του Chi-Chi, Taiwan. Οι χρονοϊστορίες ταχύτητας τόσο της κάθετης όσο και της παράλληλης συνιστώσας φαίνονται στο σχήμα 2.14.



**Σχήμα 2.14** Χρονοϊστορία ταχύτητας της καταγραφής Tsaotun (TCU075) από το σεισμό στο Chi-Chi της Ταϊβάν. (α) Χρονοϊστορίες στην κάθετη και στην παράλληλη στο ρήγμα διευθύνσεις, (β) Τροχιακό διάγραμμα της ταχύτητας στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα ως προς την παράλληλη.

Η παρουσία παλμού είναι εμφανής στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα, ενώ δεν εμφανίζεται κάποιος παλμός στην παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα, όπως υποδεικνύεται από τους παλμικούς δείκτες 0,999 και 0,001 αντίστοιχα. Περιστρέφοντας τις δύο συνιστώσες της εδαφικής κίνησης, είναι δυνατός ο υπολογισμός του παλμικού δείκτη για διάφορες διευθύνσεις. Αυτές οι τιμές του παλμικού δείκτη παρουσιάζονται για την καταγραφή TCU075 στο σχήμα 2.15, στο οποίο εντοπίζεται η παρουσία παλμού σε περισσότερες από τις μισές γωνίες, δείχνοντας ότι οι παλμοί κατευθυντικότητας μπορούν να επηρεάσουν κατασκευές σε ένα εύρος διευθύνσεων.

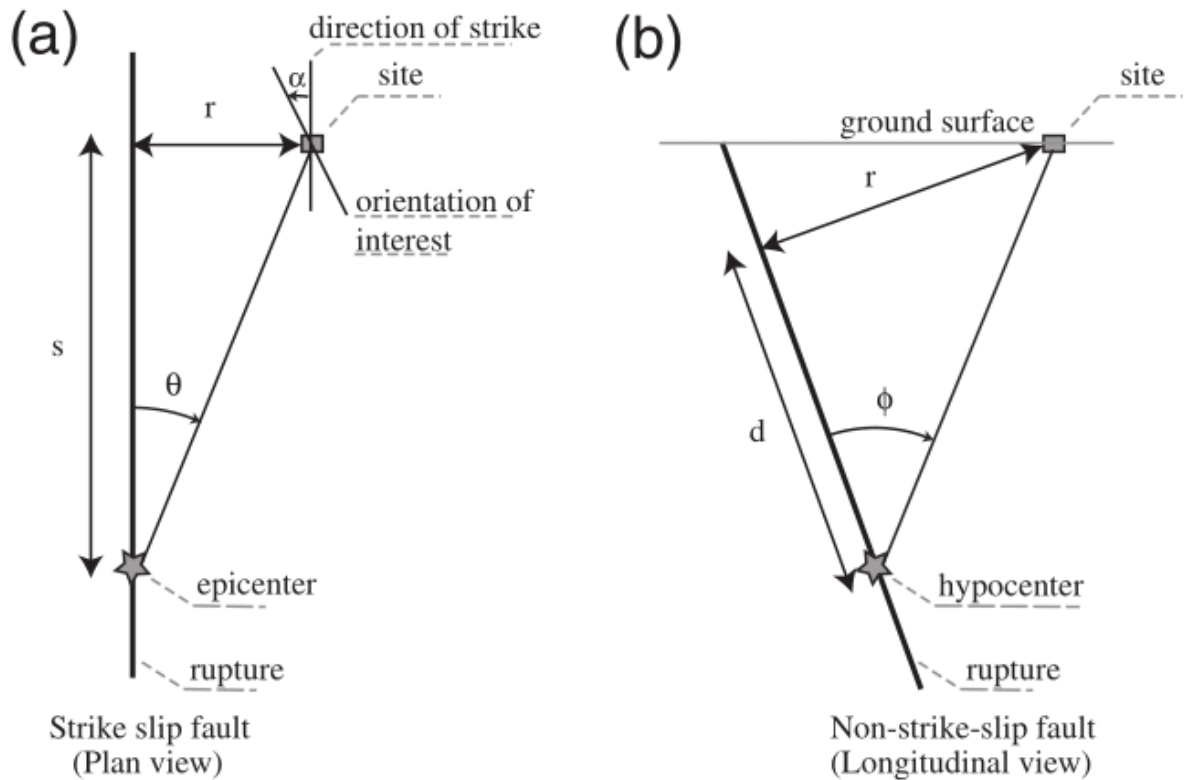




**Σχήμα 2.15** Διευθύνσεις καταγραφής παλμών κατευθυντικότητας σε σχέση με το ίχνος του ρήγματος για την καταγραφή Tsaotun (TCU075) από το σεισμό στο Chi-Chi της Ταϊβάν (Baker , 2007)

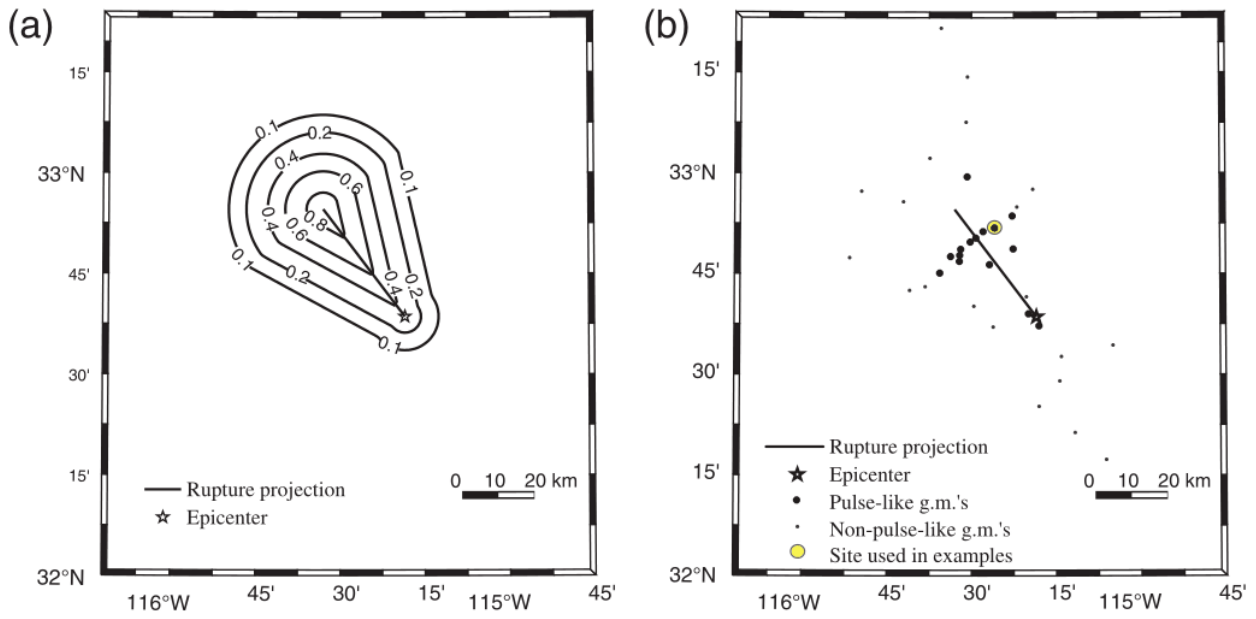
Αυτό συμβαίνει αφού ο παλμός ταχύτητας, ακόμα και όταν παρατηρείται σε μια γωνία άλλη από αυτή της κύριας αναμενόμενης διεύθυνσης, μπορεί να είναι ακόμα μεγάλος σε σχέση με τις μικρότερες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης που σχετίζονται με το μη παλμικό κομμάτι της καταγραφής. Επίσης, άλλες εδαφικές κινήσεις δείχνουν ότι κάποιες φορές ο παλμός ταχύτητας εμφανίζεται σε μια διεύθυνση που διαφέρει σημαντικά από την κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση. Αυτά τα φαινόμενα έχουν παρατηρηθεί από ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με τους παλμούς ταχύτητας (Howard et al. 2005, Mavroeidis and Papageorgiou 2002), και η προτεινόμενη διαδικασία του Baker (2007) στην οποία γίνεται χρήση του παλμικού δείκτη, παρέχει μια μέθοδο ποσοτικού προσδιορισμού του εύρους των γωνιών στις οποίες παρατηρούνται παλμοί ταχύτητας.

Οι Shahi and Baker (2011) αναφέρουν ότι ο υπολογισμός του σεισμικού κινδύνου μιας θέσης κοντά σε ρήγμα για διάφορες διευθύνσεις, προϋποθέτει τη γνώση της πιθανότητας εμφάνισης μιας παλμικής κίνησης σε μια τυχαία διεύθυνση. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα ταξινόμησης ενός πλήθους στραμμένων καταγραφών, προέκυψε μια σχέση υπολογισμού της πιθανότητας εμφάνισης ενός παλμού σε μια διεύθυνση  $\alpha$ , δεδομένου ότι παρατηρείται η ύπαρξη κάποιου παλμού στη θέση. Η πιθανότητα αυτή συμβολίζεται  $P$  (pulse at  $\alpha$ /pulse), όπου η γωνία  $\alpha$  είναι η μικρότερη γωνία που μετράται από το άζιμούθιο της παράλληλης στο ρήγμα διεύθυνσης (Strike direction) όπως δίνεται στη βάση δεδομένων NGA. Στο σχήμα 2.16 φαίνεται μια απεικόνιση της γωνίας  $\alpha$  σε σχέση με άλλες γεωμετρικές παραμέτρους μεταξύ μιας τυχαίας θέσης και του υπόκεντρου που παρουσιάζουν κάποια ισχυρή πιθανοτική συσχέτιση με την παρουσία παλμού, για μηχανισμούς οριζόντιας και κεκλιμένης ολίσθησης, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η συσχέτιση της πιθανότητας  $P$  (pulse at  $\alpha$ /pulse) προκύπτει διαφορετική για μηχανισμούς οριζόντιας και μη οριζόντιας ολίσθησης.

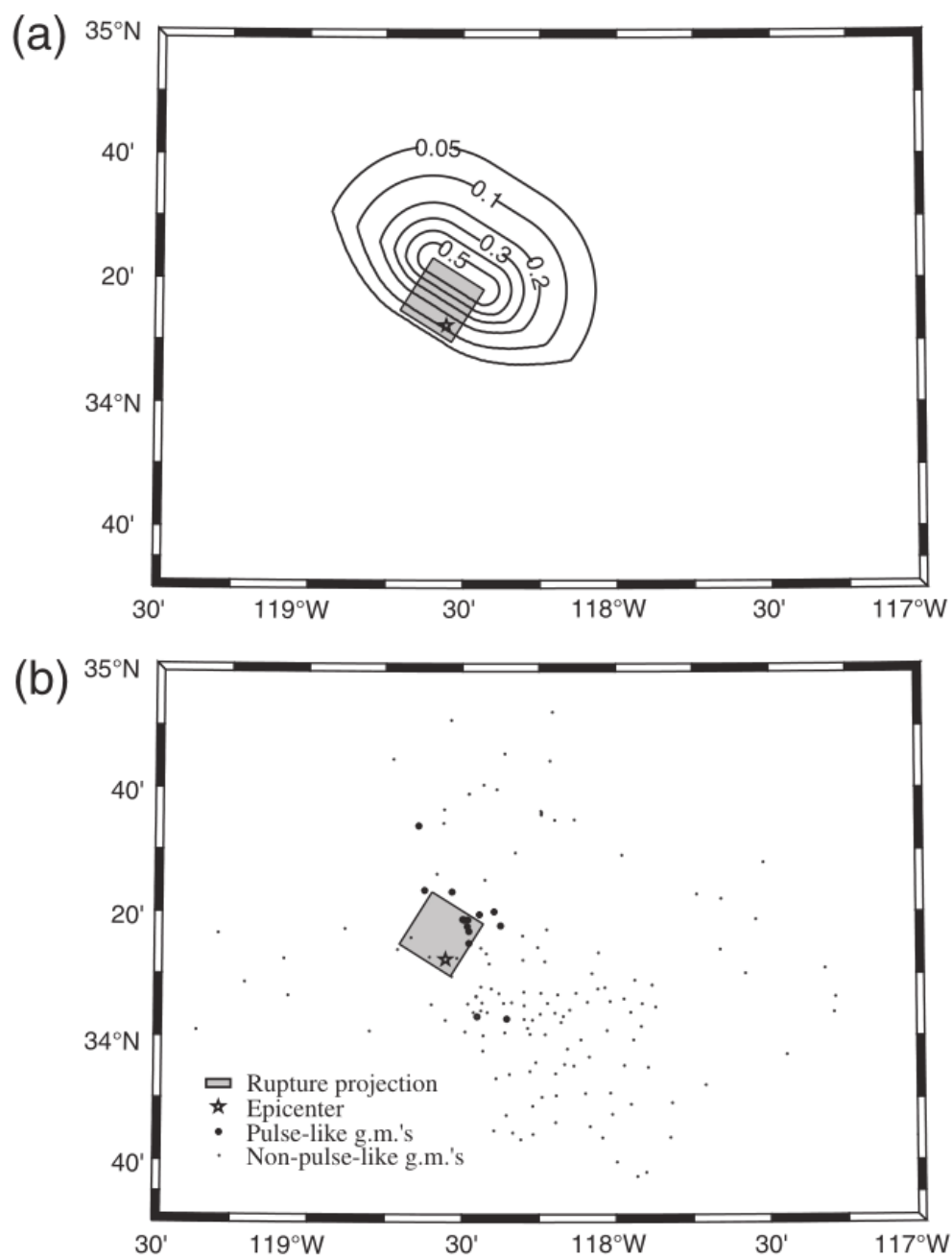


**Σχήμα 2.16** Γεωμετρικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται στις σχέσεις γραμμικής παλινδρόμησης για μηχανισμό (a) οριζόντιας ολίσθησης και (b) κεκλιμένης ολίσθησης (Shahi and Baker, 2011)

Στα σχήματα 2.17(a) και 2.18(a) παρουσιάζονται οι ισο-πιθανοτικές καμπύλες εμφάνισης παλμού ταχύτητας πάνω στους χάρτες δύο περιοχών για ένα ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και για ένα ρήγμα μη οριζόντιας ολίσθησης, αντίστοιχα. Οι ισο-πιθανοτικές αυτές καμπύλες συμβολίζουν την πιθανότητα εμφάνισης παλμού γύρω από τη διάρρηξη, για σεισμούς στο Imperial Valley και στο Northridge αντίστοιχα. Οι συγκεκριμένοι χάρτες μπορούν να συγκριθούν με τους πραγματικούς χάρτες των περιοχών, που φαίνονται στα σχήματα 2.17(b) και 2.18(b) όπου τονίζονται οι θέσεις όπου παρατηρήθηκαν παλμικές εδαφικές κινήσεις για τους σεισμούς στο Imperial Valley και Northridge, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι το μοντέλο προβλέπει αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης παλμού σε περιοχές που φαίνεται ότι έχουν εμφανιστεί φαινόμενα κατευθυντικότητας και το σχήμα των ισο-πιθανοτικών καμπυλών παρουσιάζει μεγάλη συσχέτιση με τις πραγματικές παρατηρήσεις.



**Σχήμα 2.17** Χάρτης του σεισμικού γεγονότος στο Imperial Valley που δείχνει: (a) ισοπιθανοτικές καμπύλες εμφάνισης παλμού για τη δεδομένη διάρρηξη και (b) θέσεις όπου παρατηρήθηκε παρουσία παλμού (Shahi and Baker, 2011).



**Σχήμα 2.18** Χάρτης του σεισμικού γεγονότος στο Northridge που δείχνει: (a) ισοπιθανοτικές καμπύλες εμφάνισης παλμού για τη δεδομένη διάρρηξη και (b) θέσεις όπου παρατηρήθηκε παρουσία παλμού (Shahi and Baker 2011)

### 3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ ΜΕΣΩ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΝΕΛΙΞΗ

#### 3.1 Εισαγωγή

Τα φαινόμενα κατευθυντικότητας έχουν αποτελέσει τις τελευταίες δεκαετίες αντικείμενο συστηματικών ερευνών, οι οποίες επικεντρώνονται στην εύρεση των κυριότερων χαρακτηριστικών του παλμού που εμπεριέχεται στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας σεισμικής καταγραφής κοντινού πεδίου. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια μέθοδος εντοπισμού των κύριων παλμών που εμπεριέχονται στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας εδαφικής κίνησης, όπως εισήχθη από τους ερευνητές Π. Μίμογλου, Ι. Ψυχάρη και Ι. Ταφλαμπά. Στη μέθοδο αυτή, η οποία αποτελεί μια κλειστή μαθηματική διαδικασία, οι παλμοί ταχύτητας εντοπίζονται μέσω κυματικής ανάλυσης και για τη μαθηματική τους περιγραφή γίνεται χρήση του κυματιδίου που χρησιμοποιούν στις μελέτες τους οι Mavroeidis and Papageorgiou (2003). Για τον προσδιορισμό της περιόδου κάθε παλμού γίνεται χρήση του φάσματος συνέλιξης και για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του χρησιμοποιείται η νεοεισαχθείσα έννοια Cumulative Absolute Displacement (CAD-Taflampas et al. 2009).

Η αυξημένη πυκνότητα καταγραφικών σταθμών σε περιοχές που βρίσκονται κοντά σε ενεργά ρήγματα έχει καταστήσει δυνατή τη συλλογή πλήθους καταγραφών κοντινού πεδίου, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές από τις τυπικές καταγραφές μακριά από τη ζώνη κοντινού πεδίου. Ειδικά μετά το σεισμό του Northridge το 1994, σύγχρονες έρευνες (Somerville et al. 1997, Abrahamson and Silva 1997, Somerville 1998, Abrahamson 2000, Rodriguez-Marek 2000, Somerville 2003) έχουν απομονώσει τα κύρια χαρακτηριστικά των εδαφικών κινήσεων που σχετίζονται με φαινόμενα κατευθυντικότητας και οι επιπτώσεις τους στις κατασκευές (Hall et al. 1995, Alavi and Krawinkler 2000, Sasaki and Bertero 2000, Alavi and Krawinkler 2001). Σημαντικοί παλμοί έχουν παρατηρηθεί στη χρονοϊστορία ταχύτητας των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, οι οποίοι σχετίζονται κυρίως με την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της σεισμικής δράσης και ενισχύουν τις φασματικές τιμές των ταχυτήτων και των μετακινήσεων στις μεσαίες και τις μεγάλες περιόδους.

Η αναγνώριση της ύπαρξης παλμών στη χρονοϊστορία ταχύτητας των σεισμικών διεγέρσεων κοντινού πεδίου έχει σταθεί η αφορμή για περαιτέρω έρευνα, ώστε να καθοριστούν οι χαρακτηριστικές παράμετροι του δεσπόζοντος παλμού και κυρίως η περίοδος και το πλάτος του. Διάφοροι ερευνητές έχουν παρουσιάσει σχέσεις που συνδέουν γραμμικά το λογάριθμο της δεσπόζουσας περιόδου του παλμού με το μέγεθος της ροπής του σεισμικού γεγονότος (Somerville 1998, Alavi and Krawinkler 2000, Rodriguez-Marek 2000, Rupakhety et al. 2011). Παρά το γεγονός ότι η περίοδος του παλμού μπορεί να συνδεθεί με το μέγεθος του σεισμού, δεν έχει αποδειχτεί κάτι αντίστοιχο για το πλάτος του δεσπόζοντος παλμού.

Με βάση τη σημασία των παλμών κατευθυντικότητας στη γραμμική και μη γραμμική απόκριση των κατασκευών, έχουν προταθεί αρκετές μαθηματικές παραστάσεις για την προσομοίωση των σεισμικών κινήσεων κοντινού πεδίου. Αυτά τα προσομοιώματα ποικίλουν από απλές συναρτήσεις (Sasaki and Bertero 2000, Krawinkler and Alavi 1998, Makris and Black 2004), μέχρι πιο πολύπλοκα κυματίδια (Daubechies 1992, Mallat 1999) όπως στις αναλύσεις του Baker (2007).

Ένα αποτελεσματικό προσομοίωμα έχει προταθεί από τους Mavroeidis and Papageorgiou (2003, 2004), το οποίο εισήγαγε περαιτέρω παραμέτρους, που αφορούν τη συνολική διάρκεια και την αλλαγή φάσης των προσομοιούμενων παλμών. Το συγκεκριμένο προσομοίωμα εμφανίζει καλή συσχέτιση με τις αρχικές παλμικές εδαφικές κινήσεις, όπως πιστοποιήθηκε από τους Vassiliou and Makris (2011).

Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό συνδυάζει την αποδεδειγμένη αποτελεσματικότητα της μαθηματικής παράστασης των παλμών κατευθυντικότητας που αναπτύχθηκε από τους Mavroeidis and Papageorgiou (2003) μαζί με μια καλώς ορισμένη διαδικασία για τον προσδιορισμό των παραμέτρων των χρησιμοποιούμενων κυματιδίων.

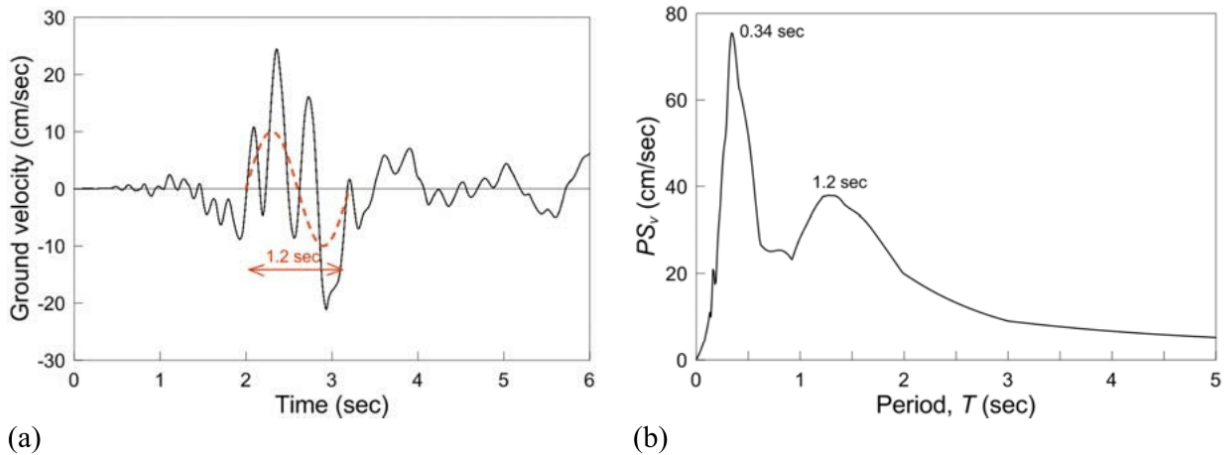
Μέχρι τώρα το προσομοίωμα των Mavroeidis and Papageorgiou (2005) έχει χρησιμοποιηθεί είτε σε διαδικασίες που ακολουθούν τη λογική «δοκιμή και σφάλμα», όπως στην αρχική δημοσίευση με την οποία εισήχθη, είτε μέσω κυματικής ανάλυσης, όπως προτάθηκε από τους Vassiliou and Makris (2011). Η προτεινόμενη διαδικασία που περιγράφεται στο κεφάλαιο αυτό βασίζεται σε νεοεισαχθείσες έννοιες και επιτρέπει την αναγνώριση και την εξαγωγή όλων των σημαντικών παλμών που εντοπίζονται στο εύρος των μέτριων και μεγάλων περιόδων. Αν γίνει υπέρθεση όλων των εξαγόμενων παλμών, μπορεί να παραχθεί μια προσομοίωση ολόκληρης της εδαφικής κίνησης. Τα χαρακτηριστικά των κυματιδίων καθορίζονται από τη βέλτιστη προσαρμογή τους (best fitting) στο φάσμα απόκρισης της ταχύτητας κάθε σεισμικής καταγραφής. Σημειώνεται ότι και άλλοι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει συσχέτιση των φασμάτων παλμού και καταγραφής (spectral matching) ώστε να εκφράσουν ένα γνωστό σήμα μέσω κυματιδίων. Για παράδειγμα, οι Hancock et al. (2006) θεώρησαν έναν αλγόριθμο βασισμένο σε κυματίδια στο πεδίο της χρονοϊστορίας, ενώ οι Giaralis and Spanos (2009) θεώρησαν μια διαδικασία βασισμένη σε κυματίδια στο πεδίο των συχνοτήτων. Η διαφορά της συγκεκριμένης διαδικασίας που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό είναι ότι επικεντρώνεται στην αναγνώριση μόνο των πιο σημαντικών παλμών που εμπεριέχονται στις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου, οι οποίοι είναι επαρκείς για την ολοκληρωμένη προσομοίωση της αρχικής καταγραφής.

Η σημαντικότητα της μεθόδου αυτής είναι διττή. Αφενός παρέχει ένα νέο εργαλείο για την απομόνωση των σημαντικών παλμών που εμπεριέχονται στις καταγραφές εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, αφετέρου οδηγεί σε απλουστευμένες τεχνητές χρονοϊστορίες (synthesized time histories) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί των αυθεντικών καταγραφών για τον αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών μέσω αναλύσεων χρονοϊστορίας φόρτισης. Όσον αφορά το τελευταίο, έχει δείχτει ότι ενώ οι σημαντικοί παλμοί ανιχνεύονται από προσαρμογή τους στα ελαστικά φάσματα απόκρισης, οι τεχνητά κατασκευασμένες χρονοϊστορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επαρκή ακρίβεια και για μη γραμμικές αναλύσεις. Οι μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας φόρτισης χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για το σχεδιασμό των κατασκευών. Ωστόσο, τα αποτελέσματά τους είναι ευαίσθητα ως προς τα χαρακτηριστικά των επιλεγμένων εδαφικών κινήσεων που χρησιμοποιούνται ως διέγερση βάσης. Για το λόγο αυτό είναι σημαντική η επιλογή διεγέρσεων βάσης με σαφώς ξεκάθαρα ορισμένα χαρακτηριστικά. Για την ικανοποίηση αυτής της απαίτησης, η συγκεκριμένη μεθοδολογία επιτρέπει τον προσδιορισμό των σημαντικών χαρακτηριστικών μιας επιλεγμένης σεισμικής καταγραφής και την προσομοίωσή της με μια υπέρθεση λίγων, αυστηρά μαθηματικά καθορισμένων παλμών.

### 3.2 Προσδιορισμός των περιόδων των σημαντικών παλμών

Μια κοινή πρακτική για την εκτίμηση της περιόδου  $T_p$  του δεσπόζοντος παλμού που περιέχεται στις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου είναι η τιμή της περιόδου για την οποία το ελαστικό φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5% εμφανίζει τη μέγιστη αιχμή του. Για παράδειγμα, η κλιμάκωση του μεγέθους της περιόδου του παλμού κατευθυντικότητας δίνεται από σχέσεις παλινδρόμησης που συχνά βασίζονται σε αυτό τον ορισμό (Somerville 1998, Alavi and Krawinkler 2000, Rupakhety et al. 2011). Ωστόσο, η ακρίβεια της διαδικασίας αυτής έχει αμφισβητηθεί από πολλούς ερευνητές (Rodriguez-Marek 2000, Baker 2007).

Ένα παράδειγμα στο οποίο αυτός ο ορισμός της περιόδου του δεσπόζοντος παλμού οδηγεί σε εσφαλμένα αποτελέσματα δείχνεται στο σχήμα 3.1 για την καταγραφή G06-320 (Gilroy Array #6) από το σεισμό του Coyote Lake (1979), ο οποίος είχε μέγεθος  $M_w = 5,7$ . Στο σχήμα 3.1(a) παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας, στην οποία είναι εμφανές ότι η κίνηση χαρακτηρίζεται από ένα παλμό με περίοδο κοντά στο 1,2 sec. Η τιμή αυτή προτείνεται και από τον Baker (2007). Ωστόσο, η περίοδος στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη αιχμή του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για λόγο ιξώδους απόσβεσης 5% είναι ίση με 0,34 sec (Σχήμα 3.1(b)), ενώ η κορυφή στην περίοδο  $T = 1,2$  sec έχει σημαντικά μικρότερο πλάτος.



**Σχήμα 3.1: Καταγραφή G 06-320 (Coyote Lake) 1979 (a) χρονοϊστορία ταχύτητας, (b) PSV 5% (Mimoglou et al. 2014).**

Είναι γνωστό ότι οι φασματικές τιμές Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης μπορούν να είναι ίσες με τις αντίστοιχες φασματικές τιμές της εδαφικής ταχύτητας (Hudson 1979). Έτσι, το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας για μηδενική απόσβεση θεωρείται ότι είναι μια επαρκής περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης, δηλαδή:

$$\tilde{a}_g(\omega) \leq S_{v,0}(\omega) \quad (3.1)$$

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

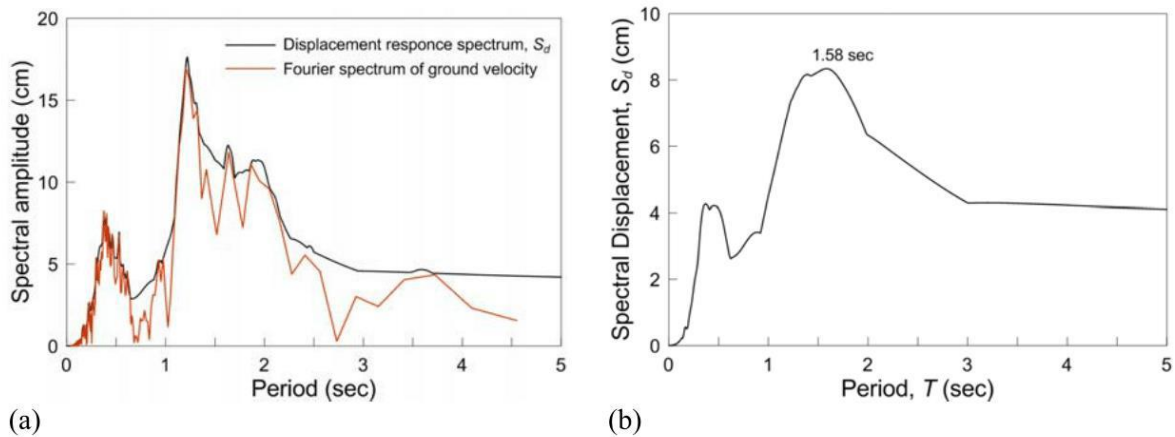
Όμοια, μπορεί να αποδειχτεί ότι το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης για μηδενική απόσβεση αποτελεί μια επαρκή περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής ταχύτητας. Όντως, για ταλαντωτές με μηδενική απόσβεση ( $\xi = 0$ ) μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας  $S_{v,0}(\omega)$  συμπίπτει με το φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας  $PS_{v,0}(\omega)$ , εκτός από τις περιοχές μεγάλων περιόδων. Έτσι, σε ένα μεγάλο εύρος περιόδων, μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι  $S_{v,0}(\omega) = \omega \cdot S_{d,0}(\omega)$ , όπου  $S_{d,0}(\omega)$  είναι το φάσμα απόκρισης της μετατόπισης για μηδενική απόσβεση. Τότε, διαιρώντας και τα δύο μέλη της σχέσης (3.1) με  $\omega$  και λαμβάνοντας υπόψη ότι  $\tilde{a}_g(\omega)/\omega = \tilde{v}_g(\omega)$ ,

όπου  $\tilde{v}_g(\omega) = F(\dot{v}_g)$  το φάσμα Fourier της εδαφικής ταχύτητας  $v_g(t)$ , προκύπτει:

$$\tilde{v}_g(\omega) \leq S_{d,0}(\omega) \quad (3.2)$$

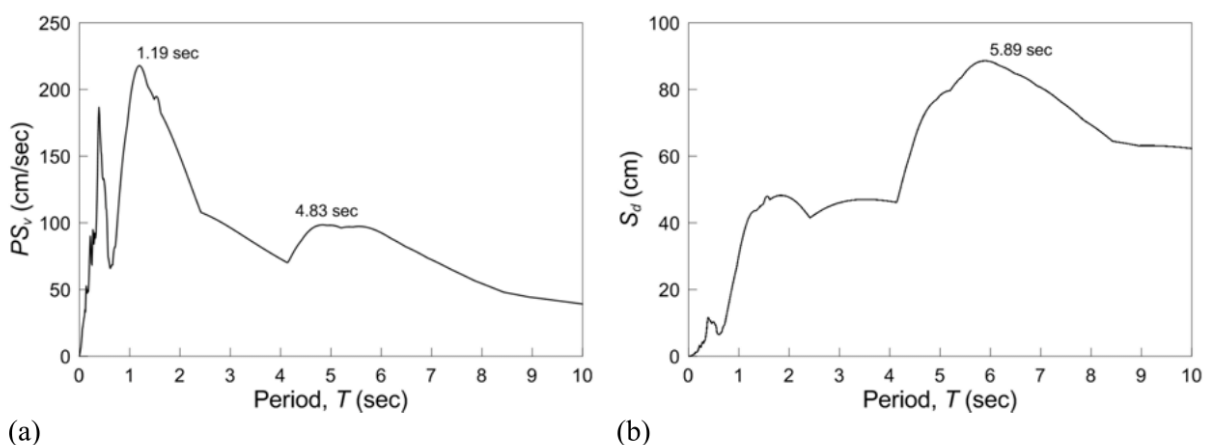
το οποίο δείχνει ότι το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης είναι μια επαρκής περιβάλλουσα καμπύλη του φάσματος Fourier της εδαφικής ταχύτητας. Ένα παράδειγμα δείχνεται στο σχήμα 3.2 για την καταγραφή G06-320 από το σεισμό στο Coyote Lake (1979).

Με βάση την παραπάνω παρατήρηση, και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο παλμός κατευθυντικότητας είναι δεσπόζων στη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας, θα ήταν λογικό η περίοδος του παλμού  $T_p$  να καθορίζεται από τη δεσπόζουσα περίοδο στο φάσμα απόκρισης της μετακίνησης. Για την καταγραφή G06-320, αυτός ο ορισμός οδηγεί σε περίοδο  $T_p = 1,58$  sec (Σχήμα 3.2(b)) η οποία είναι κοντά στην περίοδο του παλμού (1,2 sec) που μπορεί να προσδιοριστεί από την καταγραφή της εδαφικής ταχύτητας (Σχήμα 3.2(a)).



**Σχήμα 3.2: Καταγραφή G06-320 (Coyote Lake) 1979: (a) σύγκριση του φάσματος ταχύτητας Fourier με το φάσμα μετακίνησης για μηδενική απόσβεση, (b)  $S_d$  5% (Mimoglou et al. 2014).**

Ωστόσο, αυτός ο εναλλακτικός ορισμός της  $T_p$  μέσω της δεσπόζουσας περιόδου του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης δε μπορεί να γενικευτεί, αφού υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες δεν επαληθεύεται. Ένα τέτοιο παράδειγμα δίνεται στο σχήμα 3.3 για τη συνιστώσα PCD-164 της καταγραφής Pacoima Dam από το σεισμό του San Fernando (1971). Στην περίπτωση αυτή, η περίοδος του παλμού κατευθυντικότητας είναι ίση με 1,47 sec σύμφωνα με τους Mavroudis and Papageorgiou (2003) και 1,60 sec σύμφωνα με τον Baker (2007). Αυτές οι τιμές είναι κοντινές στη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας (Σχήμα 3.3(a)), ενώ η δεσπόζουσα περίοδος του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης είναι αρκετά μεγαλύτερη, ίση με: 5,89 sec (Σχήμα 3.3(b)). Ακόμα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αιχμή του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης συχνά επηρεάζεται από την παρουσία σφαλμάτων στις καταγραφές του επιταχύνσεων στην περιοχή των μεγάλων περιόδων, με συνέπεια ο ορισμός της περιόδου  $T_p$  από το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης να μην είναι αξιόπιστος σε πολλές περιπτώσεις.



**Σχήμα 3.3: Καταγραφή PCD-164 από το σεισμό στο San Fernando, CA (1971): (a) φάσμα απόκρισης ψευδοταχύτητας για απόσβεση 5%; (b) φάσμα απόκρισης μετακίνησης για απόσβεση 5% (Mimoglou et al. 2014).**

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι εμφανές ότι η δεσπόζουσα περίοδος του παλμού δε μπορεί να προκύψει από τις αιχμές των φασμάτων απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας ή της μετακίνησης, αφού υπάρχουν περιπτώσεις που οι δύο αυτές προσεγγίσεις δίνουν αποτελέσματα που απέχουν σημαντικά από τα πραγματικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πολλές εδαφικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου επηρεάζονται από περισσότερους από έναν παλμούς διαφορετικών περιόδων. Στις

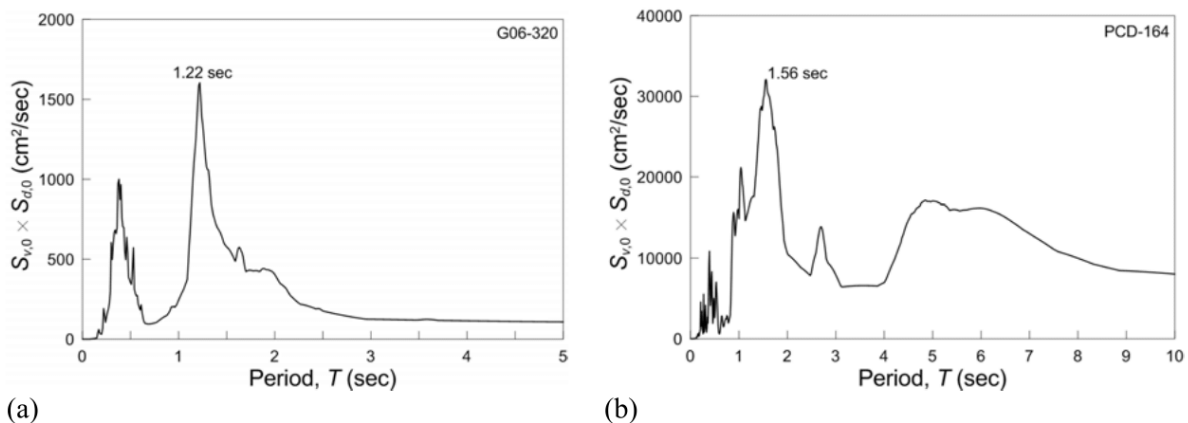


επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία, σύμφωνα με την οποία η εύρεση όλων των σημαντικών παλμών που σχετίζονται με φαινόμενα κατευθυντικότητας προκύπτει μέσω ενός συνδυασμού των φασμάτων της ταχύτητας και της μετακίνησης.

Συγκεκριμένα, αφού οι παλμικές συνιστώσες των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου επηρεάζουν και την εδαφική επιτάχυνση και την εδαφική ταχύτητα, αν και σε διαφορετικό βαθμό, οι σημαντικές περιόδους  $T_i$  είναι λογικό να ξεχωρίζουν στο ολοκλήρωμα συνέλιξης (convolution integral) των δύο αυτών χρονοϊστοριών. Ακόμα, με τη χρήση του ολοκληρώματος συνέλιξης απομειώνεται η επιρροή συνιστωσών με εξαιρετικά υψηλή ή χαμηλή συχνότητα που μπορεί να εμπεριέχονται στην επιτάχυνση και την ταχύτητα της εδαφικής κίνησης. Κατά συνέπεια, οι κορυφές του φάσματος συνέλιξης επιτάχυνσης και ταχύτητας αντιστοιχούν στις περιόδους των σημαντικών παλμών που εμπεριέχονται σε μια εδαφική κίνηση.

Είναι γνωστό ότι το φάσμα Fourier του ολοκληρώματος συνέλιξης είναι ίσο με το φάσμα Fourier των σημάτων για τα οποία γίνεται η συνέλιξη. Ακόμα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας για μηδενική απόσβεση  $S_{v,0}$  είναι μια επαρκής περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης και το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης για μηδενική απόσβεση  $S_{d,0}$  είναι μια επαρκής περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής ταχύτητας. Χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες αυτές, το φάσμα Fourier του ολοκληρώματος συνέλιξης μπορεί να προσεγγιστεί από το γινόμενο  $S_{v,0} \times S_{d,0}$ , το οποίο στη συνέχεια θα αναφέρεται ως “Φάσμα Συνέλιξης” (convolution spectrum). Συνεπώς, οι περιόδους των σημαντικών παλμών μπορούν να καθοριστούν από τις κορυφές του φάσματος συνέλιξης.

Ένα παράδειγμα δίνεται στο σχήμα 3.4, όπου παρουσιάζονται τα φάσματα συνέλιξης για τις καταγραφές που αναφέρθηκαν παραπάνω, όπου η καταγραφή G06-320 αντιστοιχεί στο σεισμό του Coyote Lake, ενώ η καταγραφή PCD-164 αντιστοιχεί στο σεισμό του San Fernando. Όπως αναφέρθηκε ήδη, στην πρώτη περίπτωση η περίοδος του παλμού σχετίζεται με τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης, ενώ στη δεύτερη σχετίζεται με τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης της ψευδοταχύτητας. Η χρήση του φάσματος συνέλιξης επιτρέπει το σωστό υπολογισμό της περιόδου του παλμού και στις δύο περιπτώσεις.



**Σχήμα 3.4: Φάσματα συνέλιξης και προσδιορισμός της περιόδου  $T_i$  για τις καταγραφές: (a) G06-320 (Coyote Lake), (b) PCD-164 San Fernando (Mimoglou et al. 2014).**

Η χρήση του φάσματος συνέλιξης επιτρέπει τον εντοπισμό πρόσθετων σημαντικών παλμών που ενδέχεται να εμπεριέχονται μέσα στην εδαφική κίνηση και εμφανίζονται στο πεδίο των μεσαίων και χαμηλών συχνοτήτων. Το γεγονός ότι ίσως απαιτούνται περισσότεροι από ένα παλμοί για την αξιόπιστη παράσταση της εδαφικής κίνησης και την ικανοποιητική προσέγγιση των φασμάτων απόκρισης των καταγραφών, έχει τονιστεί και από τους Manroeidis and Papageorgiou (2003). Στις περιπτώσεις αυτές είναι απαραίτητος ο συνδυασμός περισσότερων από ένα κυματιδίων για την επαρκή αναπαράσταση της αρχικής καταγραφής.

Αυτοί οι επιπλέον παλμοί εμφανίζονται ως δευτερεύουσες κορυφές στο φάσμα συνέλιξης και μπορεί να αντιστοιχούν σε μικρότερες ή μεγαλύτερες περιόδους σε σύγκριση με τον πρώτο παλμό που προκύπτει από τη μεγαλύτερη αιχμή του φάσματος συνέλιξης. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις

αυτό δεν είναι ξεκάθαρο. Για το λόγο αυτό προτείνεται η εύρεση κάθε επιπρόσθετου παλμού επαναλαμβάνοντας την προαναφερθείσα διαδικασία στην εναπομένουσα εδαφική κίνηση (residual motion), μετά την αφαίρεση όλων των προηγούμενων παλμών από την αρχική καταγραφή. Αυτή η διαδικασία θα πρέπει να επαναλαμβάνεται όσες φορές είναι απαραίτητο, μέχρι να εξαχθούν διαδοχικά όλοι οι σημαντικοί παλμοί. Παρατηρείται ότι όλοι οι παλμοί που εξάγονται από τη διαδικασία αυτή δεν είναι εξίσου σημαντικοί. Είναι έτσι απαραίτητος ο καθορισμός κριτηρίων, ώστε να ελέγχεται εάν ένας παλμός είναι αποδεκτός ή θα πρέπει να απορρίπτεται.

### 3.3 Προσδιορισμός των παραμέτρων των κυματιδίων

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

Το κυματίδιο των Mavroudis and Papageorgiou (2003) προέρχεται από τη σύζευξη ενός σήματος αρμονικής ταλάντωσης και μια περιβάλλουσα κωδωνοειδούς μορφής.

Για τον ορισμό του παλμού χρησιμοποιούνται τέσσερις παράμετροι:

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

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

$$a_p(t) = \begin{cases} -\frac{A\pi}{\gamma T_p} \left[ \sin\left(\frac{2\pi}{\gamma T_p}(t-t_0)\right) * \cos\left(\frac{2\pi}{\gamma T_p}(t-t_0) + \nu\right) \right. \\ \left. + \gamma * \sin\left(\frac{2\pi}{\gamma T_p}(t-t_0) + \nu\right) * \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{T_p}(t-t_0)\right) \right] \right], & t_0 - \frac{\gamma}{2}T_p \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2}T_p \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$v_p(t) = \begin{cases} \frac{A}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\gamma T_p}(t-t_0)\right) \right] * \cos\left(\frac{2\pi}{\gamma T_p}(t-t_0) + \nu\right), & t_0 - \frac{\gamma}{2}T_p \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2}T_p \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (3.4)$$

όπου  $t_0$  είναι η χρονική στιγμή που καθορίζει την περιοχή της αιχμής της περιβάλλουσας.

Προκειμένου να αντιστοιχηθεί ένα κυματίδιο σε κάθε σημαντικό παλμό  $i$ , η περίοδος του παλμού  $T_p$  τίθεται ίση με την αντίστοιχη  $T_i$ . Ο καθορισμός των υπολοίπων παραμέτρων του κυματιδίου,  $A$ ,  $\gamma$  και  $\nu$ , πραγματοποιείται με τη χρήση της νεοεισαχθείσας παραμέτρου CAD (Cumulative Absolute Displacement – Αθροιστική Απόλυτη Μετατόπιση), η οποία εισήχθη από τους Taflampas et al. (2009) σε αναλογία με το δείκτη CAV (Cumulative Absolute Velocity – Αθροιστική Απόλυτη Ταχύτητα – EPRI 1991). Το CAD ορίζεται ως το χρονικό ολοκλήρωμα της απόλυτης εδαφικής ταχύτητας, δηλαδή:

$$CAD = \int_0^{t_{tot}} |v_g| dt \quad (3.5)$$

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

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

$$S_{d,0}(T_{res}) = \pi * \gamma * d_{g,max} \quad (3.6)$$

Από την άλλη, η τιμή του CAD στο τέλος του  $\gamma$  κύκλου μιας αρμονικής διέγερσης, είναι ίση με:

$$CAD = 4 * \gamma * d_{g,max} \quad (3.7)$$

Συνεπώς, για μια αρμονική διέγερση  $\gamma$  κύκλων υπάρχει μια σταθερή σχέση μεταξύ του CAD και της φασματικής μετατόπισης για μηδενική απόσβεση στο συντονισμό, η οποία μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\frac{S_{d,0}(T_{res})}{CAD} = \frac{\pi}{4} \quad (3.8)$$

Εάν αντί μιας καθαρά αρμονικής διέγερσης χρησιμοποιείται ένα κυματίδιο M&P, η παραπάνω σχέση συνεχίζει να διατηρείται με ικανοποιητική ακρίβεια, παρά το γεγονός ότι η περιβάλλουσα κωδωνοειδούς μορφής έχει επιβληθεί στο πλάτος της διέγερσης. Η θέση αυτή επιβεβαιώνεται στο σχήμα 3.5, στο οποίο παρουσιάζεται ο λόγος της μέγιστης φασματικής μετακίνησης για μηδενική απόσβεση προς το CAD ( $S_{d,0,max}/CAD$ ) για διαφορά φάσης  $\nu$  και για  $\gamma = 1,5 ; 2,0 ; 3,0$  και  $5,0$ . Τα αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα από την περίοδο  $T_p$  και το πλάτος  $A$ . Είναι εμφανές ότι ο λόγος  $S_{d,0,max}/CAD$  είναι κοντά στο  $\pi/4$ , ειδικά για παλμούς μεγάλης διάρκειας (μεγάλες τιμές του  $\gamma$ ). Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται για  $\gamma = 1,5$  και  $\nu = 30\theta$ , αλλά ακόμα και τότε το σφάλμα είναι μικρότερο από 6%.

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

$$S_{d,\xi}(T_{res}) = \frac{1-e^{-2\pi\gamma\xi}}{2\xi} d_{g,max} \quad (3.9)$$

και με χρήση της σχέσης (3.7), προκύπτει:

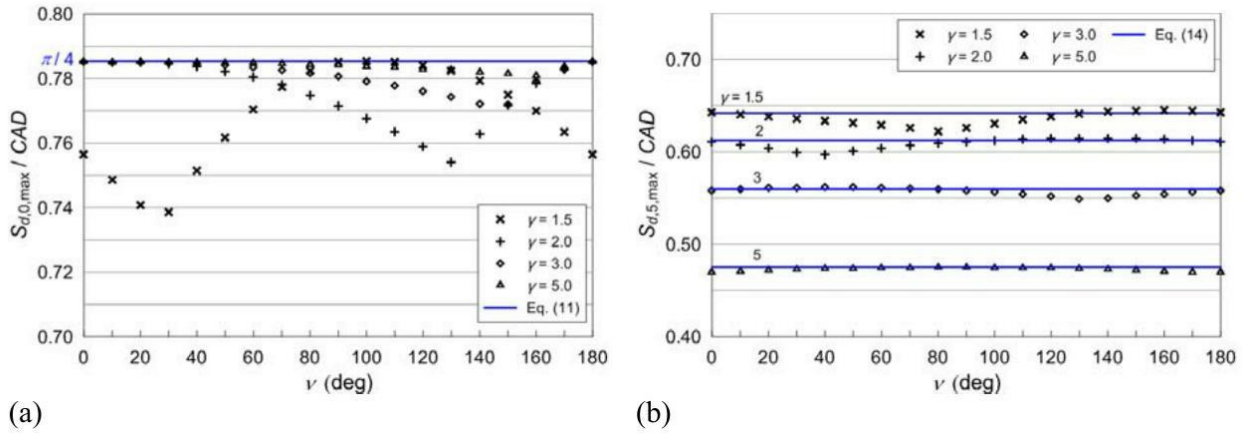
$$\frac{S_{d,\xi}(T_{res})}{CAD} = \frac{1-e^{-2\pi\gamma\xi}}{8\gamma\xi} \quad (3.10)$$

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

$$\frac{S_{d,\xi}(T_{res})}{CAD} = \frac{1-e^{-2\pi\gamma\xi}}{8\gamma\xi} [1 + (\gamma - 1)\xi] \quad (3.11)$$

Μια σύγκριση των τιμών που παράγονται από τη σχέση (3.11) με τις πραγματικές τιμές του λόγου

$S_{d,\xi,max}/CAD$ , οι οποίες υπολογίστηκαν για διάφορες τιμές  $\nu$  και  $\gamma$ , παρουσιάζονται στο σχήμα 3.5 για  $\xi = 5\%$ . Είναι εμφανές ότι η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με την εξίσωση (3.11) είναι ικανοποιητική σε όλες τις περιπτώσεις.



**Σχήμα 3.5:** Σχέση μεταξύ της μέγιστης φασματικής μετακίνησης  $S_{d,max}$  και  $CAD$  για κυματίδιο M&P και διάφορες τιμές  $\gamma$  και  $\nu$ . (a) μηδενική απόσβεση (b) απόσβεση 5% (Mimoglou et al. 2014).

Κάνοντας χρήση των εξισώσεων (3.8) και (3.11) και τη γνωστή σχέση μεταξύ του φάσματος μετακίνησης και του φάσματος ψευδο-ταχύτητας  $PS_{\nu} = (2\pi/T) \cdot S_d$ , μπορούν να διατυπωθούν οι εξής σχέσεις μεταξύ του  $CAD$  της  $PS_{\nu}$ , για κυματίδια M&P:

$$\frac{PS_{\nu,0,max}}{CAD} = \frac{\pi^2}{2T_p} \quad \xi = 0 \quad (3.12)$$

$$\frac{PS_{\nu,\xi,max}}{CAD} = \frac{\pi(1-e^{-2\pi\gamma\xi})[1+(\gamma-1)\xi]}{4\gamma\xi T_p} \quad \xi \neq 0 \quad (3.13)$$

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

$$CAD = \gamma A T_p / \pi \quad (3.14)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι προσανατολισμένη γύρω από τις φασματικές τιμές των διαφόρων μεγεθών, αφού τα κυματίδια ορίζονται έτσι ώστε να γίνεται η καλύτερη δυνατή προσαρμογή (best fitting) των φασμάτων τους, στα φάσματα της αρχικής καταγραφής. Συνεπώς στη βάση αυτής της λογικής, αντικαθιστώντας το  $CAD$  στις εξισώσεις (3.12) και (3.13) και με χρήση της εξίσωσης (3.14), προκύπτουν:

$$A_i = \frac{2PS_{\nu,0}(T_i)}{\pi\gamma_i}, \quad \xi = 0 \quad (3.15)$$

$$A_i = \frac{4\xi PS_{\nu,\xi}(T_i)}{(1-e^{-2\pi\gamma_i\xi})[1+(\gamma_i-1)\xi]}, \quad \xi \neq 0 \quad (3.16)$$

Στις παραπάνω σχέσεις ο δείκτης  $i$  αναφέρεται στο κυματίδιο που αντιστοιχεί στη δεσπόζουσα περίοδο  $T_i$  του παλμού  $i$  και  $PS_{\nu,0}(T_i)$  και  $PS_{\nu,\xi}(T_i)$  είναι οι αντίστοιχες κορυφές του φάσματος της ψευδο-ταχύτητας της εδαφικής κίνησης για μηδενική απόσβεση και για λόγο ιξώδους απόσβεσης ίσο με  $\xi$ , αντίστοιχα.

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

Μεταξύ των εξισώσεων (3.15) και (3.16), για τον καθορισμό του πλάτους  $A_i$  προτιμάται η εξίσωση (3.16), αφού το παραγόμενο κυματίδιο συσχετίζεται καλύτερα με τα αρχικά φάσματα για την επιθυμητή τιμή απόσβεσης. Ωστόσο, η εξίσωση (3.15) θα πρέπει να χρησιμοποιείται στην περίπτωση που κάποιος θέλει να κανονικοποιήσει τα κυματίδια με τη φασματική τιμή απόκρισης για μηδενική απόσβεση.

Για τον καθορισμό του πλάτους  $A_i$  του κυματιδίου από τις εξισώσεις (3.15) ή (3.16), η τιμή της διάρκειας  $\gamma_i$  θα πρέπει να είναι γνωστή. Αφού η παράμετρος αυτή είναι κατά βάση άγνωστη, ελέγχονται όλες οι τιμές  $\gamma_{ij}$  εντός ενός επιλεγμένου εύρους. Από αυτά τα ζεύγη ( $A_{ij}, \gamma_{ij}$ ), εκείνα που οδηγούν σε πλάτη επιταχύνσεων, ταχυτήτων ή μετακινήσεων των κυματιδίων, τα οποία είναι μεγαλύτερα από τις αντίστοιχες αιχμές της εδαφικής κίνησης, PGA, PGV και PGD αντίστοιχα, απορρίπτονται.

Για τα ζεύγη ( $A_{ij}, \gamma_{ij}$ ) που είναι αποδεκτά, υπολογίζονται τα κυματίδια για όλες τις τιμές της διαφοράς φάσης  $\nu_i$ , η οποία παίρνει τιμές εντός του εύρους ( $0^\circ - 360^\circ$ ) και επιλέγεται το κυματίδιο που έχει το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης με την εδαφική κίνηση. Η διαδικασία επεξηγείται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην επόμενη ενότητα.

### 3.4 Προτεινόμενη Μεθοδολογία σε Βήματα

Με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο που αναφέρθηκε παραπάνω, μπορεί να εδραιωθεί μια καλώς ορισμένη διαδικασία για τον καθορισμό των πιο σημαντικών παλμών και των παραμέτρων των αντίστοιχων κυματιδίων M&P που μπορούν να αναπαραστήσουν βέλτιστα την αρχική εδαφική κίνηση. Αυτή η μέθοδος, η οποία μπορεί εύκολα να προγραμματιστεί σε μορφή κώδικα, αποτελείται από τα βήματα που ακολουθούν:

1. Για την υπό εξέταση εδαφική κίνηση παράγεται το φάσμα συνέλιξης με πολλαπλασιασμό των φασμάτων ταχύτητας και μετακίνησης για λόγο ιξώδους απόσβεσης 5%. Στη θεωρητική τεκμηρίωση της μεθόδου, αναφέρεται ότι τα φάσματα ταχύτητας και μετακίνησης για μηδενική απόσβεση αποτελούν επαρκείς περιβάλλουσες των φασμάτων Fourier επιτάχυνσης και ταχύτητας αντίστοιχα. Παρ' όλα αυτά, γίνεται χρήση των φασμάτων ταχύτητας και μετακίνησης για απόσβεση 5%, με στόχο την εξομάλυνση των κορυφών τους που αντιστοιχούν σε υψηλό συχνοτικό περιεχόμενο (υψίσυχνες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης).

2. Προσδιορίζεται η περίοδος που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη αιχμή του φάσματος συνέλιξης και τίθεται ίση με  $T_1$ .

3. Υπολογίζεται το φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για την επιθυμητή τιμή του λόγου ιξώδους απόσβεσης  $\xi$  (τυπικά χρησιμοποιείται η τιμή  $\xi=5\%$ ) και προσδιορίζεται η τιμή  $PSV_{\xi, \max}(T_1)$ .

4. Τίθεται μια μέγιστη τιμή  $\gamma_{\max}$  για την διάρκεια του κυματιδίου M&P. Αφού η διάρκεια του κυματιδίου δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, για τον καθορισμό του κυματιδίου που προσαρμόζεται καλύτερα στη συγκεκριμένη εδαφική κίνηση απαιτείται η σάρωση όλων των πιθανών τιμών του  $\gamma$ , από 1 μέχρι και  $\gamma_{\max}$ . Για παλμούς κατευθυντικότητας σε σεισμικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου, η τιμή  $\gamma_{\max} = 5$  θεωρείται επαρκής. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις ίσως απαιτούνται μεγαλύτερες τιμές της τάξης του  $\gamma_{\max} = 10$  ή και μεγαλύτερες. Για τη σάρωση των τιμών της διάρκειας  $\gamma$  εντός του εύρους που περιγράφηκε παραπάνω, προτείνεται ένα βήμα  $\Delta\gamma = 0.1$ .

Για κάθε τιμή  $\gamma_j$  εντός του εύρους  $1 \leq \gamma_j \leq \gamma_{\max}$ , με βήμα  $\Delta\gamma$  και για την τιμή  $PSV_{\xi, \max}(T_1)$  που καθορίστηκε στο βήμα 3, υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή του πλάτους  $A_j$  με χρήση της εξίσωσης (3.16) ή (3.15) για  $\xi=0\%$ .

5. Για κάθε ζεύγος ( $A_j, \gamma_j$ ) που προσδιορίστηκε στο βήμα 4 και για τιμές διαφοράς φάσης  $\nu$  εντός

του εύρους  $0^\circ$  έως  $360^\circ$ , παράγεται το κυματίδιο M&P με χρήση των εξισώσεων (3.3) και (3.4) θέτοντας  $T_p = T_1$  και αφήνοντας το  $t_0$  ως παράμετρο. Για τη σάρωση όλων των τιμών διαφοράς φάσης εντός του εύρους που αναφέρθηκε παραπάνω, προτείνεται ένα βήμα ίσο με  $\Delta\nu=5^\circ$ . Τα κυματίδια στα οποία η μέγιστη επιτάχυνση, ταχύτητα ή μετακίνηση είναι μεγαλύτερη από την PGA, PGV ή PGD της εδαφικής κίνησης αντίστοιχα, απορρίπτονται.

6. Για κάθε αποδεκτό κυματίδιο που υπολογίστηκε στο βήμα 5 και για τιμές  $t_0$  από  $t_0 = \gamma_j \cdot T_{1/2}$  (αντιστοιχεί σε κυματίδια που ξεκινούν τη χρονική στιγμή  $t = 0$ ) έως  $t_0 = t_{\max} - \gamma_j \cdot T_{1/2}$  (αντιστοιχεί σε κυματίδια που τελειώνουν τη χρονική στιγμή  $t = t_{\max}$ ), με το  $t_{\max}$  να αντιστοιχεί στο τέλος της εδαφικής κίνησης, υπολογίζεται η συσχέτιση μεταξύ της χρονοϊστορίας ταχύτητας του κυματιδίου  $v_p(t)$ , όπως ορίστηκε στην εξίσωση (3.4) και της χρονοϊστορίας της εδαφικής ταχύτητας της καταγραφής  $v_g(t)$ . Επιλέγεται το κυματίδιο με το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης και για αυτό καθορίζονται οι παράμετροι  $A_1$ ,  $\gamma_1$ ,  $\nu_1$  και  $t_{0,1}$ . Υπολογίζεται ο χρόνος έναρξης του παλμού:  $t_{p,1}=t_{0,1}\gamma_j \cdot T_{1/2}$ .

Θα πρέπει να τονιστεί ότι εάν οι συντελεστές συσχέτισης για τα επιλεγμένα κυματίδια είναι μικροί, είναι αμφισβητήσιμο το εάν η συγκεκριμένη εδαφική κίνηση επηρεάζεται από παλμούς κατευθυντικότητας.

7. Υπολογίζεται η εναπομένουσα εδαφική κίνηση (residual ground motion) με αφαίρεση του κυματιδίου που υπολογίστηκε στο βήμα 6 από την αρχική καταγραφή. Αυτή η εναπομένουσα εδαφική κίνηση θεωρείται ως η αρχική εδαφική κίνηση για τους πρόσθετους παλμούς πέραν του πρώτου στα επόμενα βήματα, εκτός από εκείνα όπου επισημαίνεται ότι ορίζεται διαφορετικά.

8. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 έως 6 για τη νέα εδαφική κίνηση και προσδιορίζεται ο επόμενος παλμός  $i$ . Στα βήματα αυτά, ο δείκτης 1 αντικαθίσταται με το δείκτη του εκάστοτε παλμού  $i$ .

Η διαδικασία μπορεί να προγραμματιστεί εύκολα στο σύνολό της και συνεπώς μπορεί να αυτοματοποιηθεί πλήρως, για την εύρεση των χαρακτηριστικών των σημαντικών παλμών σε ένα πλήθος σεισμικών καταγραφών.

## 4 ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 8

### 4.1 Εδαφικές συνθήκες και κατηγορίες εδάφους

Η σεισμική δράση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Η τελευταία έκδοση του EC8(§3.1.2) αναφέρει πέντε βασικούς A,B,C,D,E και δύο ειδικούς S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> τύπους εδάφους, που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να λογαριάσουμε την επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στις σεισμικές δράσεις. Η μέση ταχύτητα διατμητικών κυμάτων στα πρώτα 30 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους V<sub>S-30</sub> υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$V_{S-30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{v_i}}$$

όπου

h<sub>i</sub> και v<sub>i</sub> είναι το πάχος σε μέτρα (m) και η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων (σε ένα επίπεδο διατμητικής καταπόνησης 10<sup>-5</sup> ή λιγότερο) που αντιστοιχούν στη στρώση i, σε ένα σύνολο από N στρώσεις.

Εάν η τιμή της V<sub>S-30</sub> δεν είναι διαθέσιμη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατάταξη σε κατηγορία ο αριθμός κρούσεων ανά 0,3 m στην πρότυπη δοκιμή διείσδυσης N<sub>SPT</sub> (Standard Penetration Test). Εάν ούτε και αυτός ο αριθμός είναι διαθέσιμος, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αστράγγιστη αντοχή c<sub>u</sub>.

Στον Πίνακα 4.1 (Table 4.1) παρουσιάζονται οι κατηγορίες εδάφους με την αντίστοιχη περιγραφή τους και οι παράμετροι που ορίστηκαν V<sub>S-30</sub>, N<sub>SPT</sub> και c<sub>u</sub> κατά EC8.

Κατηγορία Εδάφους		VS30 (m/s)	NSPT	Cu (kPa)
<b>A</b>	Βράχος με έως 5m ασθενέστερο επιφανειακό υλικό	>800	-	-
<b>B</b>	Πολύ πυκνή άμμος ή αμμοχάλικο, ή πολύ σκληρή άργιλος, δεκάδων m με αύξηση μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος	360-800	>50	>250
<b>C</b>	Πυκνή άμμος ή αμμοχάλικο, ή σκληρή άργιλος, αρκετών δεκάδων ή εκατοντάδων m	180-360	15-50	70-250
<b>D</b>	Χαλαρή έως μετρίως χαλαρή άμμος η αμμοχάλικο ή μαλακή έως μετρίως σκληρή άργιλος	<180	<15	<70
<b>E</b>	Επιφανειακό στρώμα C ή D πάχους 5 έως 20m και υπόστρωμα με V <sub>S</sub> >800m/s			
<b>S<sub>1</sub></b>	≥ 10m μαλακή άργιλος/ιλύς με δείκτη πλαστικότητας PI>40 και υψηλή περιεκτικότητα νερού	<100	-	10-20
<b>S<sub>2</sub></b>	Ευαίσθητη άργιλος, εδάφη ρευστοποιήσιμα ή εκτός A-E ή S <sub>1</sub>			

Πίνακας 4.1 Κατάταξη εδαφών κατά EC8

Ground type and description	V <sub>s,30</sub>	N <sub>SPT</sub>	C <sub>u</sub>
<b>A:</b> Rock or other rock-like geological formation, including at most 5 m of weaker material at the surface.-	>800	-	-

<b>B:</b> Deposits of very dense sand, gravel, or very stiff clay, at least several tens of meters in thickness, characterized by a gradual increase of mechanical properties with depth.	360-800	>50	>250
<b>C:</b> Deep deposits of dense or medium dense sand, gravel or stiff clay with thickness from several tens to many hundreds of meters.	180-360	15-50	70-250
<b>D:</b> Deposits of loose-to-medium cohesion less soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil.	<180	<15	<70
<b>E:</b> A soil profile consisting of a surface alluvium layer with $v_s$ values of type C or D and thickness varying between about 5 m and 20 m, underlain by stiffer material with $v_s > 800$ m/s.			
<b>S<sub>1</sub>:</b> Deposits consisting, or containing a layer at least 10 m thick, of soft clays/silts with a high plasticity index ( $PI > 40$ ) and high water content	<100	-	10-20
<b>S<sub>2</sub>:</b> Deposits of liquefiable soils, of sensitive clays, or any other soil profile not included in types A – E or S <sub>1</sub>			

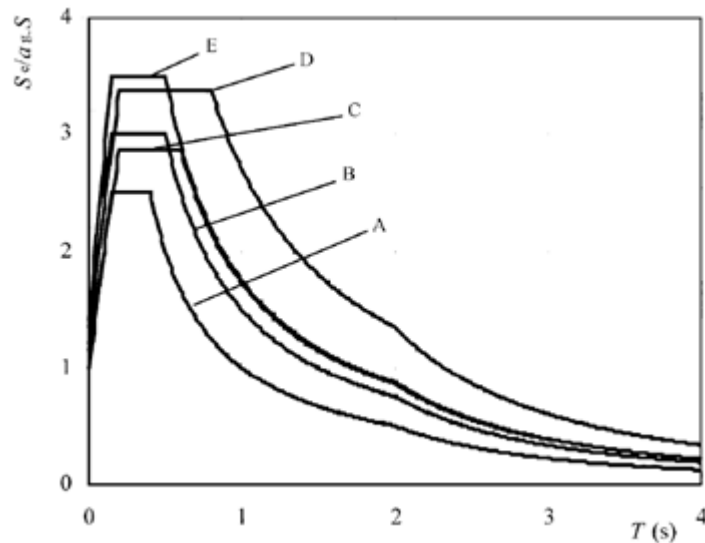
**Table 4.1 Ground types according to Eurocode 8 (EC8 § 3.1.2 Table 3.1)**

Εδάφη της κατηγορίας S<sub>1</sub> έχουν χαμηλή εσωτερική απόσβεση και γραμμική-ελαστική συμπεριφορά ακόμη και σε μεγάλες τιμές της διατμητικής παραμόρφωσης προκαλώντας ενίοτε ασυνήθιστα φαινόμενα ενίσχυσης της σεισμικής δράσης από το εδαφικό στρώμα και αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής. Τα εδάφη αυτά απαιτούν ειδική μελέτη για τον καθορισμό της σεισμικής δράσης ανάλογα με το πάχος και την τιμή της  $V_{S-30}$  του στρώματος μαλακής αργίλου/ιλύος και τη μεγάλη διαφορά των ελαστικών σταθερών μεταξύ του στρώματος αυτού και των υποκειμένων. Ακόμη μεγαλύτερη προσοχή απαιτεί η κατηγορία S<sub>2</sub>, για την οποία υπάρχει πιθανότητα αστοχίας του εδάφους υπό τη σεισμική δράση. Είναι προφανές, ότι η θέση του έργου και η φύση του εδάφους αποκλείουν το ενδεχόμενο να προκληθεί από στο σεισμό ρευστοποίηση ή δυναμική συμπίκνωση του εδάφους θεμελίωσης ή αστάθεια πρανών που μπορεί να απειλήσουν τη σταθερότητα του έργου. Χρειάζεται, εν γένει, εδαφοτεχνική έρευνα-μελέτη για να εξεταστούν τα ανωτέρω, αλλά και για την κατάταξη του εδάφους σε μία από τις παραπάνω κατηγορίες.

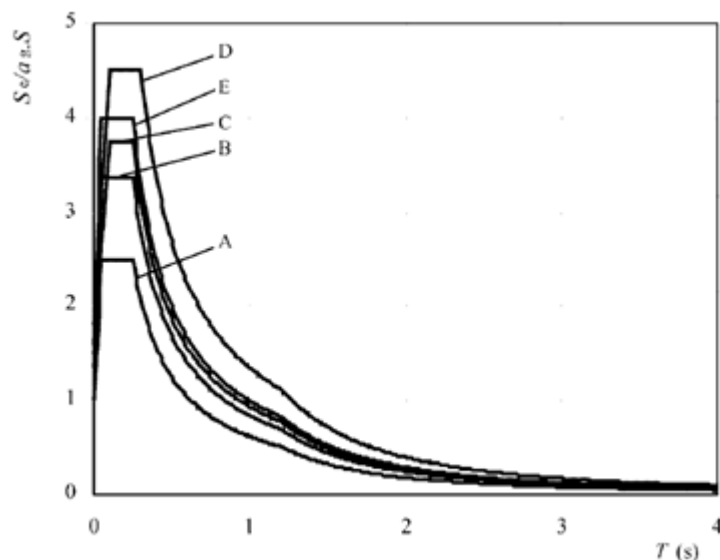
Τα παρακάτω σχήματα παρουσιάζουν τα φάσματα ελαστικής απόκρισης που ορίζονται από τον Ευρωκώδικα 8 για κάθε τύπο εδάφους. Όπως αναφέρθηκες, ο EC8(§3.2.2.2(2)) ορίζει δύο τύπους φασμάτων: Τον Τύπο 1 για περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα ( $M > 5,5$ ) και τον Τύπο 2 για περιοχές με μέση σεισμική δραστηριότητα ( $M < 5,5$ ). Τα φάσματα για κάθε τύπο εδάφους παρουσιάζονται περιλαμβάνοντας τους τύπους εδάφους: A- βράχος, B- πολύ πυκνή άμμος, σκύρο ή πολύ σκληρή άργιλος, C- πυκνή ή μέσης πυκνότητας άμμος, χαλίκι ή σκληρή άργιλος, D- χαλαρό προς μέσο μη συνεκτικό έδαφος (με ή χωρίς μερικές μαλακές συνεκτικές στρώσεις), ή κυρίως μαλακό προς σκληρό συνεκτικό έδαφος, E- εδαφικά προφίλ αποτελούμενα από μία στρώση



επιφάνειας πρόσχωσης με τιμές vs τύπου C ή D και πάχος που ποικίλει μεταξύ 5 και 20 μέτρων, στηριζόμενη από σκληρότερο υλικό. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στη φασματική επιτάχυνση μίας ελαστικής κατασκευής κανονικοποιημένη προς την εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού  $a_g$ .



Σχήμα 4.4.1 Ελαστικό φάσμα απόκρισης για Τύπο 1 κατά EC8 για απόσβεση 5% (EC8 § 3.2.2.2)



Σχήμα 4.4.2 Ελαστικό φάσμα απόκρισης για Τύπο 2 κατά EC8 για απόσβεση 5% (EC8 § 3.2.2.2)

## 4.2 Φάσμα σχεδιασμού επιτάχυνσης

### 4.2.1 Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση

Στον Ευρωκώδικα 8 η εξάρτηση της «σεισμικής δράσης αναφοράς», δηλαδή αυτής με πιθανότητα υπέρβασης 10% σε 50 χρόνια με περίοδο επανάληψης 475 χρόνια,  $A_{EK}$ , από τη γεωγραφική θέση δίνεται σε όρους μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης αναφοράς  $a_{gR}$  στο βράχο, δηλαδή σε έδαφος κατηγορίας A, από τον εθνικό χάρτη Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας. Η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους εξαρτάται από την κατηγορία του εδάφους και προκύπτει από την επιτάχυνση αναφοράς  $a_{gR}$  πολλαπλασιασμένη επί τον συντελεστή  $S$  του Πίνακα 4.4 και

4.5. Για έργα κατηγορίας σπουδαιότητας διαφορετικής της συνήθους (II), η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού  $a_{gR}$  ισούται με την τιμή αναφοράς επί τον συντελεστή σπουδαιότητας  $\gamma_i$ . Οι τιμές του συντελεστή σπουδαιότητας δίνονται στον Πίνακα 4.3. Οι τιμές αναφοράς  $a_{gR}$  για την Ελλάδα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας	$a_{gR}(g)$
Z1	0.16
Z1	0.24
Z3	0.36

Πίνακας 4.2 Τιμές της επιτάχυνσης στο βράχο ανάλογα με τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας

Κατηγορία Σπουδαιότητας	$\gamma_i$
I	0.80
II	1.00
III	1.20
IV	1.40

Πίνακας 4.3 Τιμές του συντελεστή  $\gamma_i$  ανάλογα με την κατηγορία σπουδαιότητας

Οι Πίνακες 4.4 και 4.5 παρουσιάζουν την επίδραση των συντελεστών τοπικού εδάφους στις σεισμικές δράσεις εξαιτίας της φασματικής εδαφικής επιτάχυνσης. Οι παράγοντες που εξαρτώνται από τον τύπο του εδάφους είναι ο συντελεστής του εδάφους,  $S$ , και οι περίοδοι  $T_B$ ,  $T_C$  and  $T_D$ , των οποίων ο ορισμός δίνεται κάτω από τους ακόλουθους πίνακες. Ο Ευρωκώδικας 8 προβλέπει διαφορετικές τιμές για αυτούς τους παράγοντες ανάλογα με το φάσμα ελαστικής απόκρισης που έχει υιοθετηθεί για κάθε περιοχή (Τύπος 1 και Τύπος 2).

Ground type	S	$T_B$	$T_C$	$T_D$
A	1.0	0.15	0.4	2.0
B	1.2	0.15	0.5	2.0
C	1.15	0.20	0.6	2.0
D	1.35	0.20	0.8	2.0
E	1.4	0.15	0.5	2.0

Πίνακας 4.4 Τιμές για το ελαστικό φάσμα απόκρισης Τύπου 1 κατά Eurocode 8 (EC8§ 3.2.2.2 Table 3.2)

Ground type	S	T <sub>B</sub>	T <sub>C</sub>	T <sub>D</sub>
A	1.0	0.05	0.25	1.2
B	1.35	0.05	0.25	1.2
C	1.5	0.10	0.25	1.2
D	1.8	0.10	0.30	1.2
E	1.6	0.05	0.25	1.2

Πίνακας 4.5 Τιμές για το ελαστικό φάσμα απόκρισης Τύπου 2 κατά Eurocode 8 (EC8 § 3.2.2.2 Table 3.3)

όπου:

T<sub>B</sub> είναι το κατώτατο όριο της περιόδου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης

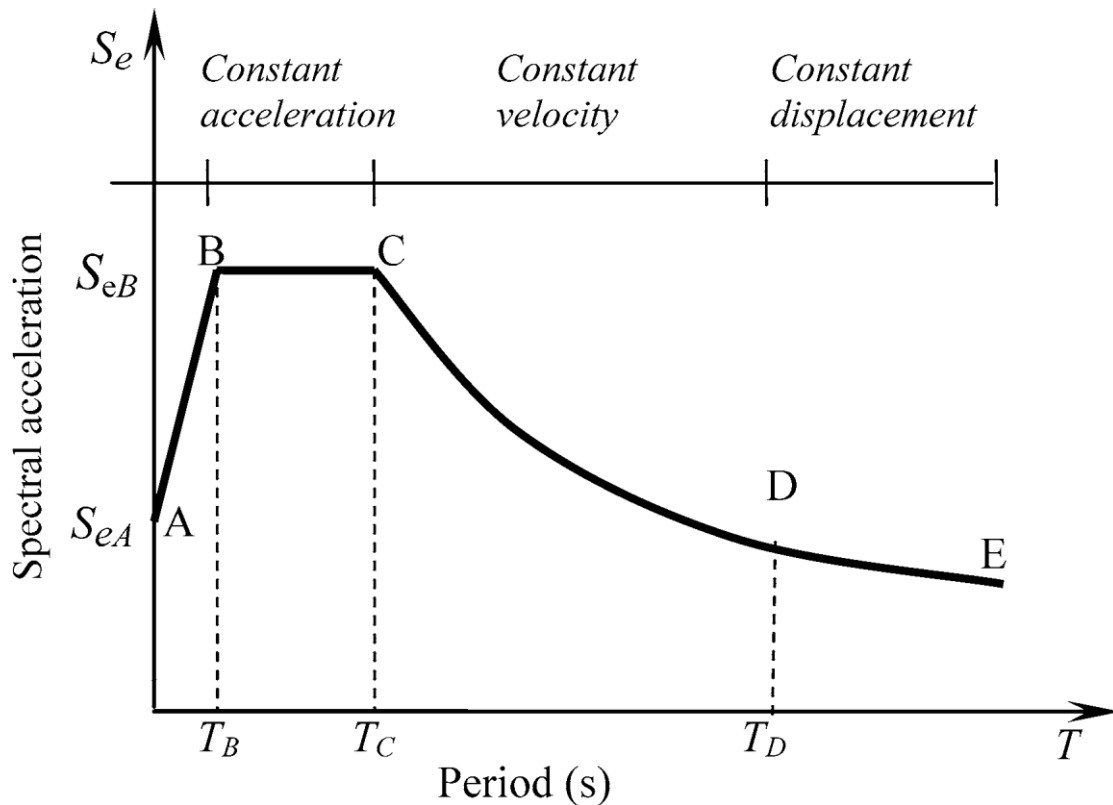
T<sub>C</sub> είναι το ανώτατο όριο της περιόδου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης

T<sub>D</sub> είναι η τιμή που ορίζει την αρχή του εύρους απόκρισης σταθερής μετακίνησης του φάσματος

S είναι ο συντελεστής του εδάφους

#### 4.2.2 Φάσμα σχεδιασμού στην οριζόντια διεύθυνση

Στο οριζόντιο επίπεδο, η σεισμική δράση δρα ταυτόχρονα και ανεξάρτητα σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις που έχουν το ίδιο φάσμα απόκρισης. Η σεισμική δράση σχεδιασμού καθορίζεται στον Ευρωκώδικα 8 μέσω του φάσματος επιταχύνσεων σχεδιασμού. Αυτό βασικώς προκύπτει από το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων με διαίρεση των φασματικών τιμών με το συντελεστή συμπεριφοράς  $q$ . Ένα τυπικό σχήμα οριζόντιου ελαστικού φάσματος σχεδιασμού φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Στο σχήμα αυτό, το T αντιστοιχεί στις περιόδους της κατασκευής, τα  $S_{eA}$  και  $S_{eB}$  δείχνουν τις τιμές των τεταγμένων στα σημεία A και B του ελαστικών φασμάτων σχεδιασμού αντίστοιχα, τα T<sub>B</sub>, T<sub>C</sub> και T<sub>D</sub> ορίζονται όπως αναφέρθηκε παραπάνω.



Σχήμα 4.3 Τυπικό σχήμα του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού

Το ελαστικό φάσμα απόκρισης εφαρμόζεται για σχεδιασμό κατασκευών, οι οποίες θέλουμε να συμπεριφέρονται ελαστικά στο σεισμό σχεδιασμού. Διακρίνονται οι εξής περιοχές:

- Για  $T_B \leq T \leq T_C$ : Περιοχή σταθερής φασματικής επιτάχυνσης
- Για  $T_C \leq T \leq T_D$ : Περιοχή σταθερής φασματικής ταχύτητας
- Για  $T_D \leq T \leq 4.0$ : Περιοχή σταθερής φασματικής μετακίνησης

Στις περιοχές σταθερής φασματικής επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης, το φάσμα σχεδιασμού προκύπτει από την ελαστική απόκριση με απόσβεση 5% διαιρεμένη με το συντελεστή συμπεριφοράς  $q$ . Για περιόδους δόνησης που ανήκουν στην περιοχή  $0 < T \leq T_B$  θεωρείται μία γραμμική συνάρτηση για την επιτάχυνση σχεδιασμού, η οποία ξεκινάει από την τιμή  $S_d = (2/3) S \cdot a_g$  για  $T = 0$ . Επιπλέον, υπάρχει και ένα κατώτερο όριο στη φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού ίσο προς 20% της μέγιστης επιτάχυνσης στο βράχο (Fardis, 2009a).

Οι ακόλουθες εξισώσεις περιγράφουν το φάσμα σχεδιασμού της επιτάχυνσης (EC8 § 3.2.2.5(4)):

$$0 \leq T \leq T_B: S_d(T) = a_g * S * \left[ \frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} * \left( \frac{2.5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_d(T) = a_g * S * \frac{2.5}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_d(T) \begin{cases} = a_g * S * \frac{2.5}{q} * \frac{T_C}{T} \\ \geq \beta * a_g \end{cases}$$

$$T_D \leq T \leq 4 \text{sec}: S_d(T) \begin{cases} = a_g * S * \frac{2.5}{q} * \frac{T_C * T_D}{T^2} \\ \geq \beta * a_g \end{cases}$$

όπου:

$S_d(T)$  είναι το φάσμα σχεδιασμού

$T$  είναι η περίοδος της φόρτισης ενός γραμμικού μονοβάθμιου συστήματος

$a_g$  είναι η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού σε βράχο - έδαφος τύπου A ( $a_g = \gamma_i \cdot a_{gR}$ )

$\gamma_i$  είναι ο συντελεστής σπουδαιότητας του κτιρίου

$T_B$  είναι το κατώτατο όριο της περιόδου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης

$T_C$  είναι το ανώτατο όριο της περιόδου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης

$T_D$  είναι η τιμή που ορίζει την αρχή του εύρους απόκρισης σταθερής μετακίνησης του φάσματος

$S$  είναι ο συντελεστής του εδάφους

$\eta$  είναι ο διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης με τιμή αναφοράς  $\eta = 1$  για ιξώδη απόσβεση 5%

$q$  είναι ο συντελεστής συμπεριφοράς

$\beta$  είναι το κατώτερο όριο της σεισμικής επιτάχυνσης (προτεινόμενη τιμή  $\beta = 0.2$ )

### 4.3 Φάσμα σχεδιασμού μετατόπισης

Ο πρώτος και πλέον προφανής τρόπος να εξάγουμε το ελαστικό φάσμα μετατόπισης ( $S_{De}$ ) για σχεδιασμό θα ήταν να μετατρέψουμε το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού της απόλυτης επιτάχυνσης ( $S_e$ ) που ορίζεται στον κώδικα, μέσω της ψευδο-φασματικής σχέσης:

$$S_{De} = \frac{S_e(T)}{\omega^2}$$

Ο μετασχηματισμός του φάσματος επιτάχυνσης στους παρόντες σεισμικούς κώδικες σε φάσμα μετατόπισης γενικά δε δίνει αξιόπιστες τεταγμένες μετατόπισης στις μεγαλύτερες περιόδους σχετικά με το βασιζόμενο στη μετατόπιση σχεδιασμό. Ο μετασχηματισμός αυτός θα έπρεπε κανονικά να εφαρμόζεται για περιόδους δόνησης που δεν υπερβαίνουν τα 4 sec. Για κατασκευές με περιόδους δόνησης μεγαλύτερες των 4 sec, ένας πληρέστερος ορισμός τους ελαστικού φάσματος παρουσιάζεται στον Ευρωκώδικα 8. Στον Ευρωκώδικα 8 το φάσμα μετατόπισης για λόγους απόσβεσης εκτός του 5% προκύπτουν προσαρμόζοντας έναν συντελεστή κλιμάκωσης στις

τεταγμένες του φάσματος απόσβεσης 5% όπως παρακάτω:

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}}$$

Όπου  $\xi$  είναι ο λόγος ιξώδους απόσβεσης της κατασκευής, εκφραζόμενος σε ποσοστό επί τοις εκατό (%). Στον EC8 τα φάσματα απόκρισης ορίζονται για διάφορους λόγους απόσβεσης.

## 5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανάλυση 483 σεισμικών καταγραφών που προέκυψαν από 65 σεισμικά γεγονότα μεσαίου μεγέθους  $M_w > 5$ , όπως είναι εκείνα που συνήθως πλήττουν την περιοχή. Οι σεισμοί αυτοί σημειώθηκαν είτε στον ελλαδικό χώρο είτε στις παρακείμενες περιοχές αυτού, όπως της Ευρώπης και της Μέσης Ανατολής. Όσον αφορά στον ελλαδικό χώρο, για σεισμούς που σημειώθηκαν πριν το 2000 χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα καταγραφών από την **Hellenic Accelerogram Database (HEAD)**, ενώ για σεισμούς μετά το 2000 από στην ιστοσελίδα του **ΙΤΣΑΚ** (Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών). Για τους σεισμούς που σημειώθηκαν εκτός του ελλαδικού χώρου χρησιμοποιήθηκαν καταγραφές από την **ESM (European Strong Motion Database)**.

Ακολουθώς, παρουσιάζεται ο πίνακας με το σύνολο των σεισμικών γεγονότων που μελετήθηκαν, την ημερομηνία καταγραφής και το μέγεθος κάθε σεισμού (Πίνακας 5.1). Με έντονο χρώμα σημειώνονται οι σεισμοί σε καταγραφές των οποίων εμφανίζεται παλμός κατευθυντικότητας.

	EVENT NAME	NATION	DATE	Mw
1	THESSALONIKI	GREECE	20/06/1978	6.5
2	ALKYONIDES	GREECE	24/02/1981	6.7
3	CEPHALONIA	GREECE	17/01/1983	7.0
4	CEPHALONIA	GREECE	23/03/1983	6.2
5	CEPHALONIA	GREECE	24/03/1983	5.4
6	IERISSOS	GREECE	26/08/1983	5.1
7	KREMYDIA	GREECE	25/10/1984	5.0
8	KALAMATA	GREECE	13/09/1986	6.0
9	KALAMATA	GREECE	15/09/1986	5.3
10	KYLLINI	GREECE	16/10/1988	6.0
11	GRIVA	GREECE	21/12/1990	6.0
12	PYRGOS	GREECE	26/03/1993	5.4
13	PATRA	GREECE	14/07/1993	5.6
14	ARNAIA	GREECE	04/05/1995	5.3
15	KOZANI	GREECE	13/05/1995	6.6
16	KOZANI	GREECE	15/05/1995	5.3
17	KOZANI	GREECE	17/05/1995	5.1
18	KOZANI	GREECE	19/05/1995	5.3
19	AEGION	GREECE	15/06/1995	6.4
20	AEGION	GREECE	15/06/1995	5.6
21	KONITSA	GREECE	05/08/1996	5.7
22	STROFADES	GREECE	18/11/1997	6.6
23	ATHENS	GREECE	07/09/1999	5.9
24	LEFKADA	GREECE	14/08/2003	6.2
25	CEPHALONIA	GREECE	26/01/2014	6.1
26	CEPHALONIA	GREECE	26/01/2014	5.3
27	CEPHALONIA	GREECE	03/02/2014	6.1
28	LEFKADA	GREECE	17/11/2015	6.4
29	FRIULI	ITALY	11/09/1976	5.2
30	FRIULI	ITALY	11/09/1976	5.6
31	FRIULI	ITALY	15/09/1976	5.9
32	FRIULI	ITALY	15/09/1976	6.0
33	SICILIA	ITALY	15/04/1978	6.0
34	BAR-SKUPSTINA	YUGOSLAVIA	15/04/1979	6.9

35	BUDVA	YUGOSLAVIA	24/05/1979	6.2
36	UMBRIA	ITALY	19/09/1979	5.8
37	LAZIO	ITALY	07/05/1984	5.9
38	ABRUZZO	ITALY	11/05/1984	5.5
39	JUDEUL VRANCEA	ROMANIA	30/05/1990	6.9
40	JUDEUL VRANCEA	ROMANIA	31/05/1990	6.3
41	ERZINCAN	TURKEY	13/03/1992	6.6
42	FARS	IRAN	20/06/1994	5.8
43	Afyonkarahisar	TURKEY	01/10/1995	6.4
44	ARDABIL	IRAN	28/02/1997	6.0
45	UMBRIA	ITALY	26/09/1997	6.0
46	UMBRIA	ITALY	26/09/1997	5.7
47	UMBRIA	ITALY	14/10/1997	5.6
48	AZORES ISLAND	PORTUGAL	09/07/1998	6.2
49	CALABRIA	ITALY	09/09/1998	5.6
50	IZMIT	TURKEY	17/08/1999	7.4
51	KOCAELI	TURKEY	13/09/1999	5.8
52	DUZCE	TURKEY	11/11/1999	5.7
53	DUZCE	TURKEY	12/11/1999	7.0
54	DUZCE	TURKEY	12/11/1999	4.6
55	DUZCE	TURKEY	12/11/1999	5.0
56	Çankırı	TURKEY	06/06/2000	5.9
57	IS-2000-0048	ICELAND	17/06/2000	6.5
58	IS-2000-0053	ICELAND	21/06/2000	6.4
59	Khuzestan	IRAN	25/9/2002	5.6
60	BINGL	TURKEY	01/05/2003	6.4
61	KERMAN	IRAN	26/12/2003	6.6
62	MAZANDARAN	IRAN	28/05/2004	6.3
63	IS-2008-0054	ICELAND	29/05/2008	6.3
64	L'AQUILA	ITALY	06/04/2009	6.1
65	EMILIA ROMAGNA	ITALY	29/05/2012	6.0

Πίνακας 5. 1 Σύνολο εξεταζόμενων καταγραφών ελλαδικού χώρου και περίξ αυτού

## 5.2 Προσδιορισμός των παλμών μέσω κυματικής ανάλυσης

Για την προσομοίωση της εδαφικής κίνησης γίνεται χρήση του κυματιδίου που προτείνεται από τους **Mavroeidis and Papageorgiou [2003]**. Το κυματίδιο αυτό προκύπτει από τη σύνθεση μιας περιοδικής αρμονικής, με συχνότητα **fp** και διαφορά φάσης **v** και μιας κωδωνόσχημης περιβάλλουσας, με εύρος **A** και διάρκεια **γ/fp**. Η τελευταία προκύπτει από την μετάθεση πάνω από τον οριζόντιο άξονα μιας συνάρτησης συνημιτόνου και επιτρέπει την ικανοποιητική προσέγγιση κάθε σημαντικού παλμού που εντοπίζεται.

Για τον ορισμό του παλμού χρησιμοποιούνται τέσσερις παράμετροι:

- Η περίοδος  $T_p$  της αρμονικής ταλάντωσης του κυματιδίου.
- Το πλάτος  $A$  της περιβάλλουσας, το οποίο σχετίζεται με το πλάτος της χρονοϊστορίας της ταχύτητας.
- Η διάρκεια  $\gamma$  του κυματιδίου, η οποία μετρά τον αριθμό των ταλαντώσεων
- Η διαφορά φάσης  $v$ .

Αρχικά, για κάθε καταγραφή εξάγεται το φάσμα συνέλιξης (convolution spectrum), που προκύπτει από πολλαπλασιασμό των φασμάτων απόκρισης της μετακίνησης ( $S_{d,s}$ ) και της ταχύτητας ( $S_{v,s}$ ) για λόγο ιξώδους απόσβεσης 5% ( $S_{d,s} \times S_{v,s}$ ), ώστε να προσδιοριστεί η περίοδος  $T_p$  του παλμού που αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη αιχμή του φάσματος συνέλιξης.

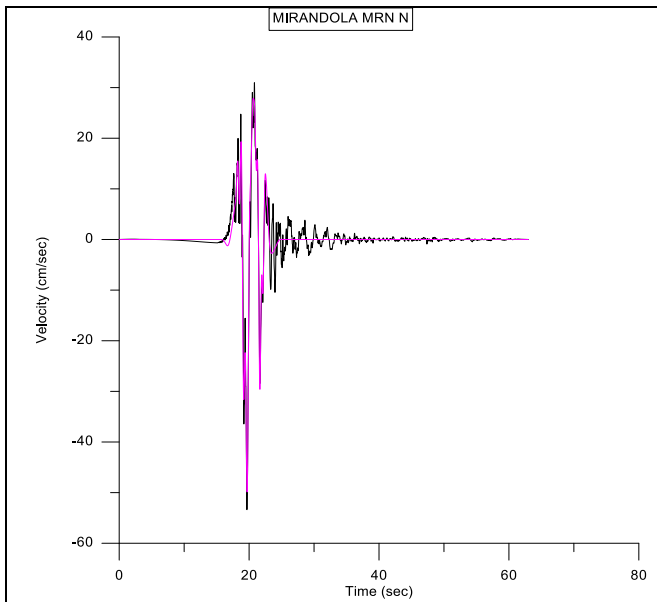


Στη συνέχεια υπολογίζονται οι υπόλοιπες παράμετροι με σειρά δοκιμών, προκειμένου να επιτευχθεί μία καλή συσχέτιση του προσομοιώματος με την πραγματική χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας και της μετακίνησης πέραν της συσχέτισης των φασματικών τιμών. Κατόπιν, προσδιορίζεται ο συντελεστής συσχέτισης της αρχικής καταγραφής με τον πρώτο παλμό.

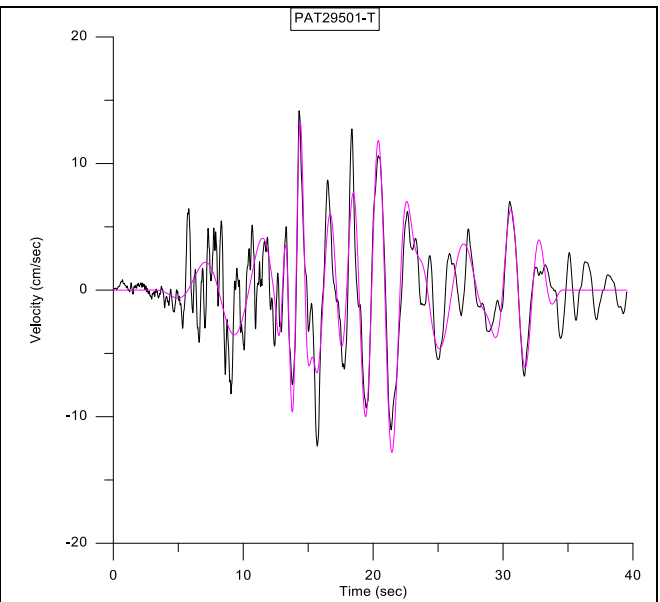
Έπειτα αφαιρείται ο πρώτος παλμός από την αρχική καταγραφή και υπολογίζεται η εναπομένουσα εδαφική κίνηση, η οποία με τη σειρά της θεωρείται ως η αρχική εδαφική κίνηση για τους πρόσθετους παλμούς πέραν του πρώτου.

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι και τον προσδιορισμό του έκτου παλμού και στη συνέχεια γίνεται υπέρθεση και των έξι παλμών που έχουν εξαχθεί με την παραπάνω διαδικασία ώστε να διαταχθεί η σειρά των κυματιδίων για την προσομοίωση ολόκληρης της εδαφικής κίνησης. Ακόμη, εξάγονται τα ελαστικά φάσματα για απόσβεση 5% της αρχικής καταγραφής με επιμέρους συνδυασμούς των παλμών, ώστε να εκτιμηθεί με πόσους επιμέρους παλμούς προσεγγίζεται ικανοποιητικά η καταγραφή.

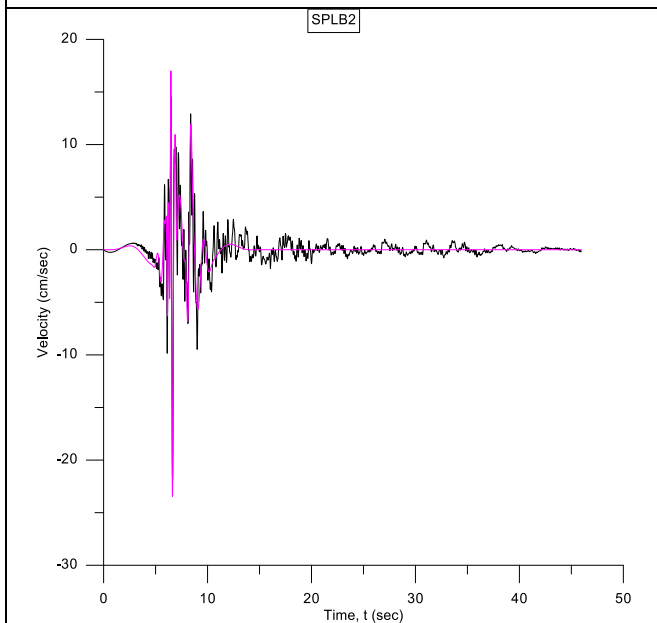
Παρακάτω, παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια από τα διαγράμματα που δείχνουν τη συσχέτιση του προσομοιώματος με τη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας (Πίνακας 5.2). Το σύνολο των διαγραμμάτων χρονοϊστορίας - προσομοιώματος παρουσιάζεται αναλυτικά στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**.



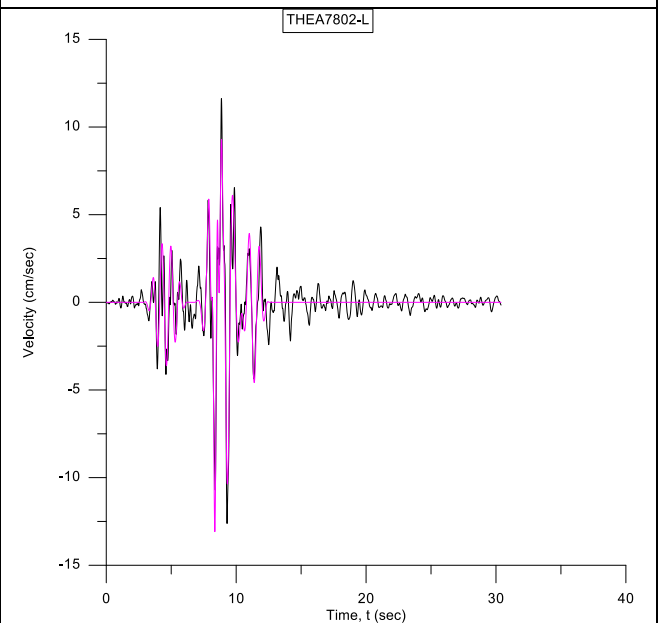
**Σχήμα 5.1**



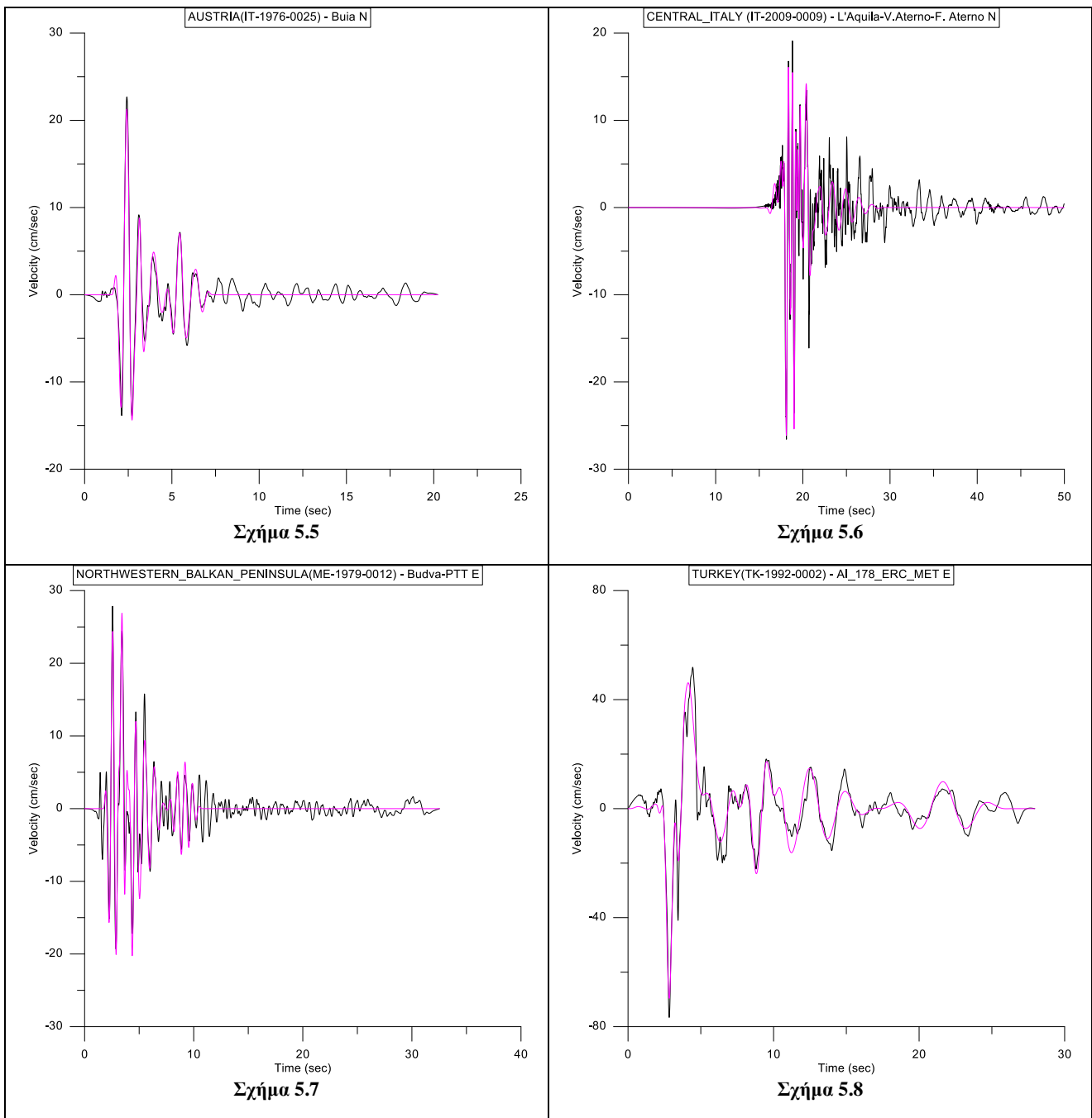
**Σχήμα 5.2**



**Σχήμα 5.3**



**Σχήμα 5.4**



**Πίνακας 5.2** Συσχέτιση του προσομοιώματος (ροζ γραμμή) με τη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας (μαύρη γραμμή)

### 5.3 Ταξινόμηση των καταγραφών σε παλμικές και μη και εξαγωγή παλμών

Ακολουθως, γίνεται η ταξινόμηση των καταγραφών σε παλμικές και μη παλμικές. Για το χαρακτηρισμό μιας καταγραφής ως «παλμική» τίθενται τα παρακάτω κριτήρια:

- Η ταξινόμηση γίνεται με βάση τον πρώτο παλμό κάθε καταγραφής
- Ο συντελεστής συσχέτισης του πρώτου παλμού με την αρχική καταγραφή πρέπει να είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 0,6
- Η μέγιστη εδαφική ταχύτητα της αρχικής καταγραφής πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με 10cm/sec , ( $PGV \geq 10 \text{cm/sec}$ )

Το τελευταίο κριτήριο τίθεται καθώς στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας καταγραφής μπορεί να εκδηλώνεται μια παλμική μορφή χωρίς όμως η καταγραφή να εμπεριέχει σημαντική ενέργεια στο σύνολό της. Εφόσον ο παλμός κατευθυντικότητας εκδηλώνεται μέσα στη χρονοϊστορία της ταχύτητας λαμβάνεται ως γενικός δείκτης για κάθε καταγραφή το μέγεθος της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας (Peak Ground Velocity).

Αξίζει να γίνει μια ακόμα αναφορά στο τελευταίο κριτήριο, την απόρριψη δηλαδή καταγραφών από τη λίστα των παλμικών στην περίπτωση που η τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης PGV είναι μικρότερη από 10cm/sec, ακόμα και αν το κυματίδιο των Μανροειδес and Παπαγεωργίου (2003) εμφανίζει καλή συσχέτιση με την αρχική καταγραφή. Η επιλογή αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι η παρουσία ενός παλμού κατευθυντικότητας συνοδεύεται με την έκλυση σημαντικής κινητικής ενέργειας. Οι καταγραφές συνεπώς που παρουσιάζουν χαμηλές τιμές εδαφικής ταχύτητας θεωρείται ότι δε σχετίζονται άμεσα με το φαινόμενο αλλά μπορεί να οφείλονται σε άλλες αιτίες, όπως είναι τα «Φαινόμενα Λεκάνης» (Basin Effects). Αυτά συμβαίνουν λόγω ανάκλασης των σεισμικών κυμάτων σε μια εκτεταμένη οριζόντια επιφάνεια εντός μιας γεωλογικής λεκάνης, μια παρατήρηση που έχει γίνει και από τον Baker (2007). Ακόμα, θέτοντας το όριο αυτό αποκλείονται αυτόματα οι καταγραφές μακρινού πεδίου, αφού σε μεγάλες αποστάσεις από το ρήγμα το σήμα έχει εξασθενήσει. Τέλος, η μελέτη των παλμικών καταγραφών παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το μηχανικό, καθώς μέσα απ' αυτή τοποθετούνται στις κατασκευές σημαντικά μεγαλύτερες απαιτήσεις από εκείνες για τις οποίες είχαν αρχικά σχεδιαστεί. Συνεπώς, οι εν λόγω καταγραφές, που τυπικά εμπεριέχουν ενέργεια ίδιας τάξεως με τις μη παλμικές καταγραφές, απορρίπτονται από τη διαδικασία ταξινόμησης.

Από τις 483 καταγραφές που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, οι 91 πληρούν και τα τρία ανωτέρω κριτήρια και χαρακτηρίζονται ως παλμικές (pulse like). Οι καταγραφές αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.3), ο οποίος ακόμη περιλαμβάνει τις περιόδους των 6 επιμέρους παλμών καθώς και τα χαρακτηριστικά του πρώτου παλμού.

Number	Event	Year	Station	TP(s)	A(cm/s)	V	v(o)	td(s)	PGA	PGV	TP 2nd	TP 3rd	TP 4th	TP 5th	TP 6th
1	AUSTRIA(IT-1976-0025)	1976	Buia N	0,71	20,86	2,6	35	1,56	228,31	22,70	0,78	1,27	0,4	0,66	0,78
2	AUSTRIA(IT-1976-0025)	1976	Gemona E	1,39	13,70	2,1	85	0,40	292,60	20,28	0,66	1,13	0,56	0,47	0,54
3	AUSTRIA(IT-1976-0025)	1976	Gemona N	0,74	26,02	4,0	240	0,75	321,92	36,58	1,36	0,47	0,97	0,71	1,2
4	AUSTRIA(IT-1976-0025)	1976	Gemona Z	0,72	13,27	2,5	215	1,01	228,11	13,34	0,96	0,44	2,02	0,63	0,6
5	AUSTRIA(IT-1976-0027)	1976	Gemona E	0,86	70,79	2,4	235	5,86	629,04	68,33	0,96	1,8	0,69	0,91	1,12
6	AUSTRIA(IT-1976-0027)	1976	Gemona N	0,90	26,97	5,0	40	5,49	318,47	33,71	1,68	0,63	0,84	0,57	1,29
7	AUSTRIA(IT-1976-0027)	1976	Gemona Z	0,87	23,53	2,0	270	7,46	476,99	20,49	0,65	1,7	0,87	0,47	0,3
8	AUSTRIA(IT-1976-0030)	1976	Gemona E	1,41	16,84	2,5	130	0,12	250,37	30,30	0,73	1,08	1,3	0,37	0,61
9	AZORES ISLANDS(PT-1998-0019)	1998	Horta E	0,86	26,66	2,2	180	6,66	362,35	36,11	0,4	0,52	0,5	0,87	1,09
10	AZORES ISLANDS(PT-1998-0019)	1998	Horta N	0,69	27,49	3,1	50	6,54	397,20	29,71	0,61	0,47	0,8	0,55	1,67
11	CENTRAL ITALY(IT-1997-0004)	1997	Colfiorito E	1,49	13,41	3,9	335	0,01	284,41	22,71	0,85	1,08	0,35	1,09	0,25
12	CENTRAL ITALY(IT-1997-0004)	1997	Colfiorito N	0,92	17,47	4,9	235	2,91	331,81	20,86	1,22	0,91	0,57	0,32	0,34
13	CENTRAL ITALY (IT-1997-0006)	1997	Colfiorito E	1,22	10,85	5,0	130	0,48	213,12	13,33	0,94	1,81	1	0,96	0,74
14	CENTRAL ITALY (IT-1997-0006)	1997	Colfiorito N	0,96	15,32	5,0	340	3,47	193,19	17,02	1,22	0,79	1,23	1,02	0,67
15	CENTRAL ITALY (IT-1997-0006)	1997	Nocera Umbra N	0,86	17,59	2,9	65	1,05	492,17	32,13	0,23	0,35	0,42	0,17	0,24
16	CENTRAL ITALY (IT-1997-0006)	1997	Nocera Umbra Z	1,26	13,91	1,7	180	1,05	398,23	21,13	0,64	1,39	0,25	0,99	0,6
17	CENTRAL ITALY (IT-2009-0009)	2009	AQUILA CASTELLO N	1,18	31,78	1,5	120	17,74	301,88	29,07	0,78	2,2	1,34	0,94	1,13
18	CENTRAL ITALY (IT-2009-0009)	2009	AQUILA CASTELLO Z	3,35	12,40	1,5	180	15,2	301,71	21,02	1,2	1,36	10,63	0,86	2,01
19	CENTRAL ITALY (IT-2009-0009)	2009	L'AQUILA-V.ATERNO-AQUIL PARK ING. E	1,65	22,35	3,9	305	30,46	323,14	32,05	1,82	1,95	1,02	0,87	1,16
20	CENTRAL ITALY (IT-2009-0009)	2009	L'AQUILA-V.ATERNO-AQUIL PARK ING. N	1,68	34,35	1,9	175	31,47	346,78	35,66	1,83	0,84	1,76	1,38	1,58
21	CENTRAL ITALY (IT-2009-0009)	2009	L'AQUILA-V.ATERNO-CENTRO VALLE E	0,75	37,31	1,9	215	32,28	644,25	40,18	0,4	3,25	0,82	0,47	0,46
22	CENTRAL ITALY (IT-2009-0009)	2009	L'AQUILA-V.ATERNO-CENTRO VALLE N	0,53	31,99	2,2	255	33,05	535,20	42,45	2,22	0,64	1,29	0,56	0,81
23	CENTRAL ITALY (IT-2009-0009)	2009	L'AQUILA-V.ATERNO-COLLE GRILLI E	0,94	27,84	2,3	245	32,11	437,43	30,88	3,05	0,97	0,46	0,32	0,56
24	CENTRAL ITALY (IT-2009-0009)	2009	L'AQUILA-V.ATERNO-COLLE GRILLI N	0,91	19,88	4,0	300	31,69	479,27	35,66	0,54	0,95	1,24	0,53	0,87

25	CENTRAL_ITALY (IT-2009-0009)	2009	L'AQUILA-V.ATERNO-F.ATERNO E	1,14	26,93	1,5	165	17,02	389,84	31,77	0,76	1,54	2,49	0,6	17,49
26	CENTRAL_ITALY (IT-2009-0009)	2009	L'AQUILA-V.ATERNO-F.ATERNO N	0,47	20,42	5,0	175	17,38	433,85	26,54	0,94	2,94	1,53	0,66	0,29
27	NORTHWESTERN_BALKAN(ME-1979-0003)	1979	Bar-Skupstina E	1,59	50,67	2,7	45	6,59	351,64	50,41	0,74	1,25	0,58	2,1	0,59
28	NORTHWESTERN_BALKAN(ME-1979-0003)	1979	Bar-Skupstina N	1,08	42,67	3,5	125	7,85	364,56	42,04	0,97	1,21	1,21	0,89	1,94
29	NORTHWESTERN_BALKAN(ME-1979-0012)	1979	Budva-PTT E	0,71	26,52	2,7	55	1,71	260,81	27,85	0,64	0,88	2,31	0,41	0,69
30	NORTHWESTERN_BALKAN(ME-1979-0012)	1979	Budva-PTT N	1,54	13,71	2,4	305	1,96	116,24	19,51	0,7	0,5	0,68	0,93	1,17
31	SOUTHERN_IRAN(IR-2003-0041)	2003	Bam E	1,71	109,49	1,7	345	16,34	843,70	120,42	1,22	1,93	0,8	0,72	3,71
32	SOUTHERN_IRAN(IR-2003-0041)	2003	Bam N	1,44	62,07	2,4	235	17,68	628,22	63,59	1,09	2,6	0,88	0,54	1,32
33	SOUTHERN_IRAN(IR-2003-0041)	2003	Bam Z	1,20	35,65	1,9	235	16,51	980,81	39,73	1,19	3,25	0,81	0,77	0,9
34	TURKEY(TK-1992-0002)	1992	AL_178_ERC_METE	3,46	42,59	1,8	295	0,73	472,73	76,62	2,51	1,71	0,84	1,26	3,36
35	TURKEY(TK-1992-0002)	1992	AL_178_ERC_MET N	2,34	77,69	2,0	255	0,78	403,14	108,41	1,02	3,26	2,76	1,24	8,35
36	TURKEY(TK-1999-0077)	1999	AL_004_IJT E	4,84	26,79	1,5	345	0,01	227,62	38,40	1,8	2,87	1	0,61	16,01
37	TURKEY(TK-1999-0077)	1999	AL_004_IJT Z	2,60	12,86	1,8	245	0,01	143,57	12,50	8,62	1,52	3,05	3,87	2,08
38	TURKEY(TK-1999-0294)	1999	AL_004_IJT E	0,25	10,08	4,4	235	3,25	251,80	12,06	0,5**	1,06	0,35	1,2	1,12
39	TURKEY(TK-1999-0294)	1999	AL_199_TPT E	1,28	71,21	1,7	100	21,89	610,68	62,65	2,09	0,63	1,14	2,19	1,32
40	TURKEY(TK-1999-0415)	1999	AL_011_DZC E	5,03	59,44	3,1	300	0,01	513,33	82,65	1,99	1,64	10,33	1,4	0,85
41	TURKEY(TK-1999-0415)	1999	AL_011_DZC N	5,52	45,60	3,0	185	0,01	404,77	68,05	3,68	3,89	8,33	5,38	3,43
42	TURKEY(TK-1999-0415)	1999	AL_011_DZC Z	6,34	17,44	2,5	170	0,11	346,28	19,80	3,62	8,39	2,86	2,28	2,19
43	TURKEY(TK-1999-0431)	1999	AL_156_VO N	0,34	27,62	5,0	20	13,32	912,40	38,97	0,25	0,43	0,51	0,15	0,47
44	TURKEY(TK-2003-0038)	2003	AL_049_BNG N	2,30	19,57	1,8	115	21,64	502,92	34,14	0,61	0,94	0,4	0,4	2,32
45	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	MIRE E	2,02	20,25	2,2	185	16,56	173,27	27,45	4,17	1,33	0,69	0,46	0,41
46	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	MIRE N	2,06	39,25	2,2	230	17,09	265,49	58,46	0,68	0,81	5,37	0,63	1,01
47	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	MIRH E	2,37	20,21	1,8	165	16,69	145,33	24,68	1,46	0,69	4,26	0,44	1,13
48	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	MIRH N	2,45	37,70	2,5	240	16,50	265,00	55,02	0,64	1,13	1,31	4,8	1,73
49	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	MIRANDOLA E	2,05	21,53	2,1	180	18,63	214,21	28,45	4,18	1,32	0,69	0,47	0,38
50	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	MIRANDOLA N	2,11	38,42	2,2	230	19,05	288,48	57,46	0,68	0,81	5,21	0,63	1,07

51	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	SAN FELICE SUL PARANO E	2,63	11,93	3,9	255	32,60	171,26	19,59	1,6	2,25	0,91	1,16	0,45
52	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	SAN FELICE SUL PARANO N	2,63	22,93	2,6	80	34,27	215,99	35,22	1,72	0,56	0,89	3,89	1,7
53	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	T0800 E	2,19	19,23	1,1	360	23,41	362,85	35,30	0,38	5,71	0,95	20	2,77
54	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	T0802 E	2,33	10,30	4,0	295	16,53	257,40	16,97	0,66	5,88	0,99	2,9	0,33
55	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	T0802 N	3,18	10,13	2,8	210	16,44	288,48	24,37	1,71	0,87	0,57	0,36	0,63
56	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	T0813 N	3,20	11,41	1,8	185	27,07	328,22	24,57	1,09	0,46	3,04	2,41	0,64
57	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	T0818 N	1,00	24,07	5,0	235	17,9	274,38	39,18	2,34	4,45	0,77	0,7	1,37
58	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	MEDOLLA E	2,20	18,06	3,3	5	22,42	407,24	31,29	0,69	0,32	1,43	0,84	0,5
59	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	MEDOLLA N	2,23	48,84	2	55	22,21	373,01	52,33	0,69	1,14	5,42	2,22	0,37
60	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	MIRANDOLA MRN E	2,86	27,49	1,6	180	17,05	205,72	36,29	1,62	0,65	1,45	1,77	15,23
61	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	MIRANDOLA MRN N	2,80	32,55	2,6	230	16,2	229,89	53,37	1,78	0,63	1,26	2,87	0,59
62	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	GAVELLO E	0,76	30,60	3,6	10	44,94	392,11	35,33	2,2	0,94	0,44	2,79	5,93
63	NORTHERN_ITALY(IT-2012-0011)	2012	QUARANTOLI 2 N	2,17	19,65	3,7	20	38,96	242,97	32,42	4,27	0,85	0,59	1,07	2,49
64	KALAMATA	1986	KAL18601-L	2,44	12,49	3	150	0,74	232,53	29,23	1,24	0,64	1,93	0,44	1,75
65	KALAMATA	1986	KAL18608-L	0,73	20,72	2	55	1,78	232,67	22,67	0,35	0,79	0,96	1,87	0,57
66	KALAMATA	1986	KAL28602-L	0,58	12,07	1,9	205	1,99	158,89	12,17	1,26	0,69	0,3	0,45	0,39
67	KALAMATA	1986	KAL28602-T	0,72	25,33	1,9	55	1,82	254,13	24,02	0,38	0,79	1,98	0,99	0,66
68	KONITSA	1996	KON19601-L	0,80	14,03	2,6	205	11,9	167,69	14,53	0,53	2,02	0,58	0,35	0,54
69	KONITSA	1996	KON19601-T	0,80	14,03	2,6	205	11,9	167,69	14,53	0,53	2,02	0,58	0,35	0,54
70	KONITSA	1996	KON29601-L	0,55	23,98	1,9	90	16,97	379,92	20,76	0,29	1,04	0,63	0,25	0,22
71	KONITSA	1996	KON29601-T	0,40	16,68	5,0	85	16,79	379,92	25,83	0,76	0,3	0,3	0,7	0,34
72	KONITSA	1996	KON29601-V	0,89	13,54	1,7	60	16,65	185,03	13,30	0,39	0,59	2,87	0,29	0,15
73	PYRGOS	1993	PYR19308-L	0,52	8,84	1,6	215	2,60	162,86	11,01	0,56	0,77	1,51	1,06	0,78
74	PYRGOS	1993	PYR19308-T	0,45	22,47	1,5	265	2,70	425,85	20,51	0,7	0,81	0,74	0,33	0,4
75	KEFALLONIA	2014	ARG2 20140203N	1,68	29,42	1,3	195	24,58	259,50	33,15	0,49	2,59	20	0,62	5,56
76	KEFALLONIA	2014	LXR1-20140203E	1,46	117,53	2,5	225	23,55	654,50	115,26	1,1	2,52	1	7,71	3,16
77	KEFALLONIA	2014	LXR1-20140203N	1,90	70,32	1,6	255	23,78	589,13	80,52	0,97	0,86	4	1,08	0,46
78	AEGION	1995	AIGA9501-T	0,58	41,92	2,2	185	2,78	501,62	43,78	1,81	1,79	0,79	0,37	1,64
79	AEGION	1995	PAT29501-T	2,04	12,42	5,0	210	14,53	81,21	14,17	3,06	3,83	1,25	4,69	2,29

80	LEFKADA	2015	VAS2_201511170710-NS	2,04	59,94	3,3	60	16,9	363,03	58,62	2,43	2,02	1,14	1,93	1,72
81	THESSALONIKI	1978	THEA7802-L	0,94	9,57	4	45	7,08	137,98	12,62	0,69	0,65	0,8	0,34	0,86
82	KOZANI	1995	KRR19501-L	1,02	8,19	5	145	2,86	185,28	15,30	0,39	0,95	0,75	0,56	1,34
83	ATHENS	1999	ATH39901-L	0,69	14,31	2,3	235	3,16	258,60	16,05	0,98	2,45	0,24	0,37	0,25
84	ATHENS	1999	SGMA9901-L	2,49	5,75	1,7	295	6,21	145,91	12,66	0,55	1,39	0,82	1,73	8,7
85	ATHENS	1999	SGMA9901-T	1,00	10,24	1,5	180	7,9	231,72	13,33	5,02	0,45	0,75	0,22	0,38
86	ATHENS	1999	SPLB9901-L	1,46	10,63	1,8	340	5,19	335,03	21,80	0,47	0,26	1,14	1,59	2,03
87	ATHENS	1999	FIX1	1,47	8,28	2,0	185	7,94	100,88	11,47	1,25	0,59	0,67	2,67	1,06
88	ATHENS	1999	SMA2	1,41	8,29	1,7	185	7,37	189,64	13,72	1,19	2,73	0,51	0,45	0,23
89	ATHENS	1999	SPLA1	1,76	9,80	1,6	0	7,54	177,52	12,64	0,81	5,4	0,44	2,69	0,9
90	ATHENS	1999	SPLB1	1,80	10,33	1,6	330	5,04	232,89	15,45	0,79	0,45	2,35	13,31	1,03
91	ATHENS	1999	SPLB2	0,51	21,67	1,8	200	6,21	371,83	21,91	1,22	5,32	0,24	0,63	0,73

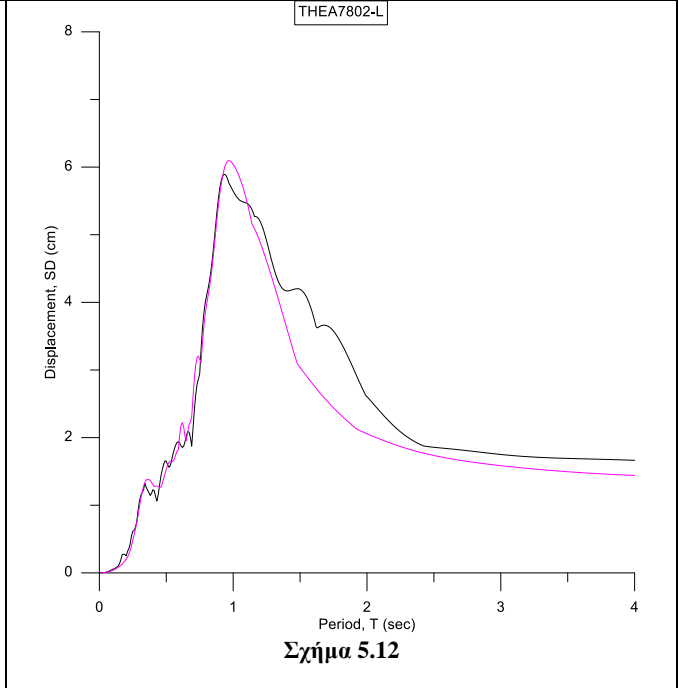
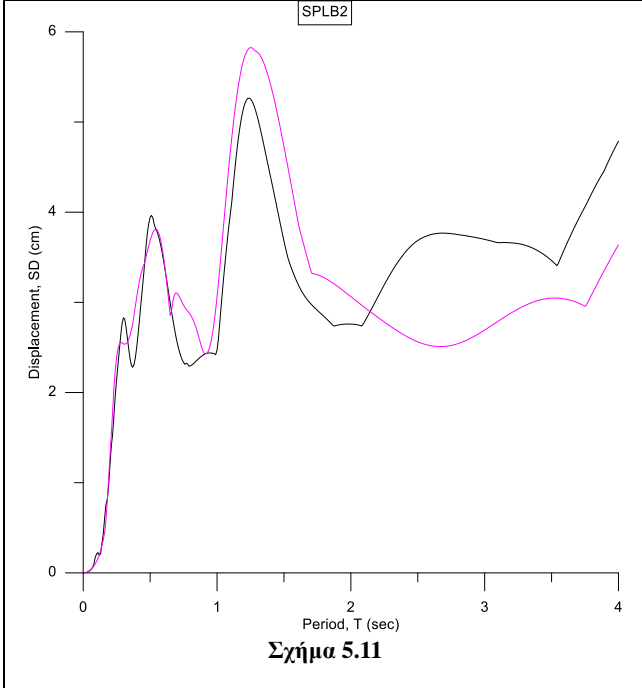
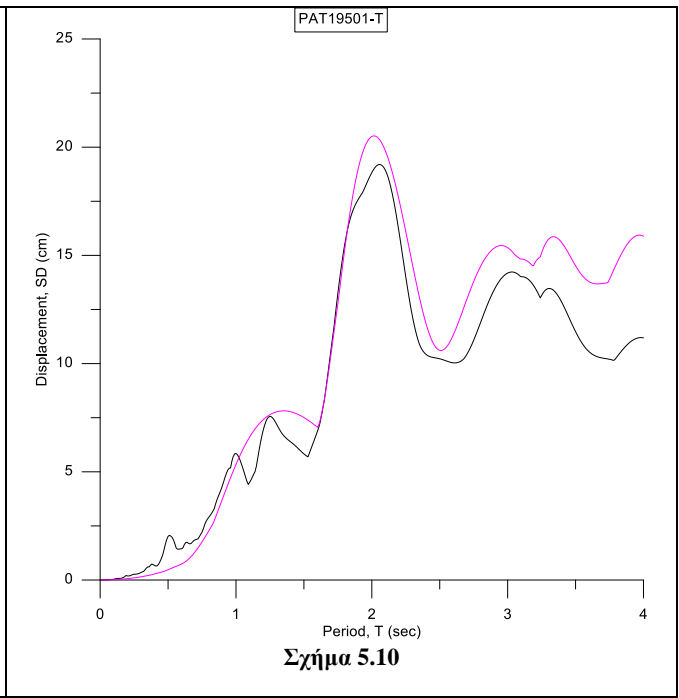
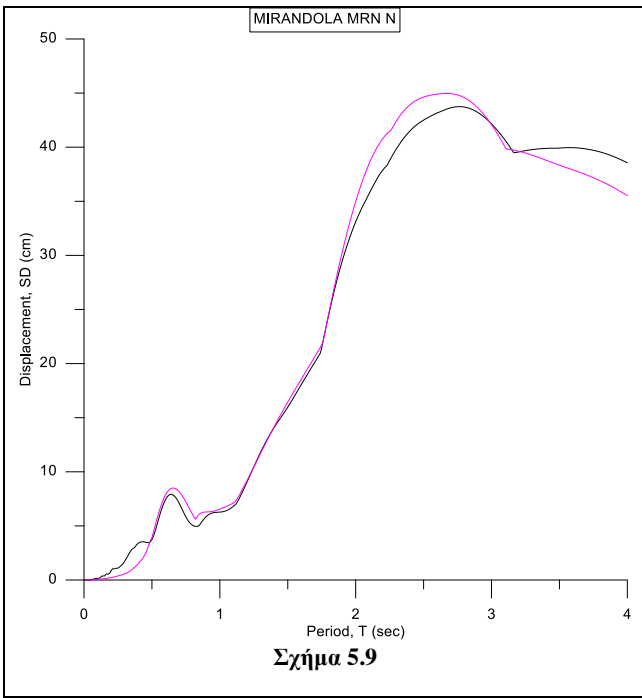
Πίνακας 5.3 Παλμικές καταγραφές και χαρακτηριστικά των παλμών

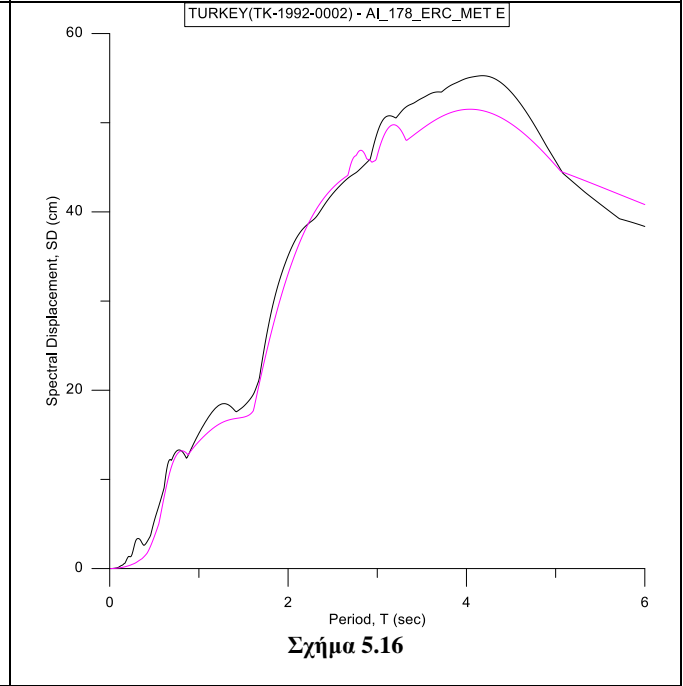
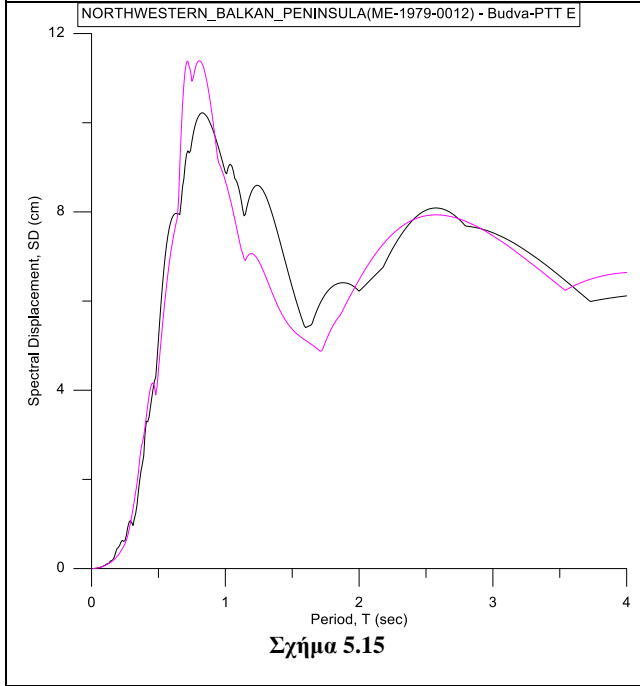
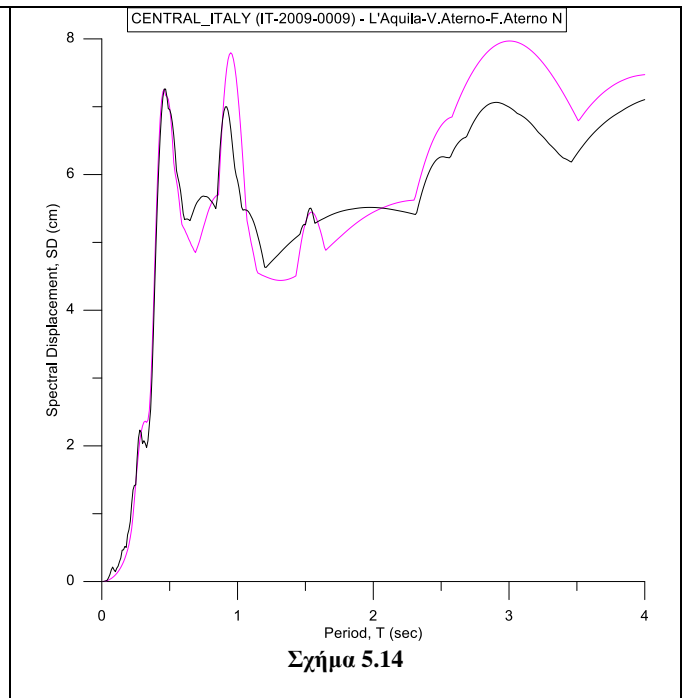
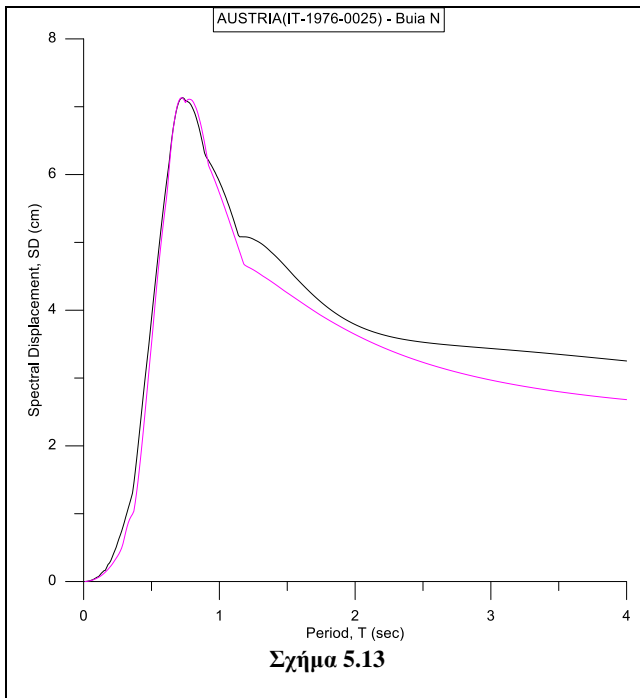


## 5.4 Ελαστικά φάσματα απόκρισης

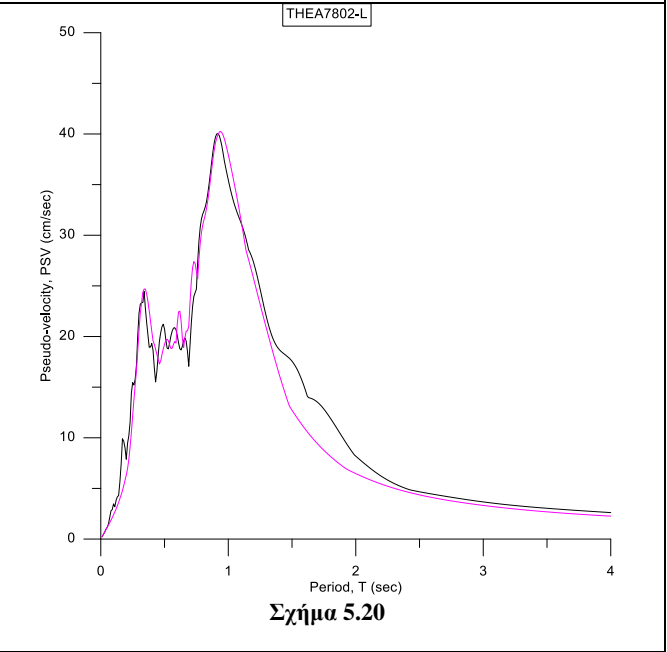
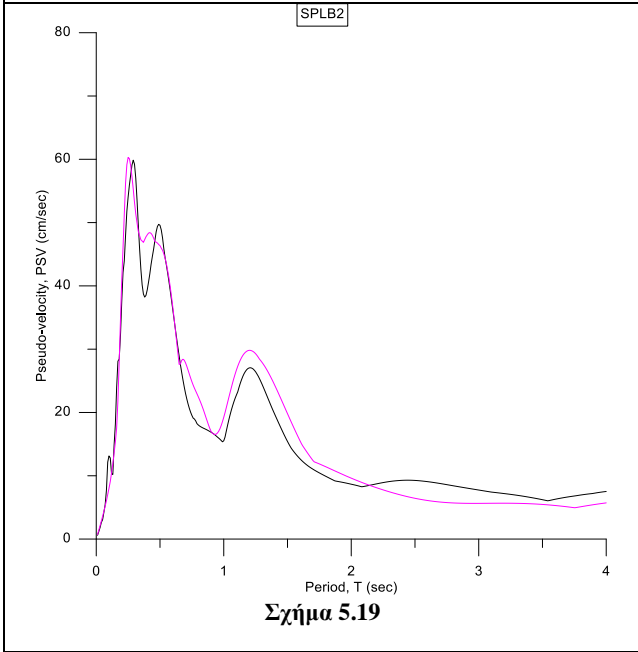
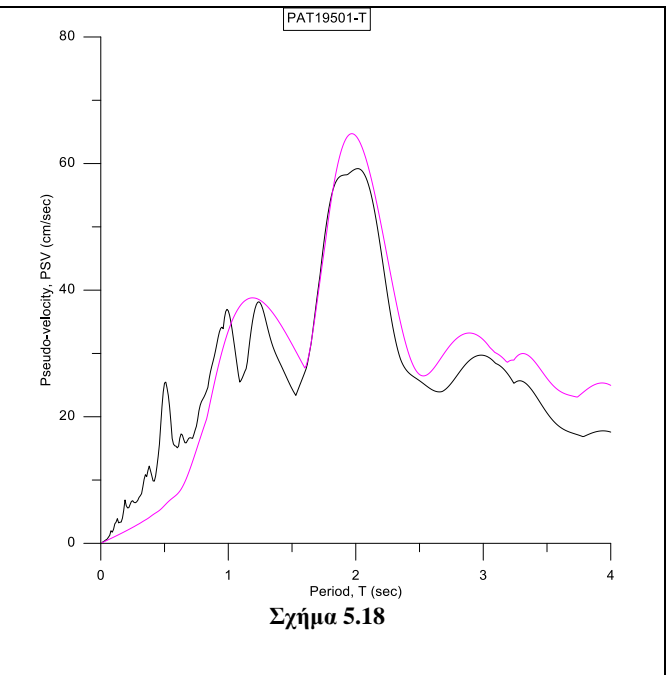
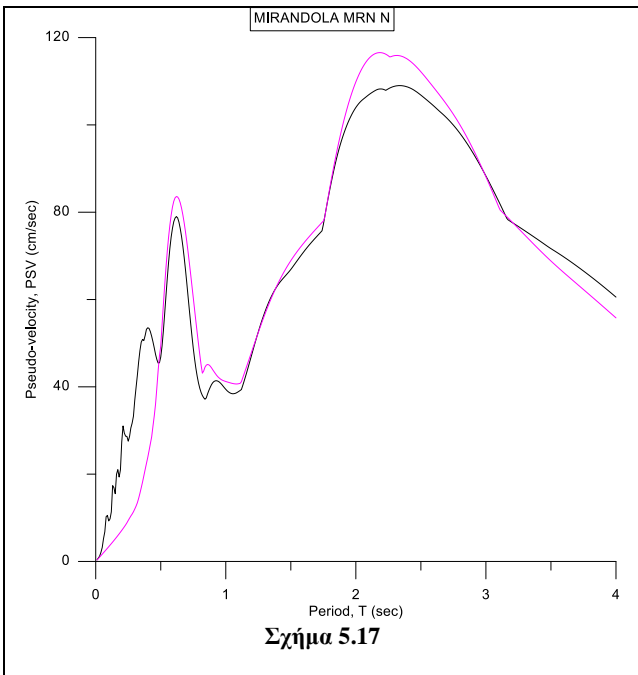
Στη συνέχεια, εξήχθησαν τα ελαστικά φάσματα απόκρισης μετακίνησης, ψευδο-ταχύτητας και ψευδο-επιτάχυνσης του προσομοιώματος με βάση το οποίο έγινε η ανάλυση των καταγραφών και έγινε σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα φάσματα απόκρισης της αρχικής καταγραφής.

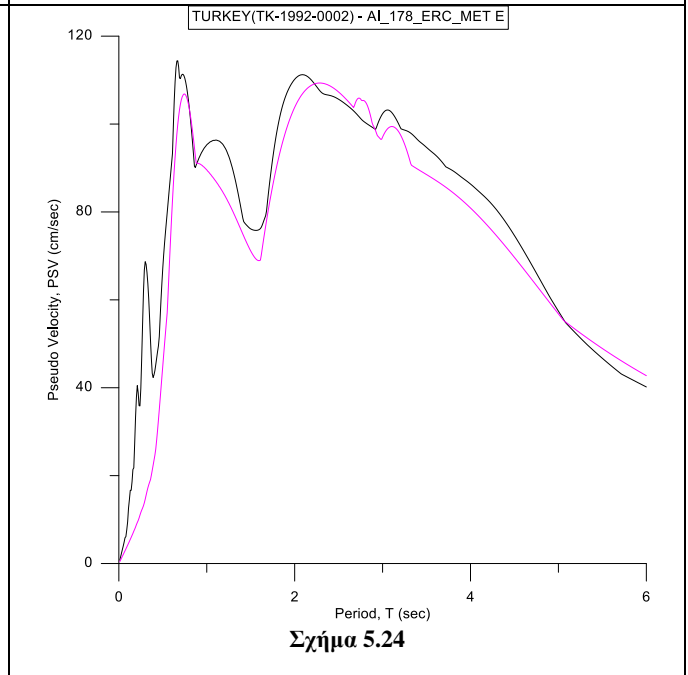
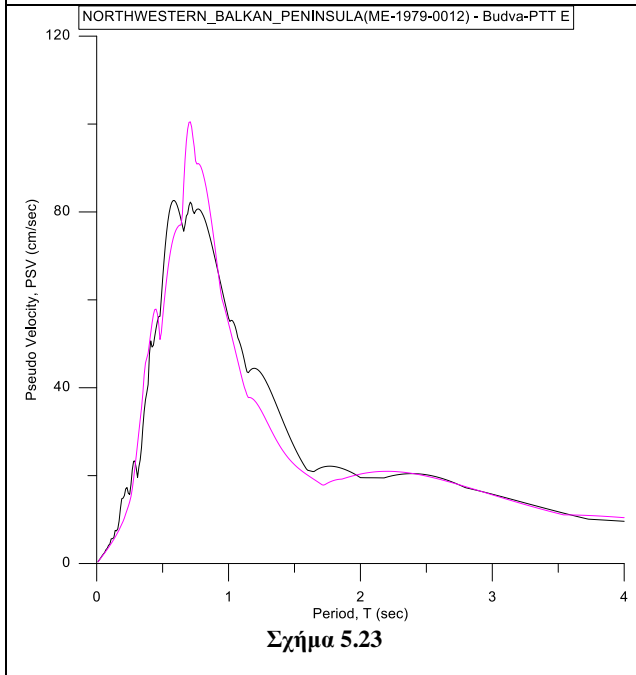
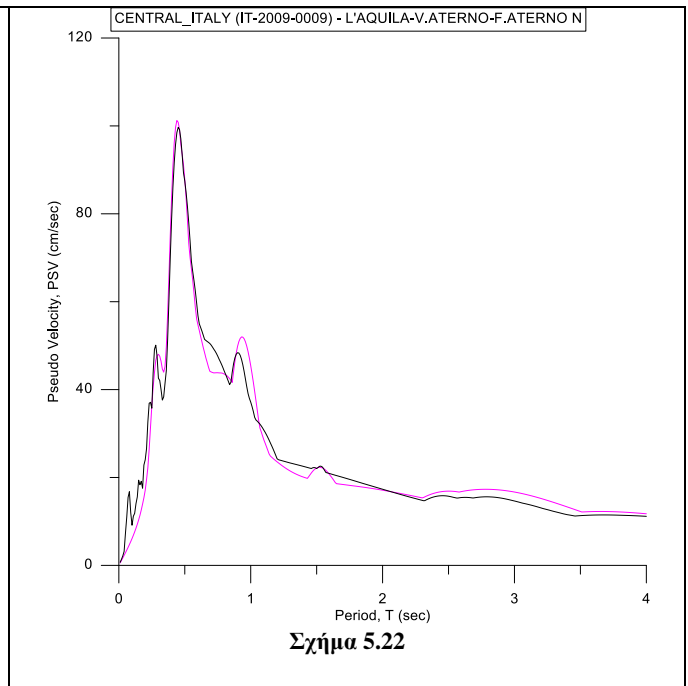
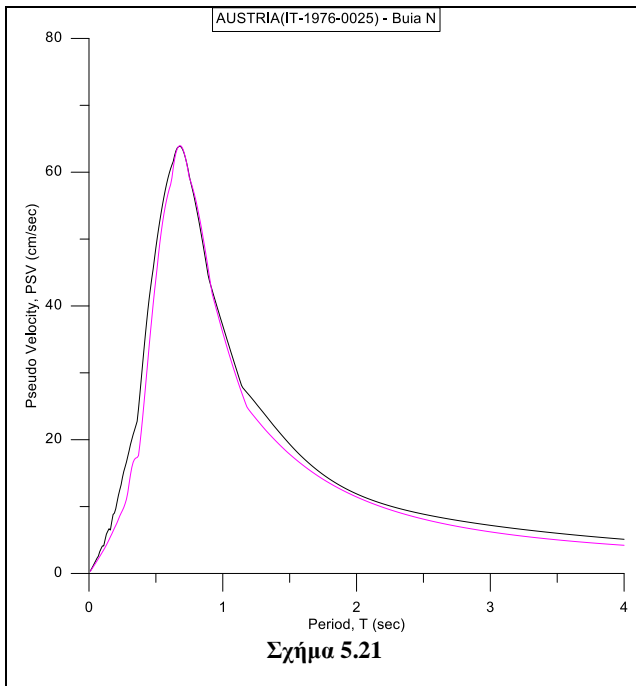
Παρακάτω, παρατίθενται ορισμένα χαρακτηριστικά διαγράμματα, όπου συγκρίνονται τα ελαστικά φάσματα απόκρισης μετακίνησης (SD) (Πίνακας 5.4), ψευδο-ταχύτητας (PSV) (Πίνακας 5.5) και ψευδο-επιτάχυνσης (PSA) (Πίνακας 5.6) της αρχικής καταγραφής με τα αντίστοιχα φάσματα που προέκυψαν από την προτεινόμενη μεθοδολογία.



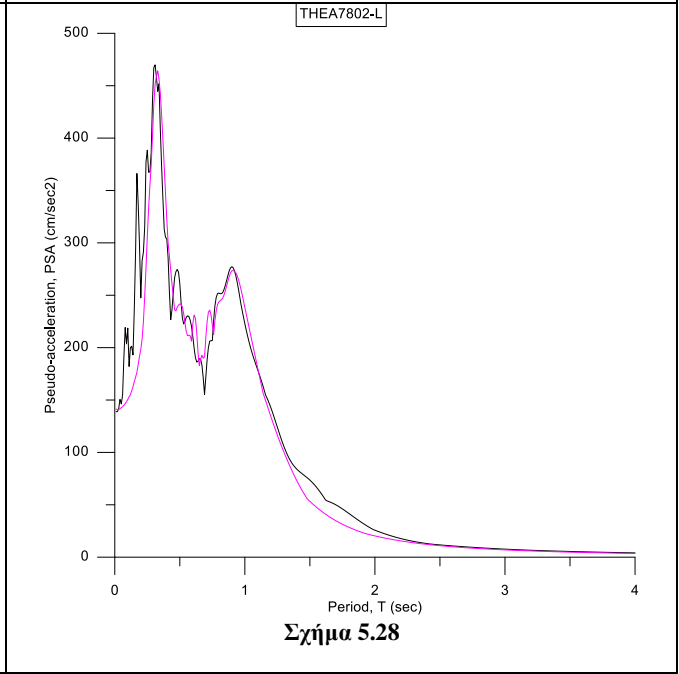
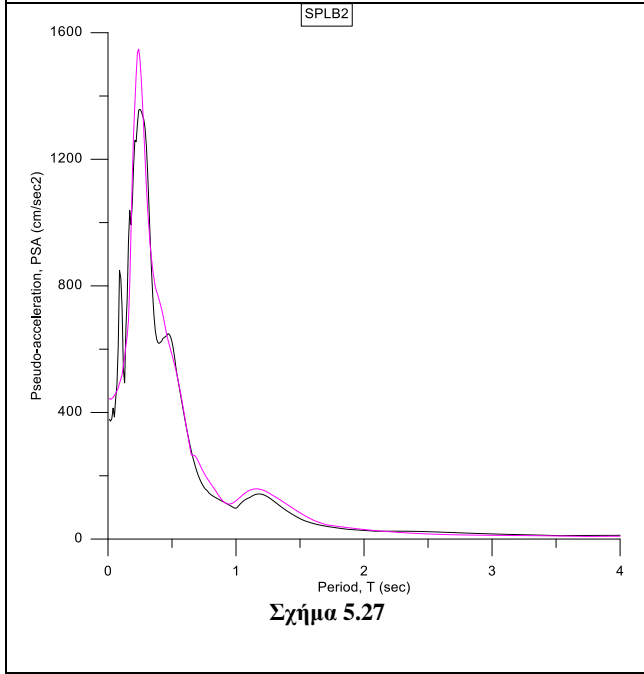
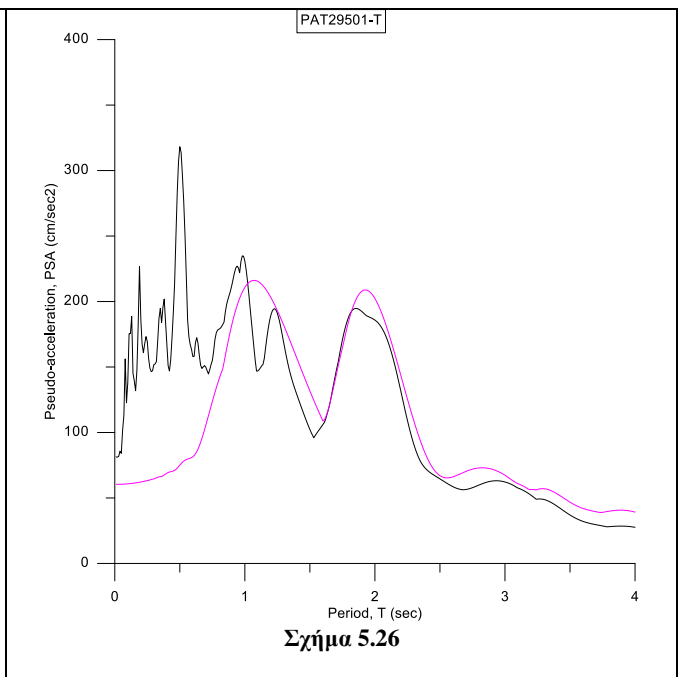
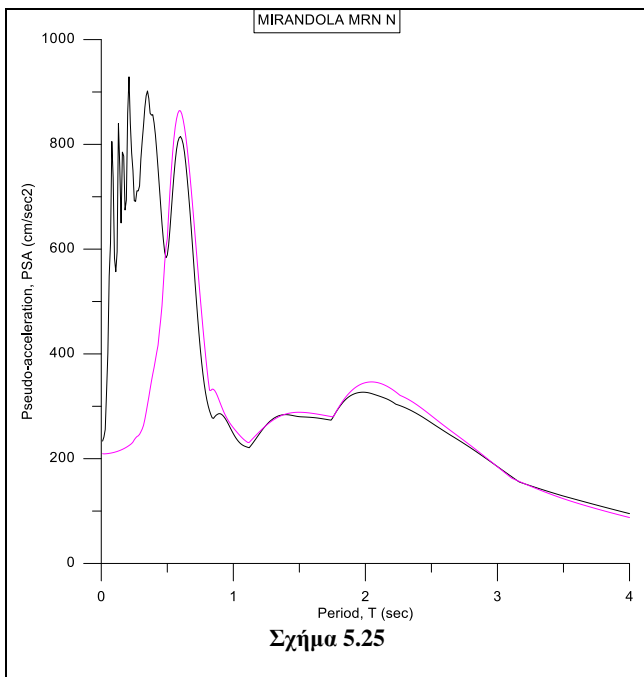


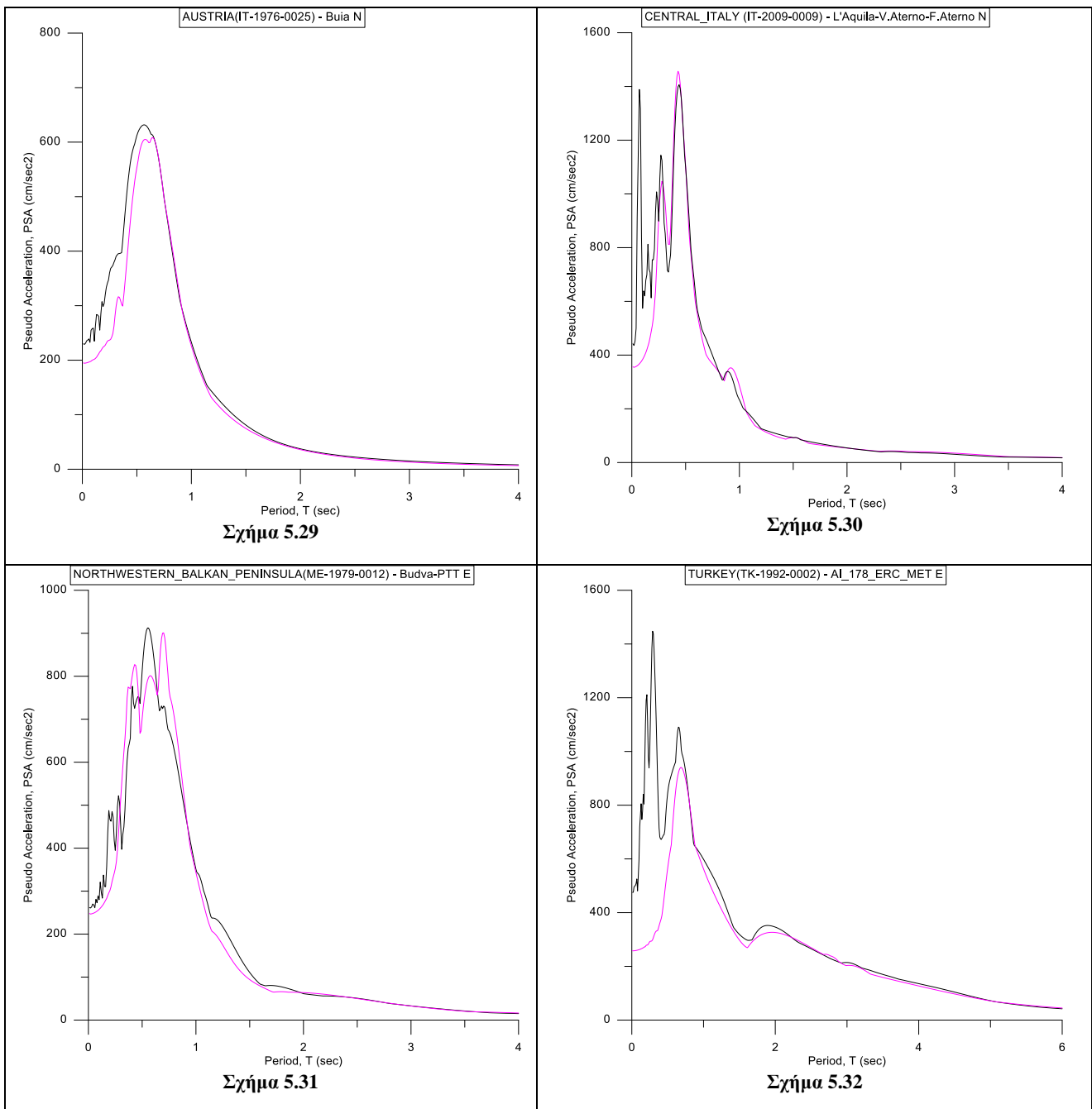
Πίνακας 5.4 Ελαστικά φάσματα απόκρισης μετακίνησης (SD) της αρχικής καταγραφής (μαύρη γραμμή) και του προσομοιώματος (ροζ γραμμή)





**Πίνακας 5.5** Ελαστικά φάσματα απόκρισης ψευδο-ταχύτητας (PSV) της αρχικής καταγραφής (μαύρη γραμμή) και της προτεινόμενης μεθοδολογίας (ροζ γραμμή)





**Πίνακας 5.6** Ελαστικά φάσματα απόκρισης ψευδο-επιτάχυνσης (PSA) της αρχικής καταγραφής (μαύρη γραμμή) και της προτεινόμενης μεθοδολογίας (ροζ γραμμή)

### 5.5 Το ενεργειακό κριτήριο ως δείκτης επιλογής των σημαντικών παλμών

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι με τους 6 παλμούς προσομοιώνουμε πολύ καλά την αρχική μας καταγραφή, όμως είναι χρονοβόρο υπολογιστικά και δεν έχει κάποια πρακτική λογική η προσομοίωση με τόσους παλμούς. Για το λόγο αυτό, για τις 91 παλμικές καταγραφές υπολογίζεται η ενέργεια (Energy flux) που εκλύει τόσο η αρχική καταγραφή, όσο και καθένας από τους 6 παλμούς, ως το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της εδαφικής ταχύτητας *CSV* (*Cumulative Squared Velocity*) στο τέλος της εδαφικής κίνησης:

$$\text{EnergyFlux} = \int_0^t v_g^2 dt \quad (5.1)$$

προκειμένου να προσδιοριστεί πόσοι παλμοί απαιτούνται, ώστε το άθροισμα των ενεργειών τους να είναι τουλάχιστον ίσο με το 70% της ενέργειας της αρχικής καταγραφής. Οι παλμοί με τους οποίους επιτυγχάνεται το ποσοστό αυτό θεωρούνται οι σημαντικότεροι. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.7 που παρουσιάζεται παρακάτω, στις περισσότερες περιπτώσεις 2-3 παλμοί είναι αρκετοί για να αγγίξουν το 70% της ενέργειας της αρχικής καταγραφής και επομένως με 2-3 παλμούς έχουμε μια αρκετά καλή προσομοίωση των φασμάτων.

FILE	SITE CLASSIFICATION EC8	Energy Flux						Event titles		
		Record	1 <sup>st</sup> pulse	2 <sup>nd</sup> pulse	3 <sup>rd</sup> pulse	4 <sup>th</sup> pulse	5 <sup>th</sup> pulse	6 <sup>th</sup> pulse	Station	Event ID
1	C	204,1195	150,5634	29,9621	8,6656	6,7587	4,4457	3,4323	Buia N	AUSTRIA(IT-1976-0025)-1976.09.11
2	B	184,2489	102,5733	51,4079	28,6654	8,8727	9,6877	5,5805	Gemona E	
3		497,3392	375,8416	45,0489	20,5354	14,5085	9,097	5,4178	Gemona N	
4		84,8981	59,4165	12,061	9,959	4,3634	3,6478	1,5117	Gemona Z	
5	B	2704,088	1939,182	803,7459	583,9815	282,1248	95,6443	63,2367	Gemona E	AUSTRIA(IT-1976-0027)-1976.09.15
6		1103,404	613,9516	292,5169	96,9443	109,9253	39,399	24,7117	Gemona N	
7		270,6556	180,6716	93,0202	14,871	16,234	15,4202	12,9363	Gemona Z	
8	B	366,5236	187,4041	105,8421	72,6625	28,2369	12,36	8,2624	Gemona E	AUSTRIA(IT-1976-0030)-1976.09.15
9	C*	458,973	252,1212	78,5643	57,64898	37,19501	47,04282	19,90006	Horta E	AZORES_ISLANDS(P T-1998-0019)-1998.07.09
10		540,0688	303,1442	124,4519	116,7668	35,2383	23,3478	18,6057	Horta N	
11	D	396,6509	195,7438	72,72516	53,64786	46,53447	10,83245	8,98824	Colfiorito E	CENTRAL_ITALY (IT-1997-0004)-1997.09.26
12		440,3567	257,9573	128,3603	34,4361	22,9447	24,2647	15,1129	Colfiorito N	
13	D	291,6636	134,5184	53,67829	30,38904	30,51516	29,89257	12,78368	Colfiorito E	CENTRAL_ITALY (IT-1997-0006)-1997.09.26
14		404,7649	211,3537	123,3213	31,1061	31,2435	20,6937	21,0958	Colfiorito N	
15	E	326,44	144,772	47,0079	61,9986	32,3349	24,0176	24,3487	Nocera Umbra N	
16		124,5981	77,3486	14,7423	6,3947	7,7648	5,3768	5,5069	Nocera Umbra Z	
17	C*	615,4562	335,1851	77,2126	47,4516	40,7493	46,8962	21,5807	AQUILA CASTELLO N	CENTRAL_ITALY (IT-2009-0009)-2009.04.06
18		278,8212	144,7933	52,0885	37,3152	12,2901	13,6324	10,5644	AQUILA CASTELLO Z	
19	B	1356,308	602,9508	272,635	151,5758	119,1963	92,9373	76,5648	L'AQUILA-V.ATERNO-AQUIL PARK ING. E	
20		1434,356	705,3813	176,5024	151,2332	121,4127	100,5136	45,0717	L'AQUILA-V.ATERNO-AQUIL PARK ING. N	
21	B	864,3852	371,7854	95,9446	96,243	85,7288	69,634	42,0386	L'AQUILA-V.ATERNO-CENTRO VALLE E	
22		553,7795	223,5393	37,9955	54,6456	44,9332	44,8707	41,1171	L'AQUILA-V.ATERNO-CENTRO VALLE N	
23	B	674,8773	314,0141	91,1131	81,1129	36,0038	27,0283	22,9318	L'AQUILA-V.ATERNO-COLLE GRILLI E	
24		567,0763	269,6901	86,9434	83,3996	36,4941	23,5377	22,5456	L'AQUILA-V.ATERNO-COLLE GRILLI N	
25	B	381,542	232,3533	18,59807	32,84474	18,37394	12,16753	3,24751	L'AQUILA-	



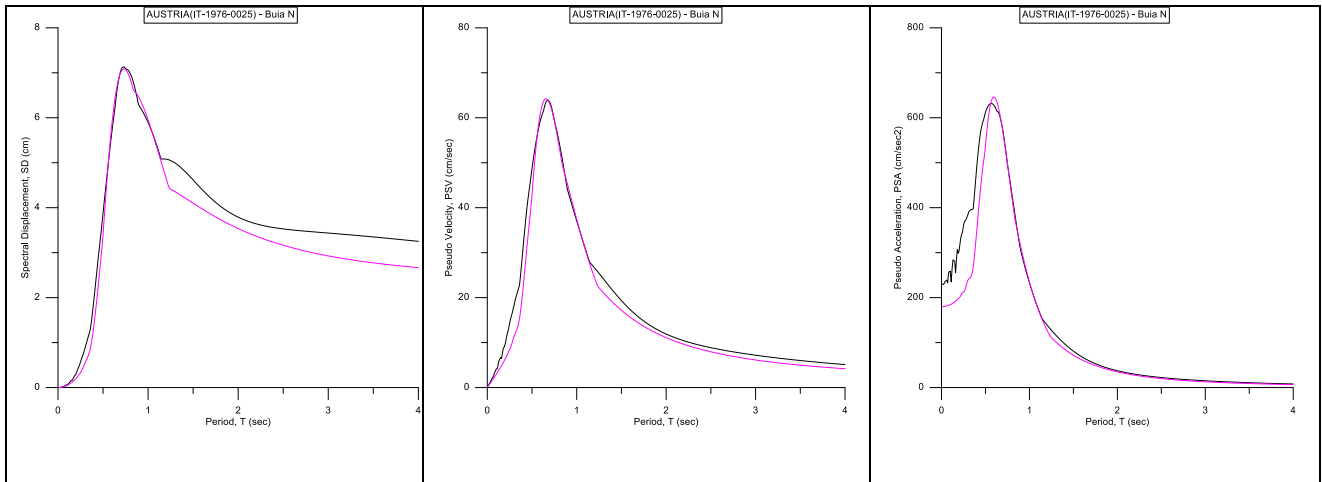
									V.ATERNOF.ATERNOE	
									L'AQUILA-V.ATERNOF.ATERNON	
26		426,452	183,0378	73,8388	35,2912	29,6503	30,4366	27,1336		
27	B*	3760,943	2065,978	469,9747	379,3417	291,349	197,827	186,4744	Bar-Skupstina E	NORTHWESTERN_BALKAN_PENINSULA (ME-1979-0003)-1979.04.15
28		2751,131	1290,598	446,6182	170,4812	157,5265	140,4951	161,3018	Bar-Skupstina N	
29	B*	557,9596	252,8596	107,7522	73,5598	55,2158	39,0612	27,4875	Budva-PTT E	NORTHWESTERN_BALKAN_PENINSULA (ME-1979-0012)-1979.05.24
30		279,1534	130,1873	90,0379	25,5559	11,0981	8,5423	7,0462	Budva-PTT N	
31	A*	7761,252	6507,323	773,907	220,8896	321,7196	117,5277	77,07033	Bam E	SOUTHERN_IRAN(IR-2003-0041)-2003.12.26
32		3265,537	2496,197	334,856	102,6201	136,2385	126,3066	75,2302	Bam N	
33		1170,178	543,555	286,9473	83,7734	65,9021	83,5068	47,5729	Bam Z	
34	B	4288,016	2122,884	589,8436	406,5589	466,4129	190,8224	172,7651	AI_178_ERC_MET E	TURKEY(TK-1992-0002)-1992.03.13
35		7125,298	5296,89	547,8887	423,0855	364,5903	67,5612	60,3849	AI_178_ERC_MET N	
36	A	1560,673	977,282	246,7972	120,1548	68,9394	57,3095	42,4217	AI_004_IZT E	TURKEY(TK-1999-0077)-1999.08.17
37		288,1962	145,4675	53,6999	32,5371	25,1772	18,8107	15,8225	AI_004_IZT Z	
38	A	63,0938	34,6319	20,9671	9,7910	1,5845	2,1547	1,1673	AI_004_IZT E	TURKEY(TK-1999-0294)-1999.09.13
39	A	3344,221	2077,676	348,4811	308,3031	251,0104	210,9789	118,1276	AI_199_TPT E	
40	C	14194,33	10328,64	2420,972	1294,304	694,4488	694,4488	718,1307	AI_011_DZC E	TURKEY(TK-1999-0415)-1999.11.12
41		10406,68	6671,08	3456,246	1180,088	1103,019	729,1008	886,1375	AI_011_DZC N	
42		1340,818	903,4415	331,5238	199,4854	158,8952	102,9078	81,6228	AI_011_DZC Z	
43	B	294,3202	243,2186	35,3731	28,1946	15,2753	7,866	6,1107	AI_156_VO N	TURKEY(TK-1999-0431)-1999.11.12
44	B	752,1211	297,7662	164,475	93,0621	89,709	59,5196	41,0429	AI_049_BNG N	TURKEY(TK-2003-0038)-2003.05.01
45	C*	568,9197	341,8502	44,9891	60,7174	36,2753	23,0645	14,6360	MIRE E (MIRANDOLA)	NORTHERN_ITALY (IT-2012-0011) Emilia-Romagna 2012.05.29
46		1974,080	1308,89	228,1529	211,9936	54,9475	66,4679	42,4863	MIRE N (MIRANDOLA)	
47	C*	432,3271	325,8571	48,2953	16,7018	16,0724	19,1001	9,9489	MIRH E (MIRANDOLA)	
48		2110,435	1632,496	183,0963	177,9985	126,0149	34,9752	51,6366	MIRH N (MIRANDOLA)	
49	C	592,537	374,3479	42,4575	61,7735	39,6580	24,7523	13,7012	MIRANDOLA E	
50		1950,187	1284,279	215,4192	216,4152	59,8950	64,7273	49,3803	MIRANDOLA N	
51	C*	464,0597	273,6545	106,4013	42,7117	62,8732	24,0750	14,0406	SAN FELICE SUL PARANO E	
52		927,1278	674,392	120,7125	98,6706	45,5523	34,2179	31,6434	SAN FELICE SUL PARANO N	
53	C*	395,311	184,6742	100,0258	56,5369	50,9286	10,7097	19,3371	T0800 E (FINALE EMILIA)	
54	C*	402,8807	185,4041	57,5463	42,1208	31,8088	22,1501	23,5641	T0802 E (SAN FELICE SUL PARANO)	
55		465,3413	171,3353	94,9653	74,9762	47,3908	37,1843	35,2638	T0802 N (SAN FELICE SUL PARANO)	
56	C*	344,464	140,283	64,2287	44,1404	12,9718	11,8626	13,9420	T0813 N (SAN FELICE SUL PARANO)	

57	C*	1217,927	543,0273	262,5885	171,2471	147,2614	91,3786	72,3750	T0818 N (CONCORDIA SULLA SECCHIA)	
58	C*	971,1698	444,0787	199,0414	90,6794	73,2602	99,6772	52,5049	MEDOLLA E	
59		2516,178	1994,434	121,4276	66,8886	41,4569	68,7297	59,6925	MEDOLLA N	
60	C*	894,8089	645,6959	141,0477	52,1687	56,6636	25,8245	14,8077	MIRANDOLA MRN E	
61		2084,317	1446,05	249,7729	134,0180	84,2408	77,5981	63,0855	MIRANDOLA MRN N	
62	C*	1089,763	480,1787	267,9064	131,5474	67,6286	62,6938	32,5877	GAVELLO E	
63	C*	1267,501	581,0096	162,3579	218,7885	95,8952	52,9443	57,8959	QUARANTOLI 2 N	
64	B	535,2179	214,1719	109,3725	93,0849	36,8825	33,4212	26,2622	KAL18601-L	KALAMATA (GREECE) 1986.09.13
65	B	154,0109	117,4807	18,015	16,3966	11,3417	8,2045	6,1919	KAL18608-L	KALAMATA (GREECE) 1986.09.15
66	B	46,9071	30,0862	5,1657	4,3582	4,2677	2,7058	1,714	KAL28602-L	
67		182,0567	164,6263	17,7804	11,5152	7,8249	4,9229	4,3266	KAL28602-T	
68	B	97,1522	76,7154	6,3966	2,8486	2,8156	2,529	1,2619	KON19601-L	KONITSA (GREECE) 1996.08.05
69		97,1522	76,7154	6,3966	2,8486	2,8156	2,529	1,2619	KON19601-T	
70	C	130,5582	112,8563	14,0128	7,6823	3,9482	3,6895	2,5915	KON29601-L	
71		171,9059	104,3045	45,844	13,5946	4,5257	3,0293	2,377	KON29601-T	
72		69,6407	52,1154	10,1323	3,5918	1,3418	1,3358	1,4634	KON29601-V	
73	C	27,2488	12,1666	4,3574	2,0547	1,4344	1,4971	1,6142	PYR19308-L	PYRGOS (GREECE) 1993.03.26
74		104,5043	63,8733	13,7617	11,1411	4,2032	6,5634	2,2448	PYR19308-T	
75	A	434,2301	363,5253	68,6758	32,6477	4,9302	11,2801	5,9429	ARG2- 20140203 N	KEFALLONIA (GREECE) 2014.02.03
76	A	11573,65	9452,875	1590,015	450,5848	236,0768	98,3239	95,3556	LXR1- 20140203 E	
77		4361,253	2828,657	549,8135	274,5119	327,0268	222,4876	143,294	LXR1- 20140203 N	
78	B	508,6089	420,8115	39,68	15,1084	22,7104	11,9865	10,2427	AIGA9501-T	AEGION (GREECE) 1995.06.15
79	C	584,3469	294,9891	94,2205	83,7781	83,301	40,3344	51,7278	PAT29501-T	
80	C	6574,993	4534,963	3123,393	457,1006	407,9524	428,7711	401,089	VAS2_201511 170710-NS	LEFKADA (GREECE) 2015.11.17
81	C	103,0142	64,5731	8,4928	9,0933	9,9298	7,7744	4,3572	THEA7802-L	THESSALONIKI (GREECE) 1978.06.20
82	B	133,2197	64,0736	24,102	12,5979	9,2767	12,9527	5,604	KRR19501-L	KOZANI (GREECE) 1995.05.19
83	B	100,9113	60,932	13,4122	8,7647	6,3081	5,3724	3,216	ATH39901-L	ATHENS (GREECE) 1999.09.07
84	A	58,928	26,3349	13,337	11,8286	4,9711	1,8162	1,0492	SGMA9901-L	
85	A	55,4506	29,4756	11,1816	7,0636	8,364	6,4089	4,3094	SGMA9901-T	
86	B	126,7282	55,5581	28,9626	15,1901	12,6209	8,1236	4,1184	SPLB9901-L	
87	B	53,4539	37,8002	16,3881	7,1689	5,0416	2,134	2,9187	FIX1	
88	A	58,0125	30,7303	10,4314	4,4226	4,0038	4,9658	2,6605	SMA2	
89	B	82,615	50,4548	13,5891	5,7259	5,4461	8,9945	3,5761	SPLA1	
90	B	110,3374	57,5358	13,782	16,9137	12,9885	1,9964	9,5314	SPLB1	
91	B	169,1286	80,6004	23,4303	25,3592	19,7312	12,6003	7,272	SPLB2	

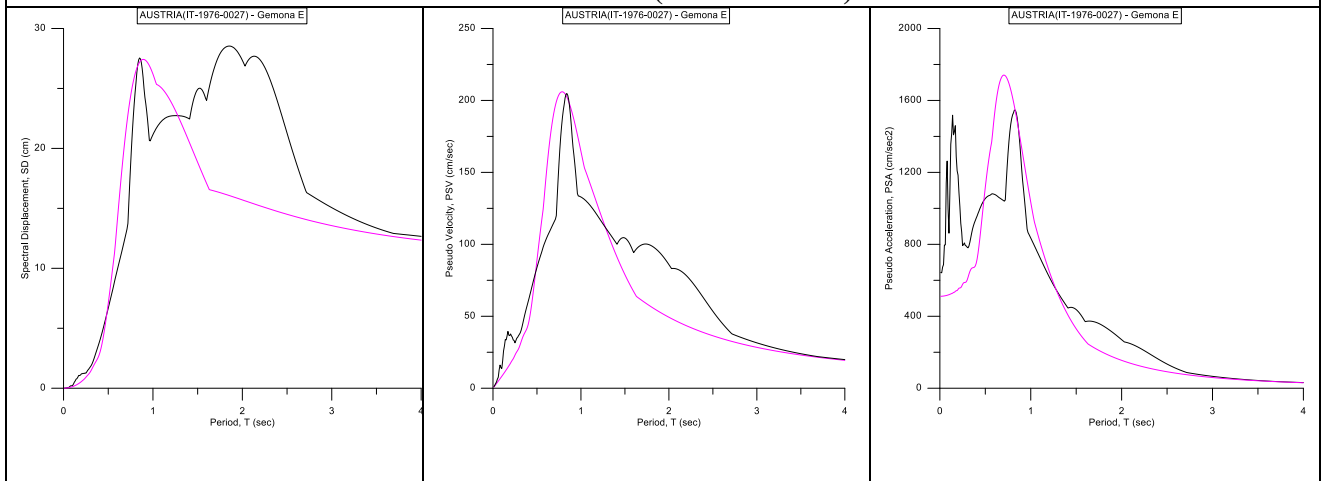
**Πίνακας 5.7** Ενέργειες (cm<sup>2</sup>/sec) της αρχικής καταγραφής και των επιμέρους παλμών (με κίτρινο χρώμα σημειώνονται οι παλμοί που συμπληρώνουν αθροιστικά ποσοστό ενέργειας ίσο ή μεγαλύτερο του 70% της συνολικής ενέργειας)

Για ορισμένες περιπτώσεις του παραπάνω πίνακα, όπου το πολύ δύο παλμοί συμπληρώνουν το 70% της συνολικής ενέργειας της καταγραφής παρουσιάζονται ακολούθως τα ελαστικά φάσματα

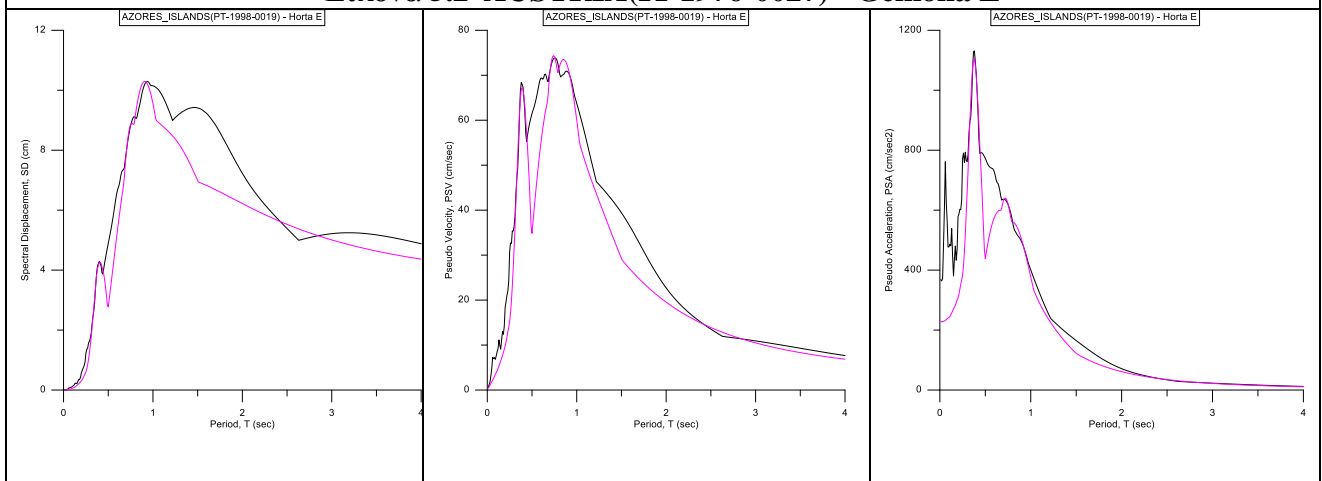
απόκρισης μετατόπισης (SD), ψευδο-ταχύτητας (PSV) και ψευδο-επιτάχυνσης (PSA) της αρχικής καταγραφής και του προσομοιώματος για έναν έως δύο παλμούς.



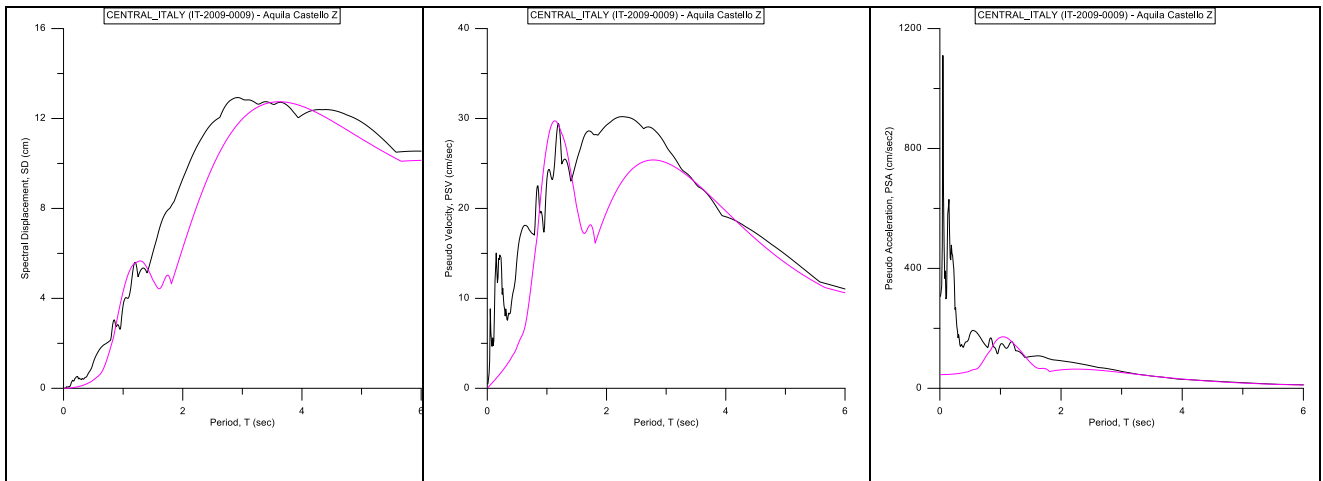
**Εικόνα 5.1 AUSTRIA(IT-1976-0025) - Buia N**



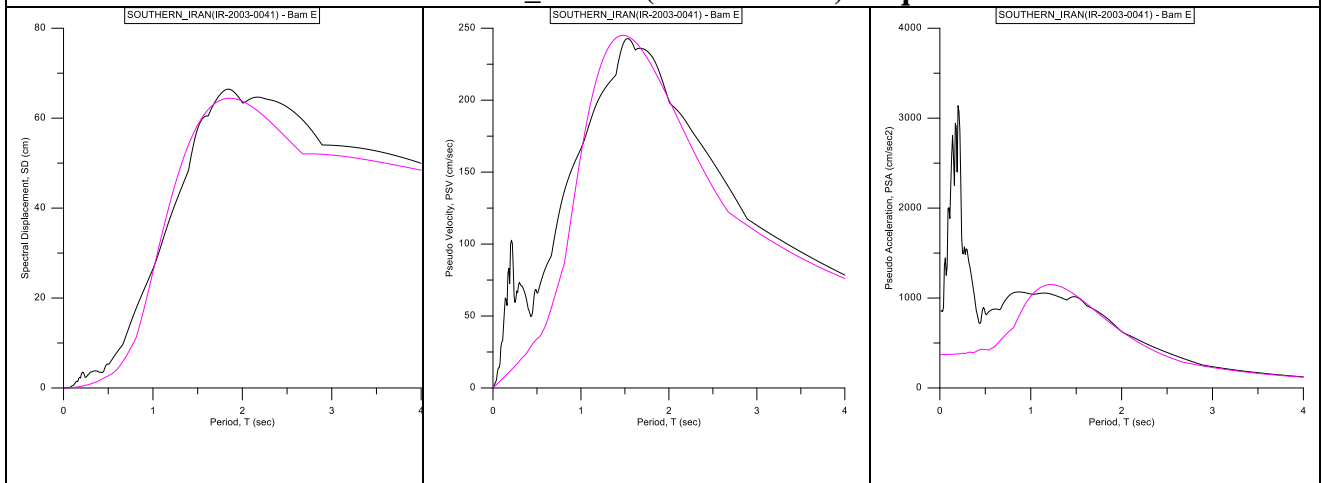
**Εικόνα 5.2 AUSTRIA(IT-1976-0027) - Gemona E**



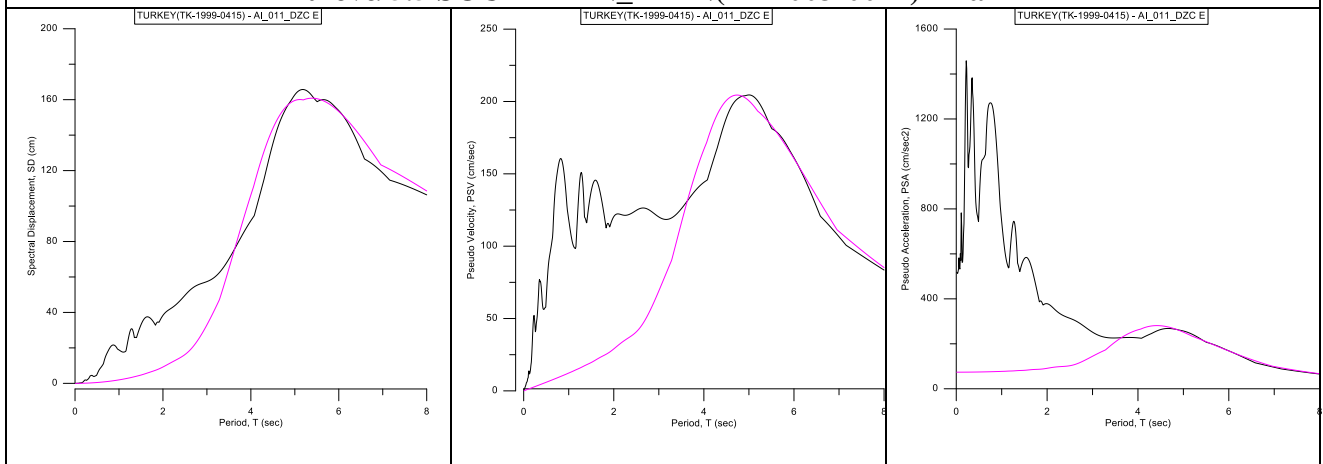
**Εικόνα 5.3 AZORES\_ISLANDS(PT-1998-0019) - Horta E**



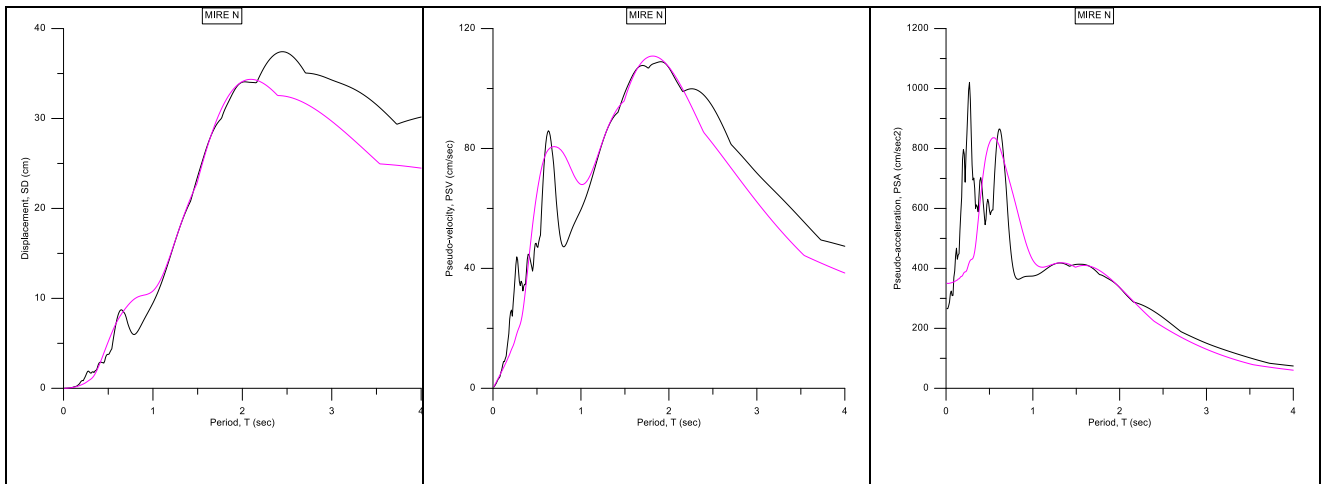
**Εικόνα 5.4 CENTRAL\_ITALY (IT-2009-0009) - Aquila Castello Z**



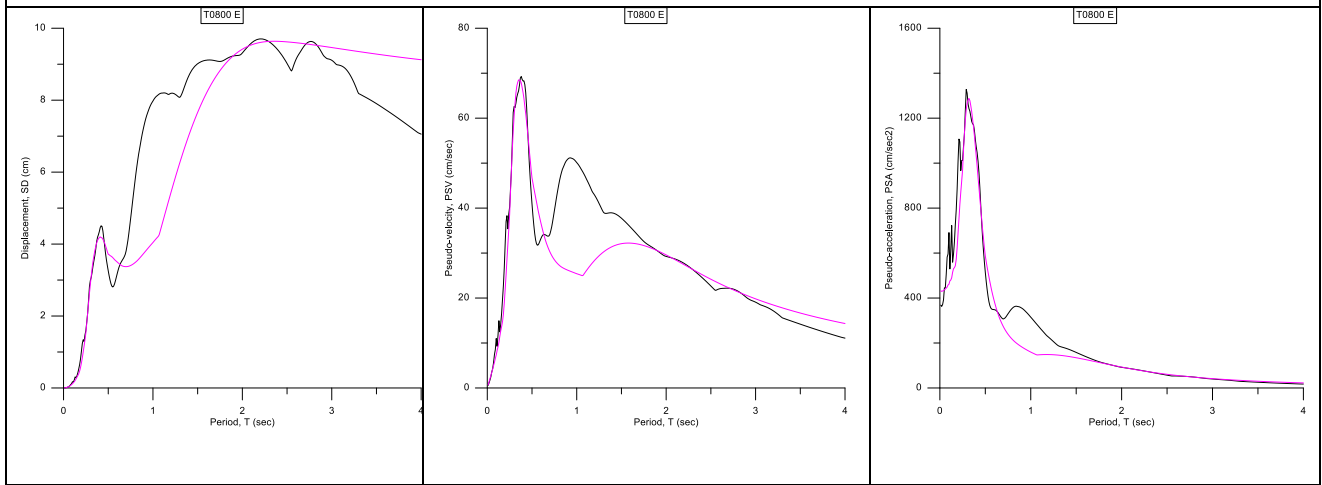
**Εικόνα 5.5 SOUTHERN\_IRAN(IR-2003-0041) - Bam E**



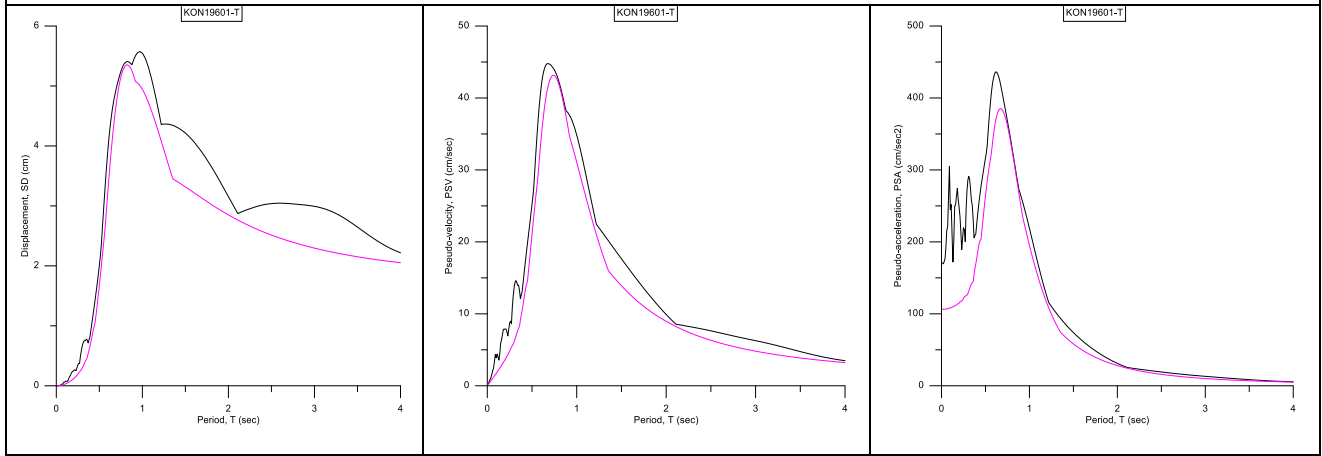
**Εικόνα 5.6 TURKEY(TK-1999-0415) - AI\_011\_DZCE**



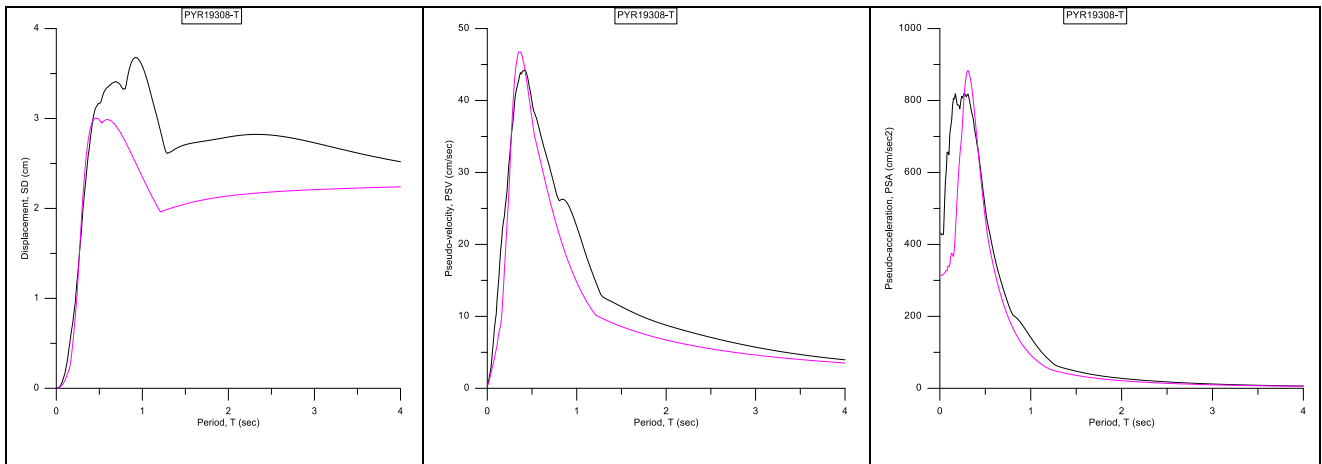
**Εικόνα 5.7 MIRE N**



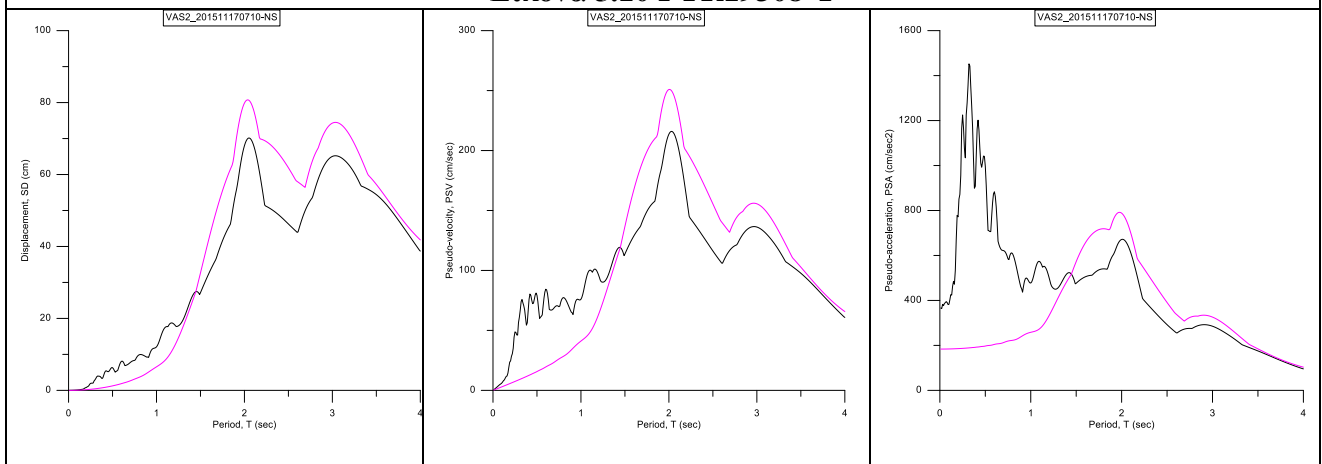
**Εικόνα 5.8 T0800 E**



**Εικόνα 5.9 KON19601-T**



Εικόνα 5.10 PYR19308-T



Εικόνα 5.11 VAS2\_201511170710-NS

Πίνακας 5.8 Ελαστικά φάσματα απόκρισης μετακίνησης (SD), ψευδο-ταχύτητας (PSV) και ψευδο-επιτάχυνσης (PSA) της αρχικής καταγραφής (μαύρη γραμμή) και του προσομοιώματος για έναν έως δύο παλμούς (ροζ γραμμή)

## 5.6 Ανελαστικά φάσματα απόκρισης

Όσον αφορά τα ελαστικά φάσματα απόκρισης, οι παλμοί κατευθυντικότητας προκαλούν μία επαύξηση κωδωνοειδούς μορφής στα φάσματα μετακινήσεων, με κέντρο την περίοδο του παλμού  $T_P$  (Shahi & Baker (2011)). Στην περίπτωση των ανελαστικών φασμάτων, για περιόδους μικρότερες από τη μισή περίοδο του παλμού, οι απαιτήσεις πλαστιμότητας είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Για να προσδιοριστούν οι απαιτήσεις αυτές, μελετήθηκε η ανελαστική απόκριση μονοβάθμιων συστημάτων στις 91 παλμικές μας καταγραφές.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, εξετάστηκε η απόκριση ενός μονοβάθμιου συστήματος σε όλο το εύρος ιδιοπεριόδων. Δημιουργήθηκε δηλαδή, ένα διγραμμικό μοντέλο με σταθερό συντελεστή συμπεριφοράς  $q_y=4$ , ελαστικό-τελείως πλαστικό και λόγο ιξώδους απόσβεσης 5%. Για τον προσδιορισμό του σημείου διαρροής κάθε μονοβάθμιου, διαιρείται το φάσμα επιταχύνσεων της καταγραφής με  $q_y=4$  και προκύπτει η επιτάχυνση διαρροής για κάθε ιδιοπερίοδο:

$$SA_y(T) = \frac{SA(T)}{q_y} \quad (5.2)$$

όπου  $SA_y$  η επιτάχυνση διαρροής και  $SA$  η ελαστική φασματική επιτάχυνση της καταγραφής για κάθε περίοδο  $T$ .

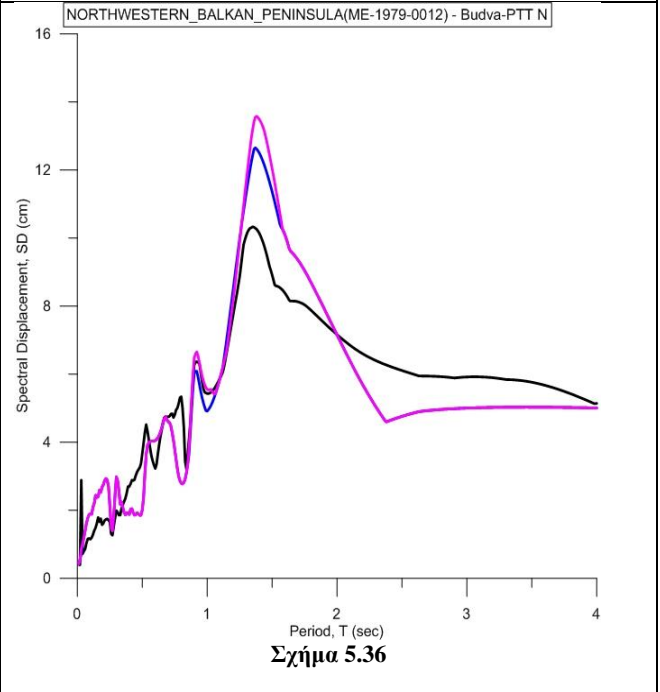
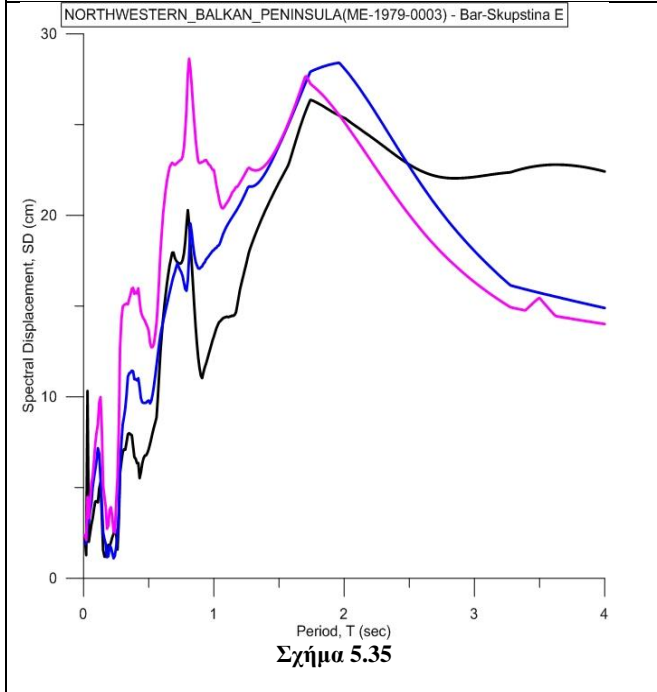
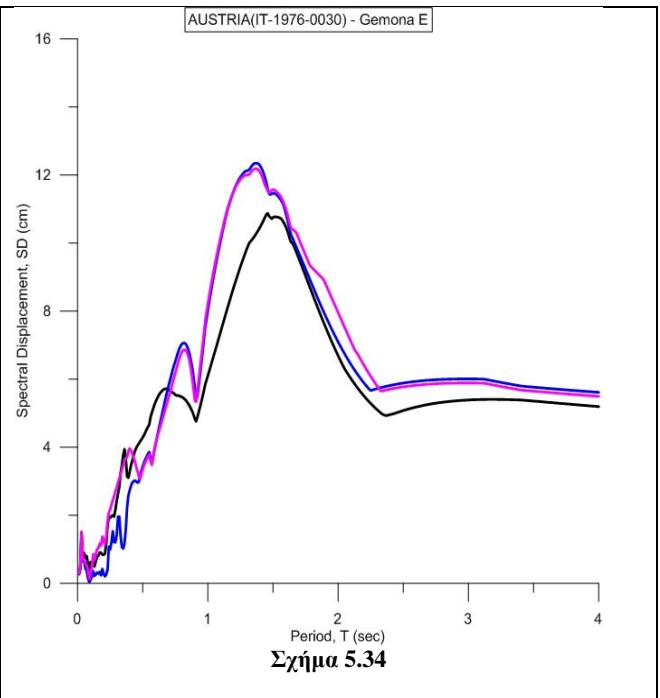
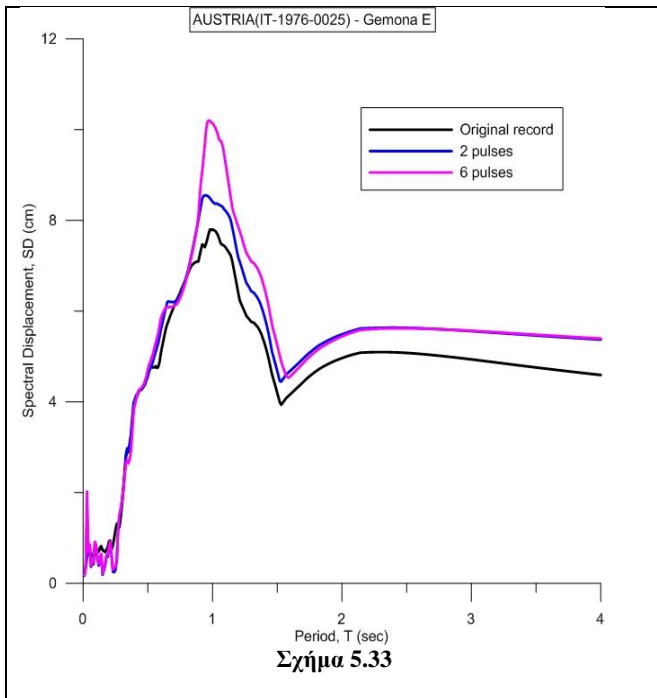
Η αντίστοιχη μετακίνηση διαρροής υπολογίζεται από τη γνωστή σχέση:

$$SD_y(T) = SA_y(T) \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \quad (5.3)$$

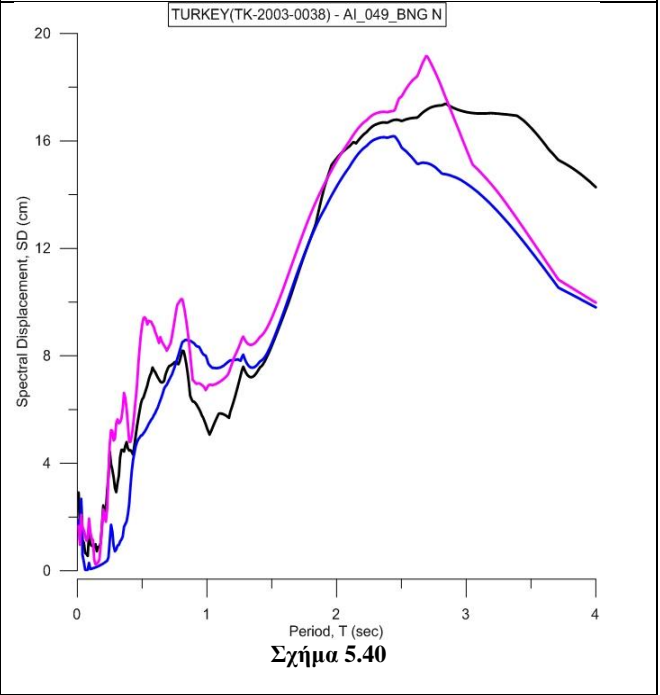
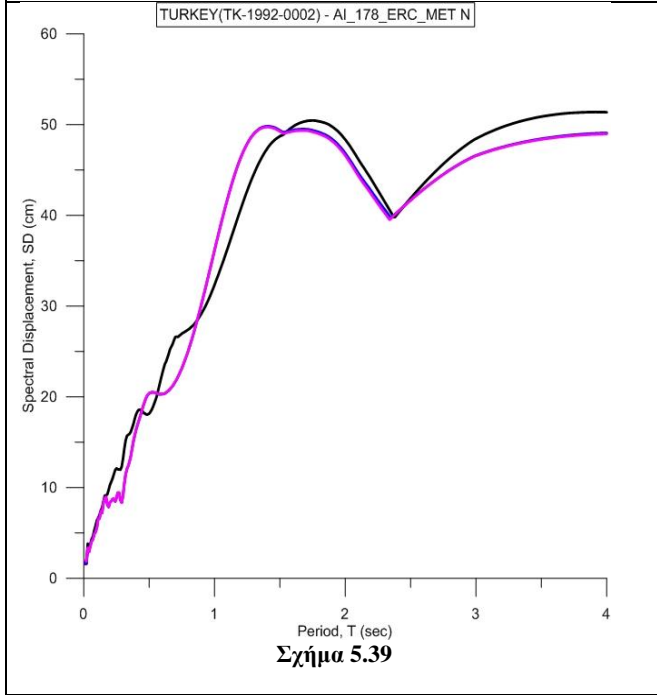
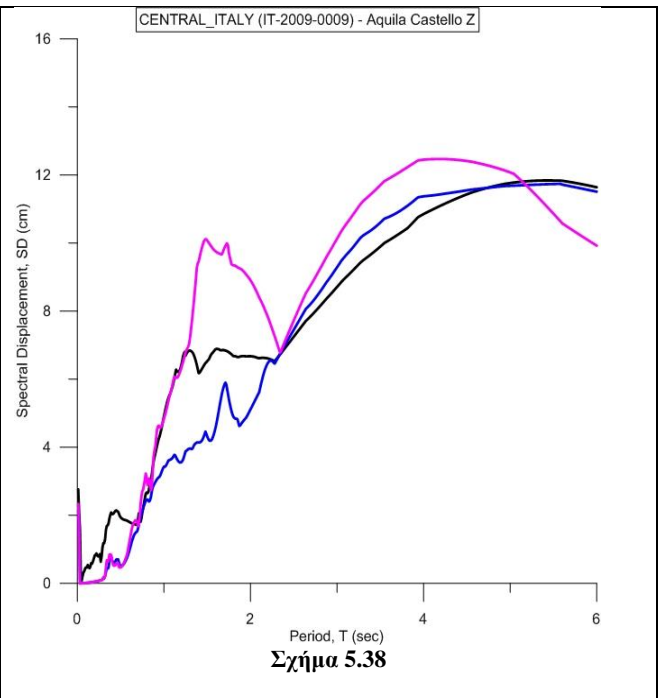
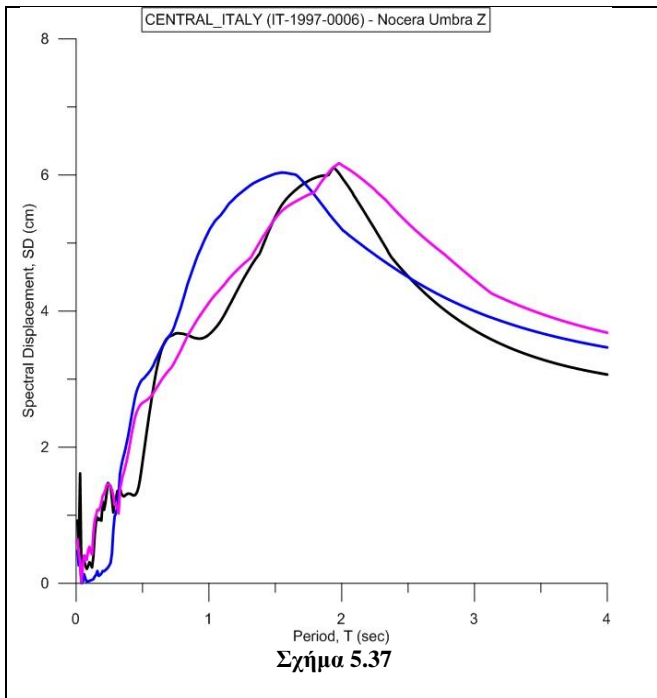
Με τη διαδικασία αυτή, για κάθε καταγραφή, έχει δημιουργηθεί το ανελαστικό φάσμα επιταχύνσεων  $SA_{in}$  (cm/sec<sup>2</sup>). Για τη δημιουργία του ανελαστικού φάσματος μετακινήσεων  $SD_{in}$  (cm), το κάθε μονοβάθμιο σύστημα διεγείρεται στη βάση του με το επιταχυνσιογράφημα της εδαφικής καταγραφής και με χρονική ανελαστική ανάλυση προκύπτουν οι ανελαστικές μετακινήσεις για κάθε τιμή της περιόδου.

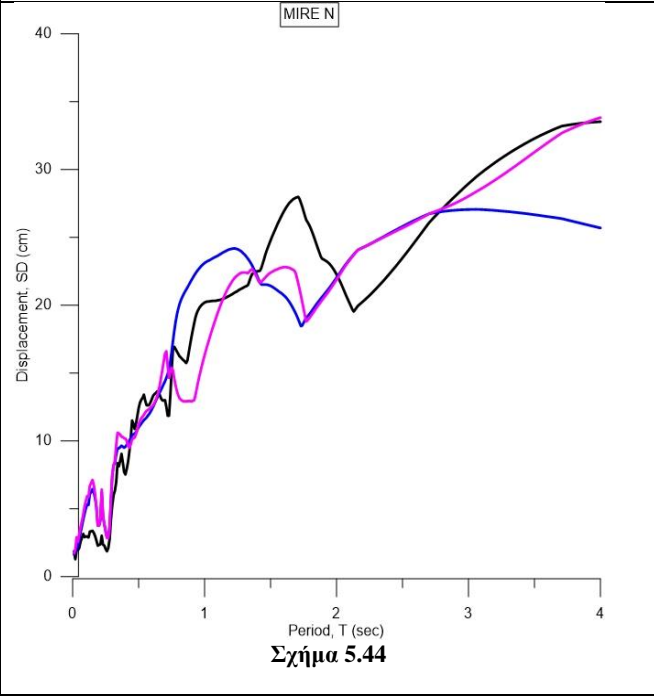
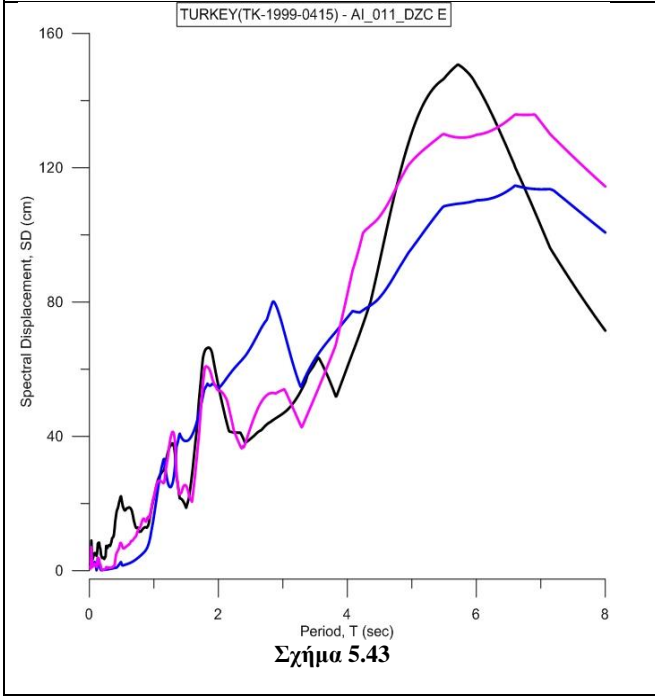
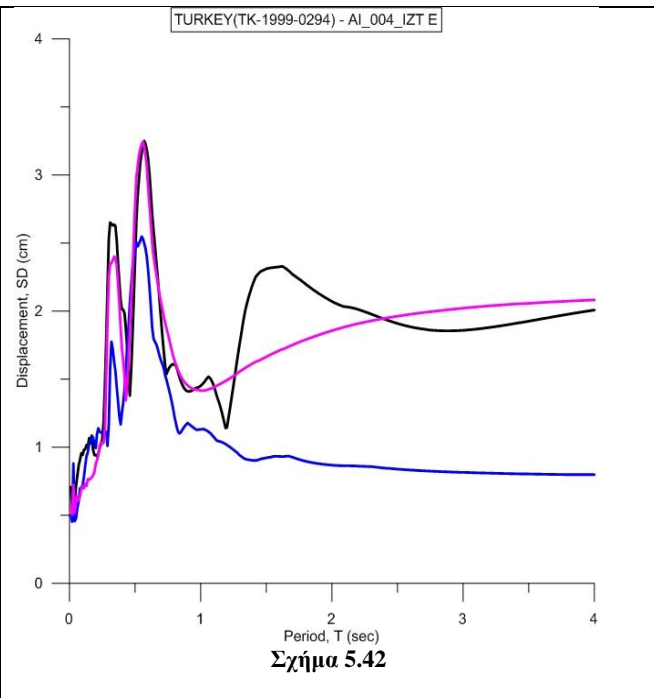
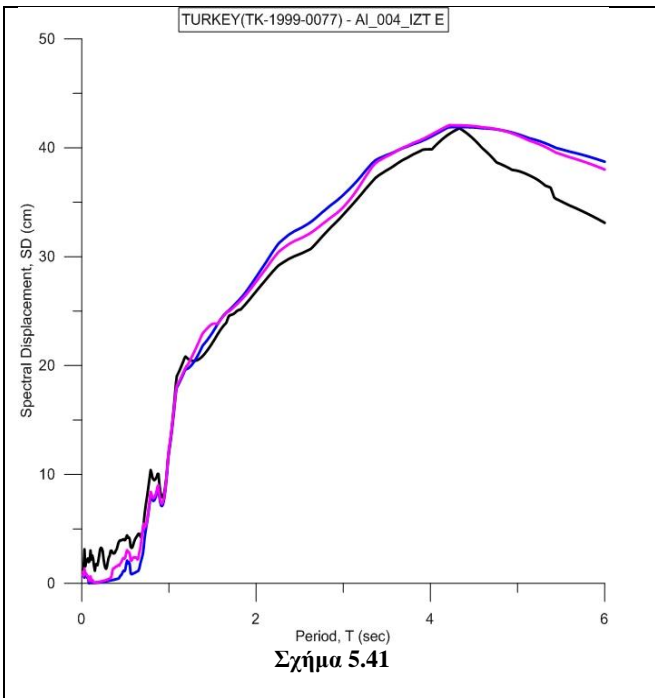
Οι παλμοί εξετάστηκαν, όπως και πριν αθροιστικά. Για να προσδιοριστούν τα ανελαστικά φάσματα μετακινήσεων, ως διέγερση του μονοβάθμιου χρησιμοποιείται το επιταχυνσιογράφημα του απαιτούμενου αθροίσματος παλμών.

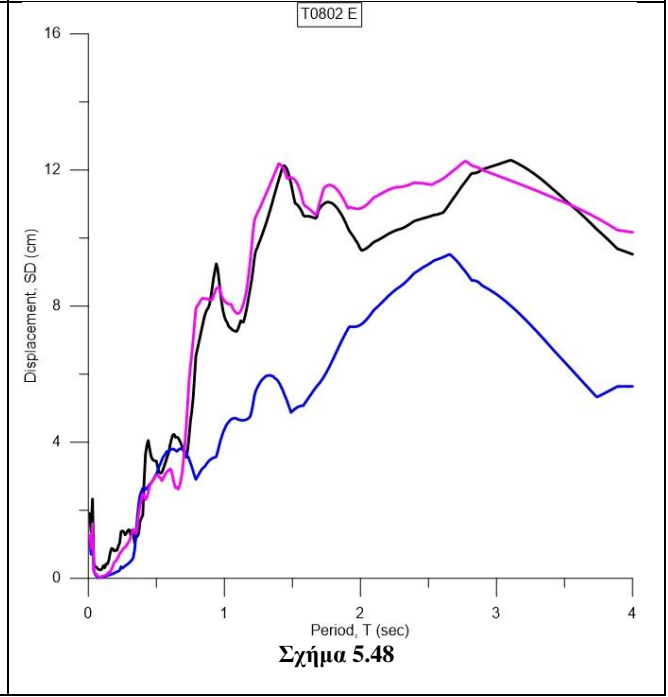
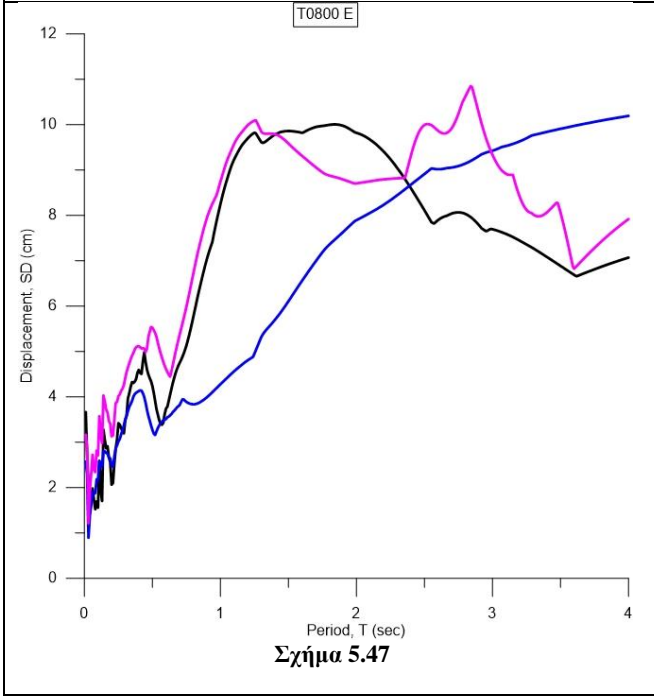
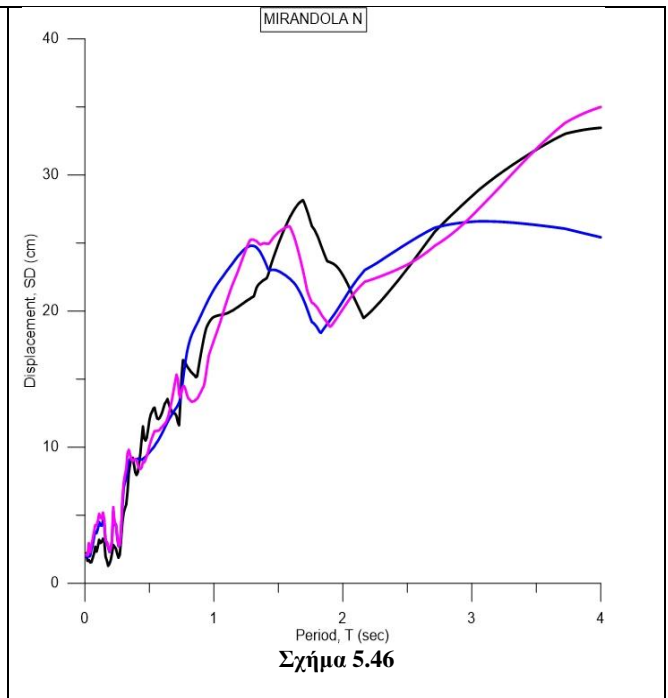
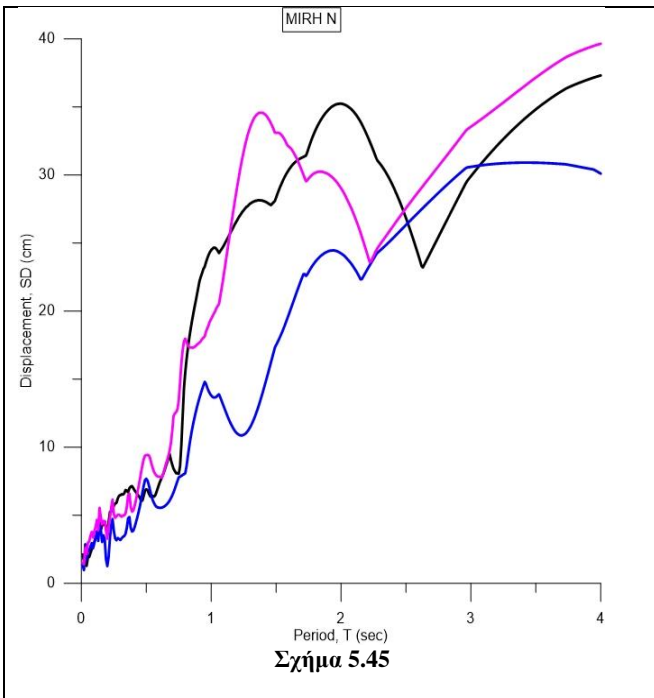
Στη συνέχεια, παρατίθενται σε ένα κοινό διάγραμμα τα ανελαστικά φάσματα απόκρισης μετακίνησης της αρχικής καταγραφής και του προσομοιώματος για το συνδυασμό δύο και έξι παλμών για τις καταγραφές στις οποίες η περίοδος του πρώτου παλμού είναι τουλάχιστον διπλάσια από αυτήν του δεύτερου ( $T_{p1} \geq 2 * T_{p2}$ ), καθώς σε αυτή την περίπτωση πετυχαίνεται καλύτερη σύγκλιση μεταξύ των φασμάτων (Πίνακας 5.9).

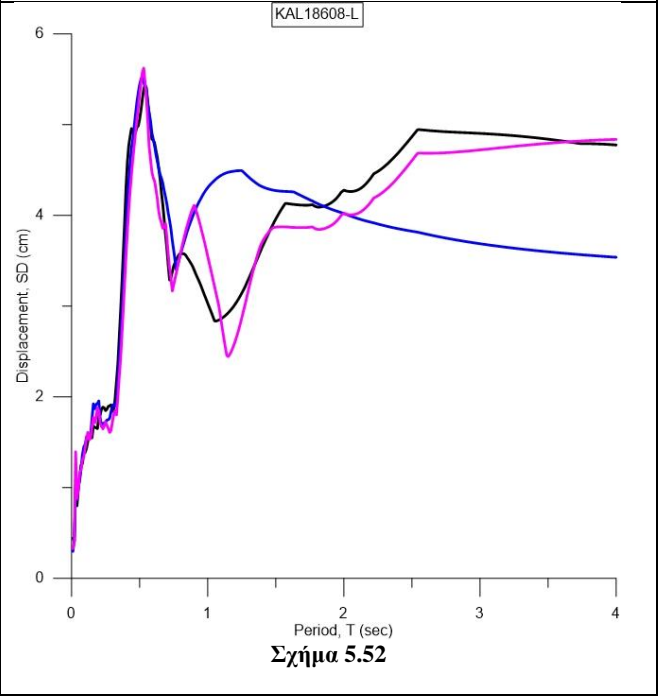
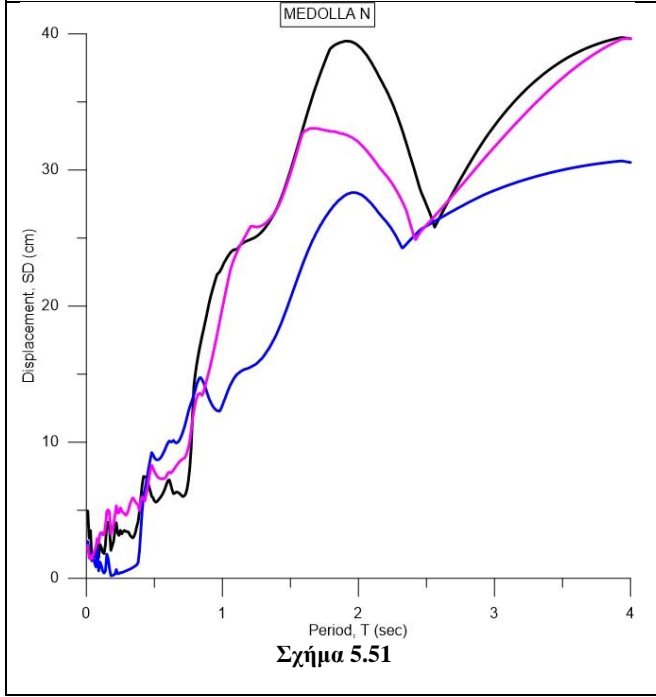
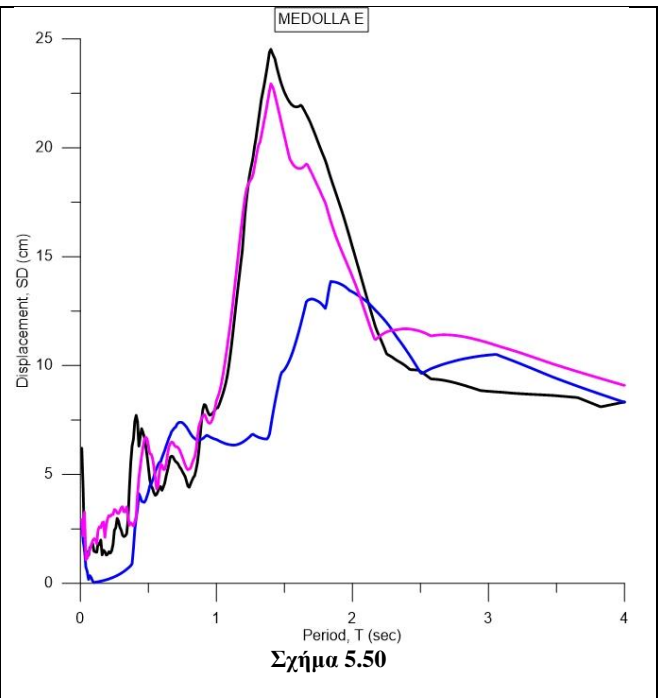
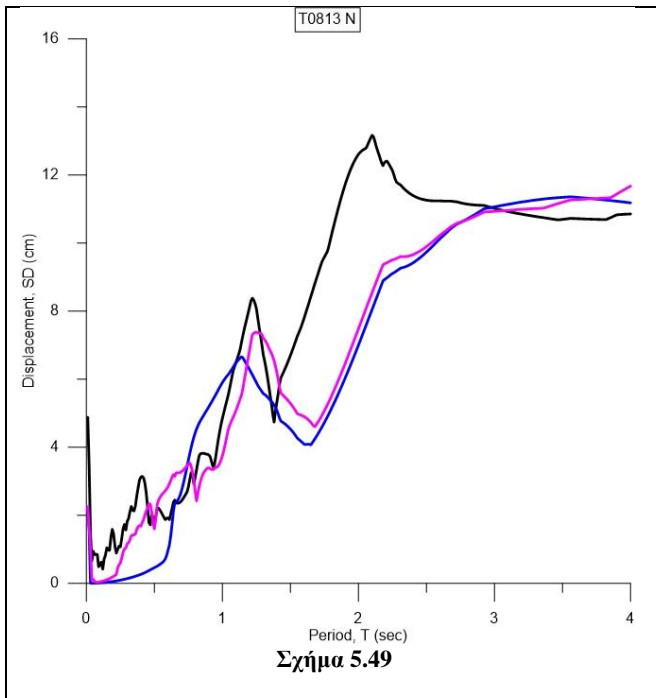


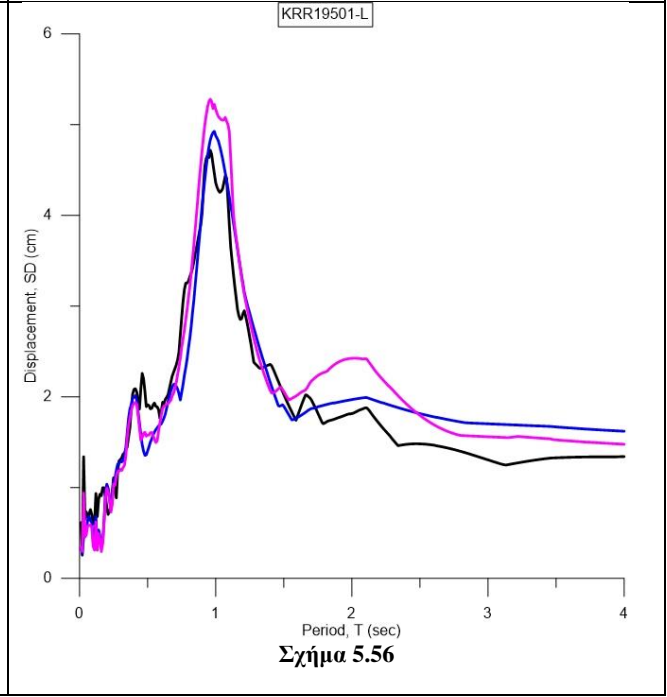
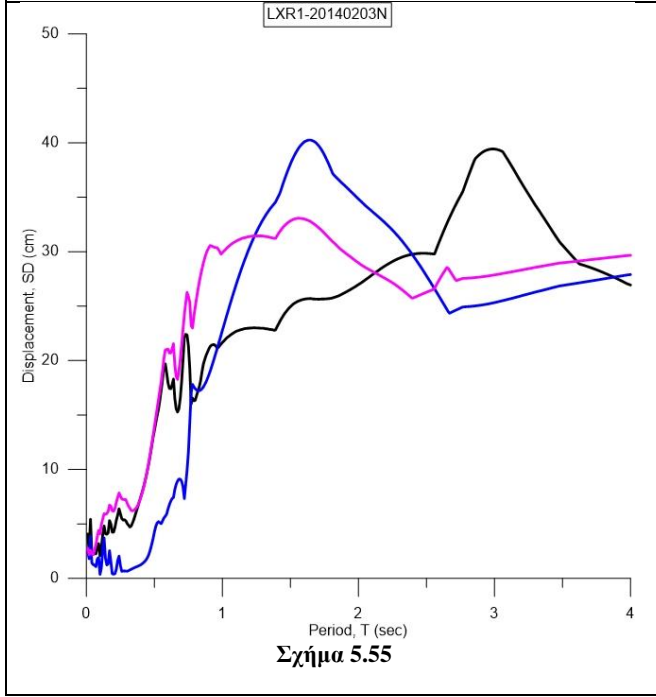
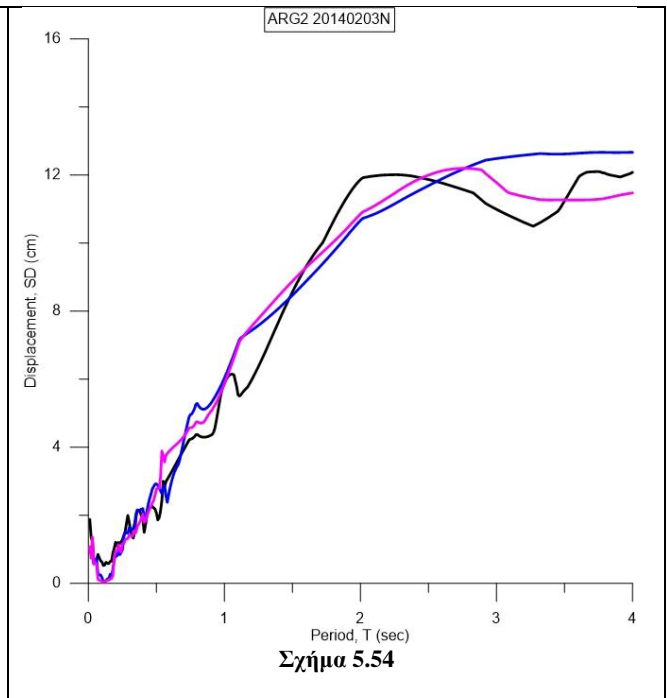
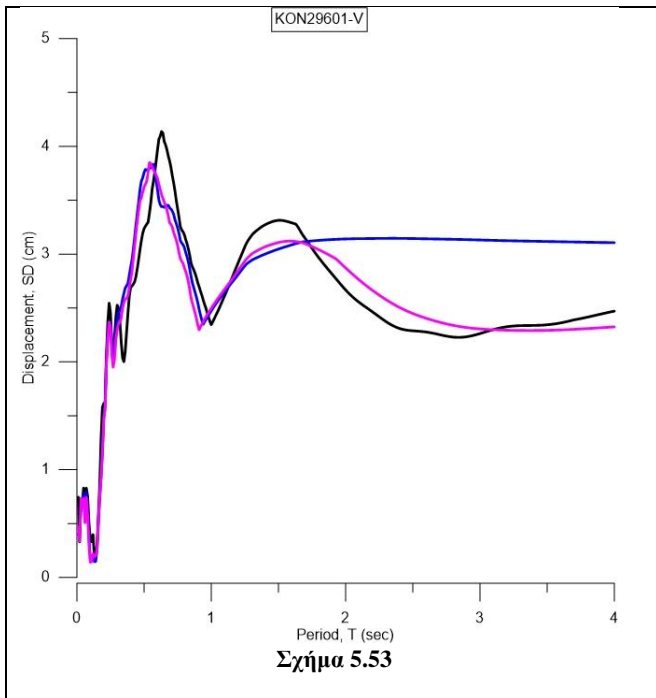


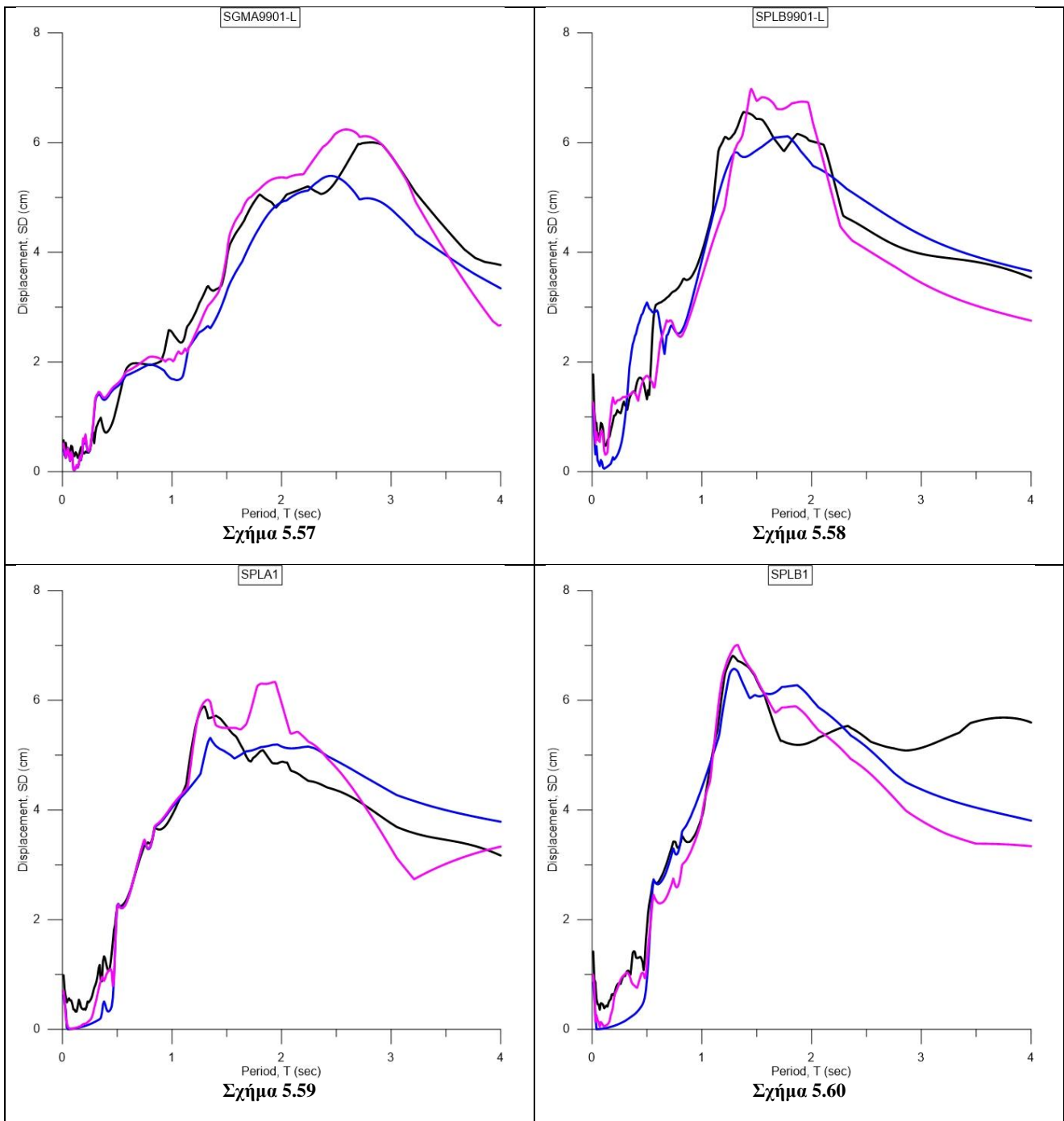












**Πίνακας 5.9** Ανελαστικά φάσματα απόκρισης μετακίνησης (SD) της αρχικής καταγραφής (μαύρη γραμμή) και του προσομοιώματος για δύο (μπλε γραμμή) και έξι (ροζ γραμμή) παλμούς

## 5.7 Σύγκριση με τον Ευρωκώδικα 8

Για τον υπολογισμό των φασμάτων του Ευρωκώδικα 8 θεωρήθηκε συντελεστής συμπεριφοράς  $q_y=4$ . Ως  $a_{gR}$  επιλέχθηκε να μη χρησιμοποιηθεί η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA που αναφέρεται μόνο στην τιμή  $T=0$ . Εναλλακτικά ορίστηκε η  $a_{eff}$  (Effective Ground Acceleration) ως η μέση τιμή των φασματικών επιταχύνσεων στο εύρος περιόδων  $0,1 \div 0,5 \text{sec}$  (περιοχή σταθερών κατά προσέγγιση φασματικών επιταχύνσεων) διαιρεμένη με 2,5. Ο συντελεστής σπουδαιότητας  $\gamma_i$  τέθηκε ίσος με τη μονάδα για συνήθεις κατασκευές, ενώ οι κατηγορίες εδάφους υπήρχαν ως δεδομένα στην αντίστοιχη βάση δεδομένων για κάθε καταγραφή.

Τα ανελαστικά φάσματα μετακινήσεων του Ευρωκώδικα 8 υπολογίστηκαν ακολουθώντας την εξής

διαδικασία.

Έχοντας υπολογίσει την επιτάχυνση διαρροής βρίσκουμε τη μετακίνηση διαρροής μέσω του τύπου  $SD_y = SA_y / \omega^2$ , όπου  $\omega$  είναι η ιδιοσυχνότητα του ελαστικού συστήματος. Κατόπιν, εφαρμόζοντας τις παρακάτω σχέσεις του Fajfar υπολογίζουμε την πλαστιμότητα  $\mu$  για συντελεστή συμπεριφοράς  $q_y=4$ :

$$q_y = (\mu - 1) * (T / T_0) + 1 \quad \text{για } T \leq T_0 \quad (5.4)$$

$$q_y = \mu \quad \text{για } T \geq T_0 \quad (5.5)$$

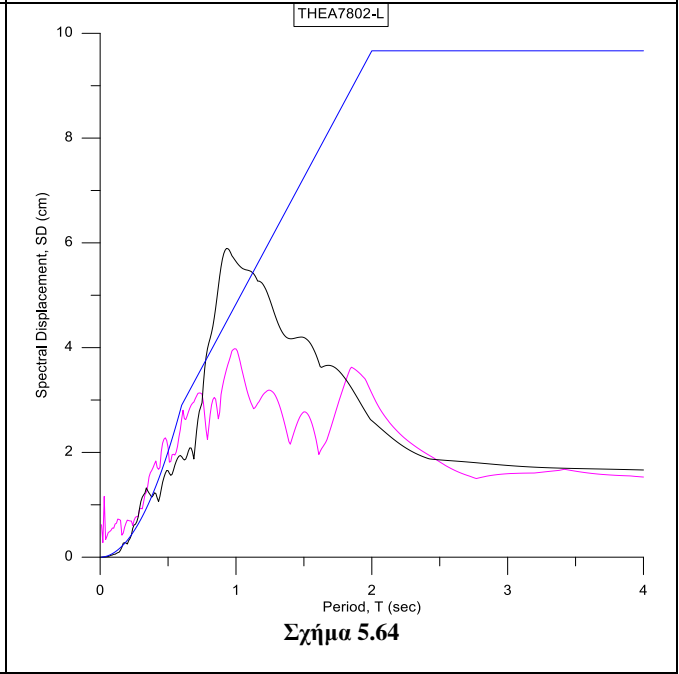
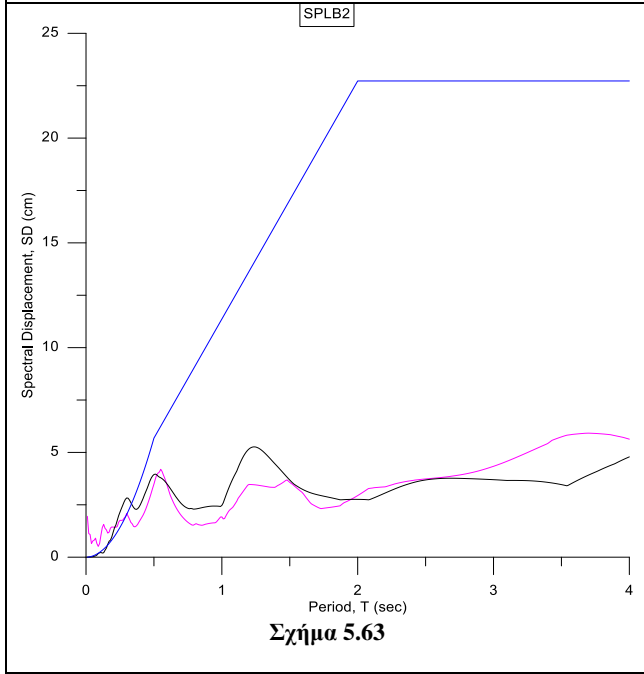
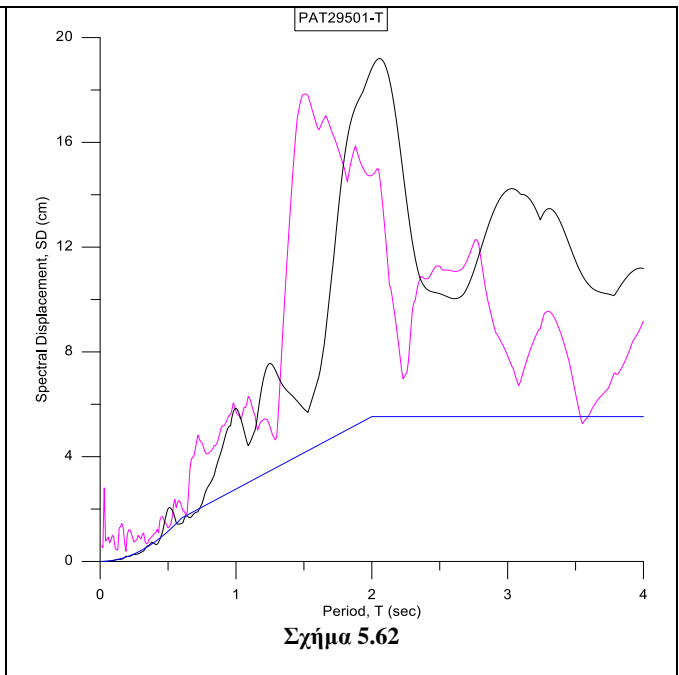
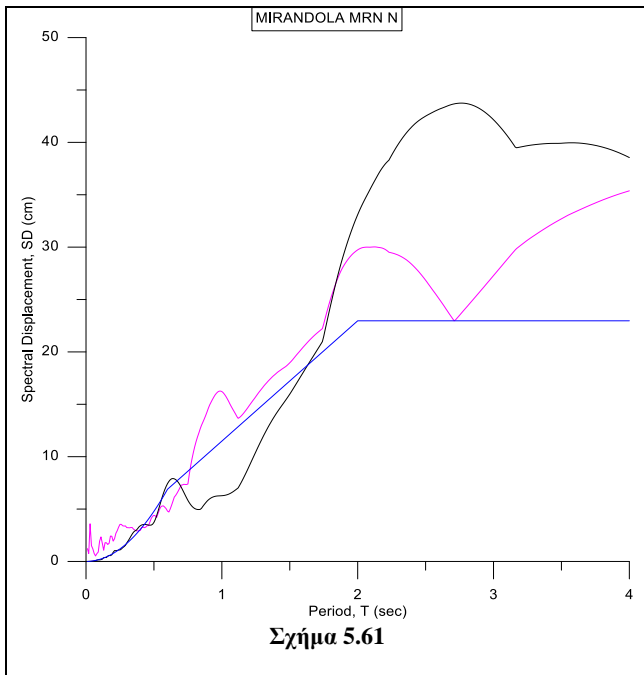
$$T_0 = 0,65 \mu^{0,3} T_c \leq T_c \quad (5.6)$$

Στην παραπάνω σχέση,  $T$  είναι η ιδιοπερίοδος του μονοβαθμίου και  $T_c$  η χαρακτηριστική περίοδος της εδαφικής κίνησης. Για φάσματα σχεδιασμού της μορφής του ΕΚ8, η περίοδος  $T_c$  ορίζεται ως το σημείο τομής του τμήματος που αντιστοιχεί σε σταθερή επιτάχυνση (οριζόντιο τμήμα) με αυτό που αντιστοιχεί σε σταθερή ταχύτητα (φθίνων κλάδος). Η εξίσωση (5.5) δηλώνει ότι για μεσαίες και μεγάλες περιόδους ισχύει η παραδοχή ίσων μετακινήσεων, δηλαδή ότι η μετακίνηση του ανελαστικού συστήματος είναι ίση με αυτή του αντίστοιχου ελαστικού με την ίδια περίοδο. Για κατασκευές με μικρές περιόδους, η ισότητα αυτή δεν ισχύει, όπως δηλώνει η σχέση (5.4).

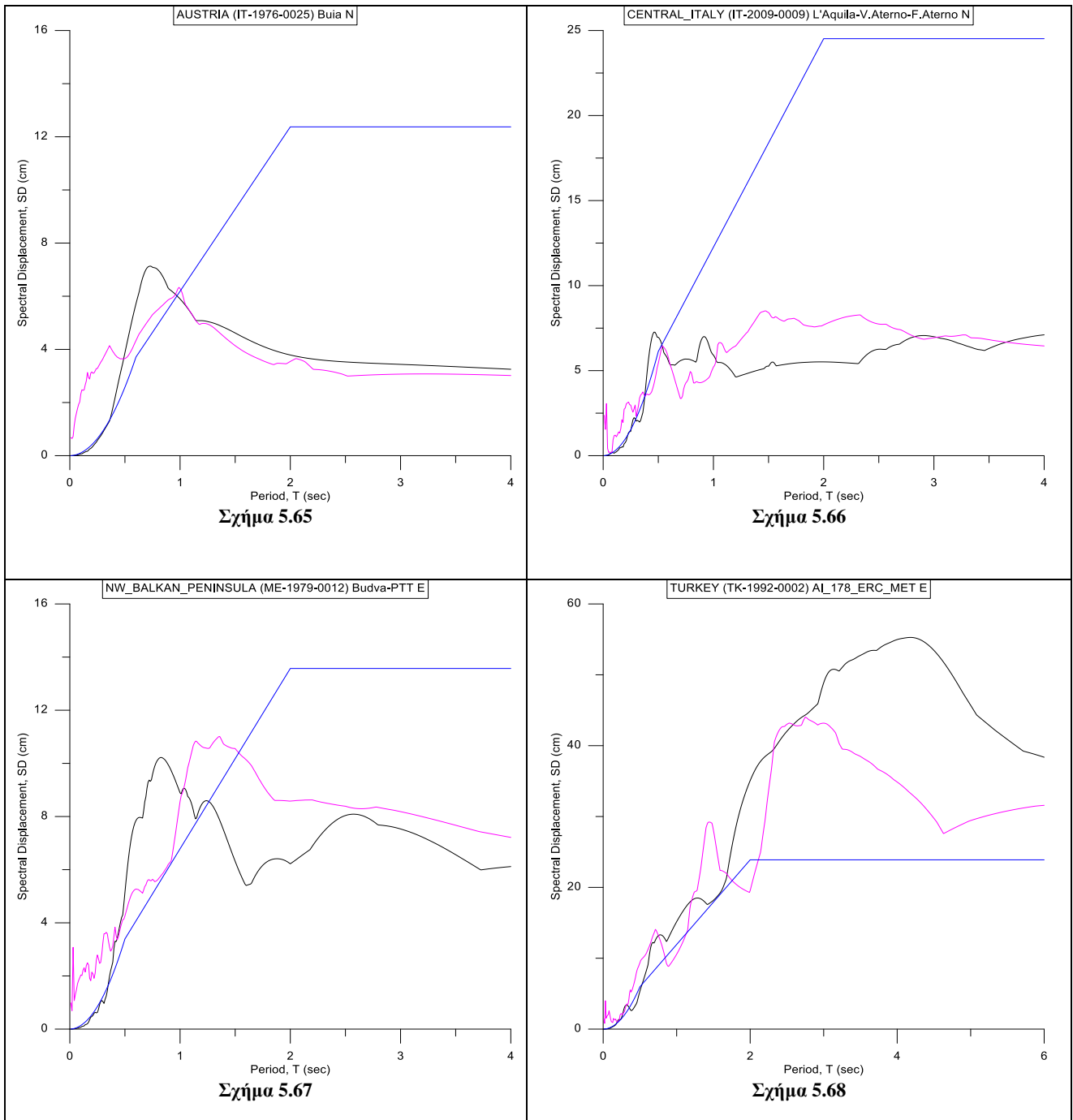
Επειδή η εξάρτηση της περιόδου  $T_0$  από την πλαστιμότητα απαιτεί επαναληπτική διαδικασία, προτείνεται η απλοποίηση:  $T_0 = T_c$ , η οποία είναι μία συντηρητική παραδοχή που δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα.

Έτσι, υπολογίζονται οι ανελαστικές φασματικές μετακινήσεις μέσω της σχέσης:  $SD = \mu * SD_y$ .

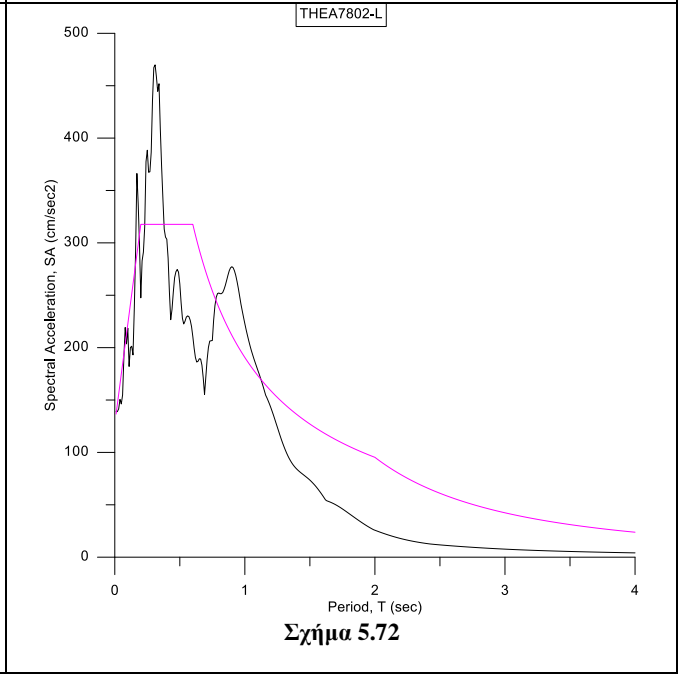
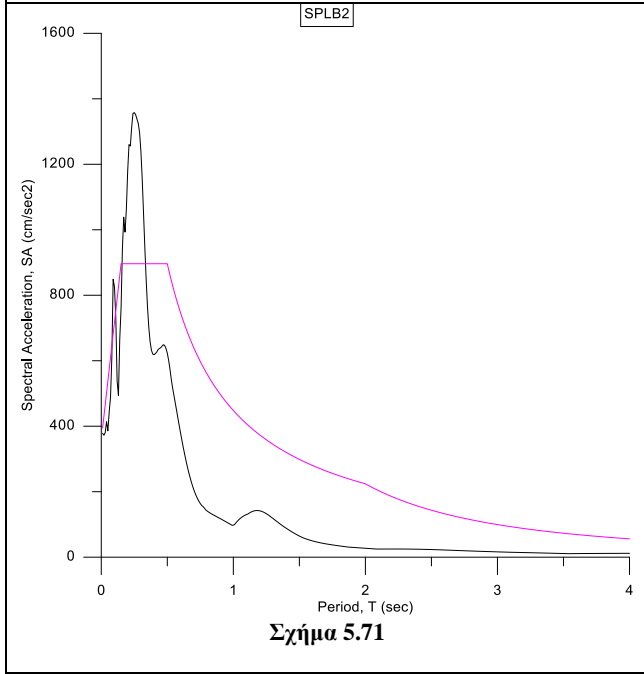
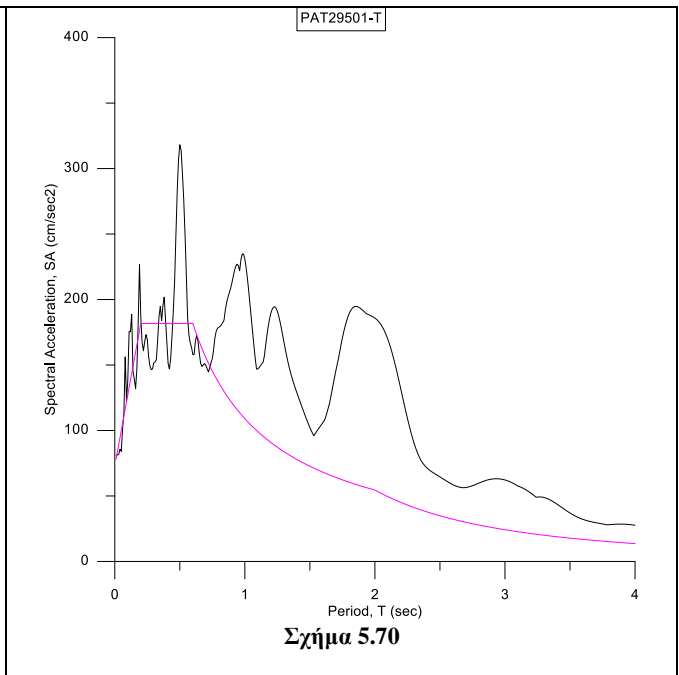
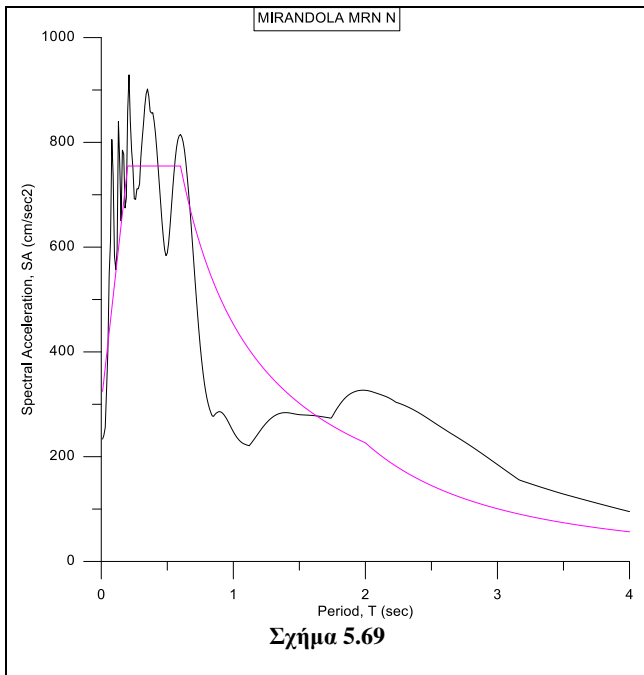
Στη συνέχεια, παρατίθενται σε ένα κοινό διάγραμμα τα ελαστικά και ανελαστικά φάσματα απόκρισης μετακίνησης της αρχικής καταγραφής και τα αντίστοιχα του Ευρωκώδικα 8 (για  $a_{eff}$ ) προκειμένου να γίνει σύγκρισή τους (Πίνακας 5.10). Το ίδιο γίνεται και για τα ελαστικά φάσματα απόκρισης επιτάχυνσης και τα αντίστοιχα του Ευρωκώδικα 8 (για  $a_{eff}$ ) για κάθε καταγραφή (Πίνακας 5.11). Το σύνολο αυτών των διαγραμμάτων βρίσκεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ, ενώ κάποια χαρακτηριστικά από αυτά παρουσιάζονται ακολούθως.

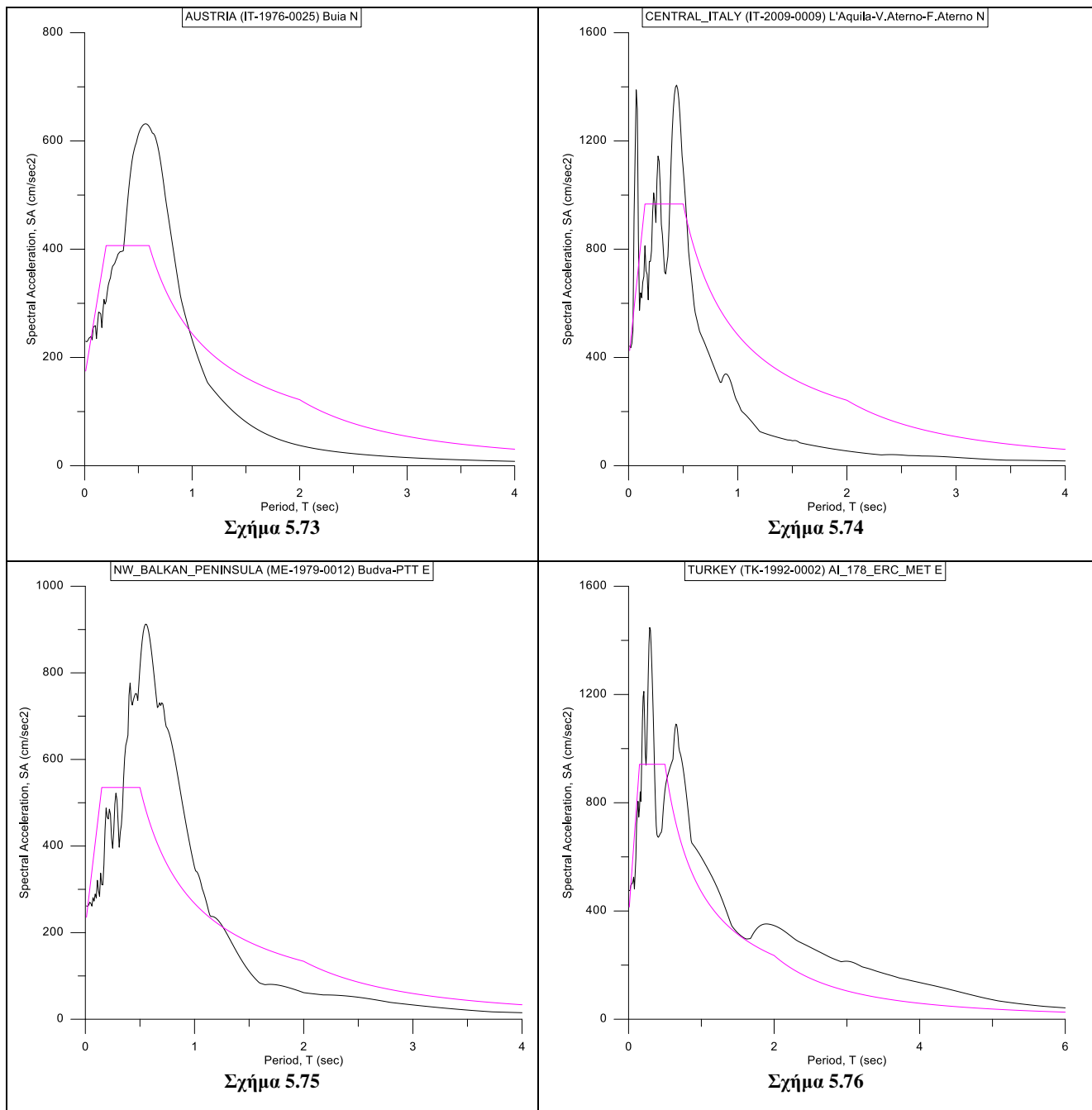






**Πίνακας 5.10** Ελαστικά (μαύρη γραμμή) και ανελαστικά (ροζ γραμμή) φάσματα απόκρισης μετακίνησης της αρχικής καταγραφής σε σύγκριση με τα αντίστοιχα του Ευρωκώδικα 8 (μπλε γραμμή) για effective acceleration





**Πίνακας 5.11** Ελαστικά φάσματα απόκρισης επιτάχυνσης της αρχικής καταγραφής (μαύρη γραμμή) σε σύγκριση με τα αντίστοιχα του Ευρωκώδικα 8 (ροζ γραμμή) για effective acceleration

## 5.8 Στατιστική επεξεργασία φασμάτων

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η διερεύνηση της απόκλισης των ανελαστικών φασματικών μετακινήσεων από τις ελαστικές της αρχικής καταγραφής και από τις ανελαστικές του Ευρωκώδικα 8 και της απόκλισης των φασματικών επιταχύνσεων της αρχικής καταγραφής και από τις αντίστοιχες του Ευρωκώδικα 8.

Επειδή το φάσμα του Ευρωκώδικα 8 περιγράφεται από τέσσερις περιοχές περιόδων, κατηγοριοποιήθηκαν οι καταγραφές σύμφωνα με την περίοδο  $T_P$  του πρώτου παλμού ώστε να προσεγγιστούν αυτές οι περιοχές. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν τέσσερις κατηγορίες:

- $T_P \leq 1,0$  sec, περιοχή σταθερών επιταχύνσεων
- $1,0 < T_P \leq 2,0$  sec, περιοχή σταθερών ταχυτήτων
- $2,0 < T_P \leq 4,0$  sec, περιοχή σταθερών μετακινήσεων
- $T_P > 4,0$  sec

Για κάθε καταγραφή, εξετάστηκε το φάσμα του λόγου των ανελαστικών προς τις ελαστικές μετακινήσεις, δηλαδή ο λόγος της πλαστιμότητας προς το συντελεστή συμπεριφοράς  $\mu/q_y$ . το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων και το ανελαστικό φάσμα μετακινήσεων. Σε κάθε ένα από τα παραπάνω φάσματα έγινε αναγωγή του οριζόντιου άξονα των περιόδων ως προς την περίοδο του πρώτου παλμού. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν τα σφάλματα των επιταχύνσεων και των μετακινήσεων σε σχέση με το ανελαστικό φάσμα του ΕΚ8 ως εξής:

$$\text{ERROR}_{SA} = \frac{SA_{rec} - SA_{EC8}}{SA_{rec}} \quad (5.7)$$

και

$$\text{ERROR}_{SD} = \frac{SD_{rec} - SD_{EC8}}{SD_{rec}} \quad (5.8)$$

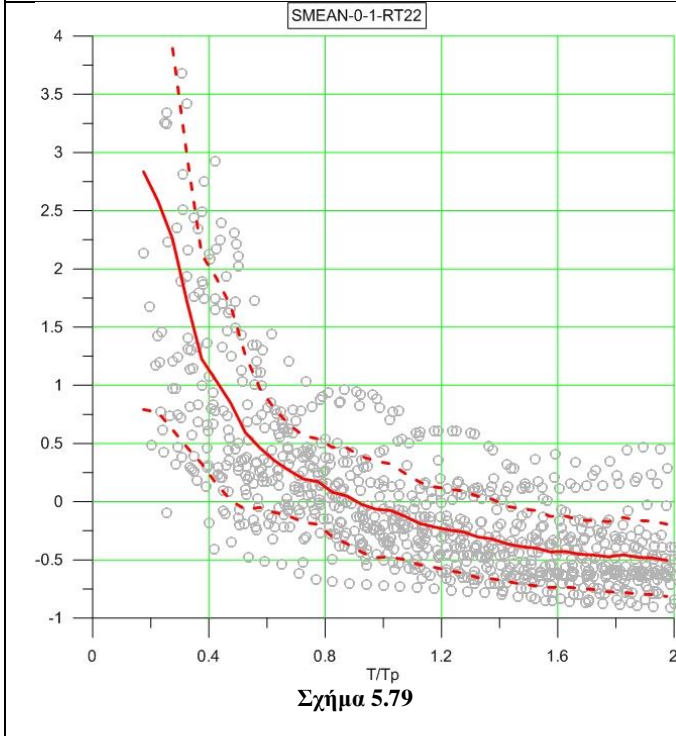
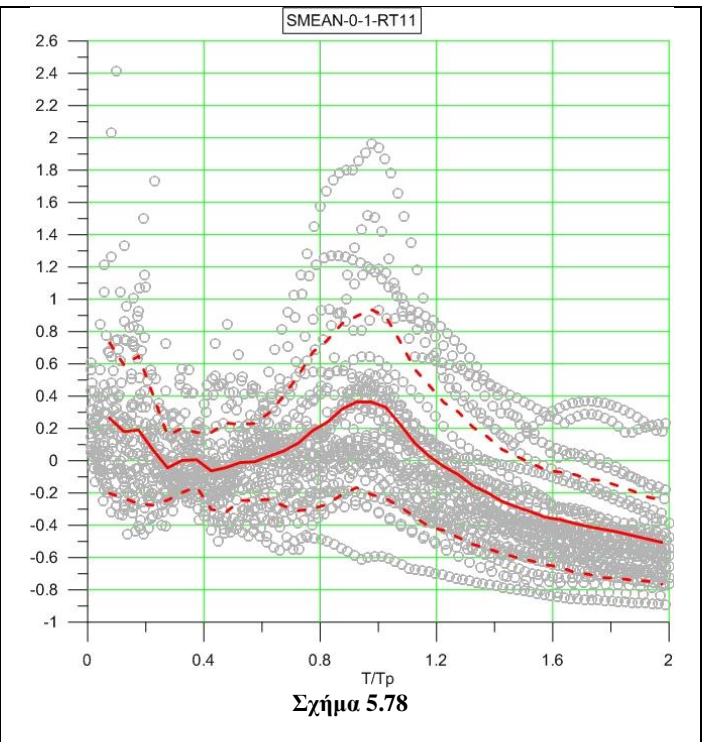
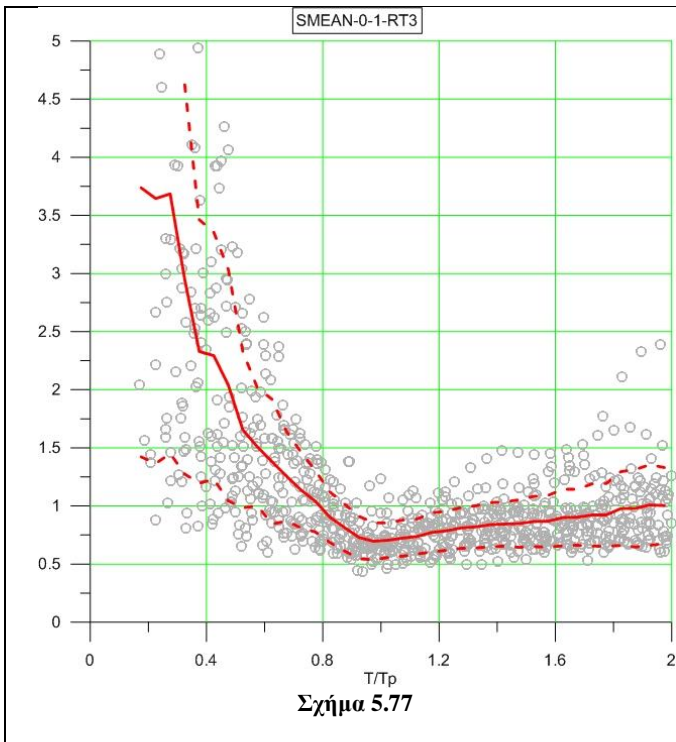
όπου  $SA_{rec}$ ,  $SD_{rec}$  η φασματική επιτάχυνση και η ανελαστική φασματική μετακίνηση της καταγραφής και  $SA_{EC8}$ ,  $SD_{EC8}$  οι αντίστοιχες του Ευρωκώδικα 8.

Έτσι για όλες τις καταγραφές κάθε κατηγορίας περιόδων, έχουν προκύψει τα σφάλματα  $\text{ERROR}_{SA}$ ,  $\text{ERROR}_{SD}$  καθώς και ο λόγος  $SD_{in} / SD_{el}$  συναρτήσει του  $T/T_P$ . Για κάθε ένα από αυτά τα δείγματα υπολογίστηκε η Μέση Τιμή και η Τυπική Απόκλιση, όπως φαίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα, προκειμένου να γίνει μία συνολική εκτίμηση των αποτελεσμάτων και να εξαχθούν τα τελικά συμπεράσματα από την όλη διαδικασία.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν τα σφάλματα των έξι αθροισμάτων των παλμών ( $SD_{in,S_i}, T/T_P$ ) σε σχέση με το αρχικό ανελαστικό φάσμα μετακινήσεων συναρτήσει της ανηγμένης περιόδου, ( $\text{ERROR}_{S_i}, T/T_P$ ), για κάθε καταγραφή, όπου:

$$\text{ERROR}_{S_i} = \frac{SD_{in} - SD_{S_i}}{SD_{in}} \quad (5.9)$$

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε και για τις 91 παλμικές καταγραφές και με το πέρας της, συγκεντρώθηκαν έξι δείγματα για τα σφάλματα των αθροισμάτων των παλμών, ( $\text{ERROR}_{S_i}, T/T_P$ ) Με στατιστική επεξεργασία των δειγμάτων αυτών, υπολογίστηκε η Μέση Τιμή και η Τυπική Απόκλισή τους και παρήχθησαν τα διαγράμματα του Πίνακα 5.12.

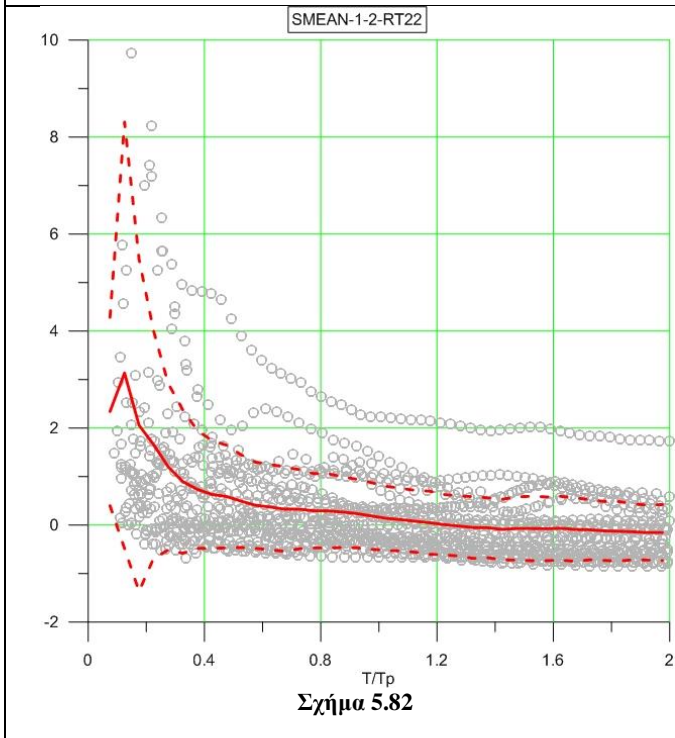
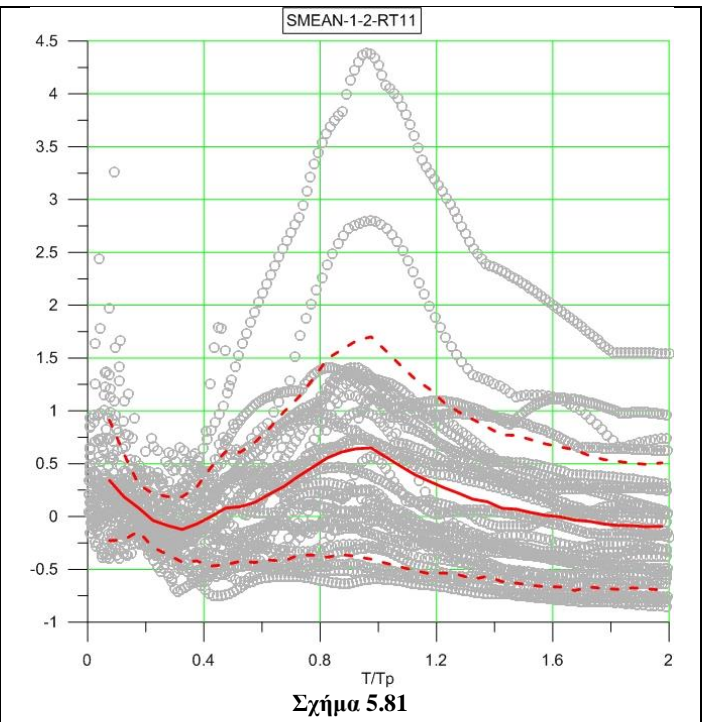
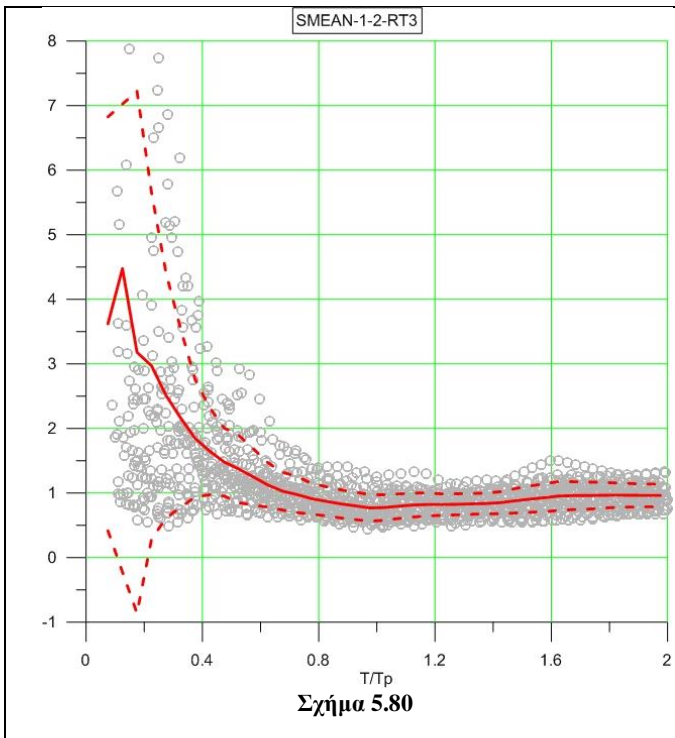


**Για περιόδους  $0 \leq T \leq 1$  sec**

**Σχήμα 5.77:** Μέση τιμή  $\pm$  τυπική απόκλιση του λόγου μεταξύ ανελαστικών και ελαστικών φασματικών μετακινήσεων της καταγραφής

**Σχήμα 5.78:** Μέση τιμή  $\pm$  τυπική απόκλιση του σφάλματος μεταξύ των φασματικών επιταχύνσεων της καταγραφής και του EC8 για effective acceleration

**Σχήμα 5.79:** Μέση τιμή  $\pm$  τυπική απόκλιση του σφάλματος μεταξύ των ανελαστικών φασματικών μετακινήσεων της καταγραφής και του EC8 για effective acceleration

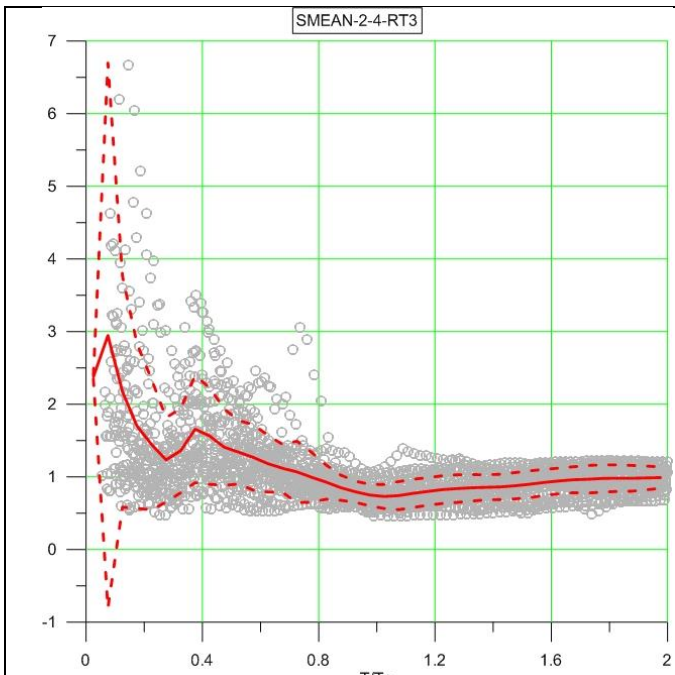


Για περιόδους  $1 < T \leq 2 \text{sec}$

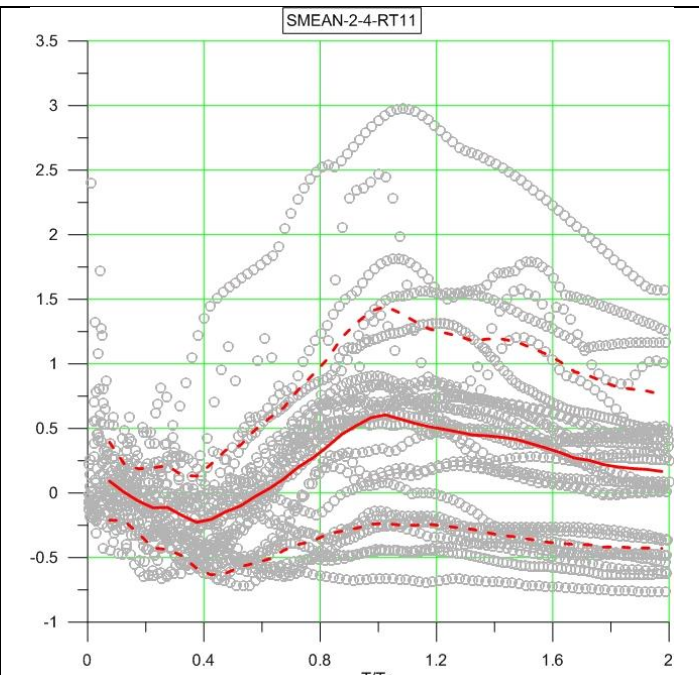
**Σχήμα 5.80:** Μέση τιμή  $\pm$  τυπική απόκλιση του λόγου μεταξύ ανελαστικών και ελαστικών φασματικών μετακινήσεων της καταγραφής

**Σχήμα 5.81:** Μέση τιμή  $\pm$  τυπική απόκλιση του σφάλματος μεταξύ των φασματικών επιταχύνσεων της καταγραφής και του EC8 για effective acceleration

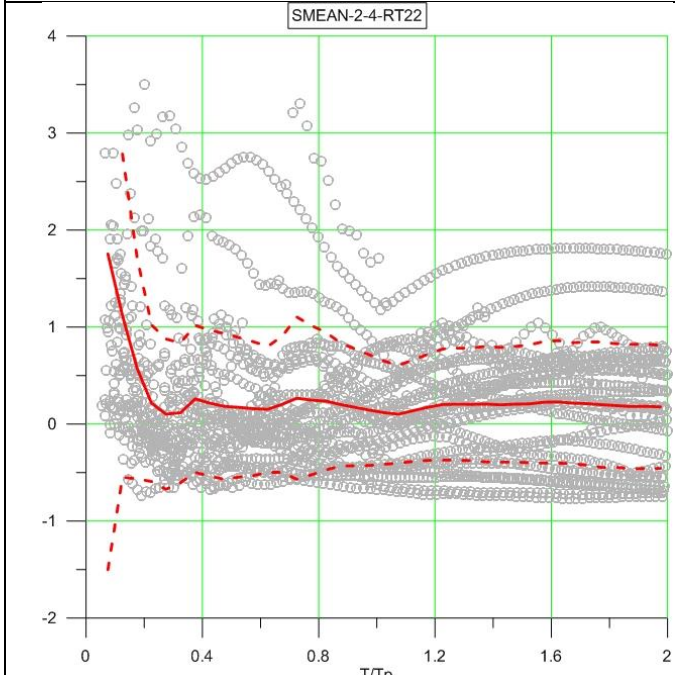
**Σχήμα 5.82:** Μέση τιμή  $\pm$  τυπική απόκλιση του σφάλματος μεταξύ των ανελαστικών φασματικών μετακινήσεων της καταγραφής και του EC8 για effective acceleration



Σχήμα 5.83



Σχήμα 5.84



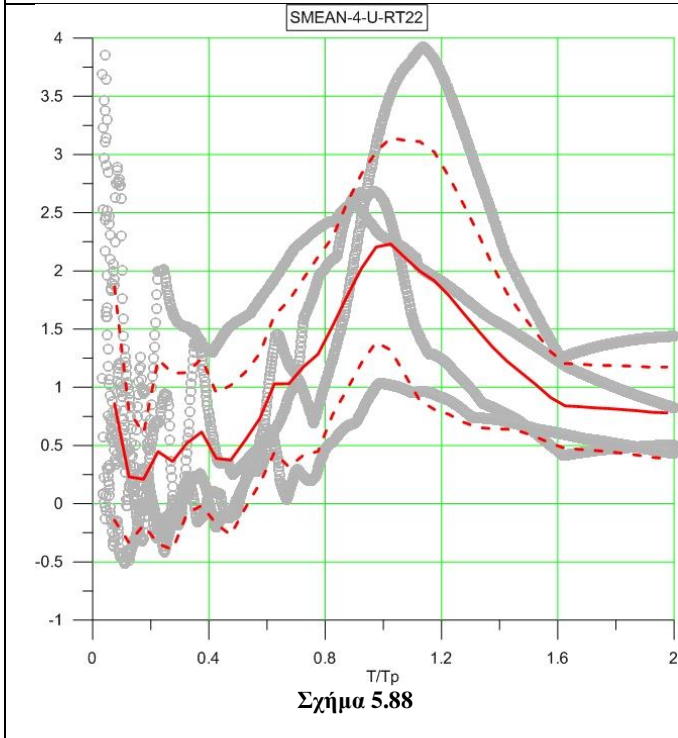
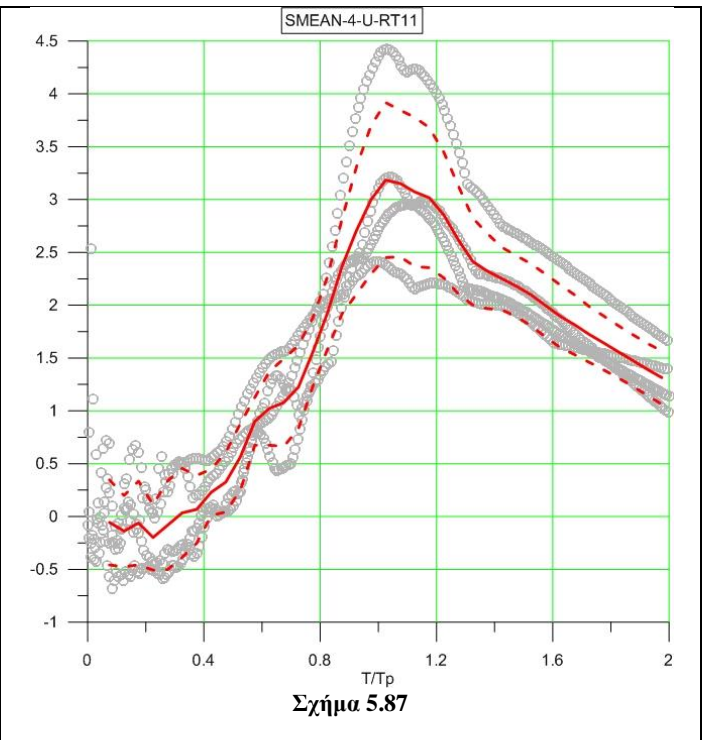
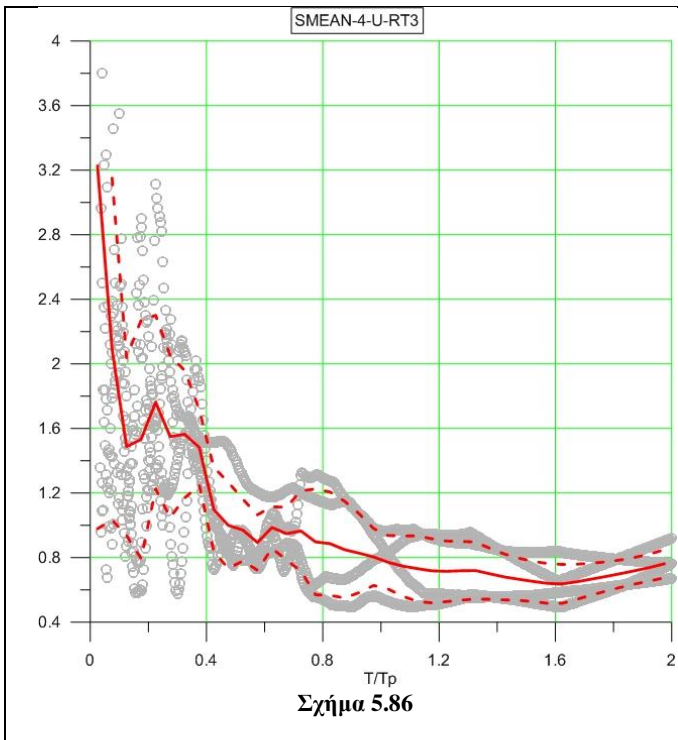
Σχήμα 5.85

**Για περιόδους  $2 < T \leq 4$  sec**

**Σχήμα 5.83:** Μέση τιμή  $\pm$  τυπική απόκλιση του λόγου μεταξύ ανελαστικών και ελαστικών φασματικών μετακινήσεων της καταγραφής

**Σχήμα 5.84:** Μέση τιμή  $\pm$  τυπική απόκλιση του σφάλματος μεταξύ των φασματικών επιταχύνσεων της καταγραφής και του EC8 για effective acceleration

**Σχήμα 5.85:** Μέση τιμή  $\pm$  τυπική απόκλιση του σφάλματος μεταξύ των ανελαστικών φασματικών μετακινήσεων της καταγραφής και του EC8 για effective acceleration



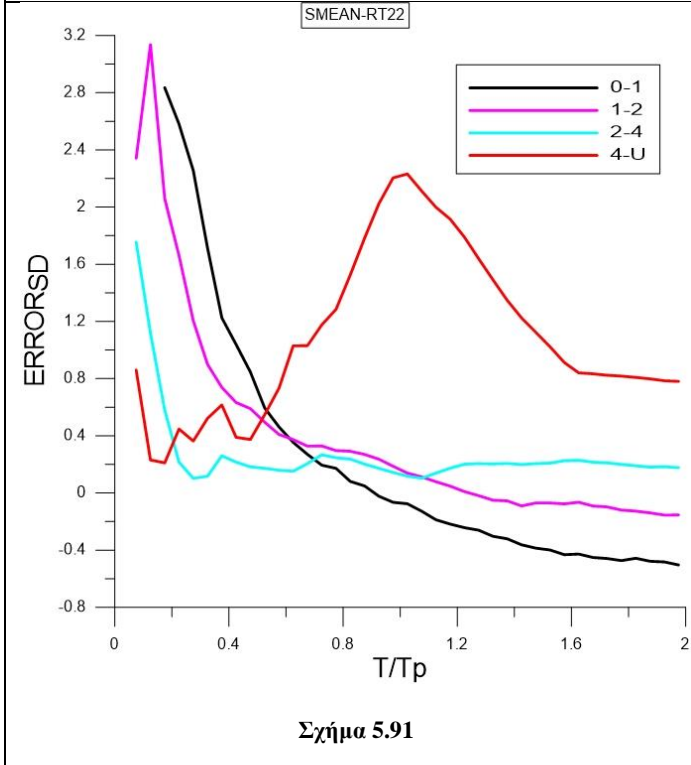
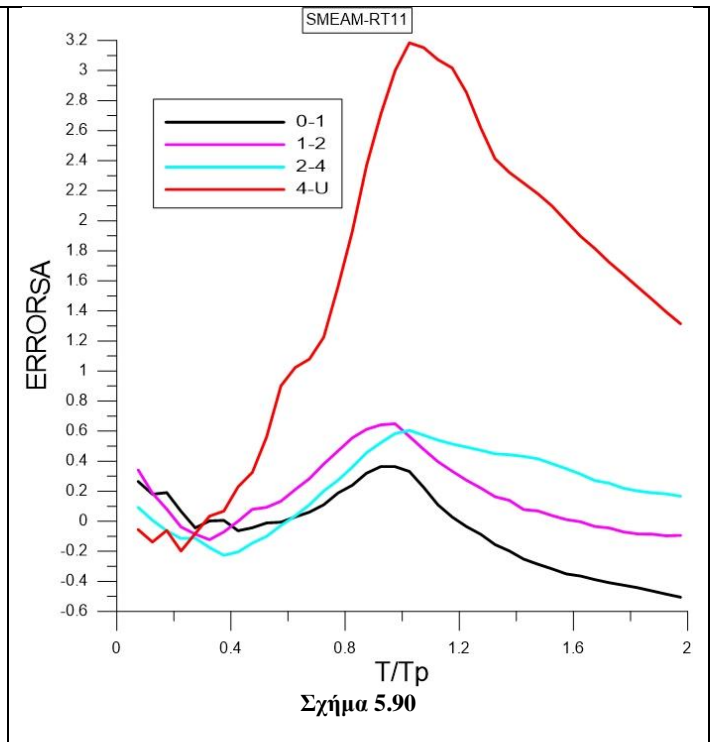
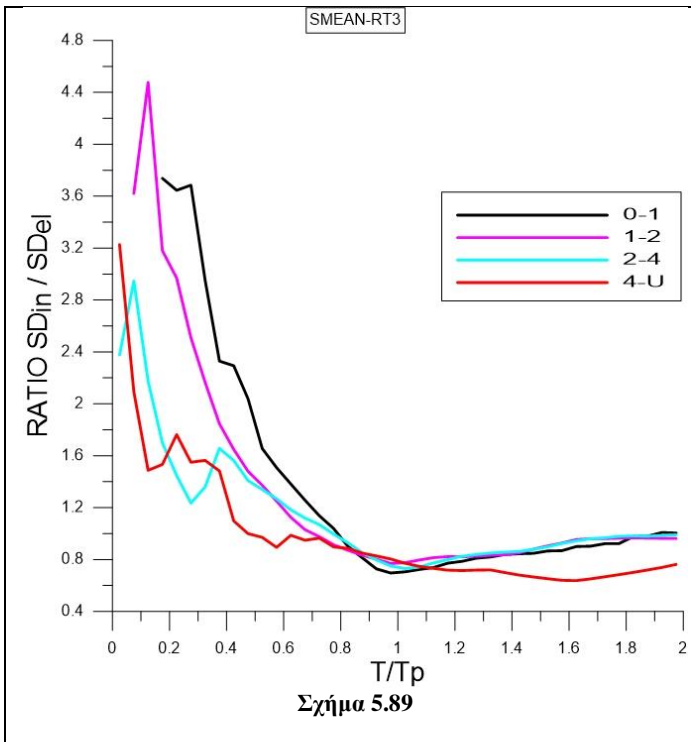
**Για περιόδους  $T > 4\text{sec}$**

**Σχήμα 5.86:** Μέση τιμή  $\pm$  τυπική απόκλιση του λόγου μεταξύ ανελαστικών και ελαστικών φασματικών μετακινήσεων της καταγραφής

**Σχήμα 5.87:** Μέση τιμή  $\pm$  τυπική απόκλιση του σφάλματος μεταξύ των φασματικών επιταχύνσεων της καταγραφής και του EC8 για effective acceleration

**Σχήμα 5.88:** Μέση τιμή  $\pm$  τυπική απόκλιση του σφάλματος μεταξύ των ανελαστικών φασματικών μετακινήσεων της καταγραφής και του EC8 για effective acceleration



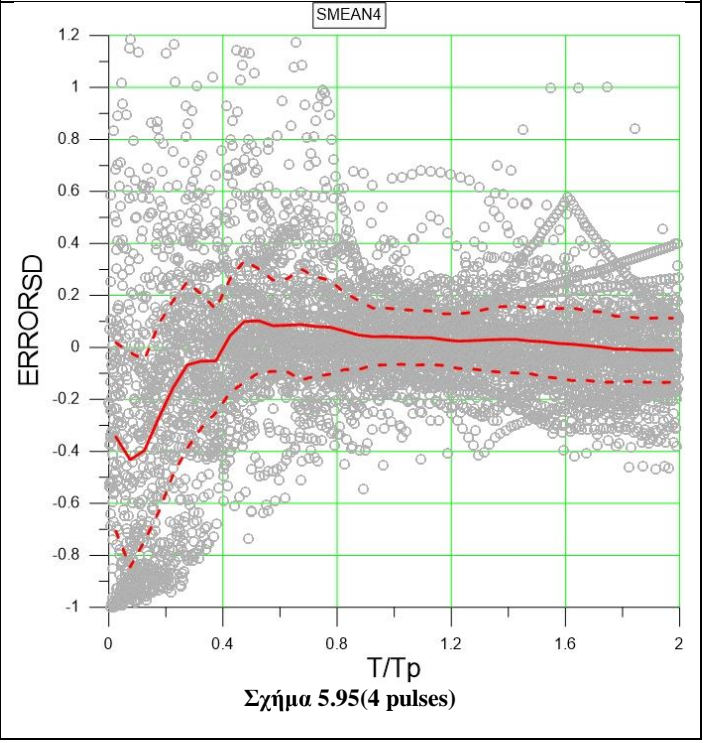
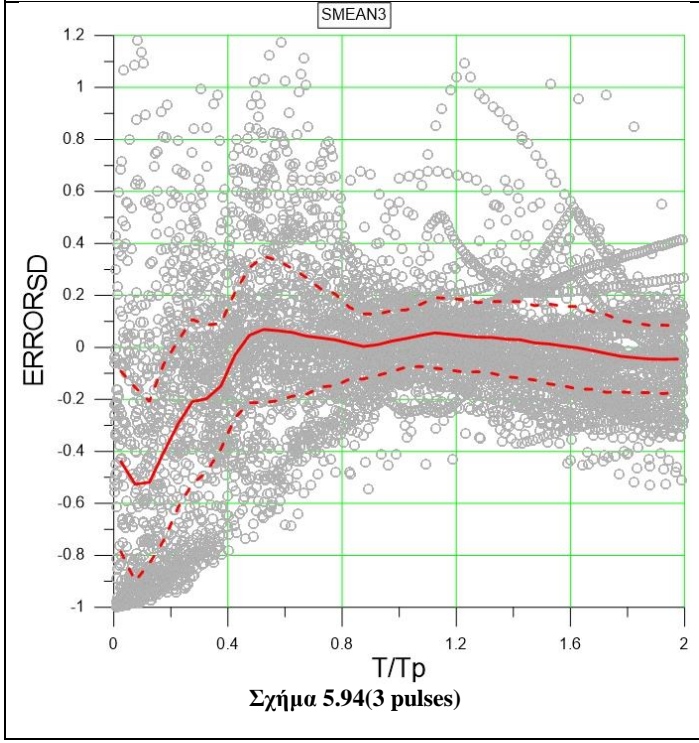
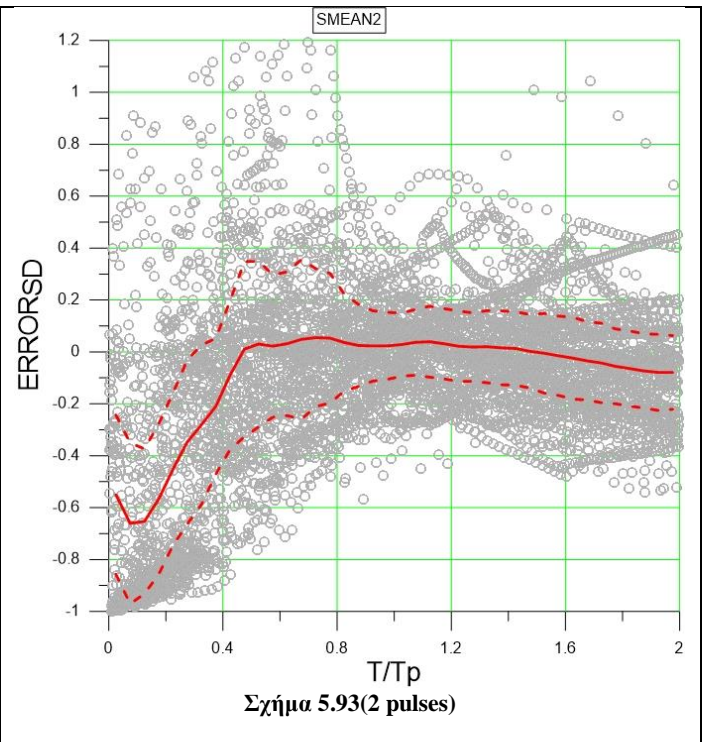
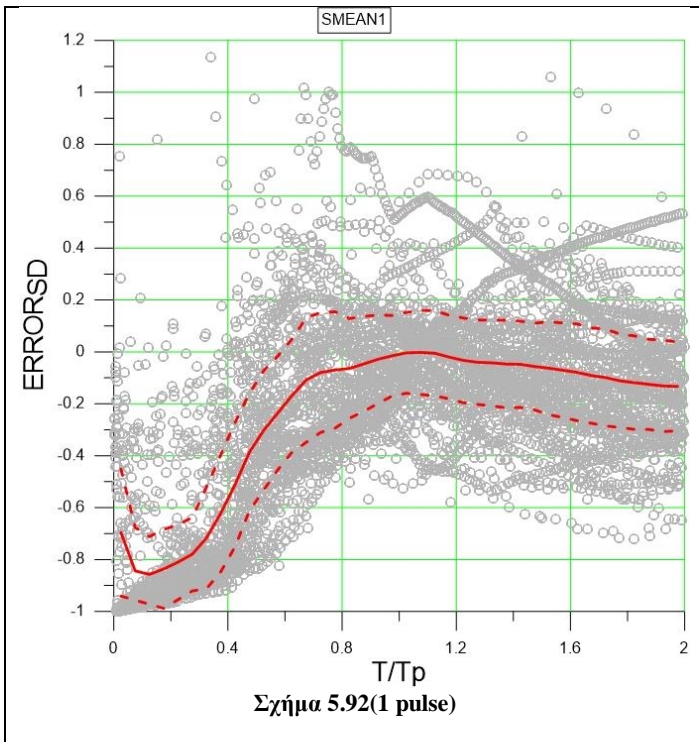


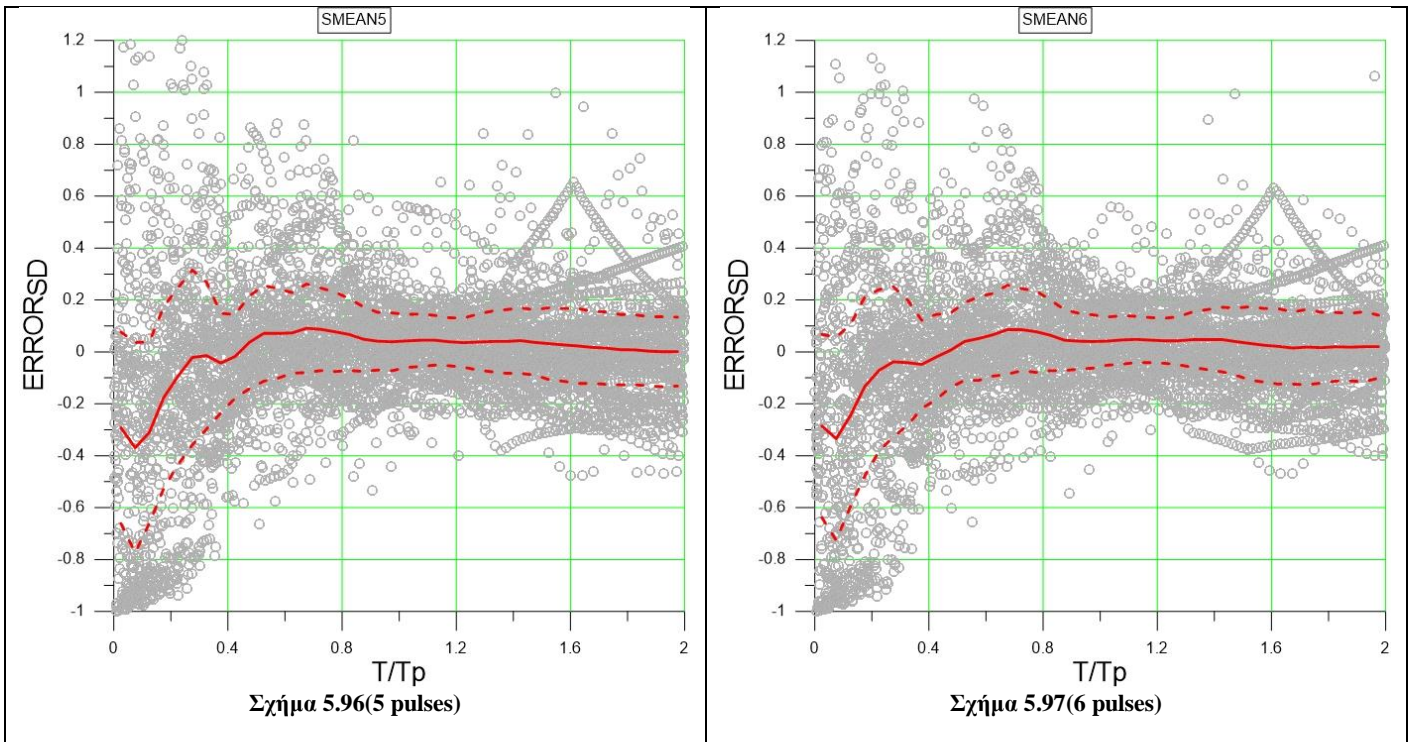
**Συγκεντρωτικά διαγράμματα για όλες τις περιοχές περιόδων**

**Σχήμα 5.89:** Μέση τιμή του λόγου μεταξύ ανελαστικών και ελαστικών φασματικών μετακινήσεων της καταγραφής

**Σχήμα 5.90:** Μέση τιμή του σφάλματος μεταξύ των φασματικών επιταχύνσεων της καταγραφής και του EC8 για effective acceleration

**Σχήμα 5.91:** Μέση τιμή του σφάλματος μεταξύ των ανελαστικών φασματικών μετακινήσεων της καταγραφής και του EC8 για effective acceleration





**Πίνακας 5.12 Μέση τιμή ± τυπική απόκλιση του σφάλματος ανάμεσα στις ανελαστικές φασματικές μετακινήσεις της αρχικής καταγραφής και του εκάστοτε συνδυασμού παλμών**

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την ανάλυση των 483 σεισμικών καταγραφών που προέκυψαν από 65 σεισμικά γεγονότα μεσαίου μεγέθους σε περιοχές του Ελλαδικού χώρου και των παρακείμενων περιοχών, προκειμένου να εντοπισθούν φαινόμενα κατευθυντικότητας.

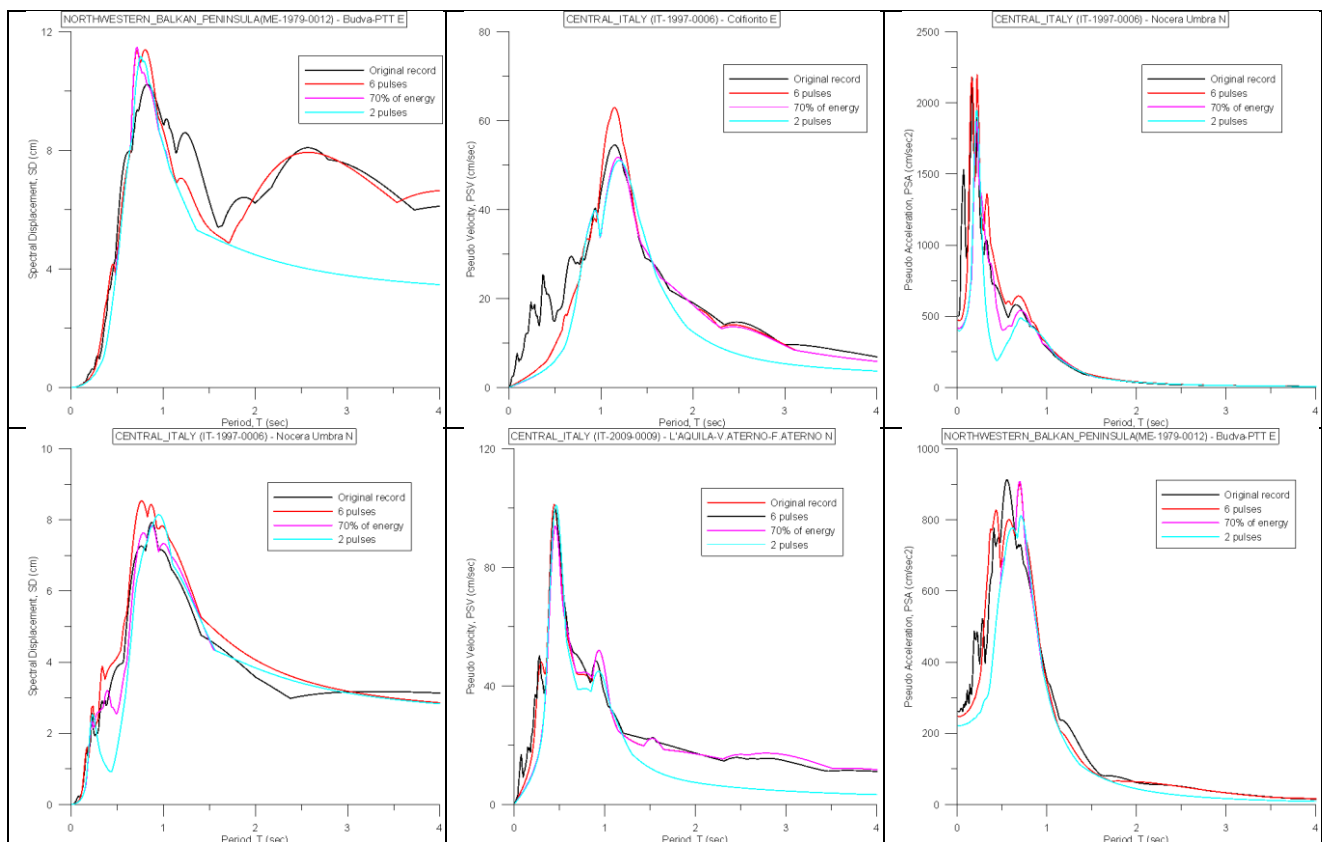
Για τον εντοπισμό των κύριων παλμών που εμπεριέχονται στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας εδαφικής κίνησης γίνεται χρήση της μεθόδου, όπως εισήχθη από τους ερευνητές Π. Μίμογλου, Ι. Ψυχάρη και Ι. Ταφλαμπά. Στη μέθοδο αυτή, η οποία αποτελεί μια κλειστή μαθηματική διαδικασία, οι παλμοί ταχύτητας εντοπίζονται μέσω κυματικής ανάλυσης και για τη μαθηματική τους περιγραφή γίνεται χρήση του κυματιδίου που χρησιμοποιούν στις μελέτες τους οι Mavroeidis and Papageorgiou (2003). Για τον προσδιορισμό της περιόδου κάθε παλμού γίνεται χρήση του φάσματος συνέλιξης με πολλαπλασιασμό των φασμάτων ταχύτητας και μετακίνησης για λόγο ιξώδους απόσβεσης 5%. Η περίοδος του παλμού προσδιορίζεται ως η αιχμή του φάσματος συνέλιξης και τίθεται ίση με  $T_1$ . Υπολογίζεται το φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για λόγο απόσβεσης  $\xi=5\%$  και προσδιορίζεται η μέγιστη τιμή  $PSV_{\xi,max}(T_1)$ . Καθώς η χρονική διάρκεια του κυματιδίου δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή, για τον καθορισμό του κυματιδίου που προσαρμόζεται καλύτερα στη συγκεκριμένη εδαφική κίνηση απαιτείται σάρωση όλων των πιθανών τιμών του  $\gamma$ , από 1 μέχρι και  $\gamma_{max}=5$  με βήμα 0,1. Για κάθε τέτοια τιμή  $\gamma_j$  και για την τιμή  $PSV_{\xi,max}(T_1)$  υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή του πλάτους  $A_j$ . Έπειτα, για κάθε ζεύγος  $(A_j, \gamma_j)$  γίνεται σάρωση όλων των τιμών διαφοράς φάσης  $\nu$  εντός του εύρους  $0^\circ$  έως  $360^\circ$  με βήμα  $\Delta\nu=5^\circ$  και παράγεται το κυματίδιο M&P θέτοντας  $T_p = T_1$ , αφήνοντας το  $t_0$  ως παράμετρο. Τα κυματίδια στα οποία η μέγιστη επιτάχυνση, ταχύτητα ή μετακίνηση είναι μεγαλύτερη από την PGA, PGV ή PGD της εδαφικής κίνησης αντίστοιχα, απορρίπτονται. Για κάθε αποδεκτό κυματίδιο και για τιμές  $t_0$  από  $t_0 = \gamma_j \cdot T_{1/2}$  έως  $t_0 = t_{max} - \gamma_j \cdot T_{1/2}$ , με το  $t_{max}$  να αντιστοιχεί στο τέλος της εδαφικής κίνησης, υπολογίζεται η συσχέτιση μεταξύ της χρονοϊστορίας ταχύτητας του κυματιδίου  $v_p(t)$  και της χρονοϊστορίας εδαφικής ταχύτητας της καταγραφής  $v_g(t)$ . Επιλέγεται το κυματίδιο με το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης και για αυτό καθορίζονται οι παράμετροι  $A_1$ ,  $\gamma_1$ ,  $\nu_1$  και  $t_{0,1}$ . Κατόπιν, υπολογίζεται ο χρόνος έναρξης του παλμού:  $t_{p,1}=t_{0,1}\gamma_1 \cdot T_{1/2}$ . Με αφαίρεση του κυματιδίου αυτού από την αρχική καταγραφή υπολογίζεται η εναπομένουσα εδαφική κίνηση (residual ground motion), η οποία θεωρείται ως η αρχική εδαφική κίνηση για τους πρόσθετους παλμούς πέραν του πρώτου. Η ανωτέρω διαδικασία επαναλαμβάνεται για την εκάστοτε νέα εδαφική κίνηση μέχρι την εξαγωγή και του έκτου παλμού και κατόπιν γίνεται υπέρθεση των έξι παλμών, ώστε να διαταχθεί η σειρά των κυματιδίων για την προσομοίωση ολόκληρης της εδαφικής κίνησης.

Στη συνέχεια, εξήχθησαν τα ελαστικά και ανελαστικά φάσματα απόκρισης με την αρχική καταγραφή και με επιμέρους συνδυασμούς παλμών για να εκτιμηθεί με πόσους επιμέρους παλμούς προσεγγίζονται ικανοποιητικά τα φάσματα της αρχικής καταγραφής. Τέλος, έγινε σύγκριση των ανελαστικών φασμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση με τα αντίστοιχα του Ευρωκώδικα 8.

Με το πέρας των αναλύσεων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων καταλήξαμε στα ακόλουθα συμπεράσματα, τα οποία παρουσιάζονται συνοδευόμενα από χαρακτηριστικά σχήματα.

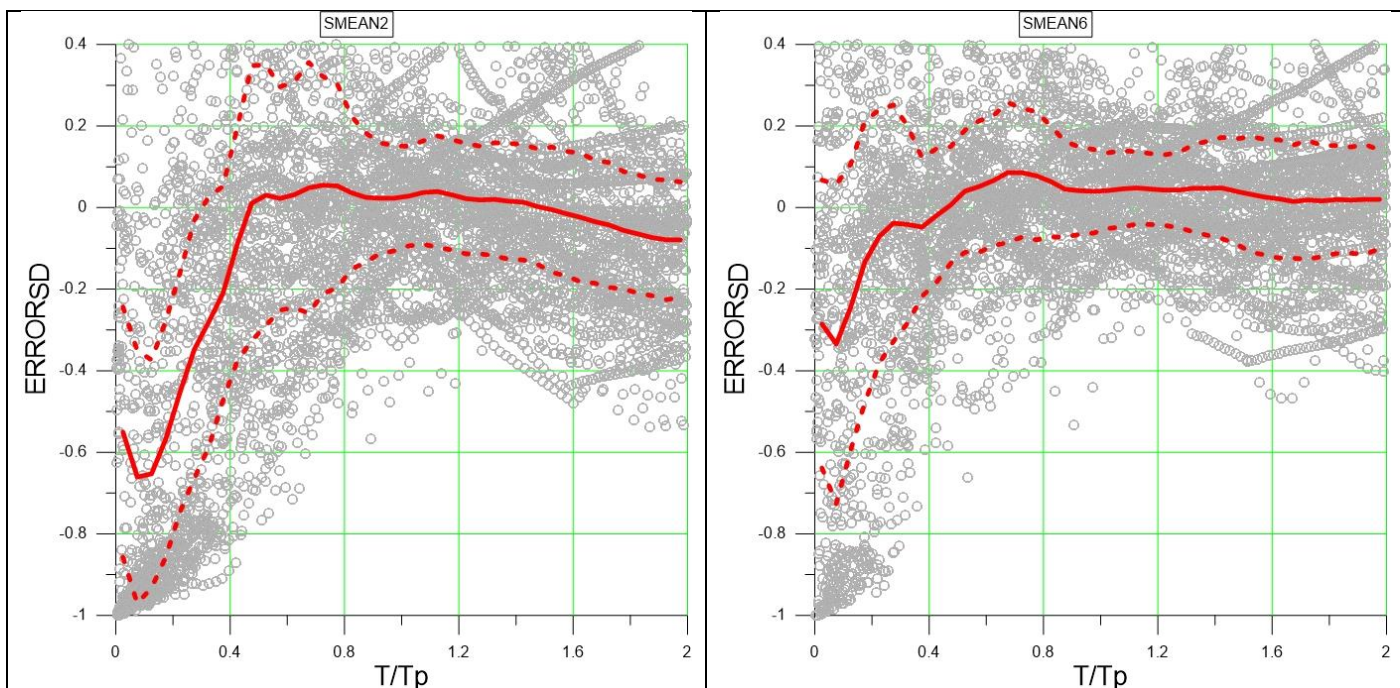
- Παρατηρήθηκε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η απόκλιση που προκύπτει κάνοντας χρήση 2 παλμών είναι πολύ κοντά σε εκείνη που δίνει η χρήση του αθροίσματος των παλμών που αγγίζουν το 70% την συνολικής ενέργειας της καταγραφής. Αυτό είναι πολύ λογικό, καθώς κατά κύριο λόγο το 70% της συνολικής ενέργειας επιτυγχάνεται το πολύ με δύο (ή και τρεις σε κάποιες περιπτώσεις) παλμούς. Σε πολλές περιπτώσεις αρκεί ένας παλμός για να προσεγγίσουμε ικανοποιητικά την αρχική καταγραφή! Ακολούθως παρατίθενται ορισμένα ελαστικά φάσματα απόκρισης μετακίνησης (SD), ψευδο-ταχύτητας (PSV) και ψευδο-επιτάχυνσης (PSA) της αρχικής καταγραφής και του προσομοιώματος για

έξι και δύο παλμούς καθώς και για το σύνολο των παλμών που αγγίζουν το 70% της συνολικής ενέργειας της καταγραφής.



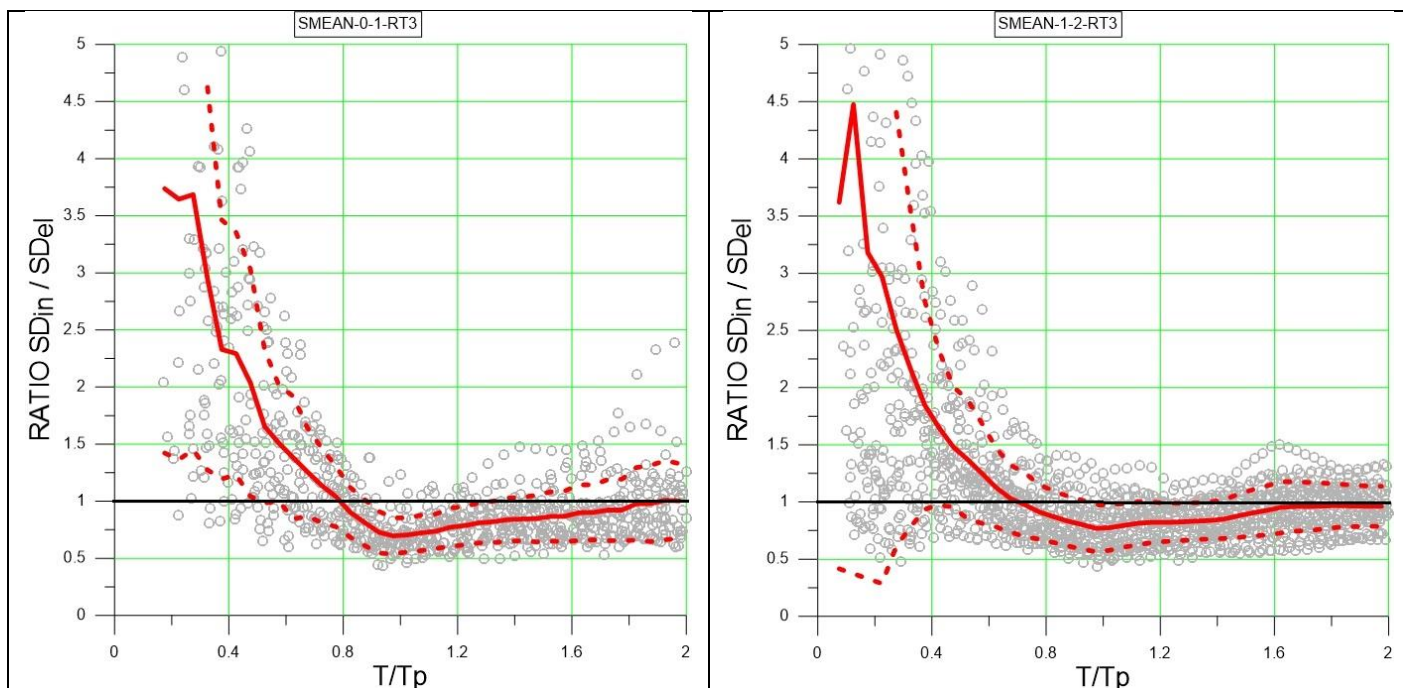
**Πίνακας 6. 1** Ελαστικά φάσματα απόκρισης μετακίνησης (SD), ψευδο-ταχύτητας (PSV) και ψευδο-επιτάχυνσης (PSA) της αρχικής καταγραφής και του προσομοιώματος για έξι και δύο παλμούς καθώς και για το σύνολο των παλμών που αγγίζουν το 70% της συνολικής ενέργειας της καταγραφής.

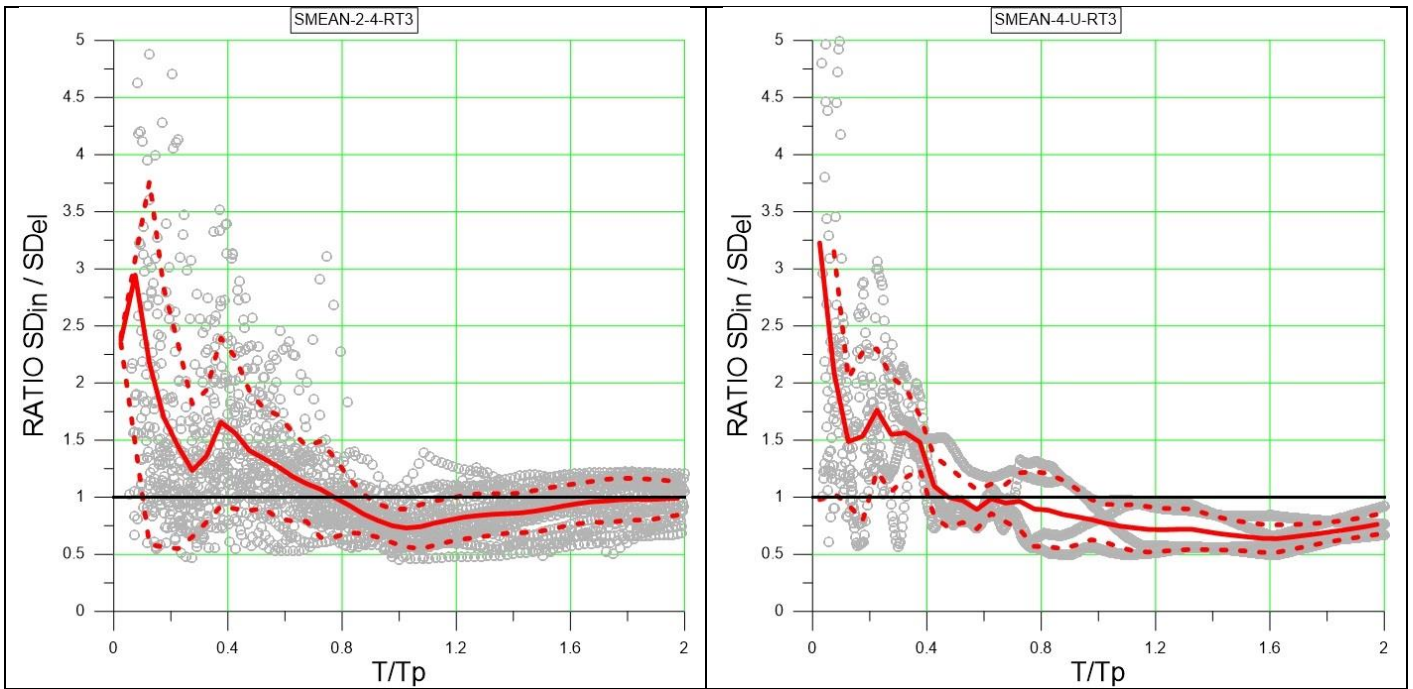
- Στα παρακάτω διαγράμματα SMEAN2 και SMEAN6 παρουσιάζεται η μέση τιμή  $\pm$  τυπική απόκλιση του σφάλματος ανάμεσα στις ανελαστικές φασματικές μετακινήσεις της αρχικής καταγραφής και του συνδυασμού 2 και 6 παλμών αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα SMEAN2, για τιμές του λόγου  $T/T_p$  από 0,4 και πάνω η απόκλιση του σφάλματος μεταξύ της αρχικής καταγραφής και του συνδυασμού των δύο παλμών είναι μικρότερη του 30%. Η σύγκλιση αυτή είναι αρκετά ικανοποιητική. Για το συνδυασμό τώρα των έξι παλμών (SMEAN6) η απόκλιση του σφάλματος φαίνεται να είναι μικρότερη, αλλά πολύ κοντά σε αυτή που προκύπτει για το συνδυασμό των 2 παλμών. Έτσι συμπεραίνουμε ότι, κατά κύριο λόγο δύο παλμοί αρκούν για να προσεγγίσουμε ικανοποιητικά την αρχική καταγραφή.



Πίνακας 6. 2 Μέση τιμή  $\pm$  τυπική απόκλιση του σφάλματος ανάμεσα στις ανελαστικές φασματικές μετακινήσεις της αρχικής καταγραφής και του εκάστοτε συνδυασμού παλμών

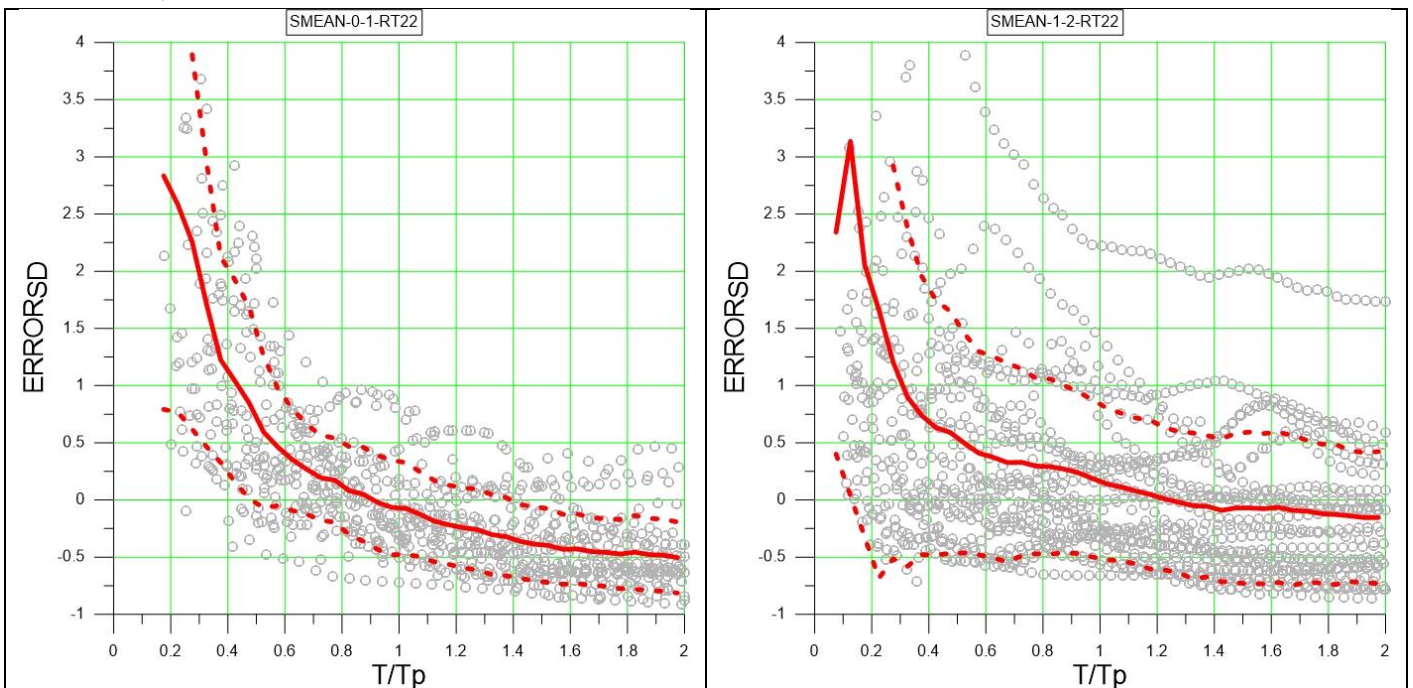
- Όσον αφορά στα φάσματα μετακινήσεων της αρχικής καταγραφής, παρατηρούμε ότι για λόγο  $T/Tr$  κοντά στο 0,4 παρατηρείται μια τοπική επαύξηση του λόγου  $S_{d,i}/S_{d,e}$  (οι ανελαστικές μετακινήσεις είναι περίπου διπλάσιες από τις ελαστικές), γεγονός που υποδηλώνει μια σημαντικά αυξημένη ανελαστική απαίτηση στην περιοχή αυτή. Δηλαδή, στις ανελαστικές αναλύσεις αναμένεται αυξημένη απαίτηση πλαστιμότητας για τις κατασκευές που έχουν ιδιοπεριόδους κοντά στη μισή ιδιοπερίοδο του δεσπόζοντος παλμού, όπου η περίοδος του παλμού έχει προκύψει από ελαστικά φάσματα απόκρισης.

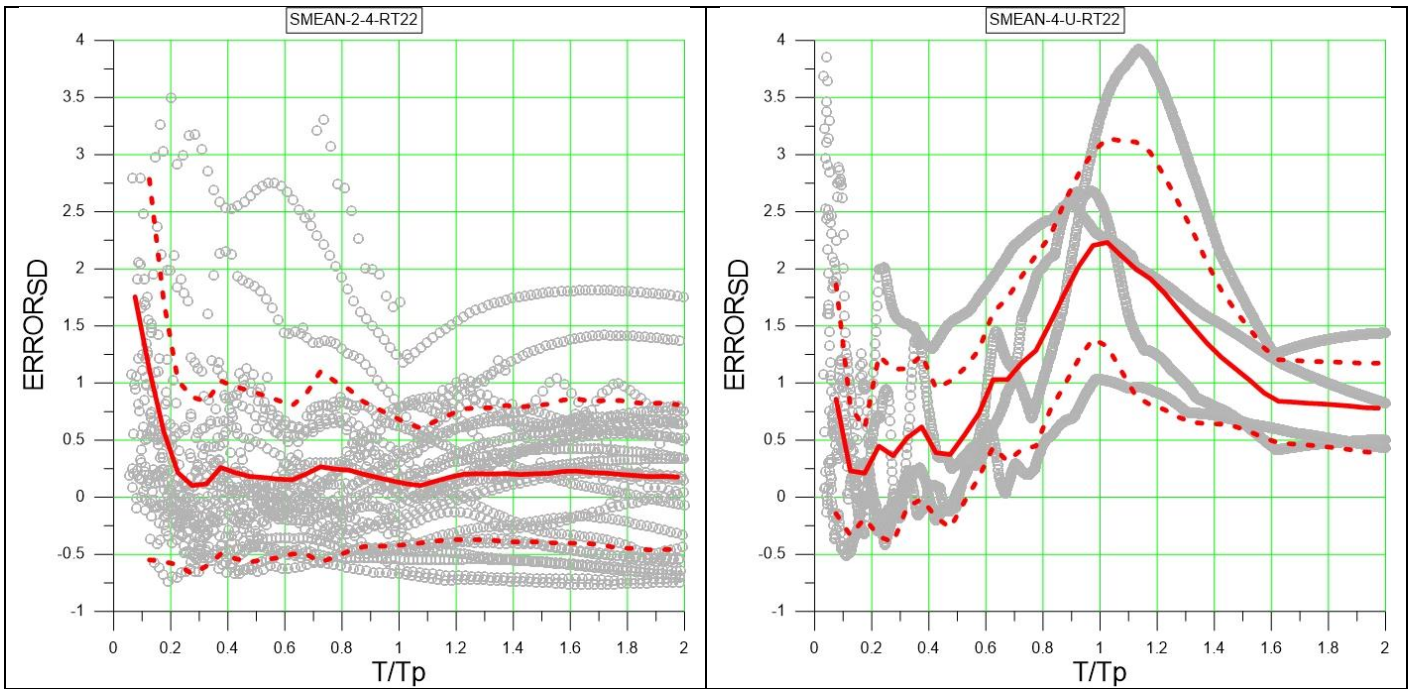




Πίνακας 6. 3 Μέση τιμή  $\pm$  τυπική απόκλιση του λόγου μεταξύ ανελαστικών και ελαστικών φασματικών μετακινήσεων της καταγραφής

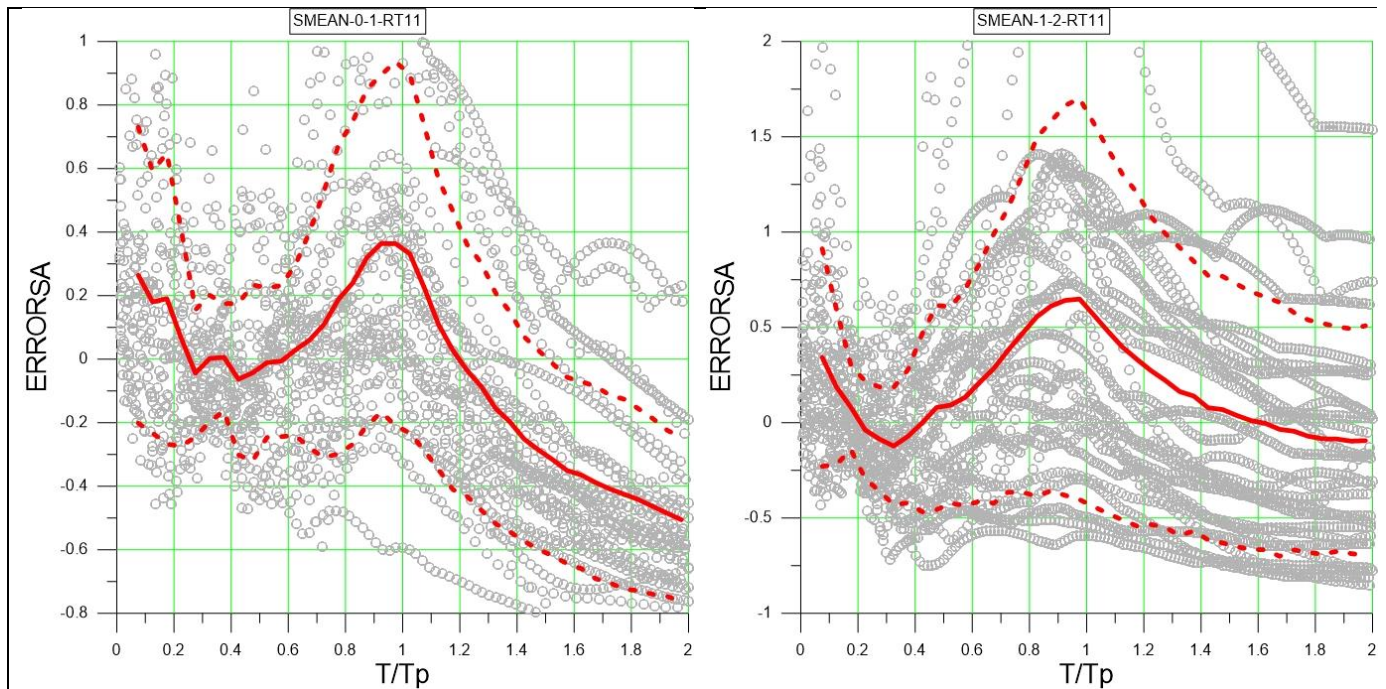
- Συγκρίνοντας τις ανελαστικές φασματικές μετακινήσεις της αρχικής καταγραφής με τις αντίστοιχες του Ευρωκώδικα 8 (για effective acceleration) για λόγο  $T/T_p$  κοντά στο 0,4 προκύπτει απόκλιση της τάξης του 80-100%. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ύπαρξη των υψίσυχνων τμημάτων των καταγραφών για μικρές περιόδους. Άρα, για τις παλμικές καταγραφές ο Ευρωκώδικας φαίνεται να μην επαρκεί και θα πρέπει να γίνει επαύξηση κοντά στο 80-100%



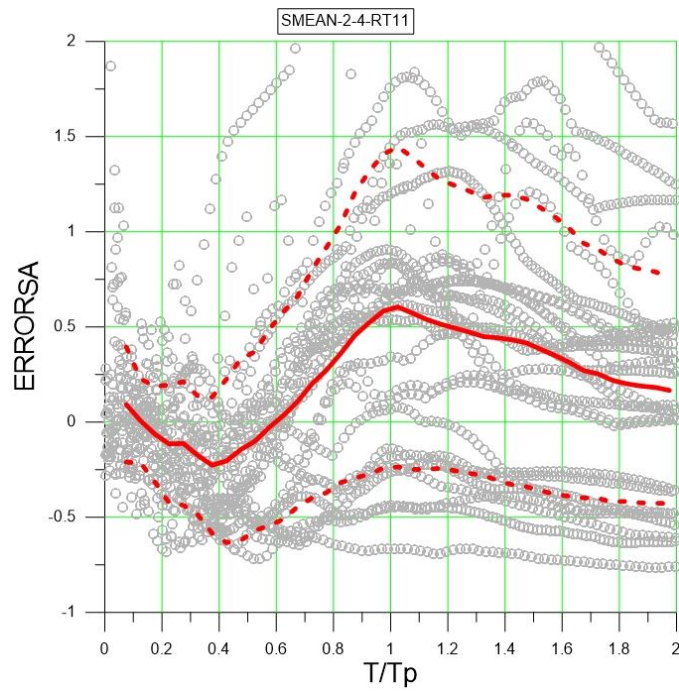


Πίνακας 6. 4 Μέση τιμή  $\pm$  τυπική απόκλιση του σφάλματος μεταξύ των ανελαστικών φασματικών μετακινήσεων της καταγραφής και του EC8 για effective acceleration

- Η απόκλιση ανάμεσα στις φασματικές επιταχύνσεις της αρχικής καταγραφής και του Ευρωκώδικα 8 (για effective acceleration) για περίοδο ίση με αυτή του παλμού ( $T/T_p=1$ ) κυμαίνεται μεταξύ 30-40 % για τις μικρές περιόδους ( $0 < T \leq 1$ ) και 60-70% για τις μεγαλύτερες περιόδους ( $1 < T \leq 4$ ), όπως βλέπουμε στα παρακάτω σχήματα. Συνεπώς, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας επαυξητικός συντελεστής της τάξης του 1,3-1,7 ανάλογα με την περιοχή περιόδων όπου βρισκόμαστε.







**Πίνακας 6. 5 Μέση τιμή ± τυπική απόκλιση του σφάλματος μεταξύ των φασματικών επιταχύνσεων της καταγραφής και του EC8 για effective acceleration**

Να τονίσουμε σε αυτό το σημείο πως, τα φάσματα του Ευρωκώδικα δεν ισχύουν για καταγραφές κοντά στη θέση της διάρρηξης. Ωστόσο, γίνεται σύγκριση των φασμάτων απόκρισης της αρχικής καταγραφής με τα αντίστοιχα του Ευρωκώδικα 8 προκειμένου να προταθούν τροποποιήσεις στα φάσματα αυτά, ώστε να ικανοποιούνται οι αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας στις κατασκευές.

## 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Baker J.W., Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis, 2007.
2. Mavroeidis G., Papageorgiou A., Effect of Fault Rupture Characteristics on Near-Fault Strong Ground Motions, 2010.
3. Mavroeidis G., Papageorgiou A., Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions, 2003
4. Mimoglou P, Psycharis I., Taflampas I., Design-oriented simulation of near fault ground motions by a limited number of velocity pulses, 2014.
5. Vassiliki Kardoutsou, Ioannis Taflampas, Ioannis Psycharis, A New Method for the Classification of Ground Motions as Pulse-Like on Non Pulse Like, 2014.
6. Iunio Iervolino, Allin Cornell, Probability of Occurrence of Velocity Pulses in Near-Source Ground Motions, 2008.
7. 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.101No2, pp.742-755, April 2011
8. Somerville P.G., Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse, Physics of the Earth and Planetary Interiors 137 (2003), 201-212.
9. Adem Doğangün · Ramazan Livaoglu, A comparative study of the design spectra defined by Eurocode 8, UBC, IBC and Turkish Earthquake Code on R/C sample buildings
10. Ιωάννης Ταφλαμπάς, σημειώσεις από το μάθημα Ειδικά Θέματα Τεχνικής Σεισμολογίας
11. 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: 2004.
12. Rodriguez-Marek A., Near-Fault Seismic Site Response, 2000
13. 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.