



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

**Διπλωματική Εργασία**

**Διερεύνηση της επιρροής του εδάφους στα ελαστικά  
φάσματα σχεδιασμού για σεισμούς κοντινού πεδίου**

**Investigation of the influence of soil conditions on the elastic  
design response spectra of near-fault ground motions**

**Καρδούτσου Βασιλική**

**Επιβλέπων: Ι. Ψυχάρης, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π**

**Συνεπιβλέπων: Ι. Ταφλαμπάς, Dr. Πολιτικός Μηχανικός**

**Αθήνα, Οκτώβριος 2011**





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

**Διπλωματική Εργασία**

**Διερεύνηση της επιρροής του εδάφους στα ελαστικά  
φάσματα σχεδιασμού για σεισμούς κοντινού πεδίου**

**Investigation of the influence of soil conditions on the elastic  
design response spectra of near-fault ground motions**

**Καρδούτσου Βασιλική**

**Επιβλέπων: Ι. Ψυχάρης, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π**

**Συνεπιβλέπων: Ι. Ταφλαμπάς, Dr. Πολιτικός Μηχανικός**

**Αθήνα, Οκτώβριος 2011**



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

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

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

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

Στην υποψήφια διδάκτορα κ. Σοφία Κουσίδη για τις συμβουλές και την πολύτιμη βοήθεια της.

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



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη διερεύνησης των παραμέτρων που επηρεάζουν τα φάσματα επιτάχυνσης καθώς και τη σεισμική διέγερση στο κοντινό πεδίο του σεισμού είναι ιδιαίτερα επιτακτική.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, διερευνάται η επιρροή του εδάφους σε 179 σεισμικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου οι οποίες χαρακτηρίζονται ως παλμικές, δηλαδή παρουσιάζουν παλμό κατευθυντικότητας στη χρονοϊστορία ταχύτητας της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας. Επίσης εξετάζεται κατά πόσο το ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης του Ευρωκώδικα 8 (EC8) καλύπτει τις διεγέρσεις κοντινού πεδίου και εάν η επαύξηση του φάσματος του EC8 με τον τύπο των Shahi-Baker (2011) μπορεί να εφαρμοστεί.

Οι καταγραφές στράφηκαν προκειμένου να υπολογιστεί η κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της κάθε εδαφικής κίνησης. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η δεσπόζουσα περίοδος παλμού  $T_p$  η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή φασματικής μετακίνησης για απόσβεση 5%. Με τη χρήση του προγράμματος Seismosignal εξήχθησαν τα ελαστικά φάσματα επιτάχυνσης για συντελεστή απόσβεσης 5%, τα οποία κανονικοποιούνται καταλλήλως προκειμένου να εξάγουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Επίσης υπολογίστηκε και χρησιμοποιήθηκε και η δεσπόζουσα περίοδος του παλμού όπως την υπολογίζει ο τύπος των Shahi-Baker (2011).

Επόμενος στόχος είναι ο υπολογισμός του συντελεστή εδάφους  $S$  και η σύγκρισή του με τις τιμές του EC8 για κάθε κατηγορία εδάφους. Για τον σκοπό αυτό γίνεται διάκριση των καταγραφών σύμφωνα με τις κατηγορίες εδάφους του EC8. Για τις καταγραφές αυτές η σεισμική κίνηση εξάγεται στο βραχώδες υπόβαθρο (bedrock) και στη συνέχεια στον βράχο ελεύθερης επιφάνειας (rock outcrop) με τη βοήθεια της Ισοδύναμης Γραμμικής Μεθόδου (πρόγραμμα SHAKE2000).





## ABSTRACT

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

A total of 179 recordings in the Next Generation Attenuation (NGA) database, where a pulselike ground motion is observed in at least one orientation, were studied. The scope was to investigate if the relevant response spectra of Eurocode 8 (EC8) and the amplification of its acceleration proposed by Shahi-Baker (2011) can be applied in case of near-fault ground motions.

The ground motions were rotated in the proper orientation in order to obtain the fault-normal component. The value of the pulse period  $T_p$  for each earthquake was determined from the period that corresponds to the peak value of the related displacement response spectrum for 5% damping. The acceleration response spectra for 5% damping were computed using the Seismosignal software. In order to obtain the targeted results, the above-mentioned response spectra have been properly processed. In addition, the value of the pulse period  $T_p$  proposed by Shahi-Baker (2011) has been applied for the calculation of the response spectra amplification.

Moreover the SHAKE2000 software was used in order to estimate the bedrock and the rock outcrop motions corresponding to soil classes A to D of EC8. Finally, the  $S$  factor of these recordings was computed and it was compared with the relevant of EC8.



## EXTENDED SUMMARY

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

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

The effect of near-fault strong velocity pulses on the response spectra is summarized in the recent research of Shahi-Baker (2011), in which the shapes of response spectra are presented and compared with those evaluated from the New Generation Attenuation (NGA) formulas. It was found that the spectra affected by directivity pulse differ from the average NGA spectra and present a bell shaped amplification, 3 to 4 times larger than of the average spectra. Shahi-Baker propose a mean amplification function that forms a bell shaped pattern centered near to  $T/T_p=1$ . Additionally, they determine the formula between pulse period  $T_p$  and magnitude of the earthquake.

A total of 179 recordings in the Next Generation Attenuation (NGA) database, where a pulslike ground motion is observed in at least one orientation, were used in this study. The scope is to investigate if the relevant response spectra of Eurocode 8 (EC8) and the amplification of its acceleration proposed by Shahi-Baker) can be applied in case of near-fault ground motions.

The ground motions were rotated in the proper orientation in order to obtain the fault-normal component. The value of the pulse period  $T_p$  for each earthquake was determined from the period that corresponds to the peak value of the related displacement response spectrum for 5% damping. It should be noticed that the rotation procedure did not alter or altered slightly the predominant periods  $T_p$  of the corresponding response spectra.

The acceleration response spectra, for 5% damping, at the soil surface, were computed using the Seismosignal software. All the recordings were categorized following the soil classification of Eurocode 8 (namely A, B, C, D and E) based on the value of  $V_{s30}$ . Furthermore, the response spectra have been grouped according to the magnitude of the earthquake with a step of 0.5 M. In order to obtain the targeted results, the above-mentioned response spectra have been properly

processed. In addition, the value of the pulse period  $T_p$ , proposed by Shahi-Baker (2011), has been applied for the calculation of the response spectra amplification. Two methods of normalization were used in order to produce and compare the elastic response spectra. The first method involved dividing the values of the elastic response spectra by the corresponding peak ground acceleration (PGA) of the surface motion. A similar method was applied to the Eurocode spectra. In this case the acceleration spectra were normalized with respect to the corresponding peak soil acceleration, where  $a_{gs}=S \cdot a_{gr}$ . In the second method of normalization the elastic response spectra were divided by the corresponding values of EC8. Some of the results have also been normalized with respect to the pulse period  $T_p$ .

Using the formula of Shahi-Baker (2011), the pulse period  $T_p$  was estimated. The elastic response spectra of EC8, corresponding to each group of results, were amplified following the function proposed by Shahi-Baker. The amplification was evaluated with two methods: (1) using the real  $T_p$  of the recordings, and (2) using the evaluated  $T_p$  by Shahi – Baker. The results are presented in three groups.

The first one presents the elastic response spectra, the corresponding of EC8 spectra and those amplified using the function of Shahi-Baker. The above-mentioned spectra are normalized with respect to PGA. The second group is similar to the first one but it is also normalized with respect to pulse period  $T_p$ . The third group presents the elastic response spectra of the 179 recordings, normalized with respect to the corresponding spectra of EC8.

The computation of the  $S$  factor was also one of the targets of this study. The SHAKE2000 software was used in order to estimate the bedrock and the rock outcrop motions corresponding to soil classes A to D of EC8. Each profile was considered of uniform unit weight  $\gamma$ , and shear wave velocity  $V_s$ . The  $V_s$  velocity was the given one from the NGA database. In all cases the soil consisted of 30 m of total thickness. The computed  $S$  factor was finally compared with the relevant of EC8.

The results are presented in two groups, (1) with respect to the elastic spectra and (2) with respect to the  $S$  factor.

## **ELASTIC RESPONSE SPECTRA**

- The amplification of the spectral acceleration of Eurocode 8 around the predominant period of the pulse proposed by Shahi-Baker for near-fault earthquakes of  $M = 5.00-5.50$  and  $5.50-6.00$  magnitude gives much higher spectral values than the real ones, regardless of soil type.

- The Eurocode elastic spectra for near-fault earthquakes of  $M = 5.00-5.50$  and  $5.50-6.00$  magnitude appear to be sufficient and cover the actual recordings.
- For large earthquakes of  $M = 7.50-8.00$  magnitude, Eurocode 8 spectrum is insufficient. Nor any amplification of Shahi-Baker can cover the actual bell that is formed around the pulse.
- The amplification of the spectral acceleration of Eurocode 8 applies sufficiently for near-fault earthquakes of  $M = 6.00-6.50$  magnitude, regardless of soil type.
- For the near-fault earthquakes of  $M = 6.00-7.00$  magnitude, the Eurocode 8 amplified by the function of Shahi-Baker, is sufficient for periods longer than 1sec. In the region of 0-1 sec, where the usual constructions belong to, is inadequate.
- Regardless of soil type, the period of the pulse calculated by the formula of Shahi-Baker approximates the actual predominant period of the pulse, as the magnitude of the earthquake increases.
- In all recordings, regardless of the earthquake magnitude and soil type, a "bell" is formed in the acceleration spectra for 5% damping around the predominant period of the pulse.
- In the near-fault earthquakes of  $M = 6.5-7.00$  magnitude, the average amplification due to the size of the earthquake tends to one. This means that the spectrum of EC8 can be applied in cases where no directivity pulse exists.
- For near-fault earthquakes of  $M = 5.00-7.00$  magnitude, EC8 seems that the amplification proposed by Shahi-Baker is sufficient to cover the average values of the actual recordings.
- Regardless of soil type and earthquake magnitude, the average amplification, due to the presence of the pulse, is almost always less than or close to value 3,068 which is the value given by Shahi-Baker for  $T = T_p$ .

## **S FACTOR**

- For soil classification B, the actual value of the S factor is greater than that of EC8 in periods of 0-1 sec. At longer periods it takes a constant value which is less than the value of EC8.
- For soil classification C, the actual value of the S factor is greater than that of EC8 in periods of 0-2 sec. At longer periods the EC8 gives a value that approximates well the reality.
- For soils D reliable conclusions cannot be drawn, due to the small number of recordings, which belong to this soil category. However, the range of periods

where the S factor is greater than the corresponding value of EC8 has become 0-3 sec in this case.

- As we move from category B to D, the area where the S factor is larger than the relevant of EC8, becomes larger.
- The average value of the S factor of the ground, namely the one corresponding to  $T = 0$  sec, is less than that of EC8, regardless of soil type. Specifically, for soil class B, C and D the S factor equals 1, 0.81 and 0.42 respectively.
- As we move from category B to D, the value of the S factor of the ground decreases.
- In the range of periods  $T = 0-2$  s, for both B and C soil classes the recordings that give very large values of the S factor are those belonging to earthquakes of low magnitude. Conversely, the recordings of earthquakes of high magnitude give a small value of S factor. This may be due to the fact that in large earthquakes the ground becomes more plastic and therefore the seismic motion is attenuated.

## ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται συνολικά σε 7 κεφάλαια και 1 παράρτημα.

Στο πρώτο κεφάλαιο, αναλύονται εκτενώς τα χαρακτηριστικά που διακρίνουν τις σεισμικές κινήσεις κοντινού πεδίου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα νέα μοντέλα απομείωσης της εδαφικής κίνησης και το πρόγραμμα NGA.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται ανάπτυξη της επίδρασης της κατευθυντικότητας στις σχέσεις κοντινού πεδίου και παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης των Shahi-Baker.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφεται συνοπτικά ο αντισεισμικός σχεδιασμός Ευρωκώδικας 8 (EC8), με έμφαση στις εδαφικές συνθήκες και στη σεισμική δράση.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, διερευνάται η επιρροή του εδάφους στα φάσματα σχεδιασμού για σεισμούς κοντινού πεδίου και εξάγονται τα ελαστικά φάσματα επιτάχυνσης 179 καταγραφών που έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές. Με κατάλληλη κανονικοποίηση παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα.

Στο έκτο κεφάλαιο, γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή εδάφους  $S$  για τις κατηγορίες εδάφους του κανονισμού και συγκρίνεται με την αντίστοιχη τιμή του EC8.

Στο έβδομο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

Στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας, δίνεται ο πίνακας με τα στοιχεία των καταγραφών, τα ελαστικά φάσματα απόκρισης για συντελεστή απόσβεσης 5% και συμπληρωματικά διαγράμματα.





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

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

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

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

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

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

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

### Κεφάλαιο 4 – ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ: ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 8

4.1	Εισαγωγή	57
4.2	Εδαφικές συνθήκες και σεισμική δράση	58
4.2.1	Εδαφικές συνθήκες και κατηγορίες εδάφους	58
4.2.2	Η σεισμική δράση	59

**Κεφάλαιο 5 – ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ**

5.1 Εισαγωγή	65
5.2 Ελαστικά φάσματα απόκρισης -Περιγραφή υπολογιστικής διαδικασίας	65
5.2.1 Αποτελέσματα	67

**Κεφάλαιο 6 – ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ S**

6.1 Εισαγωγή	85
6.2 Περιγραφή της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης της εδαφικής απόκρισης μέσω του προγράμματος SHAKE2000	86
6.3 Παραδοχές ανάλυσης και προσομοίωση των κατηγοριών εδάφους	89
6.4 Περιγραφή υπολογιστικής διαδικασίας	91
6.5 Αποτελέσματα επιλύσεων	92

**Κεφάλαιο 7 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ** 95**ΑΝΑΦΟΡΕΣ****ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

## ΠΙΝΑΚΕΣ

<b>Πίνακας 1.1:</b> Παράγοντες που χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις απλοποιημένες εδαφικές κινήσεις ημιτονικού παλμού (Rodriguez - Marek 2000)	10
<b>Πίνακας 1.2:</b> Τροποποίηση παραμέτρων εδαφικής κίνησης για την εκτίμηση της επίδρασης της κατευθυντικότητας. Οι παράμετροι $X$ , $Y$ , $\theta$ , $\phi$ ορίστηκαν στο σχήμα 1. 5. Οι τροποποιήσεις φαίνονται στο σχήμα 1.	14
<b>Πίνακας 1.3:</b> Παράμετροι του μοντέλου Rodriguez - Marek (2000) για την PHV	15
<b>Πίνακας 1.4:</b> Παράμετροι του μοντέλου Rodriguez-Marek (2000) για την περίοδο του παλμού	17
<b>Πίνακας 1.5:</b> Αριθμός παλμών ( $N_v$ ) για 48 κινήσεις κοντινού πεδίου (κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα). Οι τιμές στις παρενθέσεις είναι οι αριθμοί των ημικύκλων του παλμού της ταχύτητας που έχουν εύρη τουλάχιστον 33% της PHV. (Rodriguez-Marek 2000)	19
<b>Πίνακας 4.1:</b> Κατάταξη εδαφών κατά EC8	58
<b>Πίνακας 4.2:</b> Τιμές της επιτάχυνσης στο βράχο ανάλογα με τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας	59
<b>Πίνακας 4.3:</b> Τιμές του συντελεστή $\gamma_i$ ανάλογα με την κατηγορία σπουδαιότητας	60
<b>Πίνακας 4.4:</b> Τιμές του συντελεστή $S$ και των περιόδων $T_B$ , $T_C$ , και $T_D$ ανάλογα με την κατηγορία του εδάφους	60
<b>Πίνακας 6.1:</b> Φαινόμενα βάρη τυπικών εδαφών (Παπαχαρίσης και συν., 1999)	91

## ΣΧΗΜΑΤΑ

<b>Σχήμα 1.1:</b> Σχηματικό διάγραμμα επίδρασης της κατευθυντικότητας της διάρρηξης για οριζόντιο ρήγμα ολίσθησης. Η διάρρηξη αρχίζει στο υπόκεντρο και διαδίδεται με ταχύτητα περίπου ίση με το 80% της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Η εικόνα παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο του μετώπου της ρήξης σε μια δεδομένη στιγμή (από Somerville et al 1997a).	4
<b>Σχήμα 1.2:</b> Αποτελέσματα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες μετακινήσεων του σεισμού του Loma Prieta του 1989 για τις κάθετες (άνω) και τις παράλληλες (κάτω) στο ρήγμα συνιστώσες. EERI, 1995.	5

- Σχήμα 1.3:** Σχηματικό διάγραμμα των προσανατολισμών της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και για ρήγμα κατακόρυφης βύθισης 6
- Σχήμα 1.4:** Σχηματικό διάγραμμα των χρονοϊστοριών για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα κατακόρυφης βύθισης στο οποίο η παραμένουσα μετακίνηση και ο παλμός κατευθυντικότητας παρουσιάζονται μαζί και χωριστά 6
- Σχήμα 1.5:** Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να ερμηνεύσουν τις συνθήκες κατευθυντικότητας της διάρρηξης (Somerville et al 1997a) 8
- Σχήμα 1.6:** Προβλέψεις από τη σχέση των Somerville et al (1997a) μεταξύ διαφορετικών συνθηκών κατευθυντικότητας 8
- Σχήμα 1.7:** Απλοποιημένοι παλμοί που έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές 9
- Σχήμα 1.8:** Παράγοντες που χρειάζονται για να καθορίσουν την παράλληλη και την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα για απλοποιημένους παλμούς ταχύτητας. Τα σύμβολα N, P αντιστοιχούν στις κάθετες και παράλληλες κινήσεις ως προς τη διεύθυνση του ρήγματος αντίστοιχα (Rodriguez - Marek 2000) 11
- Σχήμα 1.9:** Χρονοϊστορίες ταχύτητας και οριζόντια τροχιακά σχέδια για κάθετη (FN) και παράλληλη (FP) στο ρήγμα συνιστώσα για δυο καταγραφές κοντινού πεδίου. Και οι δυο καταγραφές παρουσιάζουν σημαντικές «κάθετες» ταχύτητες αλλά το Meloland έχει σχετικά μικρότερες «παράλληλες» ταχύτητες 11
- Σχήμα 1.10:** Απλοποιημένη αναπαράσταση ημιτονικού παλμού για εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Η PHV (μέγιστη οριζόντια ταχύτητα) για παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα αντιστοιχεί στο 50% της PHV κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (Rodriguez-Marek 2000) 12
- Σχήμα 1.11:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης για εκτίμηση της PHV με σχέσεις προτεινόμενες από διάφορους ερευνητές με στοιχεία από βάσεις δεδομένων σεισμών κοντινού πεδίου και με το φαινόμενο της εμπρόσθιας κατευθυντικότητας (Rodriguez - Marek 2000) 16
- Σχήμα 1.12:** Σύγκριση μοντέλου Rodriguez-Marek (2000) με σχέσεις που αναπτύχθηκαν από Somerville (1998) για την Tv και από Alavi και Kranwinkler (2000) για την Tv-p (Rodriguez-Marek 2000) 18
- Σχήμα 1.13:** Μοντέλο Rodriguez-Marek για την εκτίμηση της περιόδου του παλμού για βράχο και έδαφος. Οι έντονες καμπύλες αναπαριστούν τη μέση τιμή και οι λεπτές τις τυπικές αποκλίσεις (Rodriguez-Marek 2000) 18
- Σχήμα 1.14α:** Καταγραφές παλμών ταχύτητας στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα τριών σεισμών μέτριου μεγέθους (αριστερή στήλη) και τριών σεισμών μεγάλου μεγέθους (δεξιά στήλη) σχεδιασμένοι σε ίδια κλίμακα 20

<b>Σχήμα 1.14β:</b> Αντίστοιχα φάσματα των χρονοϊστοριών του σχήματος 14 α συγκρινόμενα με τον κανονισμό UBC 1994	21
<b>Σχήμα 1.15:</b> Φασματικές ταχύτητες παλμών κάθετα στο ρήγμα ενδιάμεσων (αριστερά) και ισχυρότερων (δεξιά) σεισμών	22
<b>Σχήμα 1.16:</b> Φασματικές μετακινήσεις παλμών στην κάθετη συνιστώσα του ρήγματος ενδιάμεσων (αριστερά) και ισχυρών (δεξιά) σεισμών	23
<b>Σχήμα 1.17:</b> Διαβάθμιση με το μέγεθος απλών παλμών ταχύτητας που αντιπροσωπεύουν κινήσεις κοντινού πεδίου (αριστερά) και τα αντίστοιχα φάσματα επιταχύνσεων (κέντρο) και ταχυτήτων (δεξιά)	24
<b>Σχήμα 1.18:</b> Μοντέλο φασματικής απόκρισης κοντινού πεδίου σε απόσταση 5km για βράχο (αριστερά) και εδαφικό σχηματισμό (δεξιά). Πάνω: μοντέλο χωρίς κατευθυντικότητα των Abrahamson & Silva (1997), μέση: μοντέλο διευρυμένης συχνότητας κατευθυντικότητας των Somerville et al (1997) και κάτω: μοντέλο κατευθυντικότητας σε στενή ζώνη συχνοτήτων του Somerville (2003)	25
<b>Σχήμα 2.1:</b> Κατανομή καταγραφών εδαφικής κίνησης της νέας βάσης δεδομένων ανάλογα με το μέγεθος και την απόσταση από το ρήγμα	30
<b>Σχήμα 3.1:</b> Απεικόνιση της διαδικασίας που χρησιμοποιεί ο Baker (2007) για την αποκοπή του μεγαλύτερου παλμού από τη χρονοϊστορία ταχυτήτων (εδώ παρουσιάζεται η χρονοϊστορία του σεισμού στο Imperial Valley, El Centro 1979). Στην περίπτωση αυτή ο παλμός είναι μεγάλος και η εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται ως παλμική	39
<b>Σχήμα 3.2:</b> Τιμές συντελεστή εμφάνισης παλμού ως συνάρτηση της διεύθυνσης για το σεισμό Imperial Valley, El Centro 1979. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή υποδεικνύει τις διευθύνσεις στις οποίες η παλμική κίνηση είναι εμφανής	40
<b>Σχήμα 3.3:</b> Φάσμα απόκρισης από το σεισμό Imperial Valley, El Centro 1979 σε κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα. Η μέση πρόβλεψη των Boore και Atkinson (2007) και η φασματική απόκριση για την απομένουσα εδαφική κίνηση παρουσιάζονται επίσης	44
<b>Σχήμα 3.4:</b> Σχήμα που επεξηγεί τις απαιτούμενες παραμέτρους για τη λογιστική παλινδρόμηση για (α) ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και (b) ρήγμα μη οριζόντιας ολίσθησης. Παρουσιάζεται επίσης η γωνία $\alpha$ μεταξύ της διεύθυνσης ενδιαφέροντος και της διεύθυνσης του ρήγματος	45
<b>Σχήμα 3.5:</b> Χάρτης του σεισμού του Imperial Valley που απεικονίζει (α) ισοϋψείς πιθανότητας εμφάνισης παλμού για δεδομένη διάρρηξη και (b) περιοχές όπου παρατηρήθηκε παλμική εδαφική κίνηση	46
<b>Σχήμα 3.6:</b> Χάρτης του σεισμού του Northridge που απεικονίζει (α) ισοϋψείς πιθανότητας εμφάνισης παλμού για δεδομένη διάρρηξη και (b) περιοχές όπου παρατηρήθηκε παλμική εδαφική κίνηση	46

<b>Σχήμα 3.7:</b> Απεικόνιση της πιθανότητας εμφάνισης παλμού σε γωνία $\alpha$ δεδομένου του παλμού σε κάποια θέση για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και μη	48
<b>Σχήμα 3.8:</b> Περίοδος του παλμού σχετιζόμενη με το σεισμικό μέγεθος για εδαφικές κινήσεις χαρακτηριζόμενες ως παλμικές	49
<b>Σχήμα 3.9:</b> Παρατηρούμενες τιμές $\varepsilon$ της απομένουσας εδαφικής κίνησης	50
<b>Σχήμα 3.10:</b> Συντελεστής ενίσχυσης των φασματικών επιταχύνσεων λόγω της παρουσίας των παλμικών χαρακτηριστικών στις εδαφικές κινήσεις. (α) γραφική παράσταση των παραγόμενων εξισώσεων μαζί με τις παρατηρήσεις πεδίου και (b) μέση ενίσχυση λόγω της καταγραφής παλμών σε διάφορες διευθύνσεις	51
<b>Σχήμα 3.11:</b> της τυπικής απόκλισης των υπολοίπων από προβλέψεις του παλμικού φάσματος $\sigma_{InSa,pulse}$ προς την τυπική απόκλιση $\sigma_{InSa,gmm}$ του μοντέλου των Boore και Atkinson (2008).	53
<b>Σχήμα 4.1:</b> Ελαστικό Φάσμα Απόκρισης EC8	61
<b>Σχήμα 5.A1-5.A15:</b> Κανονικοποιημένα Ελαστικά Φάσματα Επιτάχυνσης για απόσβεση 5% στον κατακόρυφο άξονα – Επαύξηση Shahi-Baker	68-72
<b>Σχήμα 5.B1-5.B15:</b> Κανονικοποιημένα Ελαστικά Φάσματα Επιτάχυνσης για απόσβεση 5% και ως προς τους δύο άξονες- Επαύξηση Shahi-Baker	73-77
<b>Σχήμα 5.Γ1-5.Γ153:</b> Ελαστικά Φάσματα Επιτάχυνσης για απόσβεση 5% διαιρεμένα με το ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης του EC8 – κανονικοποιημένα και ως προς τους δύο άξονες	78-82
<b>Σχήμα 6.1:</b> Χαρακτηριστικές ονομασίες σεισμικών κινήσεων ανάλογα με τη θέση στην οποία αναφέρονται	85
<b>Σχήμα 6.2:</b> Η προσομοίωση στην ισοδύναμη γραμμική μέθοδο και τα χαρακτηριστικά μεγέθη των εδαφικών στρωμάτων (Manual SHAKE2000)	86
<b>Σχήμα 6.3:</b> Διάγραμμα ροής της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης (SHAKE2000)	88
<b>Σχήμα 6.4:</b> Καμπύλες απομείωσης του μέτρου δυστημψίας του εδάφους για διάφορα εδαφικά υλικά	90
<b>Σχήμα 6.5:</b> Καμπύλες αύξησης του ποσοστού απόσβεσης του εδάφους για διάφορα εδαφικά υλικά	90
<b>Σχήμα 6.6:</b> Συντελεστής εδάφους S συναρτήσει της περιόδου για εδάφη κατηγορίας B	92
<b>Σχήμα 6.7:</b> Συντελεστής εδάφους S συναρτήσει της περιόδου για εδάφη κατηγορίας C	93
<b>Σχήμα 6.8:</b> Συντελεστής εδάφους S συναρτήσει της περιόδου για εδάφη κατηγορίας D	93

# Κεφάλαιο 1

## ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

---

### 1.1 Εισαγωγή

1.1.1 Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας

1.1.2 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου

### 1.2 Μοντέλα προσομοίωσης σεισμών κοντινού πεδίου

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





## 1.1 Εισαγωγή

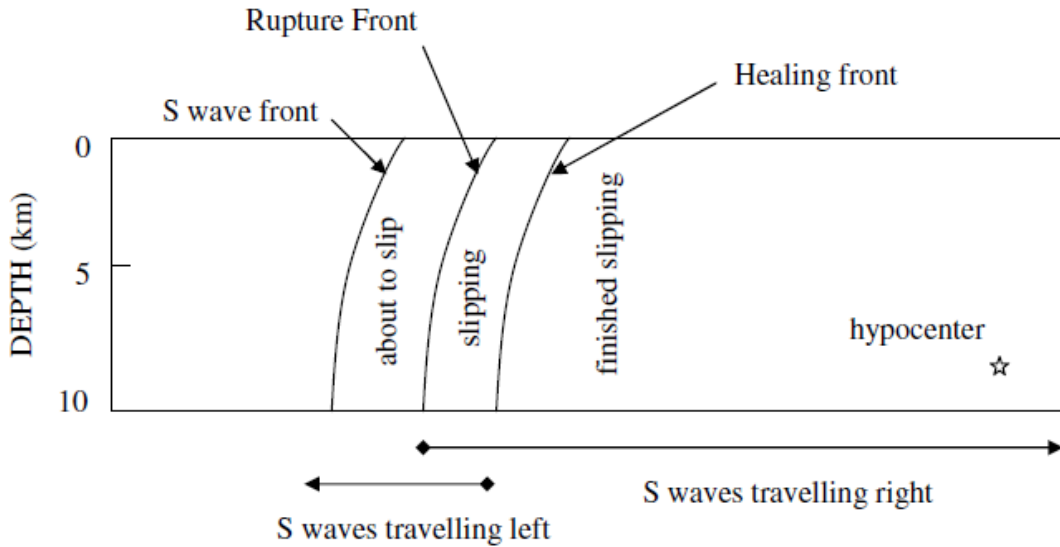
Οι εδαφικές κινήσεις κοντά σ' ένα ρήγμα μπορεί διαφέρουν σημαντικά από εκείνες που βρίσκονται μακριά από αυτό. Στην περιοχή που βρίσκεται κοντά στη σεισμική πηγή τα στοιχεία της εδαφικής κίνησης καθορίζονται από το μηχανισμό διάρρηξης, την κατεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης σε σχέση με την περιοχή και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

### 1.1.1 Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας

Η έμπροσθεν κατευθυντικότητα (forward directivity) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η διάδοση της διάρρηξης και η κατεύθυνση της ολίσθησης στο ρήγμα γίνονται προς την ίδια περιοχή. Αυτό συμβαίνει επειδή η ταχύτητα της διάρρηξης στο ρήγμα είναι σχεδόν ίδια με την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων του βράχου κοντά στην πηγή. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1.1 για μηχανισμό οριζόντιας ολίσθησης όπου το μέτωπο της διάρρηξης διαδίδεται μακριά από το υπόκεντρο και προς μια περιοχή, η ενέργεια συσσωρεύεται κοντά στο μέτωπο διάρρηξης από κάθε διαδοχική ζώνη της ολίσθησης κατά μήκος του ρήγματος. Το μέτωπο των κυμάτων φθάνει ως ένας μεγάλος παλμός της κίνησης που χαρακτηρίζεται από μεγάλο εύρος ανάμεσα στις μεγάλες περιόδους και τη μικρή διάρκεια.

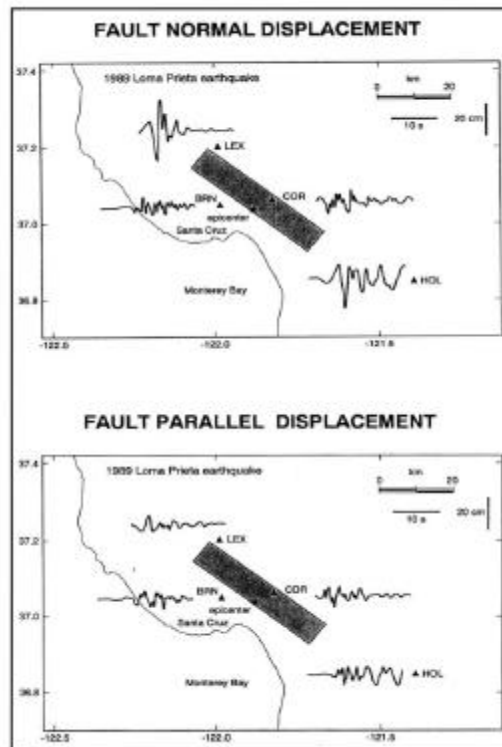
Στην περίπτωση που η διάδοση της διάρρηξης είναι αντίθετη από την μελετούμενη περιοχή, η άφιξη κάθε παλμού επιμέρους σεισμικής διάρρηξης γίνεται στο τέλος του προηγούμενου του. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται όπισθεν κατευθυντικότητα (backward directivity) και χαρακτηρίζεται από κινήσεις με σχετικά μεγάλη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

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



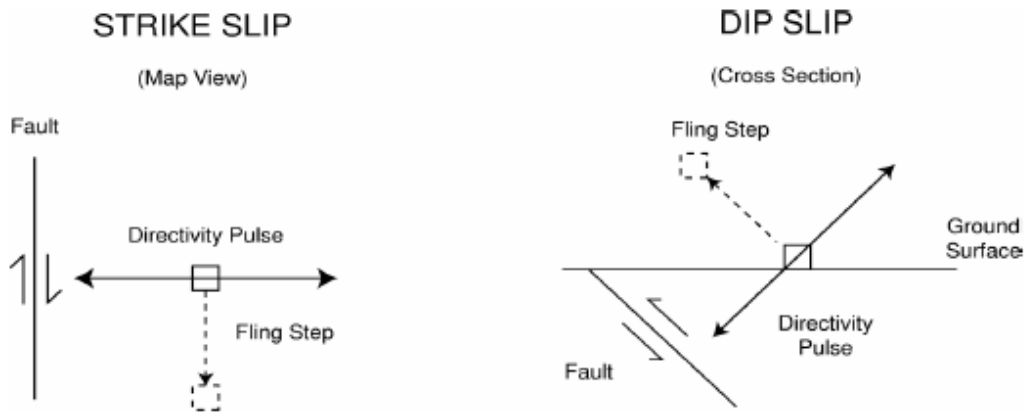
**Σχήμα 1.1:** Σχηματικό διάγραμμα επίδρασης της κατευθυντικότητας της διάρρηξης για οριζόντιο ρήγμα ολίσθησης. Η διάρρηξη αρχίζει στο υπόκεντρο και διαδίδεται με ταχύτητα περίπου ίση με το 80% της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Η εικόνα παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο του μετώπου της ρήξης σε μια δεδομένη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

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

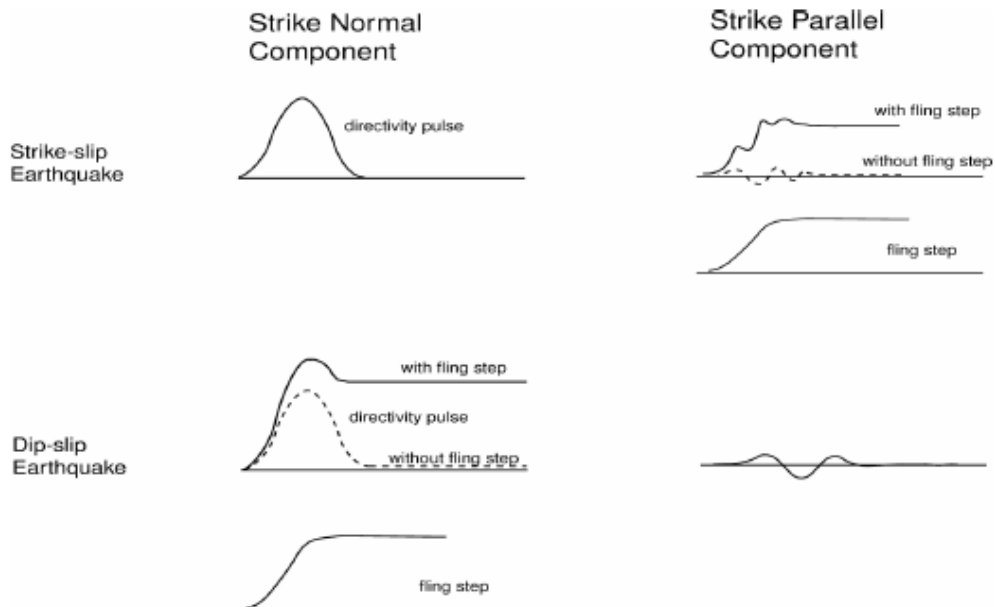


**Σχήμα 1.2:** Αποτελέσματα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες μετακινήσεων του σεισμού του Loma Prieta του 1989 για τις κάθετες (άνω) και τις παράλληλες (κάτω) στο ρήγμα συνιστώσες. EERI, 1995.

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



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

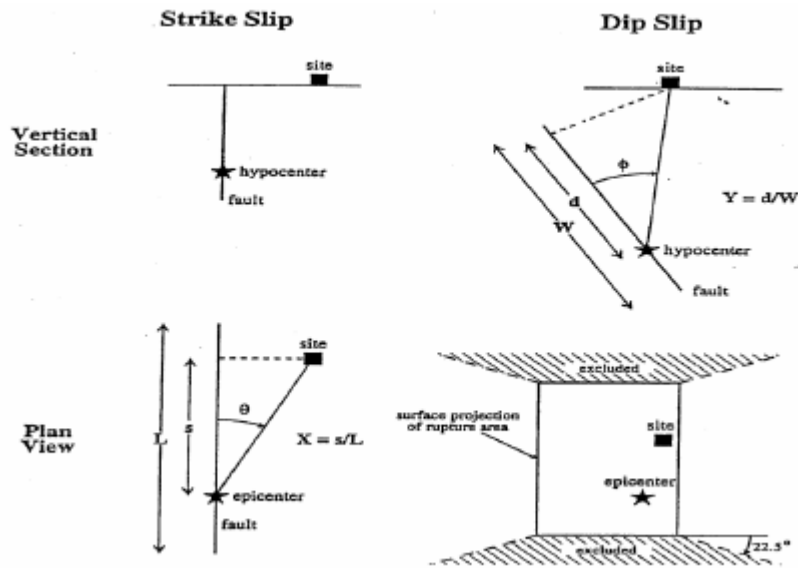


**Σχήμα 1.4:** Σχηματικό διάγραμμα των χρονοϊστοριών για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα κατακόρυφης βύθισης στο οποίο η παραμένουσα μετακίνηση και ο παλμός κατευθυντικότητας παρουσιάζονται μαζί και χωριστά

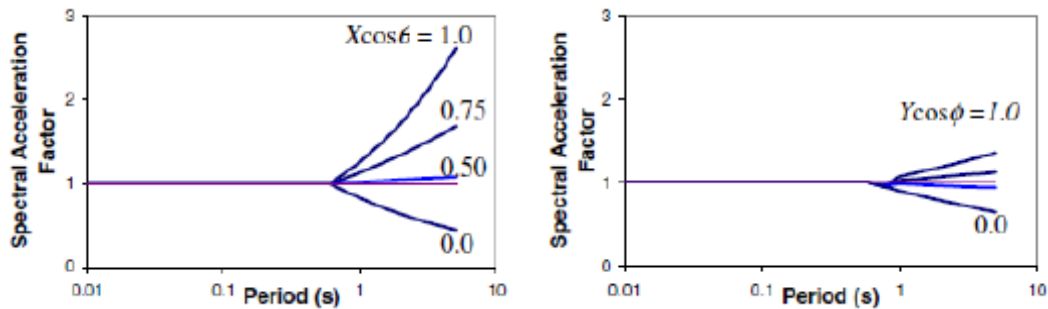
### 1.1.2 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου

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

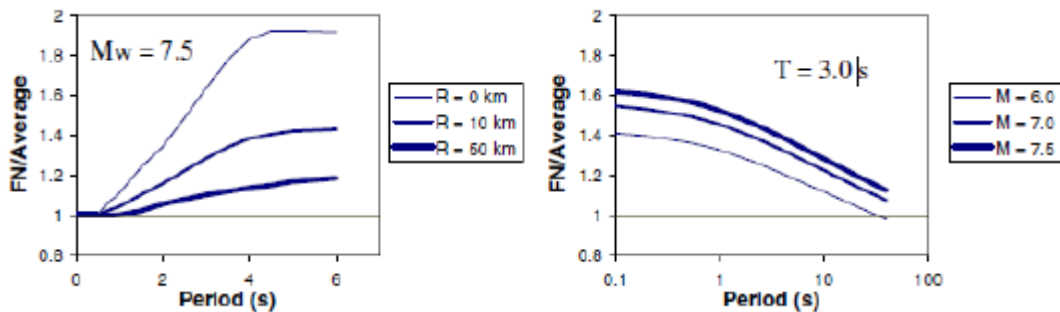
Για να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα της κατευθυντικότητας οι Somerville et al (1997a) συσχέτισαν τις ανηγμένες προς ένα μέσο φάσμα τιμές των φασμάτων απόκρισης (με 5% απόσβεση) με τις γεωμετρικές παραμέτρους που καθορίζονται στο σχήμα 1.5. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 1.6. Οι παράμετροι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



Σχήμα 1.5: Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να ερμηνεύσουν τις συνθήκες κατευθυντικότητας της διάρρηξης (Somerville et al 1997a)



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



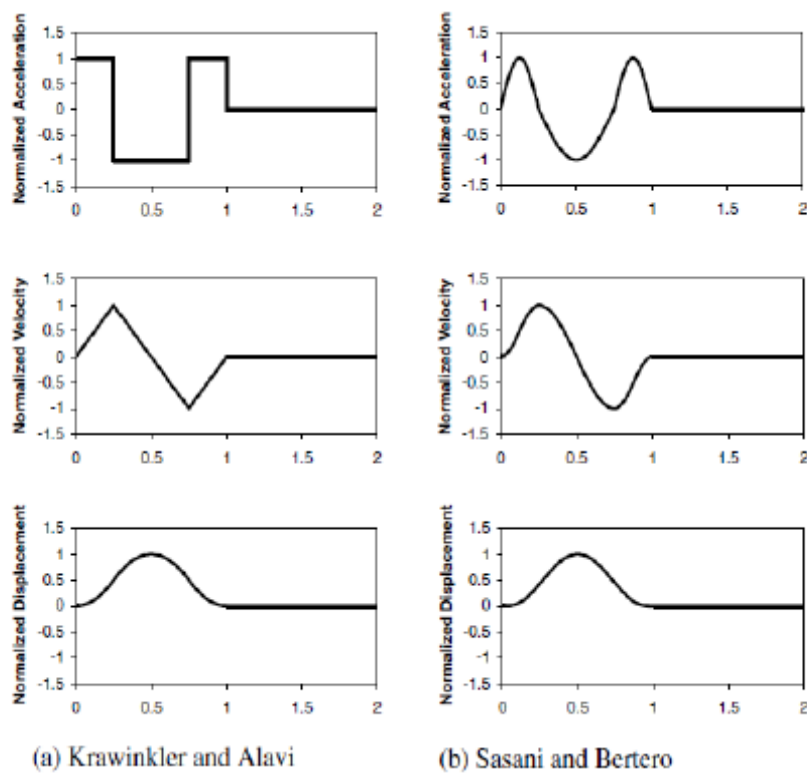
β) Αναλογία οριζόντιας φασματικής απόκρισης κάθετη στη ρήξη προς τη μέση οριζόντια για συνθήκες εμπρόσθιας κατευθυντικότητας ( $X\cos\theta=1$ ).

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

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

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

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



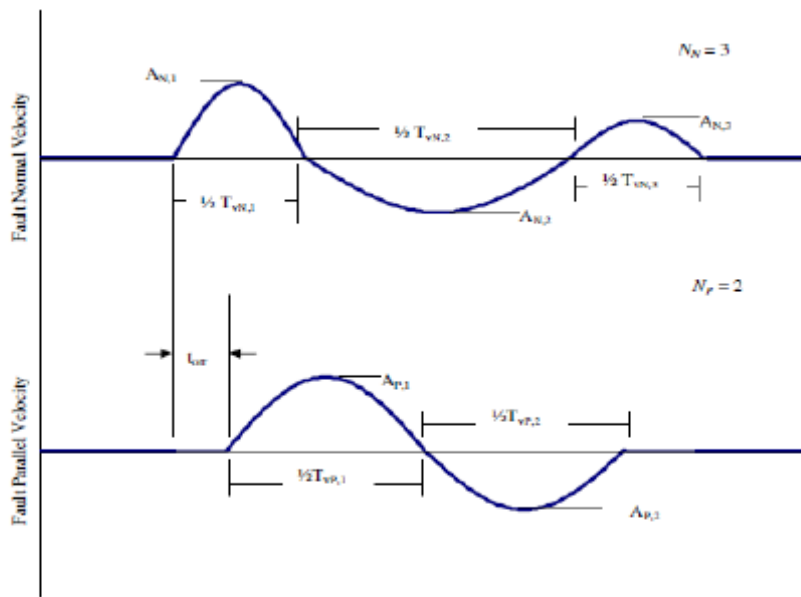
**Σχήμα 1.7:** Απλοποιημένοι παλμοί που έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές

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

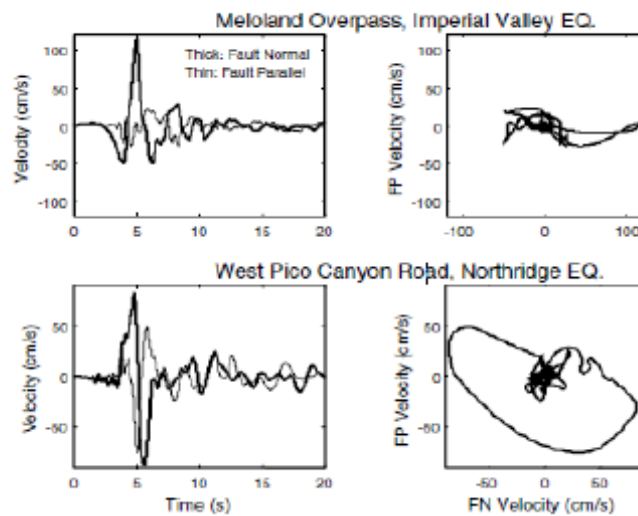
Parameter	Abbreviation	Methodology to obtain parameter
Number of significant pulses.	$N$	Number of half-cycle pulses in the velocity-time history with amplitudes at least 50% of the peak ground velocity of the record.
Pulse period.	$T_{v,i}$	For each half sine pulse, $T_{v,i} = 2(t_2 - t_1)$ , where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

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

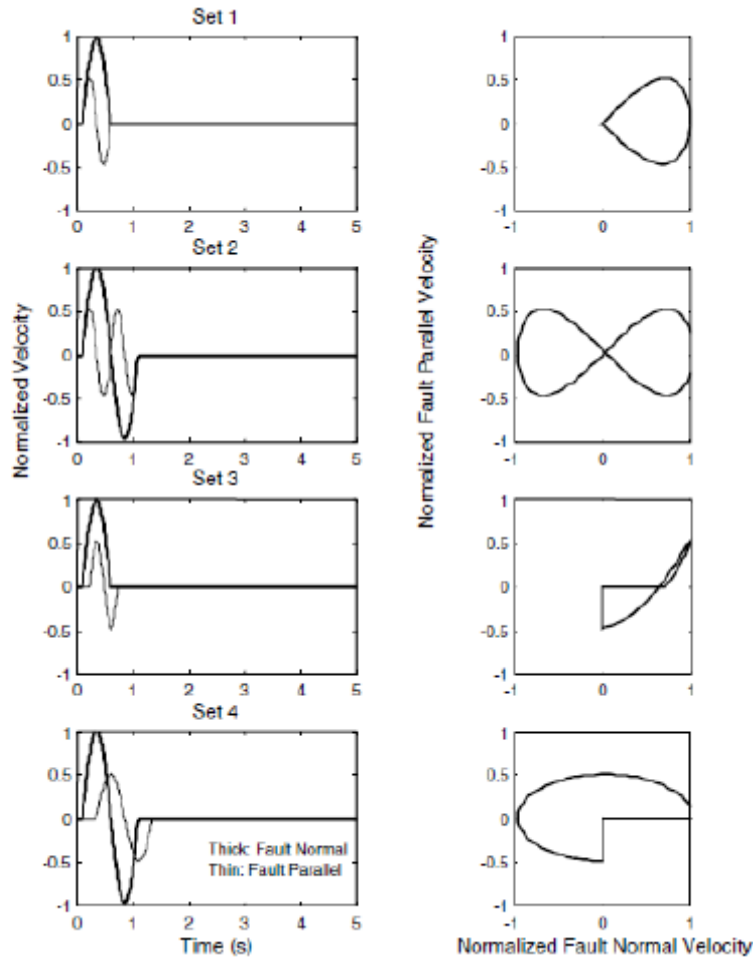




**Σχήμα 1.8:** Παράγοντες που χρειάζονται για να καθορίσουν την παράλληλη και την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα για απλοποιημένους παλμούς ταχύτητας. Τα σύμβολα  $N$ ,  $P$  αντιστοιχούν στις κάθετες και παράλληλες κινήσεις ως προς τη διεύθυνση του ρήγματος αντίστοιχα (Rodriguez - Marek 2000).



**Σχήμα 1.9:** Χρονοϊστορίες ταχύτητας και οριζόντια τροχιακά σχέδια για κάθετη (FN) και παράλληλη (FP) στο ρήγμα συνιστώσα για δυο καταγραφές κοντινού πεδίου. Και οι δυο καταγραφές παρουσιάζουν σημαντικές «κάθετες» ταχύτητες αλλά το Meloland έχει σχετικά μικρότερες «παράλληλες» ταχύτητες.



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

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

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

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

### **Φασματική επιτάχυνση**

Οι Somerville et al (1997a) και ο Abrahamson (2000) παρουσίασαν μοντέλα για την τροποποίηση των φασμάτων απόκρισης με απόσβεση  $\zeta=5\%$  μέσω της σχέσης απόσβεσης Abrahamson και Silva (1997). Τα μοντέλα αναπτύχθηκαν με παλινδρόμηση μεταβλητών αυτής της σχέσης απόσβεσης στις γεωμετρικές παραμέτρους του κοντινού πεδίου του ρήγματος (σχήμα 1.5). Τα μοντέλα παρουσιάζονται για την τροποποίηση του γεωμετρικού μέσου των δυο οριζόντιων συνιστωσών και του λόγου της κάθετης προς τη μέση οριζόντια φασματική συνιστώσα. Οι λεπτομέρειες των μοντέλων φαίνονται στις δυο πρώτες σειρές του πίνακα 1.2.

### **Διάρκεια και ισοδύναμος αριθμός ομοειδών κύκλων**

Οι Somerville et al (1997a) παρουσίασαν ένα μοντέλο για την τροποποίηση του 5 - 75% της σημαντικής διάρκειας από τη σχέση απόσβεσης Abrahamson και Silva (1996). Το μοντέλο αναπτύχθηκε με παλινδρόμηση μεταβλητών αυτής της σχέσης απόσβεσης στις γεωμετρικές παραμέτρους του κοντινού πεδίου του ρήγματος (σχήμα 1.5). Το μοντέλο ισχύει για τη διάρκεια του γεωμετρικού μέσου και των δυο οριζόντιων συνιστωσών. Ένα παρόμοιο μοντέλο αναπτύχθηκε από το Liu (2001) για τον ισοδύναμο αριθμό ομοειδών κύκλων (N). Οι λεπτομέρειες των μοντέλων διάρκειας και αριθμού (N) φαίνονται στις δυο τελευταίες σειρές του πίνακα 1.2.

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

**Πίνακας 1.2:** Τροποποίηση παραμέτρων εδαφικής κίνησης για την εκτίμηση της επίδρασης της κατευθυντικότητας. Οι παράμετροι  $X, Y, \theta, \phi$  ορίστηκαν στο σχήμα 1. 5. Οι τροποποιήσεις φαίνονται στο σχήμα 1. 6

### Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα (PHV)

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

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

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

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

στοιχείων που χρησιμοποίησε ο Somerville (1998). Η σχέση της PHV των Alavi και Kranwinkler (2000) είναι:

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

Ο Rodriguez-Marek (2000) εκτέλεσε τις αναλύσεις παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας 48 χρονοϊστορίες ταχύτητας από 11 γεγονότα. Τα στοιχεία ήταν για περιοχές με αποστάσεις  $r < 20\text{km}$  και  $m = 6.1 - 7.4$ . Χωριστές αναλύσεις εκτελέστηκαν για τις κινήσεις που καταγράφηκαν επί βράχου και εδάφους. Βάσει της ανάλυσης των καταγραφών αυτών προτάθηκε η ακόλουθη σχέση για την PHV:

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

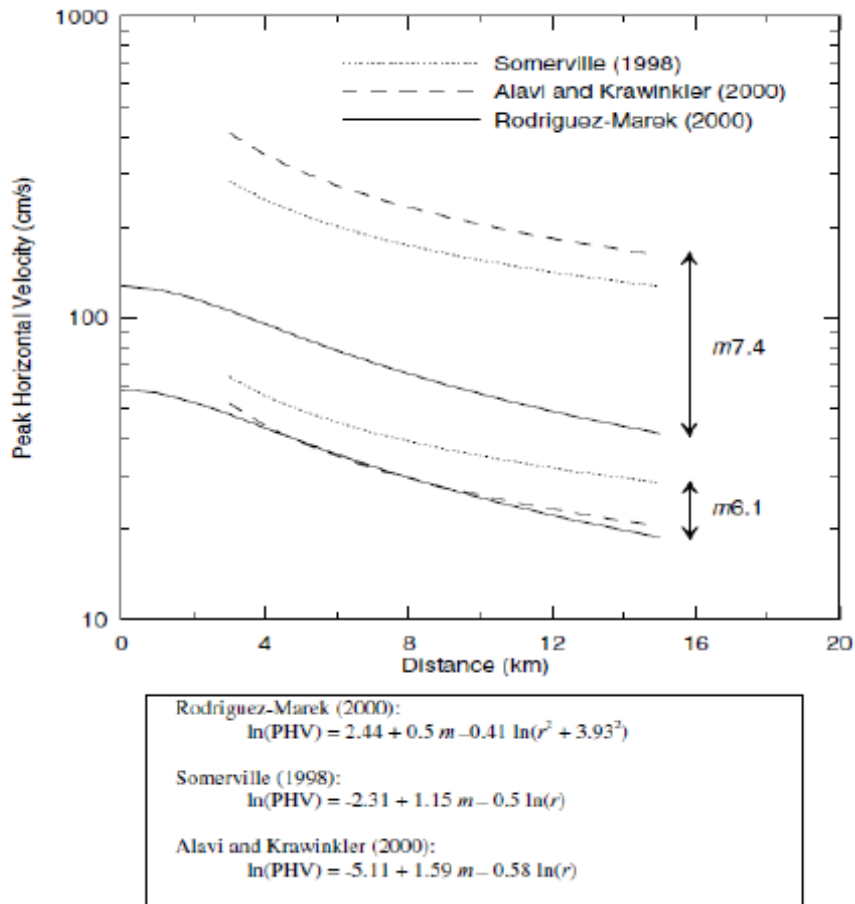
όπου η PHV είναι σε μονάδες cm/s, τα  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  είναι οι παράμετροι, το  $r$  είναι η ελάχιστη απόσταση από το ρήγμα, το  $m$  είναι το μέγεθος και τα  $\eta_i$  και  $\varepsilon_{ij}$  είναι οι όροι σφάλματος.

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

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

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

Το σχήμα 1.11 συγκρίνει τη σχέση που προτάθηκε από τον Rodriguez - Marek (2000) με τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν από τον Somerville (1998) και τους Alavi και Kranwinkler (2000). Οι σχέσεις διαφέρουν κυρίως στην επίδραση του μεγέθους  $m$ . Οι διαφορές οφείλονται πιθανώς στο μεγαλύτερο ποσό στοιχείων που περιλαμβάνεται στην πρόσφατη μελέτη.



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

### Περίοδος παλμού

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Εκτιμήσεις παρέχονται για την περίοδο του παλμού,  $T_v$ , και τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος ταχύτητας  $T_{v-p}$ . Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου παρουσιάζονται στον πίνακα 1.5. Η σχέση ισχύει για  $m=6.1-7.4$  και για  $r < 20\text{km}$ .

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

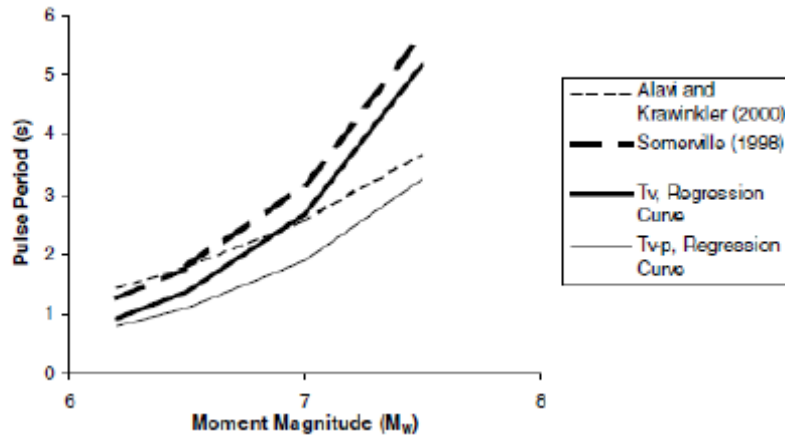
α)  $T_v$

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

β)  $T_{v-p}$

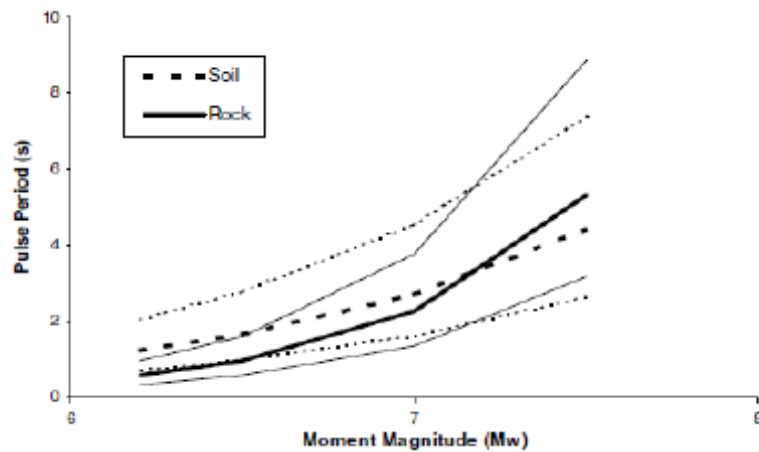
Data Set	<i>a</i>	<i>b</i>	$\sigma$	$\tau$	$\sigma_{total}$
All Motions	-6.92	1.08	0.48	0.45	0.66
Rock	-9.53	1.42	0.37	0.61	0.71
Soil	-5.66	0.91	0.41	0.45	0.61

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



**Σχήμα 1.12:** Σύγκριση μοντέλου Rodriguez-Marek (2000) με σχέσεις που αναπτύχθηκαν από Somerville (1998) για την  $T_v$  και από Alavi και Krawinkler (2000) για την  $T_v-p$  (Rodriguez-Marek 2000)

Η επίδραση των εδαφικών συνθηκών μπορεί να ερευνηθεί μέσω της χρήσης των σχέσεων Rodriguez - Marek (2000) για περίοδο του παλμού για το βράχο και το έδαφος (σχήμα 1.13). Η διαφορά μεταξύ των τιμών της περιόδου του παλμού για βράχο και έδαφος είναι μικρή για τα μεγάλα μεγέθους γεγονότα ( $m > 7$ ), αλλά η περίοδος του παλμού είναι μεγαλύτερη επί εδαφών απ' ό τι για περιοχές βράχου για τα γεγονότα με χαμηλότερα μεγέθη. Η εξέταση των ταξινομημένων κατά ζεύγη σταθμών βράχου και εδάφους και τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων απόκρισης επιβεβαιώνουν αυτή την παρατήρηση (Rodriguez-Marek 2000).



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

### Αριθμός σημαντικών παλμών

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



καταγραφών παρουσιάζεται στον πίνακα 1.5. Οι περισσότερες καταγραφές περιέχουν δυο σημαντικούς παλμούς (π.χ. ένας πλήρης κύκλος της εδαφικής κίνησης). Ο Somerville (1998) προτείνει ο αριθμός παλμών ημιτόνου στη χρονοϊστορία της ταχύτητας να συνδέεται με τον αριθμό ετερογενών διαρρήξεων (asperities) σ' ένα ρήγμα, ο οποίος στη συνέχεια να συνδέεται με τη διανομή ολίσθησης ρήγματος. Δεν υπάρχει κανένα μοντέλο διαθέσιμο για την πρόβλεψη του αριθμού σημαντικών παλμών στη χρονοϊστορία της ταχύτητας. Για τις περισσότερες περιπτώσεις ο  $N_v$  θα ποικίλλει μεταξύ 1 και 3 με  $N_v=2$  να είναι μια καλή τιμή που χρησιμοποιείται για σεισμούς.

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

**Πίνακας 1.5:** Αριθμός παλμών ( $N_v$ ) για 48 κινήσεις κοντινού πεδίου (κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα). Οι τιμές στις παρενθέσεις είναι οι αριθμοί των ημικύκλων του παλμού της ταχύτητας που έχουν εύρη τουλάχιστον 33% της PHV. (Rodriguez-Marek 2000)

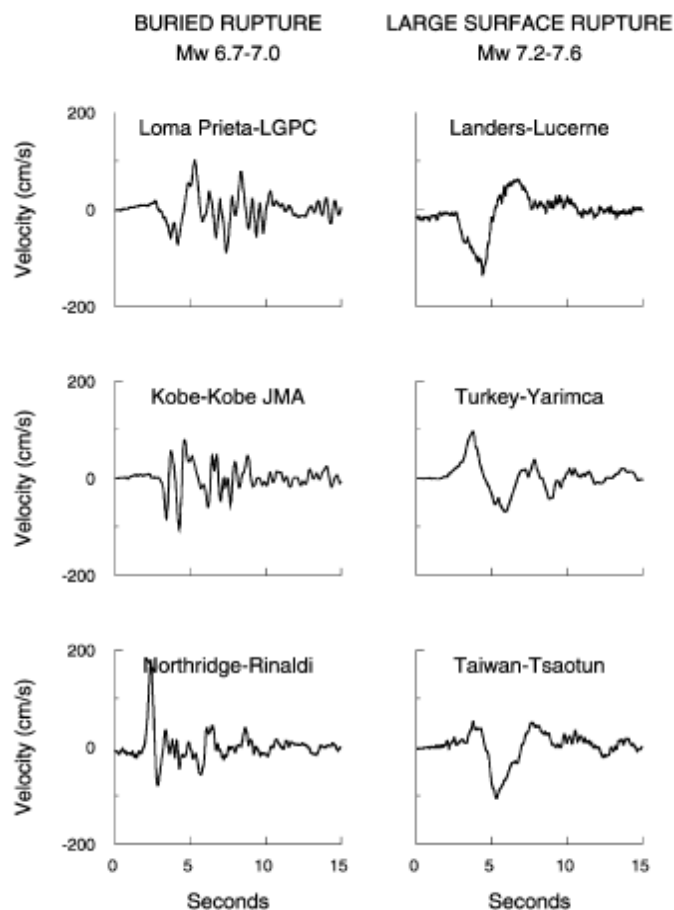
### 1.3 Μεταβολή των ιδιοτήτων του παλμού της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου συναρτήσει του μεγέθους του σεισμού

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

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

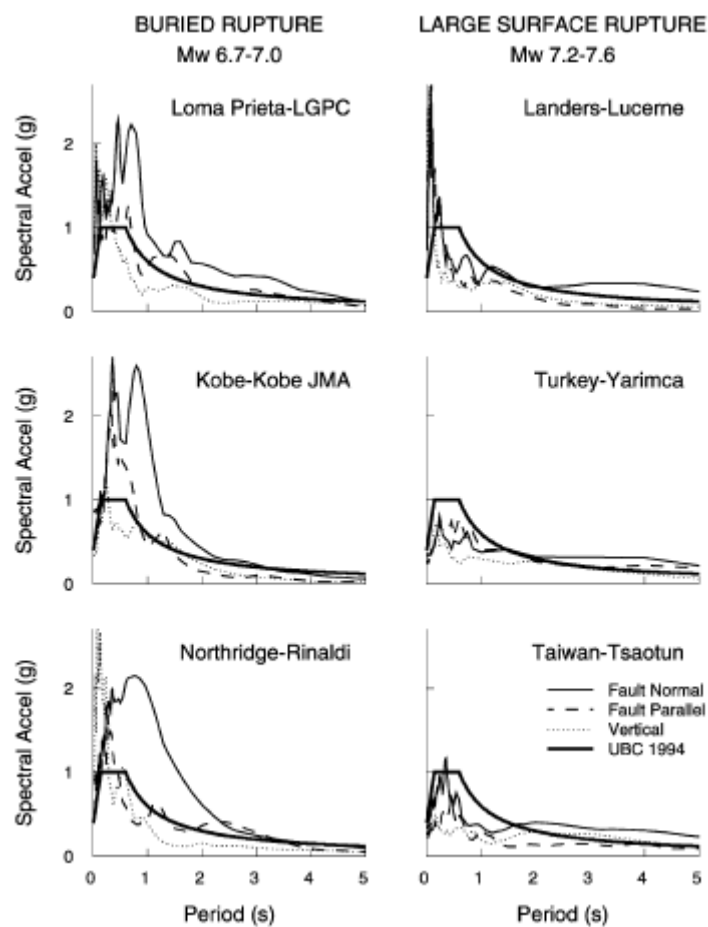
Οι ισχυροί σεισμοί της Τουρκίας και της Ταϊβάν που αποδεικνύουν την εξάρτηση της περιόδου του παλμού κοντινού πεδίου από το σεισμικό μέγεθος, χαρακτηρίζονται από ασθενείς καταγραφές στις μικρές και ενδιάμεσες περιόδους (0,1-3sec), ασθενέστερες από τις καταγραφές σεισμών μικρότερου μεγέθους ( $M_w=6.7-7$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

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



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

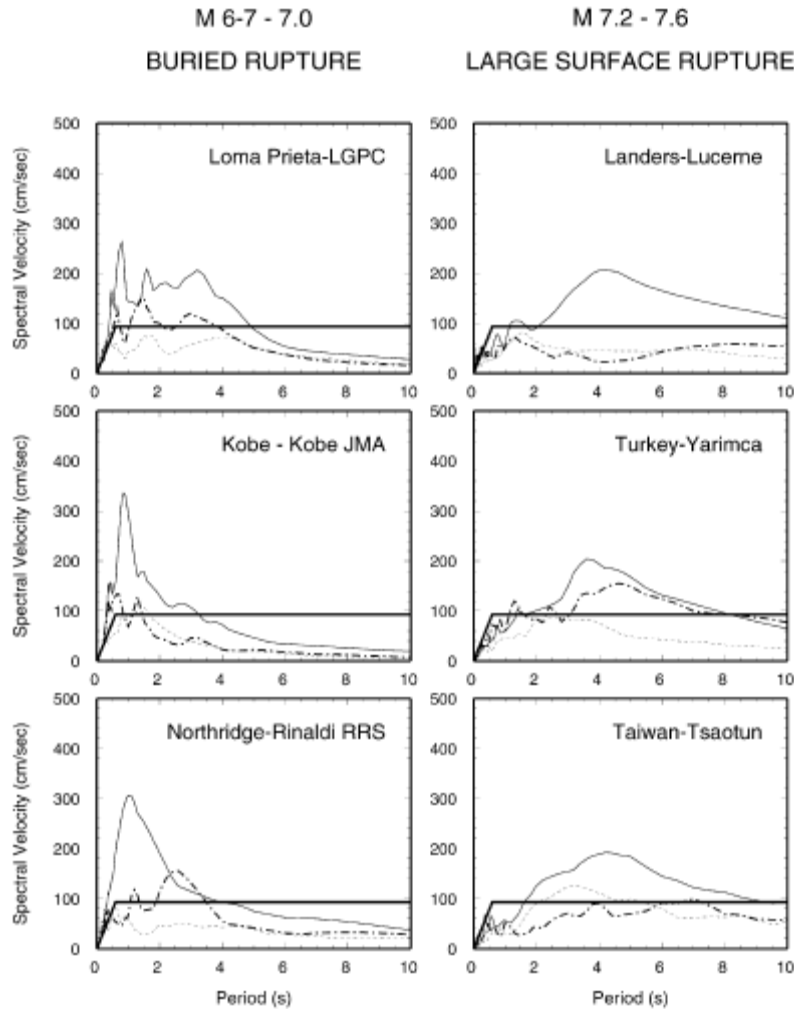
Η φύση στενών περιόδων αυτών των φασμάτων προκαλεί μικρές αιχμές στο φάσμα απόκρισης. Τονίζεται ότι η παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα αναμένεται μικρότερη από την κάθετη λόγω απουσίας της κατευθυντικότητας, κάτι που φαίνεται στα φάσματα. Το φάσμα του κανονισμού UBC 1994 χρησιμοποιείται ως μέτρο σύγκρισης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



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

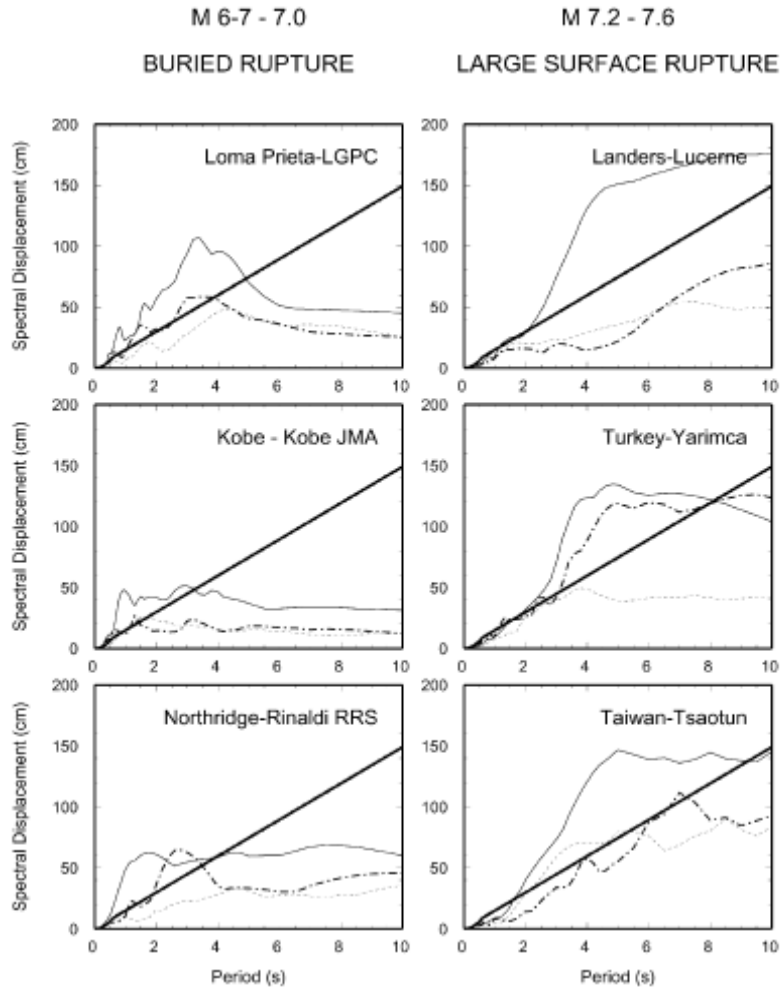
Τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης παρουσιάζονται καλύτερα στα σχήματα 1.15 και 1.16 που απεικονίζουν τα φάσματα ταχυτήτων και μετακινήσεων αντίστοιχα των παλμών του σχήματος 1.14α και αποδεικνύουν ότι η μεταβολή του σεισμικού μεγέθους είναι εμφανής, κάτι που δε λαμβάνεται υπόψη στα μέχρι στιγμής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

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



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

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



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

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

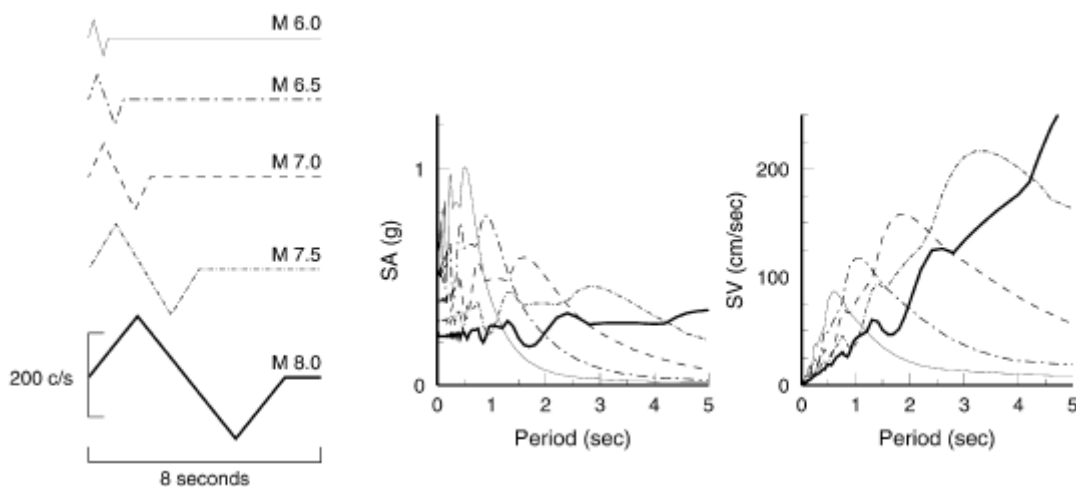
$$\text{Log}_{10}T_{dir} = -3.17 + 0.5M_w$$

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

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

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

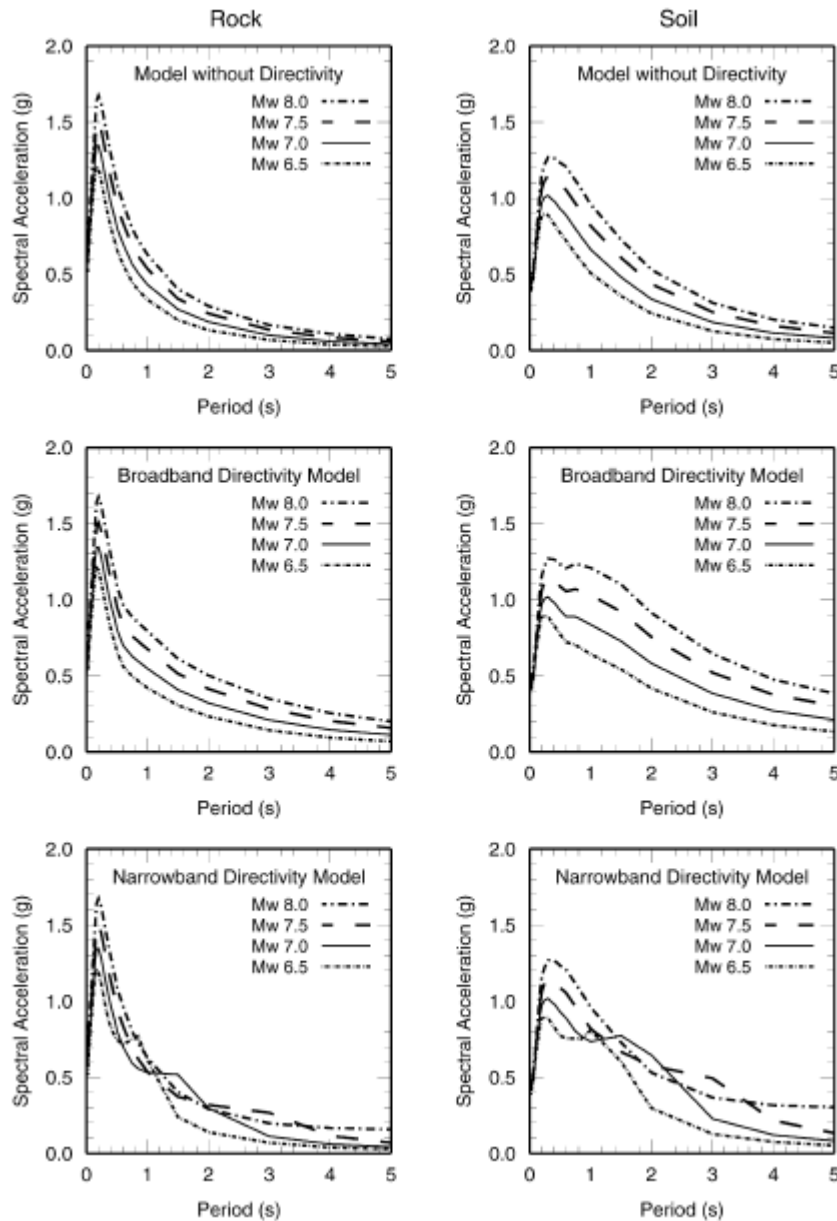
Στο σχήμα 1.17 παρουσιάζεται ένας τριγωνικός παλμός ταχύτητας και το αντίστοιχο φάσμα επιταχύνσεων και ταχυτήτων για διάφορα μεγέθη. Προκύπτει ότι το ελαστικό φάσμα απόκρισης παρουσιάζει αιχμές που σχετίζονται με την περίοδο του παλμού. Εξαιτίας αυτών των αιχμών το φάσμα δεν αυξάνεται μονοτονικά με το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



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

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

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



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





# Κεφάλαιο 2

## ΝΕΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΠΟΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

---

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



## 2.1 Εισαγωγή

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

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

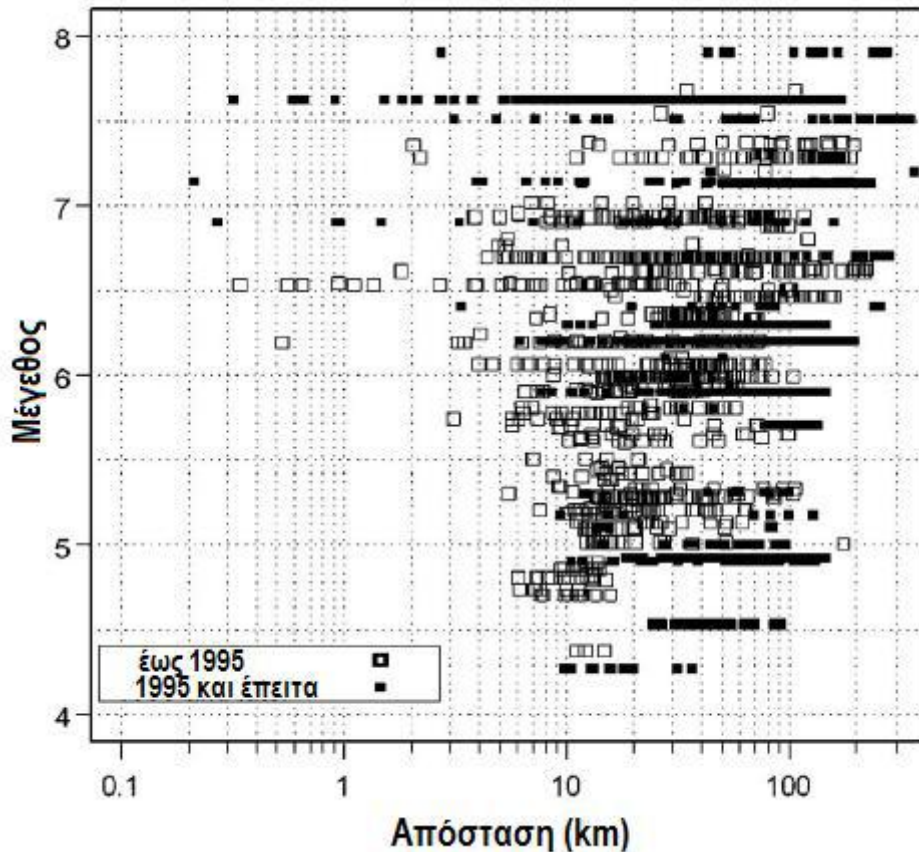
- Norman Abrahamson and Water Silva - Abrahamson and Silva 1997
- David Boore and Gail Atkinson - Boore et al. 1997
- Kenneth Campbell and Yousef Bozorgnia -Campbell 1997, Campbell and Bozorgnia 2003
- Brian Chiou and Robert Youngs, επαναπροσαρμογή του μοντέλου των Sadigh et al. - 1993,1997
- I.M. Idriss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

## 2.2 Η βάση δεδομένων και τα μοντέλα απομείωσης

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

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

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



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

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

- πιθανές καταγραφές από διαφορετικό τεκτονικό περιβάλλον

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

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

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

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

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

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

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

Μια ακόμη σημαντική παράμετρος ήταν η εκτίμηση της  $V_{st30}$  στις θέσεις καταγραφών, βασιζόμενη σε συσχετίσεις με την καταμετρημένη διατμητική ταχύτητα σε άλλες θέσεις και σε εξαρτήσεις από τη γεωλογία της περιοχής και από τα εδαφικά χαρακτηριστικά. Οι μελέτες που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της εν λόγω παραμέτρου συμπεριλαμβάνουν δεδομένα από τους σεισμούς του Northridge στην Καλιφόρνια (1994) και δεδομένα καταγεγραμμένων ταχυτήτων στην ευρύτερη περιοχή από το γεωλογικό ισοτιούτο της περιοχής. Παρόμοιες συσχετίσεις έγιναν για την εκτίμηση των εδαφικών ταχυτήτων συμπεριλαμβάνοντας δεδομένα από το σεισμό και τους μετασεισμούς του Chi-Chi στην Ταιβάν (1999).

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

Τα τελικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν ήταν τα παρακάτω:

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

### 2.3 Αλληλεπιδράσεις του προγράμματος και αναθεωρήσεις

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

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

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





# Κεφάλαιο 3

## ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

---

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



### 3.1 Εισαγωγή

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

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

Οι εδαφικές κινήσεις με παρουσία παλμού στην αρχή της χρονοϊστορίας της ταχύτητας ανήκουν σε μια ειδική κατηγορία εδαφικών κινήσεων που προκαλούν πολλές καταστροφές στις κατασκευές. Αυτό το είδος εδαφικής κίνησης, το οποίο στην έρευνα των Shahi και Baker (2011) αναφέρεται ως παλμική κίνηση, παρατηρείται συνήθως σε περιοχές που βρίσκονται κοντά στο ρήγμα και πιστεύεται ότι προκαλείται κατά κύριο λόγο εξαιτίας της παρουσίας των φαινομένων εμπροσθεν κατευθυντικότητας (Somerville et al. 1997, Somerville 2003 και 2005, Spudlich και Chίου2008). Οι παλμικές εδαφικές κινήσεις αυξάνουν τις σεισμικές απαιτήσεις των κατασκευών και προκαλούν εκτεταμένες καταστροφές, όπως παρατηρήθηκε σε διάφορους σεισμούς. Τα συμβατικά μοντέλα πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης που χρησιμοποιούνται στην πιθανοτική ανάλυση σεισμικού κινδύνου δε λαμβάνουν υπόψη την ύπαρξη παλμικής κίνησης και γι' αυτό ίσως να υποεκτιμούν τον σεισμικό κίνδυνο σε περιοχές κοντινού πεδίου όπου αναμένεται να εμφανιστεί ο παλμός. Είναι πολύ σημαντικό να μοντελοποιηθούν οι επιδράσεις της εν λόγω κίνησης ώστε να εκτιμηθεί σωστά ο σεισμικός κίνδυνος και να ενσωματωθούν τα φαινόμενα κατευθυντικότητας στους υπολογισμούς του τελευταίου. Η μόνιμη παραμένουσα μετακίνηση του εδάφους (fling step) που αποτελεί ακόμα ένα χαρακτηριστικό του κοντινού πεδίου αλλά δε λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα μελέτη.

Στο παρελθόν έγιναν πολλές προσπάθειες ενσωμάτωσης της επίδρασης του παλμού του κοντινού πεδίου στην εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου. Σε αυτές δόθηκε έμφαση στη

μοντελοποίηση της ενίσχυσης του φάσματος απόκρισης λόγω της παλμικής κίνησης είτε αυξάνοντας είτε μειώνοντας μονοτονικά τις φασματικές συντεταγμένες σε ένα εύρος περιόδων (Somerville et al. 1997, Abrahamson 2000), είτε ενισχύοντας το φάσμα απόκρισης σε ένα στενό εύρος περιόδων κοντά στην περίοδο του παλμού (Tr) (Somerville 2005, Tothong et al. 2007). Τα πρώτα μοντέλα αναφέρονται συνήθως ως μοντέλα με ευρεία ζώνη ενώ τα τελευταία ως αυτά με τη στενή ζώνη. Η πορεία μελέτης αυτής της εργασίας επεκτείνει την πορεία των Tothong et al (2007) και χρησιμοποιεί επιπρόσθετα μοντέλα περιοριζόμενων καταγραφών, αντί για τα παλαιότερα χρησιμοποιούμενα υποθετικά μοντέλα. Η συγκεκριμένη μελέτη δίνει επίσης τη δυνατότητα υπολογισμού της φασματικής επιτάχυνσης σε οποιαδήποτε τυχαία διεύθυνση περιμετρικά του ρήγματος, ενώ μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μοντέλο στενής ζώνης καθώς η φασματική επιτάχυνση ενισχύεται σε ένα εύρος περιόδων κεντραρισμένων γύρω από την περίοδο του παλμού. Παρ' όλα αυτά, δε μπορούν να γίνουν υποθέσεις εκ των προτέρων όσον αφορά τον αριθμό των περιόδων που ενισχύονται γύρω από την περίοδο του παλμού και το μέγεθος της ενίσχυσης. Το μοντέλο προέκυψε εντελώς εμπειρικά ενώ ο χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος περιστρέφει την εδαφική κίνηση και εντοπίζει τον παλμό όχι μόνο στην κάθετη στο ρήγμα αλλά σε όλες τις διευθύνσεις. Αυτή η τροποποίηση επιτρέπει την αναγνώριση των παλμών της ταχύτητας σε τυχαίες διευθύνσεις, οι οποίες αργότερα χρησιμοποιούνται στη βαθμονόμηση των μοντέλων πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης.

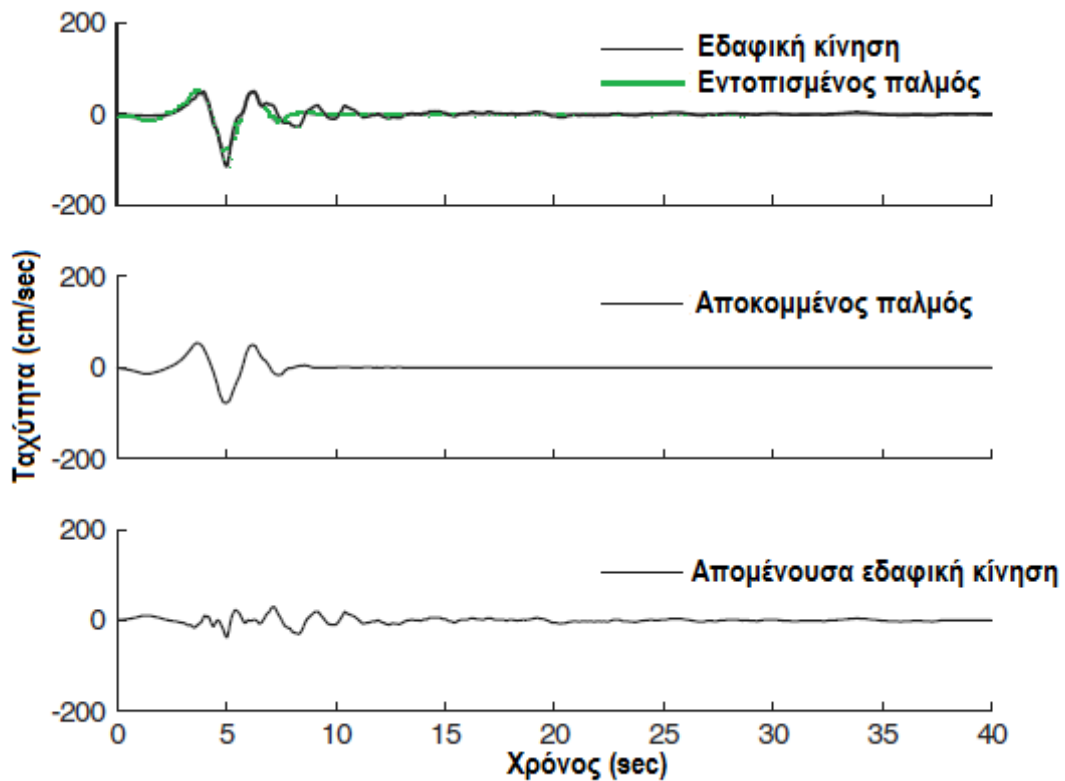
Η συνολική έρευνα περιλαμβάνει μοντέλα πρόβλεψης της πιθανότητας εμφάνισης παλμού για μια δεδομένη γεωμετρία πηγής και θέσης καταγραφής, την πιθανότητα παρατήρησης παλμού σε κάποια συγκεκριμένη διεύθυνση δεδομένου ότι έχει παρατηρηθεί ο παλμός σε κάποια θέση καταγραφής και την απόσβεση του φάσματος απόκρισης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

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

### **3.2.1 Αναγνώριση της ύπαρξης παλμικής κίνησης**

Προκειμένου να συμπληρωθεί μια πιθανοτική μελέτη παλμικών εδαφικών κινήσεων χρειάζεται μια βιβλιοθήκη καταγραφών με κατηγοριοποίηση της εκάστοτε εδαφικής κίνησης ως παλμικής ή μη. Στο παρελθόν πολλοί ερευνητές κατηγοριοποίησαν τις καταγραφές χρησιμοποιώντας οπτικές ή ποσοτικές τεχνικές (Mavroeidis και Parageorgiou 2003, Somerville 2003, Fu και Menun 2004, Akkar et al 2005). Αυτές οι προσπάθειες όμως δεν περιέχουν μη παλμικές εδαφικές κινήσεις γι' αυτό αποτρέπουν την ανάλυση από τον προσδιορισμό της πιθανότητας εμφάνισης παλμού.

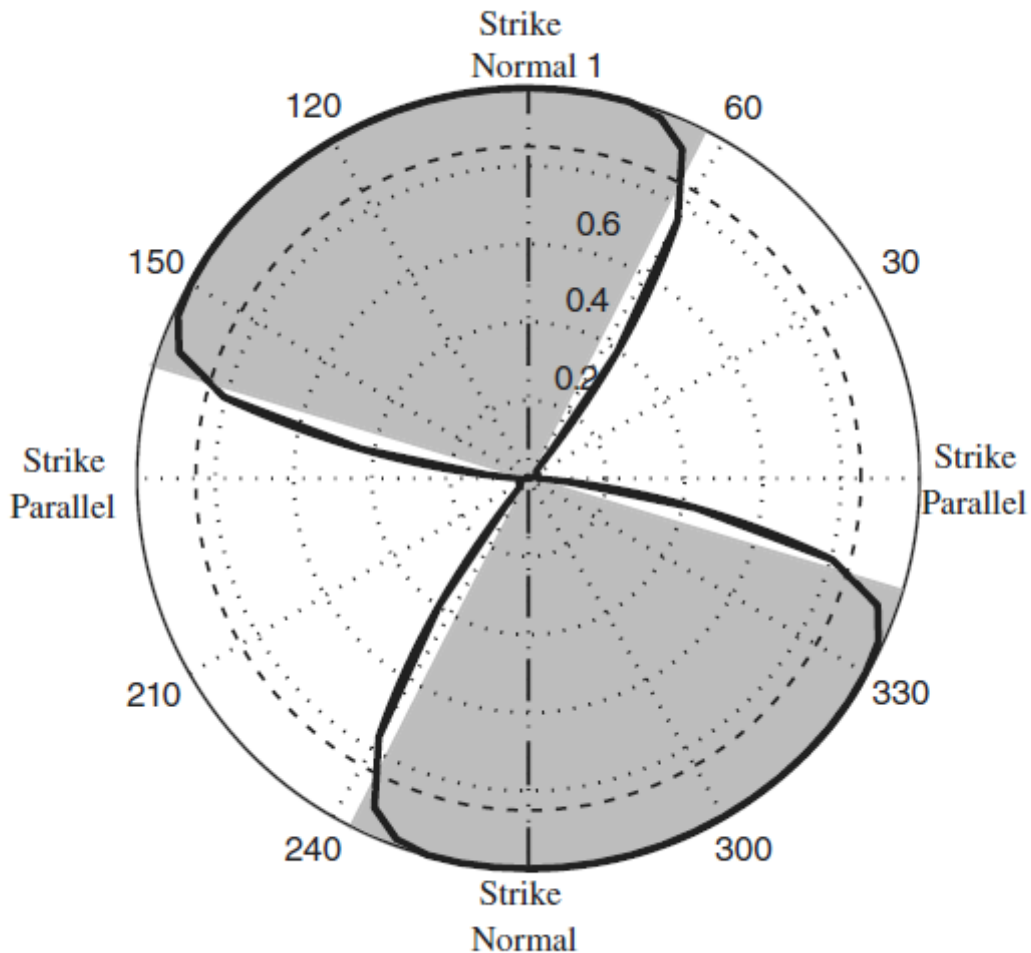
Στην προκειμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος εντοπισμού παλμού του Baker (2007) επειδή είναι εντελώς ποσοτική και επιτρέπει την κατηγοριοποίηση πολλών δεδομένων όπως αυτά της νέας βάσης δεδομένων (NGA database). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρησιμοποιεί κυματική ανάλυση ώστε να αποκόψει το παλμικό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



**Σχήμα 3.1:** Απεικόνιση της διαδικασίας που χρησιμοποιεί ο Baker (2007) για την αποκοπή του μεγαλύτερου παλμού από τη χρονοϊστορία ταχυτήτων (εδώ παρουσιάζεται η χρονοϊστορία του σεισμού στο Imperial Valley, El Centro 1979). Στην περίπτωση αυτή ο παλμός είναι μεγάλος και η εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται ως παλμική.

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

δύσκολος ο προσδιορισμός της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας και οι παλμικές κινήσεις παρατηρούνται σε ένα ευρύ φάσμα διευθύνσεων γύρω από το ρήγμα (Howard et al 2005). Το σχήμα 3.2 δείχνει τον συντελεστή εμφάνισης παλμού όπως αυτός προσδιορίστηκε από τον Baker (2007) σε διάφορες διευθύνσεις γύρω από μια περιοχή (στις παλμικές εδαφικές κινήσεις εμφανίζονται μεγάλες τιμές συντελεστή εμφάνισης παλμού και σε διάφορες διευθύνσεις γύρω από τη θέση καταγραφής). Η παρουσιαζόμενη περίπτωση αποτελεί την απλή περίπτωση εμφάνισης παλμού γύρω από περιοχή ρήματος κανονικής διάρρηξης ενώ πιο περίπλοκες περιπτώσεις υφίστανται όταν η διεύθυνση του ρήματος κανονικής διάρρηξης δεν κείται στο εύρος διευθύνσεων όπου παρατηρούνται οι παλμοί (οι εν λόγω περιπτώσεις είναι μικρές σε αριθμό).



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

Προκειμένου να μελετηθούν οι διευθύνσεις εμφάνισης της παλμικής κίνησης, οι εδαφικές καταγεγραμμένες κινήσεις περιστράφηκαν σε όλες τις διευθύνσεις και για καθενιά διεύθυνση κατηγοριοποιήθηκαν ως παλμικές ή μη. Μια θέση, λοιπόν, θεωρείται ότι μπορεί να εμφανίσει παλμική κίνηση αν έστω και μια εδαφική κίνηση σε οποιαδήποτε διεύθυνση στη θέση αυτή είναι παλμική. Αυτό το μοντέλο περιστροφής και κατηγοριοποίησης εδαφικών κινήσεων σε κάθε διεύθυνση οδήγησε στην κατηγοριοποίηση 179 καταγραφών της νέας βάσης δεδομένων, οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ως παλμικές. Οι καταγραφές αυτές δίνονται στο παράρτημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η συγκεκριμένη μέθοδος κατηγοριοποίησης προσδιορίζει παλμούς μόνο στην οριζόντια διεύθυνση και ίσως να μη μπορεί να κατηγοριοποιήσει την κίνηση ως παλμική αν ο παλμός δε βρίσκεται στο οριζόντιο επίπεδο. Η κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση μπορεί να μη βρίσκεται στο οριζόντιο επίπεδο για ορισμένα ρήγματα μη κανονικής ολίσθησης, γι' αυτό τα μοντέλα για τα όλα τα ρήγματα μη κανονικής διάρρηξης που αναπτύχθηκαν στην παρούσα μελέτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο όταν υπάρχουν μικρής σημασίας παλμοί εκτός του οριζοντίου επιπέδου.

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

### 3.2.2 Ανάπτυξη μοντέλων υπολογισμού της οριζόντιας φασματικής επιτάχυνσης

Η συμβατική εξίσωση προσδιορισμού της φασματικής επιτάχυνσης είναι η:

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

η οποία χρησιμοποιείται για την εύρεση του ετήσιου ρυθμού με τον οποίο η φασματική επιτάχυνση  $S_a$  σε μια θέση υπερβαίνει την τιμή  $x$ . Ο όρος  $P(S_a > x|m, r)$  δίνει την πιθανότητα η  $S_a$  σε μια συγκεκριμένη θέση να υπερβεί την τιμή  $x$  με την ταυτόχρονη εμφάνιση σεισμού μεγέθους  $m$  σε απόσταση  $r$ , η οποία μπορεί να προσδιοριστεί με οποιοδήποτε εδαφικό μοντέλο. Η συγκεκριμένη πιθανότητα αν πολλαπλασιαστεί με την πυκνότητα πιθανότητας εμφάνισης ενός σεισμού μεγέθους  $m$  σε απόσταση  $r$ ,  $f_i(m, r)$  σε ένα συγκεκριμένο ρήγμα  $i$  και αν ολοκληρωθεί για όλες τις πιθανές τιμές των  $m$  και  $r$ ,

δίνει την πιθανότητα υπέρβασης ενός σεισμού. Ο συνολικός ρυθμός υπέρβασης μιας θέσης μπορεί να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας αυτή την πιθανότητα με το ρυθμό εμφάνισης των σεισμών στο ρήγμα  $v_i$  και αθροίζοντας για κάθε ρήγμα στην περιοχή της θέσης. Η πιθανότητα  $P(S_a > x | m, r)$  προέκυψε χρησιμοποιώντας ένα εδαφικό μοντέλο το οποίο γενικότερα αποτελεί συνάρτηση των παραμέτρων του μηχανισμού διάρρηξης, των χαρακτηριστικών της θέσης καταγραφής και άλλων παραμέτρων πέραν του σεισμικού μεγέθους και της απόστασης.

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

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

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

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

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



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

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

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

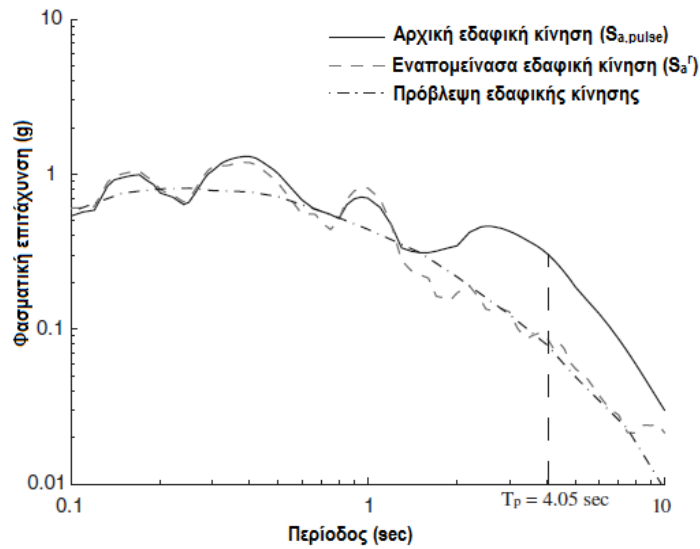
$$P(Sa > x|m, r, no pulse) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(x) - \mu_{\ln Sa, no pulse}}{\sigma_{\ln Sa, no pulse}}\right) \quad (4)$$

όπου η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση μπορούν να προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο τροποποιημένης εδαφικής κίνησης για μη παλμικές κινήσεις. Στις εξισώσεις (3) και (4) το  $\Phi()$  αντιπροσωπεύει την τυπική κανονική αθροιστική συνάρτηση κατανομής. Υποτέθηκε κανονική κατανομή υπολοίπων ενώ τα ιστογράμματα υπολοίπων που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη έρευνα είναι συμβατά με αυτή την υπόθεση.

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

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

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



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

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

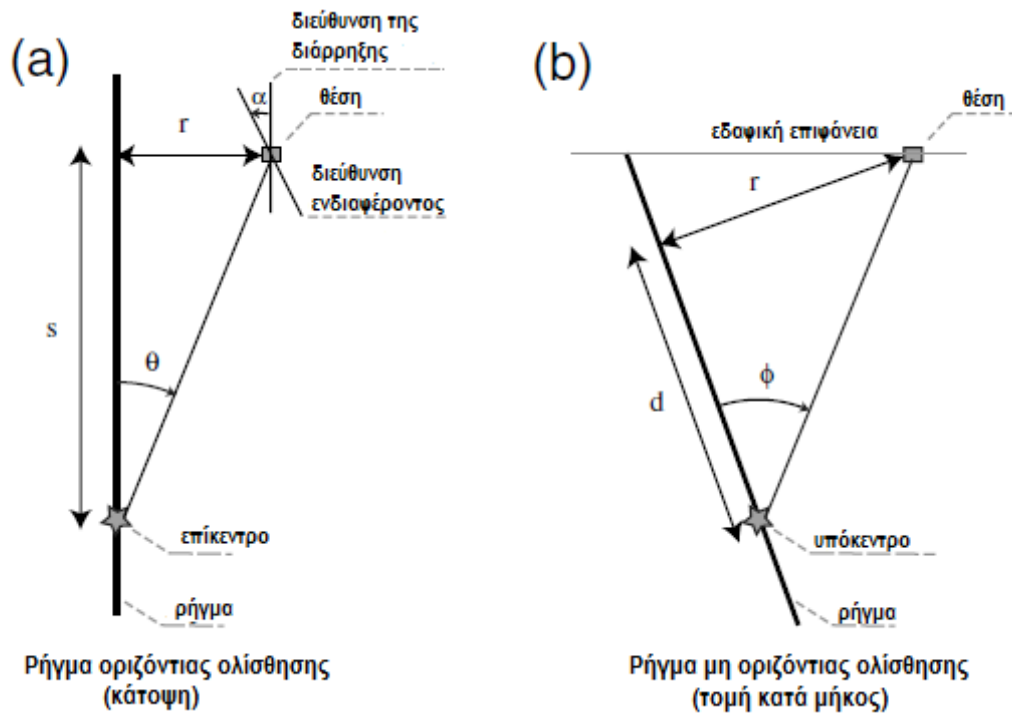
για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης

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

για όλους τους υπόλοιπους τύπους ρηγμάτων

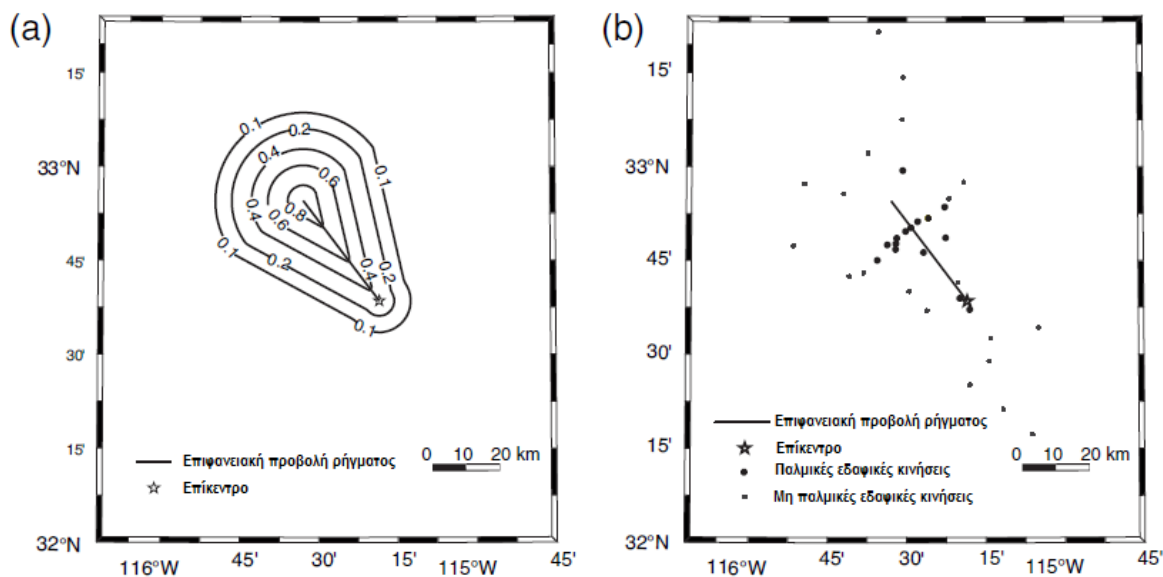
$$P(\text{pulse}|r, d, \phi) = \frac{1}{1 + e^{(0.128 + 0.055 \cdot r - 0.061 \cdot d + 0.036 \cdot \phi)}} \quad (7)$$

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

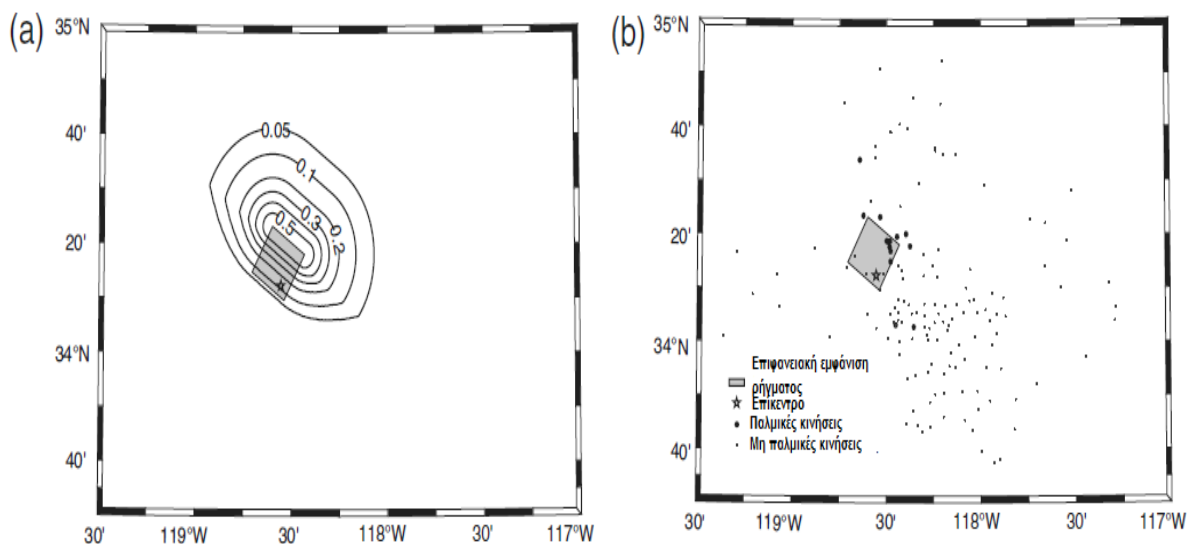


**Σχήμα 3.4:** Σχήμα που επεξηγεί τις απαιτούμενες παραμέτρους για τη λογιστική παλινδρόμηση για (α) ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και (β) ρήγμα μη οριζόντιας ολίσθησης. Παρουσιάζεται επίσης η γωνία  $\alpha$  μεταξύ της διεύθυνσης ενδιαφέροντος και της διεύθυνσης του ρήγματος.

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



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



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

Η περιστροφή και η κατηγοριοποίηση των εδαφικών κινήσεων οδήγησε στην εύρεση των παλμικών κινήσεων σε ένα εύρος διευθύνσεων. Για τον υπολογισμό του σεισμικού κινδύνου μιας θέσης κοντά σε ρήγμα για διάφορες διευθύνσεις πρέπει να είναι γνωστή η πιθανότητα παρατήρησης παλμικής κίνησης σε κάποια τυχαία διεύθυνση. Τα δεδομένα από τις περιστρεμμένες κατηγοριοποιήσεις παλμών χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό της πιθανότητας εύρεσης παλμού σε κάποια

διεύθυνση ( $\alpha$ ) δεδομένου ότι ο παλμός εμφανίζεται σε κάποια θέση, άρα  $P$  (pulse at  $\alpha$  | pulse ). Η γωνία  $\alpha$  είναι η μικρότερη γωνία που μπορεί να μετρηθεί σε σχέση με τη γωνία βύθισης του ρήγματος που λήφθηκε από τα δεδομένα της νέας βάσης δεδομένων. Το σχήμα 3.4a απεικονίζει ένα σχηματικό διάγραμμα στο οποίο φαίνεται η γωνία  $\alpha$ . Βρέθηκε ότι η πιθανότητα  $P$  (pulse at  $\alpha$  | pulse ) είναι διαφορετική για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και διαφορετική για κάθε άλλο τύπο ρήγματος. Το σχήμα 3.7 δείχνει το κλάσμα των παλμικών κινήσεων με παλμό στη γωνία  $\alpha$  για ρήματα οριζόντιας ολίσθησης και μη οριζόντιας ολίσθησης. Επίσης παρουσιάζονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μείωση των τετραγωνικών σφαλμάτων μεταξύ των δεδομένων που προέκυψαν από παρατηρήσεις και αυτών που προέκυψαν από τις εξισώσεις. Το μοντέλο περιγράφεται από τις εξισώσεις (8) και (9) για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και όλους τους υπόλοιπους τύπους ρηγμάτων αντίστοιχα:

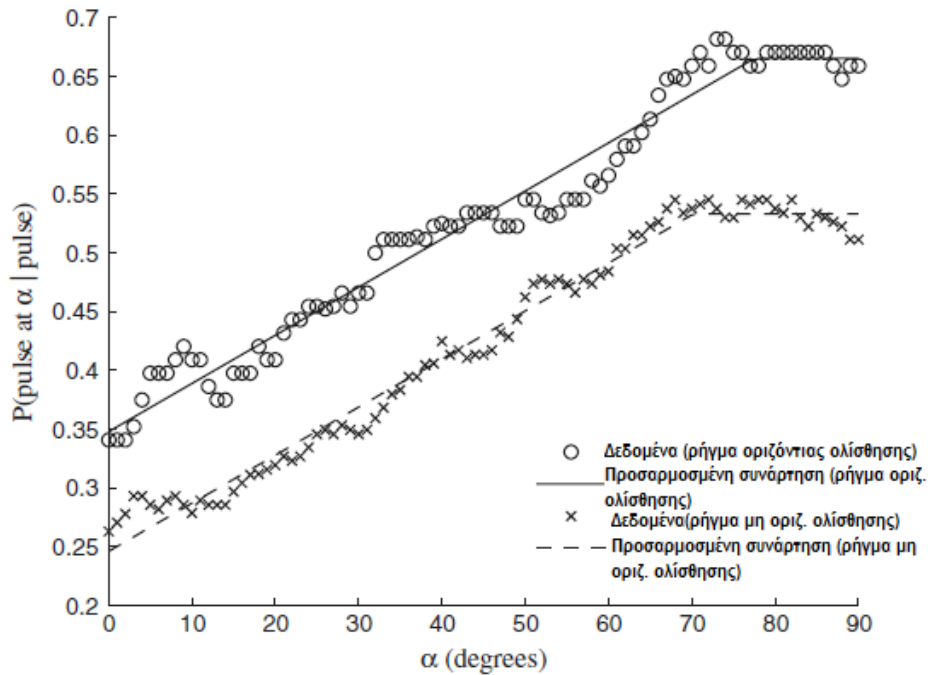
$$P(\text{pulse at } \alpha \mid \text{pulse}) = \min [0.67, 0.67 - 0.0041(77.5 - \alpha)] \quad (8)$$

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

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

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

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



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

### 3.2.3 Περίοδος παλμού

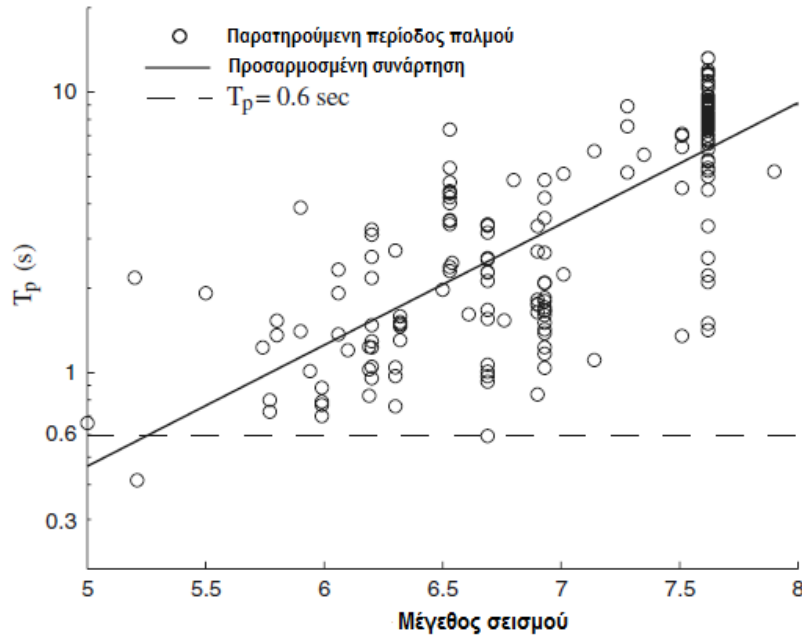
Η ενίσχυση της φασματικής επιτάχυνσης  $S_a$  λόγω της παρουσίας ενός παλμικού χαρακτηριστικού στην εδαφική κίνηση αποτελεί συνάρτηση της περιόδου του παλμού. Πολλοί ερευνητές στο παρελθόν ανακάλυψαν ότι η περίοδος του παλμού εξαρτάται από το σεισμικό μέγεθος, συνεπώς συμπεριέλαβαν αυτή τη σχέση στις εξισώσεις τους (Mavroudis και Parageorgiou 2003, Somerville 2003, Bray και Rodriguez-Marek 2004 και Baker 2007). Χρησιμοποιώντας τον τροποποιημένο αλγόριθμο κατηγοριοποίησης εντοπίστηκαν πολλές παλμικές εδαφικές κινήσεις οι οποίες δεν είχαν χρησιμοποιηθεί σε παλαιότερες έρευνες και κατασκευάστηκε μια εξίσωση συσχέτισης της περιόδου του παλμού και του σεισμικού μεγέθους χρησιμοποιώντας όλες τις παλμικές κινήσεις της παρούσας έρευνας.

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

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

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

Το σχήμα 3.18 απεικονίζει τη σχέση της παρατηρούμενης περιόδου του παλμού  $T_p$  σε σχέση με το σεισμικό μέγεθος  $M$  της εξίσωσης (11).



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

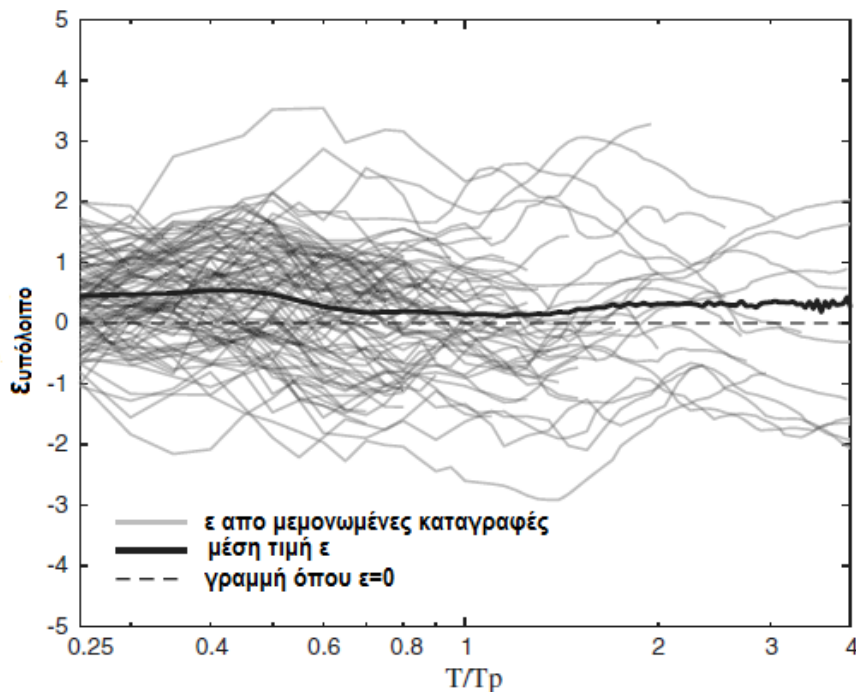
Τα υπόλοιπα του μοντέλου ακολουθούν κανονική κατανομή άρα η  $\ln T_p$  μπορεί να θεωρηθεί ότι ακολουθεί επίσης κανονική κατανομή (ή ότι η  $T_p$  ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή) σε σχέση με τη μέση τιμή  $\mu_{\ln T_p}$  που δίνεται από την εξίσωση (11) και την τυπική απόκλιση  $\sigma_{\ln T_p}$  που δίνεται από την εξίσωση (12). Από την εικόνα επίσης φαίνεται ότι ο αριθμός των παλμικών κινήσεων με μικρή περίοδο παλμού είναι μικρός. Τιμές  $T_p < 0.6 \text{ sec}$  είναι σπάνιες και παλμοί κατευθυντικότητας με χαμηλές περιόδους δεν αναμένεται να επιδρούν σημαντικά στη σεισμική επικινδυνότητα. Για το λόγο αυτό, οι παρατηρήσεις με  $T_p < 0.6 \text{ sec}$  αγνοήθηκαν στα εν λόγω μοντέλα και στους μετέπειτα υπολογισμούς.

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

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

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

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



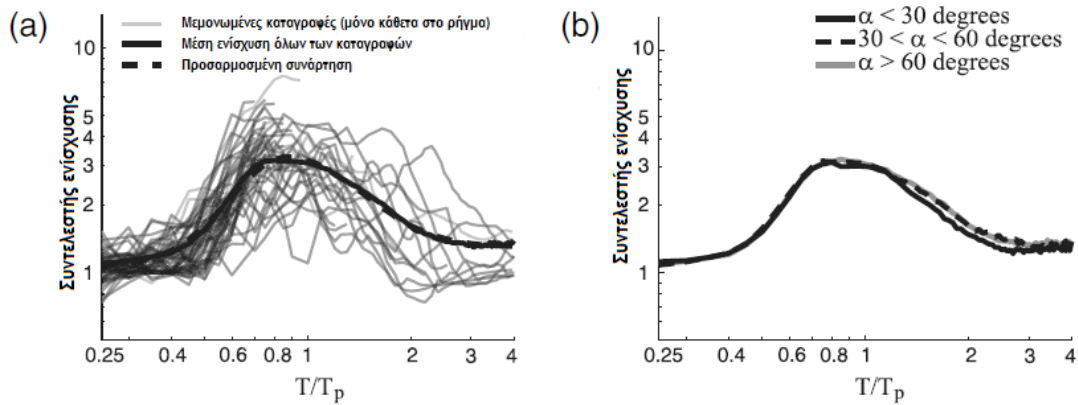
Σχήμα 3.9: Παρατηρούμενες τιμές  $\epsilon$  της απομένουσας εδαφικής κίνησης.



Στο σχήμα φαίνεται ότι τιμές των  $\varepsilon$  κοντά στο μηδέν υποδηλώνουν ότι το εδαφικό μοντέλο μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά την  $Sa'$  κατά μέσο όρο και για το λόγο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της απομένουσας εδαφικής κίνησης. Οι Chioccarelli και Iervolino (2010) απέδειξαν ότι η κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα εδαφικής κίνησης είναι πολλές φορές ισχυρότερη από την παράλληλη, ακόμα και μετά την αφαίρεση του παλμού, άρα το αποτέλεσμα του σχήματος 3.9 είναι συμβατό με αυτό το εύρημα καθώς τα  $\varepsilon$  από την απομένουσα εδαφική κίνηση είναι θετικά (η εδαφική κίνηση είναι δηλαδή ισχυρότερη από την πρόβλεψη για τη μέση τιμή). Όμως, τα  $\varepsilon$  είναι αρκετά κοντά στο 0 άρα συμπεραίνουμε ότι τα παραδοσιακά μοντέλα εδαφικής κίνησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της απομένουσας εδαφικής κίνησης. Άρα η εξίσωση (13) μπορεί να ξαναγραφεί αντικαθιστώντας το  $\ln Sa'$  με την τιμή που προβλέπεται από τα παραδοσιακά προσομοιώματα εδαφικής κίνησης:

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

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



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

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

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

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

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

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

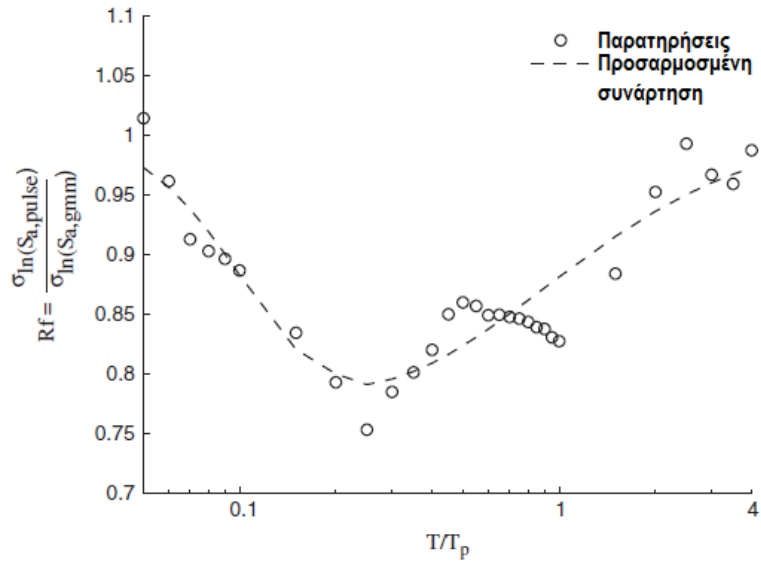
$$\sigma_{lnSa,pulse} = R_f \cdot \sigma_{lnSa,gmm}$$

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

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

Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζεται ο λόγος της τυπικής απόκλισης των υπολοίπων του τροποποιημένου μοντέλου προς αυτές του μοντέλου των Boore και Atkinson (2008). Όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη μελέτη είναι στατιστικά προσαρμοσμένα στα σεισμικά δεδομένα και εξαρτώμενα από την περίοδο του παλμού ( $T_p$ ). Όπως προαναφέρθηκε, τα δεδομένα με περίοδο  $T_p < 0.6\text{sec}$  είναι σπάνια και η προσομοίωση του μοντέλου για τις συγκεκριμένες τιμές μπορεί να οδηγήσει σε ενίσχυση των μικρών περιόδων, άρα συνιστάται η χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου για τυπικές εδαφικές κινήσεις περιόδων  $T_p > 0.6\text{sec}$ . Ας σημειωθεί ότι αυτό το όριο περιορίζει την

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



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



# Κεφάλαιο 4

## ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ: ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 8

---

### 4.1 Εισαγωγή

### 4.2 Εδαφικές συνθήκες και σεισμική δράση

#### 4.2.1 Εδαφικές συνθήκες και κατηγορίες εδάφους

#### 4.2.2 Η σεισμική δράση



## 4.1 Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας τριακονταετίας έγιναν σύντομες προσπάθειες στο δυτικοευρωπαϊκό χώρο προκειμένου να διαμορφωθεί ένα ενιαίο πλαίσιο ευρωπαϊκών κανονισμών για το σχεδιασμό και τη μελέτη των έργων πολιτικού μηχανικού.

Το 1975, η Επιτροπή της Ευρωπαϊκής Κοινότητας αποφάσισε να υλοποιηθεί ένα πρόγραμμα δράσης στον τομέα των κατασκευών. Στα πλαίσια αυτού του προγράμματος δράσης, η Επιτροπή ανέλαβε την πρωτοβουλία να θεσπίσει μια σειρά εναρμονισμένων τεχνικών κανόνων για το σχεδιασμό των κατασκευών, οι οποίοι σε πρώτο στάδιο θα χρησίμευαν ως εναλλακτικοί των ισχυόντων στα Κράτη Μέλη εθνικών κανόνων και τους οποίους τελικά θα αντικαθιστούσαν. Επί δεκαπέντε χρόνια η Επιτροπή μαζί με εκπροσώπους των Κρατών Μελών, προώθησε την ανάπτυξη του προγράμματος των Ευρωκωδίκων, το οποίο οδήγησε στην πρώτη γενιά Ευρωπαϊκών κανονισμών κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980. Το 1989 η Επιτροπή και τα Κράτη Μέλη της Ε.Ε. αποφάσισαν τη μεταφορά της ευθύνης σύνταξης και δημοσιοποίησης των Ευρωκωδίκων στη CEN (Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης), προκειμένου να τους δοθεί η υπόσταση ενός Ευρωπαϊκού Προτύπου (EN).

Το πρόγραμμα των Ευρωκωδίκων περιλαμβάνει τα ακόλουθα Πρότυπα, το καθένα από τα οποία απαρτίζεται από έναν αριθμό μερών:

- Ευρωκώδικας: Βάσεις σχεδιασμού
- Ευρωκώδικας 1: Δράσεις στους φορείς
- Ευρωκώδικας 2: Σχεδιασμός φορέων από σκυρόδεμα
- Ευρωκώδικας 3: Σχεδιασμός φορέων από χάλυβα
- Ευρωκώδικας 4: Σχεδιασμός σύμμικτων φορέων από χάλυβα και σκυρόδεμα
- Ευρωκώδικας 5: Σχεδιασμός ξύλινων φορέων
- Ευρωκώδικας 6: Σχεδιασμός φορέων από τοιχοποιία
- Ευρωκώδικας 7: Γεωτεχνικός Σχεδιασμός
- Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός
- Ευρωκώδικας 9: Σχεδιασμός φορέων από αλουμίνιο

Ο Ευρωκώδικας 8 αποτελείται από 6 μέρη εκ των οποίων το πρώτο μέρος δίνει τις γενικές απαιτήσεις σεισμικής συμπεριφοράς και τους κανόνες καθορισμού της σεισμικής δράσης για το σχεδιασμό οιοδήποτε τύπου έργου.

## 4.2 Εδαφικές Συνθήκες και Σεισμική Δράση

### 4.2.1 Εδαφικές συνθήκες και κατηγορίες εδάφους

Η σεισμική δράση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Στον Ευρωκώδικα 8 η κατηγοριοποίηση του εδάφους γίνεται σε 5 τυπικές κατηγορίες, τις A,B,C,D,E και σε δύο ειδικές τις S<sub>1</sub> και S<sub>2</sub>.

Η βασική παράμετρος για την κατάταξη είναι η μέση τιμή της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων στα ανώτατα 30m από την επιφάνεια, V<sub>S,30</sub>.

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

Όπου h<sub>i</sub> και v<sub>i</sub> είναι το πάχος σε μέτρα (m) και η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων του σχηματισμού ή στρώματος i από N συνολικά. Αν δεν είναι διαθέσιμη η τιμή της V<sub>S,30</sub> μπορεί να χρησιμοποιείται για την κατάταξη σε κατηγορία ο αριθμός κρούσεων ανά 0.3m στην Πρότυπη Δοκιμή Διείσδυσης, N<sub>SPT</sub>. Αν ούτε αυτός είναι διαθέσιμος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αστράγγιστη αντοχή c<sub>u</sub>. Οι κατηγορίες του εδάφους δίνονται στον πίνακα 4.1.

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 Vs>800m/s			
<b>S<sub>1</sub></b>	≥ 10m μαλακή άργιλος/λύς 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

Εδάφη της κατηγορίας S1 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<sub>S30</sub> του στρώματος μαλακής αργίλου/λύος και τη μεγάλη διαφορά των ελαστικών σταθερών μεταξύ του στρώματος αυτού και των υποκείμενων. Ακόμη



μεγαλύτερη προσοχή απαιτεί η κατηγορία S2, για την οποία υπάρχει πιθανότητα αστοχίας του εδάφους υπό τη σεισμική δράση. Είναι προφανές, ότι η θέση του έργου και η φύση του εδάφους να αποκλείουν το ενδεχόμενο να προκληθεί από το σεισμό ρευστοποίηση ή δυναμική συμπύκνωση 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.

#### 4.2.2 Η σεισμική δράση

##### 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. Για έργα κατηγορίας σπουδαιότητας διαφορετικής της συνήθους (II), η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού  $a_g$  ισούται με την τιμή αναφοράς επί τον συντελεστή σπουδαιότητας. Οι τιμές του συντελεστή σπουδαιότητας δίνονται στον πίνακα 4.2. Οι τιμές αναφοράς  $a_{gr}$  για την Ελλάδα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1.

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας	$a_{gr}$ (g)
Z1	0.16
Z2	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

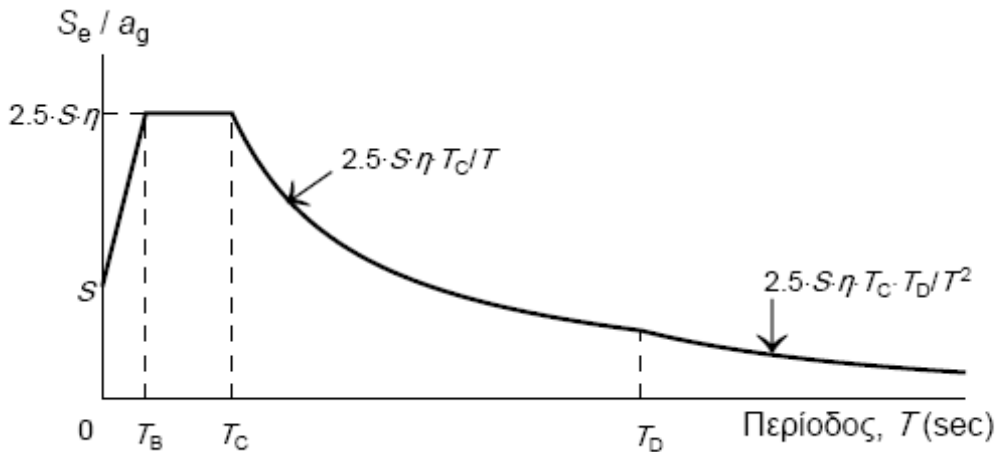
**Πίνακας 4.3:** Τιμές του συντελεστή  $\gamma_i$  ανάλογα με την κατηγορία σπουδαιότητας

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

**Πίνακας 4.4:** Τιμές του συντελεστή S και των περιόδων  $T_B$ ,  $T_C$ , και  $T_D$  ανάλογα με την κατηγορία του εδάφους

## Φάσμα σχεδιασμού στην οριζόντια διεύθυνση

Σε 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 τον συντελεστή συμπεριφοράς  $q$ . Το ελαστικό φάσμα απόκρισης απεικονίζεται στο σχήμα 4.1:



**Σχήμα 4.1:** Ελαστικό Φάσμα Απόκρισης EC8

Οι εξισώσεις που το περιγράφουν είναι οι εξής:

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

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

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

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

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

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

Se: ελαστική φασματική απόκριση

και S ο συντελεστής εδάφους.



# Κεφάλαιο 5

## ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

---

### 5.1 Εισαγωγή

### 5.2 Ελαστικά φάσματα απόκρισης-Περιγραφή υπολογιστικής διαδικασίας

#### 5.2.1 Αποτελέσματα



## 5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας διερευνάται η επιρροή του εδάφους στα ελαστικά φάσματα επιτάχυνσης σε σεισμούς κοντινού πεδίου. Επίσης μελετάται κατά πόσο το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων του Ευρωκώδικα 8 μπορεί να καλύψει τις περιπτώσεις φασμάτων σε σεισμούς κοντινού πεδίου αλλά και αν οι σχέσεις των Shahi-Baker (2011) για το κοντινό πεδίο μπορούν να εφαρμοστούν στην περίπτωση αυτή.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι 179 καταγραφές από τη νέα βάση δεδομένων (NGA database) οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ως παλμικές, δηλαδή παρουσιάζουν παλμό κατευθυντικότητας στη χρονοϊστορία ταχύτητας της κάθετης συνιστώσας.

Για τις καταγραφές αυτές αρχικά γίνεται διάκριση των εδαφικών κατηγοριών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8. Η κατηγοριοποίηση έγινε με βάση την τιμή της μέσης διατμητικής ταχύτητας στα άνω 30m της εδαφικής στρώσης και την περιγραφή του εδάφους όπως αυτή δίνεται στη βάση δεδομένων από τους ερευνητές. Είναι γνωστό ότι οι οριζόντιες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης εξαρτώνται από τον προσανατολισμό ως προς το ρήγμα (Somerville et al. 1999). Γι αυτό το λόγο οι καταγραφές στράφηκαν προκειμένου να υπολογιστεί η κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της κάθε εδαφικής κίνησης. Για τις 179 καταγραφές υπολογίστηκε και η δεσπόζουσα περίοδος του παλμού  $T_p$ , η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της φασματικής μετακίνησης για απόσβεση 5%. Πρέπει να τονιστεί ότι η διαδικασία της περιστροφής των καταγραφών δεν επηρεάζει την δεσπόζουσα περίοδο  $T_p$ .

Για την κάθε στραμμένη καταγραφή προέκυψαν δύο συνιστώσες. Για την κάθε συνιστώσα με τη χρήση του προγράμματος Seismosignal, εξήχθησαν τα φάσματα μετακίνησης. Αυτό που έδινε τις μεγαλύτερες τιμές μετακινήσεων θεωρήθηκε ότι αντιστοιχεί στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα, και με αυτήν συνεχίσαμε τις αναλύσεις.

Στο παράρτημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας δίνεται πίνακας που παρουσιάζει τις 179 καταγραφές που χρησιμοποιήσαμε, την εδαφική κατηγοριοποίησή τους σύμφωνα με τον EC8 και τις δεσπόζουσες περιόδους.

## 5.2 Ελαστικά Φάσματα Απόκρισης – Περιγραφή υπολογιστικής διαδικασίας

Με τη χρήση του προγράμματος Seismosignal εξήχθησαν τα φάσματα επιτάχυνσης με απόσβεση 5% στην επιφάνεια του εδάφους, τα οποία δίνονται στο παράρτημα της διπλωματικής εργασίας. Στη συνέχεια, κατηγοριοποιήθηκαν στις πέντε κατηγορίες εδάφους, σύμφωνα με την κατάταξη της κάθε καταγραφής. Επιπλέον κατηγοριοποίηση έγινε και ως προς το μέγεθος του σεισμού και έτσι για κάθε κατηγορία εδάφους προέκυψαν

φάσματα με διαβάθμιση μεγέθους ανά 0.5 M ξεκινώντας από M=5 και φτάνοντας μέχρι M=8. Οι κατηγορίες που προέκυψαν είναι οι εξής:

- Εδάφη A, M=6.50-7.00
- Εδάφη B, M=5.50-6.00
- Εδάφη B, M=6.00-6.50
- Εδάφη B, M=6.50-7.00
- Εδάφη B, M=7.00-7.50
- Εδάφη B, M=7.50-8.00
- Εδάφη C, M=5.00-5.50
- Εδάφη C, M=5.50-6.00
- Εδάφη C, M=6.00-6.50
- Εδάφη C, M=6.50-7.00
- Εδάφη C, M=7.00-7.50
- Εδάφη C, M=7.50-8.00
- Εδάφη D, M=6.50-7.00
- Εδάφη E, M=5.50-6.00
- Εδάφη E, M=6.50-7.00

Στη συνέχεια ακολούθησε κανονικοποίηση των φασμάτων διαιρώντας τις φασματικές τιμές με την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) και τις περιόδους με την δεσπόζουσα περίοδο παλμού για την κάθε καταγραφή. Τα κανονικοποιημένα φάσματα παρουσιάζονται ως προς T (sec), αλλά και ως προς T/T<sub>p</sub>.

Η ίδια διαδικασία αδιαστατοποίησης ακολουθήθηκε και για το ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης του EC8. Η τιμή της επιτάχυνσης σε αυτή την περίπτωση διαιρέθηκε με την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, η οποία είναι  $a_{gs}=S \cdot a_{gr}$ .

Στη συνέχεια υπολογίστηκε για κάθε καταγραφή η περίοδος του παλμού κατευθυντικότητας σύμφωνα με τον τύπο των Shahi- Baker (2011) που παρουσιάστηκε στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής και εξαρτά την περίοδο με το μέγεθος του σεισμού. Συγκεκριμένα υπολογίζεται ως εξής:

$$\mu_{lnT_p} = -5.37 + 0.99M$$

Το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων του EC8 πολλαπλασιάστηκε με την επαύξηση που δίνουν οι Shahi-Baker σύμφωνα με τον τύπο:

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

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



Η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε δύο φορές. Μία χρησιμοποιώντας ως περίοδο  $T_p$  τον μέσο όρο των πραγματικών δεσποζουσών περιόδων παλμού που αντιστοιχούν στην κάθε καταγραφή, και μία με τον μέσο όρο της περιόδου παλμού που δίνει ο τύπος των Shahi-Baker. Στον παρακάτω πίνακα δίνεται η μέση τιμή της πραγματικής περιόδου παλμού  $T_p$  και η μέση τιμή της υπολογιζόμενης  $T_{p, S-B}$  για κάθε κατηγορία φασμάτων.

Κατηγορίες φασμάτων	$T_p$	$T_{p, S-B}$
Εδάφη Α, $M=6.50-7.00$	1.85	2.69
Εδάφη Β, $M=5.50-6.00$	1.11	0.93
Εδάφη Β, $M=6.00-6.50$	2.38	1.54
Εδάφη Β, $M=6.50-7.00$	1.97	2.71
Εδάφη Β, $M=7.00-7.50$	3.75	3.95
Εδάφη Β, $M=7.50-8.00$	7.61	6.10
Εδάφη C, $M=5.00-5.50$	3.61	0.53
Εδάφη C, $M=5.50-6.00$	1.68	1.16
Εδάφη C, $M=6.00-6.50$	1.43	1.56
Εδάφη C, $M=6.50-7.00$	2.67	2.44
Εδάφη C, $M=7.00-7.50$	4.58	4.00
Εδάφη C, $M=7.50-8.00$	6.53	6.17
Εδάφη D, $M=6.50-7.00$	2.60	2.80
Εδάφη E, $M=5.50-6.00$	0.69	1.07
Εδάφη E, $M=6.50-7.00$	2.31	2.44

**Πίνακας 5.1:** Κατηγορίες φασμάτων και οι μέσοι όροι των δεσποζουσών περιόδων παλμού

Τελευταίο ζητούμενο ήταν να παρουσιαστεί η πραγματική επαύξηση των καταγραφών ως προς το φάσμα του EC8. Για το σκοπό αυτό κάθε ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης διαιρέθηκε με το αντίστοιχο του Ευρωκώδικα και στη συνέχεια κανονικοποιήθηκε διαιρώντας την περίοδο  $T$  με την δεσπόζουσα περίοδο  $T_p$  της κάθε μιας καταγραφής.

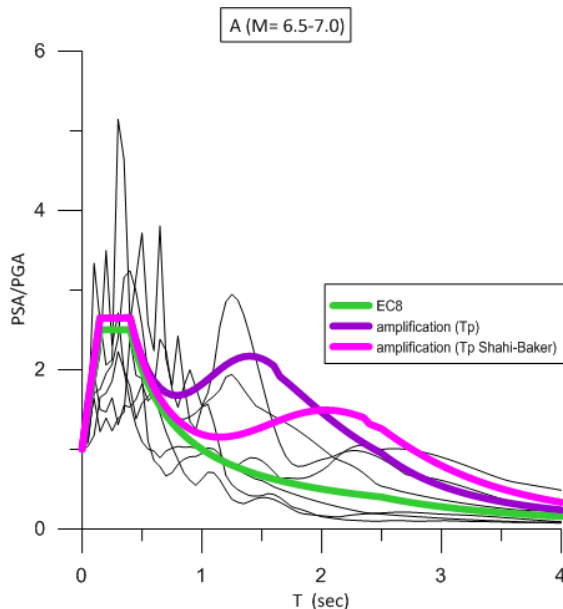
### 5.2.1 Αποτελέσματα

Ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται στα παραπάνω βήματα δημιουργήθηκαν τρεις μορφές αποτελεσμάτων για όλες τις κατηγορίες των φασμάτων. Στην πρώτη δίνονται τα φάσματα κανονικοποιημένα ως προς τον κατακόρυφο άξονα με την PGA ενώ ο οριζόντιος άξονας είναι εκφρασμένος ως προς την περίοδο  $T$  (sec). Στο ίδιο διάγραμμα απεικονίζεται το φάσμα του Ευρωκώδικα 8 και οι δύο επαυξήσεις του φάσματος αυτού, όπως αυτές υπολογίστηκαν. Στην δεύτερη απεικονίζονται επιπλέον ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση των φασμάτων, ενώ ο οριζόντιος άξονας είναι και αυτός κανονικοποιημένος ως προς την περίοδο  $T_p$ . Στην τρίτη μορφή παρουσίασης δίνονται τα φάσματα διαιρεμένα με τον Ευρωκώδικα μαζί με τον μέσο όρο και την τυπική απόκλιση.

Και σε αυτήν την περίπτωση ο οριζόντιος άξονας εκφράζεται ως προς την δεσπόζουσα περίοδο παλμού  $T_p$ . Στις επόμενες σελίδες δίνονται τα αποτελέσματα.

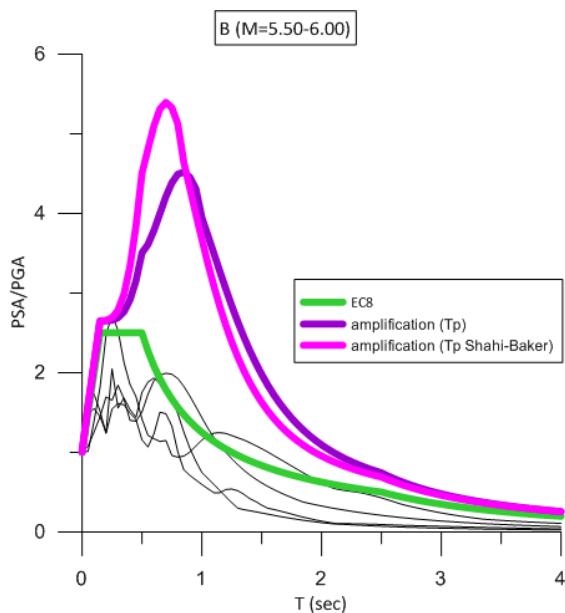
### A. Κανονικοποιημένα Ελαστικά Φάσματα Επιτάχυνσης για απόσβεση 5% στον κατακόρυφο άξονα – Επαύξηση Shahi-Baker

- Κατηγορία A

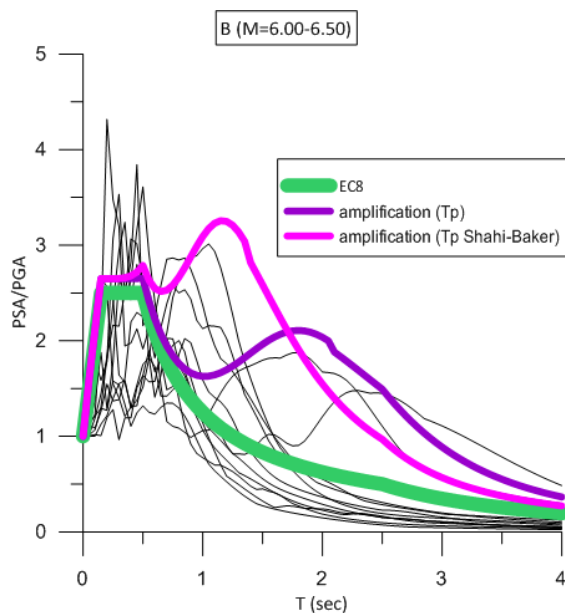


Σχήμα 5.A.1

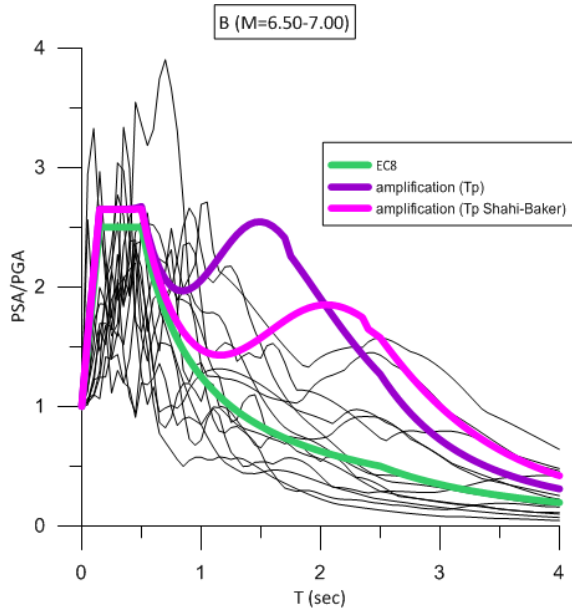
- Κατηγορία B



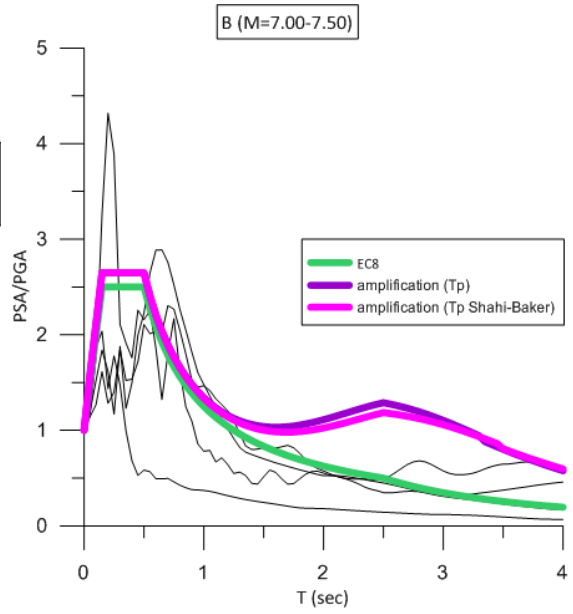
Σχήμα 5.A.2



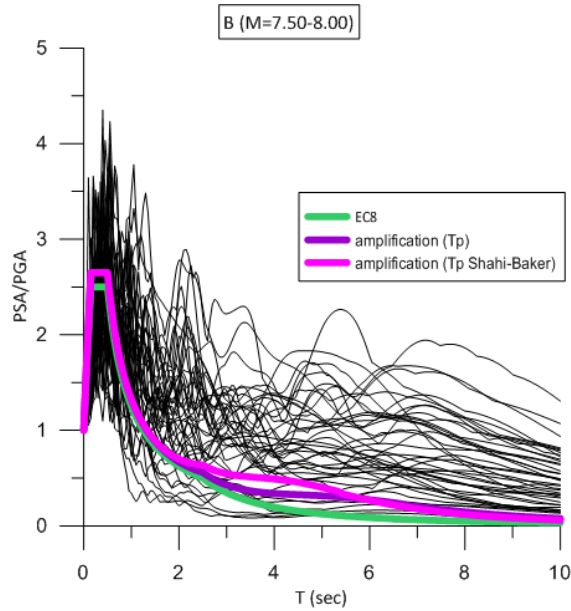
Σχήμα 5.A.3



Σχήμα 5.A.4

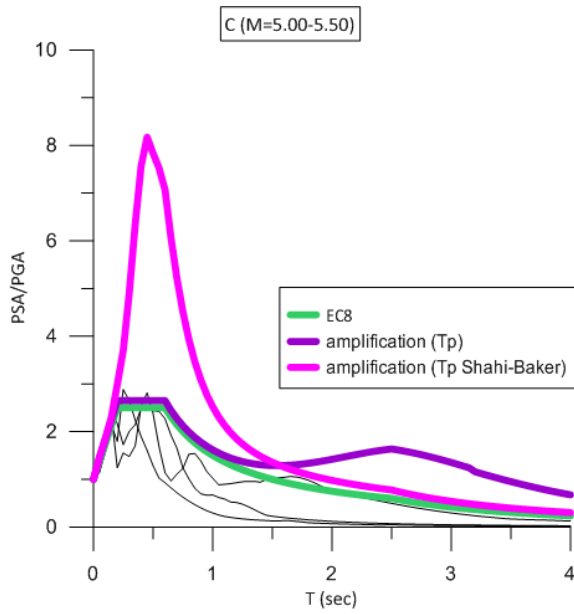


Σχήμα 5.A.5

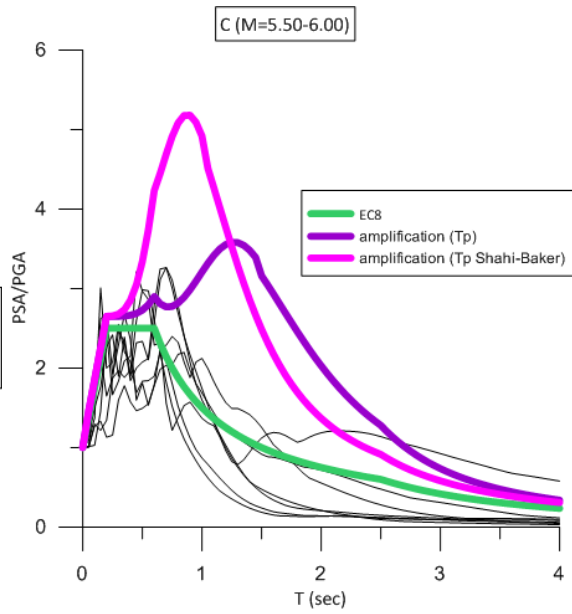


Σχήμα 5.A.6

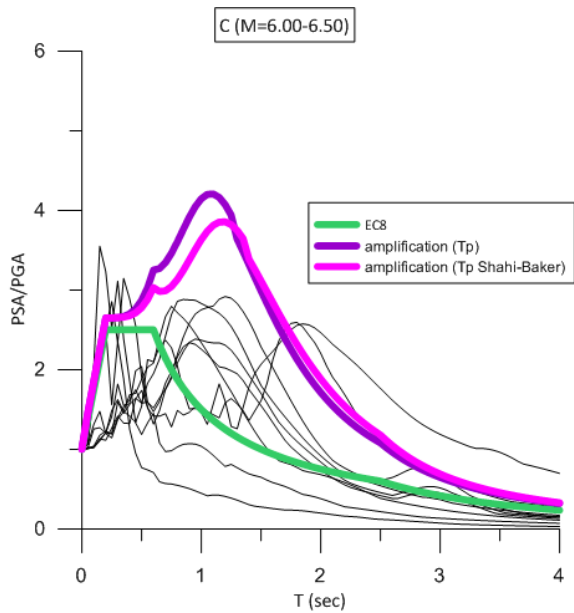
• Κατηγορία C



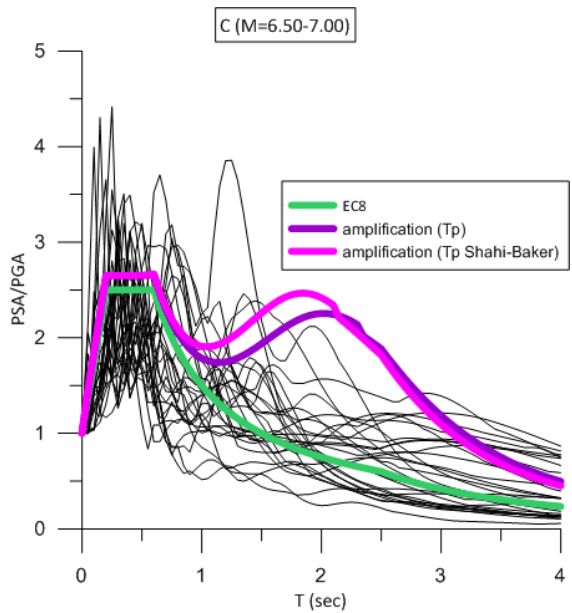
Σχήμα 5.A.7



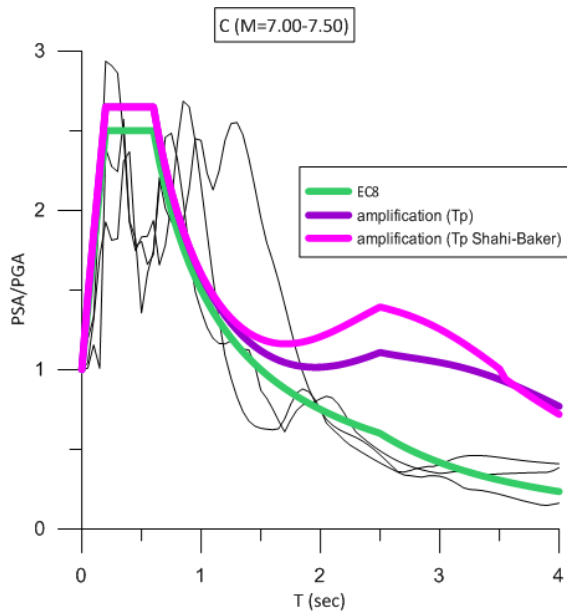
Σχήμα 5.A.8



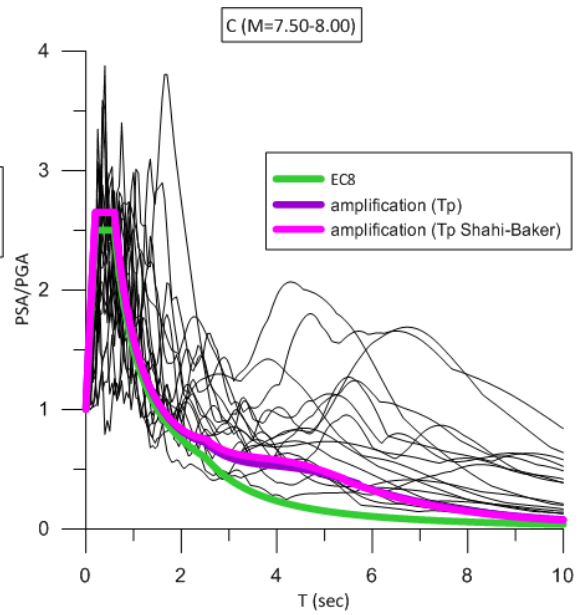
Σχήμα 5.A.9



2 Σχήμα 5.A.10

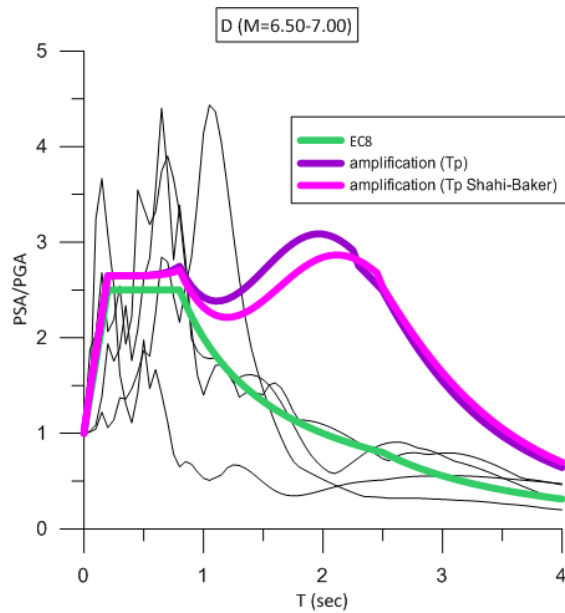


Σχήμα 5.A.11



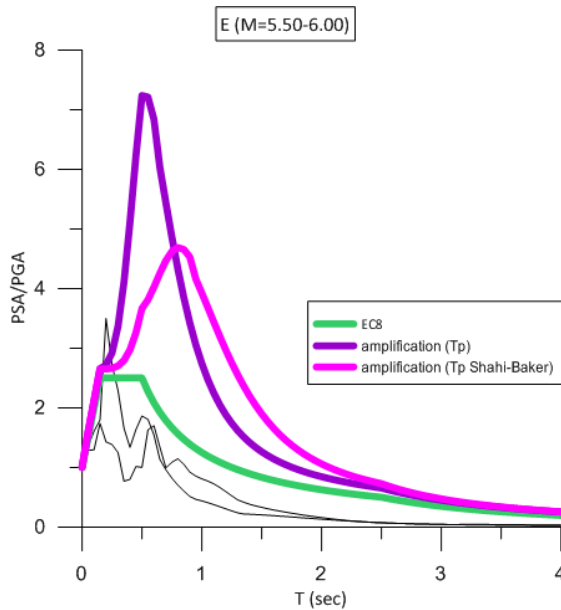
Σχήμα 5.A.12

- **Κατηγορία D**

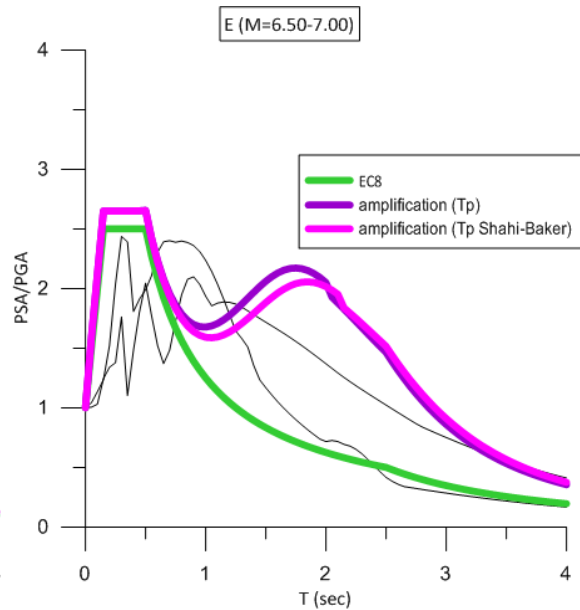


Σχήμα 5.A.13

- **Κατηγορία Ε**



Σχήμα 5.A.14



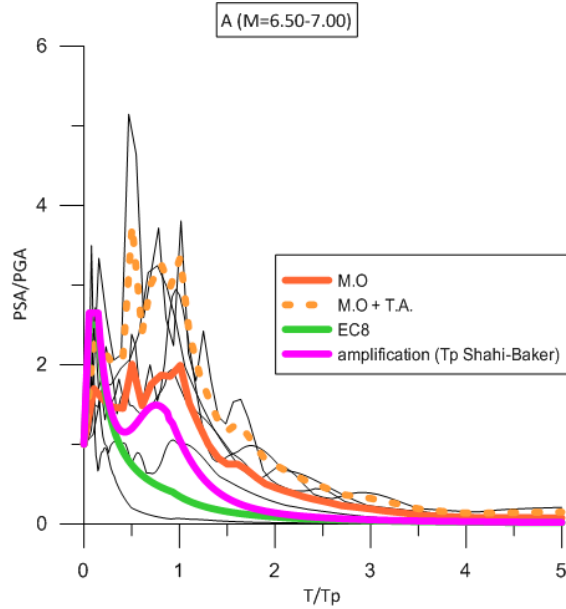
Σχήμα 5.A.15

### Παρατηρήσεις για την πρώτη ομάδα αποτελεσμάτων

- Η επαύξηση της φασματικής επιτάχυνσης του Ευρωκώδικα 8 γύρω από την δεσπόζουσα περίοδο του παλμού των Shahi-Baker για τους σεισμούς κοντινού πεδίου μεγέθους  $M=5.00-5.50$  και  $M=5.50-6.00$  δίνει πολύ μεγαλύτερες φασματικές τιμές από τις πραγματικές, ανεξαρτήτως κατηγορίας εδάφους.
- Το φάσμα του Ευρωκώδικα για τους σεισμούς κοντινού πεδίου μεγέθους  $M=5.00-5.50$  και  $M=5.50-6.00$  φαίνεται να επαρκεί και καλύπτει τις πραγματικές καταγραφές.
- Για τους σεισμούς μεγάλου μεγέθους,  $M=7.50-8.00$  το φάσμα του Ευρωκώδικα 8 είναι ανεπαρκές. Επίσης ούτε η επαύξηση των Shahi-Baker μπορεί να καλύψει την πραγματική επαύξηση στην περιοχή του παλμού.
- Η επαύξηση της φασματικής επιτάχυνσης του Ευρωκώδικα 8 εφαρμόζεται ικανοποιητικά για τους σεισμούς κοντινού πεδίου μεγέθους  $M=6.00-6.50$ , ανεξαρτήτως κατηγορίας εδάφους, στην περιοχή του παλμού.
- Για τους σεισμούς κοντινού πεδίου μεγέθους  $M=6.00-7.00$ , ο Ευρωκώδικας 8 με επαύξηση των Shahi-Baker επαρκεί για περιόδους μεγαλύτερες από 1sec. Στην περιοχή όμως από 0-1 sec που ανήκουν οι συνήθεις κατασκευές κρίνεται ανεπαρκής.
- Ανεξαρτήτως κατηγορίας εδάφους όσο μεγαλώνει το μέγεθος του σεισμού, η περίοδος του παλμού που υπολογίστηκε από τον τύπο των Shahi-Baker πλησιάζει την πραγματική δεσπόζουσα περίοδο του παλμού.

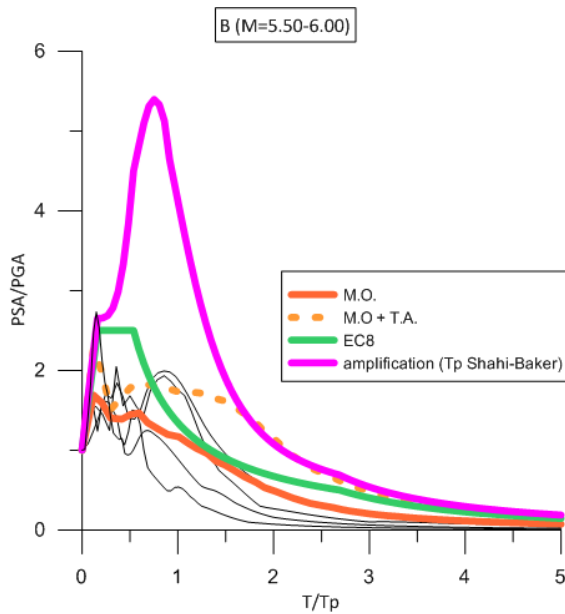
## Β. Κανονικοποιημένα Ελαστικά Φάσματα Επιτάχυνσης για απόσβεση 5% και ως προς τους δύο άξονες- Επάυξηση Shahi-Baker

### • Κατηγορία Α

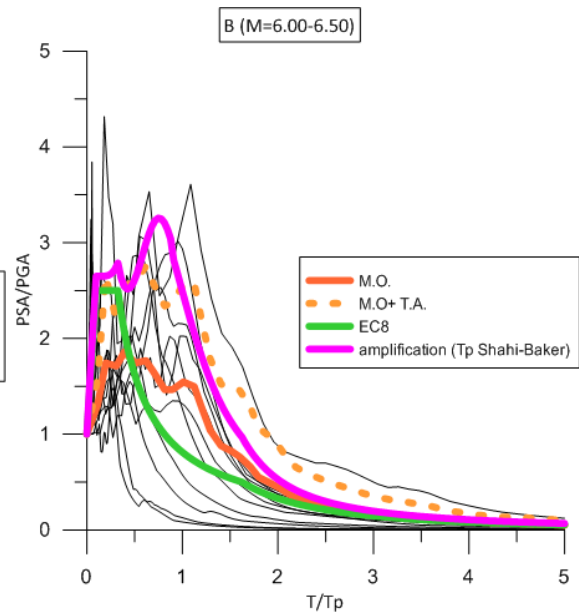


Σχήμα 5.B.1

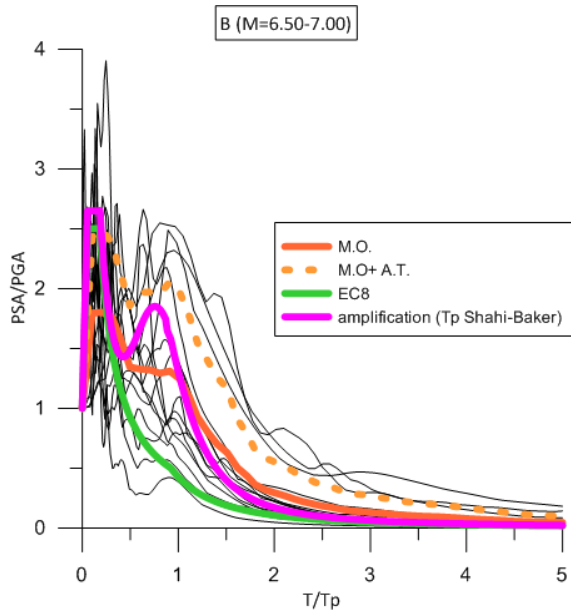
### • Κατηγορία Β



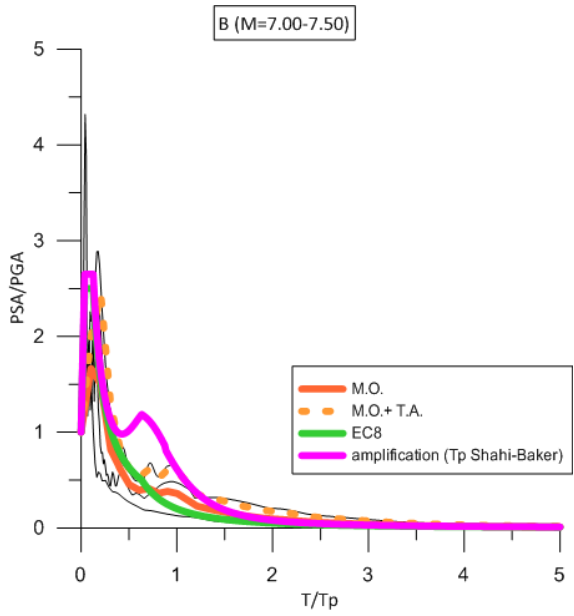
Σχήμα 5.B.2



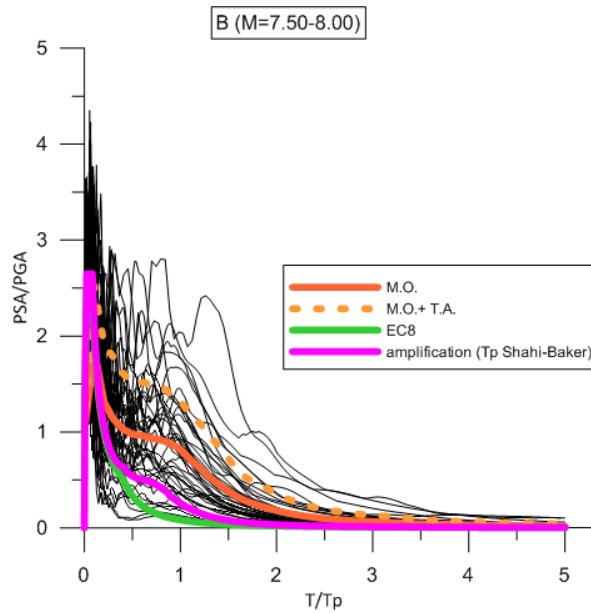
Σχήμα 5.B.3



Σχήμα 5.B.4



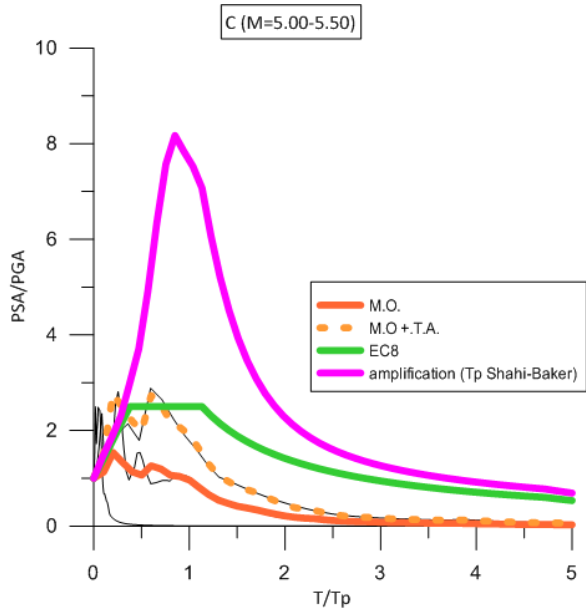
Σχήμα 5.B.5



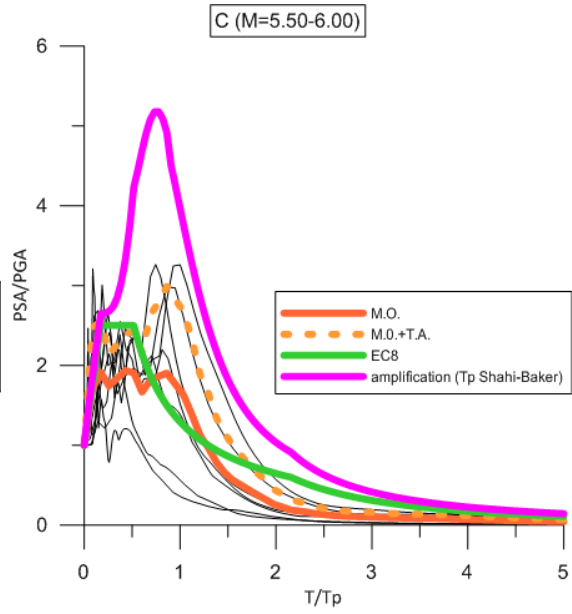
Σχήμα 5.B.6



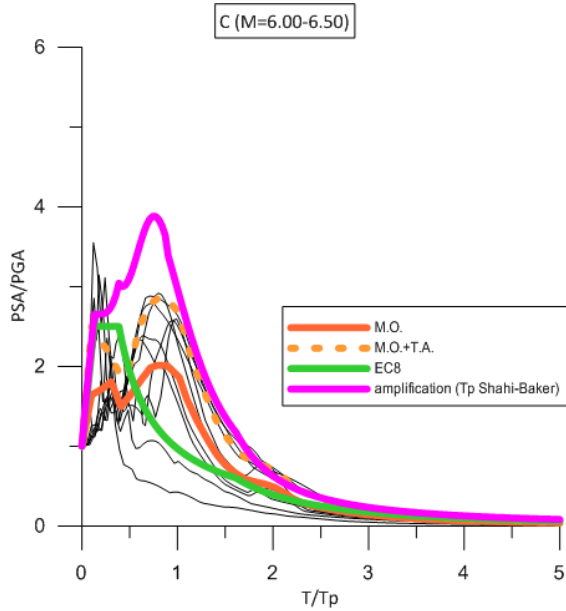
• Κατηγορία C



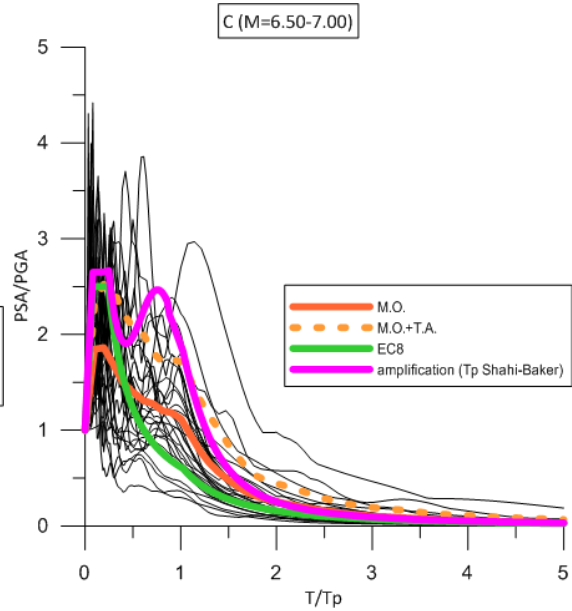
Σχήμα 5.B.7



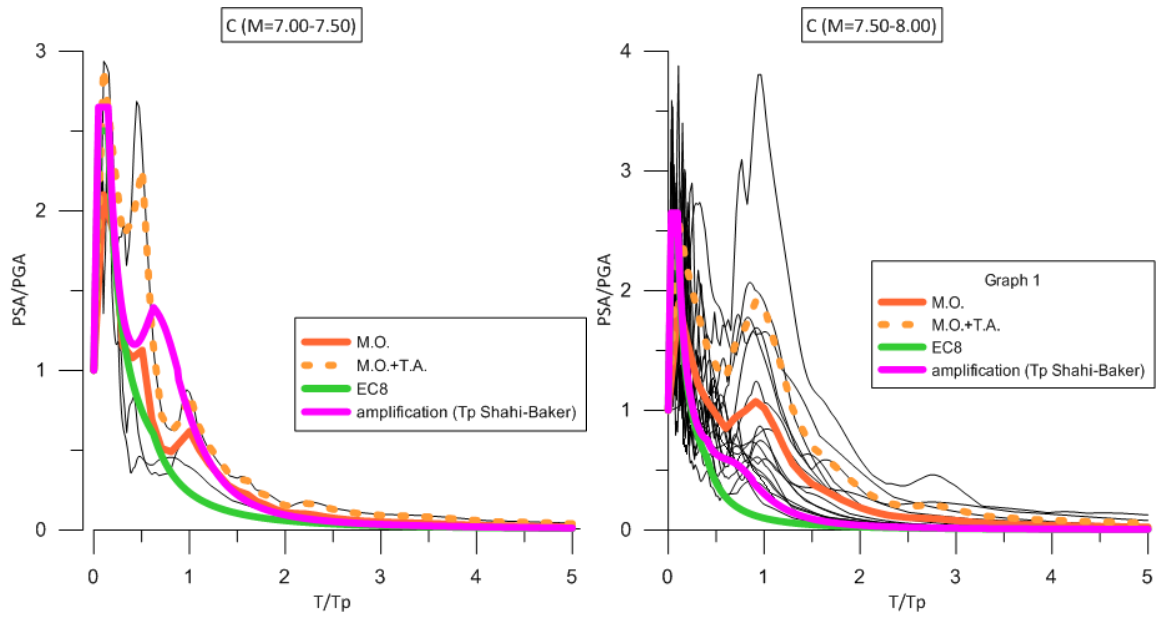
Σχήμα 5.B.8



Σχήμα 5.B.9



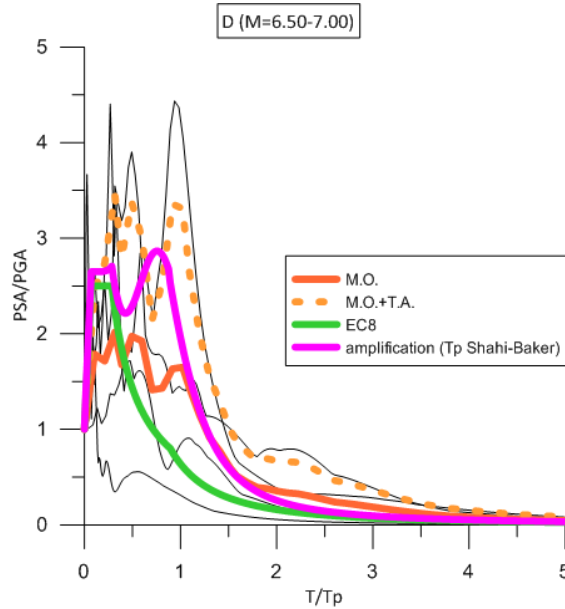
Σχήμα 5.B.10



Σχήμα 5.B.11

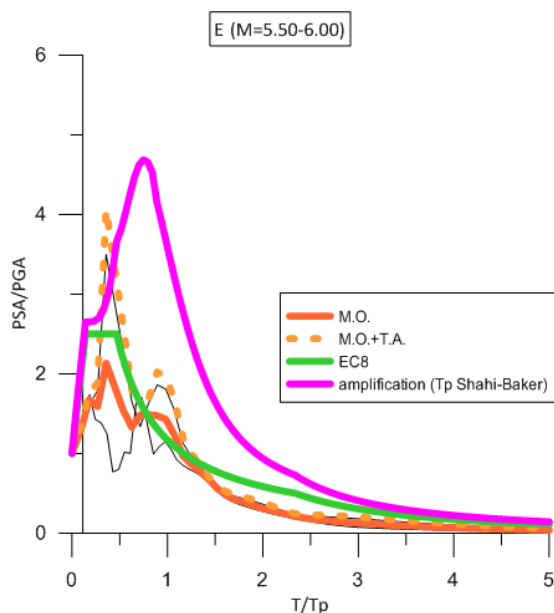
Σχήμα 5.B.12

- Κατηγορία D

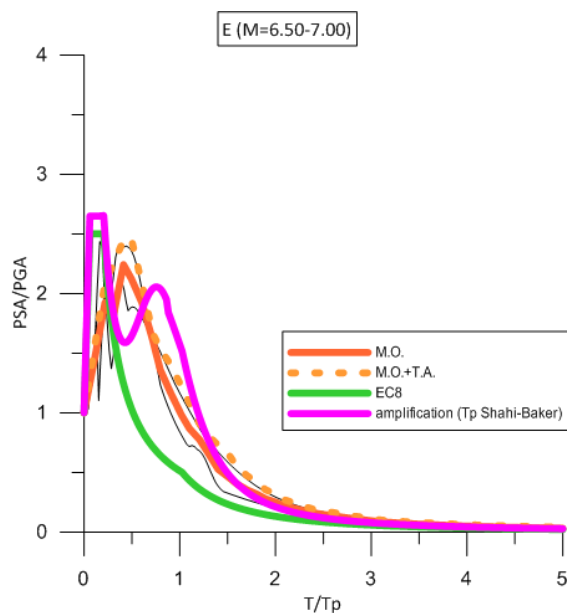


Σχήμα 5.B.13

- **Κατηγορία Ε**



Σχήμα 5.B.14



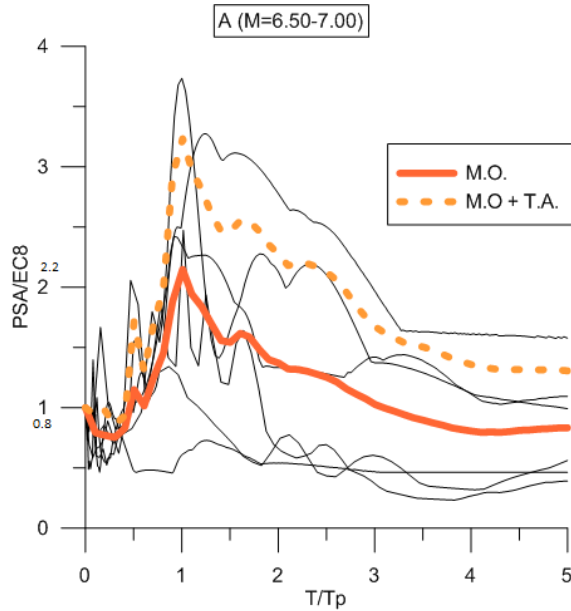
Σχήμα 5.B.15

### Παρατηρήσεις για την δεύτερη ομάδα αποτελεσμάτων

- Σε όλες τις καταγραφές, ανεξαρτήτως μεγέθους σεισμού και κατηγορίας εδάφους σχηματίζεται «καμπάνα» στα φάσματα επιτάχυνσης για απόσβεση 5% στην περιοχή του της δεσπόζουσας περιόδου του παλμού.
- Η επαύξηση της φασματικής επιτάχυνσης του Ευρωκώδικα 8 γύρω από την δεσπόζουσα περίοδο του παλμού των Shahi-Baker για τους σεισμούς κοντινού πεδίου μεγέθους  $M=5.00-5.50$  και  $M=5.50-6.00$  δίνει πολύ μεγαλύτερες φασματικές τιμές από τις πραγματικές, ανεξαρτήτως κατηγορίας εδάφους όπως φαίνεται και σε αυτήν την ομάδα αποτελεσμάτων
- Το φάσμα του Ευρωκώδικα για τους σεισμούς κοντινού πεδίου μεγέθους  $M=5.00-5.50$  και  $M=5.50-6.00$  φαίνεται να επαρκεί και καλύπτει τις πραγματικές καταγραφές.
- Και σε αυτήν την ομάδα φαίνεται ότι το φάσμα του EC8 με την επαύξηση Shahi-Baker εφαρμόζεται σε σεισμούς κοντινού πεδίου μεγέθους  $6.00-6.50$
- Όπως παρατηρήσαμε και στην προηγούμενη ομάδα αποτελεσμάτων, έτσι και εδώ το φάσμα του EC8 με την επαύξηση Shahi-Baker κρίνεται ανεπαρκές στους σεισμούς κοντινού πεδίου μεγέθους  $M=7.50-8.00$

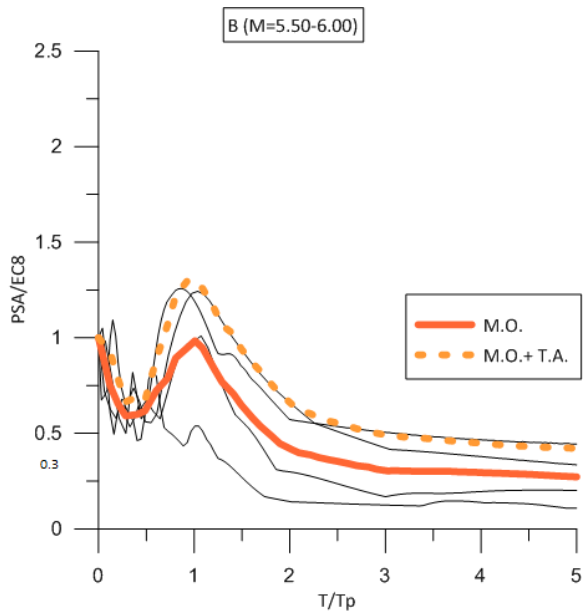
### Γ. Ελαστικά Φάσματα Επιτάχυνσης για απόσβεση 5% διαιρεμένα με το ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης του EC8 – κανονικοποιημένα και ως προς τους δύο άξονες

- Κατηγορία Α

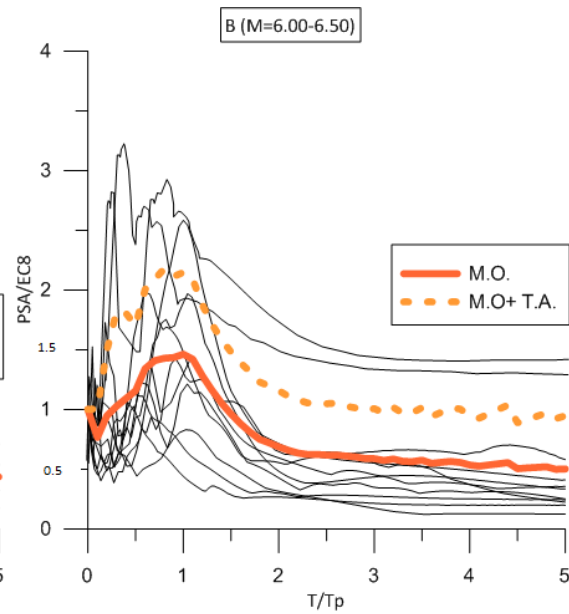


Σχήμα 5.Γ.1

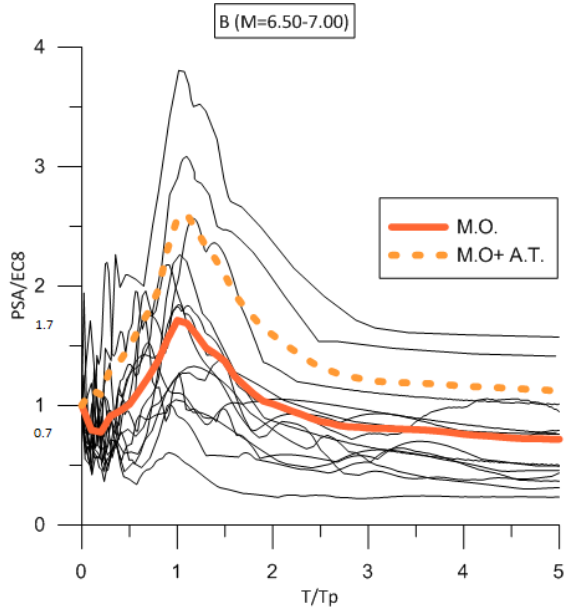
- Κατηγορία Β



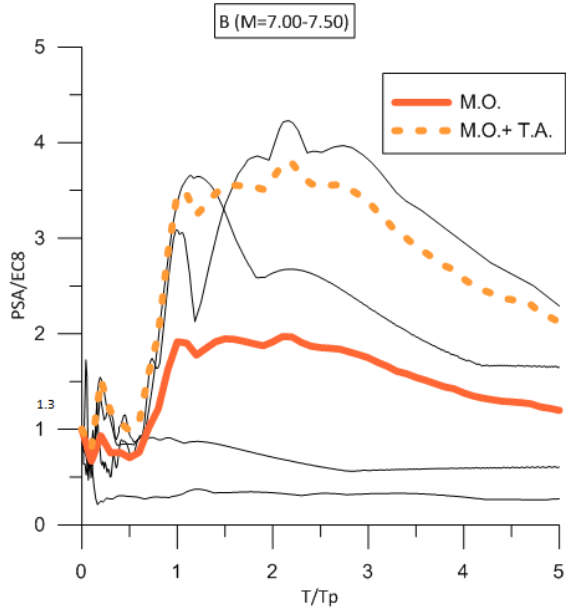
Σχήμα 5.Γ.2



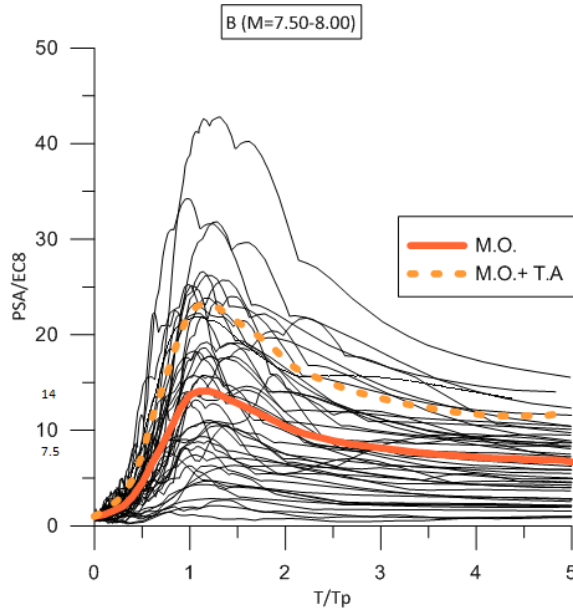
Σχήμα 5.Γ.3



Σχήμα 5.7.4

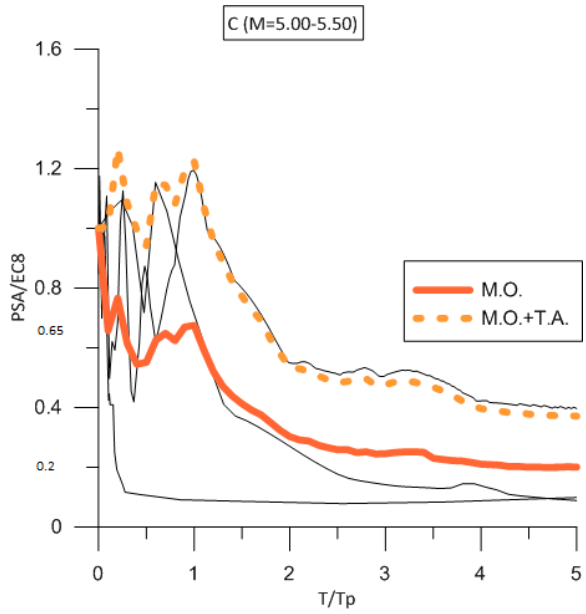


Σχήμα 5.7.5

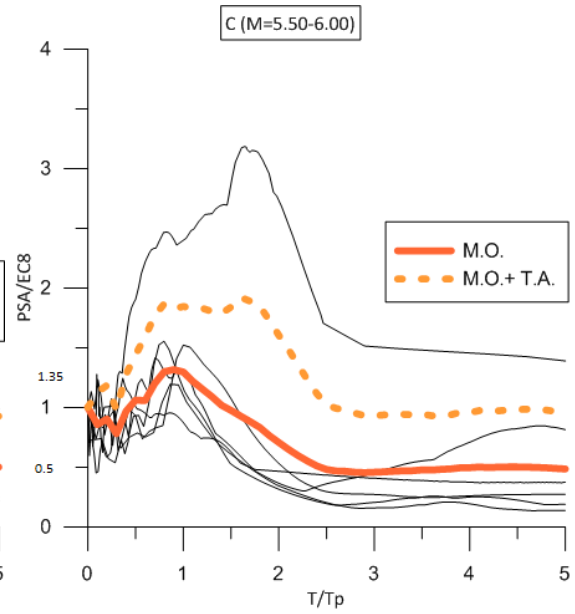


Σχήμα 5.7.6

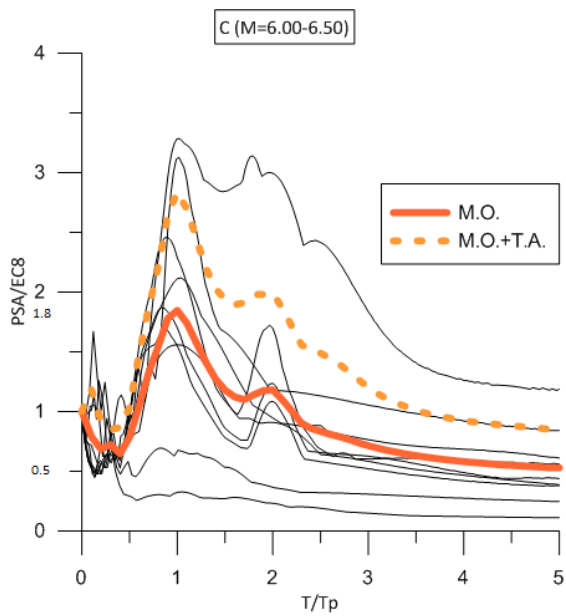
• Κατηγορία C



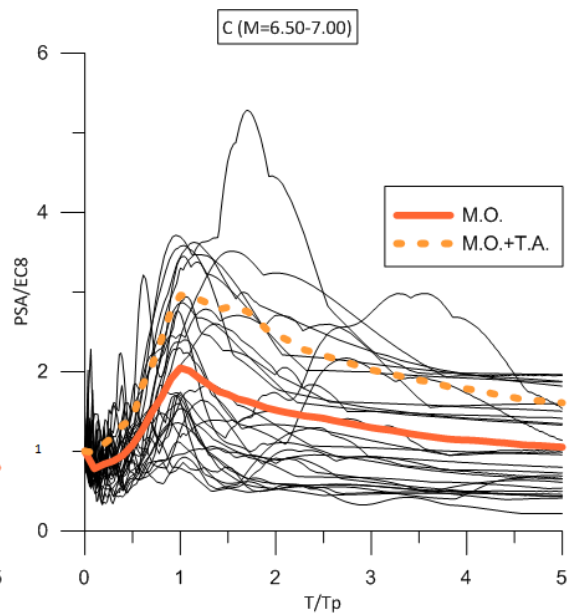
Σχήμα 5.7.7



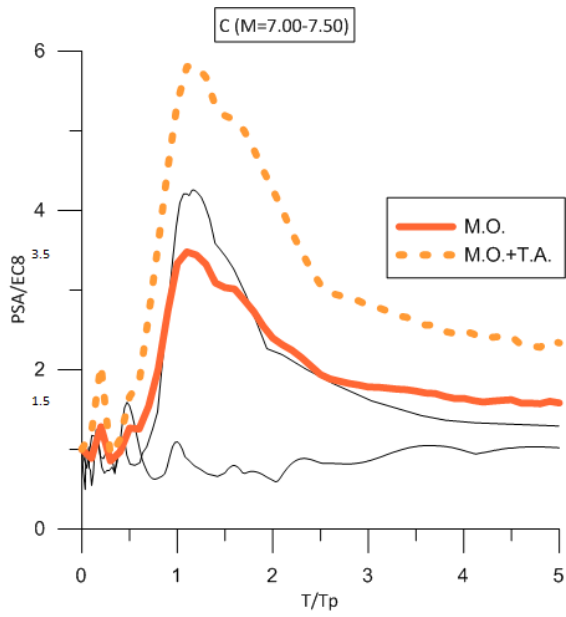
Σχήμα 5.7.8



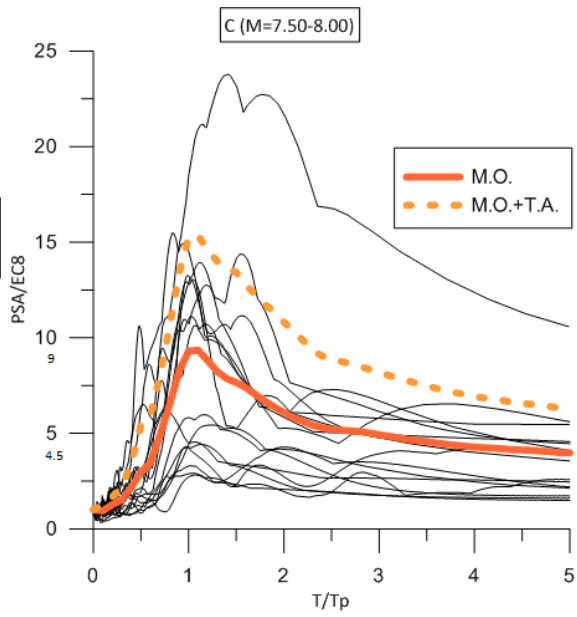
Σχήμα 5.7.9



Σχήμα 5.7.10

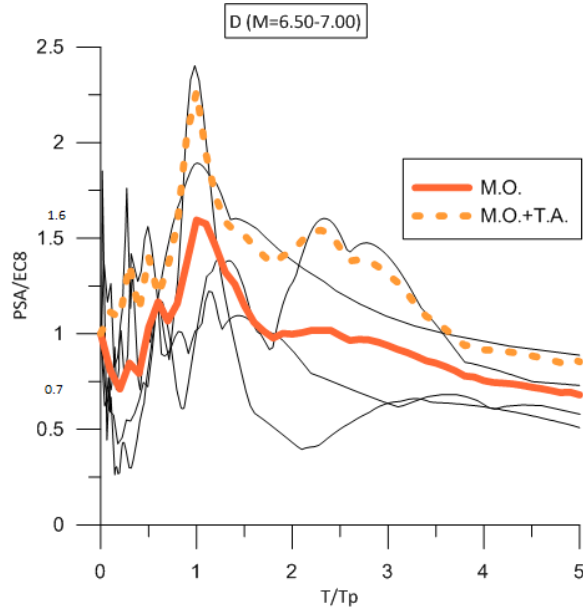


Σχήμα 5.Γ.11



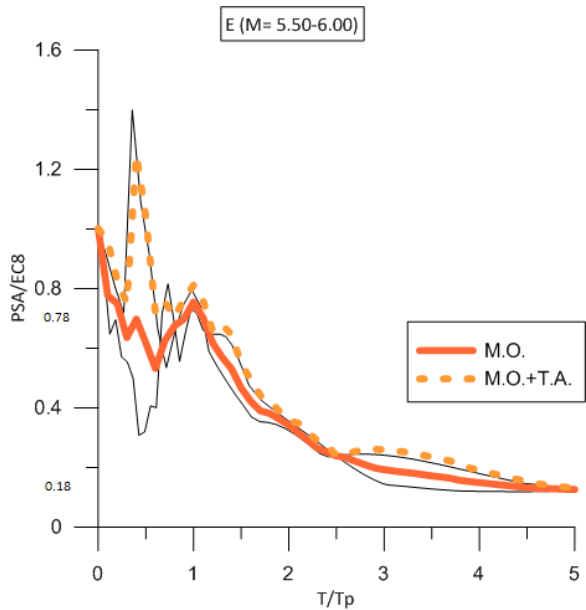
Σχήμα 5.Γ.12

- Κατηγορία D

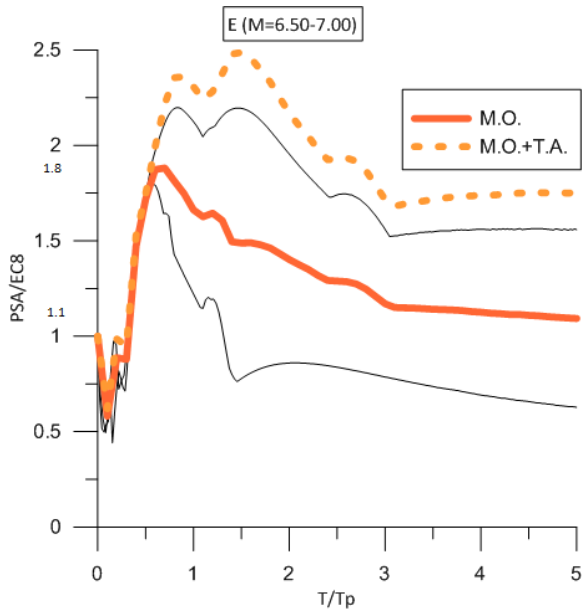


Σχήμα 5.Γ.13

- **Κατηγορία Ε**



Σχήμα 5.Γ.14



Σχήμα 5.Γ.15

### Παρατηρήσεις για την τρίτη ομάδα αποτελεσμάτων

- Ο μέσος όρος των διαγραμμάτων δίνει την μέση επαύξηση των φασματικών τιμών που οφείλεται στην επαύξηση από το μέγεθος του σεισμού και στην επαύξηση από τον παλμό κατευθυντικότητας. Το τμήμα στο οποίο ο μέσος όρος γίνεται οριζόντιος και τείνει ασυμπτωτικά σε μια τιμή, δίνει την επαύξηση λόγω μεγέθους  $M$ . Το τμήμα από την ασυμπτωτική μέχρι την «καμπάνα» για  $T/Tr=1$  αντιστοιχεί στην επαύξηση λόγω του παλμού.
- Ανεξαρτήτως κατηγορίας εδάφους ο μέσος όρος επαύξησης λόγω του μεγέθους του σεισμού είναι μικρότερος της μονάδας στους σεισμούς κοντινού πεδίου μεγέθους  $M=5.00-7.00$ . Αυτό σημαίνει ότι ο EC8 επαρκεί για το μέσο φάσμα των σεισμών αυτών, χωρίς όμως επαύξηση λόγω του παλμού.
- Στους σεισμούς κοντινού πεδίου μεγέθους  $M=6.5-7.00$  η ασυμπτωτική γραμμή του μέσου όρου τείνει στην μονάδα. Αυτό σημαίνει ότι το ελαστικό φάσμα του EC8 στις περιπτώσεις που δεν έχουμε παλμό κατευθυντικότητας, αρκεί για να καλύψει τον μέσο όρο των καταγραφών.
- Ανεξαρτήτως κατηγορίας εδάφους και μεγέθους σεισμού, ο μέσος όρος του επαυξητικού συντελεστή είναι σχεδόν πάντα μικρότερος ή πολύ κοντά στην τιμή 3.068 δηλαδή της επαύξησης για  $T=Tr$  που δίνει ο τύπος των Shahi-Baker.
- Για τα μεγέθη σεισμών κοντινού πεδίου  $M=5.00-7.00$  φαίνεται ότι ο EC8 με την επαύξηση Shahi-Baker αρκεί για να καλύψει τον μέσο όρο των πραγματικών καταγραφών.



# Κεφάλαιο 6

## ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ S

---

- 6.1 Εισαγωγή
- 6.2 Περιγραφή της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης της εδαφικής απόκρισης μέσω του προγράμματος SHAKE2000
- 6.3 Παραδοχές ανάλυσης και προσομοίωση των κατηγοριών εδάφους
- 6.4 Περιγραφή υπολογιστικής διαδικασίας
- 6.5 Αποτελέσματα επιλύσεων

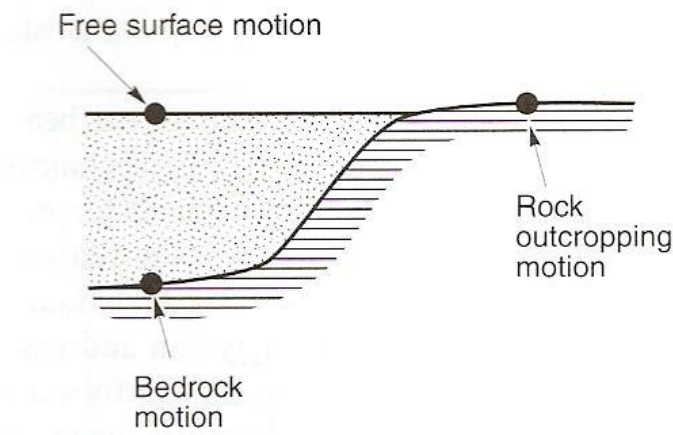


## 6.1 Εισαγωγή

Όπως επισημάνθηκε στο Κεφάλαιο 4, η επιρροή του εδάφους στη σεισμική δράση, δηλαδή στην επιτάχυνση σχεδιασμού μιας κατασκευής, δίνεται μέσω του συντελεστή ενίσχυσης  $S$  που ανάλογα με την κατηγορία του εδάφους, πάνω στο οποίο εδράζεται η κατασκευή.

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται μια προσπάθεια υπολογισμού του πραγματικού συντελεστή ενίσχυσης  $S$  για τις 179 παλμικές καταγραφές της NGA database και σύγκρισή του με τον συντελεστή ενίσχυσης που δίνει ο Ευρωκώδικας 8 για κάθε κατηγορία εδάφους. Υπενθυμίζεται ότι οι τιμές του συντελεστή είναι 1, 1.2, 1.15, 1.35 και 1.4 για έδαφος κατηγορίας A, B, C, D και E αντίστοιχα.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ενίσχυσης  $S$  διαιρείται το ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης με απόσβεση 5% της επιφάνειας του εδάφους (free surface) με το φάσμα που αντιστοιχεί στην επιφανειακή εκδήλωση του μητρικού πετρώματος (rock outcrop). Η κίνηση στην επιφανειακή εκδήλωση του μητρικού πετρώματος προκύπτει μέσω κατάλληλης επεξεργασίας της κίνησης του βραχώδους υποβάθρου (bedrock). Το σχήμα 6.1 απεικονίζει τις θέσεις για τις οποίες υπολογίστηκαν τα ελαστικά φάσματα επιτάχυνσης με απόσβεση 5%.



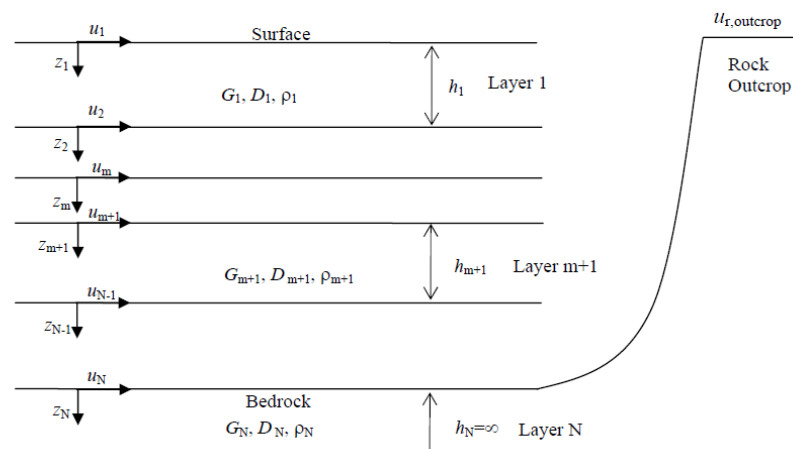
**Σχήμα 6.1:** Χαρακτηριστικές ονομασίες σεισμικών κινήσεων ανάλογα με τη θέση στην οποία αναφέρονται

Όπως αναφέρθηκε στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο, οι καταγραφές έχουν κατηγοριοποιηθεί εδαφικά σύμφωνα με τον EC8 και συναντάμε εδάφη A, B, C, D και E. Για αυτές τις εδαφικές κατηγορίες η σεισμική κίνηση εξάγεται στο βραχώδες υπόβαθρο με τη βοήθεια της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου (πρόγραμμα SHAKE2000).

## 6.2 Περιγραφή της ισοδύναμης γραμμική ανάλυσης της εδαφικής απόκρισης μέσω του προγράμματος SHAKE2000

Το πρόγραμμα SHAKE2000 εφαρμόζει ισοδύναμη γραμμική προσέγγιση της μη γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους με παραδοχή μονοδιάστατης διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Συγκεκριμένα, υπολογίζει την απόκριση ενός συστήματος ομοιογενών, ιξωδοελαστικών στρωμάτων εδάφους που εκτείνονται οριζόντια μέχρι το άπειρο και υπόκεινται σε διατμητικά κύματα κατακορύφως διαδιδόμενα. Τα απαραίτητα στοιχεία για την υπολογιστική διαδικασία συνοψίζονται παρακάτω και απεικονίζονται στο σχήμα 6.2 .

- Κάθε εδαφικό στρώμα καθορίζεται απόλυτα από το μέγιστο μέτρο δυσκαμψίας του ( $G_i$ ), την αρχική τιμή απόσβεσης ( $D_i$  ή  $\zeta_i$ ), την πυκνότητά του ( $\rho_i$  και το πάχος του ( $h_i$ ). Αυτές οι τιμές είναι ανεξάρτητες της συχνότητας.
- Τα διατμητικά κύματα δίνονται ως χρονοϊστορίες επιτάχυνσης με συγκεκριμένο χρονικό βήμα οι οποίες εισέρχονται ως δεδομένα στο πρόγραμμα είτε ως εδαφικές κινήσεις στο μητρικό υπόβαθρο (bedrock within) είτε ως εδαφικές κινήσεις στο μητρικό πέτρωμα απουσία υπερκείμενης εδαφικής απόθεσης (rock outcrop).
- Η εξάρτηση του μέτρου δυσκαμψίας και του ποσοστού απόσβεσης κάθε εδαφικής στρώσης από τη διατμητική παραμόρφωση λαμβάνεται υπόψη μέσω μιας ισοδύναμης γραμμικής προσέγγισης η οποία λαμβάνει υπόψη τη μέση διατμητική παραμόρφωση για κάθε στρώμα. Οι καμπύλες G- $\gamma$  και D- $\gamma$  καθορίζονται από τη φύση του υλικού της κάθε στρώσης και επιλέγονται είτε από την υπάρχουσα βιβλιοθήκη υλικών του προγράμματος είτε από το πλήθος διαθέσιμων καμπύλων για κάθε υλικό από την υπάρχουσα βιβλιογραφία.



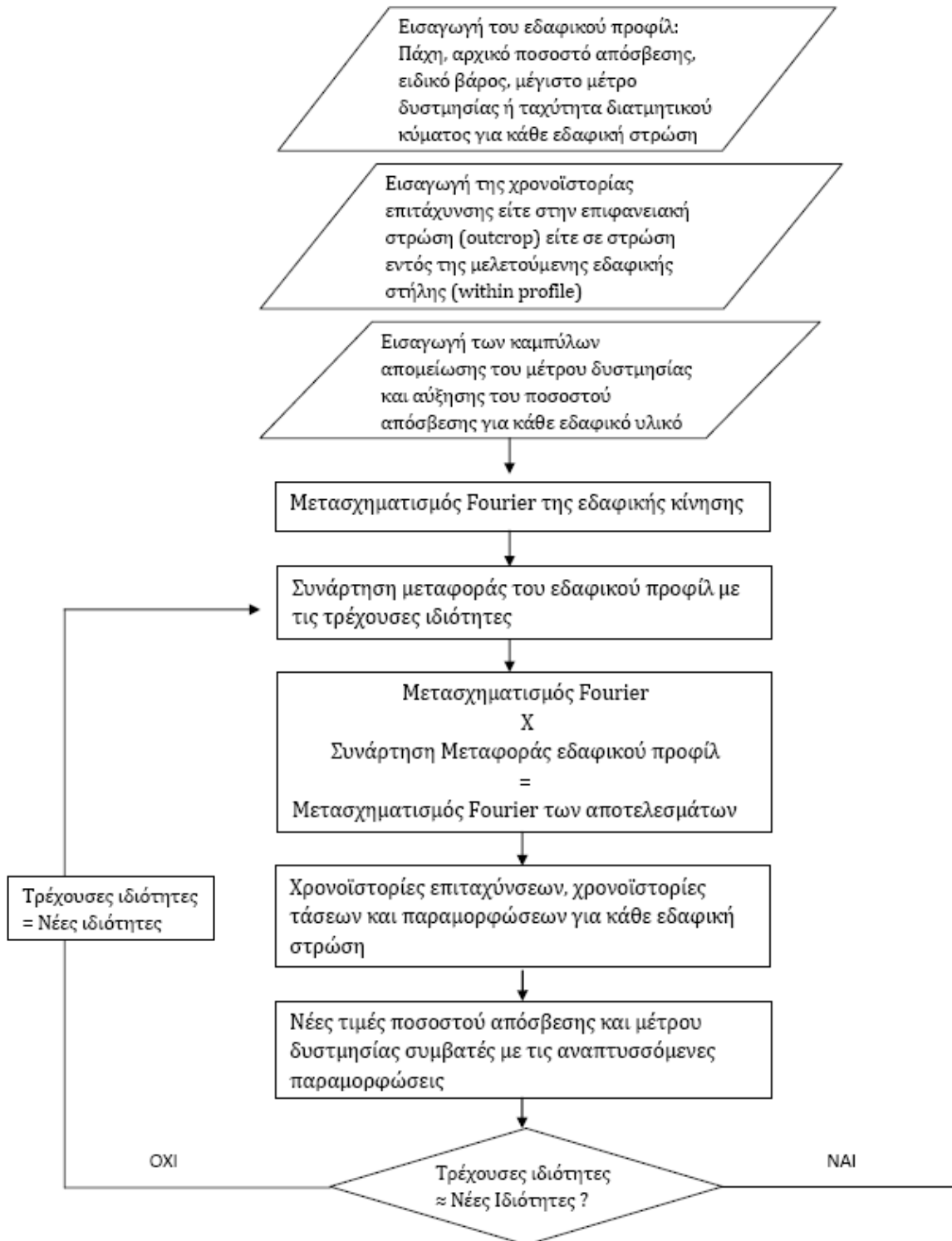
**Σχήμα 6.2:** Η προσομοίωση στην ισοδύναμη γραμμική μέθοδο και τα χαρακτηριστικά μεγέθη των εδαφικών στρωμάτων (Manual SHAKE2000)

Στο διάγραμμα ροής που φαίνεται στο σχήμα 6.3 βλέπουμε την επαναληπτική διαδικασία με την οποία λειτουργεί το SHAKE2000. Ο μετασχηματισμός των επιταχυνσιογραφημάτων γίνεται βάσει της μεθόδου Fourier DFT (Discrete Fourier Transform) ενώ οι συναρτήσεις μεταφοράς (transfer functions) δίνουν τον συντελεστή ενίσχυσης σε όρους συχνότητας για ένα δεδομένο εδαφικό προφίλ. Το φάσμα Fourier πολλαπλασιάζεται με τη συνάρτηση μεταφοράς του εδαφικού προφίλ και προκύπτει το φάσμα ενίσχυσης για κάθε μία εδαφική στρώση. Έπειτα, η χρονοϊστορία επιτάχυνσης για μία δεδομένη εδαφική στρώση υπολογίζεται με τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier IFT (Inverse Fourier Transform).

Επειδή η ισοδύναμη γραμμική προσέγγιση χρησιμοποιεί γραμμική ανάλυση, η απόκριση σε κάθε σημείο μπορεί να συσχετισθεί με την απόκριση σε οποιοδήποτε άλλο σημείο. Με την ίδια λογική που οι συναρτήσεις μεταφοράς προσδιορίζονται για τον υπολογισμό της σεισμικής κίνησης στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους με βάση την κίνηση του βραχώδους υποβάθρου, μπορούν κάλλιστα να προσδιοριστούν και οι συναρτήσεις μεταφοράς για την εξαγωγή της σεισμικής κίνησης σε οποιοδήποτε βάθος της μελετούμενης εδαφικής στήλης.

Ένα μείζον θέμα που σχετίζεται με τις συναρτήσεις μεταφοράς είναι η εξαγωγή της σεισμικής κίνησης στο βραχώδες υπόβαθρο αν είναι γνωστή η κίνηση στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Αν και αυτή η διαδικασία σε ένα γραμμικό ελαστικό σύστημα θα έπρεπε θεωρητικά να καταλήγει σε μία και μοναδική λύση, συναντώνται συχνά πρακτικές δυσκολίες που σχετίζονται με αριθμητικά προβλήματα ιδιαίτερα όταν απαιτούνται επαναλήψεις για την εύρεση των εδαφικών ιδιοτήτων που είναι συμβατές με το επίπεδο παραμόρφωσής του και τα πλάτη διατμητικής παραμόρφωσης είναι πολύ υψηλά. Επίσης, πολλές φορές η παραδοχή μονοδιάστατης ανάλυσης δεν είναι αντιπροσωπευτική καθώς ένα ποσοστό της σεισμικής κίνησης στην επιφάνεια του εδάφους, η οποία είναι συνήθως και αυτή που διαθέτουμε από τους καταγραφικούς σταθμούς οφείλεται σε διαχεόμενα και επιφανειακά σεισμικά κύματα.

Για τους προαναφερθέντες λόγους η εξαγωγή της σεισμικής κίνησης στο βραχώδες υπόβαθρο πρέπει να πραγματοποιείται με ιδιαίτερη προσοχή και να αξιολογείται η ορθότητα των αποτελεσμάτων πριν γίνει η τελική αποδοχή τους.



**Σχήμα 6.3:** Διάγραμμα ροής της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης (SHAKE2000)

### 6.3 Παραδοχές ανάλυσης και προσομοίωση των κατηγοριών εδάφους

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ληφθούν υπόψη για τον υπολογισμό του συντελεστή S μόνο οι κατηγορίες B, C και D, καθότι η κατηγορία E αποτελεί επέκταση των κατηγοριών C και D με τη διαφορά ότι σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους εμφανίζεται βράχος.

Συγκεκριμένα, μελετούνται οι παρακάτω περιπτώσεις εδαφικών στηλών με τα εξής χαρακτηριστικά:

A: Βράχος με  $V_{s30}=1000\text{m/s}$ , με καμπύλες απομείωσης μέτρου δυστημσίας και αύξησης ποσοστού απόσβεσης του εδάφους για βράχο κατά Schnabel (1973)

B: - Πολύ πυκνή άμμος ή αμμοχάλικο με καμπύλες απομείωσης μέτρου δυστημσίας και αύξησης ποσοστού απόσβεσης του εδάφους για άμμο κατά Seed et al. (1984).

- Πολύ σκληρή άργιλος με καμπύλες απομείωσης μέτρου δυστημσίας και αύξησης ποσοστού απόσβεσης του εδάφους για άργιλο μικρής πλαστιμότητας ( $PI=0-10$ ) κατά Vucetic & Dobry (1991).

C: - Πυκνή άμμος ή αμμοχάλικο με καμπύλες απομείωσης μέτρου δυστημσίας και αύξησης ποσοστού απόσβεσης του εδάφους για άμμο κατά Seed & Idriss (1970)

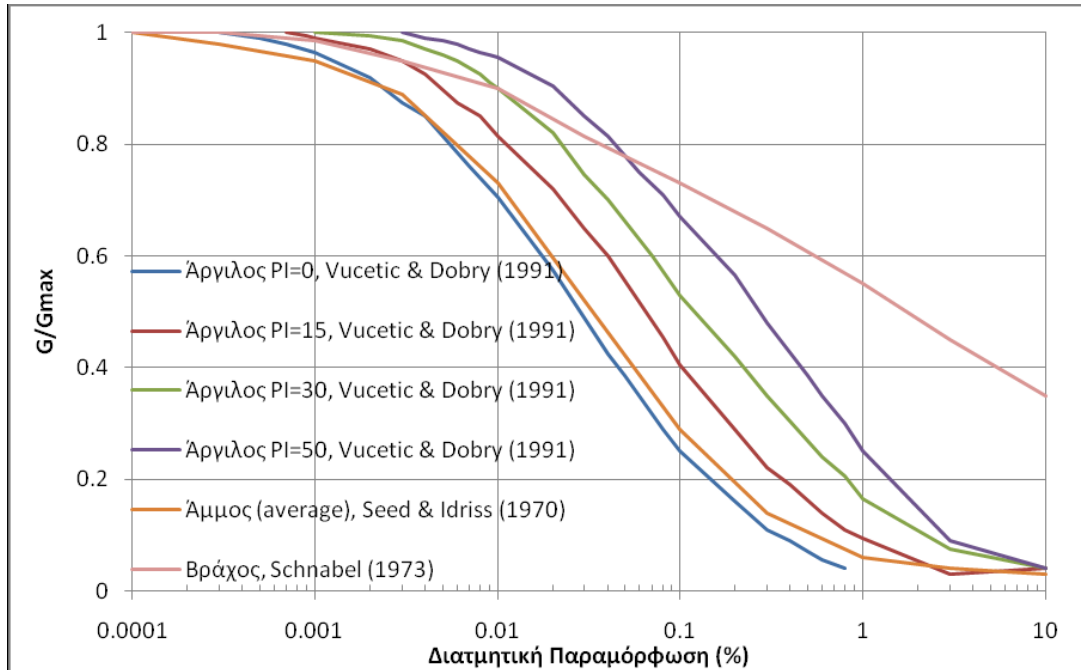
- Σκληρή άργιλος με καμπύλες απομείωσης μέτρου δυστημσίας και αύξησης ποσοστού απόσβεσης του εδάφους για άργιλο μικρής πλαστιμότητας ( $PI=10-20$ ) κατά Vucetic & Dobry (1991).

D: - Χαλαρή έως μέτρια χαλαρή άμμος ή αμμοχάλικο με καμπύλες απομείωσης μέτρου δυστημσίας και αύξησης ποσοστού απόσβεσης του εδάφους για χαλαρή άμμο κατά Seed & Idriss (1970) (lower G, upper D).

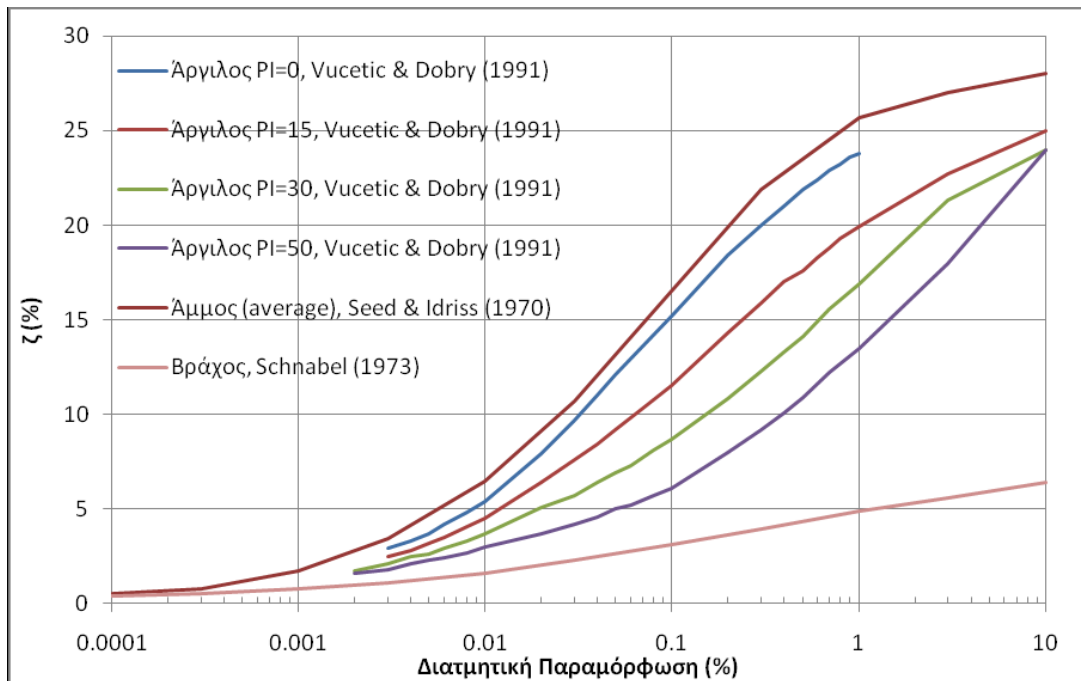
- Μαλακή έως μετρίως σκληρή άργιλος με καμπύλες απομείωσης μέτρου δυστημσίας και αύξησης ποσοστού απόσβεσης του εδάφους για άργιλο μέσης έως υψηλής πλαστιμότητας ( $PI=20-40$ ) κατά Vucetic & Dobry (1991).

Οι καμπύλες απομείωσης του μέτρου δυστημσίας και αύξησης του ποσοστού απόσβεσης του εδάφους συναρτήσκει της διατμητικής παραμόρφωσης εξαρτώνται από τον δείκτη πλαστικότητας PI όσον αφορά στις αργίλους και από τη μέση ενεργό τάση όσον αφορά στις άμμους. Θεωρώντας ότι ο δείκτης πλαστικότητας αυξάνεται όσο πιο μαλακή και πλαστική είναι η άργιλος και ότι η μέση ενεργός τάση για τις άμμους παραμένει περίπου σταθερή για την εδαφική στήλη 30 m που μελετάμε σε κάθε κατηγορία εδάφους ανεξαρτήτως δομής (χαλαρή-πυκνή άμμο), επιλέχθηκαν οι αντίστοιχες καμπύλες G-γ και ζ-γ από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος SHAKE2000. Συγκεντρωτικά, όλες οι καμπύλες που χρησιμοποιήθηκαν

στην παρούσα μελέτη φαίνονται στα σχήματα 6.4 και 6.5. Σε κάθε καταγραφή οι τιμές της  $V_{s30}$  οι οποίες εισήχθησαν στο πρόγραμμα ήταν αυτές που δίνει η βάση δεδομένων (NGA database).



Σχήμα 6.4: Καμπύλες απομείωσης του μέτρου δυστημσίας του εδάφους για διάφορα εδαφικά υλικά



Σχήμα 6.5: Καμπύλες αύξησης του ποσοστού απόσβεσης του εδάφους για διάφορα εδαφικά υλικά



Όσον αφορά στις πυκνότητες των τυπικών εδαφών που θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα διπλωματική εργασία θα κάνουμε τις εξής παραδοχές στηριζόμενοι στα εύρη που δίνονται για διαφόρους τύπους εδαφών από τους Παπαχαρίσης και συν. στον πίνακα 6.1.

- Όλα τα εδαφικά υλικά θεωρούνται κορεσμένα.
- Τα βραχώδη υλικά έχουν πυκνότητα ίση με 2.20 g/cc (ή 2200 kg/m<sup>3</sup>), δηλαδή ειδικό βάρος 21.6 KN/m<sup>3</sup> (ή 0.135 pcf).
- Τα εδαφικά υλικά από πυκνή άμμο ή σκληρή άργιλο έχουν πυκνότητα ίση με 1.9 g/cc (ή 1900 kg/m<sup>3</sup>), δηλαδή ειδικό βάρος 18.8 KN/m<sup>3</sup> (ή 0.120 pcf).
- Τα εδαφικά στρώματα χαλαρής άμμου ή μετρίως μαλακής αργίλου έχουν πυκνότητα ίση με 1.75 g/cc (ή 1750 kg/m<sup>3</sup>), δηλαδή ειδικό βάρος 17.2 KN/m<sup>3</sup> (ή 0.110 pcf).
- Τα εδαφικά στρώματα πολύ μαλακής αργίλου και ιλύος έχουν πυκνότητα ίση με 1.70 g/cc (ή 1700 kg/m<sup>3</sup>), δηλαδή ειδικό βάρος 16.7 KN/m<sup>3</sup> (ή 0.105 pcf).

Εδάφη	Ξηρά (gr/cm <sup>3</sup> )	Κορεσμένα (gr/cm <sup>3</sup> )	Υπό άνωση (gr/cm <sup>3</sup> )
Χαλαρή άμμος	1.30	1.82	0.82
Πυκνό αμμοχάλικο	2.00	2.24	1.24
Πηλός	2.10	2.30	1.30
Πλαστική άργιλος	1.60	2.00	1.00
Σκληρή άργιλος	2.20	-	-
Ιλύς με φυσική υγρασία	-	0.80-1.80	-

*Πίνακας 6.1: Φαινόμενα θάρη τυπικών εδαφών (Παπαχαρίσης και συν., 1999)*

#### 6.4 Περιγραφή υπολογιστικής διαδικασίας

Η προσομοίωση του εδάφους στο πρόγραμμα SHAKE2000 έγινε με διαχωρισμό του εδάφους σε δέκα επιμέρους στρώσεις πάχους 3 μέτρων (περίπου 10 ft) προκειμένου η συνολική στρώση να ανέρχεται στα 30m. με τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε κατηγορίας. Στόχος των αναλύσεων για κάθε εδαφική κατηγορία είναι ο υπολογισμός των ελαστικών φασμάτων επιτάχυνσης με απόσβεση 5% στο βραχύδες υπόβαθρο για κάθε καταγραφή.

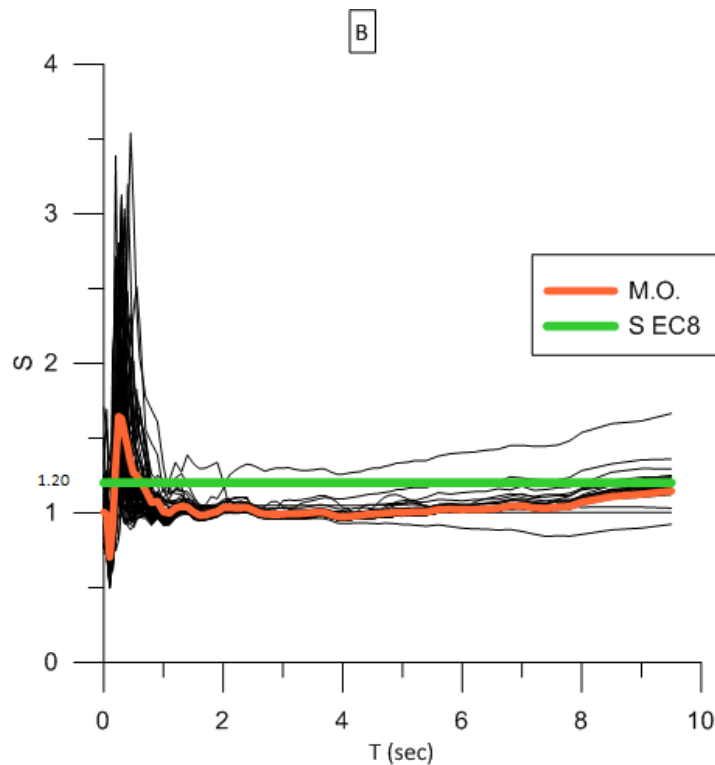
Οι αναλύσεις περιορίστηκαν για συχνότητες έως 25 Hz αφού αφενός μεν, αυτές είναι που μεταφέρουν το μεγαλύτερο ποσοστό εκλυόμενης ενέργειας ενός σεισμικού γεγονότος, αφετέρου δε, για μεγαλύτερες συχνότητες αυξάνεται η αριθμητική παθογένεια του προγράμματος SHAKE2000.

Προκειμένου τα ελαστικά φάσματα του βραχύδους υποβάθρου να μετατραπούν στα αντίστοιχα της επιφανειακής εκδήλωσης του βράχου, επιλύθηκαν στο SHAKE2000 και οι

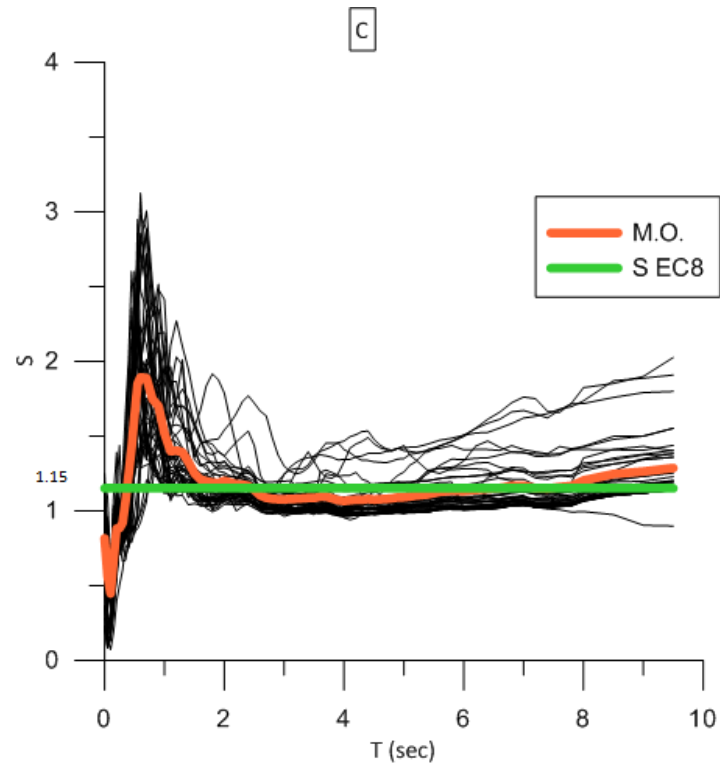
καταγραφές που αντιστοιχούν σε εδάφη κατηγορίας A. Συγκεκριμένα, οι καταγραφές αυτές θεωρούνται καταγραφές στην επιφανειακή εκδήλωση του βράχου (rock outcrop) καθώς αντιστοιχούν στην επιφάνεια, και υπολογίστηκε θεωρώντας στρώση βράχου 30m η κίνηση στο βραχώδες υπόβαθρο (bedrock). Τα φάσματα αυτά διαιρέθηκαν μεταξύ τους δίνοντας μας ουσιαστικά έναν συντελεστή μετατροπής των φασμάτων του βραχώδους υποβάθρου σε φάσματα επιφανειακής εκδήλωσης του βράχου. Με τον συντελεστή αυτόν πολλαπλασιάστηκαν τα φάσματα του βραχώδους υποβάθρου κάθε καταγραφής με αποτέλεσμα την μετατροπή τους σε φάσματα ελεύθερης εκδήλωσης. Ο συντελεστής εδάφους S προκύπτει πλέον από την διαίρεση του φάσματος επιτάχυνσης για απόσβεση 5% στην επιφάνεια του εδάφους με το αντίστοιχο φάσμα στην ελεύθερη εκδήλωση του βράχου.

## 6.5 Αποτελέσματα επιλύσεων

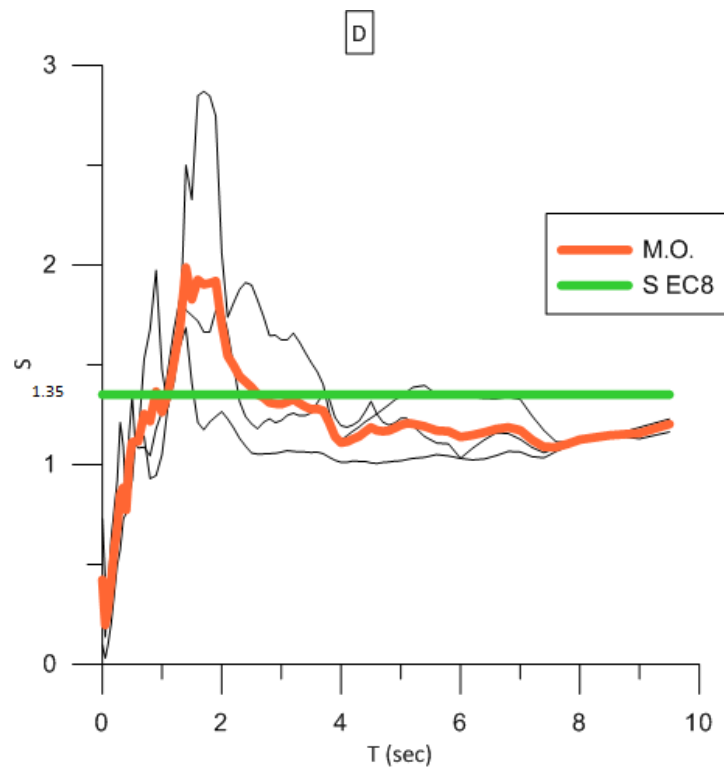
Στα παρακάτω διαγράμματα δίνεται για κάθε κατηγορία εδάφους ο συντελεστής S που προέκυψε από τις καταγραφές μας συναρτήσει της περιόδου T (sec). Σε κάθε διάγραμμα απεικονίζεται και η τιμή του συντελεστή S όπως καθορίζεται από τον EC8 για κάθε κατηγορία εδάφους.



**Σχήμα 6.6:** Συντελεστής εδάφους S συναρτήσει της περιόδου για εδάφη κατηγορίας B



Σχήμα 6.7: Συντελεστής εδάφους S συναρτήσει της περιόδου για εδάφη κατηγορίας C



Σχήμα 6.8: Συντελεστής εδάφους S συναρτήσει της περιόδου για εδάφη κατηγορίας D

## Παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων

- Για την κατηγορία εδαφών B η πραγματική τιμή του συντελεστή S είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του EC8 στην περιοχή των περιόδων από 0-1 sec. Στις μεγαλύτερες περιόδους παίρνει μια σταθερή τιμή η οποία είναι μικρότερη από την τιμή του EC8.
- Για την κατηγορία εδαφών C η πραγματική τιμή του συντελεστή S είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του EC8 στην περιοχή των περιόδων από 0-2 sec. Στις μεγαλύτερες περιόδους ο EC8 δίνει μια τιμή που προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματικότητα.
- Για τα εδάφη D δεν μπορούμε να βγάλουμε αξιόπιστα συμπεράσματα, καθώς είναι πολύ μικρός ο αριθμός των καταγραφών που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία εδάφους. Όμως και σε αυτήν την περίπτωση διακρίνουμε την περιοχή των περιόδων από 0-3 sec. στην οποία ο συντελεστής S είναι μεγαλύτερος από την αντίστοιχη τιμή του EC8.
- Όσο οι κατηγορίες εδάφους απομακρύνονται από τον βράχο, όσο δηλαδή πηγαίνουμε από την κατηγορία B στην C και εν συνεχεία στην D, παρατηρούμε ότι η περιοχή μεγάλης και μη σταθερής τιμής του συντελεστή S επεκτείνεται σε μεγαλύτερες περιόδους.
- Η μέση τιμή του συντελεστή S του εδάφους, δηλαδή αυτή που αντιστοιχεί για  $T=0$  sec. είναι σε όλες τις κατηγορίες εδαφών μικρότερη της αντίστοιχης του EC8. Συγκεκριμένα, για την κατηγορία B  $S=1$ , για την κατηγορία C  $S=0.81$  ενώ για την κατηγορία D  $S=0.42$ .
- Όσο οι κατηγορίες εδάφους απομακρύνονται από τον βράχο, όσο δηλαδή πηγαίνουμε από την κατηγορία B στην C και εν συνεχεία στην D, παρατηρούμε ότι η τιμή του συντελεστή S για το έδαφος μειώνεται.
- Στην περιοχή της περιόδου  $T=0-2$  τόσο στα εδάφη κατηγορίας B όσο και στα εδάφη κατηγορίας C, οι καταγραφές που δίνουν πολύ μεγάλες τιμές του συντελεστή S είναι αυτές που ανήκουν σε μικρά μεγέθη σεισμού. Αντίστροφα, οι καταγραφές μεγάλου μεγέθους δίνουν μικρό συντελεστή S. Αυτό ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι στους σεισμούς μεγάλου μεγέθους το έδαφος είναι περισσότερο πλαστικοποιημένο και άρα υπάρχει απομείωση.

# Κεφάλαιο 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---



Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η επιρροή του εδάφους στα φάσματα σχεδιασμού για σεισμούς κοντινού πεδίου και συγκεκριμένα στα ελαστικά φάσματα επιτάχυνσης.

Από τη βάση δεδομένων των νέων μοντέλων απομείωσης της εδαφικής κίνησης (NGA database), χρησιμοποιήθηκαν 179 καταγραφές που είχαν χαρακτηριστεί από τον Baker (2011) ως παλμικές, δηλαδή παρουσιάζουν παλμό κατευθυντικότητας στη χρονοϊστορία ταχύτητας της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας. Οι καταγραφές αυτές στράφηκαν προκειμένου να υπολογιστεί η κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της κάθε εδαφικής κίνησης. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η δεσπόζουσα περίοδος παλμού  $T_p$  η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή φασματικής μετακίνησης για απόσβεση 5%. Με τη χρήση του προγράμματος Seismosignal εξήχθησαν τα ελαστικά φάσματα επιτάχυνσης για συντελεστή απόσβεσης 5%. Τα φάσματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να μελετηθεί κατά πόσο το ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης του Ευρωκώδικα 8 (EC8) καλύπτει τις διεγέρσεις κοντινού πεδίου και εάν η επαύξηση του φάσματος του EC8 με τον τύπο των Shahi-Baker (2011) μπορεί να εφαρμοστεί. Επίσης υπολογίστηκε και η δεσπόζουσα περίοδος του παλμού όπως την υπολογίζει ο τύπος των Shahi-Baker (2011), προκειμένου να διερευνηθεί εάν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της επαύξησης του φάσματος του EC8 γύρω από την περίοδο του παλμού. Για να εξαχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα όλα τα φάσματα κανονικοποιήθηκαν ως προς την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) στον κατακόρυφο άξονα και ως προς την δεσπόζουσα περίοδο παλμού ( $T_p$ ) στον οριζόντιο. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν σε τρεις ομάδες. Η πρώτη ομάδα αποτελείται από τα κανονικοποιημένα φάσματα ως προς τον κατακόρυφο άξονα μαζί με τα οποία απεικονίζεται το αντίστοιχο φάσμα του EC8 και η επαύξησή του που προέκυψε με τη χρήση τόσο του μέσου όρου της πραγματικής δεσπόζουσας περιόδου παλμού των καταγραφών όσο και του μέσου όρου της περιόδου παλμού που υπολογίζεται από τον τύπο των Shahi-Baker. Στην δεύτερη ομάδα αποτελεσμάτων τα φάσματα παρουσιάζονται κανονικοποιημένα και ως προς τους δύο άξονες μαζί με το φάσμα του EC8 και την επαύξησή του που προέκυψε από τον μέσο όρο της περιόδου όπως αυτή υπολογίζεται από τους Shahi-Baker. Στην περίπτωση αυτή το φάσμα του EC8 έχει κανονικοποιηθεί ως προς τον μέσο όρο της περιόδου των Shahi-Baker, στον οριζόντιο άξονα. Η τρίτη ομάδα αποτελεσμάτων παρουσιάζει τα φάσματα κανονικοποιημένα και ως προς τους δύο άξονες και διαιρεμένα με το αντίστοιχο φάσμα του EC8. Σε όλες τις ομάδες αποτελεσμάτων τα φάσματα χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθος  $M$  του σεισμού κοντινού πεδίου.

Επόμενος στόχος ήταν ο υπολογισμός του συντελεστή εδάφους  $S$  και η σύγκρισή του με τις τιμές του EC8 για κάθε κατηγορία εδάφους. Για τον σκοπό αυτό έγινε διάκριση των καταγραφών χρησιμοποιώντας την ταχύτητα διατμητικού κύματος στα άνω 30m, σύμφωνα με τις κατηγορίες εδάφους του EC8. Για τις καταγραφές

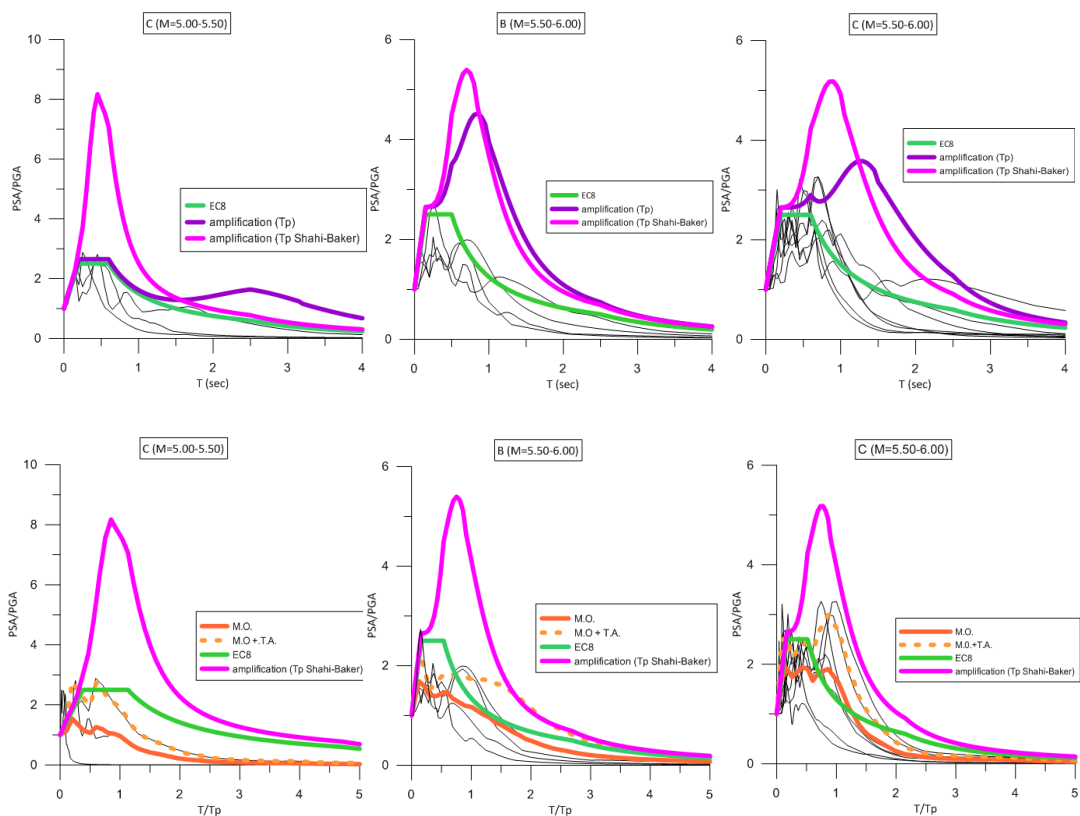
αυτές η σεισμική κίνηση εξάγεται στο βραχώδες υπόβαθρο (bedrock) και στη συνέχεια στον βράχο ελεύθερης επιφάνειας (rock outcrop) με τη βοήθεια της Ισοδύναμης Γραμμικής Μεθόδου (πρόγραμμα SHAKE2000). Οι καμπύλες μεταβολής του μέτρου δυστημσίας και του ποσοστού απόσβεσης συναρτήσκει της διατμητικής παραμόρφωσης, καθώς και οι πυκνότητες των εδαφικών υλικών επιλέγονται καταλλήλως έτσι ώστε να προσομοιάζουν τις αντίστοιχες εδαφικές κατηγορίες. Τα φάσματα της εδαφικής επιφάνειας διαιρούνται με τα προκύπτοντα φάσματα στον βράχο ελεύθερης επιφάνειας. Προέκυψαν, τελικά, τα διαγράμματα του συντελεστή εδάφους S συναρτήσκει της περιόδου T για τις κατηγορίες εδάφους B, C και D του EC8.

Μετά το πέρας των αναλύσεων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, καταλήξαμε στα κάτωθι συμπεράσματα, τα οποία παρουσιάζονται σε δύο μέρη συνοδευόμενα από χαρακτηριστικά σχήματα.

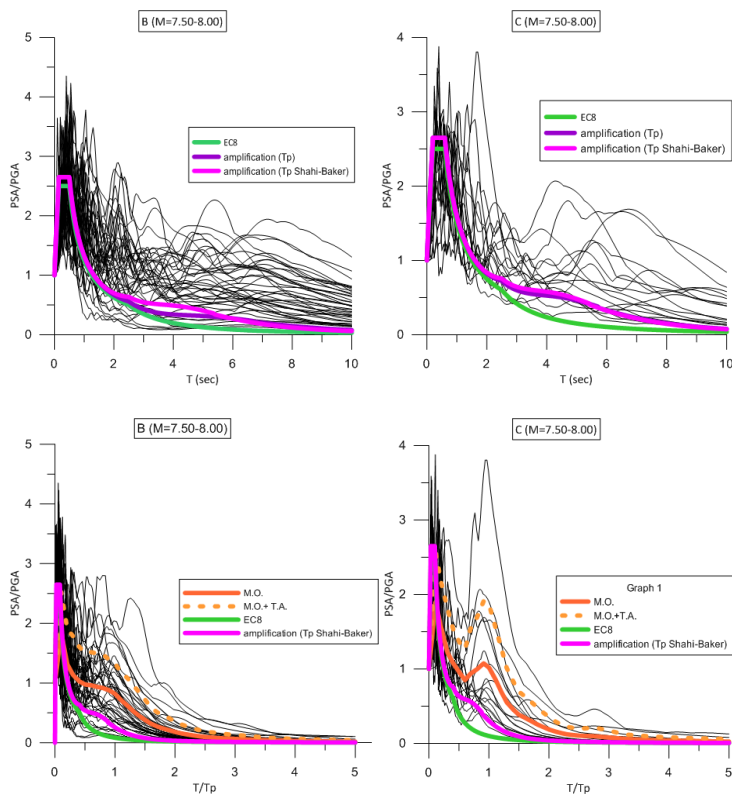


## Επιρροή του εδάφους στα φάσματα σχεδιασμού

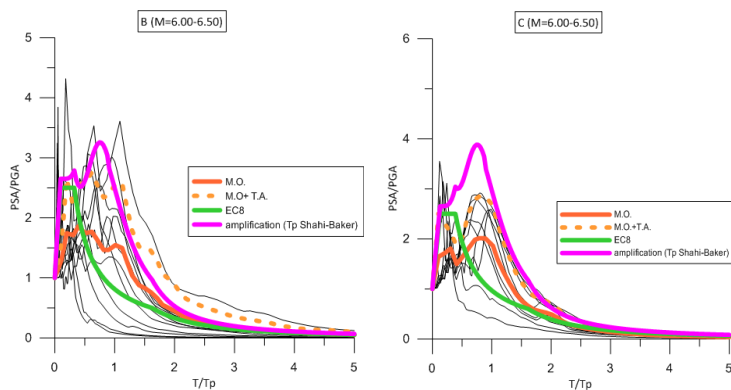
- Η επαύξηση της φασματικής επιτάχυνσης του Ευρωκώδικα 8 γύρω από την δεσπόζουσα περίοδο του παλμού των Shahi-Baker για τους σεισμούς κοντινού πεδίου μεγέθους  $M=5.00-5.50$  και  $M=5.50-6.00$  δίνει πολύ μεγαλύτερες φασματικές τιμές από τις πραγματικές, ανεξαρτήτως κατηγορίας εδάφους.
- Το φάσμα του Ευρωκώδικα για τους σεισμούς κοντινού πεδίου μεγέθους  $M=5.00-5.50$  και  $M=5.50-6.00$  φαίνεται να επαρκεί και καλύπτει τις πραγματικές καταγραφές.

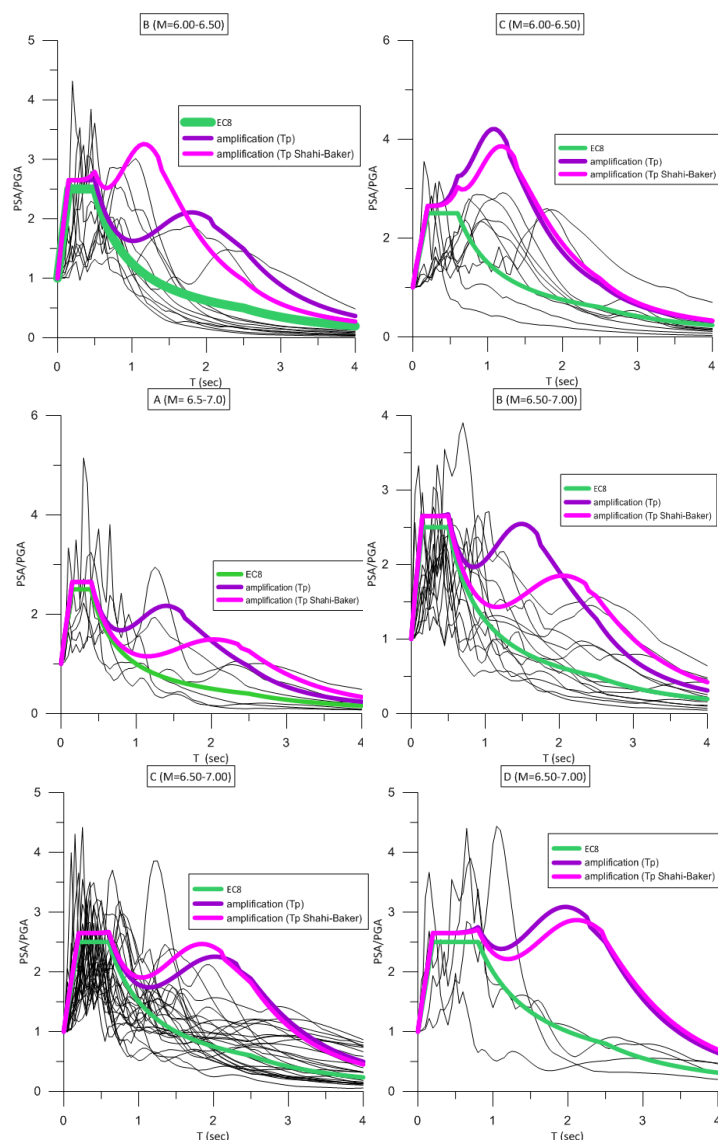


- Για τους σεισμούς μεγάλο μεγέθους,  $M=7.50-8.00$  το φάσμα του Ευρωκώδικα 8 είναι ανεπαρκές. Επίσης ούτε η επαύξηση των Shahi-Baker μπορεί να καλύψει την πραγματική επαύξηση στην περιοχή του παλμού.

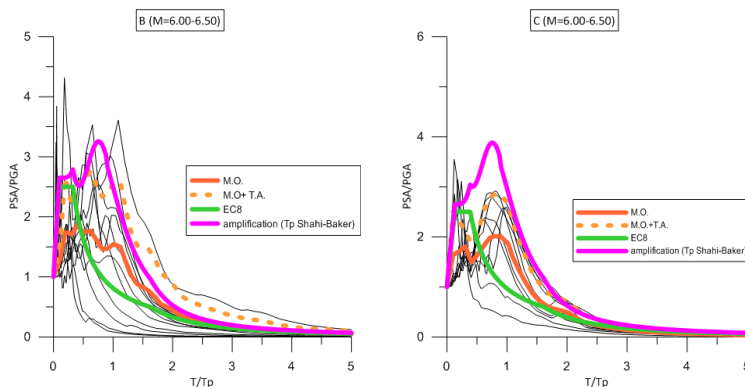


- Η επαύξηση της φασματικής επιτάχυνσης του Ευρωκώδικα 8 εφαρμόζεται ικανοποιητικά για τους σεισμούς κοντινού πεδίου μεγέθους  $M=6.00-6.50$ , ανεξαρτήτως κατηγορίας εδάφους, στην περιοχή του παλμού.
- Για τους σεισμούς κοντινού πεδίου μεγέθους  $M=6.00-7.00$ , ο Ευρωκώδικας 8 με επαύξηση των Shahi-Baker επαρκεί για περιόδους μεγαλύτερες από 1sec. Στην περιοχή όμως από 0-1 sec που ανήκουν οι συνήθεις κατασκευές κρίνεται ανεπαρκής.

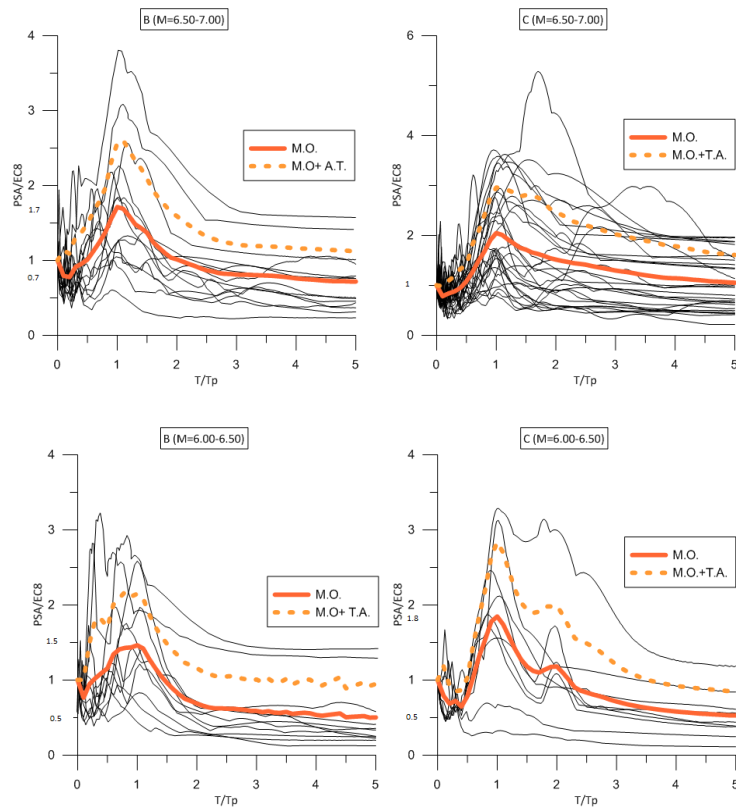




- Ανεξαρτήτως κατηγορίας εδάφους όσο μεγαλώνει το μέγεθος του σεισμού, η περίοδος του παλμού που υπολογίστηκε από τον τύπο των Shahi-Baker πλησιάζει την πραγματική δεσπόζουσα περίοδο του παλμού.
- Σε όλες τις καταγραφές, ανεξαρτήτως μεγέθους σεισμού και κατηγορίας εδάφους σχηματίζεται «καμπάνα» στα φάσματα επιτάχυνσης για απόσβεση 5% στην περιοχή του της δεσπόζουσας περιόδου του παλμού.

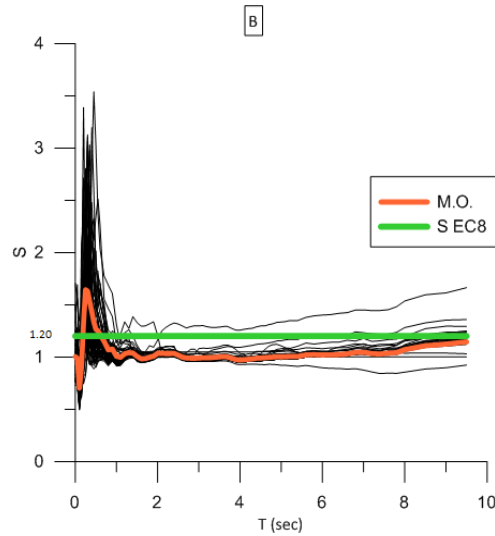


- Στους σεισμούς κοντινού πεδίου μεγέθους  $M=6.5-7.00$  ο μέσος όρος επαύξεσης λόγω του μεγέθους του σεισμού τείνει στην μονάδα. Αυτό σημαίνει ότι το ελαστικό φάσμα του EC8 στις περιπτώσεις που δεν έχουμε παλμό κατευθυντικότητας, αρκεί για να καλύψει τον μέσο όρο των καταγραφών.
- Για τα μεγέθη σεισμών κοντινού πεδίου  $M=5.00-7.00$  φαίνεται ότι ο EC8 με την επαύξεση Shahi-Baker αρκεί για να καλύψει τον μέσο όρο των πραγματικών καταγραφών.
- Ανεξαρτήτως κατηγορίας εδάφους και μεγέθους σεισμού ο μέσος όρος του επαυξητικού συντελεστή λόγω της ύπαρξης παλμού είναι σχεδόν πάντα μικρότερος ή πολύ κοντά στην τιμή 3.068 δηλαδή της επαύξεσης για  $T=T_p$  που δίνει ο τύπος των Shahi-Baker.

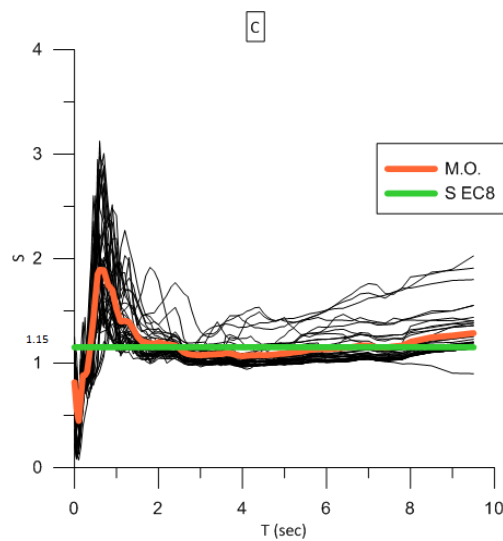


## Συντελεστής εδάφους S

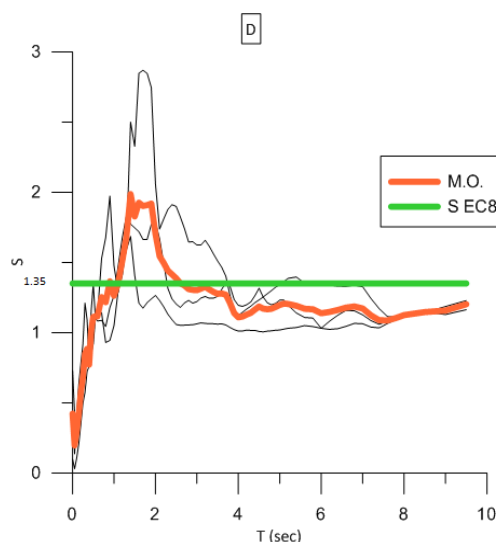
- Για την κατηγορία εδαφών B η πραγματική τιμή του συντελεστή S είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του EC8 στην περιοχή των περιόδων από 0-1 sec. Στις μεγαλύτερες περιόδους παίρνει μια σταθερή τιμή η οποία είναι μικρότερη από την τιμή του EC8.



- Για την κατηγορία εδαφών C η πραγματική τιμή του συντελεστή S είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του EC8 στην περιοχή των περιόδων από 0-2 sec. Στις μεγαλύτερες περιόδους ο EC8 δίνει μια τιμή που προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματικότητα.



- Για τα εδάφη D δεν μπορούμε να βγάλουμε αξιόπιστα συμπεράσματα, καθώς είναι πολύ μικρός ο αριθμός των καταγραφών που ανήκουν σ αυτήν την κατηγορία εδάφους. Όμως και σε αυτήν την περίπτωση διακρίνουμε την περιοχή των περιόδων από 0-3 sec. στην οποία ο συντελεστής S είναι μεγαλύτερος από την αντίστοιχη τιμή του EC8.



- Όσο οι κατηγορίες εδάφους απομακρύνονται από τον βράχο, όσο δηλαδή πηγαίνουμε από την κατηγορία B στην C και εν συνεχεία στην D, παρατηρούμε ότι η περιοχή μεγάλης και μη σταθερής τιμής του συντελεστή S επεκτείνεται σε μεγαλύτερες περιόδους.
- Η μέση τιμή του συντελεστή S του εδάφους, δηλαδή αυτή που αντιστοιχεί για  $T=0$  sec. είναι σε όλες τις κατηγορίες εδαφών μικρότερη της αντίστοιχης του EC8. Συγκεκριμένα, για την κατηγορία B  $S=1$ , για την κατηγορία C  $S=0.81$  ενώ για την κατηγορία D  $S=0.42$ .
- Όσο οι κατηγορίες εδάφους απομακρύνονται από τον βράχο, όσο δηλαδή πηγαίνουμε από την κατηγορία B στην C και εν συνεχεία στην D, παρατηρούμε ότι η τιμή του συντελεστή S για το έδαφος μειώνεται.
- Στην περιοχή της περιόδου  $T=0-2$  τόσο στα εδάφη κατηγορίας B όσο και στα εδάφη κατηγορίας C, οι καταγραφές που δίνουν πολύ μεγάλες τιμές του συντελεστή S είναι αυτές που ανήκουν σε μικρά μεγέθη σεισμού. Αντίστροφα, οι καταγραφές μεγάλου μεγέθους δίνουν μικρό συντελεστή S. Αυτό ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι στους σεισμούς μεγάλου μεγέθους το έδαφος είναι περισσότερο πλαστικοποιημένο και άρα υπάρχει απομείωση.

# Αναφορές





- Boore D.M., Atkinson G.M., **Boore Atkinson NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters**, 2007
- Cambell K.W., Bozorgnia Y., **Cambell - Bozorgnia NGA Empirical Ground Motion Model for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and SA at Selected Spectral Periods Ranging from 0.01-10.0 Seconds**, October 2006
- Cambell K.W., Bozorgnia Y., **Next Generation Attenuation (NGA) Empirical Ground Motion Models: Can they be used in Europe?**, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva 2006
- CEN (Comite Europeen de Normalisation) (2004), **Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1)**, Brussels, May 2004
- Chiou B., Darragh R., Gregor N., Silva W., **NGA Project Strong-Motion Database**
- Chopra A., **Δυναμική των κατασκευών. Θεωρία και εφαρμογές στη σεισμική μηχανική**, Εκδόσεις Μ.Γκιούρδας, Αθήνα 2008
- Goulet C., Abrahamson N., Bozorgnia Y., **NGA - East Final Project Plan**, 2011
- Kakkalamos J. K., Baise L., **Model Validations and Comparisons of the Next Generation Attenuation of Ground Motions (NGA-West) Project**, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.101, No. 1, pp. 160-175, February 2011
- Martin Mai P., **Ground Motion Complexity and Scaling in the Near Field of Earthquake Ruptures**, ETH Zurich, Switzerland
- Mavroeidis G., Papageorgiou A., **Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions**, 2003
- Psycharis I., Sideri M., Taflampas I., **Effect of soil conditions on the characteristics of near-field ground motion**, 2011
- Rodriguez-Marek A., Bray J., **Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region**, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24 (2004), 815-825

- 
- Rodriguez-Marek A., **Near-Fault Seismic Site Response**, 2000
  - Rupakhety R., Sidurdsson S.U., Papageorgiou A.S., Sigbjornsson, **Quantification of ground - motion parameters and response spectra in the near-fault region**, Springer Science and Business Media B.V. 2011
  - Sehhati R., **Probabilistic Seismic Demand Analysis for the near-fault Zone**, December 2008
  - Shabestari K.T., Yamazaki F, Saita J., Matsuoka M., **Estimation of the spatial distribution of ground motion parameters for the recent earthquakes in Japan**, Technophysics 390, 193-204, 2004
  - Shahi S. K., Baker J. W., **An Empirically Calibrated Framework for Including the Effects of Near-Fault Directivity in Probabilistic Seismic Hazard Analysis**, Bulletin of the seismological society of America, Vol.101 No2, pp.742-755, April 2011
  - SHAKE2000, **Manual**
  - Somerville P.G., **Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse**, Physics of the Earth and Planetary Interiors 137 (2003), 201-212
  - 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
  - Towhata I., **Geotechnical Earthquake Engineering, Springel editions**, 2008
  - Καρύδης Π.Γ., Ταφλαμπάς Ι.Μ., **Τεχνική σεισμολογία**, Αθήνα 2007
  - Παπαχαρίσης Ν, Γραμματικόπουλος Ι., Μάνου-Ανδρεάδου Ν., **Γεωτεχνική Μηχανική**, Εκδόσεις Αφοί Κυριακίδη, 1η έκδοση 1999
  - Σιδέρη Μ., **Επιρροή του εδάφους σε σεισμικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου**, Αθήνα 2011
  - Σκιαδά Ε., **Σεισμοί κοντινού πεδίου Μεσαίου Μεγέθους: Η περίπτωση του σεισμού της Αθήνας στις 7/9/1999**, Αθήνα 2011

- Φαρδής Μ., Κόλιας Β., Παναγιωτάκος Τ., Κανιτάκη Ε., **Αντισεισμικός σχεδιασμός κατασκευών - Μέρος 1, Γενικοί Κανόνες, Σεισμικές Δράσεις, Κανόνες για κτήρια**



# Παράρτημα



Record Sequence Number	EQID	Earthquake Name	YEAR	Station Name	Earthquake Magnitude	Δεσπόζουσα Ιδιοπερίοδος (sec)	Tp Shahi-Baker	Preferred Vs <sub>30</sub> (m/s)	Κατάταξη κατά ΕΚ8 σύμφωνα με Vs <sub>30</sub>	Είδος εδάφους
20	0017	Northern Calif-03	1954	Ferndale City Hall	6.50	1.6	2.02	792.0	C	Πολύ πυκνή άμμος
77	0030	San Fernando	1971	Pacoima Dam (upper left abut)	6.61	4.76	2.26	219.3	A	Πυκνή άμμος
96	0032	Managua, Nicaragua-02	1972	Managua, ESSO	5.20	1.76	0.56	297.0	C	Πυκνή άμμος
126	0041	Gazli, USSR	1976	Karakyr	6.80	4.28	2.72	274.5	B	Πυκνή άμμος
143	0046	Tabas, Iran	1978	Tabas	7.35	4.72	4.70	208.7	B	Πυκνή άμμος
150	0048	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #6	5.74	0.82	0.95	192.1	B	Σκληρή Άργιλος
158	0050	Imperial Valley-06	1979	Aeropuerto Mexicali	6.53	1.6	2.08	438.2	C	Πολύ πυκνή άμμος
159	0050	Imperial Valley-06	1979	Agrarias	6.53	1.86	2.08	427.7	C	Πολύ πυκνή άμμος
161	0050	Imperial Valley-06	1979	Brawley Airport	6.53	4.82	2.08	542.6	C	Πολύ πυκνή άμμος
170	0050	Imperial Valley-06	1979	EC County Center FF	6.53	3.72	2.08	473.9	C	Πολύ πυκνή άμμος
171	0050	Imperial Valley-06	1979	EC Meloland Overpass FF	6.53	3.1	2.08	258.9	C	Πυκνή άμμος
173	0050	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #10	6.53	3.84	2.08	210.2	C	Πυκνή άμμος
174	0050	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #11	6.53	3.06	2.08	375.3	C	Πολύ πυκνή άμμος
178	0050	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #3	6.53	5.52	2.08	553.4	D	Πολύ πυκνή άμμος
179	0050	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #4	6.53	4.76	2.08	599.6	C	Πολύ πυκνή άμμος
180	0050	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #5	6.53	2.78	2.08	212.4	C	Σκληρή Άργιλος
181	0050	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #6	6.53	4.02	2.08	215.0	C	Μαλακή έως μετρίως σκληρή άργιλος
182	0050	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #7	6.53	3.74	2.08	517.3	C	Πολύ πυκνή άμμος
183	0050	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #8	6.53	4.54	2.08	473.9	C	Πολύ πυκνή άμμος
184	0050	Imperial Valley-06	1979	El Centro Differential Array	6.53	4.4	2.08	473.9	C	Πολύ πυκνή άμμος
185	0050	Imperial Valley-06	1979	Holtville Post Office	6.53	4.4	2.08	473.9	C	Πολύ πυκνή άμμος
250	0061	Mammoth Lakes-06	1980	Long Valley Dam (Upr L Abut)	5.94	0.82	1.16	553.4	E	Πολύ πυκνή άμμος
285	0068	Irpinia, Italy-01	1980	Bagnoli Irpinio	6.90	1.36	3.01	2016.1	A	Βράχος





Record Sequence Number	EQID	Earthquake Name	YEAR	Station Name	Earthquake Magnitude	Δεσπόζουσα Ιδιοπερίοδος (sec)	Tp Shahi-Baker	Preferred Vs <sub>30</sub> (m/s)	Κατάταξη κατά ΕΚ8 σύμφωνα με Vs <sub>30</sub>	Είδος εδάφους
292	0068	Irpinia, Italy-01	1980	Sturno	6.90	2.52	3.01	288.8	A	Πυκνή άμμος
316	0073	Westmorland	1981	Parachute Test Site	5.90	5	1.12	426.0	C	Πολύ πυκνή άμμος
319	0073	Westmorland	1981	Westmorland Fire Sta	5.90	1.42	1.12	558.8	C	Πολύ πυκνή άμμος
407	0080	Coalinga-05	1983	Oil City	5.77	0.56	0.98	258.9	E	Πυκνή άμμος
415	0080	Coalinga-05	1983	Transmitter Hill	5.77	0.7	0.98	186.2	B	Πυκνή άμμος
418	0082	Coalinga-07	1983	Coalinga-14th & Elm (Old CHP)	5.21	0.42	0.56	473.9	C	Πολύ πυκνή άμμος
448	0090	Morgan Hill	1984	Anderson Dam (Downstream)	6.19	0.72	1.49	202.9	B	Πυκνή άμμος
451	0090	Morgan Hill	1984	Coyote Lake Dam (SW Abut)	6.19	0.78	1.49	196.3	B	Πυκνή άμμος
459	0090	Morgan Hill	1984	Gilroy Array #6	6.19	1.1	1.49	162.9	B	Μαλακή έως μετριώς σκληρή άργιλος
496	0097	Nahanni, Canada	1985	Site 2	6.76	0.56	2.62	208.9	B	Πυκνή άμμος
503	0100	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 C00	6.32	1.5	1.69	473.9	C	Πολύ πυκνή άμμος
504	0100	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 E01	6.32	1	1.69	473.9	C	Πολύ πυκνή άμμος
505	0100	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 I01	6.32	1.5	1.69	489.2	C	Πολύ πυκνή άμμος
506	0100	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 I07	6.32	1.5	1.69	393.8	C	Πολύ πυκνή άμμος
508	0100	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 M07	6.32	1.2	1.69	272.6	C	Πυκνή άμμος
517	0101	N. Palm Springs	1986	Desert Hot Springs	6.06	1.24	1.31	272.6	C	Πυκνή άμμος
527	0101	N. Palm Springs	1986	Morongo Valley	6.06	1.82	1.31	540.7	C	Πολύ πυκνή άμμος
529	0101	N. Palm Springs	1986	North Palm Springs	6.06	1.14	1.31	362.0	C	πολύ σκληρή άργιλος
568	0108	San Salvador	1986	Geotech Investig Center	5.80	1.68	1.01	205.6	B	Πυκνή άμμος
569	0108	San Salvador	1986	National Geographical Inst	5.80	2.32	1.01	272.6	C	Πυκνή άμμος
585	0110	Baja California	1987	Cerro Prieto	5.50	1.24	0.75	203.2	B	Πυκνή άμμος
614	0113	Whittier Narrows-01	1987	Downey - Birchdale	5.99	0.8	1.22	704.6	C	Πολύ πυκνή άμμος
615	0113	Whittier Narrows-01	1987	Downey - Co Maint Bldg	5.99	0.94	1.22	465.6	C	Πολύ πυκνή άμμος
645	0113	Whittier Narrows-01	1987	LB - Orange Ave	5.99	0.7	1.22	520.4	C	Πολύ πυκνή άμμος



Record Sequence Number	EQID	Earthquake Name	YEAR	Station Name	Earthquake Magnitude	Δεσπόζουσα Ιδιοπερίοδος (sec)	Tp Shahi-Baker	Preferred Vs <sub>30</sub> (m/s)	Κατάταξη κατά ΕΚ8 σύμφωνα με Vs <sub>30</sub>	Είδος εδάφους
692	0113	Whittier Narrows-01	1987	Santa Fe Springs - E.Joslin	5.99	0.58	1.22	487.3	C	Πολύ πυκνή άμμος
721	0116	Superstition Hills-02	1987	El Centro Imp. Co. Cent	6.54	2.48	2.11	272.6	C	Πυκνή άμμος
732	0118	Loma Prieta	1989	APEEL 2 - Redwood City	6.93	1.12	3.10	258.9	D	Πυκνή άμμος
759	0118	Loma Prieta	1989	Foster City - APEEL 1	6.93	2.42	3.10	305.9	D	Πυκνή άμμος
763	0118	Loma Prieta	1989	Gilroy - Gavilan Coll.	6.93	1.48	3.10	210.5	B	Πυκνή άμμος
764	0118	Loma Prieta	1989	Gilroy - Historic Bldg.	6.93	1.48	3.10	579.1	C	Πολύ πυκνή άμμος
766	0118	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #2	6.93	1.5	3.10	454.6	C	Πολύ πυκνή άμμος
767	0118	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #3	6.93	1.46	3.10	460.7	C	Πολύ πυκνή άμμος
771	0118	Loma Prieta	1989	Golden Gate Bridge	6.93	1.42	3.10	206.1	B	Πυκνή άμμος
778	0118	Loma Prieta	1989	Hollister Diff. Array	6.93	2.5	3.10	272.6	C	Πυκνή άμμος
779	0118	Loma Prieta	1989	LGPC	6.93	2.84	3.10	202.3	B	Πυκνή άμμος
783	0118	Loma Prieta	1989	Oakland - Outer Harbor Wharf	6.93	1.54	3.10	473.9	C	Πολύ πυκνή άμμος
784	0118	Loma Prieta	1989	Oakland - Title & Trust	6.93	1.54	3.10	272.6	C	Πυκνή άμμος
787	0118	Loma Prieta	1989	Palo Alto - SLAC Lab	6.93	1.8	3.10	202.9	B	Πυκνή άμμος
796	0118	Loma Prieta	1989	SF - Presidio	6.93	1.86	3.10	345.4	B	Πυκνή άμμος
799	0118	Loma Prieta	1989	SF Intern. Airport	6.93	1.42	3.10	615.0	D	Πολύ πυκνή άμμος
802	0118	Loma Prieta	1989	Saratoga - Aloha Ave	6.93	1.92	3.10	1000.0	B	Βράχος
808	0118	Loma Prieta	1989	Treasure Island	6.93	2.68	3.10	375.3	S1	Πολύ πυκνή άμμος
825	0123	Cape Mendocino	1992	Cape Mendocino	7.01	2.74	3.35	348.7	B	Πυκνή άμμος
828	0123	Cape Mendocino	1992	Petrolia	7.01	3.64	3.35	193.7	B	Πυκνή άμμος
838	0125	Landers	1992	Barstow	7.28	3.88	4.38	376.1	B	
879	0125	Landers	1992	Lucerne	7.28	4.62	4.38	376.1	B	Πολύ πυκνή άμμος
900	0125	Landers	1992	Yermo Fire Station	7.28	6.9	4.38	272.6	C	Πυκνή άμμος
963	0127	Northridge-01	1994	Castaic - Old Ridge Route	6.69	1.42	2.44	338.5	B	Πυκνή άμμος



Record Sequence Number	EQID	Earthquake Name	YEAR	Station Name	Earthquake Magnitude	Δεσπόζουσα Ιδιοπερίοδος (sec)	Tp Shahi-Baker	Preferred Vs <sub>30</sub> (m/s)	Κατάταξη κατά ΕΚ8 σύμφωνα με Vs <sub>30</sub>	Είδος εδάφους
982	0127	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant	6.69	2.9	2.44	488.8	B	Πολύ πυκνή άμμος
983	0127	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant Generator	6.69	2.58	2.44	597.1	B	Πολύ πυκνή άμμος
1003	0127	Northridge-01	1994	LA - Saturn St	6.69	0.68	2.44	476.1	C	Πολύ πυκνή άμμος
1004	0127	Northridge-01	1994	LA - Sepulveda VA Hospital	6.69	0.68	2.44	663.3	B	Πολύ πυκνή άμμος
1013	0127	Northridge-01	1994	LA Dam	6.69	2.56	2.44	274.5	B	Πυκνή άμμος
1044	0127	Northridge-01	1994	Newhall - Fire Sta	6.69	1.86	2.44	272.6	C	Πυκνή άμμος
1045	0127	Northridge-01	1994	Newhall - W Pico Canyon Rd.	6.69	2.28	2.44	443.0	E	Πολύ πυκνή άμμος
1050	0127	Northridge-01	1994	Pacoima Dam (downstr)	6.69	0.52	2.44	659.6	A	Πολύ πυκνή άμμος
1051	0127	Northridge-01	1994	Pacoima Dam (upper left)	6.69	0.64	2.44	766.8	A	Πολύ πυκνή άμμος
1052	0127	Northridge-01	1994	Pacoima Kagel Canyon	6.69	0.62	2.44	274.5	B	Πυκνή άμμος
1063	0127	Northridge-01	1994	Rinaldi Receiving Sta	6.69	1.82	2.44	364.0	E	Πολύ πυκνή άμμος
1084	0127	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta	6.69	2.96	2.44	305.9	C	Πυκνή άμμος
1086	0127	Northridge-01	1994	Sylmar - Olive View Med FF	6.69	2.4	2.44	274.5	B	Πυκνή άμμος
1106	0129	Kobe, Japan	1995	KJMA	6.90	0.7	3.01	487.3	C	Πολύ πυκνή άμμος
1108	0129	Kobe, Japan	1995	Kobe University	6.90	1.3	3.01	663.3	A	Πολύ πυκνή άμμος
1114	0129	Kobe, Japan	1995	Port Island (0 m)	6.90	1.94	3.01	1070.3	S1	Βράχος
1119	0129	Kobe, Japan	1995	Takarazuka	6.90	1.7	3.01	573.0	C	Πολύ πυκνή άμμος
1120	0129	Kobe, Japan	1995	Takatori	6.90	2.04	3.01	615.0	C	Πολύ πυκνή άμμος
1147	0136	Kocaeli, Turkey	1999	Ambarli	7.51	5.62	5.50	493.1	D	πολύ σκληρή άργιλος
1148	0136	Kocaeli, Turkey	1999	Arcelik	7.51	8.98	5.50	274.5	B	Πυκνή άμμος
1158	0136	Kocaeli, Turkey	1999	Duzce	7.51	3.73	5.50	272.6	C	Πυκνή άμμος
1161	0136	Kocaeli, Turkey	1999	Gebze	7.51	6.64	5.50	345.4	B	Πυκνή άμμος
1176	0136	Kocaeli, Turkey	1999	Yarimca	7.51	8.88	5.50	472.8	C	Πολύ πυκνή άμμος
1182	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY006	7.62	2.02	6.13	345.4	B	Πυκνή άμμος



Record Sequence Number	EQID	Earthquake Name	YEAR	Station Name	Earthquake Magnitude	Δεσπόζουσα Ιδιοπερίοδος (sec)	Tp Shahi-Baker	Preferred Vs <sub>30</sub> (m/s)	Κατάταξη κατά ΕΚ8 σύμφωνα με Vs <sub>30</sub>	Είδος εδάφους
1193	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY024	7.62	5.6	6.13	345.4	B	Πυκνή άμμος
1197	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY028	7.62	1.1	6.13	545.0	B	Πολύ πυκνή άμμος
1202	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY035	7.62	1.07	6.13	350.0	B	Πυκνή άμμος
1244	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY101	7.62	4.44	6.13	473.9	C	Πολύ πυκνή άμμος
1329	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	ILA037	7.62	1.76	6.13	473.9	C	Πολύ πυκνή άμμος
1402	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	NST	7.62	7.44	6.13	659.6	B	Πολύ πυκνή άμμος
1403	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	NSY	7.62	7.88	6.13	245.1	B	Πυκνή άμμος
1410	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TAP003	7.62	2.6	6.13	589.9	C	Πολύ πυκνή άμμος
1463	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU003	7.62	8.3	6.13	271.9	B	Πυκνή άμμος
1464	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU006	7.62	8.68	6.13	270.2	B	Πυκνή άμμος
1466	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU008	7.62	10.28	6.13	308.6	B	Πυκνή άμμος
1468	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU010	7.62	7.2	6.13	192.1	B	Σκληρή Άργιλος
1471	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU015	7.62	7.4	6.13	133.1	B	Μαλακή έως μετρίως σκληρή άργιλος
1472	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU017	7.62	7.59	6.13	116.4	B	Μαλακή έως μετρίως σκληρή άργιλος
1473	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU018	7.62	10.32	6.13	729.7	B	Πολύ πυκνή άμμος
1475	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU026	7.62	9.86	6.13	338.5	B	Πυκνή άμμος
1476	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU029	7.62	8.5	6.13	270.8	B	Πυκνή άμμος
1477	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU031	7.62	7.7	6.13	349.9	B	Πυκνή άμμος
1479	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU034	7.62	8.04	6.13	641.6	B	Πολύ πυκνή άμμος
1480	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU036	7.62	5.04	6.13	473.9	C	Πολύ πυκνή άμμος
1481	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU038	7.62	9.68	6.13	375.3	C	Πολύ πυκνή άμμος
1482	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU039	7.62	7.6	6.13	215.5	B	Πυκνή άμμος
1483	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU040	7.62	5.38	6.13	477.7	B	Πολύ πυκνή άμμος
1484	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU042	7.62	7.8	6.13	272.6	C	Πυκνή άμμος





Record Sequence Number	EQID	Earthquake Name	YEAR	Station Name	Earthquake Magnitude	Δεσπόζουσα Ιδιοπερίοδος (sec)	Tp Shahi-Baker	Preferred Vs <sub>30</sub> (m/s)	Κατάταξη κατά ΕΚ8 σύμφωνα με Vs <sub>30</sub>	Είδος εδάφους
1485	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU045	7.62	8.06	6.13	248.6	B	Πυκνή άμμος
1486	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU046	7.62	8.04	6.13	306.3	B	Πυκνή άμμος
1487	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU047	7.62	7.92	6.13	425.3	B	Πολύ πυκνή άμμος
1489	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU049	7.62	10.4	6.13	594.5	B	Πολύ πυκνή άμμος
1490	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU050	7.62	9.36	6.13	714.3	C	Πολύ πυκνή άμμος
1492	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU052	7.62	11	6.13	190.1	B	Μαλακή έως μετριώς σκληρή άργιλος
1493	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU053	7.62	10.68	6.13	370.8	B	Πολύ πυκνή άμμος
1494	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU054	7.62	7.36	6.13	370.8	B	Πολύ πυκνή άμμος
1496	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU056	7.62	7.78	6.13	494.1	C	Πολύ πυκνή άμμος
1497	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU057	7.62	7.26	6.13	155.1	B	μαλακή άργιλος
1498	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU059	7.62	6.14	6.13	473.9	C	Πολύ πυκνή άμμος
1499	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU060	7.62	11.82	6.13	473.9	C	Πολύ πυκνή άμμος
1501	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU063	7.62	3.8	6.13	513.7	B	Πολύ πυκνή άμμος
1502	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU064	7.62	7.31	6.13	237.5	C	Σκληρή Άργιλος
1503	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU065	7.62	5.16	6.13	493.1	C	πολύ σκληρή άργιλος
1505	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU068	7.62	11.44	6.13	712.8	B	Πολύ πυκνή άμμος
1510	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU075	7.62	3.88	6.13	370.8	B	Πολύ πυκνή άμμος
1514	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU081	7.62	6.46	6.13	475.5	C	Πολύ πυκνή άμμος
1515	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU082	7.62	8.24	6.13	353.6	B	Πυκνή άμμος
1516	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU083	7.62	5.36	6.13	450.3	B	Πολύ πυκνή άμμος
1519	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU087	7.62	8.5	6.13	373.1	B	πολύ σκληρή άργιλος
1523	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU094	7.62	9.56	6.13	525.8	B	Πολύ πυκνή άμμος
1524	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU095	7.62	7.86	6.13	308.7	B	Σκληρή Άργιλος
1525	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU096	7.62	7.14	6.13	380.1	B	Πολύ πυκνή άμμος



Record Sequence Number	EQID	Earthquake Name	YEAR	Station Name	Earthquake Magnitude	Δεσπόζουσα Ιδιοπερίοδος (sec)	Tp Shahi-Baker	Preferred Vs <sub>30</sub> (m/s)	Κατάταξη κατά ΕΚ8 σύμφωνα με Vs <sub>30</sub>	Είδος εδάφους
1526	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU098	7.62	7.9	6.13	392.2	B	Πολύ πυκνή άμμος
1528	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU101	7.62	7.9	6.13	599.6	C	Πολύ πυκνή άμμος
1530	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU103	7.62	7.56	6.13	269.1	B	Πυκνή άμμος
1531	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU104	7.62	9.04	6.13	285.9	B	
1533	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU106	7.62	6.78	6.13	2016.1	B	Βράχος
1546	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU122	7.62	6.32	6.13	508.1	B	Πολύ πυκνή άμμος
1548	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU128	7.62	7.78	6.13	282.3	B	
1550	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU136	7.62	8.48	6.13	251.2	B	Πυκνή άμμος
1595	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	WGK	7.62	5.02	6.13	258.9	C	Πυκνή άμμος
1602	0138	Duzce, Turkey	1999	Bolu	7.14	1.9	3.81	326.0	C	Πυκνή άμμος
1605	0138	Duzce, Turkey	1999	Duzce	7.14	4.94	3.81	276.0	C	Πυκνή άμμος
1853	0160	Yountville	2000	Napa Fire Station #3	5.00	8.66	0.46	271.4	C	Πυκνή άμμος
2114	0169	Denali, Alaska	2002	TAPS Pump Station #10	7.90	2.74	8.09	329.4	C	Πυκνή άμμος
2457	0172	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY024	6.20	8.48	1.50	370.5	B	Πολύ πυκνή άμμος
2461	0172	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY028	6.20	8.02	1.50	440.5	B	Πολύ πυκνή άμμος
2466	0172	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY035	6.20	1.46	1.50	312.0	B	Πυκνή άμμος
2495	0172	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY080	6.20	1.1	1.50	1043.0	B	Βράχος
2507	0172	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY101	6.20	3.32	1.50	427.7	C	Πολύ πυκνή άμμος
2618	0172	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	TCU065	6.20	1.44	1.50	542.6	C	Πολύ πυκνή άμμος
2627	0172	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	TCU076	6.20	1.28	1.50	198.0	B	μαλακή άργιλος
2650	0172	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	TCU116	6.20	3.52	1.50	312.0	B	Σκληρή Άργιλος
2734	0173	Chi-Chi, Taiwan-04	1999	CHY074	6.20	1.78	1.50	256.0	B	Σκληρή Άργιλος
3317	0175	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY101	6.30	1.96	1.66	473.9	C	Πολύ πυκνή άμμος
3473	0175	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	TCU078	6.30	0.98	1.66	175.0	B	μαλακή άργιλος

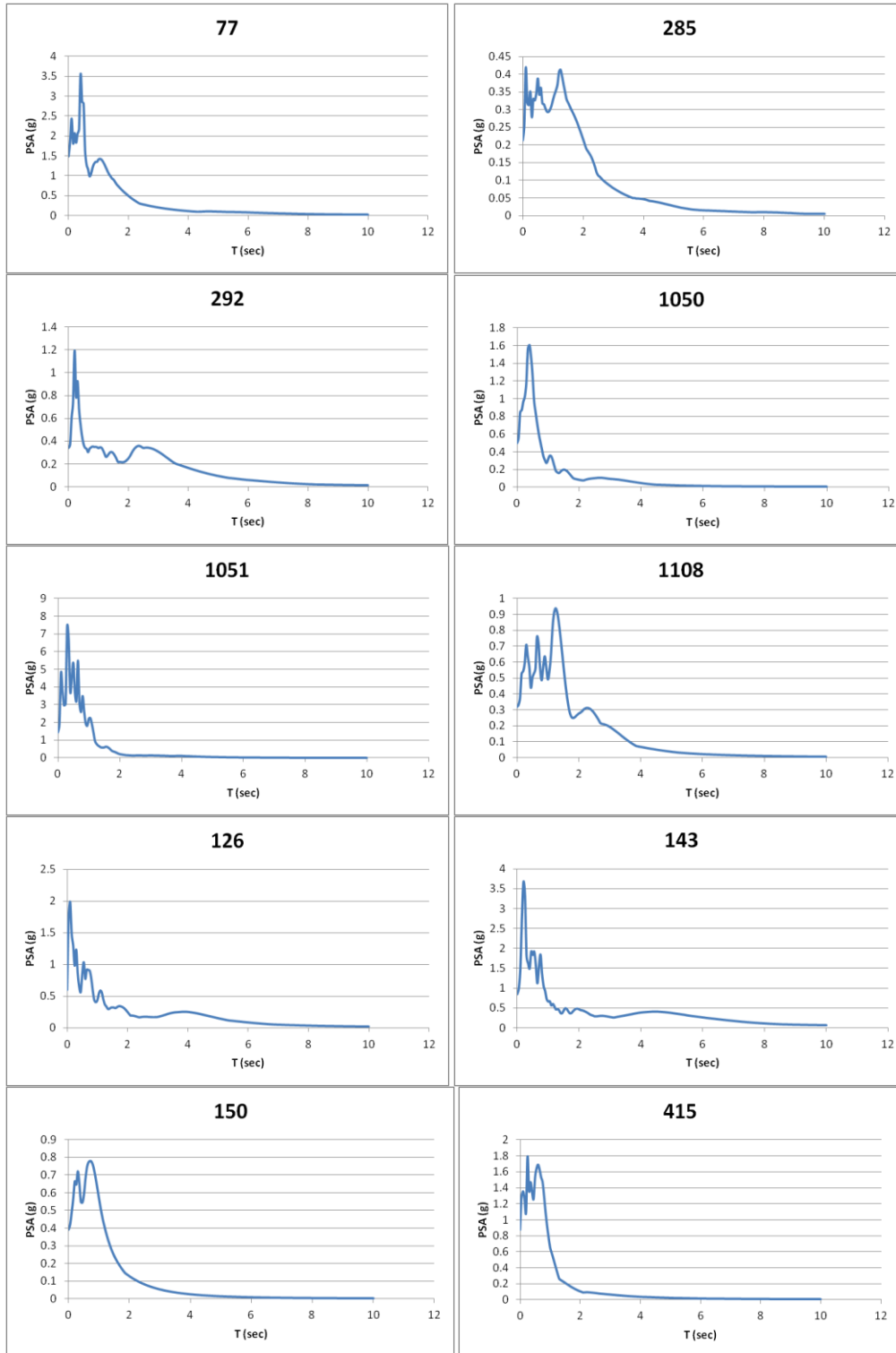


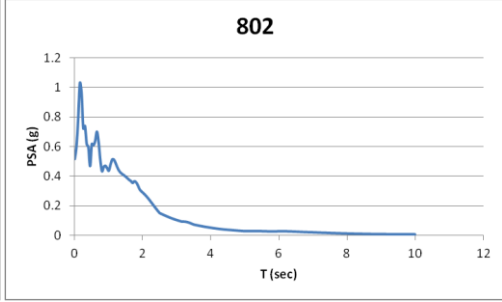
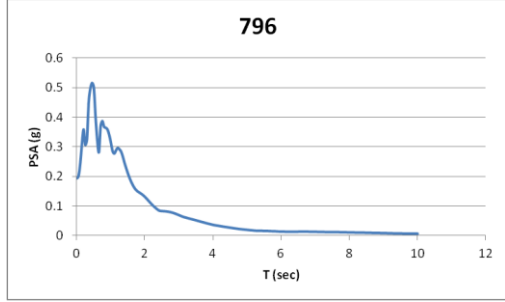
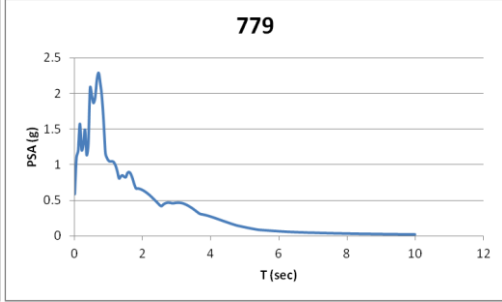
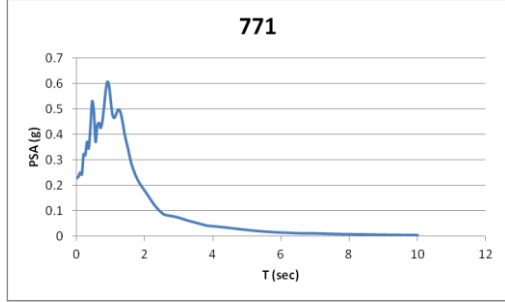
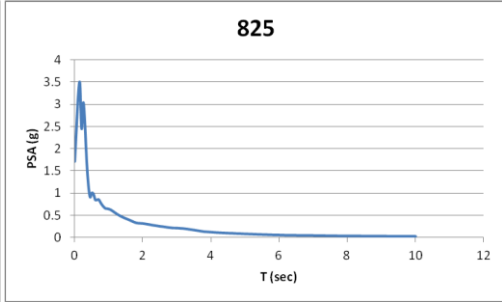
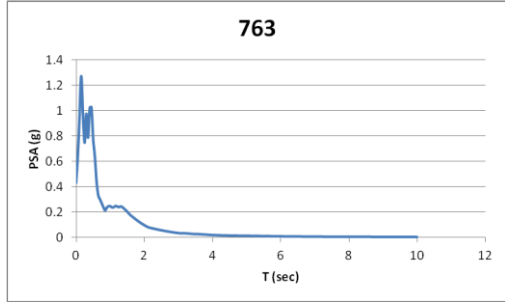
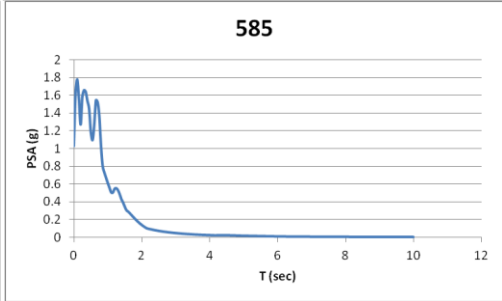
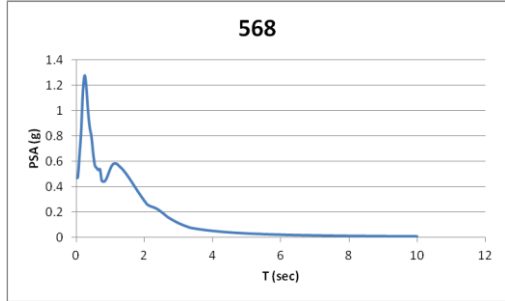
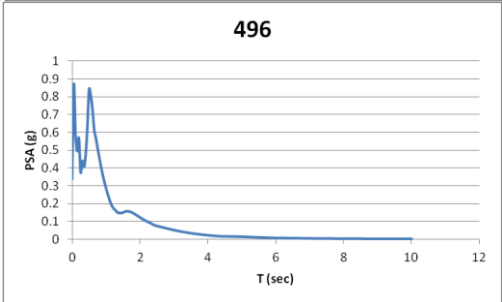
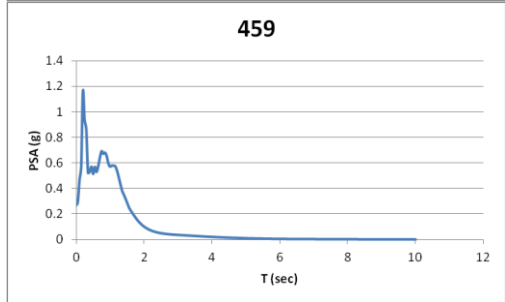
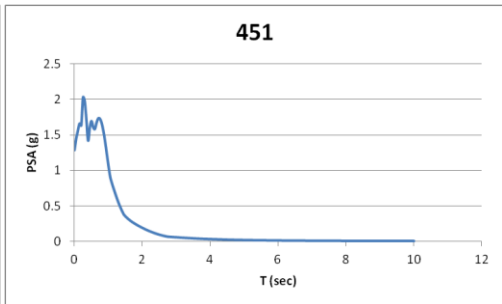
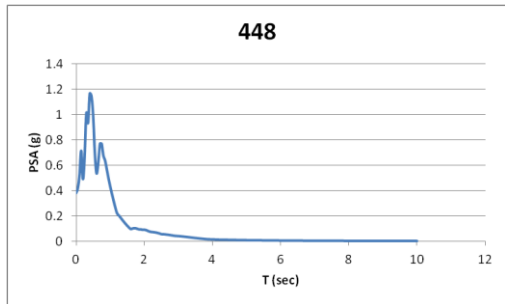
Record Sequence Number	EQID	Earthquake Name	YEAR	Station Name	Earthquake Magnitude	Δεσπόζουσα Ιδιοπερίοδος (sec)	Tp Shahi-Baker	Preferred Vs <sub>30</sub> (m/s)	Κατάταξη κατά ΕΚ8 σύμφωνα με Vs <sub>30</sub>	Είδος εδάφους
3474	0175	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	TCU079	6.30	0.46	1.66	523.0	B	Πολύ πυκνή άμμος
3475	0175	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	TCU080	6.30	1.78	1.66	276.0	B	Πυκνή άμμος
3548	0118	Loma Prieta	1989	Los Gatos - Lexington Dam	6.93	1.12	3.10	274.5	A	Πυκνή άμμος

**Πίνακας Π1:** Οι καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν από τη βάση δεδομένων (NGA database) και τα δεδομένα τους

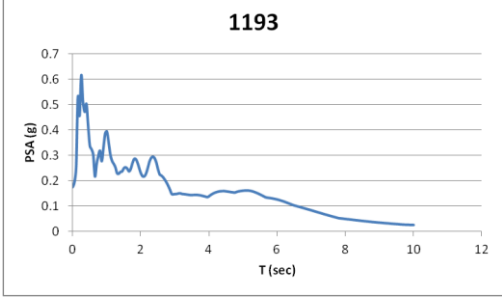
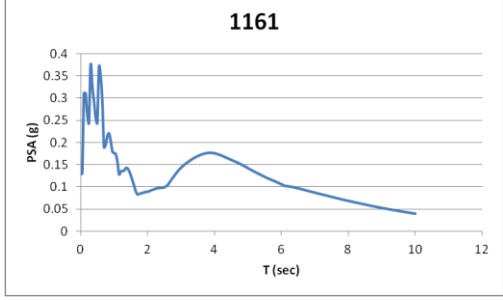
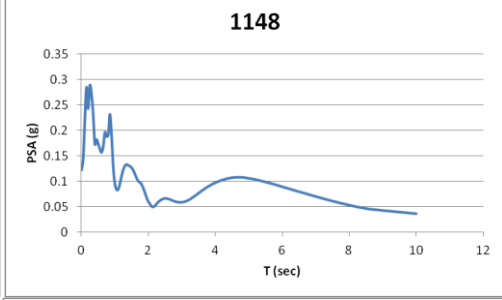
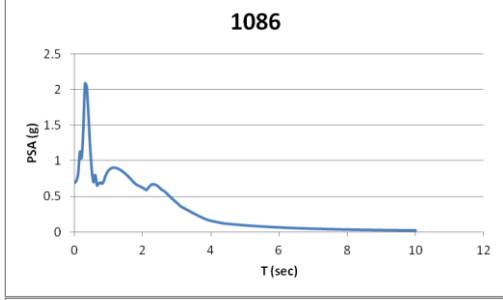
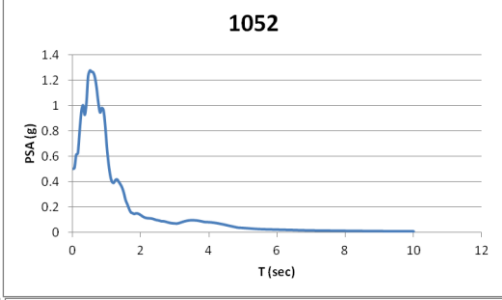
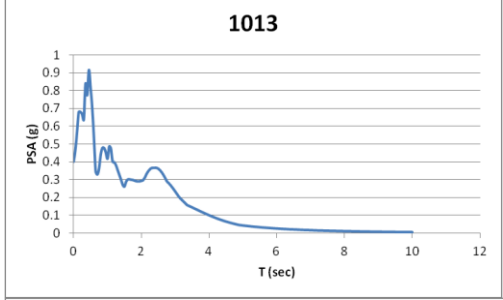
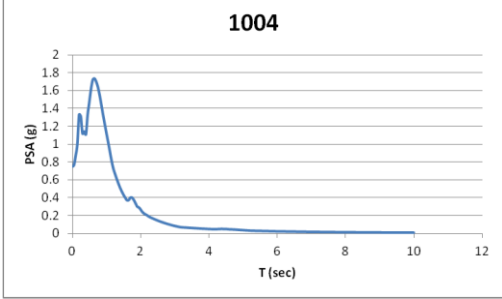
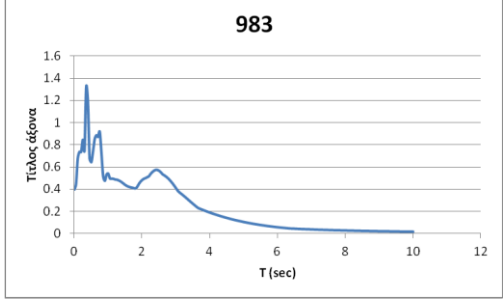
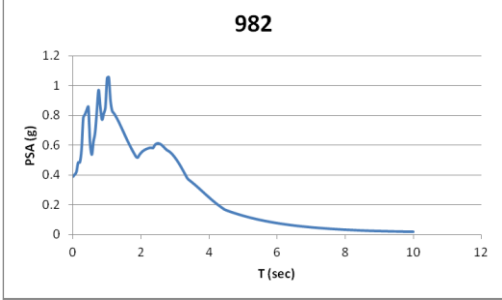
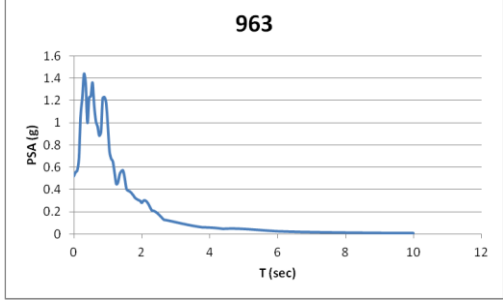
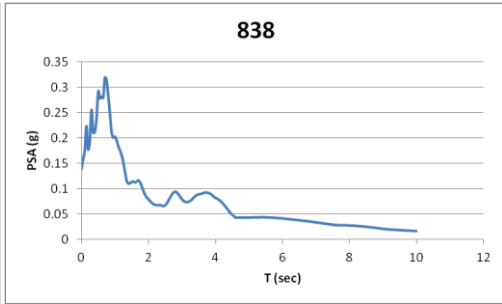
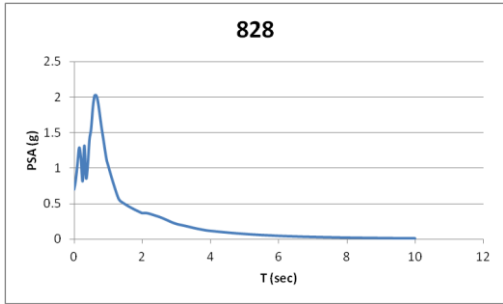


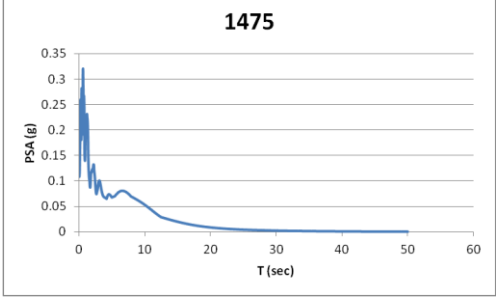
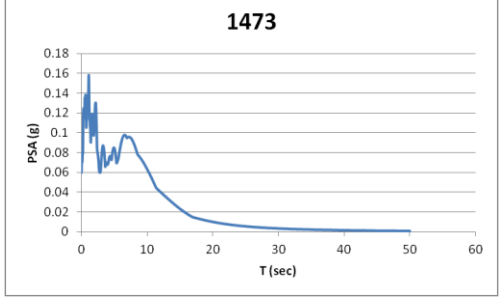
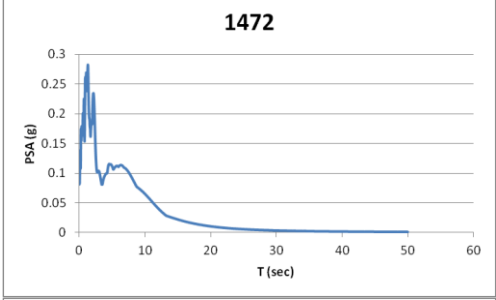
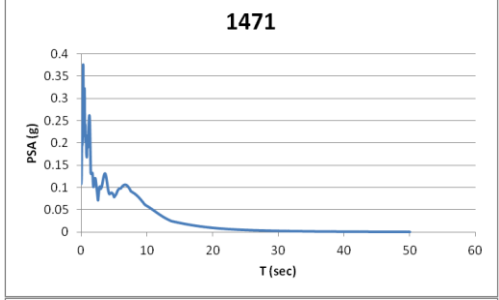
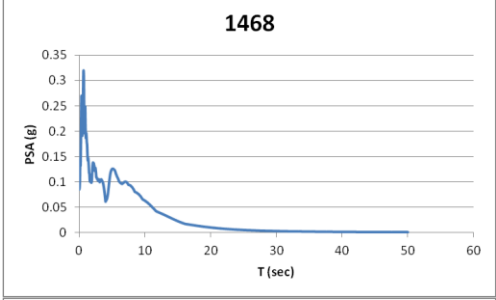
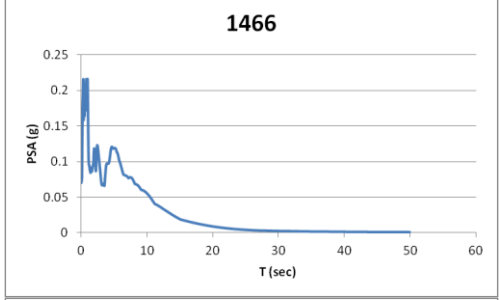
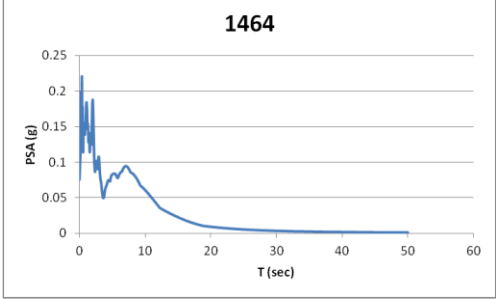
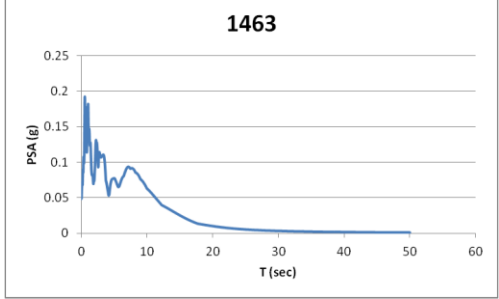
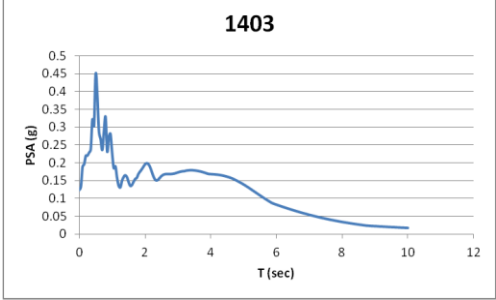
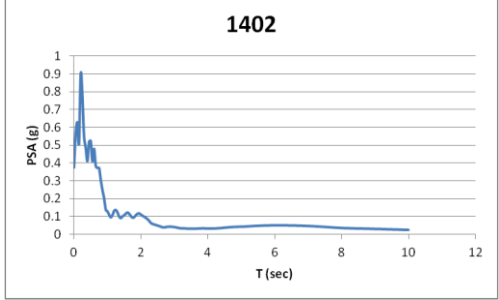
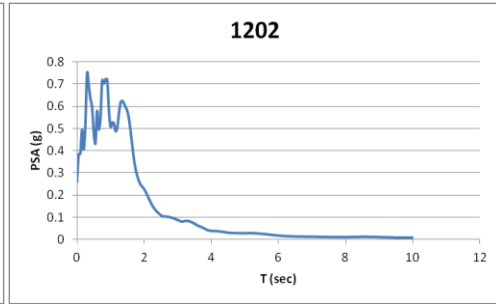
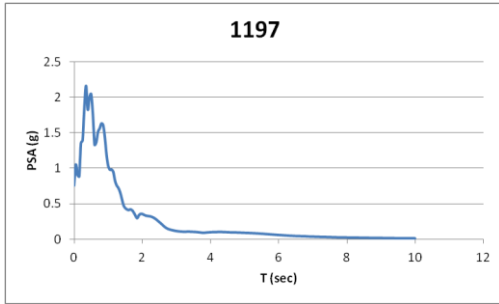
## ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΓΙΑ ΑΠΟΣΒΕΣΗ 5%

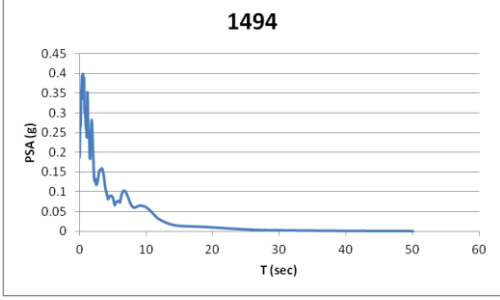
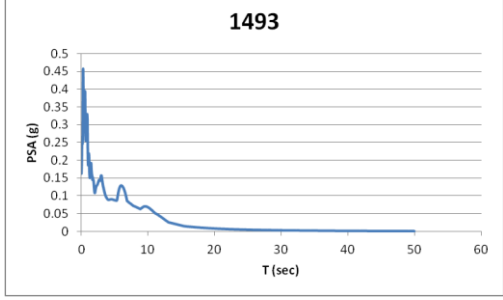
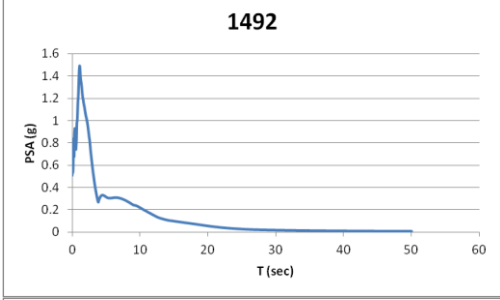
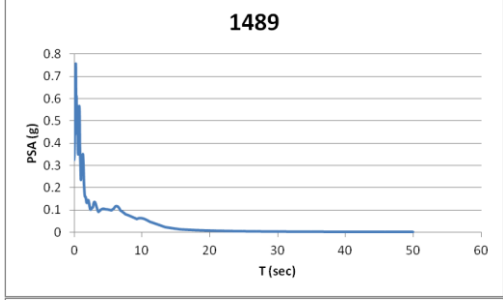
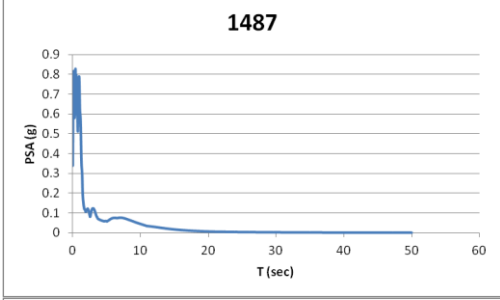
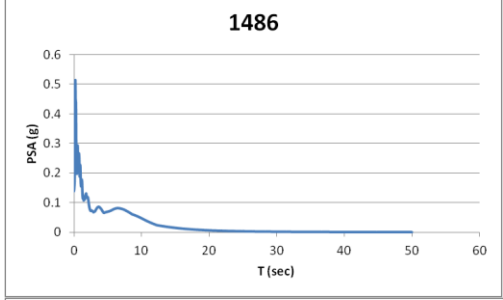
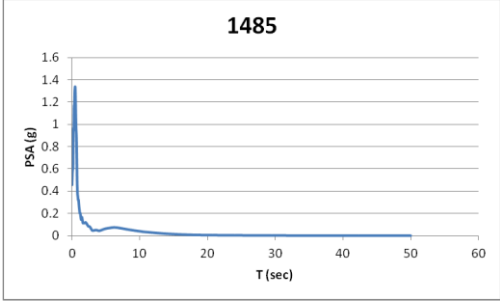
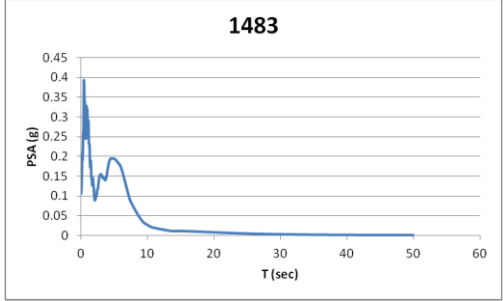
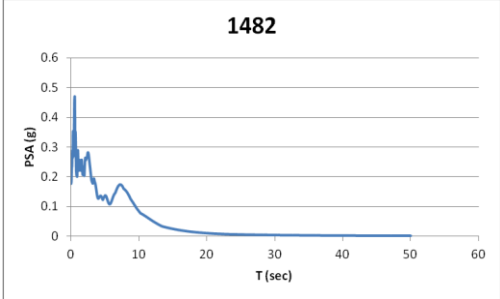
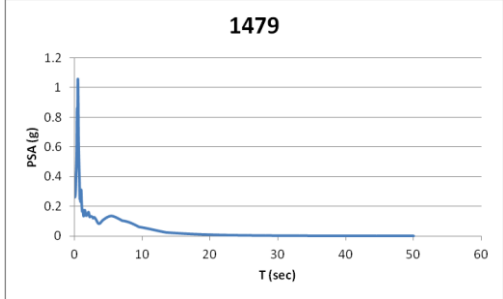
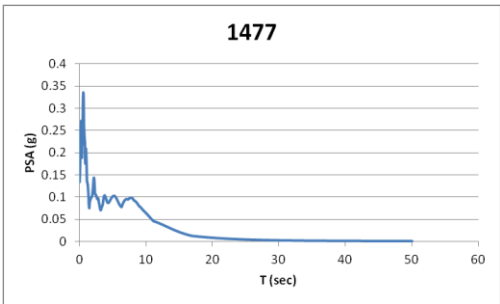
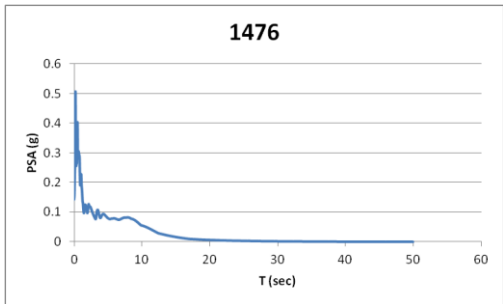


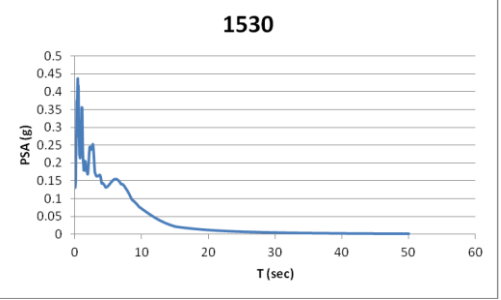
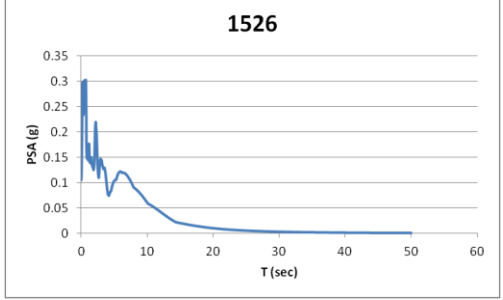
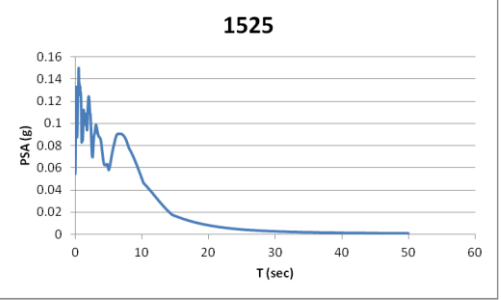
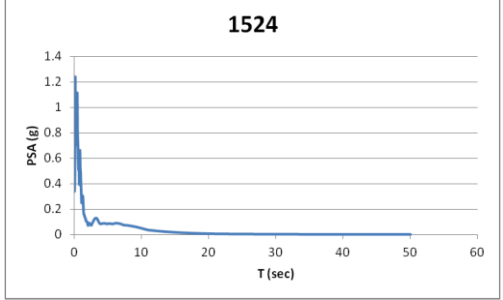
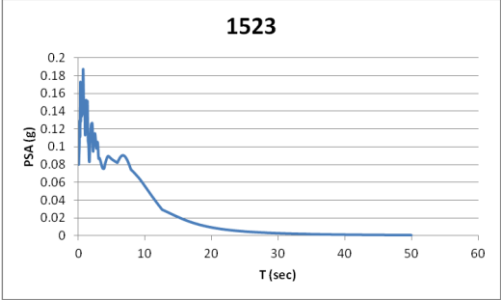
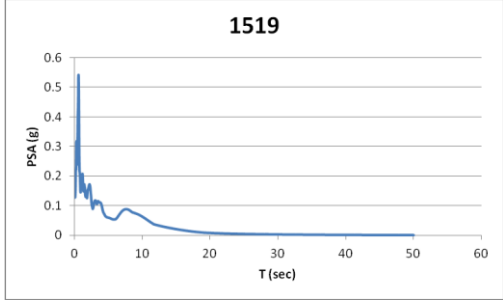
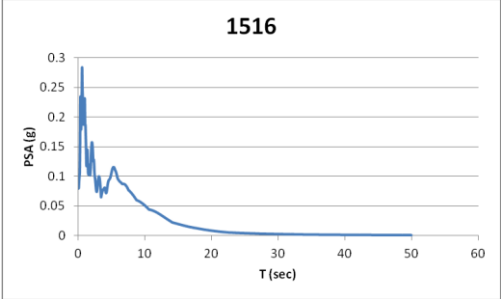
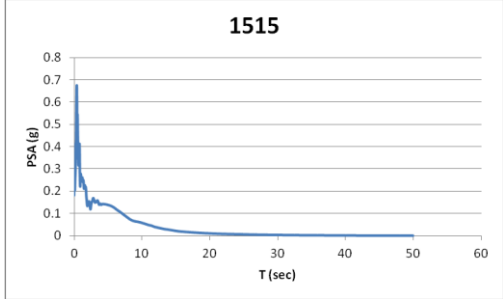
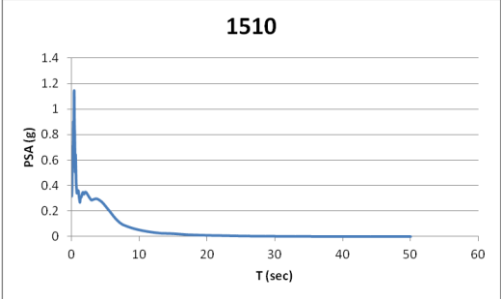
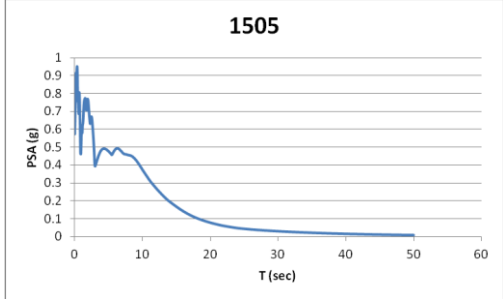
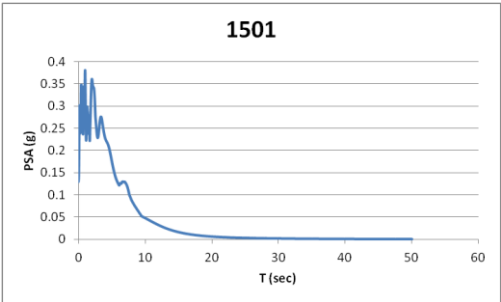
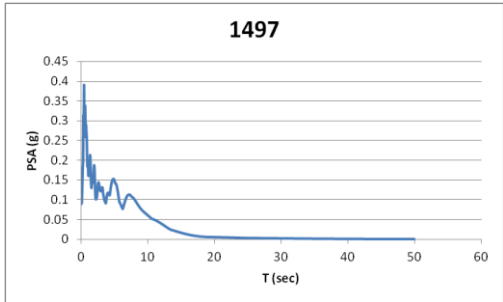


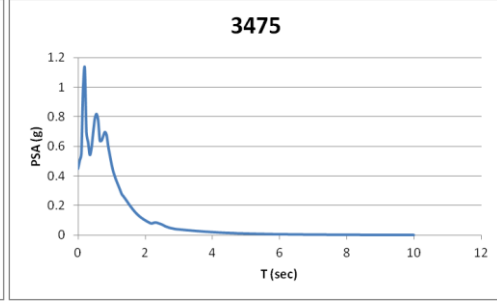
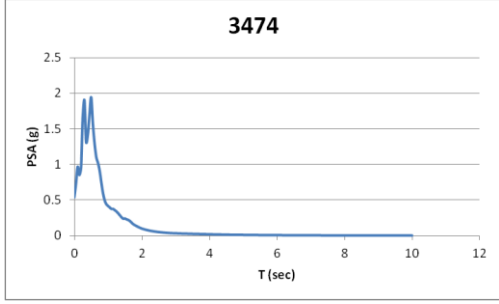
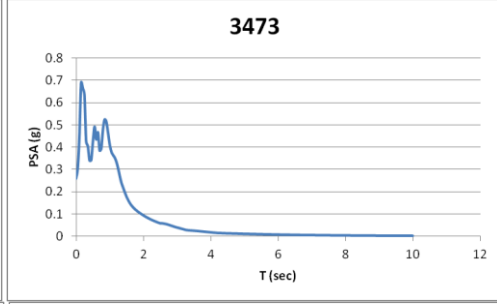
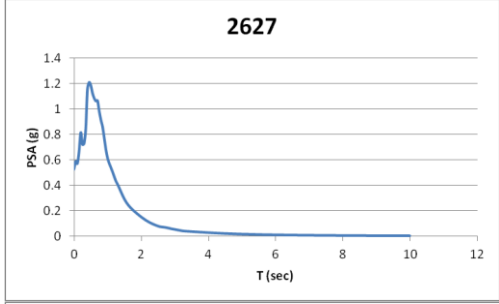
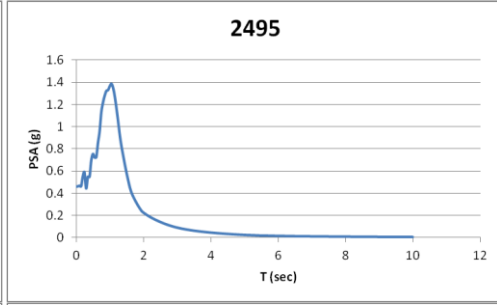
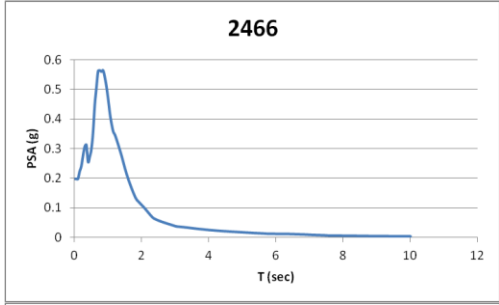
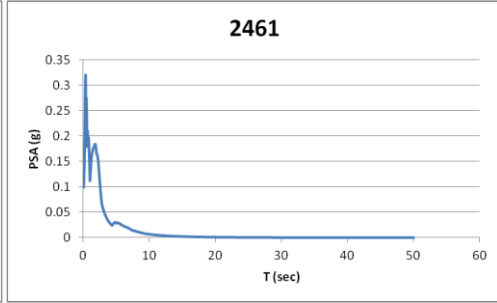
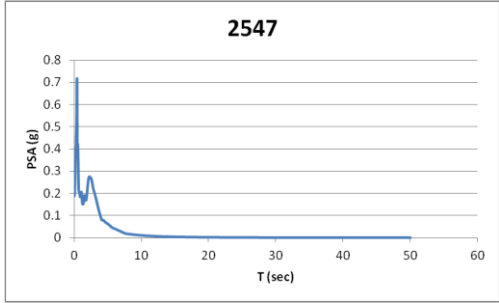
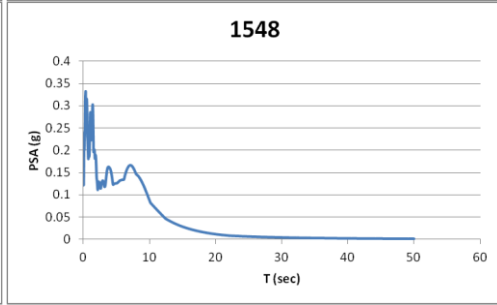
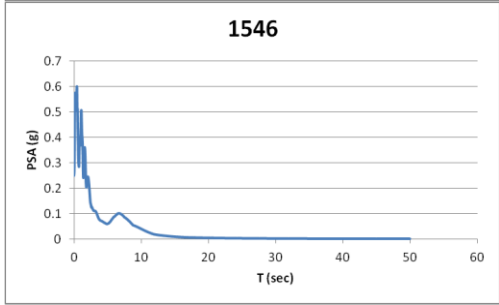
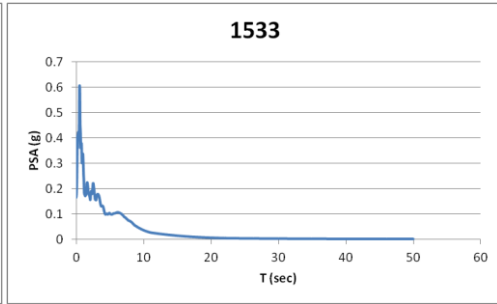
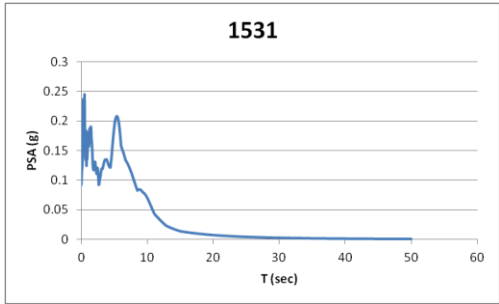


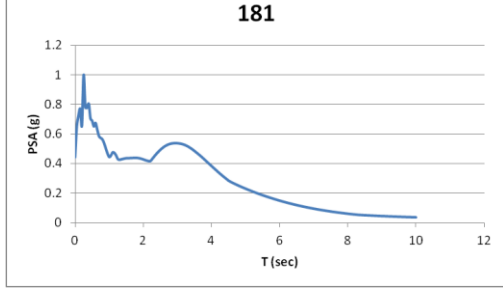
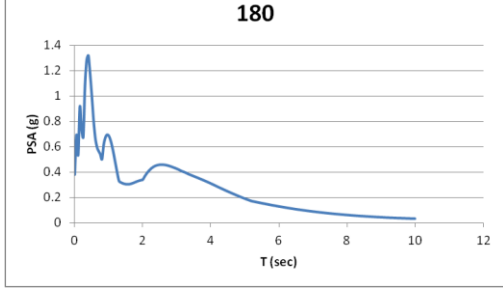
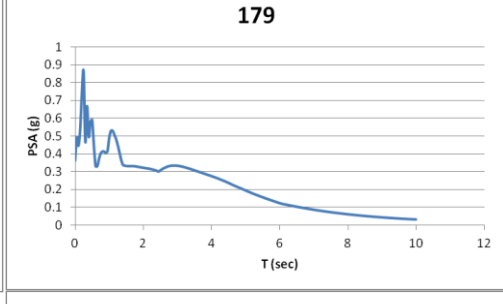
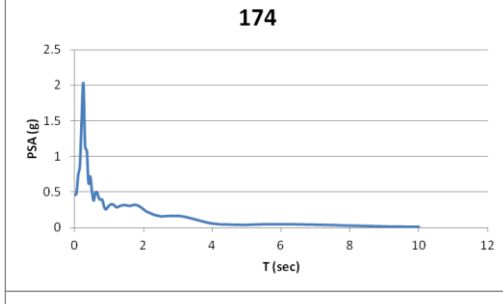
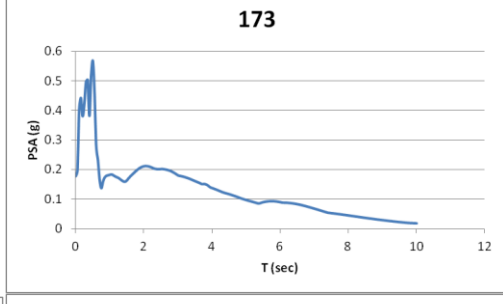
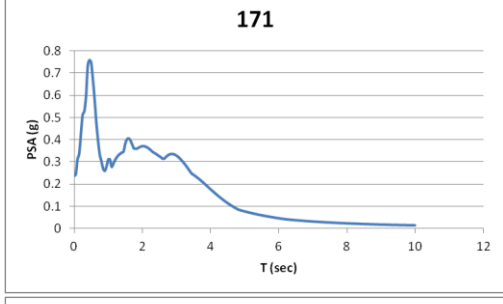
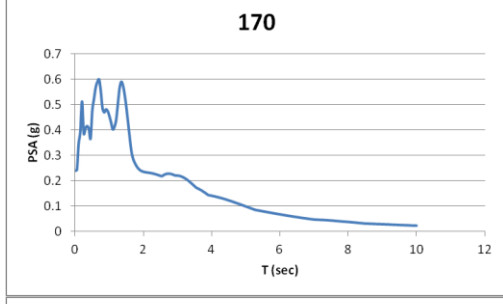
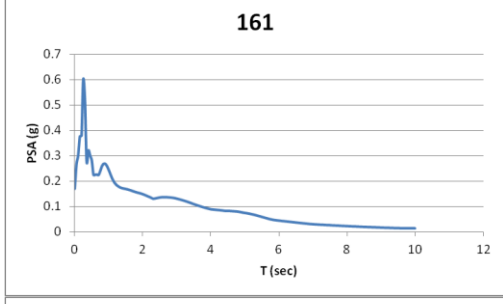
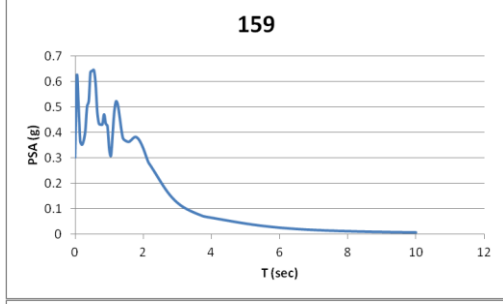
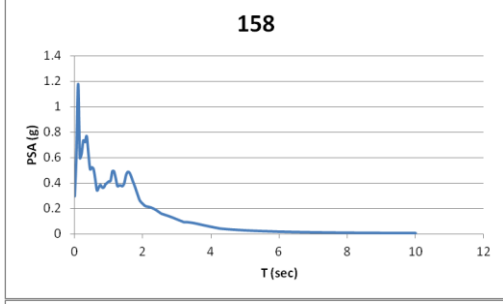
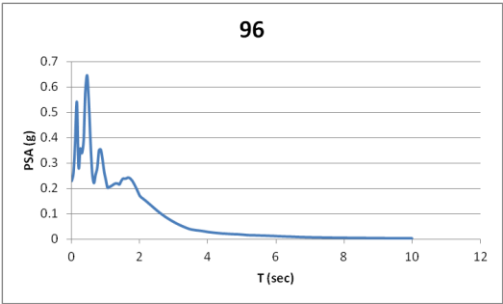
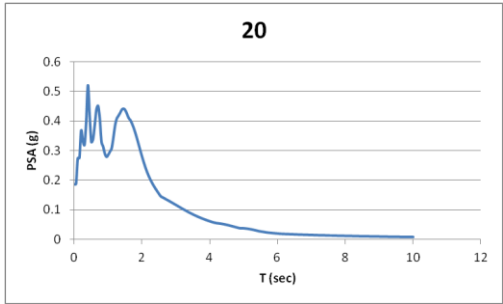


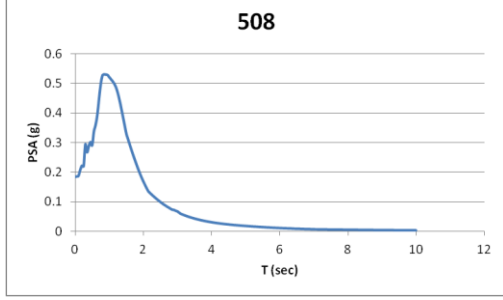
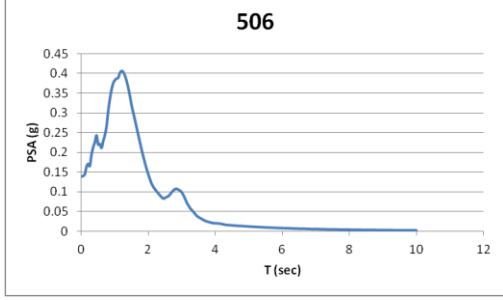
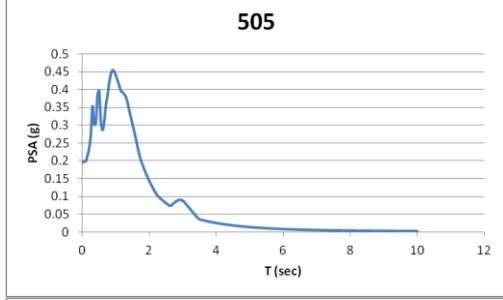
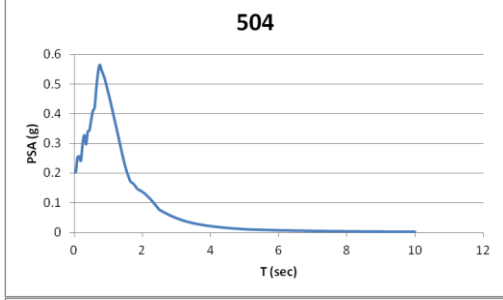
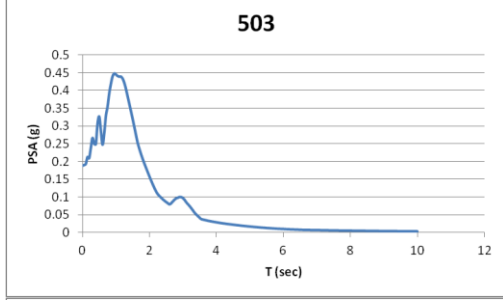
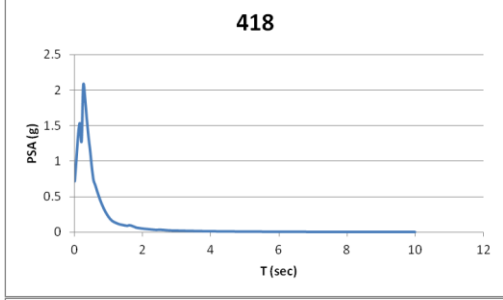
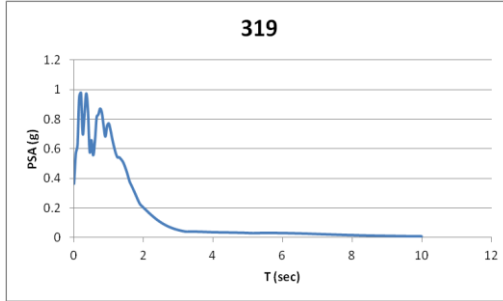
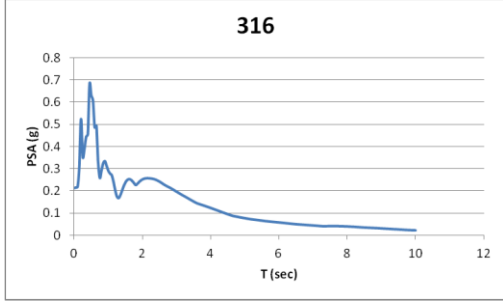
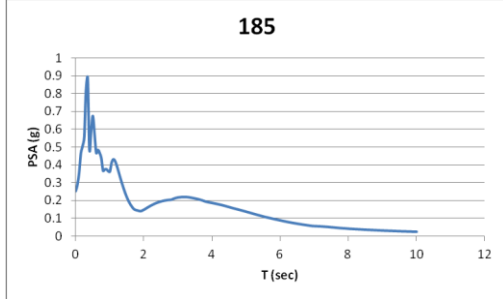
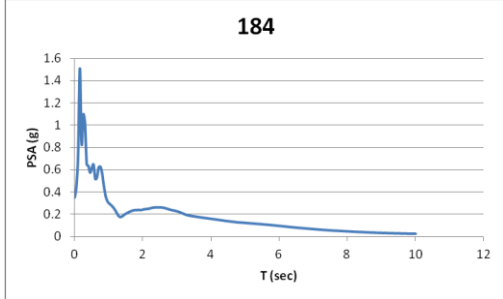
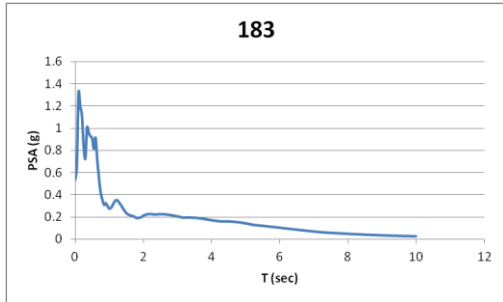
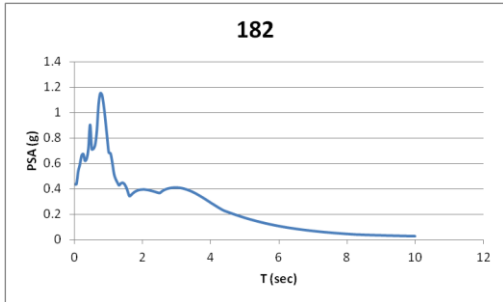


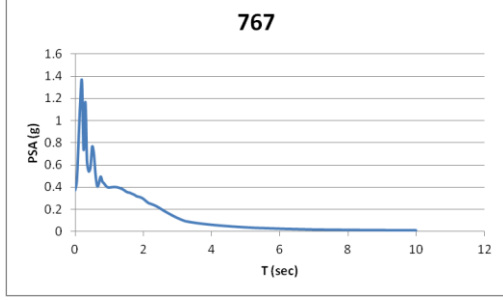
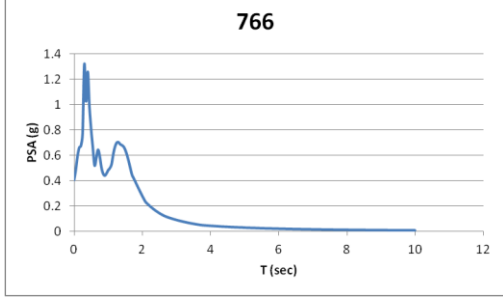
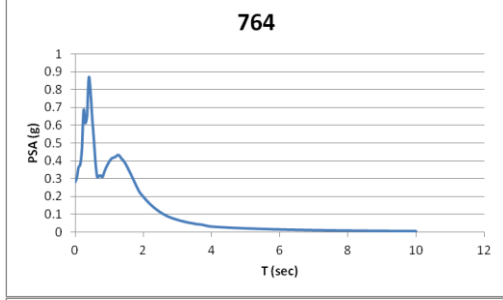
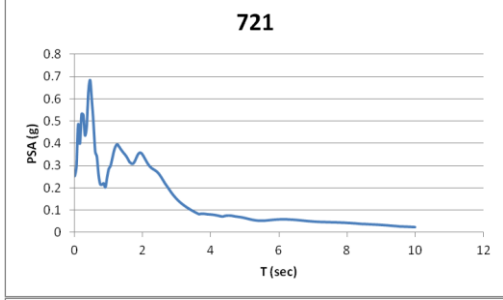
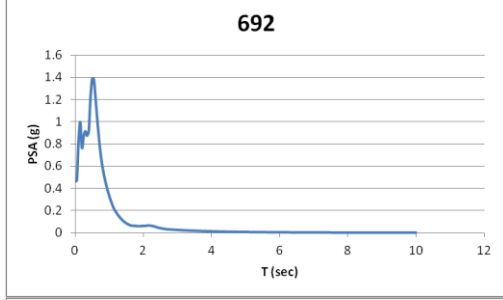
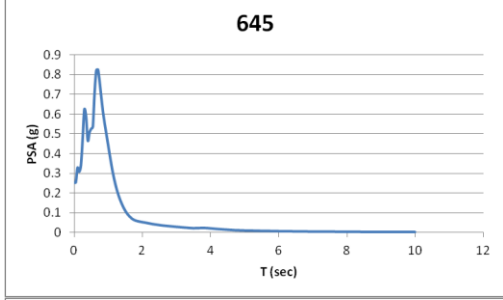
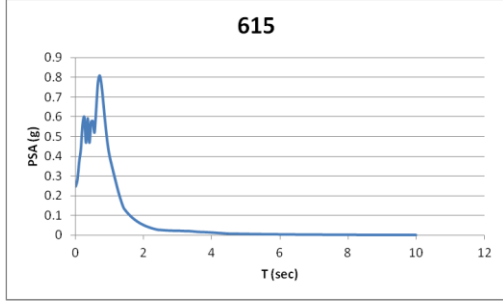
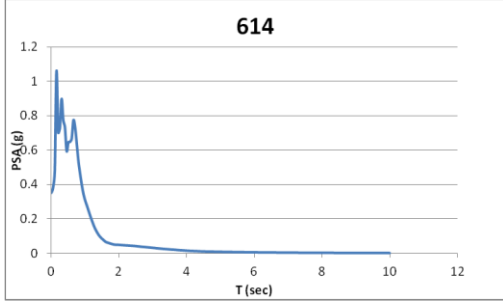
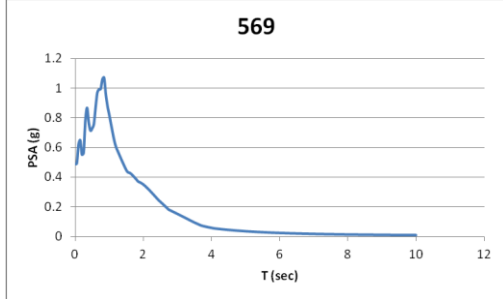
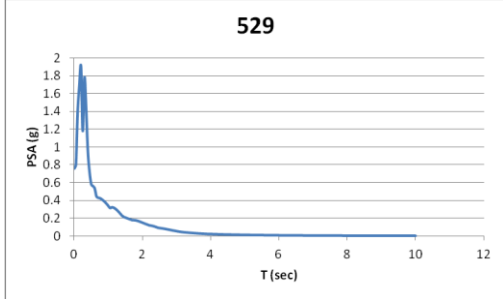
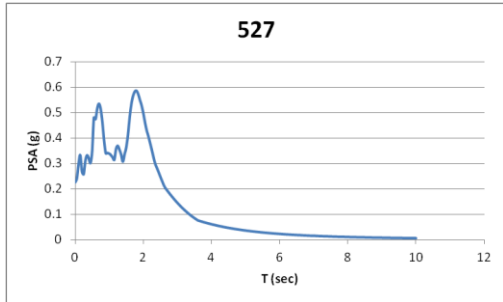
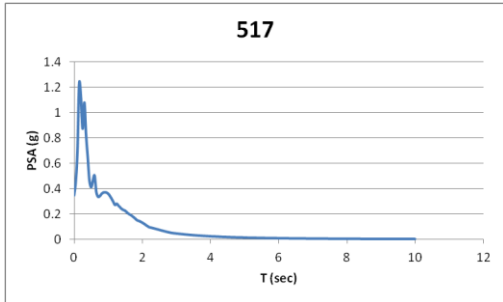




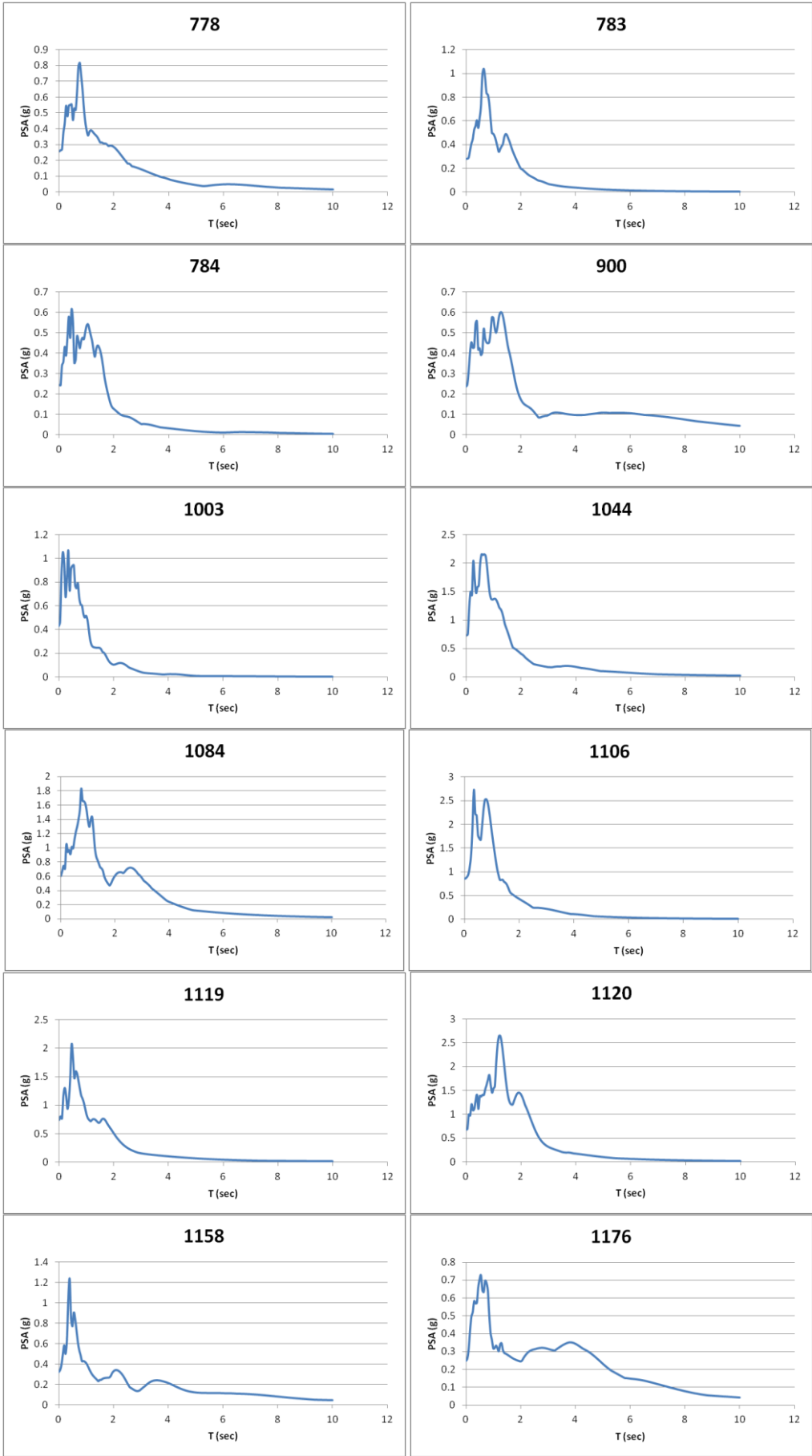


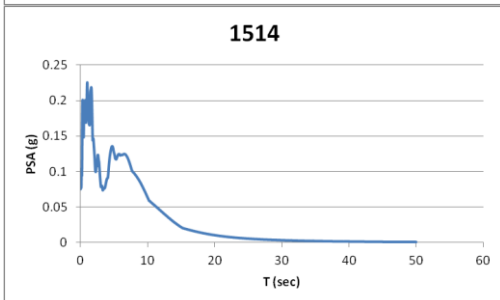
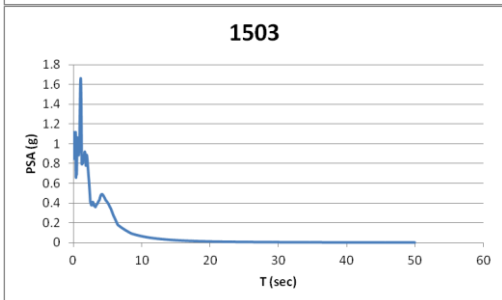
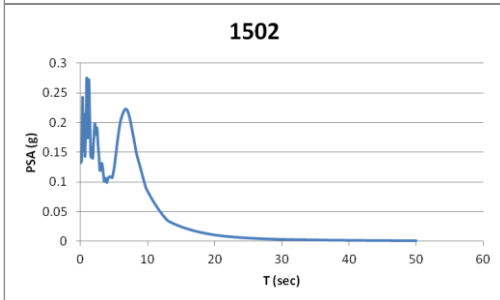
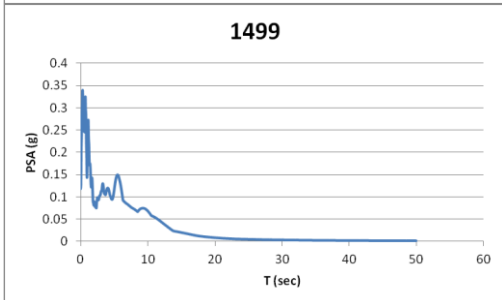
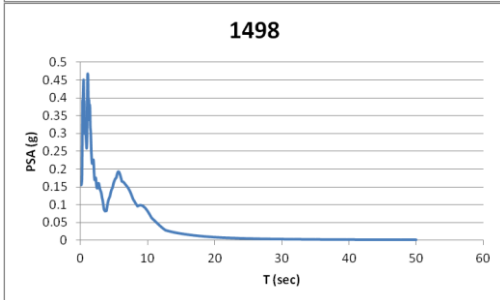
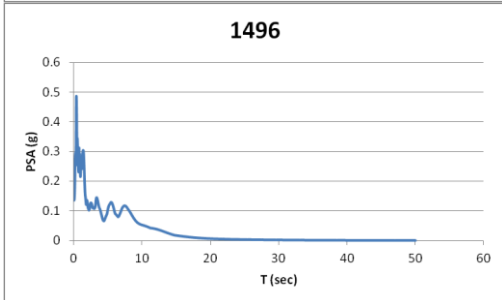
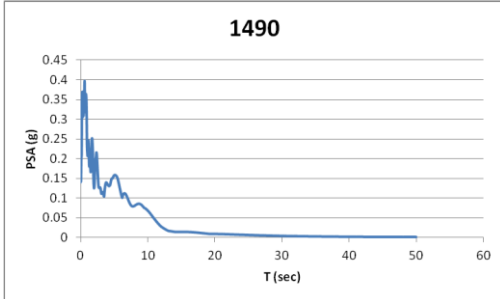
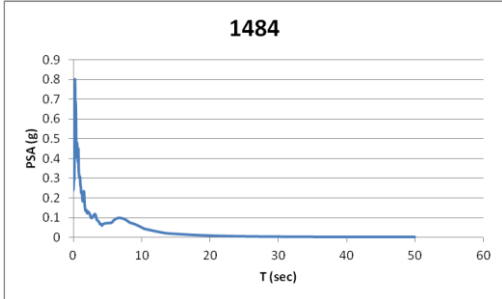
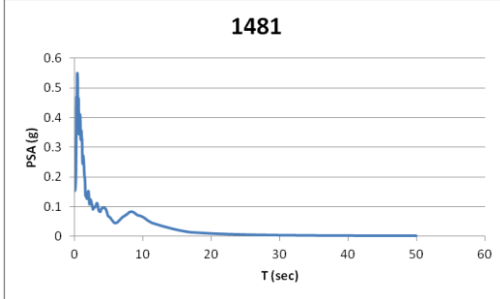
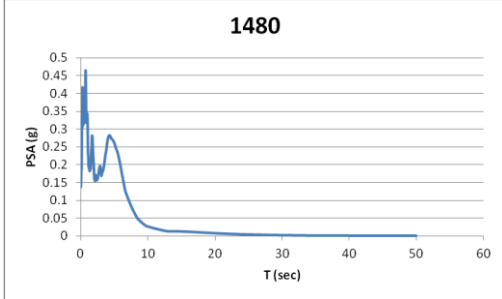
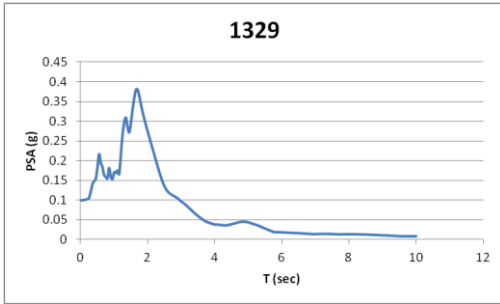
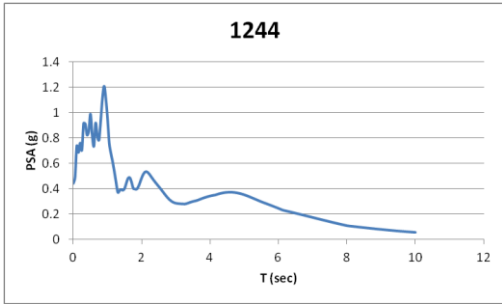


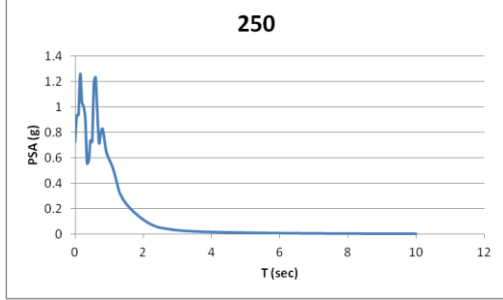
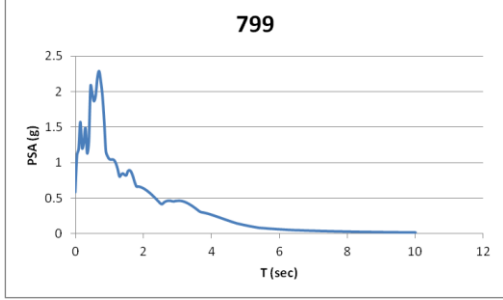
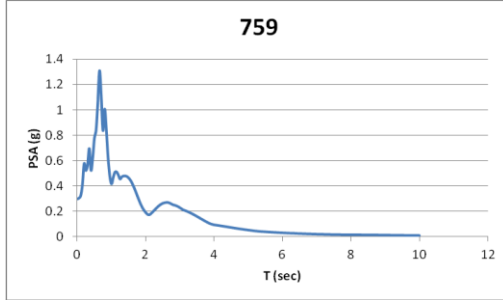
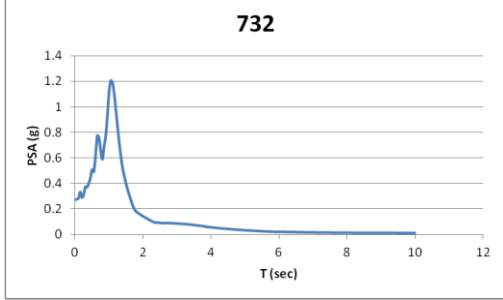
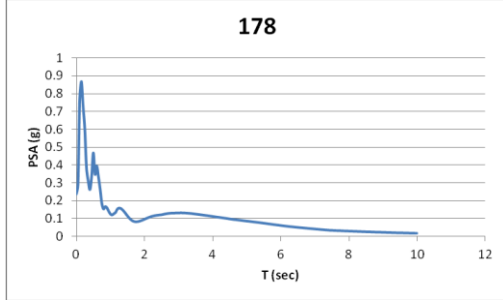
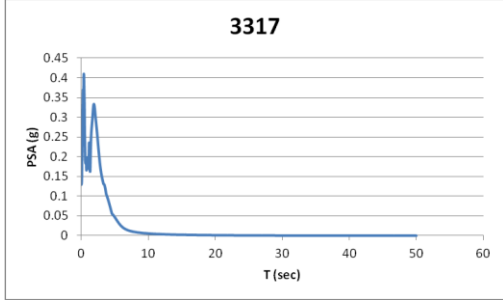
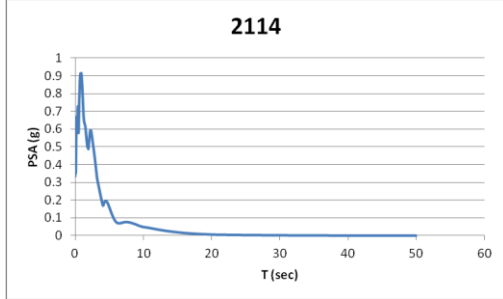
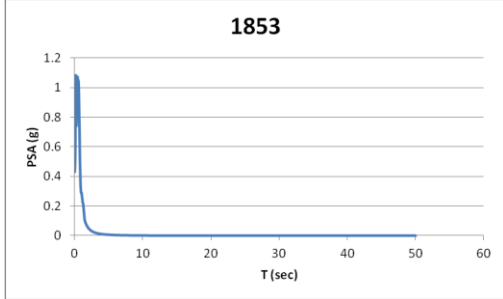
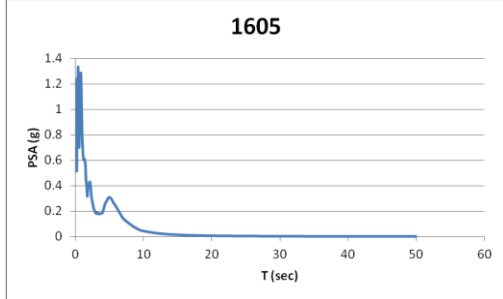
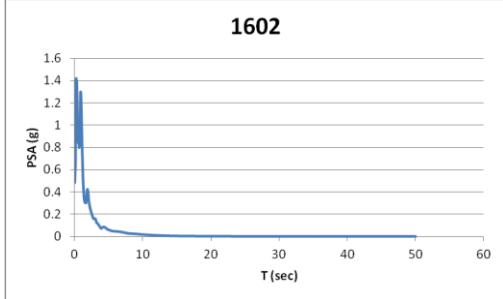
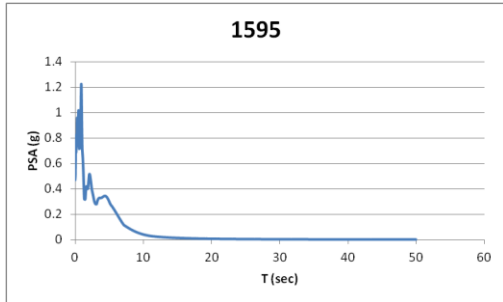
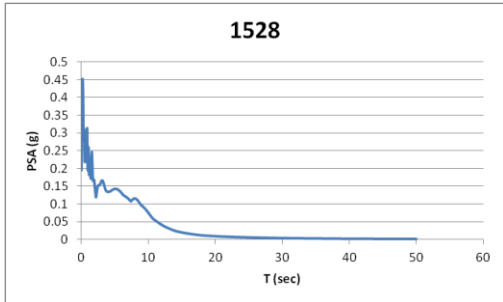


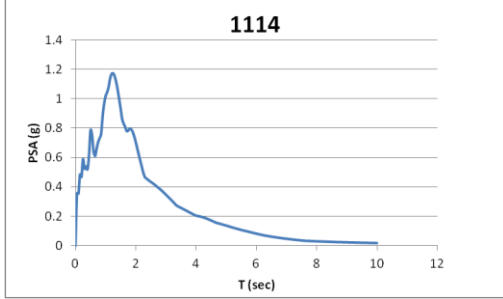
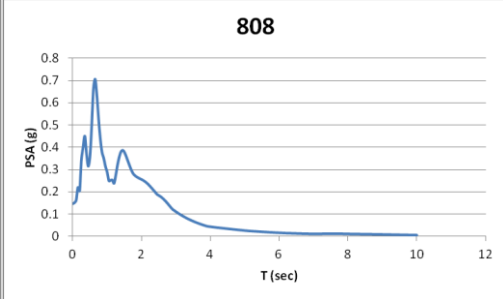
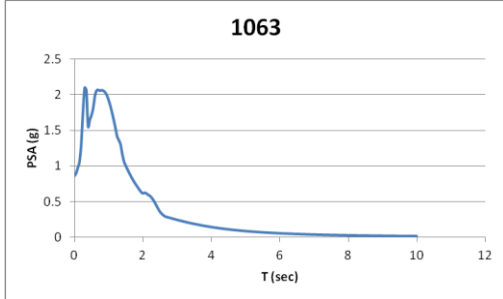
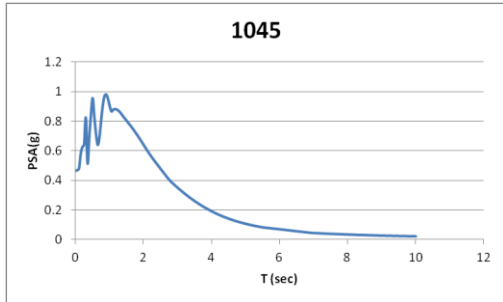
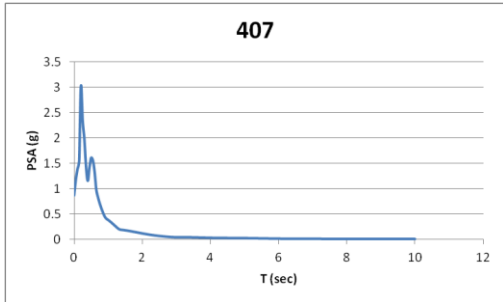




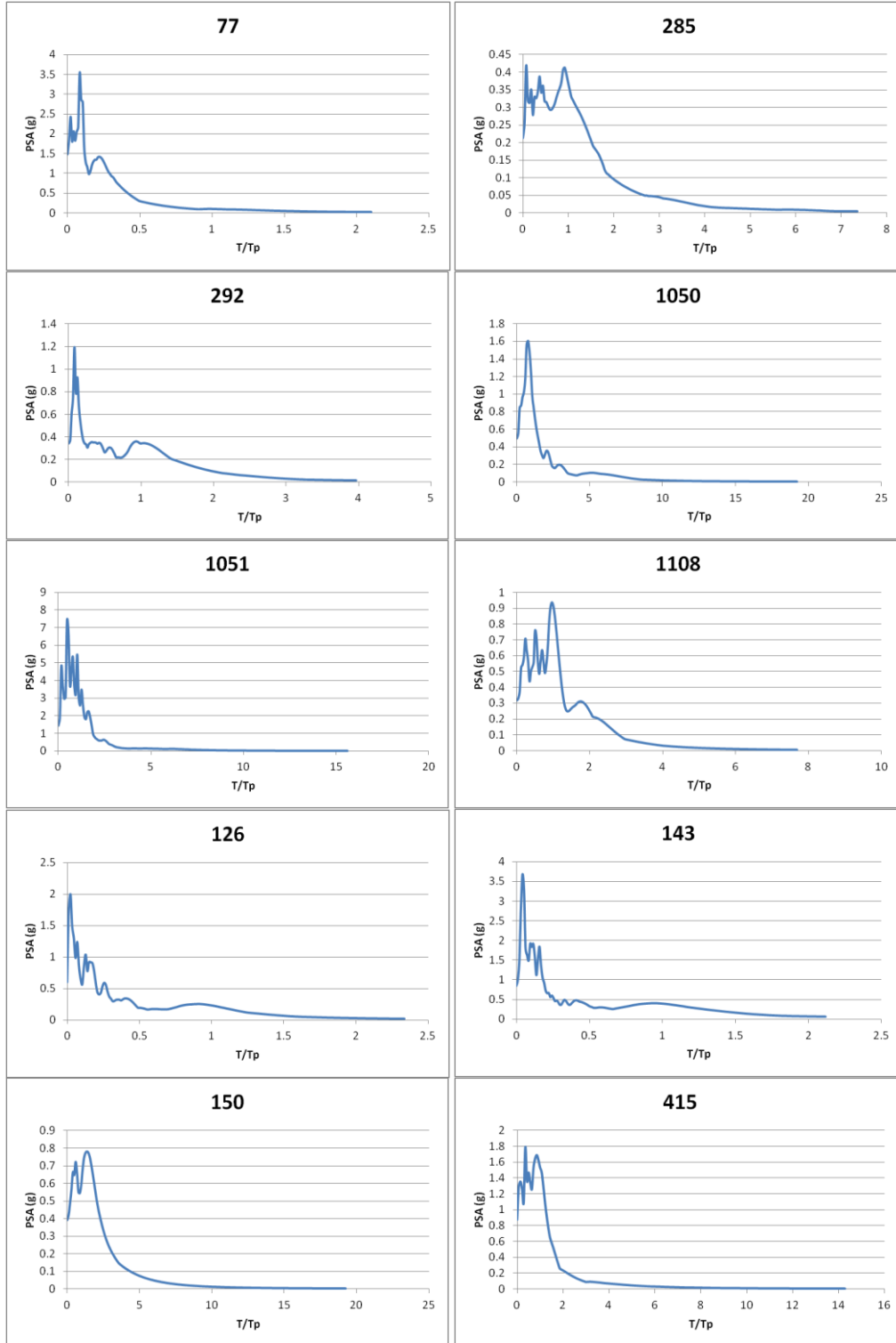


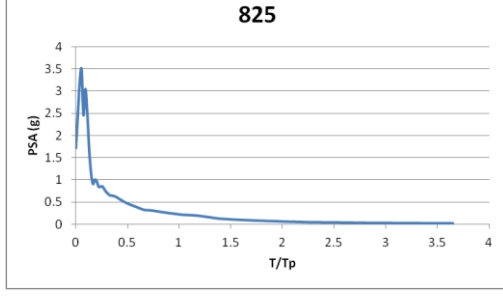
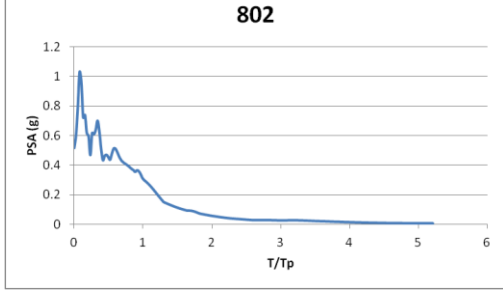
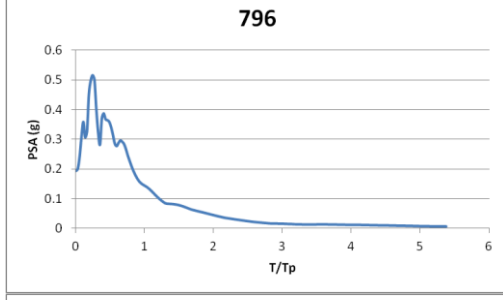
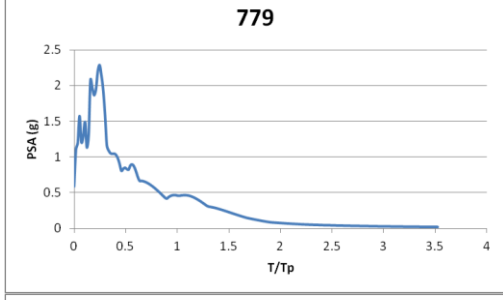
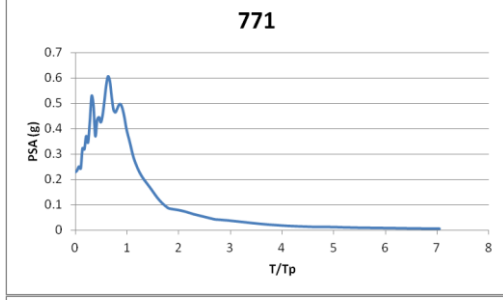
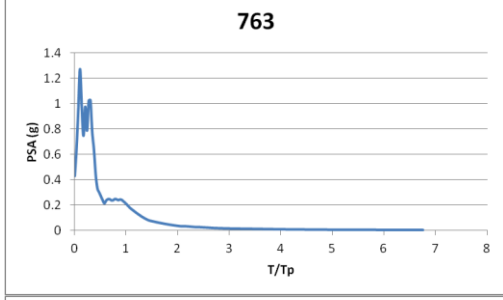
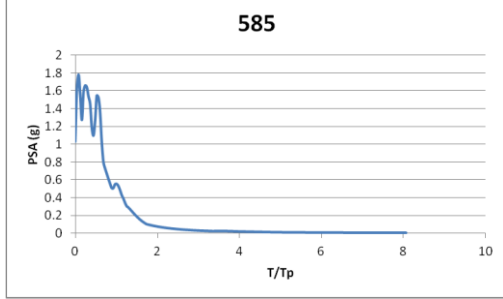
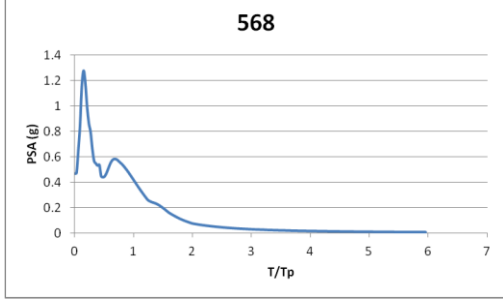
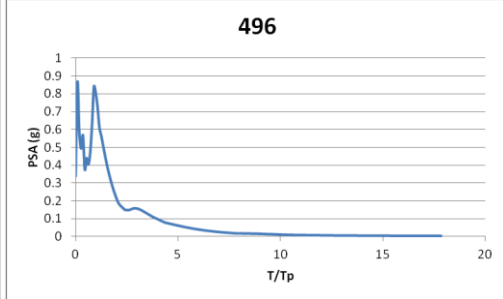
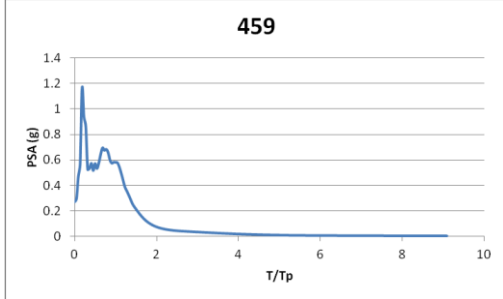
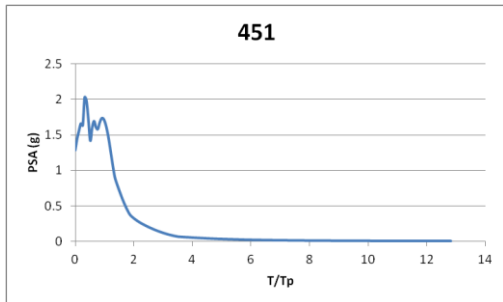
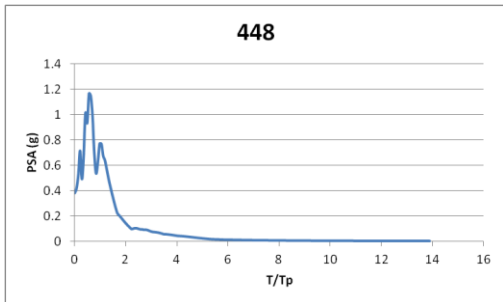


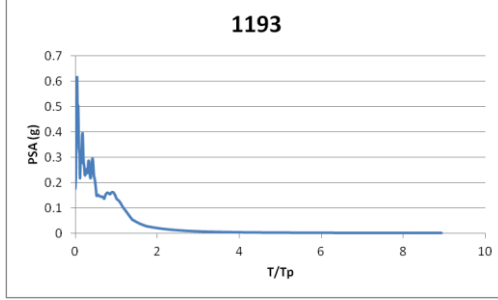
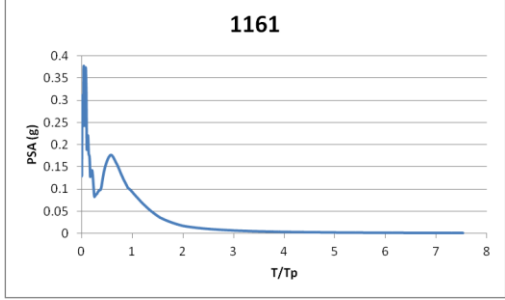
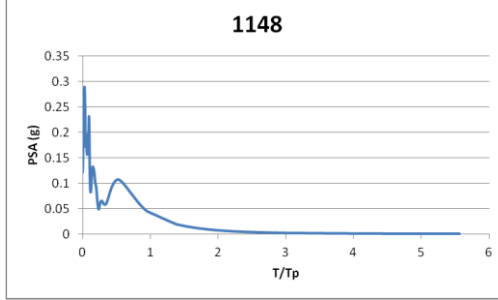
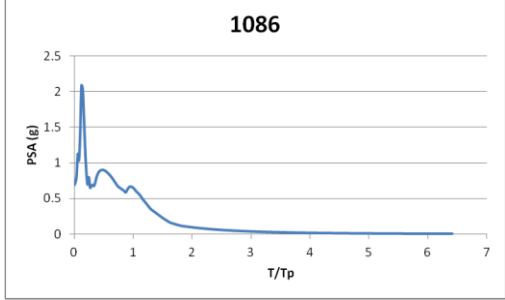
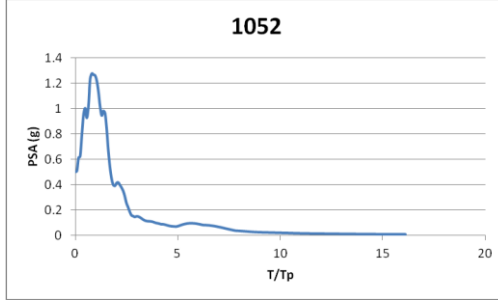
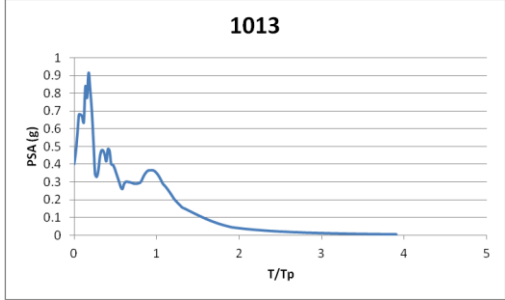
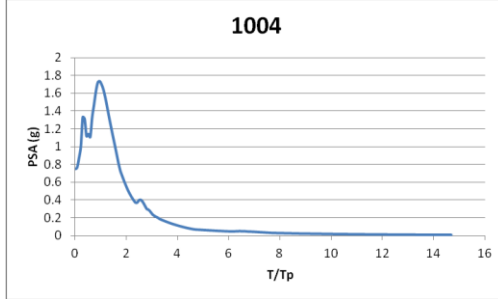
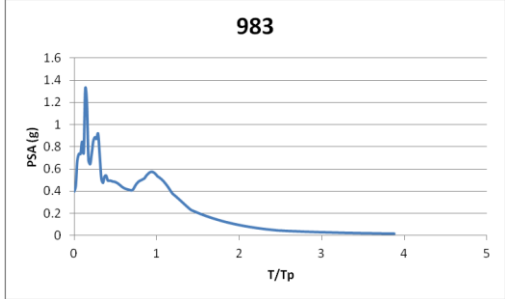
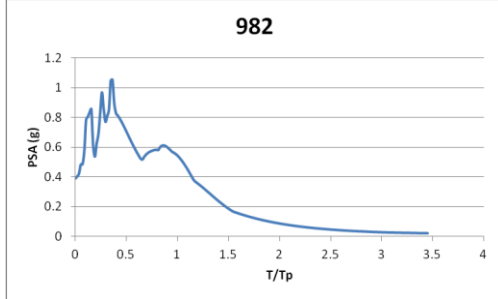
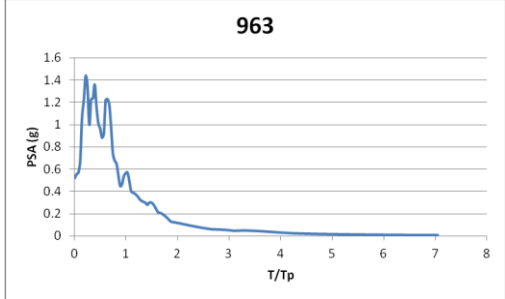
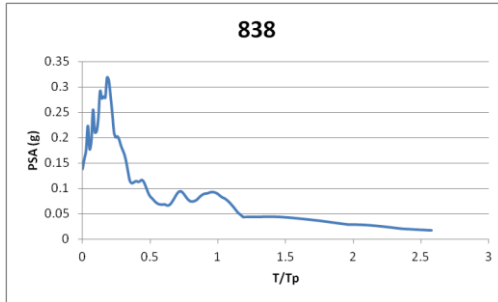
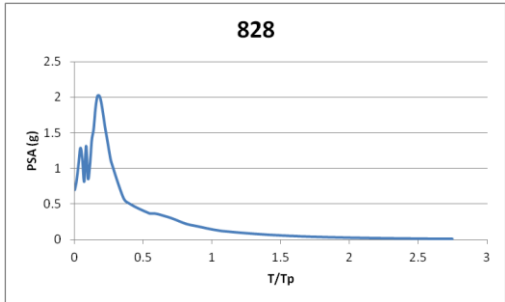


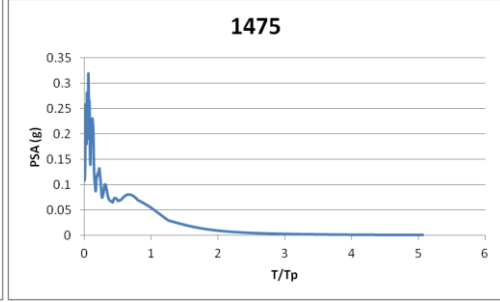
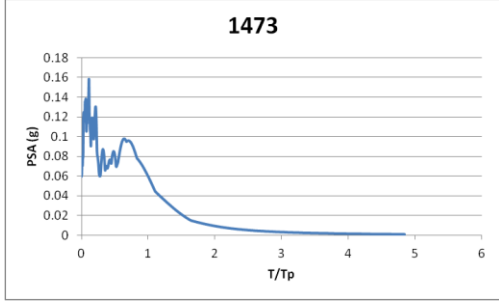
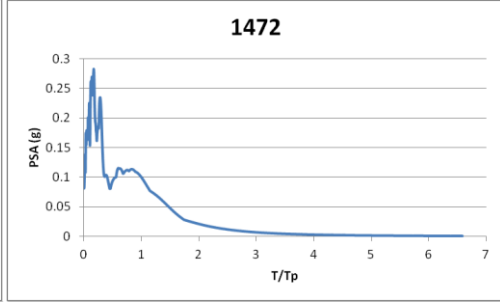
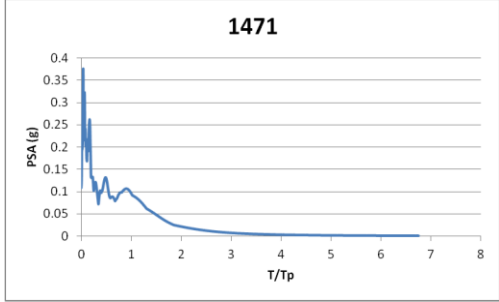
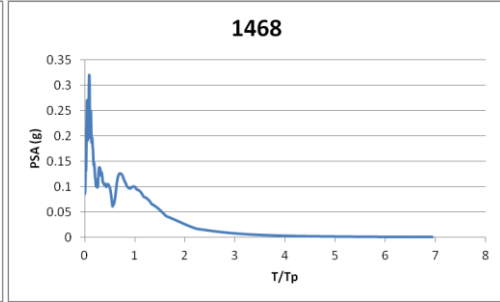
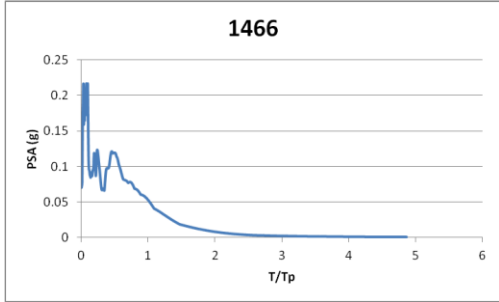
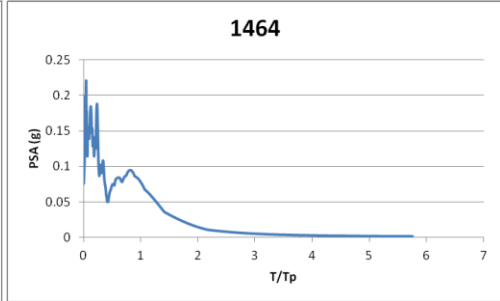
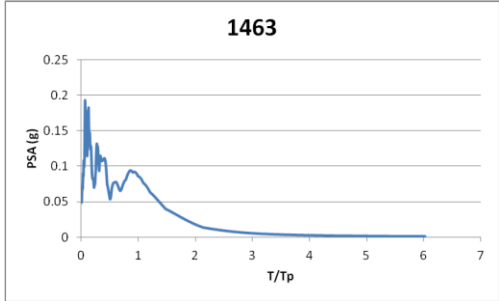
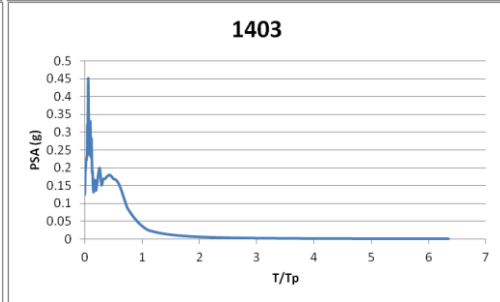
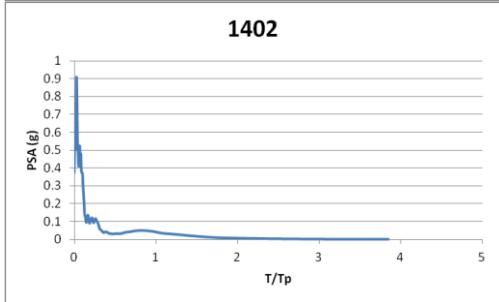
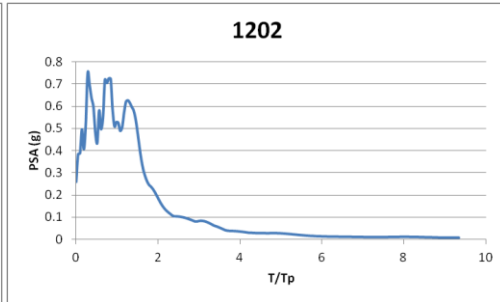
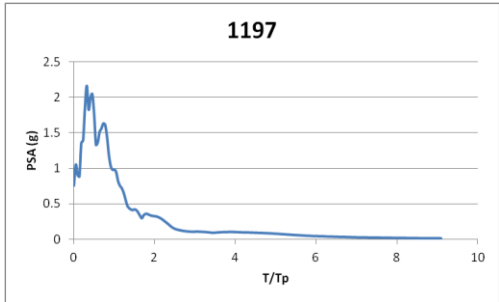


**ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΓΙΑ ΑΠΟΣΒΕΣΗ 5%  
ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΩΣ ΠΡΟΣ  $T_p$**

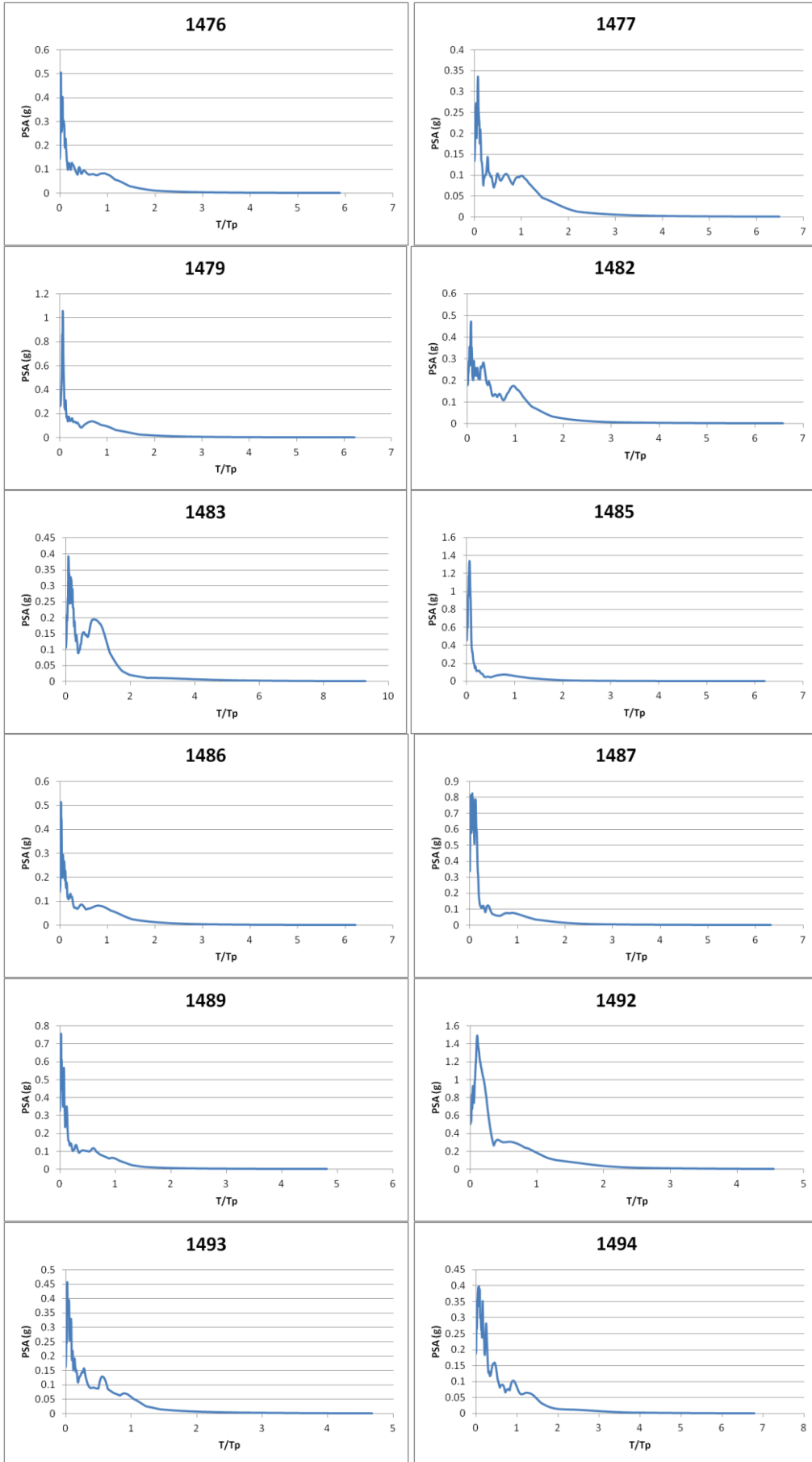


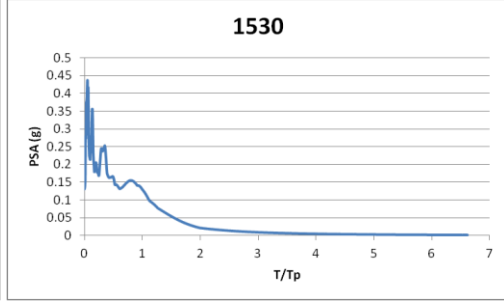
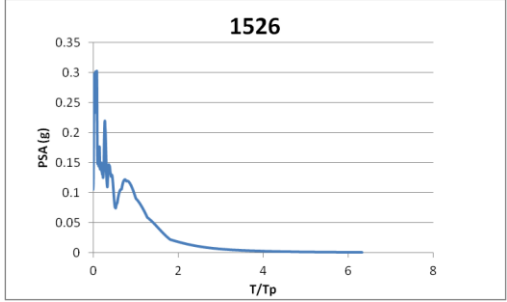
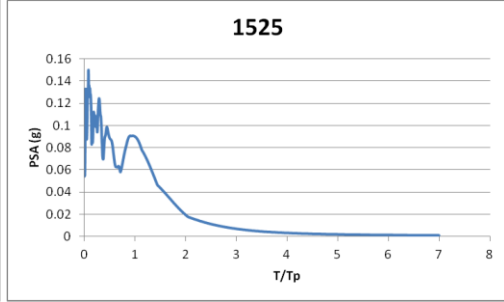
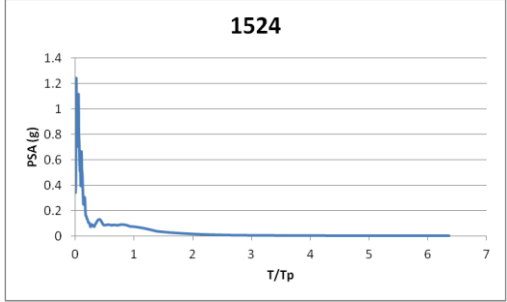
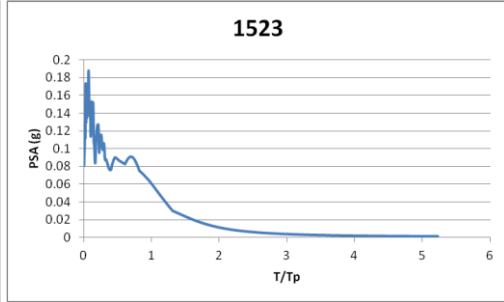
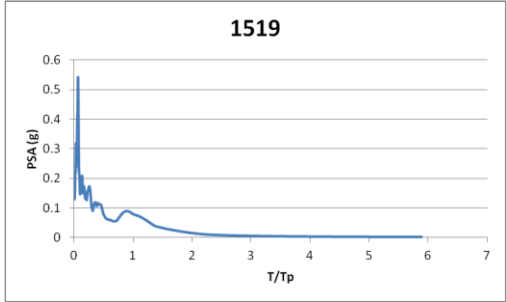
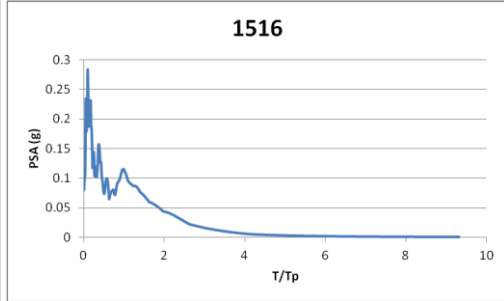
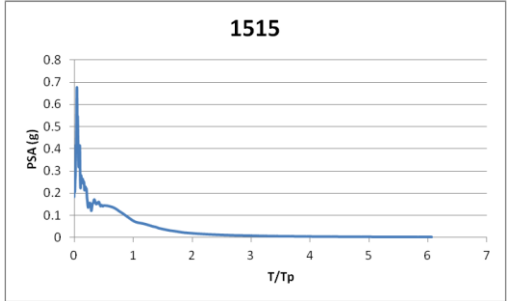
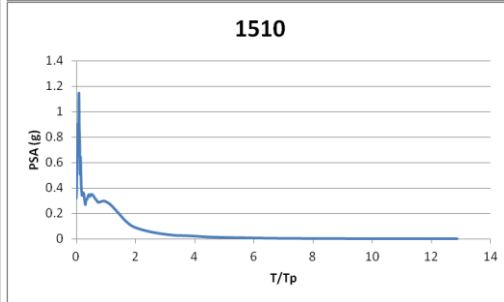
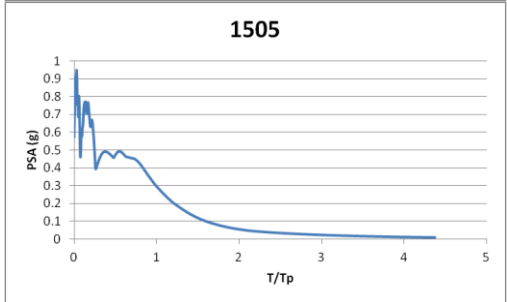
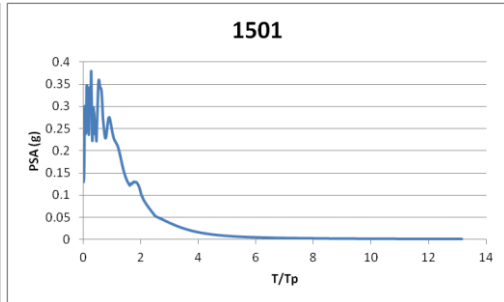
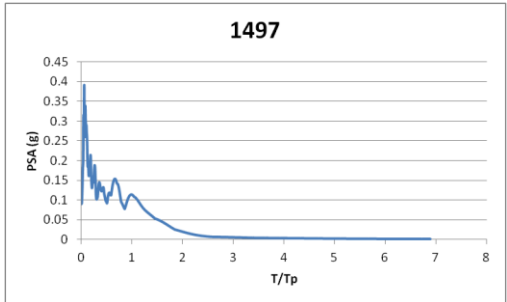


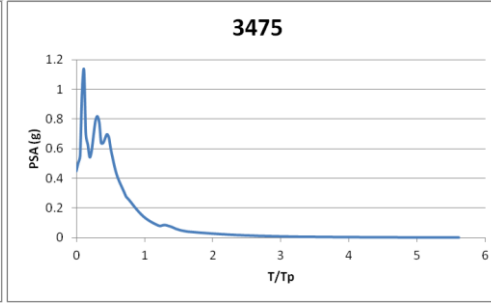
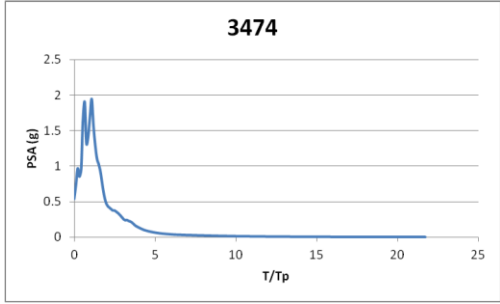
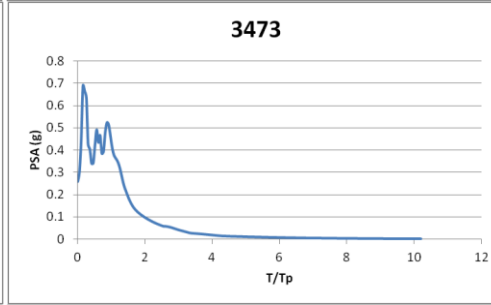
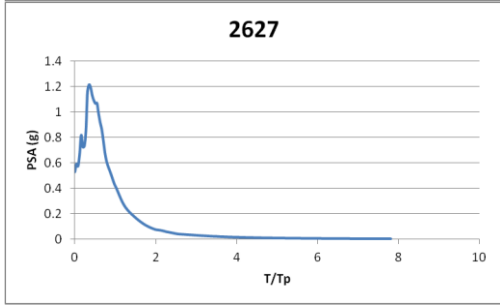
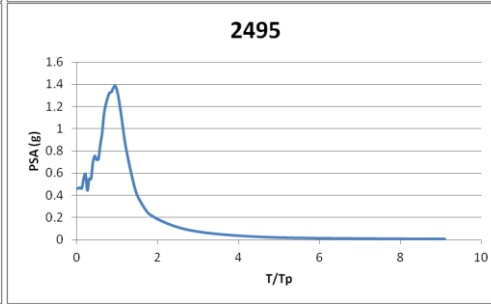
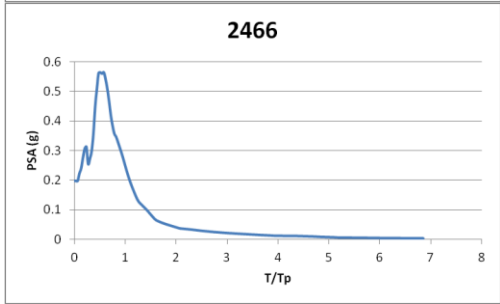
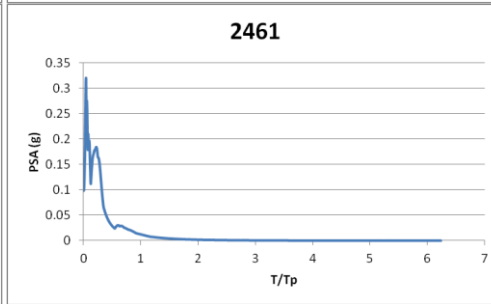
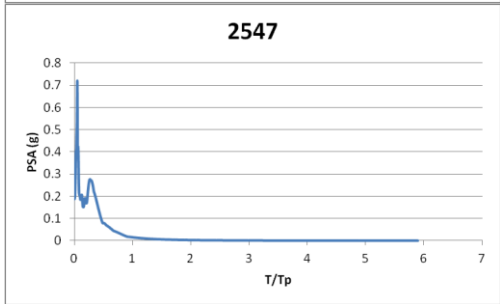
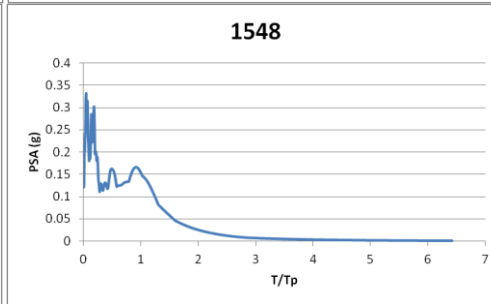
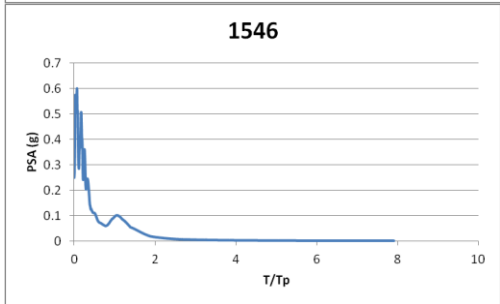
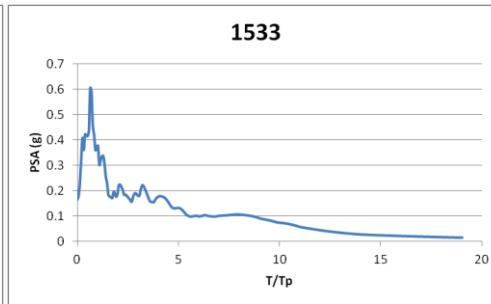
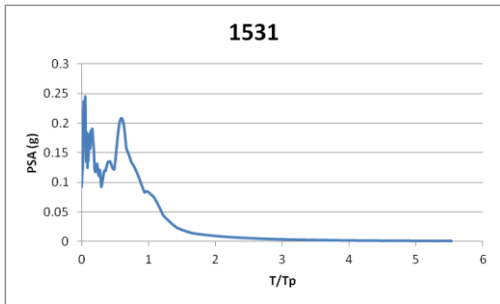


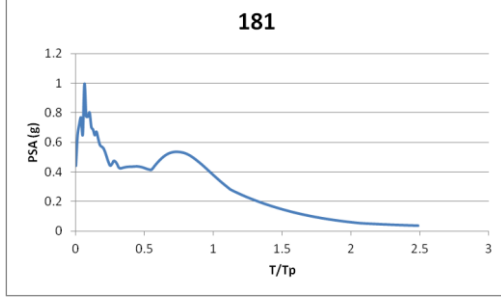
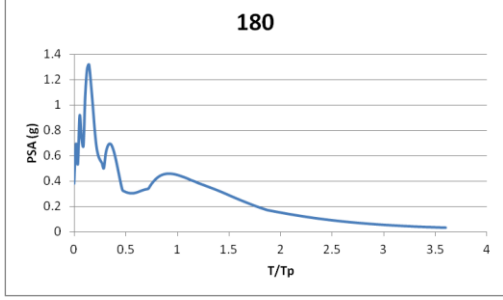
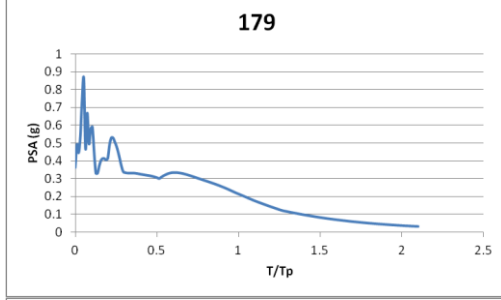
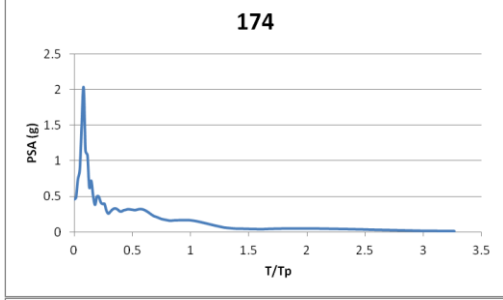
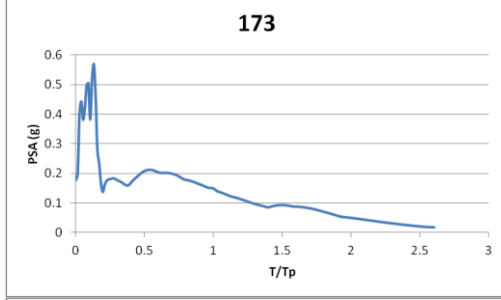
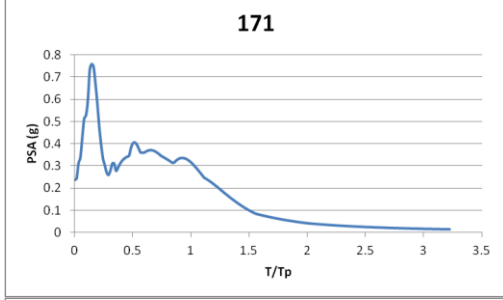
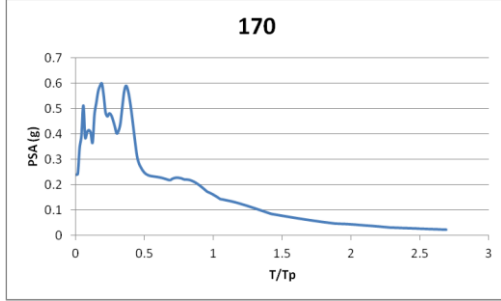
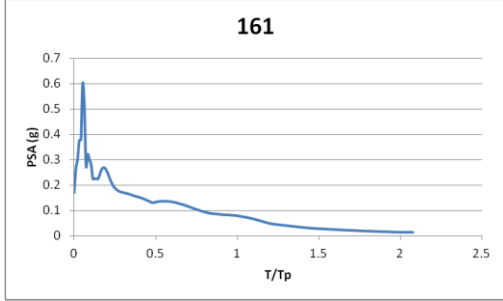
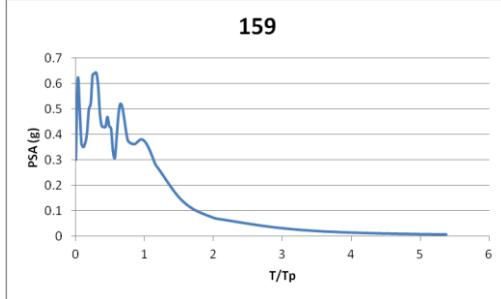
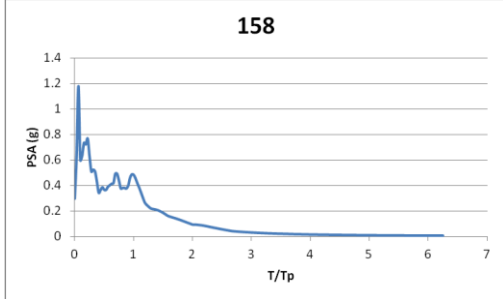
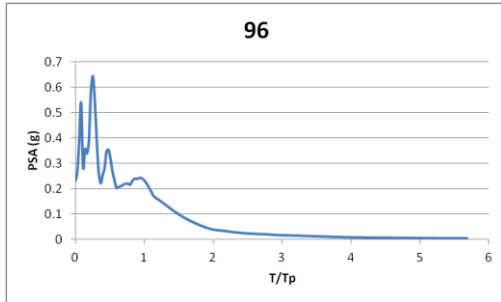
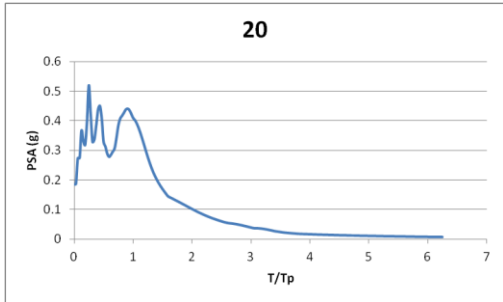


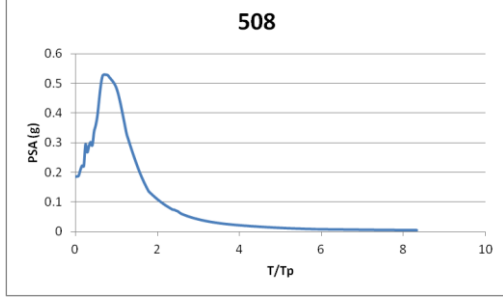
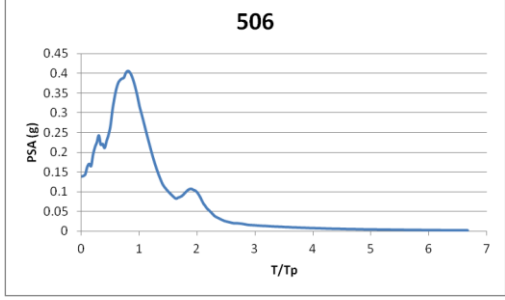
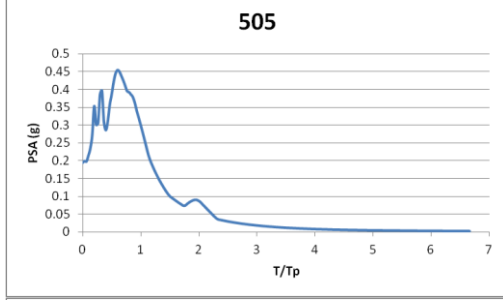
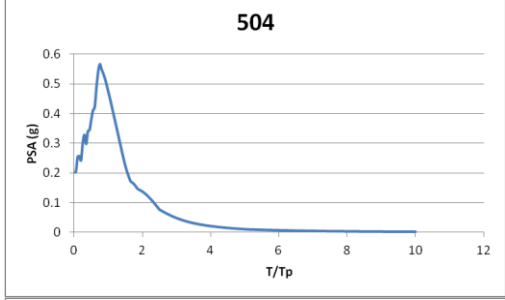
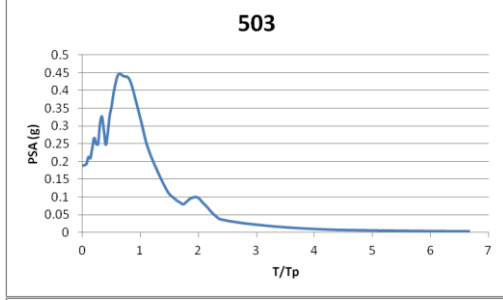
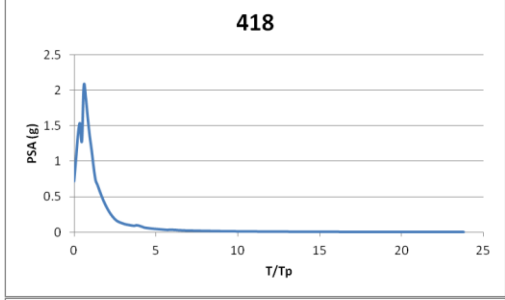
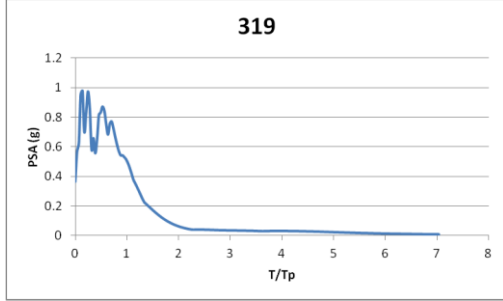
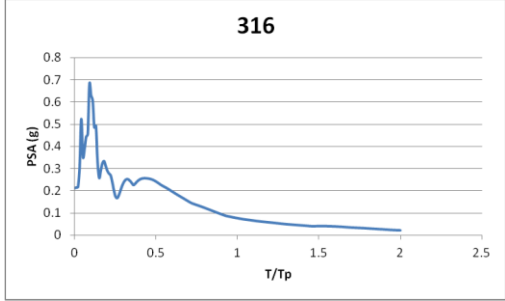
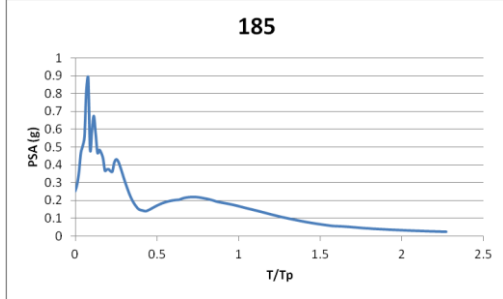
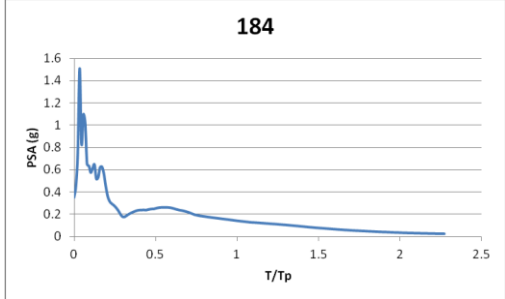
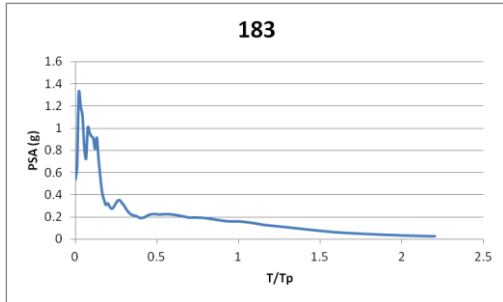
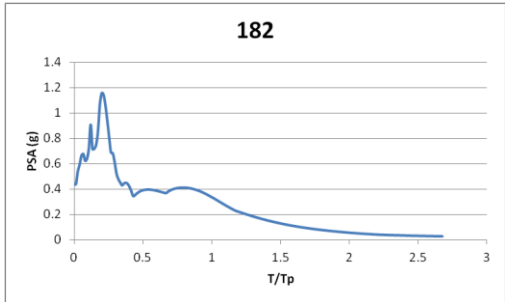


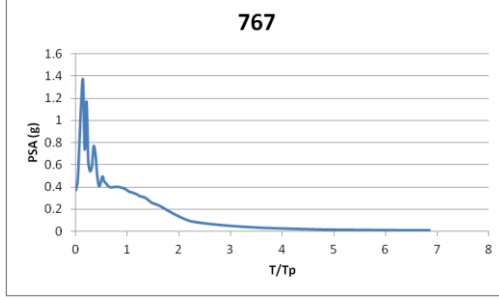
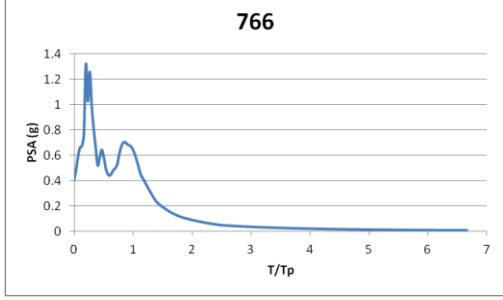
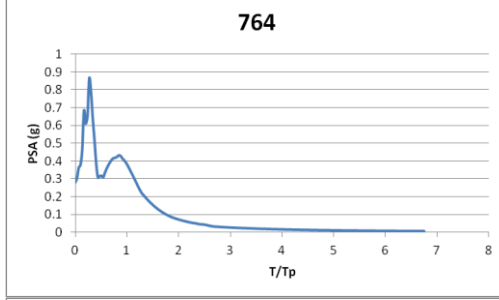
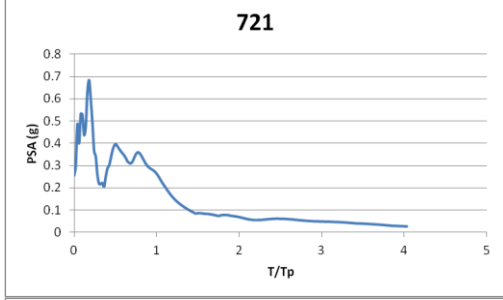
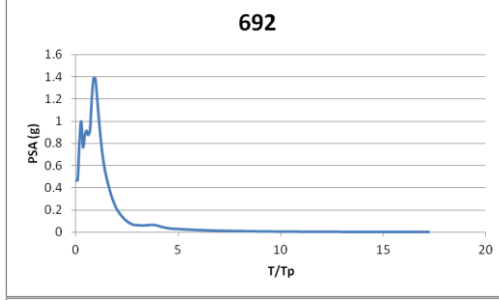
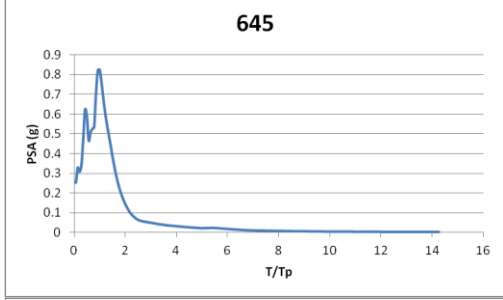
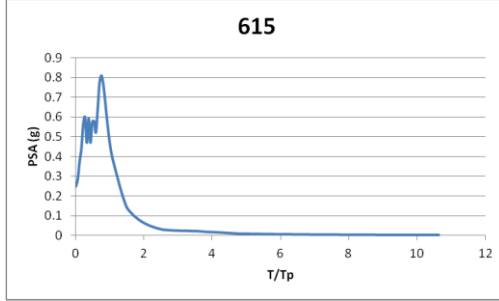
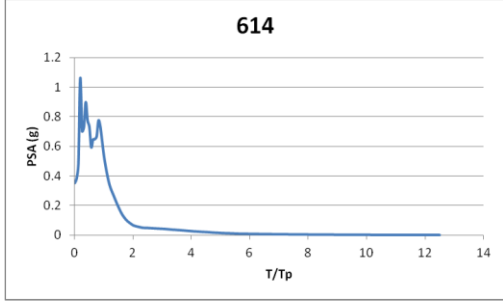
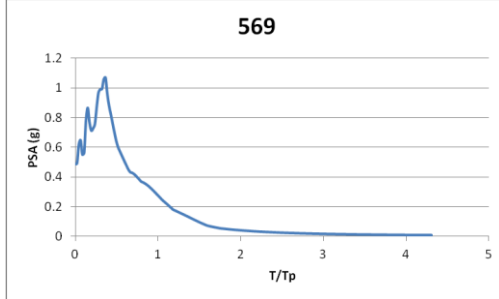
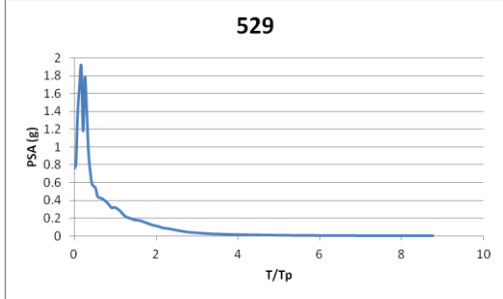
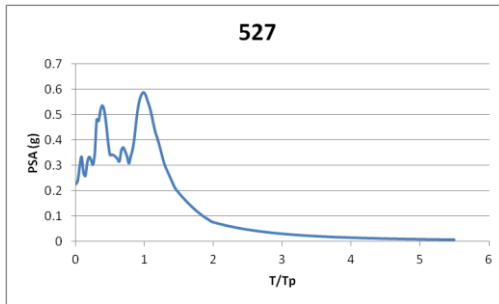
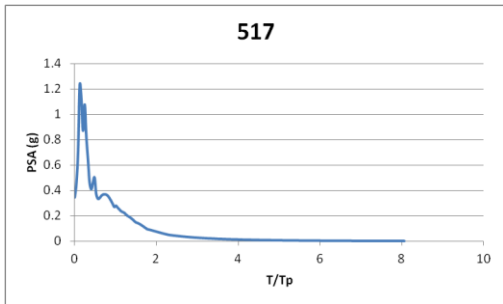


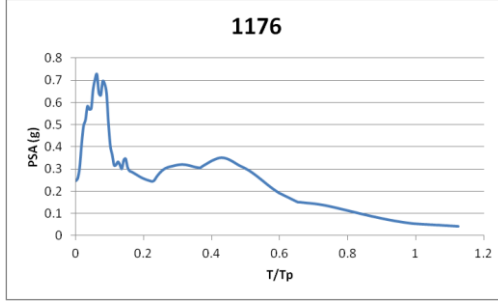
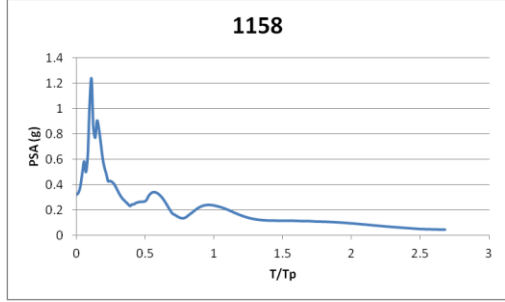
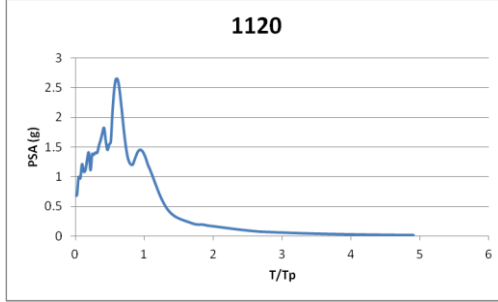
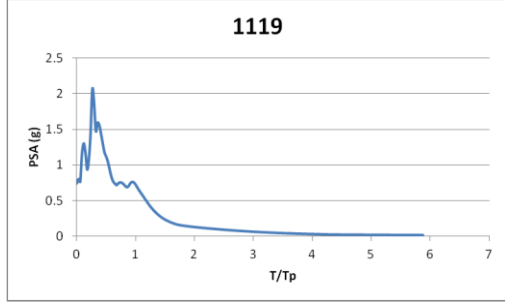
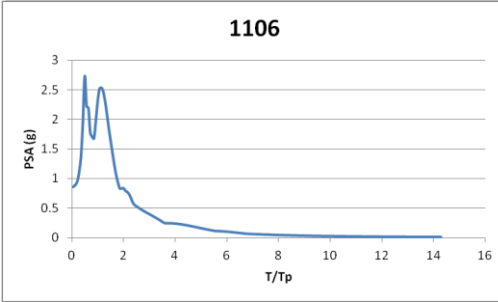
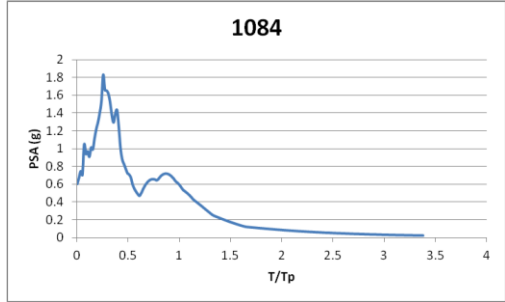
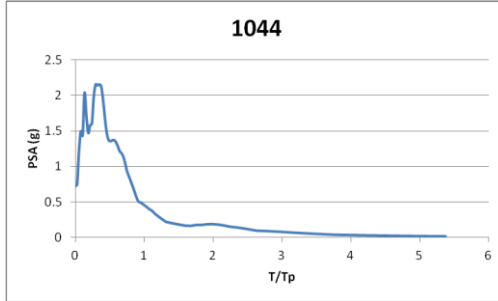
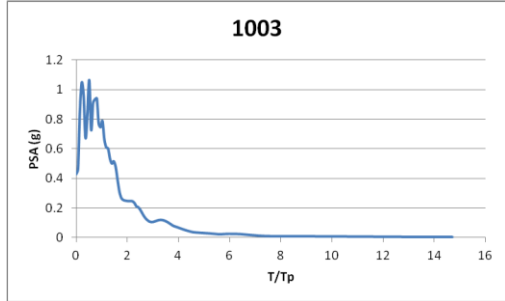
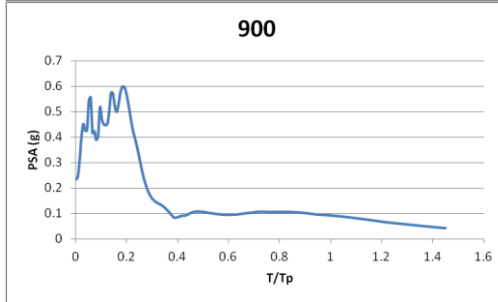
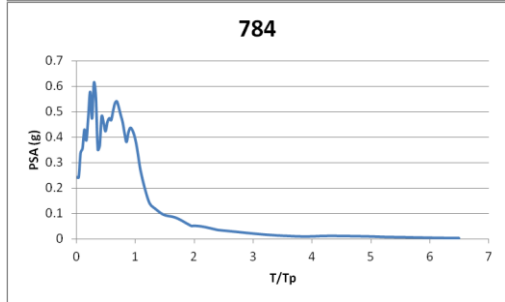
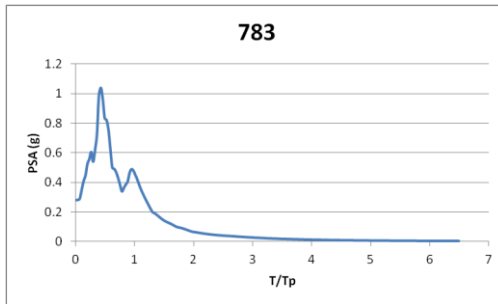
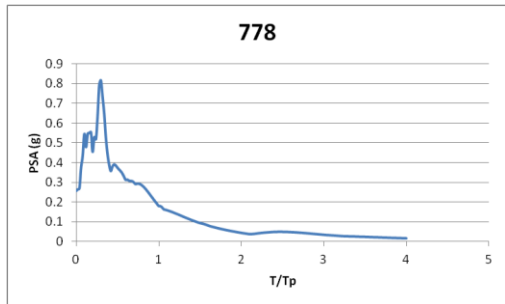


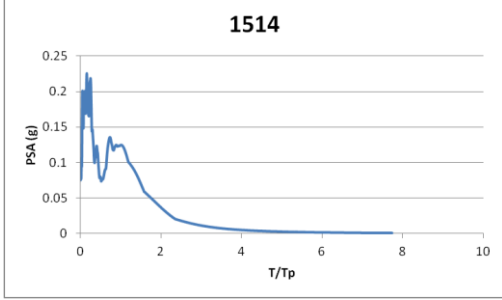
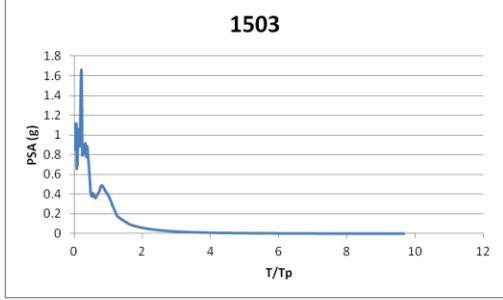
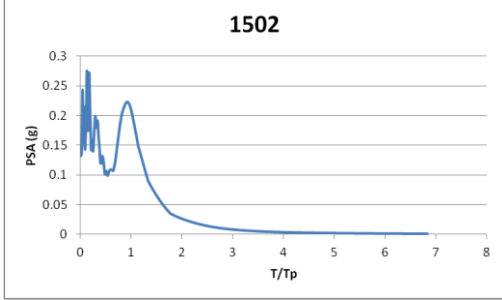
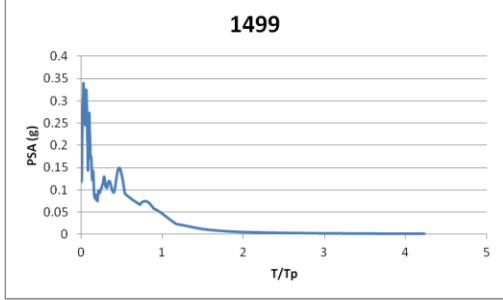
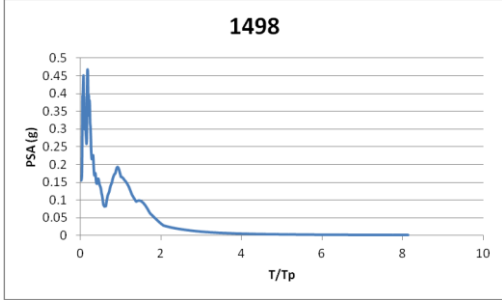
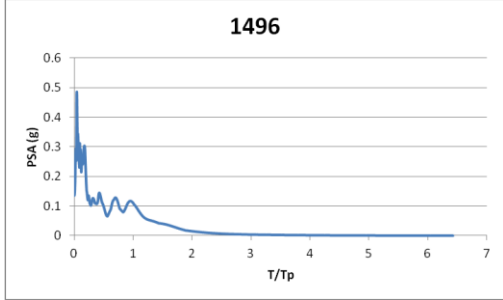
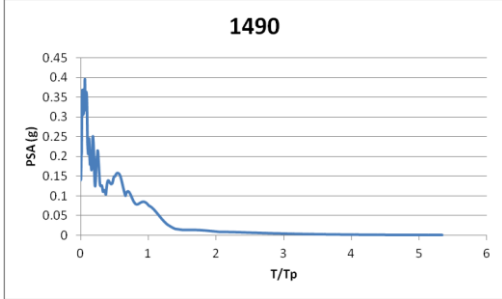
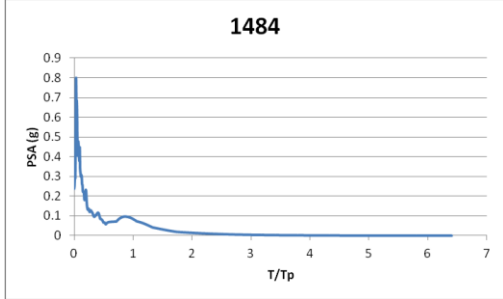
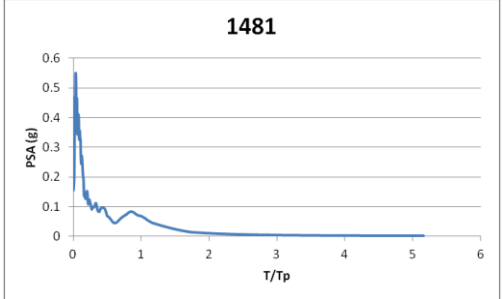
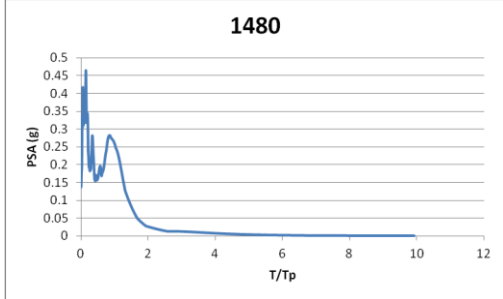
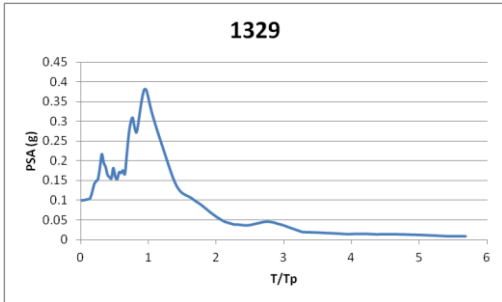
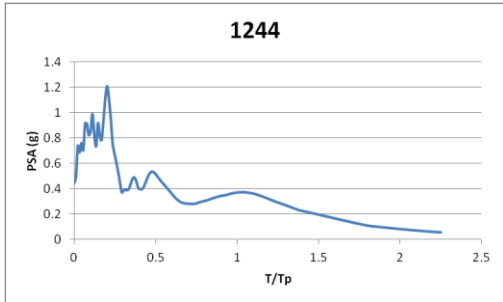




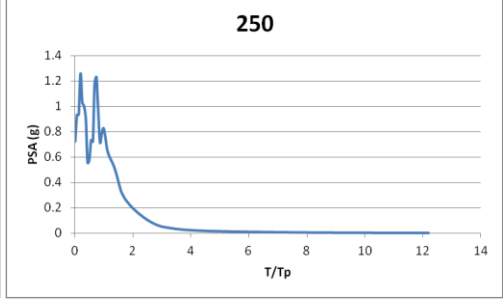
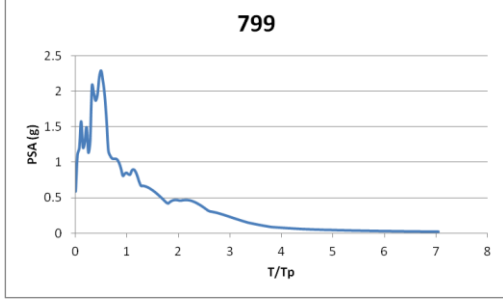
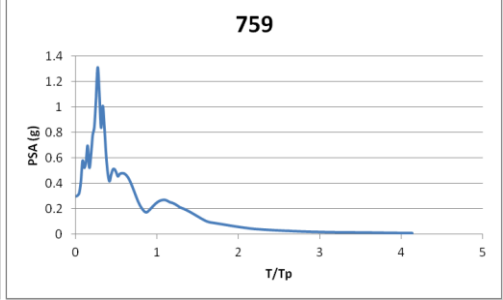
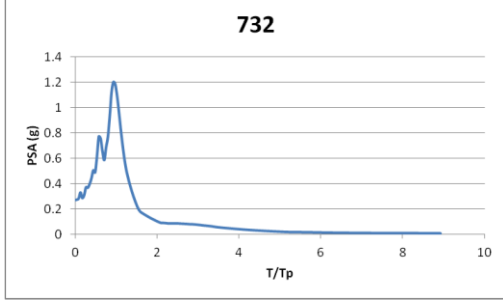
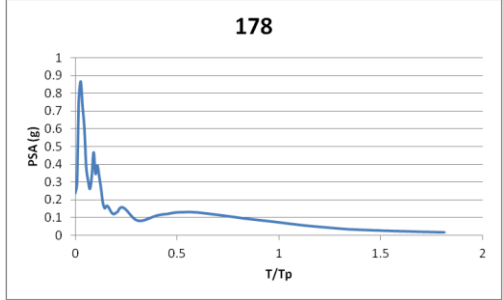
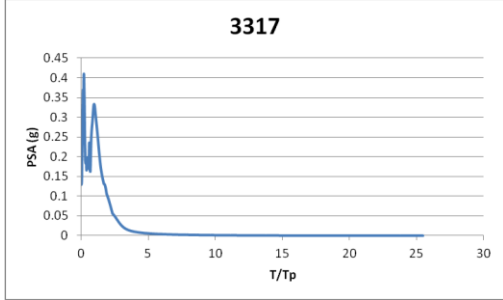
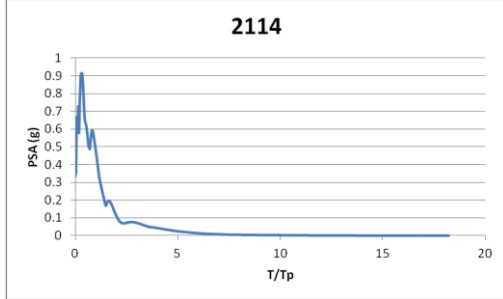
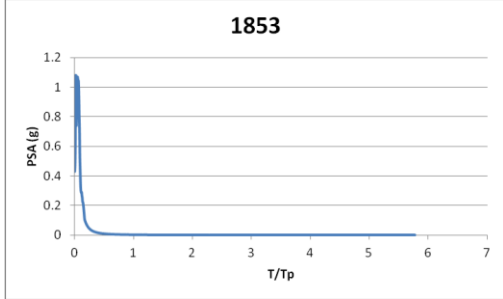
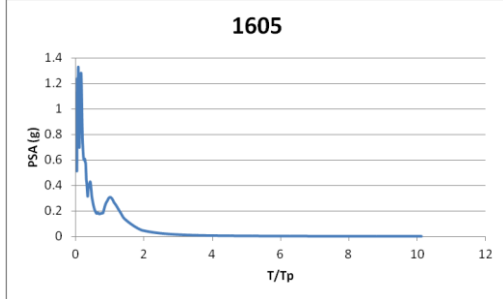
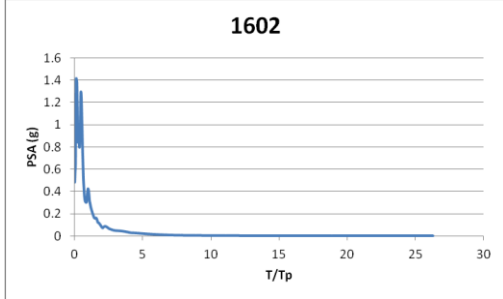
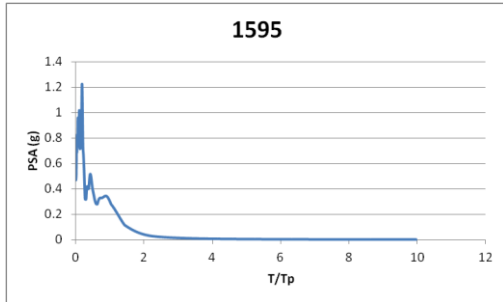
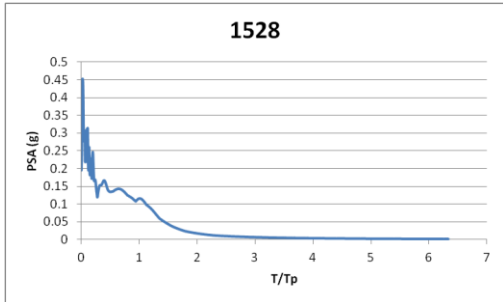


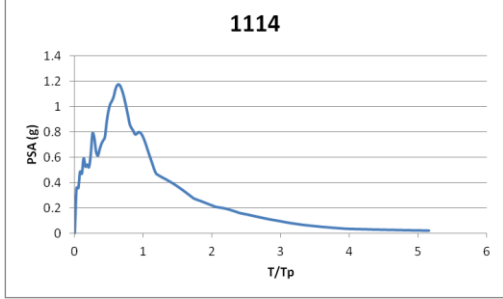
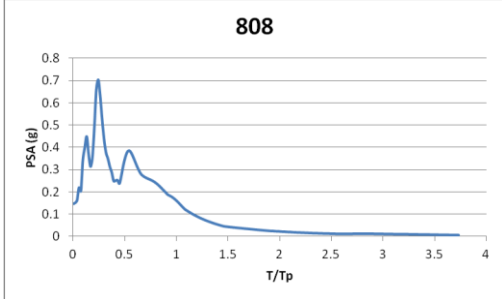
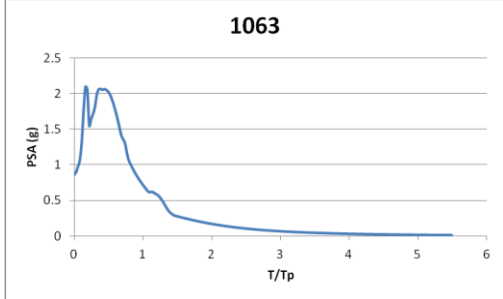
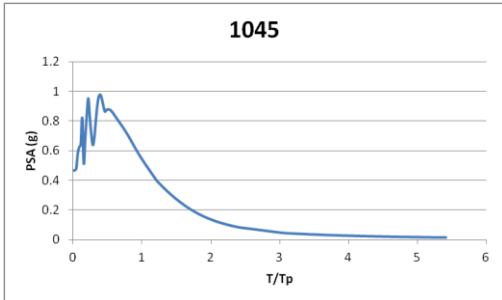
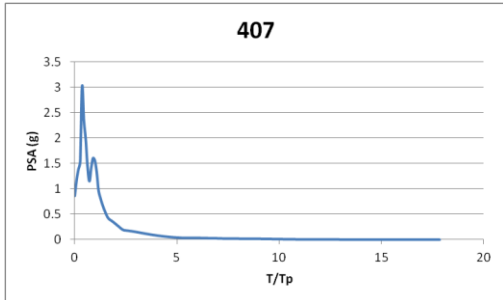


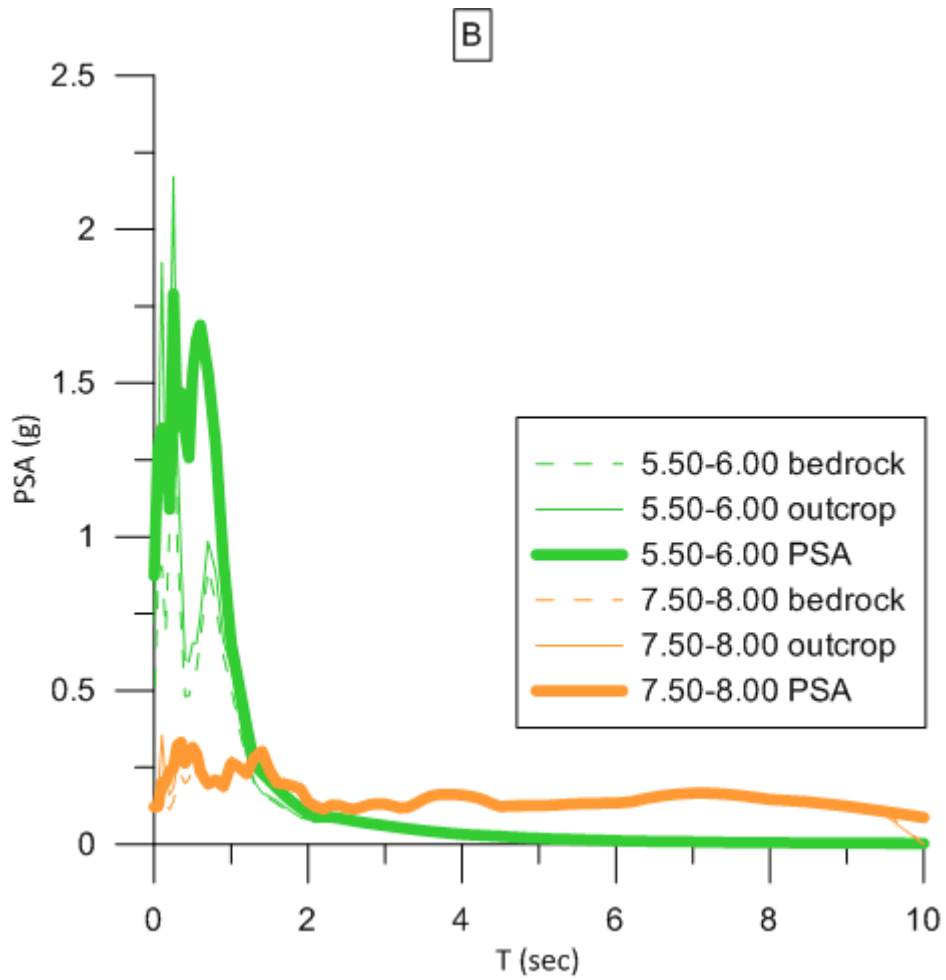






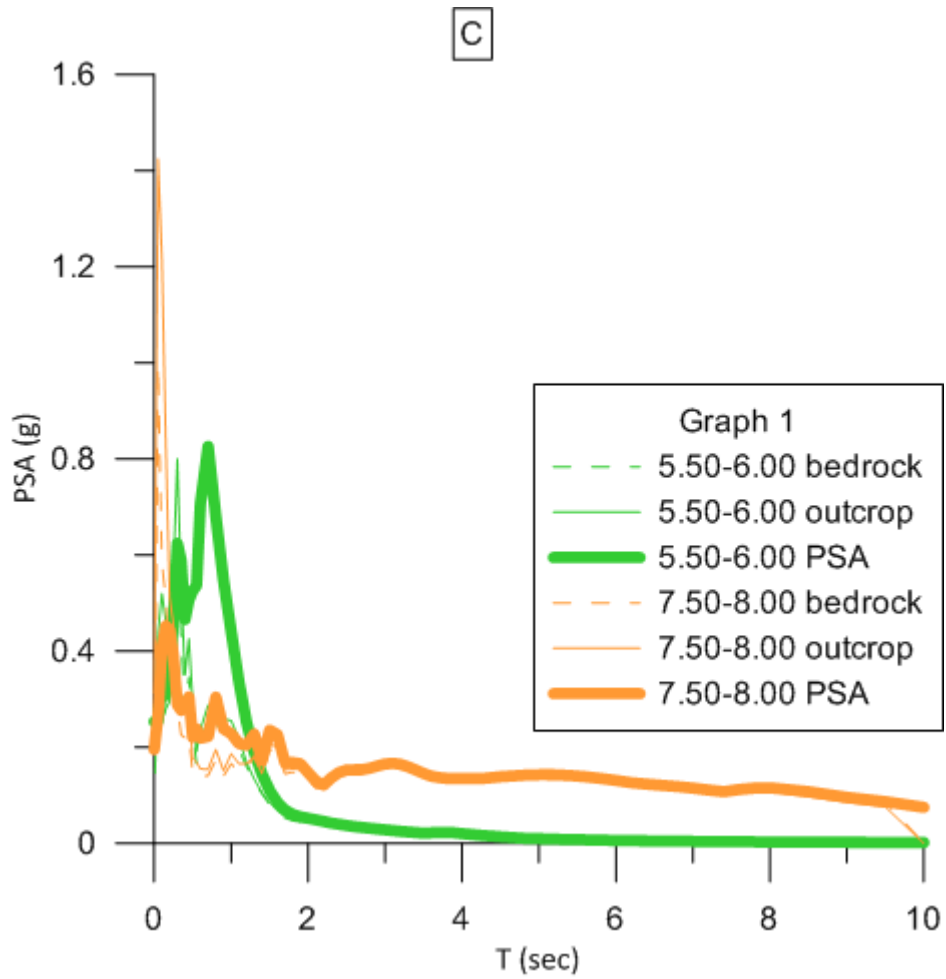






**Σχήμα Π.1:** Συγκριτική απεικόνιση των ελαστικών φασμάτων επιτάχυνσης για τις θέσεις βραχώδους υποβάθρου, ελεύθερης επιφάνειας βράχου και εδαφικής επιφάνειας, για μικρό και μεγάλο μέγεθος σεισμού στα εδάφη κατηγορίας Β





**Σχήμα Π.2:** Συγκριτική απεικόνιση των ελαστικών φασμάτων επιτάχυνσης για τις θέσεις βραχώδους υποβάθρου, ελεύθερης επιφάνειας βράχου και εδαφικής επιφάνειας, για μικρό και μεγάλο μέγεθος σεισμού στα εδάφη κατηγορίας C

