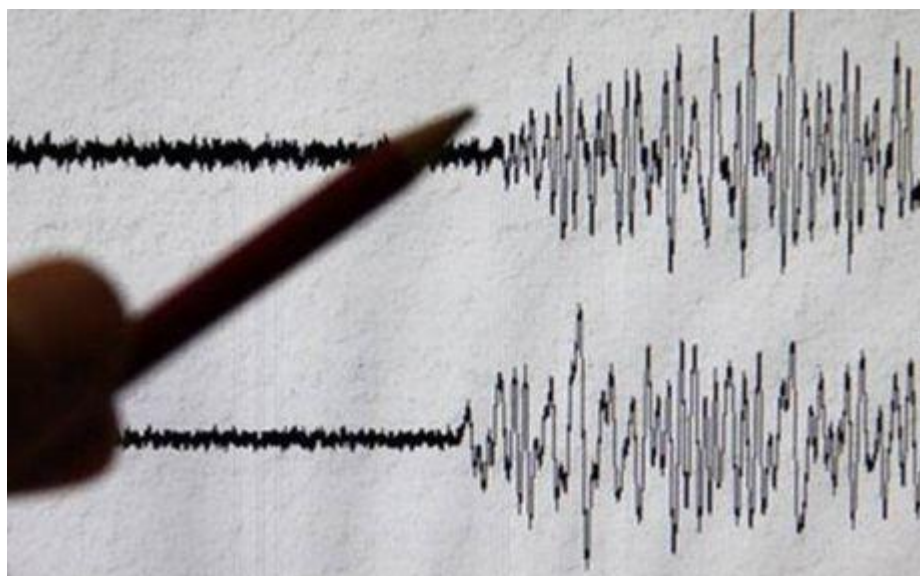




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ (NTUA)
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Διπλωματική εργασία

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΚΑΙ
ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ ΣΤΗ ΒΟΙΩΤΙΑ
SEISMIC HAZARD ASSESSMENT AND RISK IN BEOTIA
REGION



Φλίγκου Μαρία

Επιβλέπων: Κ. Σπυράκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Συνεπιβλέπων: Ι. Ταφλαμπάς, Dr. Πολιτικός Μηχανικός

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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

Στον επιβλέποντα Καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π κ.Κωνσταντίνο Σπυράκο 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 παρούσας διπλωματικής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη της καθώς και όσους βοήθησαν με οποιονδήποτε τρόπο στη διαμόρφωση της διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική αξιολογείται ο σεισμικός κίνδυνος και η διακινδύνευση στην περιοχή της Βοιωτίας.

Αρχικά, μελετήσαμε την σεισμική δράση στην περιοχή της Βοιωτίας και ειδικότερα τα ρήγματα του Καπαρελλίου, του Λεοντάρι, της Τανάγρας και του Ασωπού. Τα ρήγματα είναι κοντά σε κατοικημένες περιοχές και συνεπώς κρίθηκε σημαντικό να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της κατευθυντικότητας στην εξαγωγή των φασματικών επιταχύνσεων. Αφού υπολογίσαμε το πιθανό σεισμικό μέγεθος των ρηγμάτων αυτών, με βάση το μοντέλο των Boore & Atkinson εξήγαμε τα φάσματα επιτάχυνσης διαφόρων κοντινών περιοχών σε κάθε ρήγμα. Για τη διευκόλυνση των υπολογισμών της συνολικής μελέτης, χρησιμοποιήσαμε ενδεικτικά τρεις αποστάσεις (0, 5, 10 km) και το μέγιστο πιθανό σεισμικό μέγεθος (του ρήγματος του Ασωπού $M=6,8$). Εξήγαμε λοιπόν φάσματα επιτάχυνσης για αυτές τις αποστάσεις, για τρεις διαφορετικούς τύπους εδάφους και λαμβάνοντας ή μη την τυπική απόκλιση. Έπειτα, με βάση το μοντέλο των Shahi & Baker, ενισχύσαμε τα παραπάνω φάσματα ώστε να συμπεριληφθεί και το φαινόμενο κατευθυντικότητας που αφορά τις περιοχές κοντινού πεδίου. Όλα τα φάσματα που εξήγαμε συγκρίθηκαν με αυτά που προτείνει ο EC8 για κάθε τύπο εδάφους.

Επόμενος στόχος ήταν η δημιουργία των τεχνητών χρονοϊστοριών της επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης. Χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα Seismomatch, με το οποίο σε κάθε φάσμα των Boore & Atkinson αντιστοιχίσαμε τις χρονοϊστορίες εδαφικής κίνησης που του αναλογούν. Για τη σύνθεση των τεχνητών χρονοϊστοριών, στις οποίες συμπεριλαμβάνεται ο παλμός κατευθυντικότητας, χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο των Mavroeidis & Papageorgiou. Με βάση το πρόγραμμα Seismosignal, εντάξαμε τον παλμό κατευθυντικότητας που προέκυψε από το μοντέλο στις χρονοϊστορίες που είχαμε βρεί από το Seismomatch.

Τέλος, διερευνήσαμε τη σεισμική διακινδύνευση των συνήθων κατασκευών στην περιοχή της Βοιωτίας. Με βάση το μοντέλο των Glaister & Pinho, δημιουργήσαμε τις καμπύλες ικανότητας των κατασκευών και τις καμπύλες σεισμικού κινδύνου (φάσματα μετακίνησης) για την οριακή κατάσταση διαρροής (LS1) και την οριακή κατάσταση μετά τη διαρροή (LS2), για μηχανισμό αστοχίας δοκού (νεώτερες κατασκευές) και υποστυλώματος (παλαιότερες κατασκευές). Με αυτό τον τρόπο ελέγξαμε ποιες κατασκευές αντιμετωπίζουν προβλήματα σε κάθε στάθμη επιτελεστικότητας.

ABSTRACT

In the present thesis, we assess the seismic hazard in Beotia region.

First of all, we studied the earthquakes in Boetia and specifically the faults of Kaparelli, Leontari, Tanagra and Asopos. These faults are located near urban areas and therefore it was important to consider the effects of forward directivity in the acceleration spectra. After calculating the moment magnitude of these faults, the model of Boore & Atkinson was used in order to find the acceleration spectra of nearby areas. Due to complexity of future calculations, we used three potential distances (0, 5, 10 km) and the biggest moment magnitude (that of Asopos' fault $M=6,8$). Thus, the acceleration spectra for these distances, for three types of soil and with or without considering the standard deviation were found. Afterwards, based on Shahi & Baker model, we included the effects of forward directivity on the spectra mentioned above. All the acceleration spectra were compared to those recommended by EC8.

In the next step, we created the synthetic time histories of acceleration, velocity and displacement. Through Seismomatch, we corresponded the ground motion time histories to each spectrum. In order to create the time histories that include the effect of forward directivity, we used the Mavroeidis & Papageorgiou equations. Through Seismosignal, we integrated the directivity pulse in the time histories that we found through Seismomatch.

Finally, we assessed the seismic risk of typical buildings in Beotia. Based on Glaister & Pinho's model, we created the buildings' capacity curves and the earthquake's demand curves (displacement spectra) for yield and post-yield limit states. This procedure was done for both column-sway (older buildings) and beam-sway (current buildings) mechanisms. Consequently, we tested which constructions may face problems at each limit state.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1: ΟΙ ΣΕΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΤΑ ΡΗΓΜΑΤΑ ΒΟΙΩΤΙΑΣ

1.1 Εισαγωγή	15
1.2 Ιστορική αναδρομή	15
1.3 Τα ρήγματα της Βοιωτίας	16

Κεφάλαιο 2: Η ΕΛΑΦΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

2.1 Εισαγωγή	21
2.2 Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας	21
2.3 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου	25
2.4 Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα (PGV)	27
2.5 Περίοδος παλμού	30

Κεφάλαιο 3: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ BOORE & ATKINSON

3.1 Εισαγωγή	37
3.2 Οι εξισώσεις των Boore & Aktinson	37
3.3 Συναρτήσεις απόστασης και μεγέθους	38
3.4 Συνάρτηση περιοχής	39
3.5 Καθορισμός των συντελεστών	41
3.6 Εφαρμογή του μοντέλου Boore & Atkinson στην περιοχή της Βοιωτίας	47
3.7 Σύγκριση με το φάσμα επιτάχυνσης του EC8	52

Κεφάλαιο 4: ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ- ΜΟΝΤΕΛΟ SHAHI & BAKER

4.1 Εισαγωγή	61
4.2 Το μοντέλο προσομοίωσης των Shahi & Baker για το κοντινό πεδίο	62
4.2.1 Αναγνώριση της ύπαρξης παλμικής κίνησης	62
4.2.2 Ανάπτυξη μοντέλων για την τροποποίηση της πιθανοτικής ανάλυσης σεισμικού κινδύνου	65
4.2.3 Περίοδος παλμού	72
4.2.4 Επαύξηση της φασματικής επιτάχυνσης λόγω του παλμού κατευθυντικότητας	73
4.3 Εφαρμογή του μοντέλου Shahi & Baker	77
4.4 Σύγκριση με το φάσμα επιτάχυνσης του EC8	82

Κεφάλαιο 5: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

5.1 Εισαγωγή	89
5.2 Αποτελέσματα	89

Κεφάλαιο 6: ΜΟΝΤΕΛΟ MAVROEIDIS & PAPAGEORGIOU-ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΕΣ ΣΤΟ ΚΟΝΤΙΝΟ ΠΕΔΙΟ

6.1 Εισαγωγή	95
6.2 Το μοντέλο των Mavroeidis & Papageorgiou	95
6.3 Η σχέση της περιόδου του παλμού με το σεισμικό μέγεθος	102
6.4 Εφαρμογή του μοντέλου των Mavroeidis & Papageorgiou για τη δημιουργία χρονοϊστοριών.	103

Κεφάλαιο 7: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ- MONTELO GLAISTER & PINHO

7.1 Εισαγωγή	109
7.2 Παρουσίαση του μοντέλου Glaister & Pinho	109
7.3 Η παράμετρος του ενεργού ύψους	110
7.4 Σχέσεις ύψους-καμπύλες ικανότητας μετακίνησης	112
7.4.1 Οριακή κατάσταση διαρροής	114
7.4.2 Οριακές καταστάσεις μετά τη διαρροή	116
7.4.3 Πλαστιμότητα σε κάθε οριακή κατάσταση	116
7.5 Σχέσεις ύψους-περιόδου	116
7.5.1 Οριακή κατάσταση διαρροής	116
7.5.2 Οριακές καταστάσεις μετά τη διαρροή	117
7.6 Καμπύλες ικανότητας	118
7.7 Φάσματα απόκρισης-Καμπύλες ζήτησης	120
7.8 Εφαρμογή του μοντέλου των Glaister & Pinho	121

Κεφάλαιο 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αναφορές

Παράρτημα

Κεφάλαιο 1

ΟΙ ΣΕΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΤΑ ΡΗΓΜΑΤΑ ΤΗΣ ΒΟΙΩΤΙΑΣ

1.2 Εισαγωγή

1.2 Ιστορική αναδρομή

1.3 Τα ρήγματα της Βοιωτίας

1.1 Εισαγωγή

Ο νομός Βοιωτίας είναι νομός της Στερεάς Ελλάδας με έκταση 3,211 τ.χλμ και πρωτεύουσα τη Λιβαδειά. Η Βοιωτία και ειδικότερα η ευρύτερη περιοχή της Θήβας είναι μια σεισμογενής περιοχή. Ξεκινώντας από την αρχαιότητα μέχρι και τη σημερινή εποχή ο νομός έχει υποστεί έντονες σεισμικές δονήσεις με καταστροφικές ζημιές.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Ο Θουκυδίδης πρώτος αναφέρει πολλούς σεισμούς το 427 π.Χ. στην περιοχή του Ορχομενού με μέγεθος $M=(6.0)$. Οι επόμενες σεισμικές καταγραφές σημειώθηκαν αιώνες αργότερα, το 551 και το 1321, στη Χαιρώνεια με μεγεθος $M=(6.8)$ και στη Θήβα με $M=(6.3)$ αντίστοιχα. Ο αριθμός όμως των καταγραφών αυξάνεται δραματικά τον 19ο και 20ο αιώνα με ισχυρούς σεισμούς από το 1853 έως και το 1981.

Χαρακτηριστικά στις 18 Αυγούστου του 1853, και έχοντας προηγηθεί δύο προσεισμοί, η Θήβα επλήγει από μεγάλο σεισμό με μέγεθος $M=(6.5)$. Ο σεισμός κατέστρεψε το μεγαλύτερο μέρος των σπιτιών της πόλης με ανυπολόγιστες ζημιές καθώς επίσης σκοτώθηκαν 11 άνθρωποι και τραυματίστηκαν άλλοι 60. Σημαντικές ήταν οι ζημιές και στις γύρω περιοχές ενώ οι δονήσεις γίνονταν καθημερινά αισθητές για έξι μήνες. Τον εικοστό αιώνα ο σεισμός στη Θήβα του 1914 αποτελεί έναν από τους καταστροφικότερους σεισμούς στην Ελλάδα. Ο σεισμός, ο οποίος ήταν επιφανειακός και μέγεθος $M=(6.0)$, προκάλεσε το θάνατο ανθρώπων και μεγάλες υλικές ζημιές. Η πιο πρόσφατη σεισμική καταγραφή έγινε το Σεπτέμβριο του 2010 στο χωριό Λεύκτρα με μέγεθος $M=(4.0)$. Σύμφωνα με το Σεισμολογικό Ινστιτούτο του Πότσταμ, το επίκεντρο του σεισμού ήταν 60 χιλιόμετρα βορειοδυτικά της Αθήνας και το εστιακό βάθος υπολογίστηκε στα 10 χλμ, ενώ δεν είχαν αναφερθεί ζημιές. Ο σεισμός αυτός είναι ο μεγαλύτερος που έχει καταγραφεί τη δεκαετία του 2010.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται όλες οι σεισμικές καταγραφές στο νομό της Βοιωτίας.

<i>Χρονολογία</i>	<i>Περιοχή</i>	<i>Μέγεθος</i>
427 π.Χ	Ορχομενός	M= 6,0
551	Χαιρώνεια	M= 6,8
1321	Θήβα	M= 6,3
1853	Θήβα	M= 6,5
1870	Αράχωβα	M= 6,8
1893	Θήβα	M= 6,2
1894	Σύνορα Φθιοιώτιδας-Βοιωτίας(Μαλεσίνα)	M= 6,6
1914	Θήβα	M= 6,0
1970	Βοιωτία	M= 6,2
2010	Λεύκτρα	M= 4,0

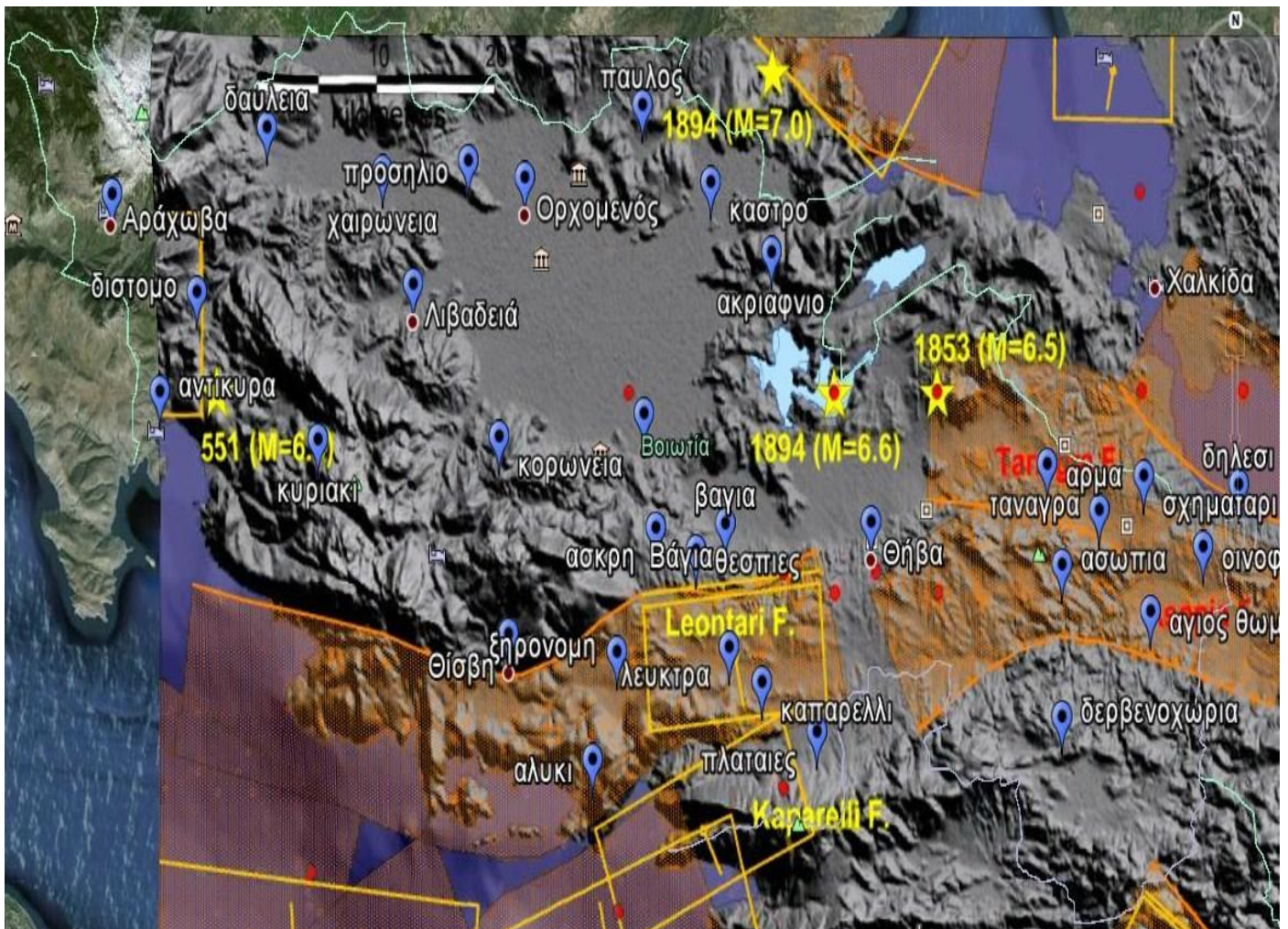
1.3 Ρήγματα στη Βοιωτία

Στη παρούσα διπλωματική θα μελετηθούν τα χαρτογραφημένα ρήγματα του Καπαρελλίου, του Λεοντάρι, της Τανάγρας και του Ασωπού. Πρόκειται για κανονικά ρήγματα κατακόρυφης διάρρηξης στα οποία ξέροντας το μήκος τους, με βάση την εμπειρική σχέση του Pavlides & Caputo, μπορούμε να υπολογίσουμε το πιθανό μέγεθος του σεισμού.

- Ρήγμα Καπαρελλίου: Μήκος ρήγματος: 17,0 km
Πιθανό μέγεθος σεισμού: 6,6
- Ρήγμα Λεοντάρι: Μήκος ρήγματος: 15,0 km
Πιθανό μέγεθος σεισμού: 6,5
- Ρήγμα Τανάγρας: Μήκος ρήγματος: 17,4 km
Πιθανό μέγεθος σεισμού: 6,5
- Ρήγμα Ασωπού: Μήκος ρήγματος: 35,8 km
Πιθανό μέγεθος σεισμού: 6,8

Σύμφωνα με τα μορφοτεκτονικά κριτήρια, τα περισσότερα χαρτογραφημένα ρήγματα θεωρούνται πολύ ενεργά, με εξαίρεση το ρήγμα της Τανάγρας το οποίο δεν εμφανίζει καθαρά γεωλογικά και γεωμορφολογικά στοιχεία που να δείχνουν πρόσφατη δραστηριότητα. Συνεπώς, το χαρακτηρίζουμε ως πιθανώς ενεργό με την έννοια ότι μπορεί να ενεργοποιηθεί ως δευτερεύον στοιχείο. Για τα υπόλοιπα, ενώ η μορφολογική ανάλυση και τα γεωλογικά δεδομένα δείχνουν έντονη και πρόσφατη

τεκτονική κίνηση, παρουσιάζουν αραιή σεισμική δράση σύμφωνα με τις ιστορικές καταγραφές. Ως πολύ ενεργό χαρακτηρίζεται το ρήγμα του Ασωπού.



Κεφάλαιο 2

Η ΕΔΑΦΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

2.1 Εισαγωγή

2.2 Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας

2.3 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου

2.4 Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα (PGV)

2.5 Περίοδος παλμού

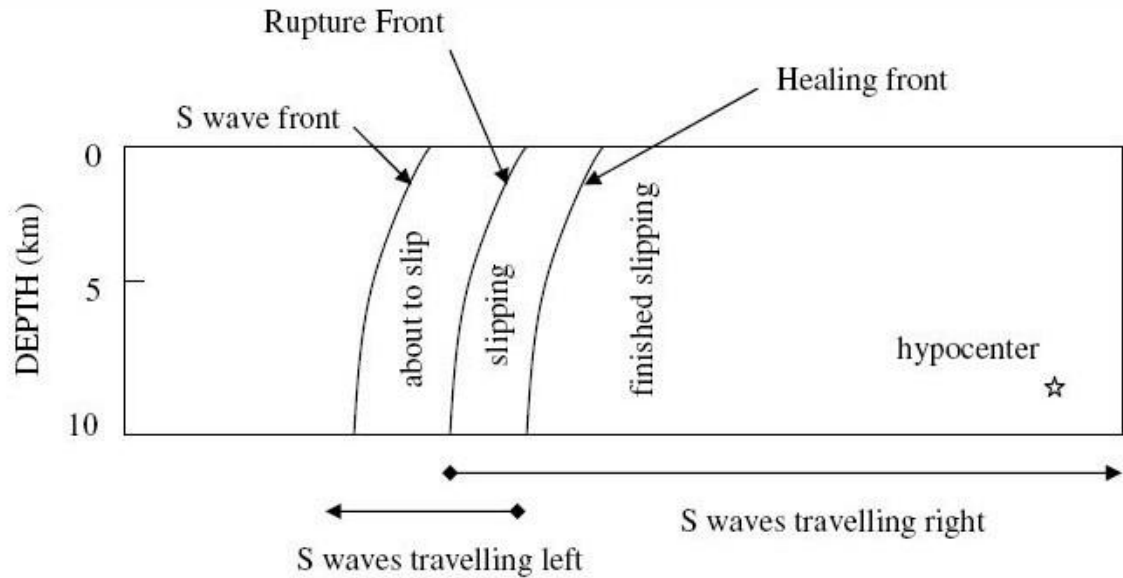
2.1 Εισαγωγή

Οι εδαφικές κινήσεις κοντά σ' ένα ρήγμα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές από εκείνες που βρίσκονται μακριά από αυτό. Η περιοχή που βρίσκεται κοντά στη σεισμική πηγή ονομάζεται κοντινό πεδίο και εκτιμάται σε μια απόσταση 20-60 km από το ρήγμα. Στο κοντινό πεδίο, οι εδαφικές κινήσεις επηρεάζονται έντονα από το μηχανισμό διάρρηξης, τη κατεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης σε σχέση με την περιοχή καθώς και τις πιθανές μόνιμες μετατοπίσεις ως αποτέλεσμα της ολίσθησης του ρήγματος. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στο φαινόμενο της κατευθυντικότητας.

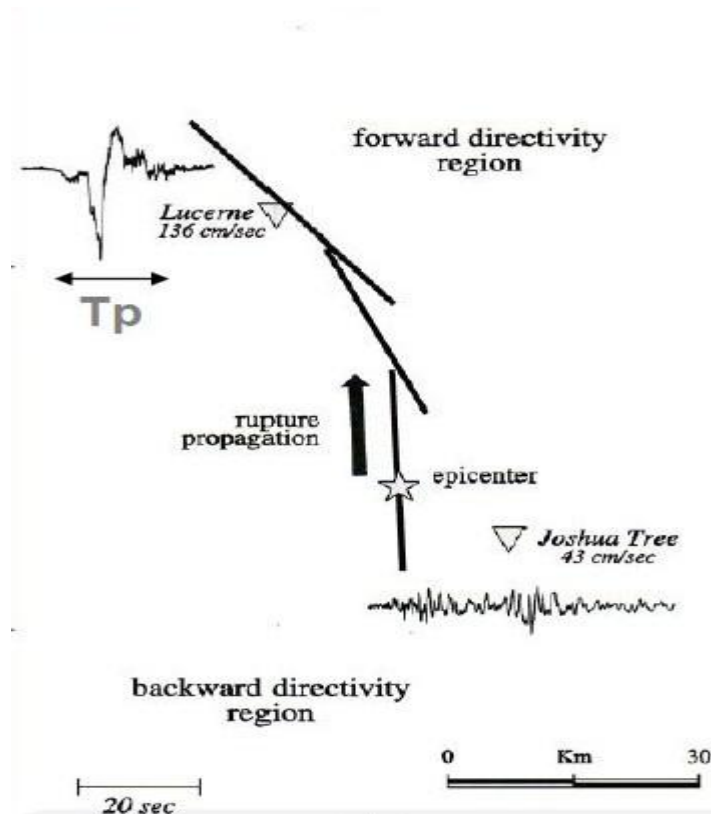
2.2 Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας

Η έμπροσθεν κατευθυντικότητα (forward directivity) είναι το φαινόμενο στο οποίο η διάδοση της διάρρηξης και η κατεύθυνση της ολίσθησης στο ρήγμα γίνονται προς την ίδια περιοχή. Αυτό συμβαίνει επειδή η ταχύτητα διάρρηξης στο ρήγμα είναι σχεδόν ίδια με τη διατμητική ταχύτητα των κυμάτων του βράχου κοντά στη πηγή. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.1, για μηχανισμό οριζόντιας διάρρηξης, καθώς 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 φτάνει ως ένας μεγάλος παλμός κίνησης και χαρακτηρίζεται από μεγάλο εύρος στις μεσαίες και μεγάλες περιόδους καθώς και από μικρή διάρκεια.

Εάν η περιοχή βρίσκεται κοντά στο επίκεντρο , δηλαδή εάν η διάρρηξη διαδίδεται αντίθετα από την περιοχή, οι παλμοί ακολουθούν ο ένας τον άλλο με αποτέλεσμα να έχουμε μια σειρά παλμών μικρού εύρους και συνολικά μεγάλης διάρκειας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται όπισθεν κατευθυντικότητα (backward directivity). Η ουδέτερη κατευθυντικότητα (neutral directivity) εμφανίζεται όταν η διάρρηξη δεν είναι ούτε προς ούτε μακριά από την περιοχή.

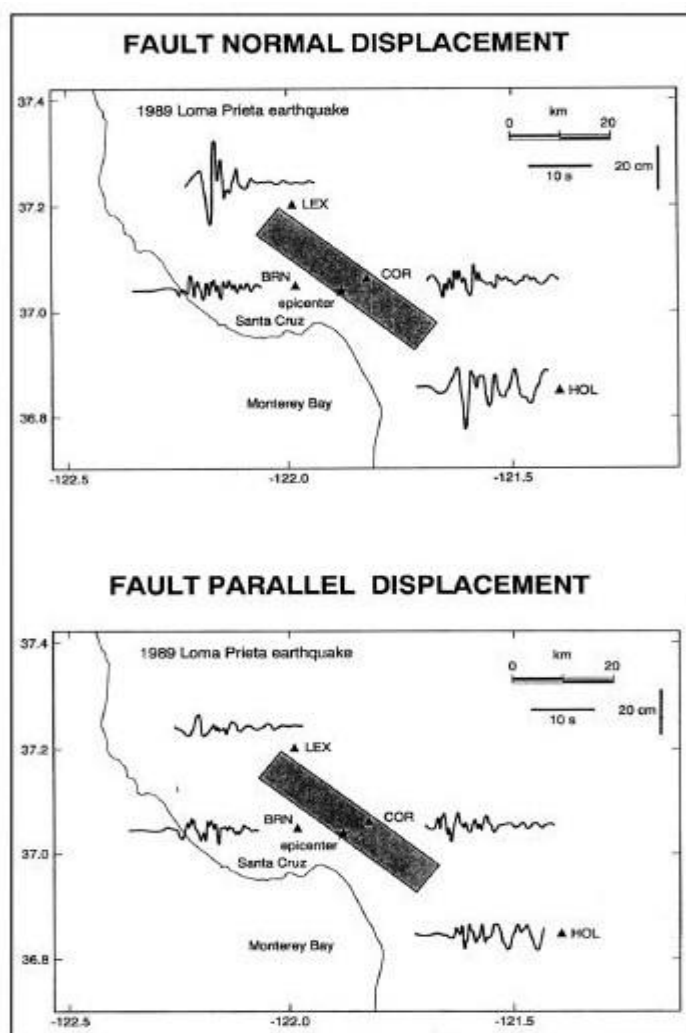


Σχήμα 2.1: Σχηματικό διάγραμμα επίδρασης της κατευθυντικότητας για οριζόντιο ρήγμα ολίσθησης. Η διάρρηξη ξεκινάει στο υπόκεντρο και διαδίδεται με ταχύτητα περίπου ίση με το 80% της διατμητικής ταχύτητας των κυμάτων. Το σχήμα δείχνει ένα στιγμιότυπο του μετώπου του ρήγματος σε μία δεδομένη στιγμή (από Somerville et al. 1997a).



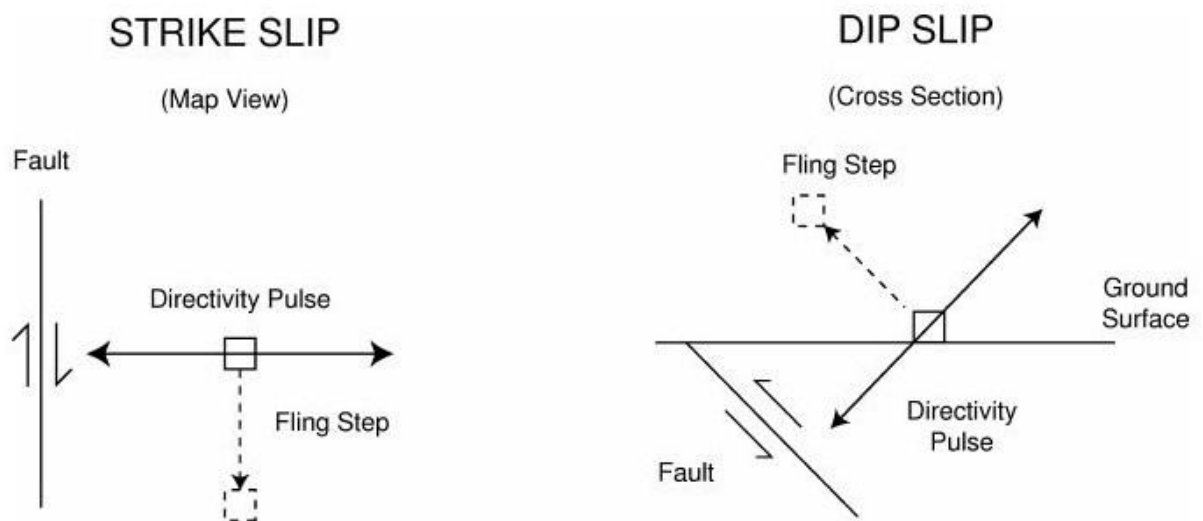
Σχήμα 2.2: Απεικόνιση των περιοχών εμφάνισης έμπροσθεν και όπισθεν κατευθυντικότητας καθώς και απότυπωση του παλμού που αυτές προκαλούν

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της επιρροής του φαινομένου της κατευθυντικότητας στις εδαφικές μετατοπίσεις είναι οι καταγραφές από το σεισμό του 1989 στο Loma Prieta (σχήμα 2.3). Στο επίκεντρο του σεισμού, οι οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις είναι μέτριες τόσο στις κάθετες (fault-normal) όσο και στις παράλληλες (fault parallel) με το ρήγμα συνιστώσες, γεγονός που αποδίδεται στην όπισθεν κατευθυντικότητα. Στα άκρα του ρήματος ωστόσο, η έμπροσθεν κατευθυντικότητα κάνει τις οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις, στην κάθετη διεύθυνση του ρήματος, να είναι παλμικές και πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στην παράλληλη συνιστώσα, οι οποίες είναι παρόμοιες με εκείνες κοντά στο επίκεντρο. Οι μεγάλες παλμικές κινήσεις εμφανίζονται μόνο στην κάθετη συνιστώσα και μόνο μακριά από το επίκεντρο.

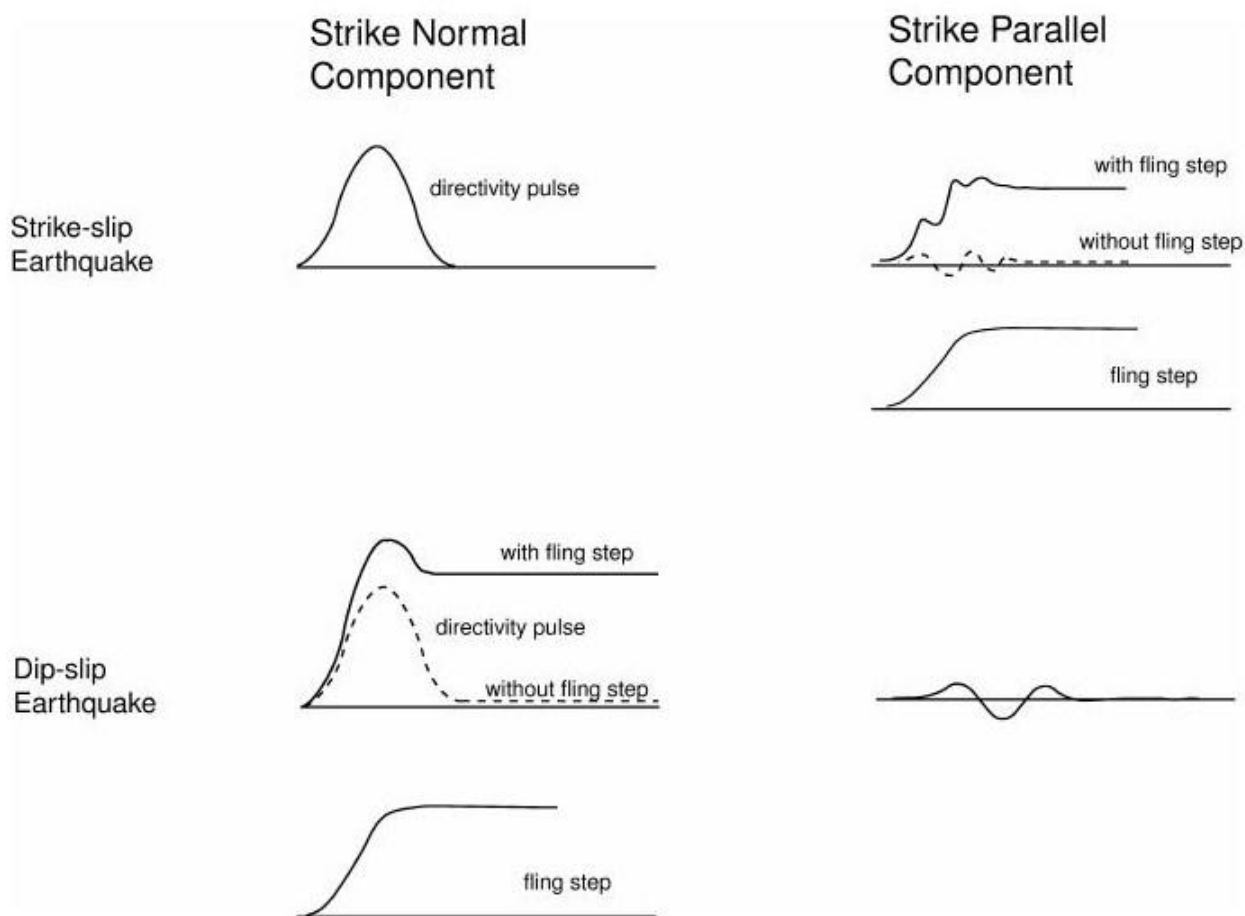


Σχήμα 2.3: Η επιρροή του φαινομένου της κατευθυντικότητας στις καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες του σεισμού του 1989 στο Loma Prieta, για τις κάθετες (άνω) και τις παράλληλες (κάτω) στο ρήγμα συνιστώσες.

Οι σύγχρονες ψηφιακές καταγραφές εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, περιλαμβάνουν μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις. Αυτές οι στατικές μετατοπίσεις ονομάζονται παραμένουσες μετακινήσεις (fling step) ,και δημιουργούνται σε χρόνο κάποιων δευτερόλεπτων καθώς το ρήγμα ολισθαίνει. Οι μετακινήσεις αυτές εμφανίζονται στη διεύθυνση ολίσθησης του ρήγματος και συνεπώς δεν συνδέονται άμεσα με τις δυναμικές μετακινήσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως- παλμός κατευθυντικότητας. Συγκεκριμένα, σε ρήγματα οριζοντίας διάρρηξης, ο παλμός κατευθυντικότητας εμφανίζεται κάθετα στο ίχνος του ρήγματος ενώ η παραμένουσα μετακίνηση παράλληλα. Σε ρήγματα κατακόρυφης διάρρηξης, τόσο ο παλμός κατευθυντικότητας όσο και η παραμένουσα μετακίνηση εμφανίζονται κάθετα στο ίχνος του ρήγματος. Ο προσανατολισμός του παλμού κατευθυντικότητας και της παραμένουσας μετακίνησης και για τους δύο τύπους ρηγμάτων απεικονίζονται στο σχήμα 2.4, ενώ στο σχήμα 2.5 αποτυπώνονται οι χρονοϊστορίες στις οποίες οι επιρροές των δύο αυτών φαινομένων παρουσιάζονται και μαζί και χωριστά.



Σχήμα 2.4: Σχηματικό διάγραμμα του προσανατολισμού του παλμού κατευθυντικότητας και της παραμένουσας μετακίνησης για ρήγμα οριζόντιας και κατακόρυφης διάρρηξης.



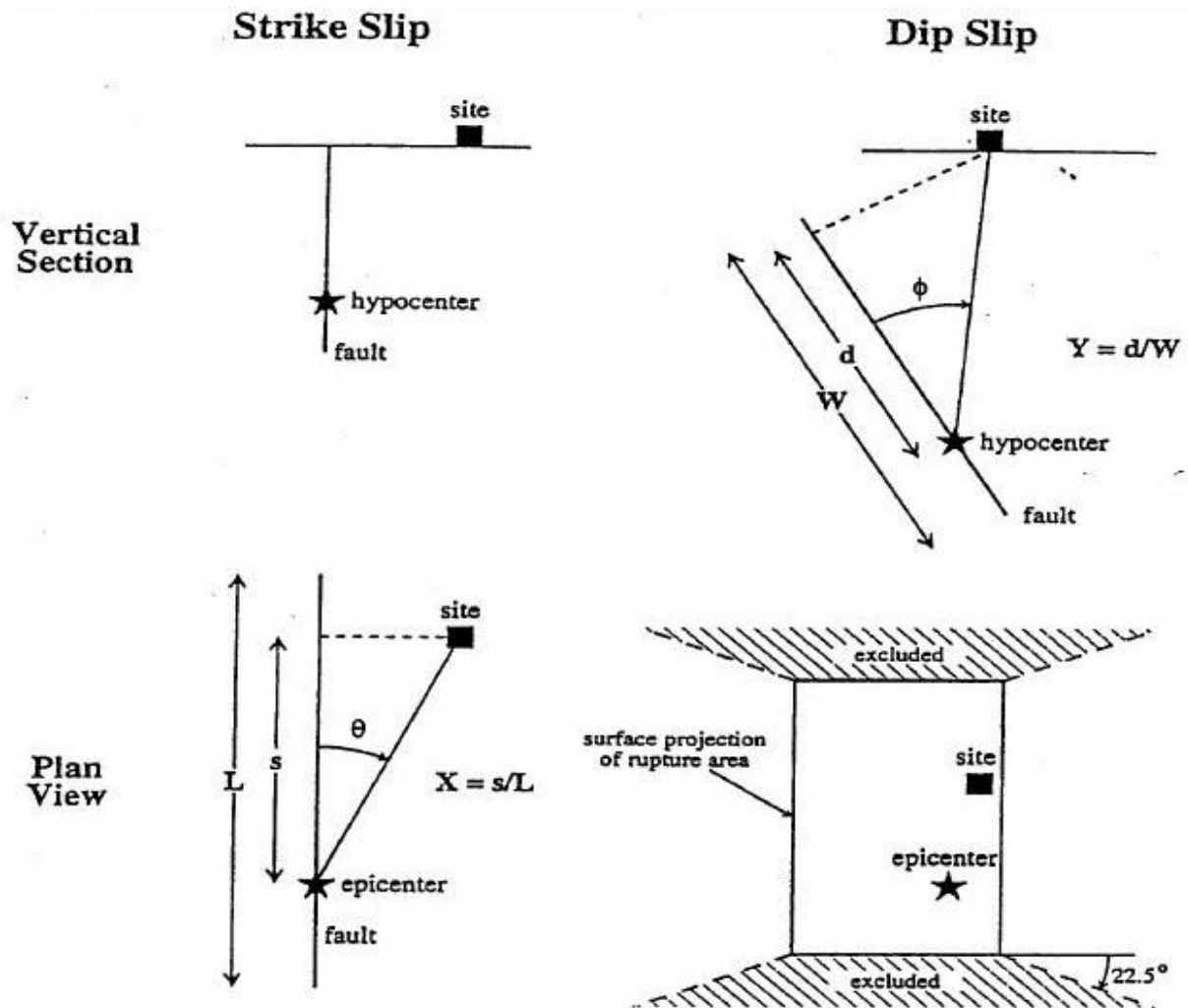
Σχήμα 2.5: Σχηματικό διάγραμμα των χρονοϊστοριών για ρήγμα οριζόντιας και κατακόρυφης διάρρηξης, στο οποίο ο παλμός κατευθυντικότητας και η παραμένουσα μετακίνηση παρουσιάζονται μαζί και χωριστά.

2.3 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου

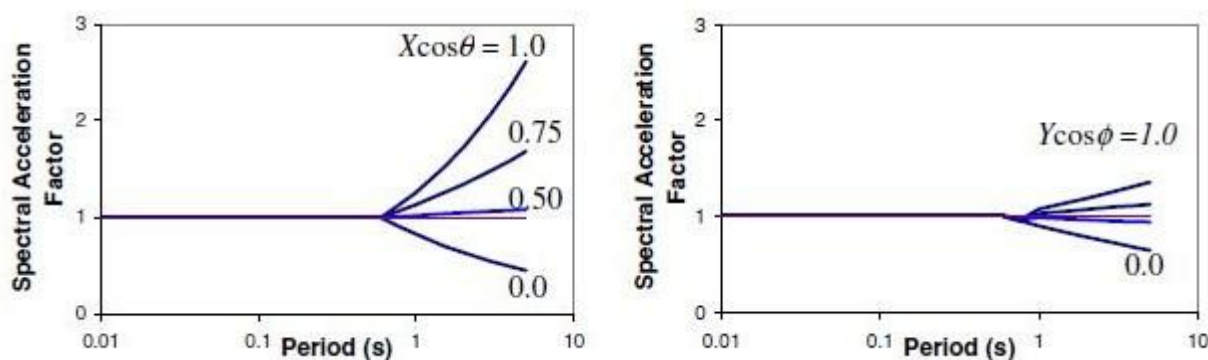
Οι Somerville et al.(1997a) μελέτησαν τις συνθήκες που οδηγούν σε έμπροσθεν και όπισθεν κατευθυντικότητα. Οι καταγραφές που έχουν επηρεαστεί από το φαινόμενο της έμπροσθεν κατευθυντικότητας παρουσιάζουν ενίσχυση των φασματικών τιμών στην περιοχή των μεσαίων και των μεγάλων περιόδων, με την αύξηση αυτή να είναι εντονότερη όσο μεγαλύτερο είναι το τμήμα της ρηγμάτωσης που μεσολαβεί μεταξύ της εστίας και της θέσης καταγραφής. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6, η διαφοροποίηση στην επίδραση της κατευθυντικότητας εξαρτάται αρχικά, από τη γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης διάδοσης της διάρρηξης και της κατεύθυνσης των κυμάτων που ταξιδεύουν από το ρήγμα προς την περιοχή (θ για τα ρήγματα οριζοντίου διάρρηξης

και ϕ για τα ρήγματα κατακόρυφης), και κατά δεύτερον, από το τμήμα της επιφάνειας διάρρηξης του ρήγματος που βρίσκεται μεταξύ του υποκέντρου και της εξεταζόμενης περιοχής (X για ρήγματα οριζοντίου διάρρηξης και Y για ρήγματα κατακόρυφης). Τα σημαντικότερα αποτελέσματα έμπροσθεν κατευθυντικότητας προκύπτουν για τις μικρότερες γωνίες και για τα μεγαλύτερα τμήματα διερρηγμένου ρήγματος.

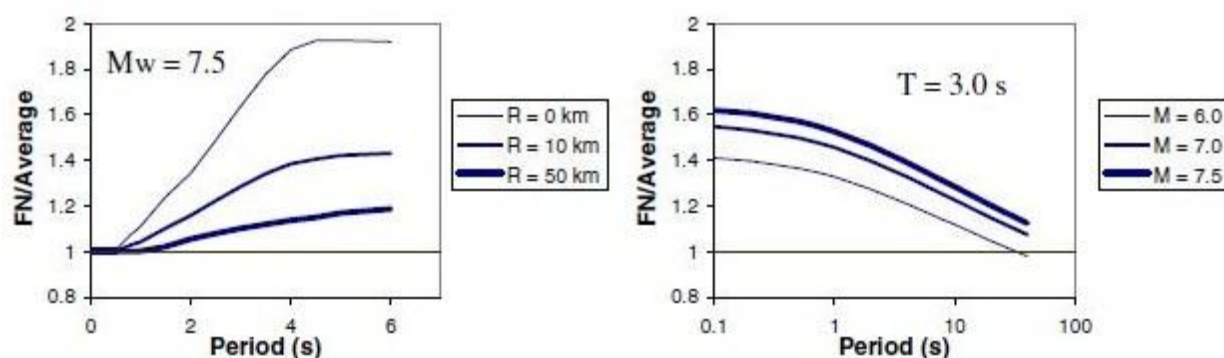
Για να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα της κατευθυντικότητας οι Somerville et al.(1997a) συσχέτισαν τις ανηγμένες, προς ένα μέσο φάσμα, τιμές των φασμάτων απόκρισης (με 5% απόσβεση) με τις γεωμετρικές παραμέτρους που προσδιορίζονται στο σχήμα 2.6. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 2.7. Οι παράμετροι εδαφικής κίνησης που διαφοροποιούνται είναι τα μέσα οριζόντια φάσματα απόκρισης και ο λόγος της κάθετης και παράλληλης συνιστώσας στο ρήγμα.



Σχήμα 2.6: Οι παράμετροι για να προσδιορισθούν οι συνθήκες της κατευθυντικότητας (Somerville et al.1997a)



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



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

Σχήμα 2.7: Προβλέψεις από τη σχέση των Somerville et al. (1997 a) για διαφορετικές συνθήκες κατευθυντικότητας.

2.4 Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα (PHV)

Η μέγιστη οριζόντια ταχύτητα επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος του σεισμού, την απόσταση από το ρήγμα και τις εδαφικές συνθήκες της περιοχής. Ο Somerville (1998) πρότεινε τη χρήση μιας διγραμμικής σχέσης μεταξύ του λογαρίθμου της PHV, του μεγέθους και του λογαρίθμου της απόστασης. Πραγματοποίησε μια ανάλυση παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας στοιχεία από 15 καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες που αυξήθηκαν από 12 τεχνητές χρονοϊστορίες. Οι καταγραφές αντιστοιχούν σε μεγέθη $m=6,2-7,5$ και $r=0-10$ km. Για να αποφύγει τις μη ρεαλιστικές προβλέψεις για

την PHV χρησιμοποίησε μία ελάχιστη απόσταση 3 km. Η σχέση του Somerville (1998) για την PHV στο κοντινό πεδίο είναι η εξής:

$$\ln(PHV) = -2,31 + 1,15 \cdot m - 0,5 \cdot \ln(r)$$

όπου το r είναι η ελάχιστη απόσταση στο ρήγμα η οποία είναι τουλάχιστον 3 km.

Οι Alavi & Krawinkler(2000) παρουσίασαν μία παρόμοια μελέτη που συσχετίζει την PHV με το μέγεθος και την απόσταση, βασιζόμενοι στο ίδιο σύνολο στοιχείων που χρησιμοποίησε ο Somerville (1998). Η σχέση των Alavi & Krawinkler (2000) είναι η εξής:

$$\ln(PHV) = -5,11 + 1,59 \cdot m - 0,58 \cdot \ln(r)$$

Ο Rodriguez-Marek(2000) εκτέλεσε μία ανάλυση παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας 48 χρονοϊστορίες ταχύτητας από 11 γεγονότα. Τα στοιχεία ήταν για περιοχές με αποστάσεις $r < 20$ km και $m = 6,1-7,4$. Χωριστές αναλύσεις έγιναν για τις κινήσεις που καταγράφηκαν επί βράχου και επί εδάφους. Με βάση αυτήν την ανάλυση προτάθηκε η ακόλουθη σχέση για την PHV:

$$\ln(PHV) = \alpha + b \cdot m + c \cdot \ln(r^2 + d^2) + \eta_i + \epsilon_{ij}$$

όπου η PHV είναι σε μονάδες cm/s, οι όροι α , b , c , d είναι παράμετροι, r είναι η ελάχιστη απόσταση στο ρήγμα, m είναι το μέγεθος και τα η_i και ϵ_{ij} είναι οι όροι σφάλματος. Οι όροι σφάλματος είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές με διακυμάνσεις τ^2 και σ^2 αντίστοιχα. Το τυπικό σφάλμα δίνεται από τη σχέση:

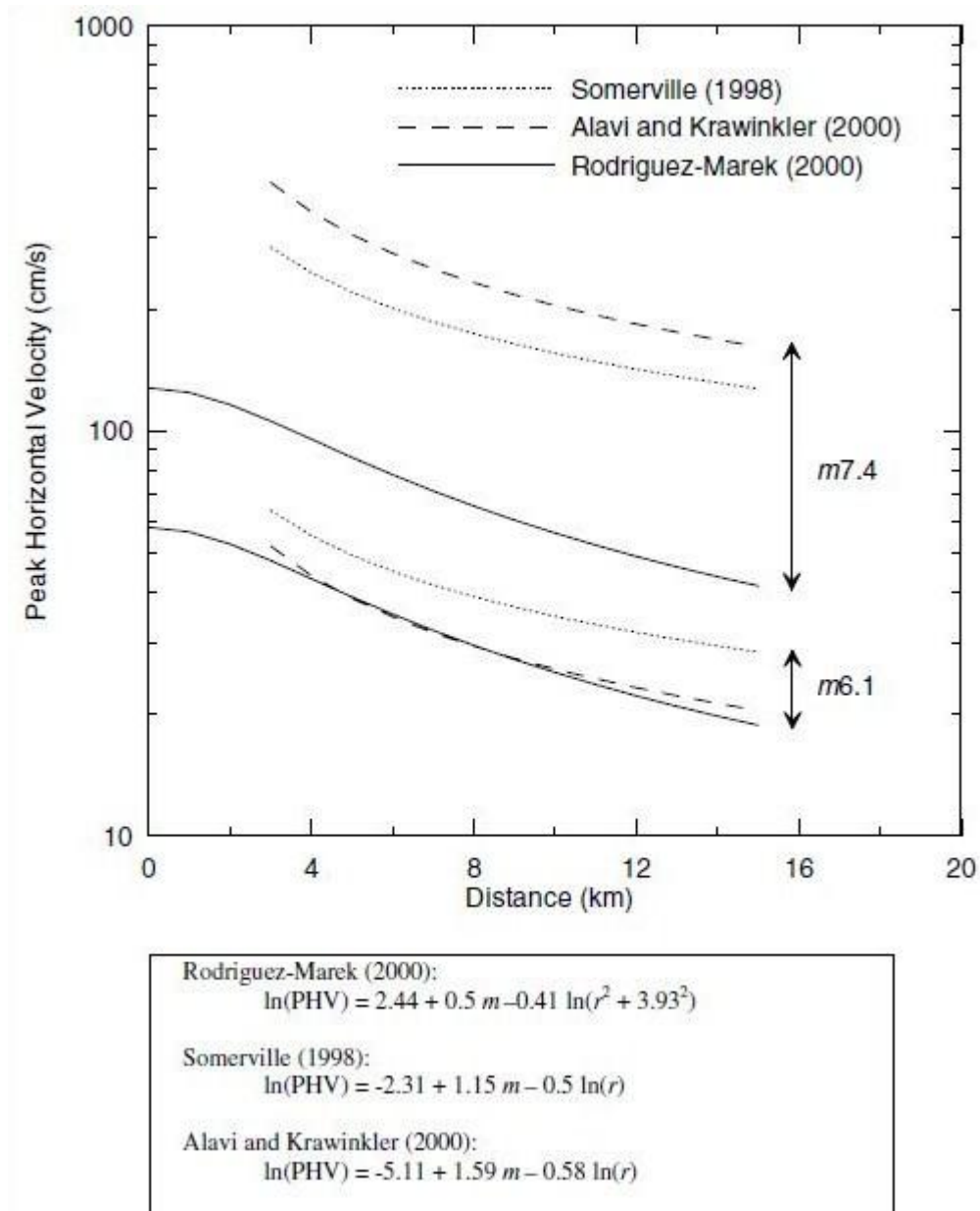
$$\sigma_{total}^2 = \tau^2 + \sigma^2$$

Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου Rodriguez-Marek(2000) παρουσιάζονται στον πίνακα 2.8 .

Data Set	a	b	c	d	σ	τ	σ_{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	0.59
Soil	3.86	0.30	-0.42	3.93	0.43	0.41	0.59

Πίνακας 2.8: Παράμετροι του μοντέλου Rodriguez-Marek (2000) για την PHV

Το σχήμα 2.9 συγκρίνει τις σχέσεις του Somerville(1998), των Alavi & Krawinkler (2000) και του Rodriguez-Marek(2000). Οι σχέσεις αυτές διαφοροποιούνται κυρίως στην επίδραση του μεγέθους m . Οι διαφορές οφείλονται πιθανώς στο μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων που περιελάμβανε η πιο πρόσφατη μελέτη (Rodriguez-Marek).



Σχήμα 2.9: Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης για την εκτίμηση της PHV με στοιχεία από βάσεις δεδομένων σεισμών κοντινού πεδίου με κατευθυντικότητα (Rodriguez-Marek 2000).

2.5 Περίοδος παλμού

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

$$\log_{10} T_v = -2,5 + 0,425 \cdot m$$

όπου T_v είναι η περίοδος του μεγαλύτερου κύκλου της κίνησης και m είναι το μέγεθος του σεισμού. Σε μία μεγαλύτερη μελέτη των διανομών ολίσθησης, χρησιμοποιώντας μοντέλα ολίσθησης για 15 σεισμούς, οι Somerville et al. 1999 παρέχουν την εξίσωση:

$$\log_{10} T_v = -3,0 + 0,5 \cdot m$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι 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 της ολίσθησης είναι (Somerville 1998):

$$T_v = 2,2 \cdot t_R$$

Η σχέση μεταξύ της περιόδου του παλμού και της χρονικής διάρκειας t_R μπορεί να προκύψει και από τη φυσική εξήγηση του φαινομένου της διάρρηξης. Εάν ένα ρήγμα διαμορφώνεται ως σημειακή πηγή και οι επιδράσεις της κατευθυντικότητας αγνοούνται, τότε η διάρκεια της κίνησης μπορεί να 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 συνεπώς ένα κάτω όριο του παλμού.

Οι Alavi & Krawinkler (2000) όρισαν την περίοδο του παλμού ως δεσπόζουσα περίοδο σ'ένα φάσμα απόκρισης ταχύτητας (T_{v-p}). Η σχέση που χρησιμοποιεί αυτόν τον ορισμό είναι η εξής:

$$\log_{10} T_{v-p} = -1,76 + 0,31 \cdot m$$

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

$$\ln(T_v)_{ij} = a + b \cdot m + \eta_i + \varepsilon_{ij}$$

όπου $(T_v)_{ij}$ είναι η περίοδος του παλμού της καταγραφής j από το γεγονός i , a και b είναι παράμετροι του μοντέλου, η_i και ε_{ij} είναι οι όροι σφάλματος. Εκτιμήσεις παρέχονται τόσο για την περίοδο του παλμού, T_v , όσο και για τη δεσπόζουσα

περίοδο, T_{v-p} . Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου παρουσιάζονται στον πίνακα 2.10. Η σχέση ισχύει για $m=6,1-7,4$ και για $r<20\text{km}$. Οι όροι σφάλματος είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές με διακυμάνσεις τ^2 και σ^2 αντίστοιχα. Το τυπικό σφάλμα δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \tau^2 + \sigma^2$$

(a) T_v

Data Set	a	b	σ	τ	σ_{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

(b) T_{v-p}

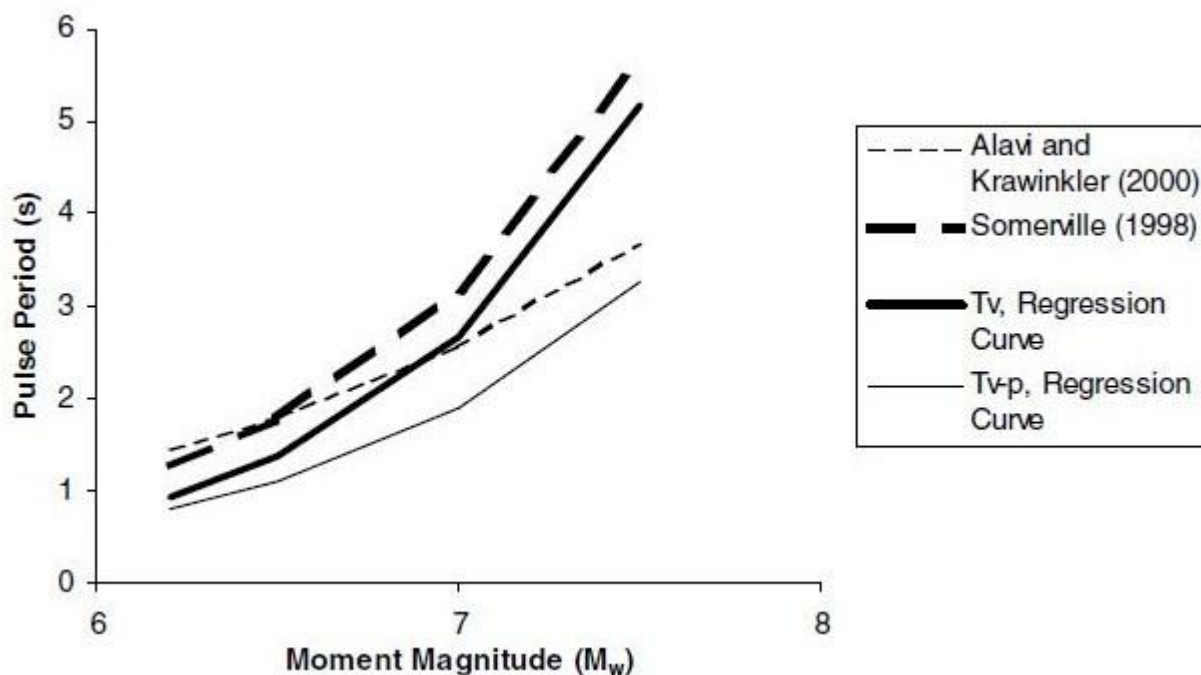
Data Set	a	b	σ	τ	σ_{total}
All Motions	-6.92	1.08	0.48	0.45	0.66
Rock	-9.53	1.42	0.37	0.61	0.71
Soil	-5.66	0.91	0.41	0.45	0.61

Πίνακας 2.10: Παράμετροι του μοντέλου Rodriguez-Marek (2000) για την περίοδο του παλμού.

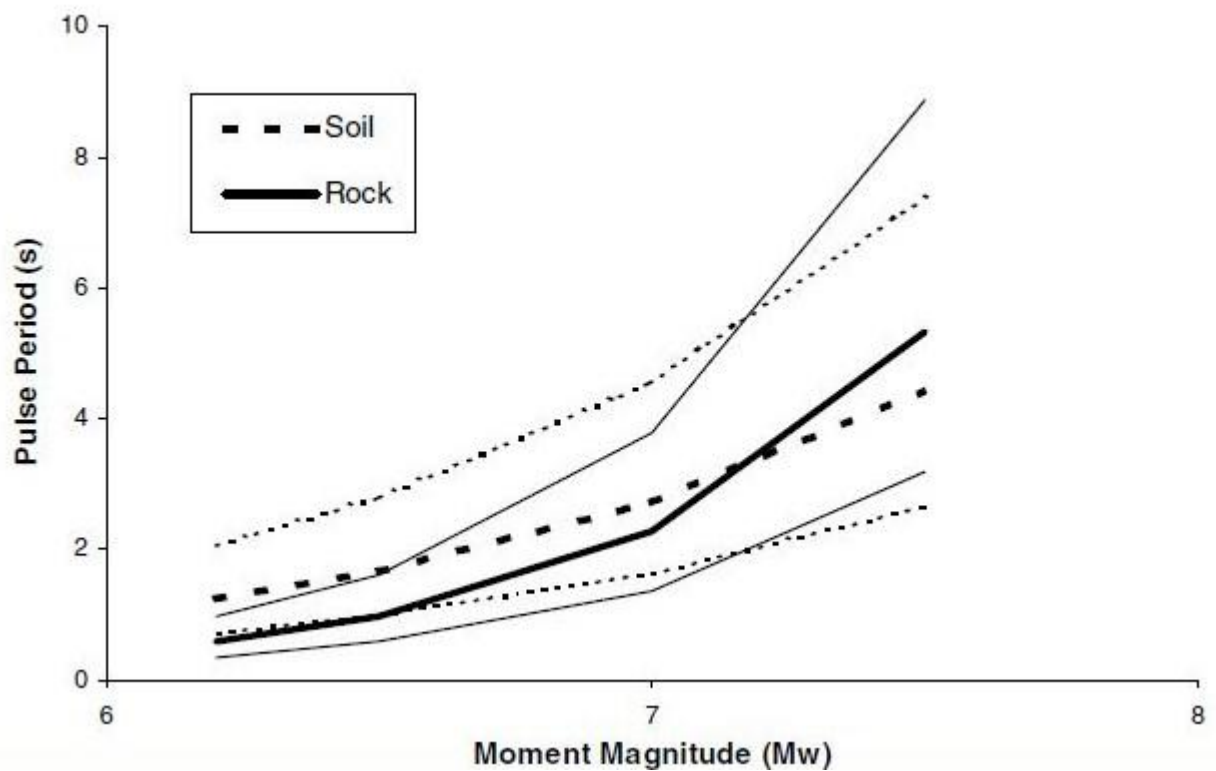
Το σχήμα 2.11 συγκρίνει τις σχέσεις του Somerville(1998), των Alavi & Krawinkler (2000) και του Rodriguez-Marek(2000). Οι σχέσεις του Rodriguez-Marek (2000) για τις T_v και T_{v-p} προβλέπουν μικρότερες περιόδους παλμού από τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν από τον Somerville (1998) για την T_v και από τους Alavi & Krawinkler (2000) για την T_{v-p} . Οι διαφορές δεν είναι τόσο έντονες για μεγάλα μεγέθη σεισμού ($m>7$), καθώς υπάρχουν αβεβαιότητες στην εκτίμηση της περιόδου του παλμού.

Η επίδραση των εδαφικών συνθηκών μπορεί να ερευνηθεί μέσω των σχέσεων Rodriguez-Marek (2000) για την περίοδο του παλμού, τόσο για βράχο όσο και για

έδαφος (σχήμα 2.12). Η διαφορά των τιμών της περιόδου του παλμού για βράχο και για έδαφος είναι μικρή για μεγάλου μεγέθους γεγονότα ($m > 7$), αλλά η περίοδος του παλμού είναι αισθητά μεγαλύτερη στο έδαφος απ'ότι στο βράχο για γεγονότα μικρότερου μεγέθους.



Σχήμα 2.11: Σύγκριση του μοντέλου του Rodriguez-Marek (2000) με τις σχέσεις του Somerville (1998) για την περίοδο του παλμού T_v και των Alavi & Krawinkler (2000) για την δεσπόζουσα περίοδο T_{v-p} . (Rodriguez-Marek 2000)



Σχήμα 2.12: Μοντέλο Rodriguez-Marek (2000) για την εκτίμηση της περιόδου του παλμού (T_v) για βράχο και για έδαφος. Οι έντονες καμπύλες αναπαριστούν την μέση τιμή και οι λεπτές τις τυπικές αποκλίσεις. (Rodriguez-Marek 2000)

Κεφάλαιο 3

ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ BOORE & ATKINSON

3.1 Εισαγωγή

3.2 Οι εξισώσεις των Boore & Aktinson

3.3 Συναρτήσεις απόστασης και μεγέθους

3.4 Συνάρτηση περιοχής

3.5 Καθορισμός των συντελεστών

3.6 Εφαρμογή του μοντέλου Boore & Atkinson στην περιοχή της Βοιωτίας

3.7 Σύγκριση με το φάσμα επιτάχυνσης του EC8

3.1 Εισαγωγή

Ποικίλα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για την πρόβλεψη της εδαφικής κίνησης στηριζόμενα σε διαφορετικές μεταβλητές. Στη παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε αυτό των David M. Boore και Gail M. Atkinson (BA07), το οποίο περιλαμβάνει εξισώσεις πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης για τη μέση οριζόντια συνιστώσα της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (**PGA**), της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας (**PGV**), και του φάσματος επιτάχυνσης με 5% απόσβεση (**PSA**) για περιόδους από 0,01sec μέχρι 10sec. Οι βασικές μεταβλητές που περιλαμβάνονται στις εξισώσεις είναι το μέγεθος του σεισμού (**M**), η κοντινότερη οριζόντια απόσταση στην επιφανειακή προβολή του ρήγματος (**R_{JB}**), ο τύπος του ρήγματος καθώς και η μέση διατμητική ταχύτητα των κυμάτων από την επιφάνεια μέχρι τα 30m βάθος (**V_{S30}**). Οι εξισώσεις είναι εφαρμόσιμες για:

- $M=5-8$
- $R_{JB}<200\text{km}$
- $V_{S30}=180-1300\text{m/s}$.

Οι εξισώσεις αυτές προέκυψαν από το ερευνητικό κέντρο αντισεισμικής τεχνολογίας του Ειρηνικού σαν τμήμα του ερευνητικού προγράμματος Νέα Γένια Μοντέλων Απομείωσης (NGA). Χρησιμοποιήθηκε μια μεγάλη βάση δεδομένων χιλιάδων καταγραφών από επιφανειακούς σεισμούς σε ενεργά τεκτονικά περιβάλλοντα παγκοσμίως.

3.2 Οι εξισώσεις των Boore & Atkinson

Ακολουθώντας τη φιλοσοφία του Boore et al. 1997 (αναφερόμενο εδώ ως “BJF97”), οι εξισώσεις για την πρόβλεψη της εδαφικής κίνησης στοχεύουν στη χρήση όσο το δυνατόν λιγότερων μεταβλητών. Οι Boore & Atkinson τροποποίησαν τις απλές εξισώσεις του BJK97 ώστε να υπάρχει καλύτερη αντιστοιχία με τις καταγεγραμμένες εδαφικές κινήσεις. Παραδείγματος χάριν, οι εξισώσεις του BJK97 χρησιμοποιούσαν ένα απλό μοντέλο απομείωσης του εύρους σε μακρινές αποστάσεις, το οποίο δεν εξαρτάται καθόλου από το μέγεθος, ούτε έχει καμπυλότητα σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Το συγκεκριμένο μοντέλο επαρκούσε σε αποστάσεις μικρότερες από 80 km. Οι καταγραφές όμως έδειξαν την αναγκαιότητα της καμπυλότητας της γραμμής για τον υπολογισμό της ανελαστικής απομείωσης σε μεγαλύτερες αποστάσεις καθώς και την εξάρτηση μεταξύ του παράγοντα διασποράς και του μεγέθους. Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων, εισάχθηκε στις εξισώσεις ένας ανελαστικός

συντελεστής στον οποίο το $\ln Y$ είναι ανάλογο της οριζόντιας απόστασης (R_{JB}) καθώς και ένας παράγοντας διασποράς εξαρτώμενος από το μέγεθος στον οποίο το $\ln Y$ είναι ανάλογο του $\ln R_{JB}$ και ο συντελεστής αναλογικότητας προκύπτει από το μέγεθος (M). Συνεπώς, η κύρια διαφορά των δύο αυτών μοντέλων είναι η εισαγωγή του όρου που αφορά την ανελαστική-μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους που εκφράζεται με τον όρο $rga4nl$ που αναλύεται παρακάτω. Η πλαστικοποίηση του εδάφους επιφέρει σημαντικές αλλαγές στα αποτελέσματα τα οποία ανταποκρίνονται καλύτερα στις καταγεγραμμένες τιμές.

Τελικά, η εξίσωση για την πρόβλεψη της εδαφικής κίνησης είναι:

$$\ln Y = F_M(M) + F_D(R_{JB}, M) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, M) + \varepsilon \cdot \sigma_T \quad (1)$$

Στην εξίσωση αυτή F_M , F_D και F_S αντιστοιχούν σε συναρτήσεις μεγέθους, απόστασης και περιοχής. Οι παράμετροι M , R_{JB} και V_{S30} αποτελούν τις βασικές μεταβλητές της εξίσωσης και έχουν επεξηγηθεί στην εισαγωγή του συγκεκριμένου κεφαλαίου. Ο τύπος του ρήγματος είναι προαιρετική μεταβλητή που εισέρχεται στη συνάρτηση μεγέθους όπως φαίνεται στις εξισώσεις 5a και 5b που παρουσιάζονται παρακάτω. Ο όρος ε αντιπροσωπεύει την τυπική απόκλιση που έχει μια μεμονωμένη τιμή του $\ln Y$ από τη μέση τιμή όλων των τιμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλοι οι όροι, συμπεριλαμβανομένου και του συντελεστή σ_T , εξαρτώνται από την περίοδο. Ο συντελεστής σ_T υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} \quad (2)$$

- σ : τυχαία αβεβαιότητα του ένδο-γεγονότος
- τ : τυχαία αβεβαιότητα μεταξύ των γεγονότων

3.3 Συναρτήσεις αποστάσεις και μεγέθους

Η συνάρτηση απόστασης είναι η εξής:

$$F_D(R_{JB}, M) = [c_1 + c_2 \cdot (M - M_{ref})] \cdot \ln\left(\frac{R}{R_{ref}}\right) + c_3 \cdot (R - R_{ref}) \quad (3)$$

όπου

$$R = \sqrt{R_{JB}^2 + h^2} \quad (4) \text{ και οι}$$

όροι c_1 , c_2 , c_3 , M_{ref} , R_{ref} και h είναι συντελεστές που διευκρινίζονται παρακάτω.

Η συνάρτηση μεγέθους δίνεται από τους εξής τύπους:

A) $M \leq M_h$

$$F_M(M) = e_1 \cdot U + e_2 \cdot SS + e_3 \cdot NS + e_4 \cdot RS + e_5 \cdot (M - M_{ref}) + e_6 \cdot (M - M_h)^2 \quad (5a)$$

B) $M > M_h$

$$F_M(M) = e_1 \cdot U + e_2 \cdot SS + e_3 \cdot NS + e_4 \cdot RS + e_7 \cdot (M - M_h) \quad (5b)$$

όπου οι όροι U, SS, NS, RS είναι πλασματικές μεταβλητές που προσδιορίζουν τον τύπο του ρήγματος -άγνωστο, οριζοντίου διάρρηξης, κανονικό, ανάστροφο αντίστοιχα και παίρνουν τιμές που φαίνονται στον πίνακα 3.1. Ο όρος M_h διευκρινίζεται παρακάτω.

Fault Type	U	SS	NS	RS
Unspecified	1	0	0	0
Strike-slip	0	1	0	0
Normal	0	0	1	0
Thrust/reverse	0	0	0	1

Πίνακας 3.1: Τιμές των πλασματικών μεταβλητών ανάλογα με τον τύπο του ρήγματος.

3.4 Συνάρτηση περιοχής

Η συνάρτηση περιοχής δίνεται από την εξίσωση:

$$F_S = F_{LIN} + F_{NL} \quad (6)$$

όπου F_{LIN} και F_{NL} είναι γραμμικοί και μη γραμμικοί όροι

Ο γραμμικός όρος δίνεται από:

$$F_{LIN} = b_{lin} \cdot \ln\left(\frac{V_{S30}}{V_{ref}}\right) \quad (7)$$

όπου b_{lin} είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από την περίοδο και V_{ref} η προσδιορισμένη ταχύτητα αναφοράς (=760 m/s). Αυτοί οι συντελεστές έχουν καθοριστεί από τους Choi και Stewart(2005; αναφερόμενο εδώ ως CS05). Είναι

εμπειρικοί και δεν έχουν προσδιορισθεί από το μοντέλο απομείωσης των Boore & Atkinson.

Ο μη γραμμικός όρος δίνεται από την εξίσωση:

a) $pga_{4nl} \leq \alpha_1$:

$$F_{NL} = b_{nl} \ln(pga_low/0,1) \quad (8a)$$

b) $\alpha_1 < pga_{4nl} \leq \alpha_2$:

$$F_{NL} = b_{nl} \ln(pga_low/0,1) + c[\ln(pga_{4nl}/\alpha_1)]^2 + d[\ln(pga_{4nl}/\alpha_1)]^3 \quad (8b)$$

c) $\alpha_2 < pga_{4nl}$:

$$F_{NL} = b_{nl} \ln(pga_{4nl}/0,1) \quad (8c)$$

όπου $\alpha_1 (=0,03g)$ και $\alpha_2 (=0,09g)$ αποδίδονται στα κατώτατα όρια για γραμμική και μη γραμμική ενίσχυση αντίστοιχα, pga_low είναι μια μεταβλητή που αντιστοιχεί στη μετάβαση ανάμεσα σε γραμμική και μη γραμμική συμπεριφορά και ο όρος pga_{4nl} είναι η προβλεπόμενη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) σε g για $V_{ref} = 760$ m/s, όπως δίνεται από την εξίσωση (1) για $F_s=0$ και $\varepsilon=0$. Οι τρεις εξισώσεις για το μη γραμμικό τμήμα της απόκρισης του εδάφους (εξισώσεις 8a-8c) χρειάζονται για δύο λόγους : 1) να εμποδίσουν τη μη γραμμική ενίσχυση να αυξάνεται επ'άπειρο καθώς ο όρος pga_{4nl} μειώνεται και 2) να εξομαλύνουν τη μετάβαση από τη γραμμική στη μη γραμμική συμπεριφορά. Οι συντελεστές c και d στην εξίσωση 8b δίνονται από τις σχέσεις:

$$c = (3\Delta x - b_{nl} \Delta x) / \Delta x^2 \quad (9)$$

$$d = -(2\Delta y - b_{nl} \Delta x) / \Delta x^3 \quad (10)$$

όπου

$$\Delta x = \ln(\alpha_1/\alpha_2) \quad (11)$$

$$\Delta y = b_{nl} \ln(\alpha_2/pga_low) \quad (12)$$

Η μη γραμμική κλίση b_{nl} είναι συνάρτηση της περιόδου και της V_{S30} όπως φαίνεται από τις σχέσεις:

a) $VS30 \leq V1$:

$$b_{nl} = b_1 \quad (13a)$$

b) $V_1 < V_{S30} \leq V_2$:

$$b_{nl} = (b_1 - b_2) \ln(V_{S30}/V_2) / \ln(V_1/V_2) + b_2 \quad (13b)$$

c) $V_2 < V_{S30} < V_{ref}$:

$$b_{nl} = b_2 \ln(V_{S30}/V_{ref}) / \ln(V_2/V_{ref}) + b_2 \quad (13c)$$

d) $V_{ref} \leq V_{S30}$:

$$b_{nl} = 0,0 \quad (13d)$$

όπου $V_1=180$ m/s, $V_2=300$ m/s, και b_1 και b_2 είναι συντελεστές που εξαρτώνται από την περίοδο (και συνεπώς ο όρος b_{nl} εξαρτάται και αυτός από την περίοδο πέρα από τη V_{S30})

3.5 Καθορισμός των συντελεστών

Ενίσχυση με βάση την περιοχή: Οι συντελεστές που αφορούν τις εξισώσεις σχετικά με τη συνάρτηση περιοχής παρουσιάζονται στους πίνακες 3.2 και 3.3. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο προσδιορισμός αυτών των συντελεστών έγινε με βάση το CS05 και όχι με το μοντέλο των Boore & Atkinson. Για την ταχύτητα αναφοράς $V_{S30}=760$ m/s οι όροι F_{LIN} , F_{NL} και F_S μηδενίζονται.

Η λογική με την οποία προσδιορίστηκαν πρώτα οι συντελεστές αυτοί, είναι ότι η βάση δεδομένων του NGA μπορεί να είναι ανεπαρκής για να προσδιοριστούν ταυτόχρονα όλοι οι συντελεστές τόσο στις εξισώσεις για τη μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους όσο και στις εξισώσεις του μεγέθους και της απόστασης, εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των παραμέτρων. Συνεπώς, κρίθηκε βέλτιστο να προσδιορισθεί η απόκριση του εδάφους με βάση εμπειρική ανάλυση και έπειτα, μέσω της απομείωσης, να καθοριστούν οι παράγοντες σχετικά με το μέγεθος και την απόσταση.

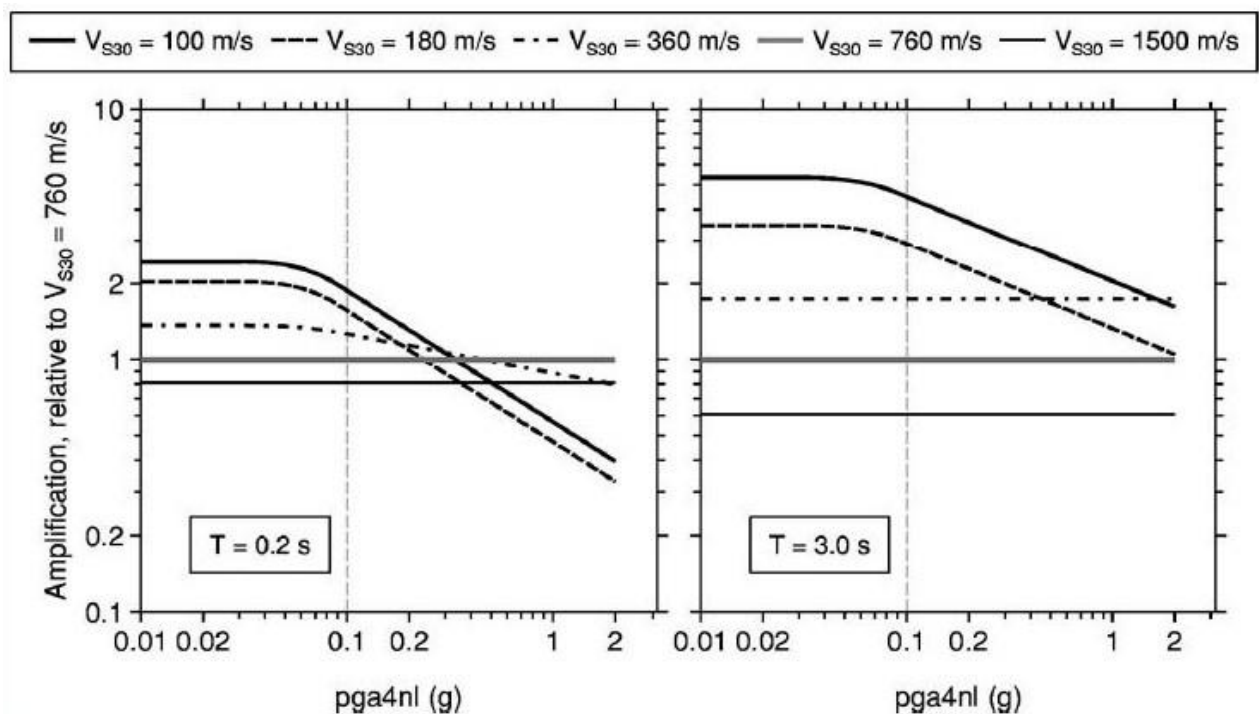
Period	b_{lin}	b_1	b_2
PGV	-0.600	-0.500	-0.06
PGA	-0.360	-0.640	-0.14
0.010	-0.360	-0.640	-0.14
0.020	-0.340	-0.630	-0.12
0.030	-0.330	-0.620	-0.11
0.050	-0.290	-0.640	-0.11
0.075	-0.230	-0.640	-0.11
0.100	-0.250	-0.600	-0.13
0.150	-0.280	-0.530	-0.18
0.200	-0.310	-0.520	-0.19
0.250	-0.390	-0.520	-0.16
0.300	-0.440	-0.520	-0.14
0.400	-0.500	-0.510	-0.10
0.500	-0.600	-0.500	-0.06
0.750	-0.690	-0.470	0.00
1.000	-0.700	-0.440	0.00
1.500	-0.720	-0.400	0.00
2.000	-0.730	-0.380	0.00
3.000	-0.740	-0.340	0.00
4.000	-0.750	-0.310	0.00
5.000	-0.750	-0.291	0.00
7.500	-0.692	-0.247	0.00
10.000	-0.650	-0.215	0.00

Πίνακας 3.2: Συντελεστές σχετικά με την ενίσχυση της περιοχής που εξαρτώνται από τη περίοδο.

Coefficient	Value
a_1	0.03 g
pga_{low}	0.06 g
a_2	0.09 g
V_1	180 m/s
V_2	300 m/s
V_{ref}	760 m/s

Πίνακας 3.3: Συντελεστές σχετικά με την ενίσχυση της περιοχής ανεξάρτητοι με την περίοδο.

Η συνολική ενίσχυση, για μία μικρή τιμή της περιόδου (0,2s) και μία μεγάλη (3,0s), συναρτήσει του όρου $pga4nl$ (εδαφική επιτάχυνση σε βράχο) και για διάφορες τιμές της V_{S30} παρουσιάζεται στο σχήμα 3.6. Σε μικρές περιόδους και για μεγάλες τιμές του όρου $pga4nl$, παρατηρείται σημαντική μείωση στις εδαφικές κινήσεις σε περιοχές με μικρή ταχύτητα λόγω της έντονης πλαστικοποίησης του εδάφους. Σε μεγάλες περιόδους, η μη γραμμικότητα του εδάφους είναι εξίσου σημαντική, αλλά η κίνηση του εδάφους χαρακτηρίζεται κυρίως από ενίσχυση ακόμα και για μεγάλες τιμές του όρου $pga4nl$. Για περιόδους μεγαλύτερες από 0,75s, δεν υπάρχει συνεισφορά του μη γραμμικού όρου στην ενίσχυση για $V_{S30} > 300$ m/s. Αυτό συμβαίνει διότι σε μεγάλες ταχύτητες V_{S30} το έδαφος είναι πιο σκληρό και έτσι η δυνατότητα πλαστικοποίησης του (μη γραμμικός όρος) δεν είναι πολύ μεγάλη. Σ' αυτές τις περιπτώσεις ο γραμμικός-ελαστικός όρος είναι αυτός που καθορίζει επί το πλείστον τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $pga4nl$.



Σχήμα 3.6: Συνδυασμένη ενίσχυση για $T=0,2s$ και $T=3,0s$ συναρτήσει του $pga4nl$ για διάφορες τιμές της V_{S30} . Αξίζει να σημειωθεί ότι για μικρές περιόδους (αριστερό διάγραμμα) καθαρή γραμμική ενίσχυση εμφανίζεται μόνο για $pga4nl < 0,03g$

Η εξάρτηση με την απόσταση: Η εξάρτηση της εδαφικής κίνησης με την απόσταση καθορίζεται στο πρώτο στάδιο απομείωσης, όπου η εξαρτημένη μεταβλητή απόκρισης είναι η PGA, PGV ή PSA για μία συγκεκριμένη τιμή της περιόδου. Η κάθε περίπτωση είναι τροποποιημένη ώστε να αντιστοιχεί σε ταχύτητα αναφοράς 760 m/s, αφαιρώντας

τον όρο F_S από την εξίσωση του $\ln Y_{\text{observed}}$. Οι διορθωμένες μεταβλητές απόκρισης απομειώνονται ως προς την απόσταση μέσω της εξίσωσης 14, η οποία είναι ανάλογη με την εξίσωση 2 με μόνη διαφορά τη χρήση πλασματικών μεταβλητών με σκοπό να εκφραστεί το γεγονός για κάθε σεισμό.

$$F_D (R_{JB}, M) = c_0(\text{event}) + [c_1 + c_2(M - M_{\text{ref}})] \ln(R/R_{\text{ref}}) + c_3(R - R_{\text{ref}}) \quad (14)$$

Στην εξίσωση αυτή ο όρος “ $c_0(\text{event})$ ” εκφράζεται αναλυτικά:

$$(c_0)_1 \delta_1 + (c_0)_2 \delta_2 + \dots + (c_0)_{NE} \delta_{NE} \quad (15)$$

όπου $(c_0)_j$ είναι ο όρος που εκφράζει το γεγονός j , δ_j ισούται με 1 για το γεγονός j και 0 διαφορετικά και NE είναι ο αριθμός των σεισμών.

Προσδιορισμός των υπόλοιπων συντελεστών (Πίνακας 3.7):

- c_1 : γεωμετρικός ρυθμός διάδοσης (κλίση) για ένα γεγονός με μέγεθος $M = M_{\text{ref}}$
- c_2 : μέσο για να περιγραφεί η αλλαγή στην απόσταση λόγω της εξάρτησης με το μέγεθος
- c_3 : ανελαστικός όρος που εκφράζει την καμπυλότητα
- h : ψευδοβάθος
- M_{ref} : μέγεθος αναφοράς (επιλέχθηκε μια τιμή 4,5 καθώς είναι το μέγεθος με το οποίο καθορίζονται οι λοιποί συντελεστές)
- R_{ref} : απόσταση αναφοράς (επιλέχθηκε μια τιμή 1 km καθώς γύρω από εκείνη την τιμή στρέφονται οι καμπύλες που εκφράζουν την εξάρτηση με την απόσταση)

Period	c_1	c_2	c_3	h
PGV	-0.87370	0.10060	-0.00334	2.54
PGA	-0.66050	0.11970	-0.01151	1.35
0.010	-0.66220	0.12000	-0.01151	1.35
0.020	-0.66600	0.12280	-0.01151	1.35
0.030	-0.69010	0.12830	-0.01151	1.35
0.050	-0.71700	0.13170	-0.01151	1.35
0.075	-0.72050	0.12370	-0.01151	1.55
0.100	-0.70810	0.11170	-0.01151	1.68
0.150	-0.69610	0.09884	-0.01113	1.86
0.200	-0.58300	0.04273	-0.00952	1.98
0.250	-0.57260	0.02977	-0.00837	2.07
0.300	-0.55430	0.01955	-0.00750	2.14
0.400	-0.64430	0.04394	-0.00626	2.24
0.500	-0.69140	0.06080	-0.00540	2.32
0.750	-0.74080	0.07518	-0.00409	2.46
1.000	-0.81830	0.10270	-0.00334	2.54
1.500	-0.83030	0.09793	-0.00255	2.66
2.000	-0.82850	0.09432	-0.00217	2.73
3.000	-0.78440	0.07282	-0.00191	2.83
4.000	-0.68540	0.03758	-0.00191	2.89
5.000	-0.50960	-0.02391	-0.00191	2.93
7.500	-0.37240	-0.06568	-0.00191	3.00
10.000	-0.09824	-0.13800	-0.00191	3.04

Πίνακας 3.7: Οι συντελεστές της συνάρτησης απόστασης για $M_{ref}=4,5$ και $R_{ref}=1,0km$ για όλες τις περιόδους, εκτός από την περίπτωση $R_{ref}=5,0km$ για το pga_{nl}

Η εξάρτηση με το μέγεθος (Πίνακας 3.8):

- M_h : εξαρτώμενο μέγεθος
- $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7$: συντελεστές στην συνάρτηση μεγέθους

Τυχαίες αβεβαιότητες (Πίνακας 3.9): Στην εξίσωση του $\ln Y$ περιλαμβάνονται η τυχαία αβεβαιότητα του ένδο-γεγονότος “σ” η οποία υπολογίζεται στο πρώτο στάδιο απομείωσης και η τυχαία αβεβαιότητα μεταξύ των γεγονότων “τ” που υπολογίζεται στο δεύτερο. Η τυχαία αβεβαιότητα “τ” λαμβάνει λίγο διαφορετικές τιμές ανάλογα με

τον τύπο του ρήγματος και για αυτό διακρίνεται σε τ_U (για αδιευκρίνιστο ρήγμα) τ_M (για συγκεκριμένο τύπο ρήγματος).

Συμπεράσματα: Όλοι οι συντελεστές που διευκρινίστηκαν παραπάνω χρησιμοποιούνται στην εξίσωση του $\ln Y$ (εξίσωση 1). Η μεταβλητή Y έχει μονάδες g για την PSA και cm/s για την PGV. Οι μονάδες της απόστασης και της ταχύτητας είναι km και m/s αντίστοιχα. Η εξίσωση για τον όρο pga_{4nl} είναι ίδια μ'αυτήν της PGA με $V_{s30} > 760m/s$ (για την οποία $F_S=0$).

Period	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	M_h
PGV	5.00121	5.04727	4.63188	5.08210	0.18322	-0.12736	0.00000	8.50
PGA	-0.53804	-0.50350	-0.75472	-0.50970	0.28805	-0.10164	0.00000	6.75
0.010	-0.52883	-0.49429	-0.74551	-0.49966	0.28897	-0.10019	0.00000	6.75
0.020	-0.52192	-0.48508	-0.73906	-0.48895	0.25144	-0.11006	0.00000	6.75
0.030	-0.45285	-0.41831	-0.66722	-0.42229	0.17976	-0.12858	0.00000	6.75
0.050	-0.28476	-0.25022	-0.48462	-0.26092	0.06369	-0.15752	0.00000	6.75
0.075	0.00767	0.04912	-0.20578	0.02706	0.01170	-0.17051	0.00000	6.75
0.100	0.20109	0.23102	0.03058	0.22193	0.04697	-0.15948	0.00000	6.75
0.150	0.46128	0.48661	0.30185	0.49328	0.17990	-0.14539	0.00000	6.75
0.200	0.57180	0.59253	0.40860	0.61472	0.52729	-0.12964	0.00102	6.75
0.250	0.51884	0.53496	0.33880	0.57747	0.60880	-0.13843	0.08607	6.75
0.300	0.43825	0.44516	0.25356	0.51990	0.64472	-0.15694	0.10601	6.75
0.400	0.39220	0.40602	0.21398	0.46080	0.78610	-0.07843	0.02262	6.75
0.500	0.18957	0.19878	0.00967	0.26337	0.76837	-0.09054	0.00000	6.75
0.750	-0.21338	-0.19496	-0.49176	-0.10813	0.75179	-0.14053	0.10302	6.75
1.000	-0.46896	-0.43443	-0.78465	-0.39330	0.67880	-0.18257	0.05393	6.75
1.500	-0.86271	-0.79593	-1.20902	-0.88085	0.70689	-0.25950	0.19082	6.75
2.000	-1.22652	-1.15514	-1.57697	-1.27669	0.77989	-0.29657	0.29888	6.75
3.000	-1.82979	-1.74690	-2.22584	-1.91814	0.77966	-0.45384	0.67466	6.75
4.000	-2.24656	-2.15906	-2.58228	-2.38168	1.24961	-0.35874	0.79508	6.75
5.000	-1.28408	-1.21270	-1.50904	-1.41093	0.14271	-0.39006	0.00000	8.50
7.500	-1.43145	-1.31632	-1.81022	-1.59217	0.52407	-0.37578	0.00000	8.50
10.000	-2.15446	-2.16137	-2.53323	-2.14635	0.40387	-0.48492	0.00000	8.50

Πίνακας 3.8: Συντελεστές στη συνάρτηση μεγέθους

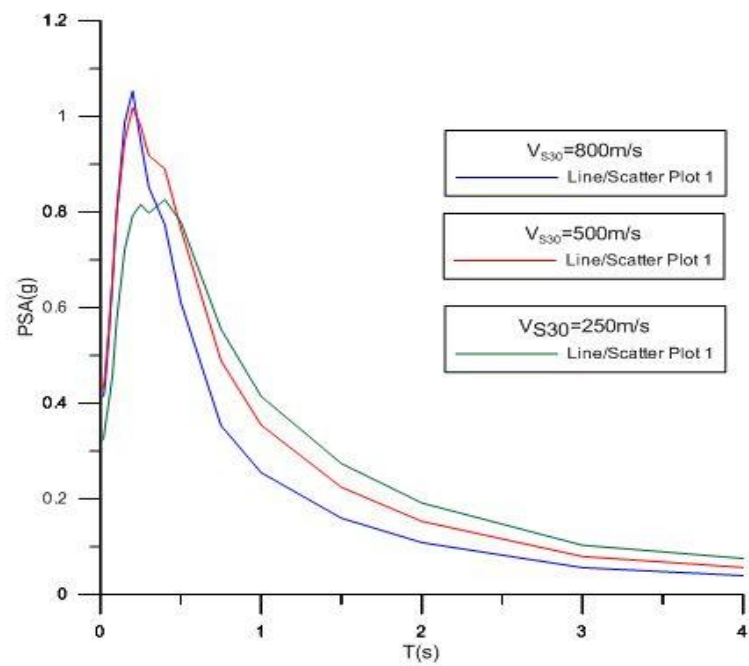
Period	σ	τ_U	σ_{TU}	τ_M	σ_{TM}
PGV	0.500	0.286	0.576	0.256	0.560
PGA	0.502	0.265	0.566	0.260	0.564
0.010	0.502	0.267	0.569	0.262	0.566
0.020	0.502	0.267	0.569	0.262	0.566
0.030	0.507	0.276	0.578	0.274	0.576
0.050	0.516	0.286	0.589	0.286	0.589
0.075	0.513	0.322	0.606	0.320	0.606
0.100	0.520	0.313	0.608	0.318	0.608
0.150	0.518	0.288	0.592	0.290	0.594
0.200	0.523	0.283	0.596	0.288	0.596
0.250	0.527	0.267	0.592	0.267	0.592
0.300	0.546	0.272	0.608	0.269	0.608
0.400	0.541	0.267	0.603	0.267	0.603
0.500	0.555	0.265	0.615	0.265	0.615
0.750	0.571	0.311	0.649	0.299	0.645
1.000	0.573	0.318	0.654	0.302	0.647
1.500	0.566	0.382	0.684	0.373	0.679
2.000	0.580	0.398	0.702	0.389	0.700
3.000	0.566	0.410	0.700	0.401	0.695
4.000	0.583	0.394	0.702	0.385	0.698
5.000	0.601	0.414	0.730	0.437	0.744
7.500	0.626	0.465	0.781	0.477	0.787
10.000	0.645	0.355	0.735	0.477	0.801

Πίνακας 3.9: Τυχαίες αβεβαιότητες(σ: αβεβαιότητα ένδο-γεγονότος; τ:αβεβαιότητα μεταξύ των γεγονότων; $\sigma_\tau = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}$:συνδυασμένη αβεβαιότητα U,M όροι που αναφέρονται σε αδιευκρίνιστο και συγκεκριμένο τύπο ρήγματος.

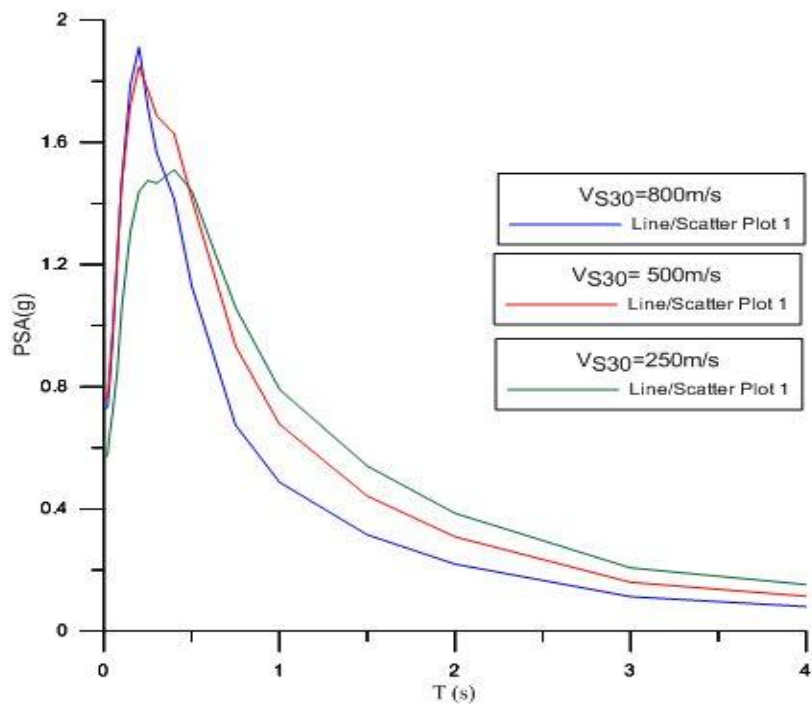
3.6 Εφαρμογή του μοντέλου Boore & Atkinson στην περιοχή της Βοιωτίας.

Στην παρούσα διπλωματική εφαρμόστηκε το μοντέλο Boore & Atkinson στο νομό Βοιωτίας, για τα ρήγματα που παρουσιάστηκαν στο πρώτο κεφάλαιο. Υπολογίζοντας την επιφανειακή απόσταση των περιοχών από το κοντινότερο, σ' αυτές, ρήγμα (R_{JB}) και χρησιμοποιώντας το πιθανό μέγεθος σεισμού του εκάστοτε ρήγματος (M), προέκυψαν τα φάσματα επιτάχυνσης με 5% απόσβεση. Η διαδικασία αυτή έγινε για τρεις διαφορετικές κατηγορίες εδάφους σύμφωνα με τον EC8 (τρεις διαφορετικές τιμές της ταχύτητας V_{S30}) με και χωρίς τυπική απόκλιση. Για τη διευκόλυνση των μετέπειτα υπολογισμών, παρουσιάζονται και χρησιμοποιούνται και στα επόμενα κεφάλαια τρεις ενδεικτικές αποστάσεις-0, 5 και 10 km- καθώς επίσης χρησιμοποιείται το μεγαλύτερο πιθανό μέγεθος σεισμού (του ρήγματος Ασωπού όπου $M=6,8$). Όλα τα φάσματα παρατίθενται στο παράρτημα της παρούσας διπλωματικής.

- Απόσταση 0 km:

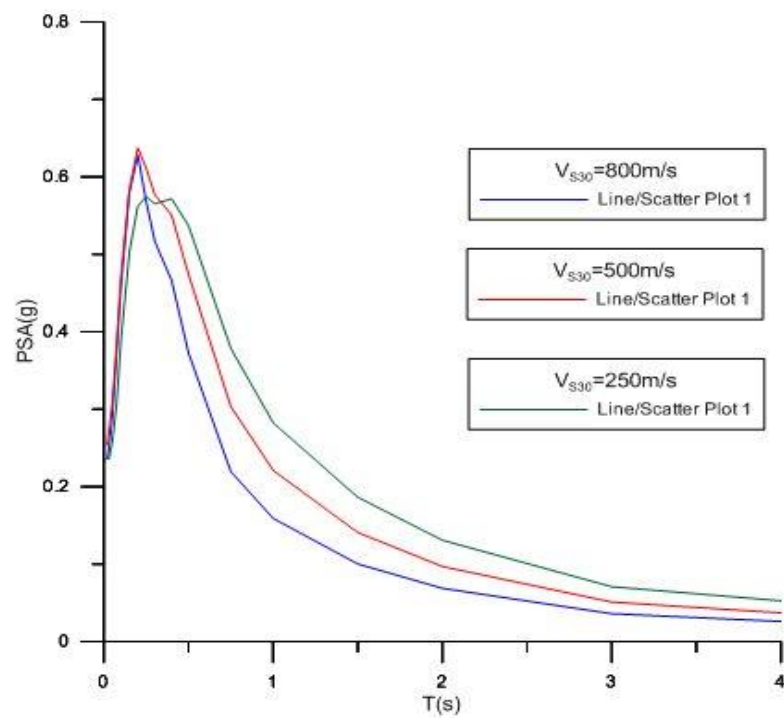


Χωρίς τυπική απόκλιση

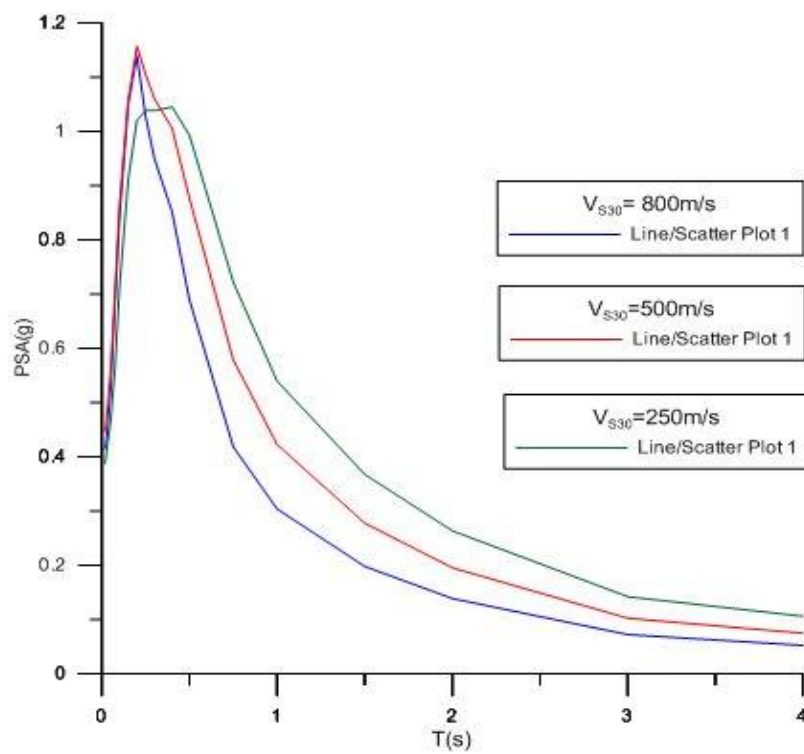


Με τυπική απόκλιση

♣ Απόσταση 5 km:

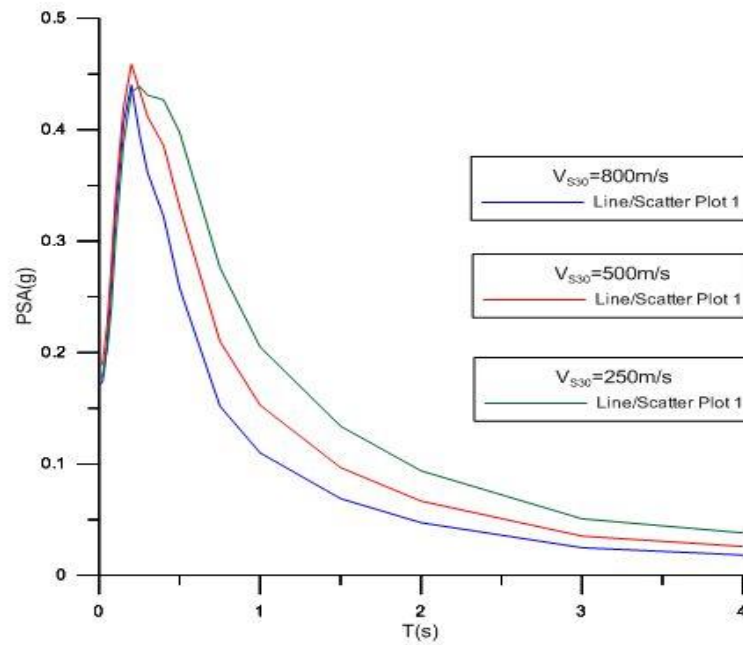


Χωρίς τυπική απόκλιση

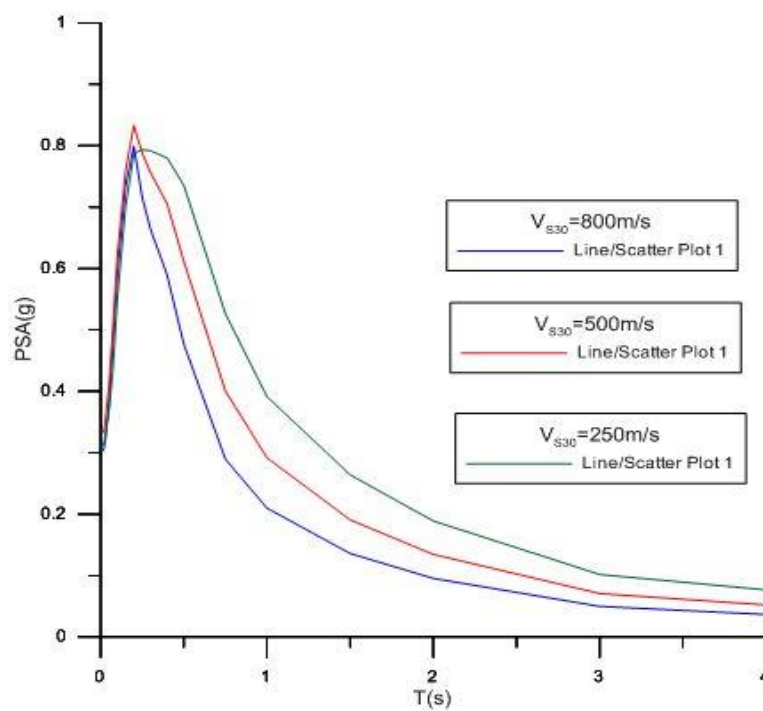


Με τυπική απόκλιση

♣ Απόσταση 10 km:



Χωρίς τυπική απόκλιση



Με τυπική απόκλιση

- **Έδαφος A:** $V_{S30} = 800 \text{ m/s}$
- **Έδαφος B:** $V_{S30} = 500 \text{ m/s}$
- **Έδαφος C:** $V_{S30} = 250 \text{ m/s}$

Παρατηρήσεις αποτελεσμάτων:

- ⤴ Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, σε μηδενική απόσταση οι τιμές των εδαφικών επιταχύνσεων είναι αισθητά μεγαλύτερες από την απόσταση των 10 km. Για παράδειγμα, παρατηρούμε ότι στην ίδια κατηγορία εδάφους και λαμβάνοντας υπόψη την τυπική απόκλιση, ανάμεσα στα 0 και 10 km εμφανίζονται διαφορές που φτάνουν μέχρι και 0,4g (στην κατηγορία εδάφους A έχουμε στα 0 km εδαφική επιτάχυνση περίπου 0,71g ενώ στα 10 km 0,3g).
- ⤴ Επιπροσθέτως, αξίζει να σημειωθεί η έντονη διαφοροποίηση των τιμών της φασματικής επιτάχυνσης λαμβάνοντας υπόψη την τυπική απόκλιση. Παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές στα φάσματα με τυπική απόκλιση με διαφορές που φτάνουν ακόμα και τα 0,8g.
- ⤴ Η σημαντικότερη παρατήρηση που προκύπτει από τα διαγράμματα είναι η επιρροή της ανελαστικής συμπεριφοράς του εδάφους σύμφωνα με το μοντέλο των Boore & Atkinson. Χαρακτηριστικά, στην απόσταση των 0 km, όπου το φαινόμενο της πλαστικοποίησης είναι πιο έντονο, παρατηρούμε ότι το έδαφος C παρουσιάζει αισθητά μικρότερη επιτάχυνση σε μικρές περιόδους συγκριτικά με τους άλλους τύπους εδαφών. Αυτό συμβαίνει λόγω του μη γραμμικού όρου, ο οποίος προκαλεί σημαντικές μειώσεις στις εδαφικές κινήσεις σε μικρές περιόδους και σε μικρές ταχύτητες (έδαφος C- $V_{S30}=250\text{m/s}$). Αντίθετα, στις μεγαλύτερες περιόδους, το έδαφος C έχει μεγαλύτερες τιμές στο φάσμα επιταχύνσεων, συγκριτικά με τους άλλους τύπους εδαφών (με μεγαλύτερη ταχύτητα V_{S30}), λόγω της πλαστικοποίησης του. Η επιρροή του μη γραμμικού όρου γίνεται αντιληπτή και από τα υπόλοιπα διαγράμματα, όπου παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει η απόσταση (και άρα τα φαινόμενο της πλαστικοποίησης είναι πιο ήπιο) τόσο μειώνεται η διαφορά των τιμών των επιταχύνσεων ανάμεσα στους τύπους εδαφών στις μικρές περιόδους.

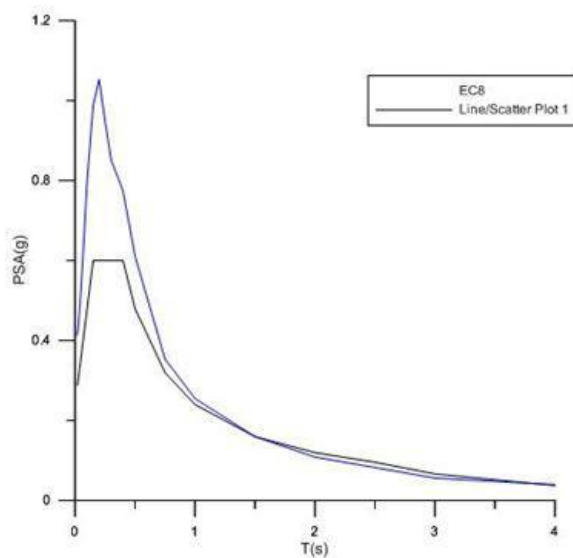
3.7 Σύγκριση με το φάσμα επιτάχυνσης του EC8

Παρακάτω συγκρίνονται τα φάσματα που εξήγαμε με το μοντέλο των Boore & Atkinson με τα φάσματα επιτάχυνσης με 5% απόσβεση που προτείνει ο EC8 για κάθε τύπο εδάφους. Η Βοιωτία ανήκει στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας 2 (Z2) καθώς επίσης θεωρήσαμε κατηγορία σπουδαιότητας 2, η οποία αντιστοιχεί σε συνήθεις κατασκευές.

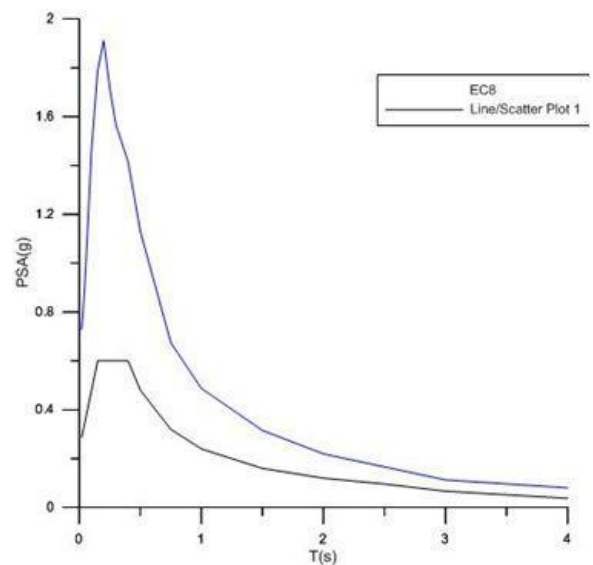
Έδαφος Α

•Απόσταση 0 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση

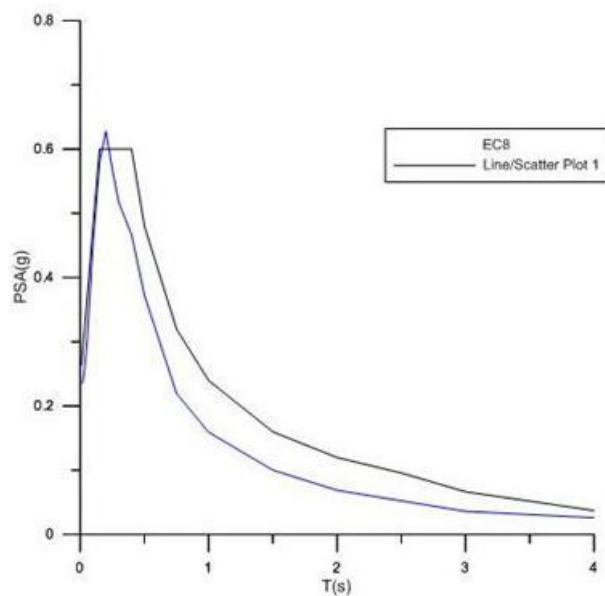


Με τυπική απόκλιση

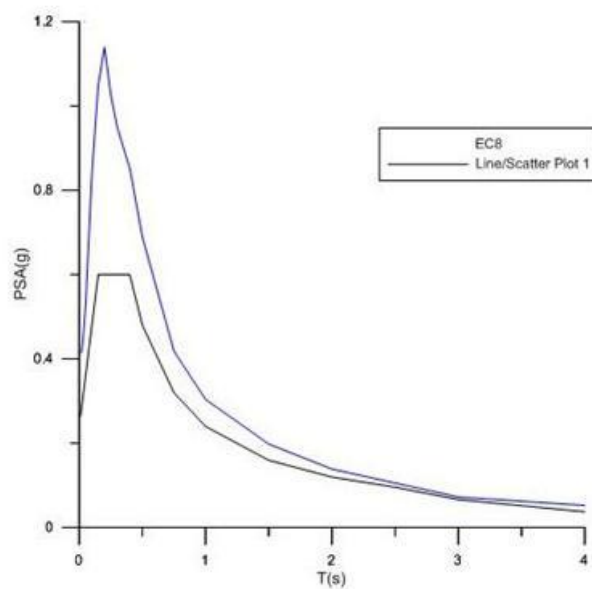


• Απόσταση 5 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση

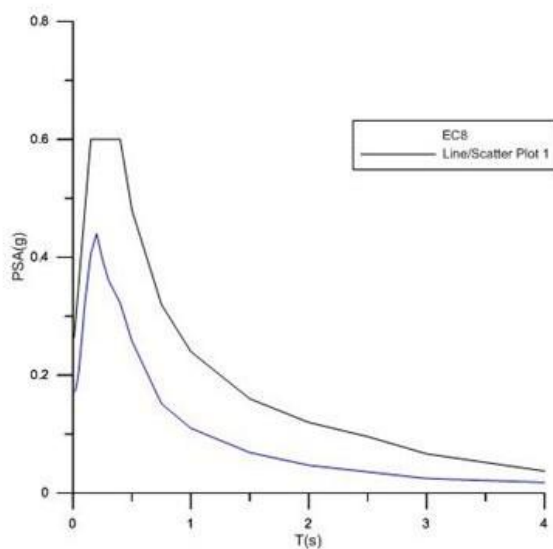


Με τυπική απόκλιση

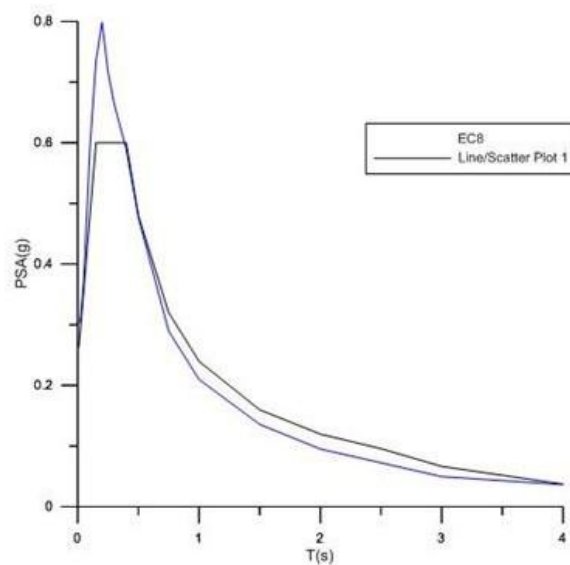


• Απόσταση 10 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση

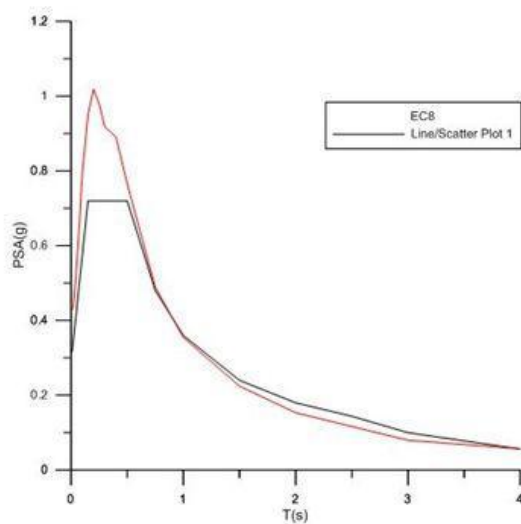


Με τυπική απόκλιση

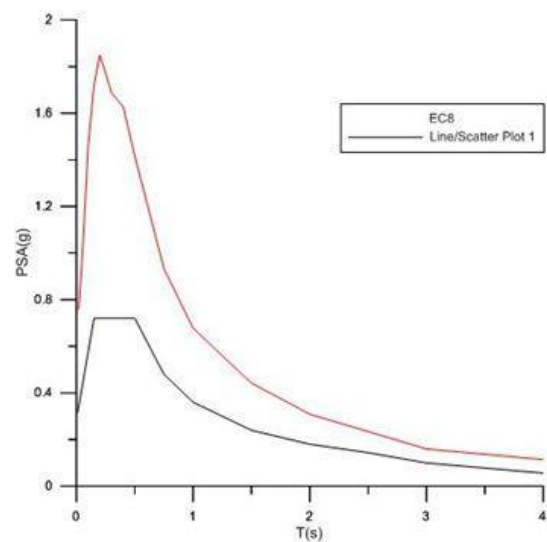


Έδαφος Β

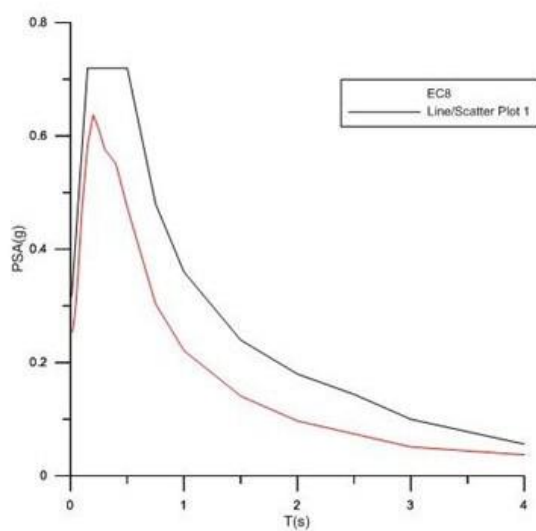
•Απόσταση 0 km:
Χωρίς τυπική απόκλιση



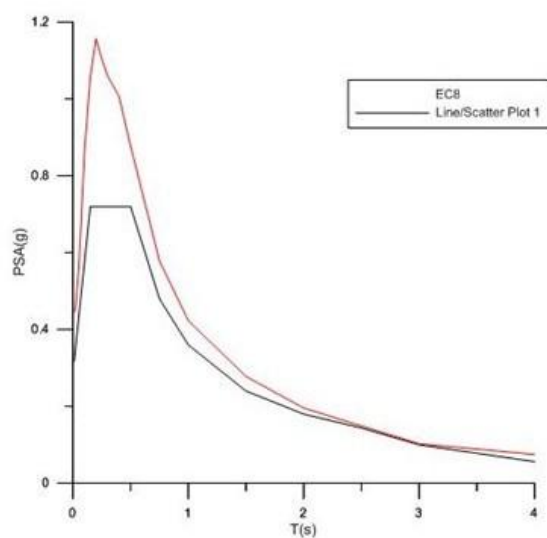
Με τυπική απόκλιση



•Απόσταση 5 km:
Χωρίς τυπική απόκλιση

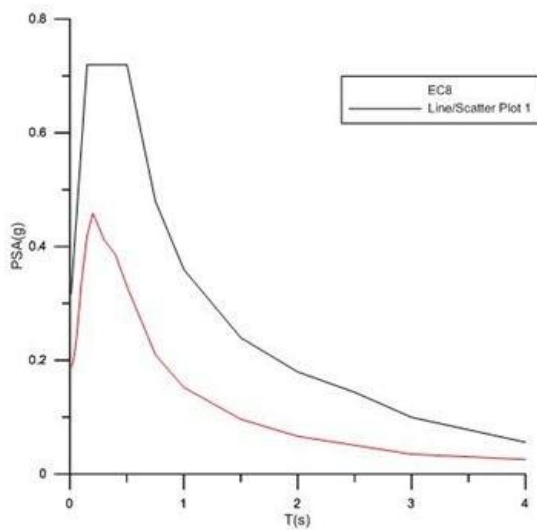


Με τυπική απόκλιση

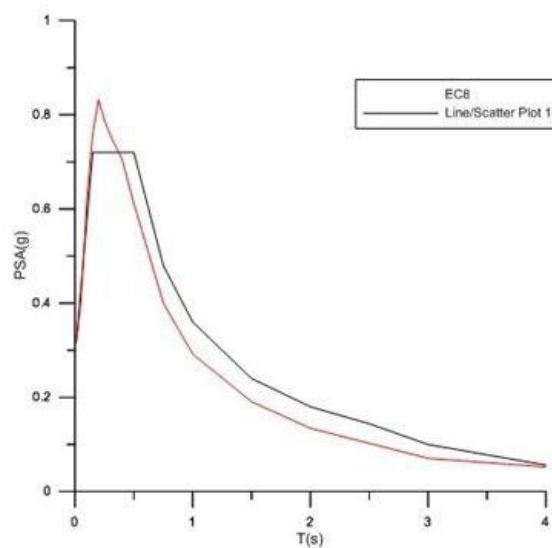


•Απόσταση 10 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση



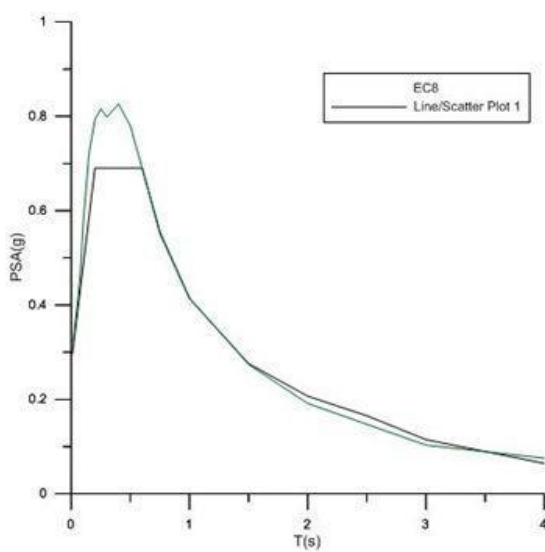
Με τυπική απόκλιση



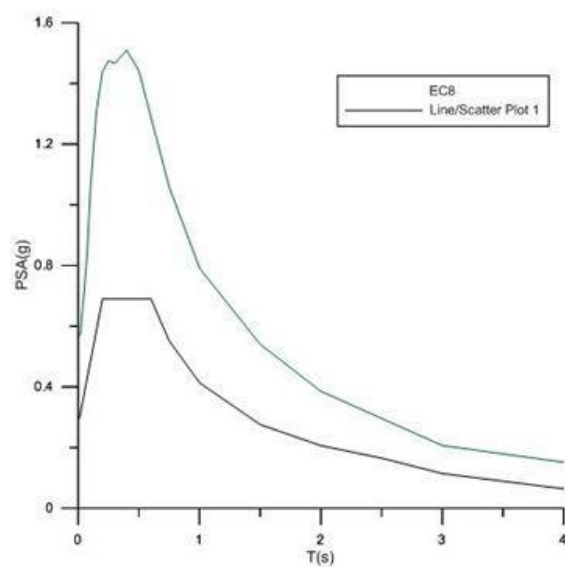
Έδαφος C

•Απόσταση 0 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση

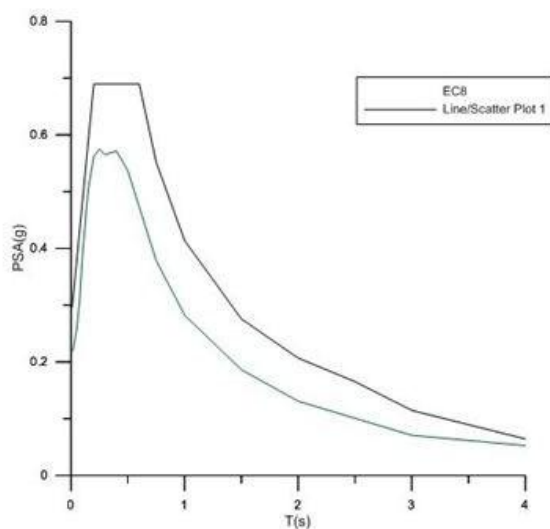


Με τυπική απόκλιση

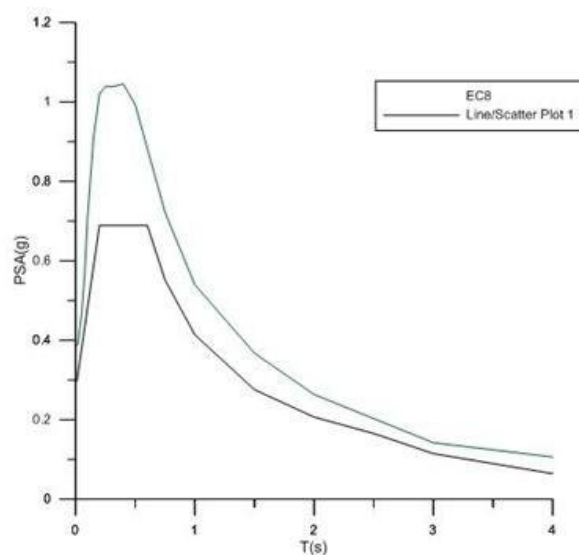


•Απόσταση 5 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση

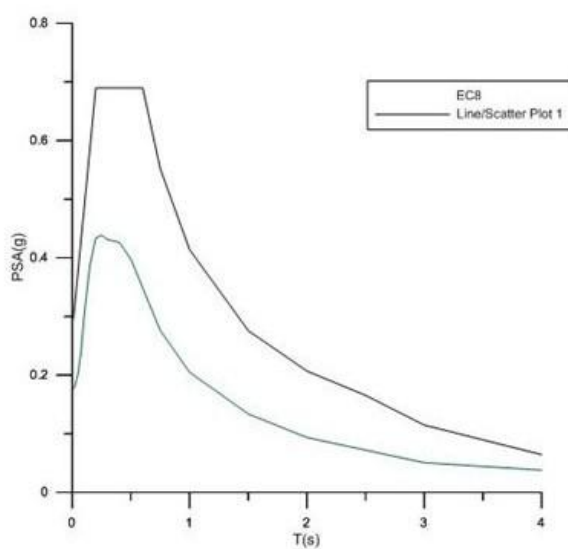


Με τυπική απόκλιση

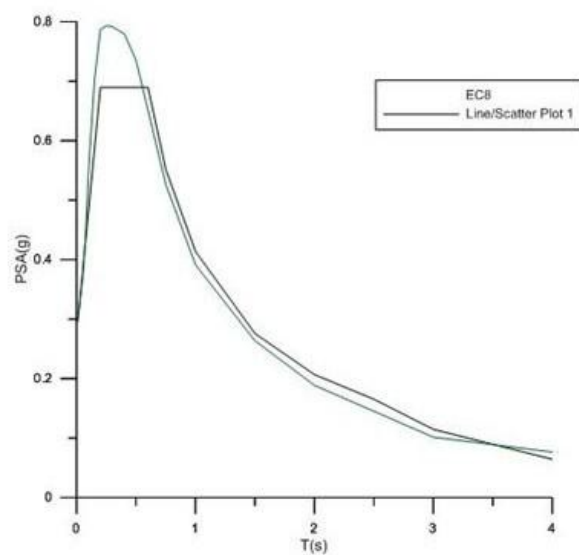


•Απόσταση 10 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση



Με τυπική απόκλιση



Παρατηρήσεις αποτελεσμάτων:

- ☐ Παρόμοιες τιμές με τα φάσματα του EC8 παρουσιάζουν τα φάσματα χωρίς τυπική απόκλιση στην απόσταση των 5 km.

Κεφάλαιο 4

ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ-MONTELO SHAHI & BAKER

4.1 Εισαγωγή

4.2 Το μοντέλο προσομοίωσης των Shahi & Baker για το κοντινό πεδίο

4.2.1 Αναγνώριση της ύπαρξης παλμικής κίνησης

4.2.2 Ανάπτυξη μοντέλων για την τροποποίηση της πιθανοτικής ανάλυσης σεισμικού κινδύνου

4.2.3 Περίοδος παλμού

4.2.4 Επαύξηση της φασματικής επιτάχυνσης λόγω του παλμού κατευθυντικότητας

4.3 Εφαρμογή του μοντέλου Shahi & Baker

4.4 Σύγκριση με το φάσμα επιτάχυνσης του EC8

4.1 Εισαγωγή

Ανά τα χρόνια αρκετοί ερευνητές ανέπτυξαν μοντέλα προσομοίωσης της εδαφικής κίνησης για σεισμούς κοντινού πεδίου. Στη παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο των Shahi & Baker(2011), βασικό στοιχείο του οποίου είναι ότι λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της κατευθυντικότητας.

Οι Shahi & Baker (2011) προτείνουν μια μέθοδο ενσωμάτωσης των φαινομένων κοντινού πεδίου στις εξισώσεις πιθανοτικής ανάλυσης σεισμικού κινδύνου. Επίσης, παρουσιάζουν μια νέα μέθοδο 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 τον προσδιορισμό 179 καταγραφών της Νέας Γενίας Μοντέλων Απομείωσης (NGA) , όπου μία παλμική κίνηση παρατηρείται το λιγότερο σε μία διεύθυνση. Οι πληροφορίες από τις καταγραφές αυτές, χρησιμοποιήθηκαν ώστε να εκτιμηθούν τα εξής:

- η πιθανότητα εμφάνισης παλμικής κίνησης σε μία περιοχή
- η διεύθυνση εμφάνισης του παλμού σε σχέση με τη διεύθυνση του ρήγματος
- η περίοδος της παλμικής κίνησης
- η ενίσχυση του φάσματος απόκρισης λόγω της παρουσίας του παλμού

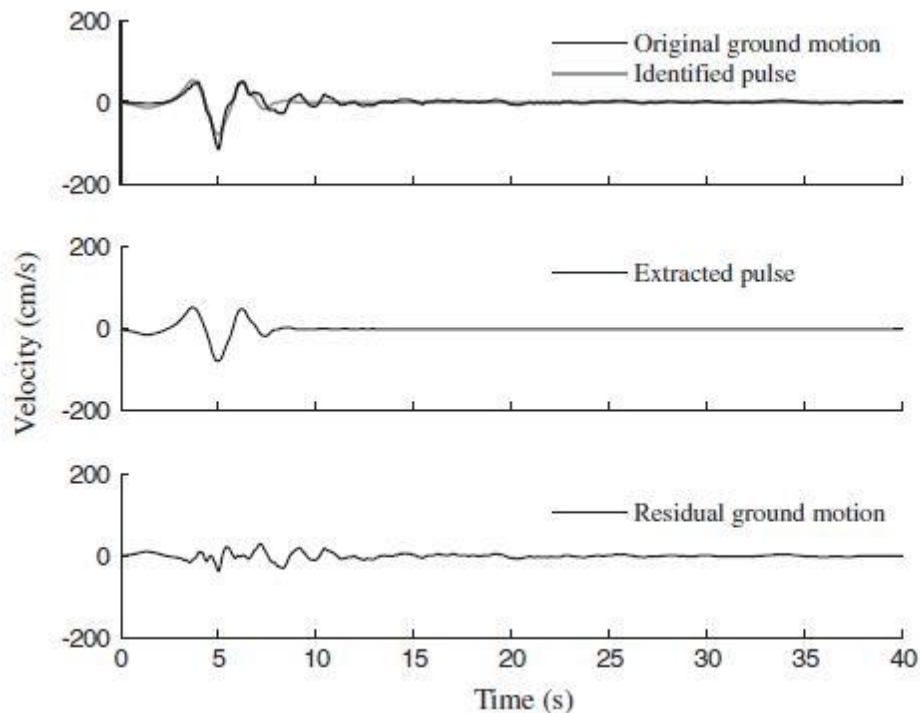
Οι εδαφικές κινήσεις με παρουσία παλμού στην αρχή της χρονοϊστορίας της ταχύτητας, ανήκουν σε μια ειδική κατηγορία εδαφικών κινήσεων που προκαλούν πολλές καταστροφές στις κατασκευές. Αυτό το είδος εδαφικής κίνησης, το οποίο στην έρευνα των Shahi & Baker (2011) αναφέρεται ως παλμική κίνηση, παρατηρείται συνήθως σε περιοχές που βρίσκονται κοντά στο ρήγμα και θεωρείται ότι προκαλείται κατά κύριο λόγο εξαιτίας του φαινομένου της έμπροσθεν κατευθυντικότητας. 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. Συνεπώς, κρίθηκε σημαντικό να μοντελοποιηθούν οι επιδράσεις της εν λόγω κίνησης, ενσωματώνοντας το φαινόμενο της κατευθυντικότητας, ώστε να εκτιμηθεί σωστά ο σεισμικός κίνδυνος. Η μόνιμη παραμένουσα μετακίνηση του εδάφους (fling step) αποτελεί ακόμα ένα χαρακτηριστικό του κοντινού πεδίου αλλά δεν προσμετράται στο μοντέλο των Shahi & Baker. Στο παρελθόν έγιναν πολλές προσπάθειες ενσωμάτωσης της επίδρασης του παλμού κοντινού πεδίου στην εκτίμηση

του σεισμικού κινδύνου. Σ' αυτές δόθηκε έμφαση στη μοντελοποίηση της ενίσχυσης του φάσματος απόκρισης είτε αυξάνοντας ή μειώνοντας μονοτονικά τις φασματικές συντεταγμένες σε ένα εύρος περιόδων (Somerville et al. 1997, Abrahamson 2000) είτε ενισχύοντας το φάσμα απόκρισης σ' ένα στενό εύρος περιόδων κοντά στην περίοδο του παλμού (Somerville 2005, Tothong et al. 2007). Τα πρώτα μοντέλα αναφέρονται συνήθως ως μοντέλα με ευρεία ζώνη ενώ τα δεύτερα ως μοντέλα με στενή ζώνη. Η μελέτη των Shahi & Baker επεκτείνει την προσέγγιση των Tothong et al. 2007 και χρησιμοποιεί επιπρόσθετα μοντέλα περιοριζόμενων καταγραφών, αντί για τα παλαιότερα 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 γύρω από την περίοδο του παλμού. Παρόλα αυτά, δε μπορούν να γίνουν υποθέσεις εκ των προτέρων όσον αφορά το εύρος των περιόδων που ενισχύονται και το μέγεθος της ενίσχυσης. Το μοντέλο προέκυψε εντελώς εμπειρικά και αποτελεί μια τροποποίηση του αλγόριθμου του Baker (2007). Ο χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος περιστρέφει την εδαφική κίνηση και εντοπίζει τον παλμό, όχι μόνο στη κάθετη αλλά σε όλες τις διευθύνσεις. Αυτή η διαφοροποίηση επιτρέπει την αναγνώριση των παλμών της ταχύτητας σε τυχαίες διευθύνσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται στη βαθμονόμηση των μοντέλων πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης.

4.2 Το μοντέλο προσομοίωσης των Shahi & Baker για το κοντινό πεδίο

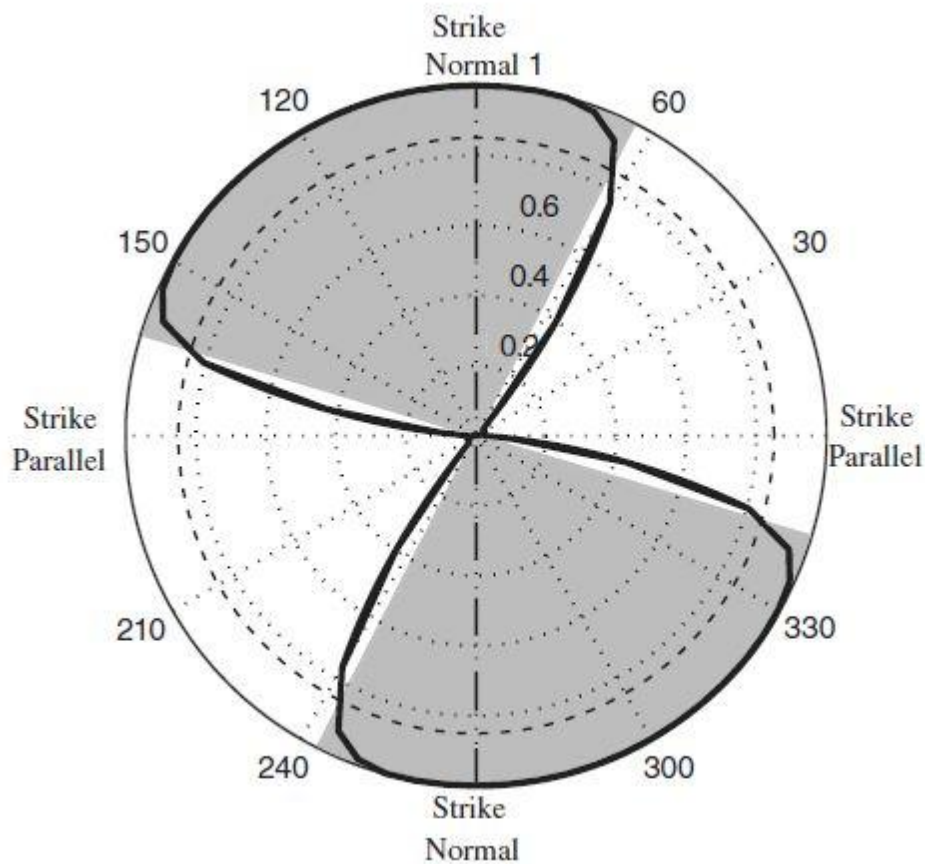
4.2.1 Αναγνώριση της ύπαρξης παλμικής κίνησης

Στην προκείμενη έρευνα χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος που παρουσιάστηκε από τον Baker (2007) για την κατηγοριοποίηση της εδαφικής κίνησης σε παλμική ή μη καθώς αποτελεί μια εντελώς ποσοτική μέθοδο και επιτρέπει την κατηγοριοποίηση πολλών δεδομένων όπως αυτά της NGA. 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 σε παλμική ή μη. Μολονότι η κατηγοριοποίηση ορισμένων καταγραφών είναι δύσκολη λόγω της δυαδικότητας της μεθόδου, ο εν λόγω αλγόριθμος είναι γενικά ικανός να δώσει βάσιμα αποτελέσματα. Στο σχήμα 4.1 απεικονίζονται γραφικά τα αποτελέσματα του αλγορίθμου.



Σχήμα 4.1: Απεικόνιση της διαδικασίας που χρησιμοποιήθηκε από τον Baker (2007) για την αποκοπή του μεγαλύτερου παλμού από την χρονοϊστορία της ταχύτητας (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, εξαιτίας της ανώμαλης γεωμετρίας, καθιστάται δύσκολος ο προσδιορισμός της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας και οι παλμικές κινήσεις παρατηρούνται σ' ένα ευρύ φάσμα διευθύνσεων γύρω από το ρήγμα (Howard et al. 2005). Το σχήμα 4.2 δείχνει το συντελεστή εμφάνισης παλμού, όπως αυτός παρουσιάστηκε από τον Baker (2007) σε διάφορες διευθύνσεις γύρω από μία περιοχή. Όπως φαίνεται από το σχήμα, οι παλμικές κινήσεις έχουν μεγάλες τιμές του συντελεστή εμφάνισης παλμού καθώς επίσης παρατηρούνται σε ένα εύρος διευθύνσεων. Η συγκεκριμένη περίπτωση αποτελεί την απλή περίπτωση εμφάνισης παλμού γύρω από την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα ενώ πιο περίπλοκες περιπτώσεις υφίστανται όταν η διεύθυνση της κάθετης συνιστώσας δεν βρίσκεται στο εύρος διευθύνσεων όπου παρατηρούνται οι παλμοί (οι εν λόγω περιπτώσεις είναι μικρές σε αριθμό).



Σχήμα 4.2: Τιμές συντελεστή εμφάνισης παλμού συναρτήσει της διεύθυνσης (σεισμός του Imperial Valley, El Centro 1979). Η γραμμοσκιασμένες περιοχές υποδεικνύουν τις διευθύνσεις στις οποίες η παλμική κίνηση είναι εμφανής.

Προκειμένου να μελετηθούν οι διευθύνσεις εμφάνισης παλμικής κίνησης, οι καταγεγραμμένες εδαφικές κινήσεις περιστράφηκαν σε όλες τις διευθύνσεις και για κάθε μία διεύθυνση κατηγοριοποιήθηκαν ως παλμικές ή μη. Μια θέση, λοιπόν, θεωρείται ότι μπορεί να εμφανίσει παλμική κίνηση εάν έστω και μία εδαφική κίνηση σε οποιαδήποτε διεύθυνση είναι παλμική. Αυτό το μοντέλο περιστροφής και κατηγοριοποίησης εδαφικών κινήσεων σε κάθε διεύθυνση οδήγησε στην κατηγοριοποίηση των 179 καταγραφών της NGA, οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ως παλμικές. Η συγκεκριμένη μέθοδος 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.

4.2.2 Ανάπτυξη μοντέλων για την τροποποίηση της πιθανοτικής ανάλυσης σεισμικού κινδύνου

Η συμβατική εξίσωση της πιθανοτικής ανάλυσης σεισμικού κινδύνου είναι:

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

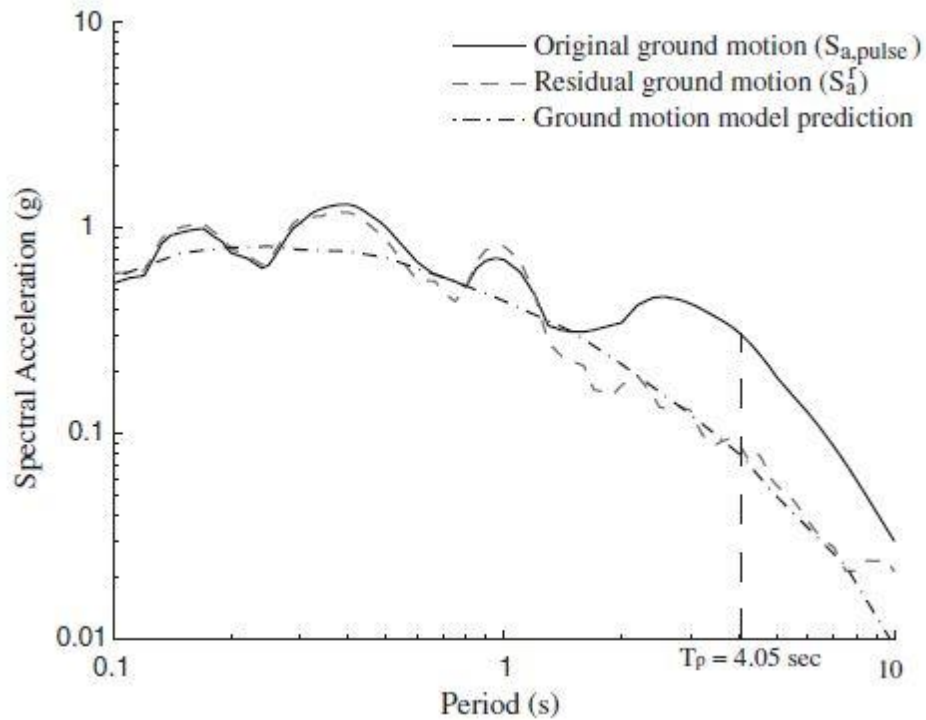
η οποία χρησιμοποιείται για την εύρεση του ετήσιου ρυθμού με τον οποίο η φασματική επιτάχυνση S_a , σε μία θέση, υπερβαίνει την τιμή x . Ο όρος $P(S_a > x | m, r)$ δίνει την πιθανότητα η S_a σε μία συγκεκριμένη περίοδο, να υπερβεί την τιμή x , δεδομένου ενός σεισμού μεγέθους m σε απόσταση r . Αυτή η πιθανότητα, εάν πολλαπλασιαστεί με την πυκνότητα πιθανότητας εμφάνισης ενός σεισμού μεγέθους m σε απόσταση r , $f_i(m, r)$, σε συγκεκριμένο ρήγμα i και ολοκληρωθεί για όλες τις πιθανές τιμές των m και r , δίνει την πιθανότητα υπέρβασης ενός σεισμού του ρήγματος αυτού. Ο συνολικός ρυθμός υπέρβασης μιας θέσης μπορεί να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας αυτή την πιθανότητα με το ρυθμό εμφάνισης σεισμών στο ρήγμα, ν_i , και αθροίζοντας για κάθε ρήγμα στην περιοχή της θέσης.

Οι επιδράσεις της παλμικής κίνησης μπορούν να συμπεριληφθούν στην ανάλυση σεισμικού κινδύνου χρησιμοποιώντας ένα τροποποιημένο μοντέλο εδαφικής κίνησης, το οποίο συνυπολογίζει την ενίσχυση των παλμών κατευθυντικότητας στις τιμές της φασματικής επιτάχυνσης. Επειδή οι επιδράσεις της κατευθυντικότητας εξαρτώνται κυρίως από τη γεωμετρία της πηγής και τη θέση καταγραφής, το εδαφικό μοντέλο που υπολογίζει τους παλμούς πρέπει να είναι συνάρτηση και της γεωμετρίας πέρα από το μέγεθος και την απόσταση. Με τη χρήση του μοντέλου αυτού, υπολογίζεται η πιθανότητα υπέρβασης $P^*(S_a > x | m, r, z)$ όπου το z εκφράζει τη γεωμετρία της περιοχής. Αυτή η νέα πιθανότητα υπέρβασης όταν χρησιμοποιηθεί στην εξίσωση της πιθανοτικής ανάλυσης, μπορεί να δώσει το ρυθμό υπέρβασης της S_a σε μία θέση, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των παλμικών κινήσεων.

Η κατευθυντικότητα συμπεριλαμβάνεται στον υπολογισμό της φασματικής επιτάχυνσης μέσω της εξίσωσης:

$$\nu_{S_a}(x) = \sum_{i=1}^{\# \text{faults}} \nu_i \iiint P^*(S_a > x | m, r, z) \cdot f_i(m, r, z) \cdot dm \cdot dr \cdot dz. \quad (2)$$

Η παρουσία ενός παλμού στην εδαφική κίνηση ενισχύει το φάσμα απόκρισης σ' ένα εύρος περιόδων όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3. Αυτή η ενίσχυση του φάσματος αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα υπέρβασης μιας συγκεκριμένης τιμής της S_a , όταν έχουμε παλμικές κινήσεις. Για το λόγο αυτό, η εξίσωση (2) μπορεί να προκύψει διαχωρίζοντας την πιθανότητα $P^*(S_a > x | m, r, z)$ σε δύο περιπτώσεις ανάλογα με την ύπαρξη ή μη παλμικής κίνησης. Οι συγκεκριμένες περιπτώσεις μπορούν αργότερα να συνδυαστούν ώστε να υπολογισθεί ο συνολικός ρυθμός υπέρβασης.



Σχήμα 4.3: Φάσμα απόκρισης από το σεισμό Imperial Valley, El Centro 1979 της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας. Παρουσιάζονται επίσης η μέση πρόβλεψη των Boore & Atkinson (2007) και το φάσμα απόκρισης της απομένουσας εδαφικής κίνησης.

Τα ισχύοντα μοντέλα πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης είναι εμπειρικά, χρησιμοποιώντας παλμικές και μη παλμικές κινήσεις από μία βάση δεδομένων. Στην περιοχή κοντινού πεδίου, όπου παρουσιάζονται κυρίως οι παλμοί, τα εδαφικά μοντέλα μπορεί να υποεκτιμούν την παλμική εδαφική κίνηση και να υπερεκτιμούν τη μη παλμική. Όταν παρατηρείται κάποιος παλμός, η πρόβλεψη υπέρβασης της φασματικής επιτάχυνσης μπορεί να δοθεί από την εξής σχέση:

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

όπου οι παλμικές κινήσεις έχουν μέση τιμή $\mu_{\ln S_a, \text{pulse}}$ και τυπική απόκλιση $\sigma_{\ln S_a, \text{pulse}}$.

Όταν δεν παρατηρείται παλμός, για τον υπολογισμό της υπέρβασης της φασματικής επιτάχυνσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα τροποποιημένο μοντέλο αφού πρωτίστως γίνει διόρθωση για την υπερεκτίμηση της κίνησης:

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

όπου η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση μπορούν να προσδιορισθούν χρησιμοποιώντας ένα τροποποιημένο μοντέλο εδαφικής κίνησης για μη παλμικές κινήσεις. Στις εξισώσεις (3) και (4) ο όρος $\Phi()$ αντιπροσωπεύει την τυπική κανονική αθροιστική συνάρτηση κατανομής. Υποτέθηκε κανονική κατανομή υπολοίπων ενώ τα ιστογράμματα υπολοίπων είναι συμβατά με αυτήν την υπόθεση.

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

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

Όπως φαίνεται στην εξίσωση (5), η πιθανότητα ύπαρξης παλμικής κίνησης σε μία περιοχή είναι απαραίτητη για την εξίσωση πιθανοτικής ανάλυσης σεισμικού κινδύνου που προτείνεται από τους Shahi & Baker. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για τον προσδιορισμό της πιθανότητας εμφάνισης παλμού δεδομένης της γεωμετρίας της περιοχής και της θέσης καταγραφής.

Είναι ευρέως αποδεδειγμένο ότι το φαινόμενο της έμπροσθεν κατευθυντικότητας εξαρτάται από τη γεωμετρία της περιοχής. Οι Iervolino και Cornell (2008) απέδειξαν ότι οι παράμετροι r , s και θ , για ρήγματα οριζοντίου διάρρηξης, και r , d και ϕ , για τους άλλους τύπους ρηγμάτων, έχουν μεγαλύτερη ισχύ στη λογιστική παλινδρόμηση για τον προσδιορισμό τη εμφάνισης παλμού απ' ότι άλλες παράμετροι. Το σχήμα 4.4 παρουσιάζει γραφικά αυτές τις παραμέτρους. Στην έρευνα των Shahi & Baker χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παράμετροι αλλά χρειάστηκε επαναπροσαρμογή γιατί χρειαζόταν η εύρεση της πιθανότητας εμφάνισης παλμού σε οποιαδήποτε διεύθυνση και το μοντέλο των Iervolino και Cornell δίνει μόνο την πιθανότητα στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα. Βρέθηκε ότι μόνο οι παράμετροι r και s είναι σημαντικές για ρήγματα οριζοντίου διάρρηξης ενώ οι παράμετροι r , d και ϕ για τους άλλους τύπους ρηγμάτων. Τα αποτελέσματα της λογιστικής παλινδρόμησης συνοψίζονται στις παρακάτω εξισώσεις:

Για ρήγματα οριζοντίου διάρρηξης:

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

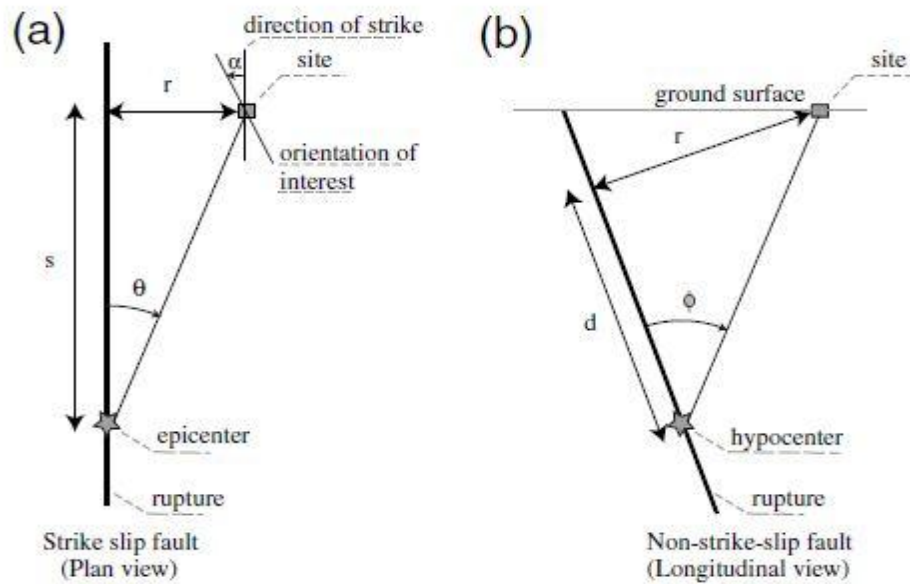
(6)

Για τους άλλους τύπους ρηγμάτων:

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

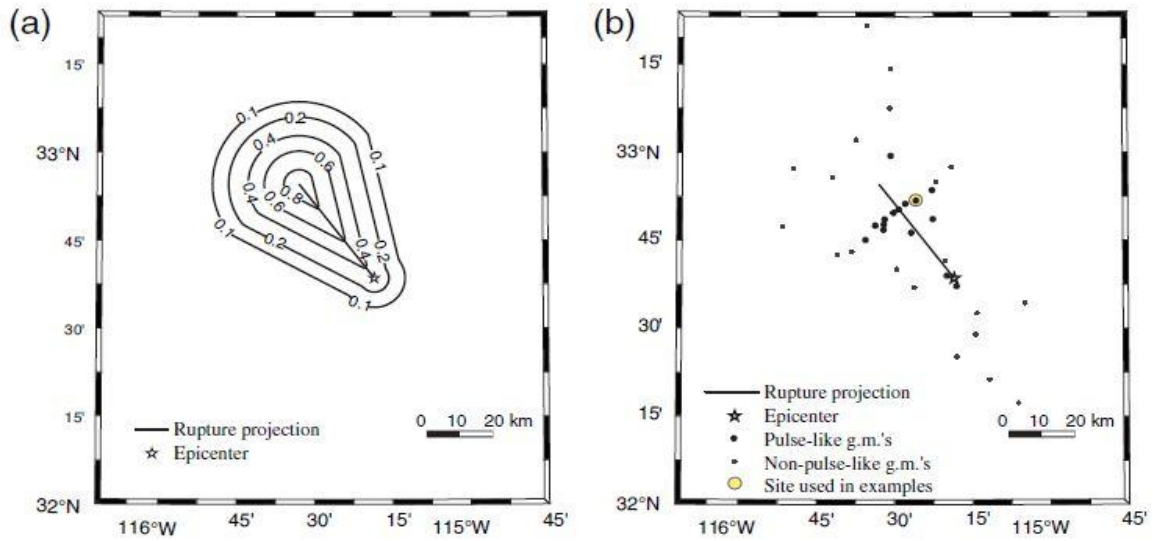
(7)

Οι μονάδες των r , d και s είναι km και του ϕ είναι μοίρες. Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε περιείχε τιμές του r που κυμαίνονταν από 0,07 km έως 472 km για ρήγματα οριζοντίου διάρρηξης και από 0,3 km έως 255 km για άλλους τύπους ρηγμάτων, του d από 0 έως 70 km, του ϕ από 0 έως 90 μοίρες και του s από 0,3 km έως 143 km.

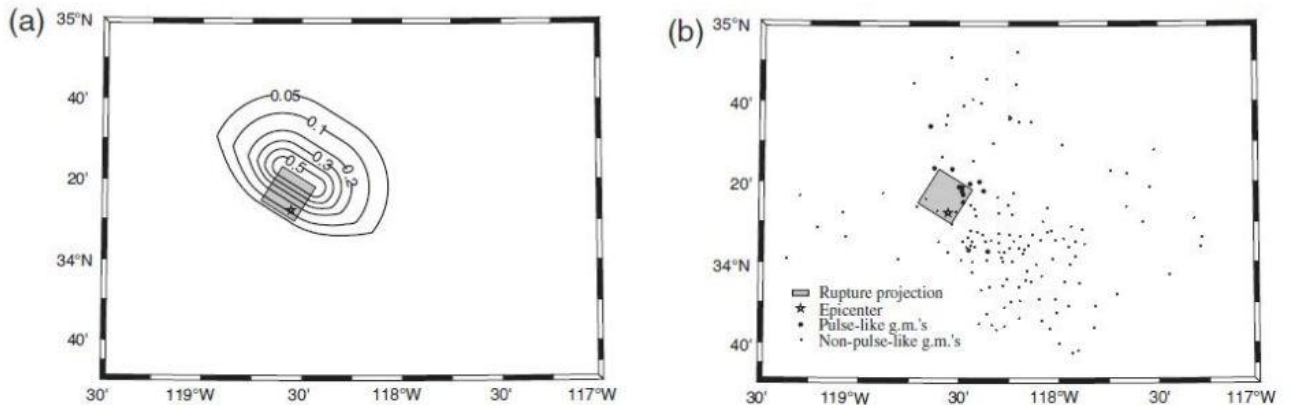


Σχήμα 4.4: Οι παράμετροι της λογιστικής παλινδρόμησης για (a) ρήγματα οριζοντίου διάρρηξης και (b) μη οριζοντίου διάρρηξης. Παρουσιάζεται επίσης η γωνία α μεταξύ της διεύθυνσης ενδιαφέροντος και της διεύθυνσης του ρήγματος

Ένας χάρτης με τις προκύπτουσες πιθανότητες για ρήγμα οριζοντίου διάρρηξης παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5a και για ρήγμα μη οριζοντίου διάρρηξης στο σχήμα 4.6a. Οι ισοϋψείς των χαρτών δίνουν την πιθανότητα εμφάνισης παλμού, όπως αυτή υπολογίστηκε, γύρω από τη διάρρηξη κατά το σεισμό του Imperial Valley και του Northridge. Οι συγκεκριμένοι χάρτες μπορούν να συγκριθούν με τους πραγματικούς χάρτες περιοχών όπου παρατηρήθηκε παλμική κίνηση στου εν λόγω σεισμούς, όπως φαίνεται στο αντίστοιχα σχήματα 4.5b και 4.6b. Το μοντέλο προβλέπει αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης παλμού σε περιοχές όπου εμφανίζεται το φαινόμενο της κατευθυντικότητας και η μορφή των ισοϋψών είναι παρόμοια με αυτή των πραγματικών παρατηρήσεων.



Σχήμα 4.5: Χάρτης του σεισμού του Imperial Valley που απεικονίζει (a) ισοϋψείς πιθανότητας εμφάνισης παλμού για δεδομένη διάρρηξη και (b) περιοχές όπου παρατηρήθηκε παλμική εδαφική κίνηση.



Σχήμα 4.6: Χάρτης του σεισμού του Northridge που απεικονίζει (a) ισοϋψείς πιθανότητας εμφάνισης παλμού για δεδομένη διάρρηξη και (b) 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 για μία περιοχή κοντά σε ρήγματα διαφόρων διευθύνσεων, 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 διεύθυνση α δεδομένου ότι ο παλμός εμφανίζεται σε κάποια θέση. Η πιθανότητα αυτή

εκφράζεται P (pulse at α |pulse). Η γωνία α αντιπροσωπεύει τη μικρότερη γωνία που μπορεί να μετρηθεί σε σχέση με τη γωνία βύθισης του ρήγματος. Στο σχήμα 4.4a που παρουσιάστηκε παραπάνω, φαίνεται σχηματικά η γωνία α . Η πιθανότητα αυτή διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο του ρήγματος. Το σχήμα 4.7 δείχνει το τμήμα των παλμικών κινήσεων που έχουν διεύθυνση τη γωνία α για ρήγματα οριζόντιας διάρρηξης και για ρήγματα μη οριζόντιας διάρρηξης. Στο σχήμα παρουσιάζονται επίσης, τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μείωση των σφαλμάτων μεταξύ των αποτελεσμάτων των εξισώσεων και των παρατηρήσεων. Το μοντέλο περιγράφεται από τις εξισώσεις (8) και (9), για ρήγματα οριζόντιας διάρρηξης και για άλλους τύπους ρηγμάτων αντίστοιχα:

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

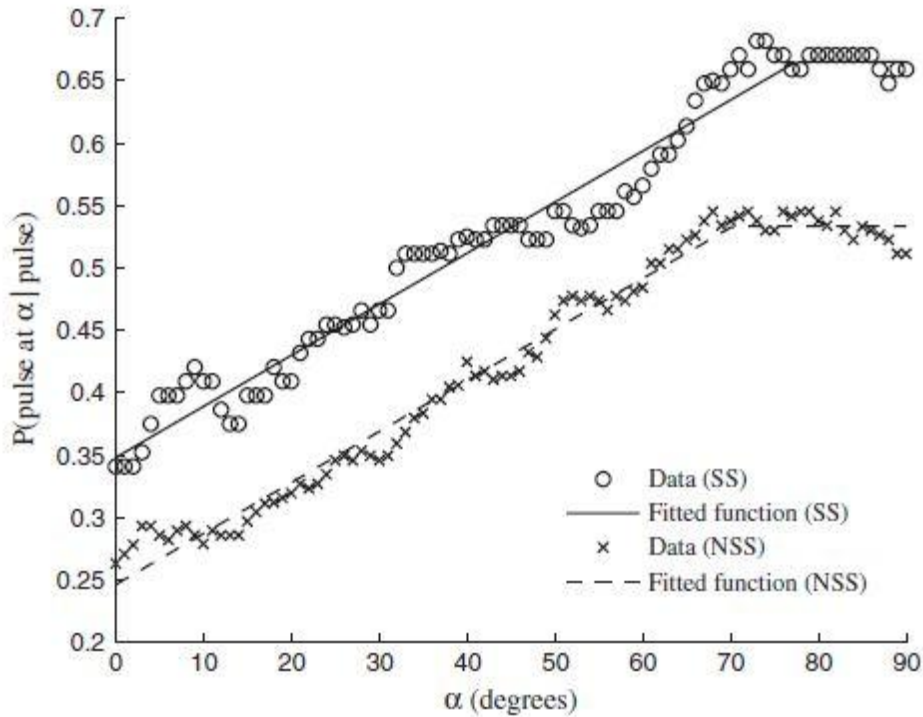
$$P(\text{pulse at } \alpha|\text{pulse}) = \min[0.53, 0.53 - 0.0041 \cdot (70.2 - \alpha)] \quad (9)$$

Καθώς το φαινόμενο της κατευθυντικότητας είναι πιο έντονο στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα και η κάθετη συνιστώσα βρίσκεται γενικά πιο κοντά στην προβολή του ρήγματος στο οριζόντιο επίπεδο, αναμένεται να υπάρχουν μεγαλύτερες τιμές πιθανότητας παρατήρησης παλμού στη διεύθυνση αυτή. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.7, πράγματι η πιο πιθανή διεύθυνση εμφάνισης παλμού είναι η κάθετη στη διάρρηξη ($\alpha=90^\circ$) ενώ λιγότερο πιθανή είναι η παράλληλη στη διάρρηξη ($\alpha=0^\circ$) για όλους τους τύπους ρηγμάτων.

Η πιθανότητα εμφάνισης παλμικής κίνησης σε κάποια θέση στην διεύθυνση α δίνεται από την εξίσωση:

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

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



Σχήμα 4.7: Απεικόνιση της πιθανότητας εμφάνισης παλμού σε γωνία α για ρήγματα οριζοντίου διάρρηξης και μη.

4.2.3 Περίοδος παλμού

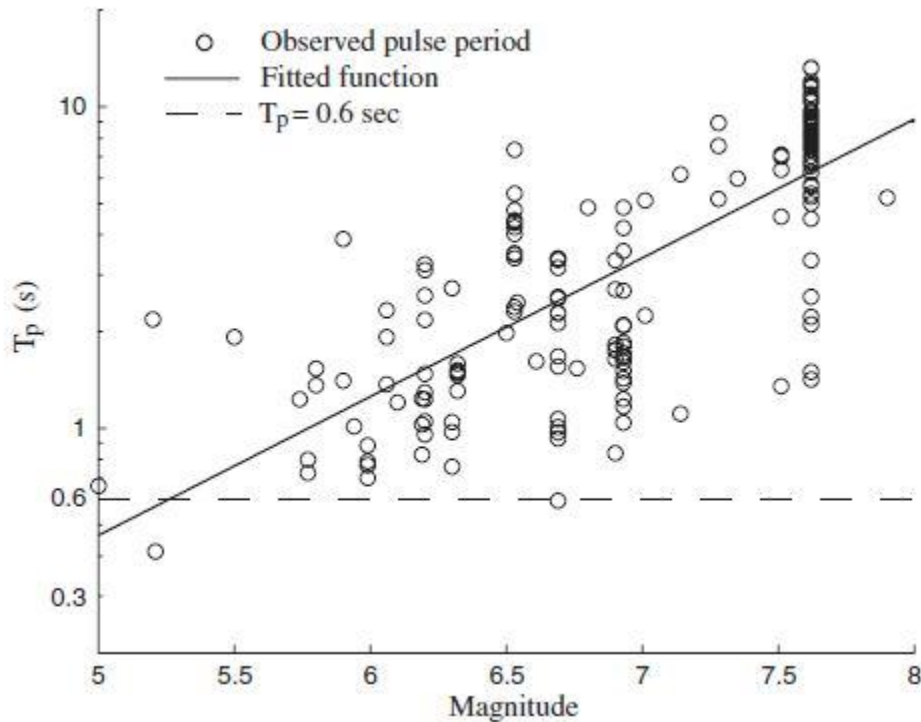
Η ενίσχυση της φασματικής επιτάχυνσης S_a , λόγω της παρουσίας ενός παλμού στην εδαφική κίνηση, αποτελεί συνάρτηση της περιόδου του παλμού. Πολλοί ερευνητές στο παρελθόν ανακάλυψαν ότι η περίοδος του παλμού εξαρτάται από το σεισμικό μέγεθος και συνεπώς εξέφρασαν με εξισώσεις αυτή τη σχέση (Mavroeidis και Papageorgiou 2003, Somerville 2003, Bray και Rodriguez-Marek 2004, Baker 2007).

Για τον καθορισμό της σχέσης μεταξύ περιόδου του παλμού και σεισμικού μεγέθους, υπολογίστηκαν οι περίοδοι όλων των εντοπισμένων παλμών. Οι εξισώσεις (11) και (12) προέκυψαν από γραμμική παλινρόμηση μεταξύ του $\ln T_p$ και του σεισμικού μεγέθους:

$$\mu_{\ln T_p} = -5.73 + 0.99M \quad (11)$$

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

Το σχήμα 4.8 απεικονίζει τη σχέση της παρατηρούμενης περιόδου του παλμού T_p και του σεισμικού μεγέθους M (εξίσωση (11)).



Σχήμα 4.8: Απεικόνιση της συσχέτισης της περιόδου του παλμου και του σεισμικού μεγέθους για παλμικές εδαφικές κινήσεις.

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται επίσης, ότι ο αριθμός των παλμικών κινήσεων με μικρή περίοδο παλμού είναι μικρός. Τιμές $T_p < 0,6s$ είναι σπάνιες και παλμοί κατευθυντικότητας με τόσο χαμηλές περιόδους δεν αναμένεται να επιδρούν σημαντικά στη σεισμική επικινδυνότητα. Για αυτό το λόγο οι παρατηρήσεις με $T_p < 0,6s$ αγνοήθηκαν.

4.2.4 Επαύξηση της φασματικής επιτάχυνσης λόγω του παλμού κατευθυντικότητας

Το εδαφικό μοντέλο, όταν εμφανίζεται παλμός κατευθυντικότητας, είναι απαραίτητο να προβλέπει τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της $\ln S_{a,pulse}$ σε κάποια θέση. Για την απλοποίηση του μοντέλου, η συγκεκριμένη παράμετρος διαχωρίζεται σε δύο μέρη:

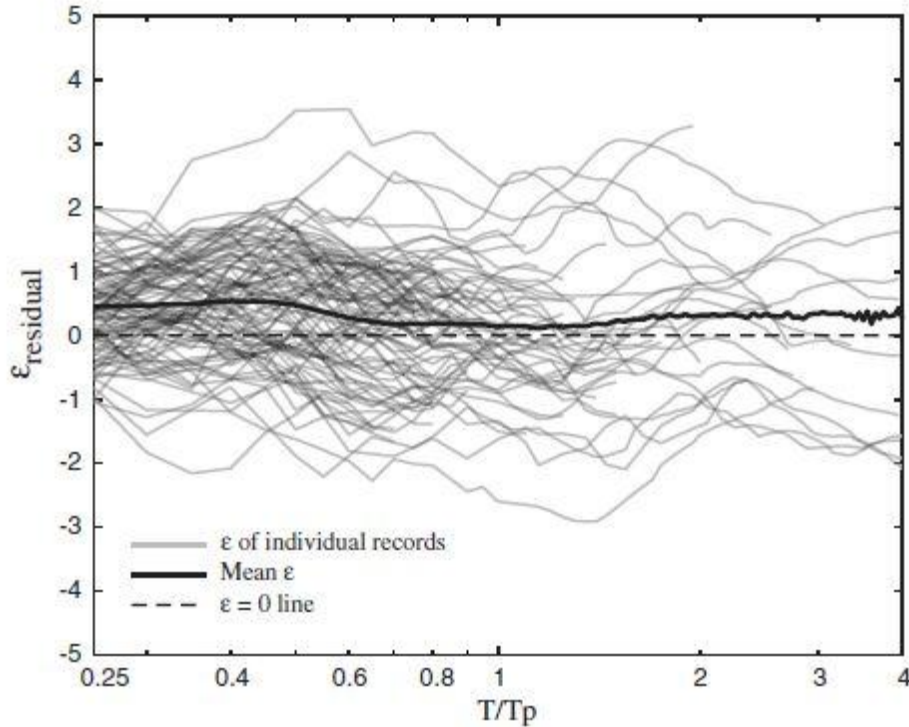
$$\ln S_{a,pulse} = \ln \left(\frac{S_{a,pulse}}{S_a^r} \cdot S_a^r \right) \quad (13)$$

$$= \ln(A_f \cdot S_a^r) \quad (14)$$

$$= \ln A_f + \ln S_a^r \quad (15)$$

Ο όρος S_{ar} είναι η φασματική επιτάχυνση της απομένουσας εδαφικής κίνησης, δηλαδή αυτής που απομένει μετά την αφαίρεση του παλμού, και ο όρος A_f είναι ο συντελεστής ενίσχυσης λόγω της παρουσίας του παλμού.

Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζονται τα ε απομένουσας εδαφικής κίνησης, όπου τα ε είναι τα τυποποιημένα υπόλοιπα των Boore & Atkinson (2008).

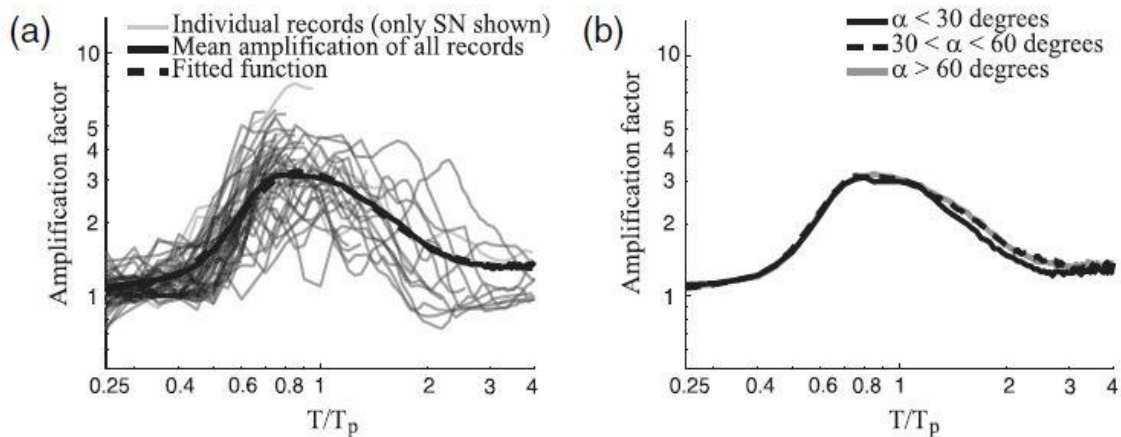


Σχήμα 4.9: Παρατηρούμενες τιμές ε της απομένουσας εδαφικής κίνησης

Όπως φαίνεται στο σχήμα, η μέση τιμή του ε είναι κοντά στο μηδέν, γεγονός που υποδηλώνει ότι το εδαφικό μοντέλο προσεγγίζει ικανοποιητικά την S_{ar} 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 της εδαφικής κίνησης είναι πολύ ισχυρότερη από την παράλληλη, ακόμα και μετά την αφαίρεση του παλμού. Το αποτέλεσμα του σχήματος 4.9 είναι συμβατό με αυτό το εύρημα καθώς τα ε από την απομένουσα εδαφική κίνηση είναι θετικά. Άρα η εξίσωση (15) μπορεί να ξαναγραφτεί αντικαθιστώντας το $\ln S_{ar}$ με την τιμή που προβλέπεται από τα παραδοσιακά προσομοιώματα εδαφικής κίνησης:

$$\ln S_{a,pulse} = \ln Af + \ln S_{a,gmm} \quad (16)$$

Επιπροσθέτως, οι Shahi & Baker υπολόγισαν συντελεστές εδαφικής ενίσχυσης σύμφωνα με το λόγο της φασματικής επιτάχυνσης της εδαφικής κίνησης προς την αντίστοιχη της απομένουσας εδαφικής κίνησης μετά την αφαίρεση του παλμού. Στο σχήμα 4.10 παρουσιάζονται οι συντελεστές ενίσχυσης συναρτήσει του λόγου της περιόδου που μας ενδιαφέρει (T) προς την περίοδο του παλμού (T_p). Η μέση τιμή της ενίσχυσης σχηματίζει μια καμπύλη κωδωνοειδούς μορφής κοντά στο λόγο $T/T_p = 1$.



Σχήμα 4.10: Συντελεστές ενίσχυσης της φασματικής επιτάχυνσης λόγω παρουσίας παλμού. (a) Γραφική απεικόνιση των εξισώσεων και των καταγραφών και (b) μέση ενίσχυση λόγω της ύπαρξης παλμών σε διάφορες διευθύνσεις.

Μετά την εφαρμογή διαφόρων σχέσεων, οι Shahi & Baker επέλεξαν την εξής:

$$\mu_{\ln Af} = \begin{cases} 1.131 \cdot \exp(-3.11 \cdot (\ln(T/T_p) + 0.127)^2) + 0.058 & \text{if } T \leq 0.88 \cdot T_p \\ 0.896 \cdot \exp(-2.11 \cdot (\ln(T/T_p) + 0.127)^2) + 0.255 & \text{if } T > 0.88 \cdot T_p \end{cases} \quad (17)$$

Στο σχήμα 4.10a παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου μοντέλου συγκριτικά με τις καταγραφές. Ενισχύσεις για παλμικές κινήσεις σε διαφορετικές διευθύνσεις παρουσιάζονται στο σχήμα 4.10b από το οποίο συμπεραίνεται ότι το μοντέλο είναι σταθερό ανεξάρτητα από την αλλαγή της διεύθυνσης. Παρόμοιοι έλεγχοι απέδειξαν ότι η ενίσχυση λόγω παρουσίας παλμού παραμένει σταθερή με την αλλαγή των σεισμικών μεγεθών και του τύπου του ρήγματος. Ισχύει επίσης η παρακάτω εξίσωση:

$$\mu_{\ln S_{a,pulse}} = \mu_{\ln Af} + \mu_{\ln S_{a,gmm}} \quad (18)$$

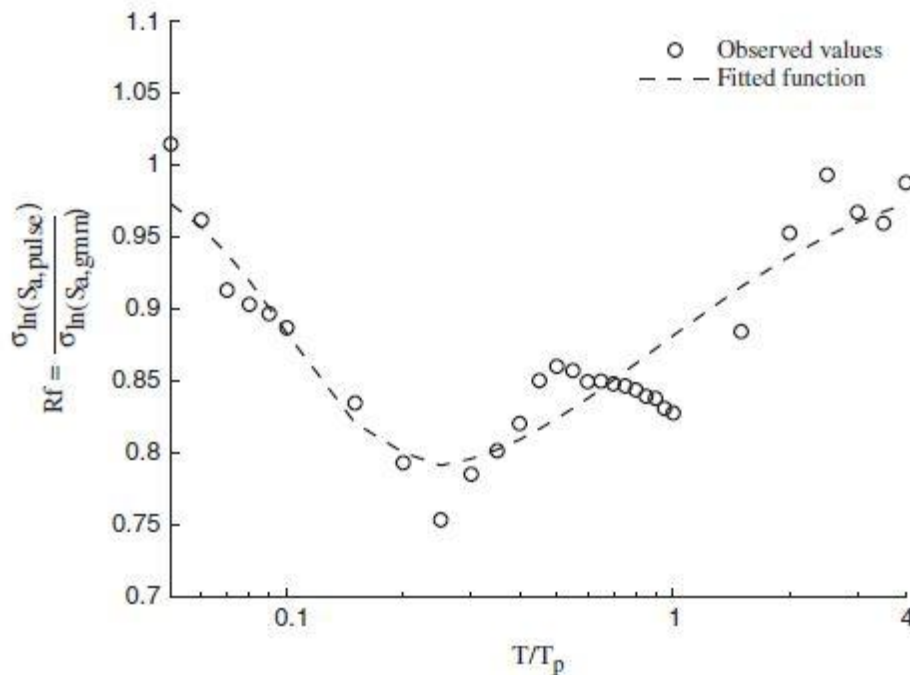
Επειδή το τροποποιημένο εδαφικό μοντέλο που παρουσιάζεται από τους Shahi & Baker εφαρμόζεται μόνο σε παλμικές κινήσεις, αναμένεται η τυπική απόκλιση του υποσυνόλου των καταγραφών να είναι μικρότερη από αυτή της συνολικής βάσης δεδομένων. Επιπλέον, καθώς το συγκεκριμένο μοντέλο εφαρμόζεται για εδαφική ενίσχυση προερχόμενη από το φαινόμενο της κατευθυντικότητας, η ομαλοποίηση που γίνεται οδηγεί σε μείωση των τιμών της τυπικής απόκλισης. Η μείωση αυτή εξαρτάται από το λόγο T/T_p και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\sigma_{\ln S_{a,pulse}} = Rf \cdot \sigma_{\ln S_{a,gmm}} \quad (19)$$

όπου ο μειωτικός συντελεστής R_f δίνεται:

$$R_f = \begin{cases} 1 - 0.2 \cdot \exp(-0.96 \cdot (\ln(T/T_p) + 1.56)^2) & \text{if } T \leq 0.21 \cdot T_p \\ 1 - 0.21 \cdot \exp(-0.24 \cdot (\ln(T/T_p) + 1.56)^2) & \text{if } T > 0.21 \cdot T_p \end{cases} \quad (20)$$

Στο σχήμα 4.11 απεικονίζεται ο λόγος των τυπικών αποκλίσεων του τροποποιημένου μοντέλου προς αυτές του μοντέλου Boore & Atkinson (2008).



Σχήμα 4.11: Απεικονίζεται ο λόγος της τυπικής απόκλισης των υπολοίπων από προβλέψεις του παλμικού φάσματος ($\sigma_{\ln Sa, pulse}$) προς την τυπική απόκλιση του μοντέλου Boore & Atkinson 2008 ($\sigma_{\ln Sa, gmm}$).

4.3 Εφαρμογή του μοντέλου Shahi & Baker

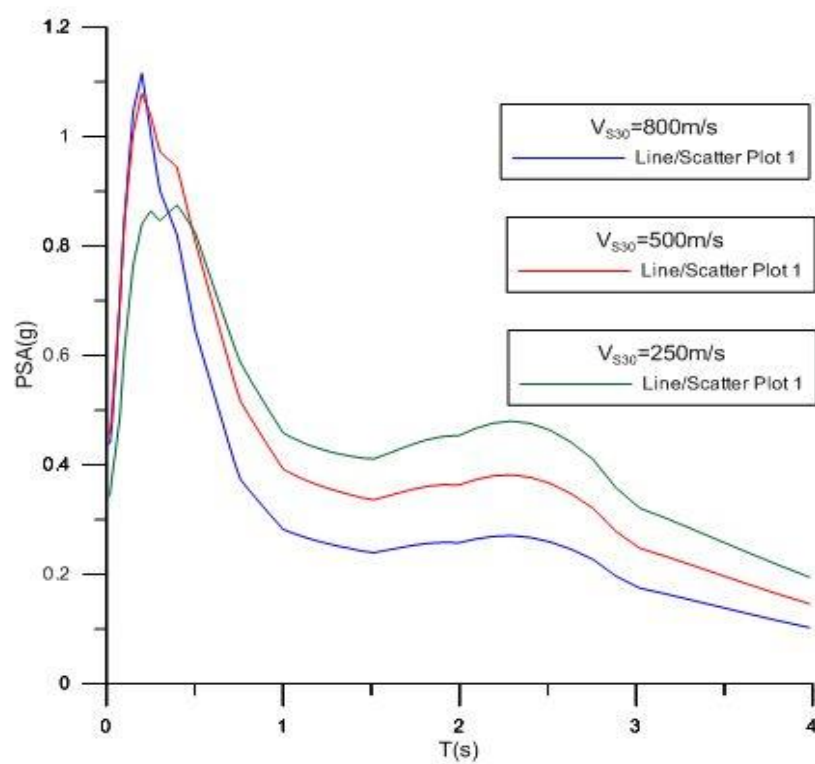
Εφαρμόσαμε το μοντέλο Shahi & Baker στα ρήγματα της Βοιωτίας με σκοπό τη δημιουργία φασμάτων που λαμβάνουν υπόψιν το φαινόμενο της κατευθυντικότητας. Όπως και στην εφαρμογή του μοντέλου Boore & Atkinson η διαδικασία έγινε για τρεις κατηγορίες εδάφους, με και χωρίς τυπική απόκλιση καθώς επίσης παρουσιάζονται τα φάσματα στις ενδεικτικές αποστάσεις των 0, 5 και 10 km και για το μέγιστο σεισμικό μέγεθος (6,8). Όλα τα φάσματα των περιοχών παρατίθενται στο παράρτημα της παρούσας διπλωματικής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η περίοδος του παλμού υπολογίστηκε από την παρακάτω σχέση των Mavroeidis & Papageorgiou:

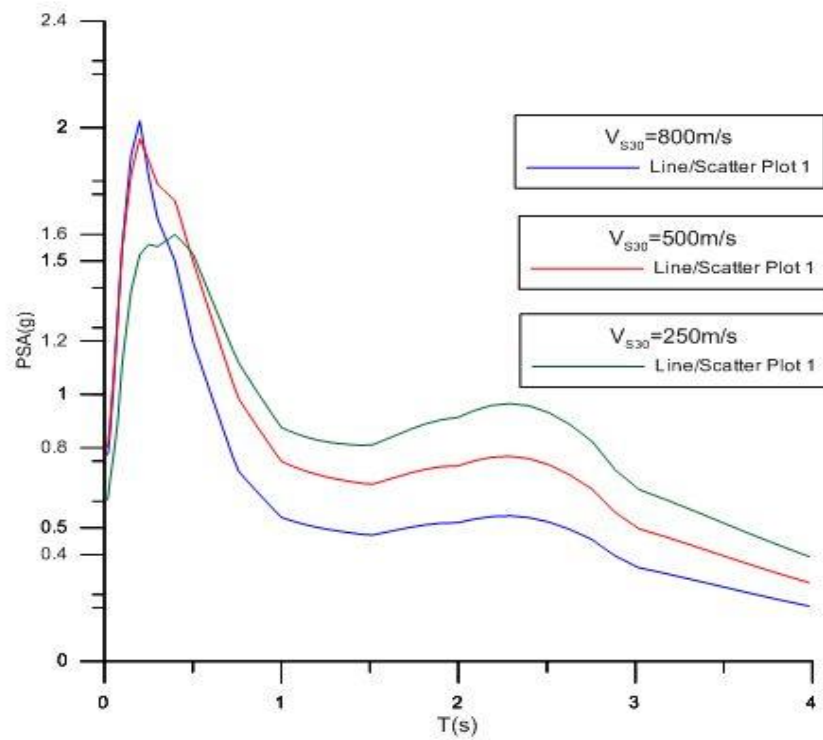
$$\log T_p = -2,9 + 0,5M$$

όπου $M=6,8$ και άρα $T_p = 3,162s$.

- **Απόσταση 0 km:**

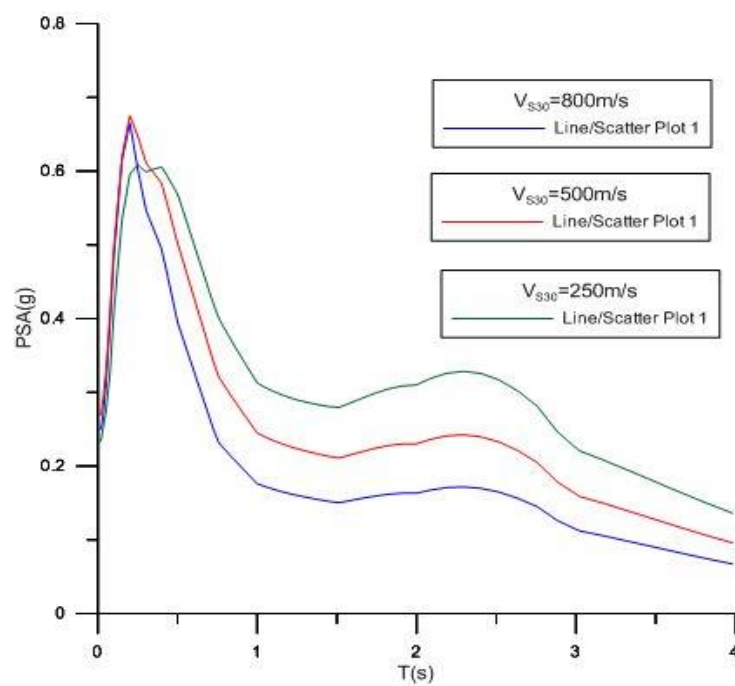


Χωρίς τυπική απόκλιση

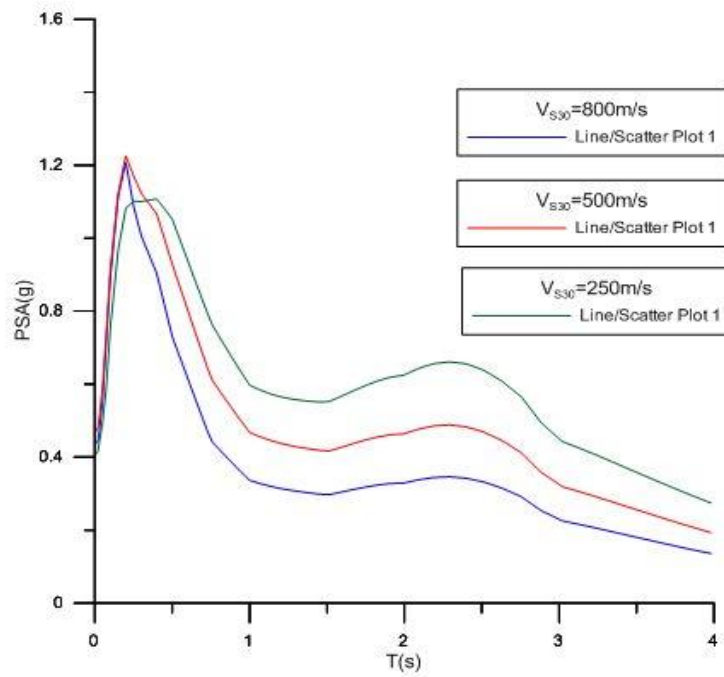


Με τυπική απόκλιση

- Απόσταση 5 km:

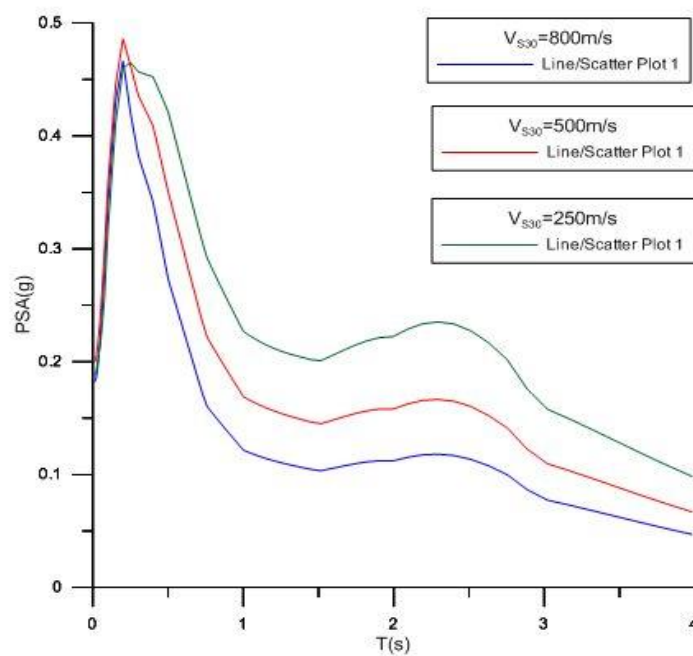


Χωρίς τυπική απόκλιση

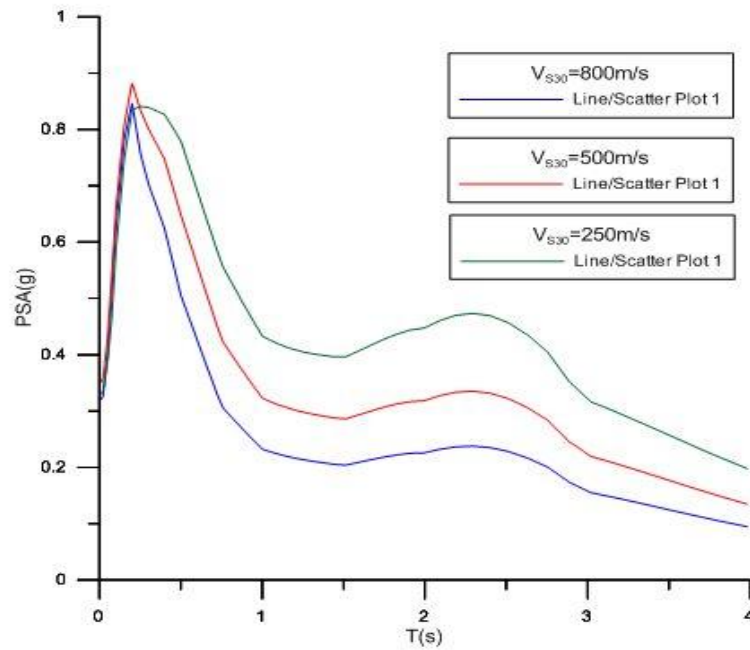


Με τυπική απόκλιση

- Απόσταση 10 km:



Χωρίς τυπική απόκλιση



Με τυπική απόκλιση

Παρατηρήσεις αποτελεσμάτων

Πέρα από τις διαφοροποιήσεις ανάμεσα στους τύπους εδαφών και στην λήψη της τυπικής απόκλισης οι οποίες εξηγήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, αξίζει να επισημάνουμε την καμπύλη κωδωνοειδούς μορφής της ενίσχυσης που εμφανίζεται περίπου εκεί όπου $T=T_p = 3\text{s}$.

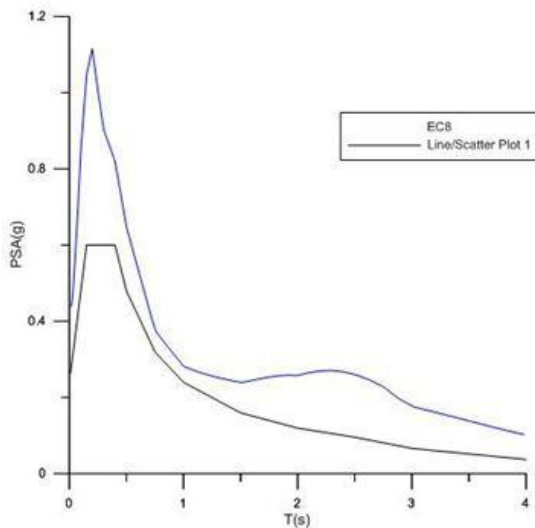
4.4 Σύγκριση με το φάσμα επιτάχυνσης του EC8

Παρακάτω συγκρίνονται τα φάσματα που εξήγαμε με το μοντέλο των Shahi & Baker με τα φάσματα επιτάχυνσης με 5% απόσβεση που προτείνει ο EC8 για κάθε τύπο εδάφους. Η Βοιωτία ανήκει στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας 2 (Z2) καθώς επίσης θεωρήσαμε κατηγορία σπουδαιότητας 2, η οποία αντιστοιχεί σε συνήθεις κατασκευές.

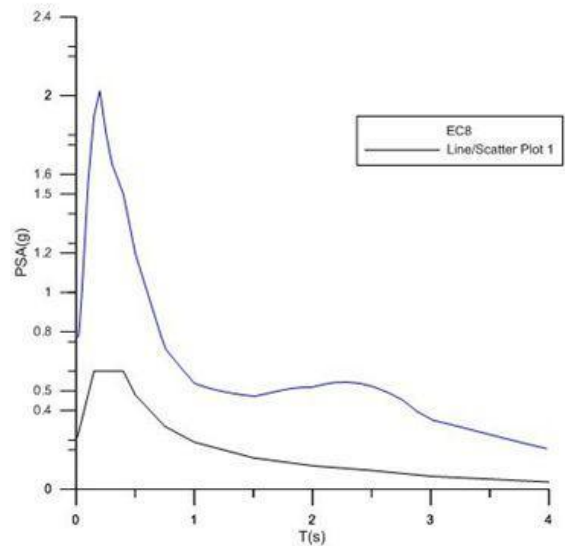
Έδαφος Α

•Απόσταση 0 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση

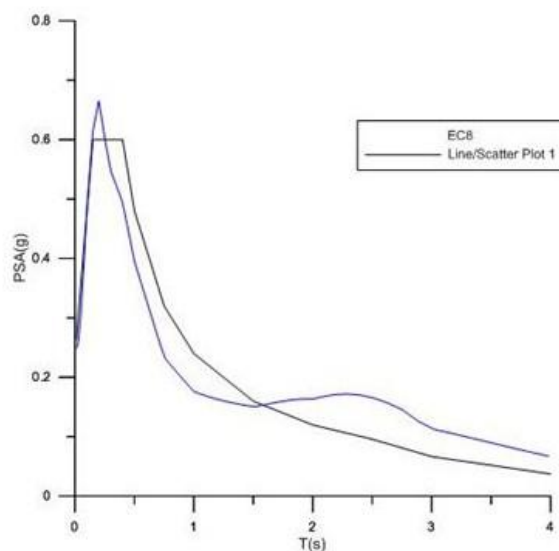


Με τυπική απόκλιση

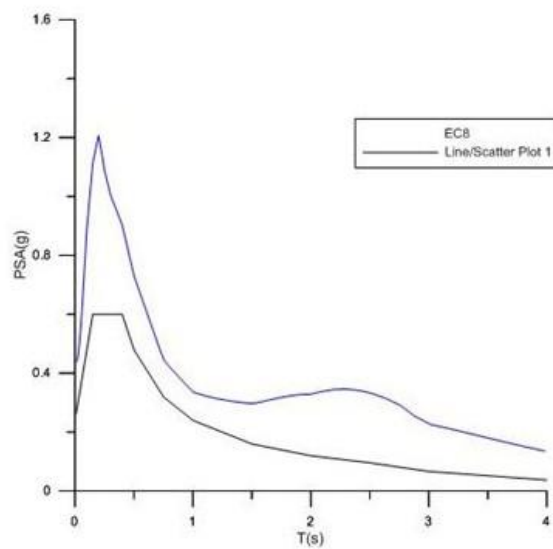


•Απόσταση 5 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση

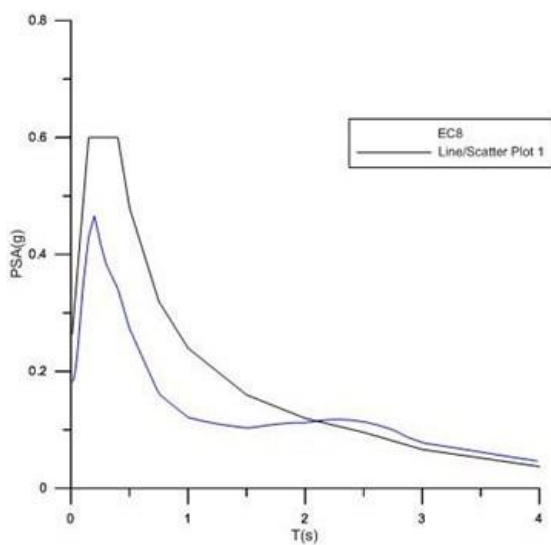


Με τυπική απόκλιση

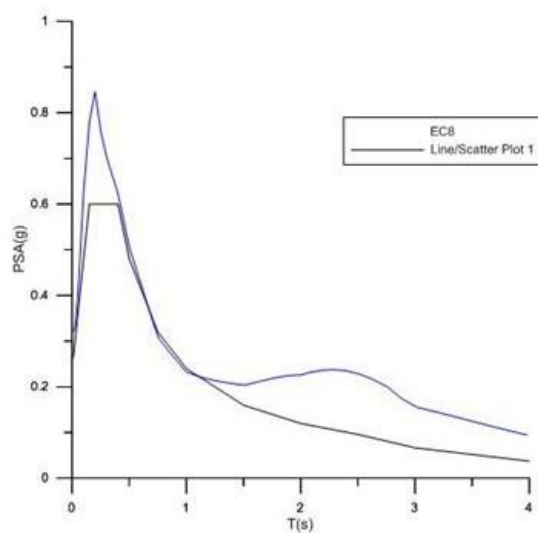


•Απόσταση 10 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση



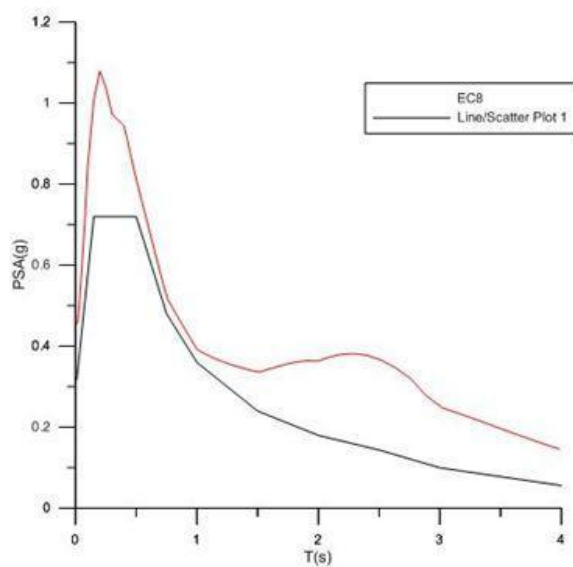
Με τυπική απόκλιση



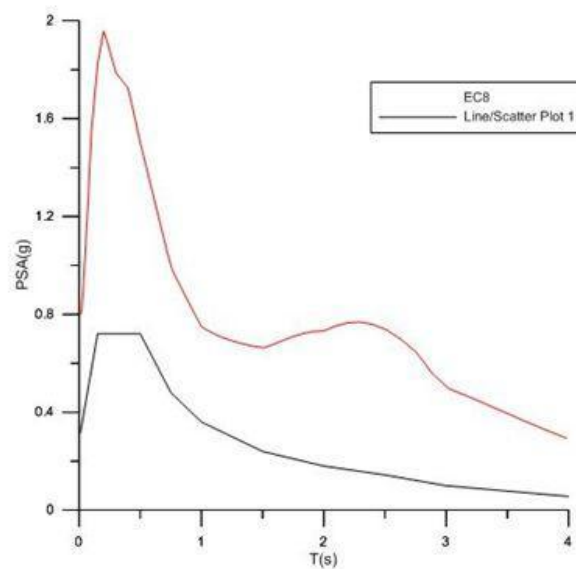
Έδαφος Β

•Απόσταση 0 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση

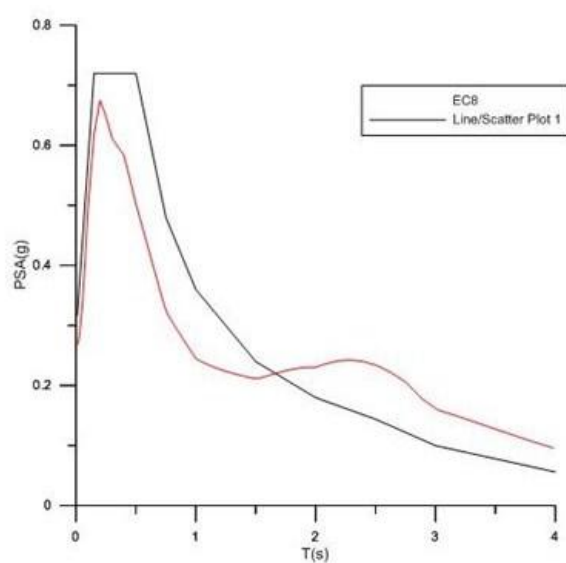


Με τυπική απόκλιση

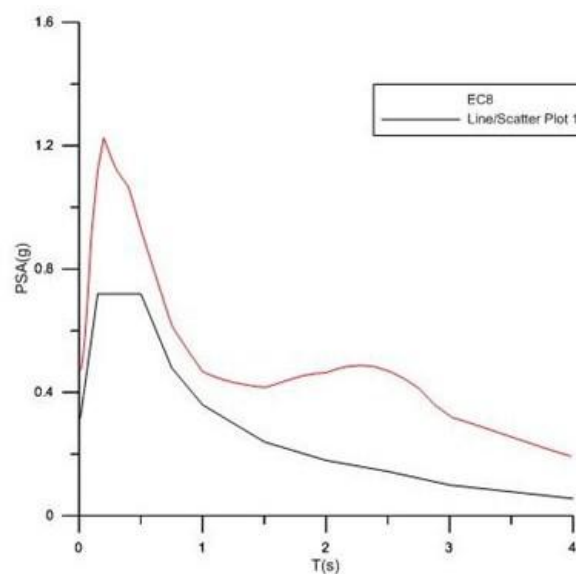


•Απόσταση 5 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση

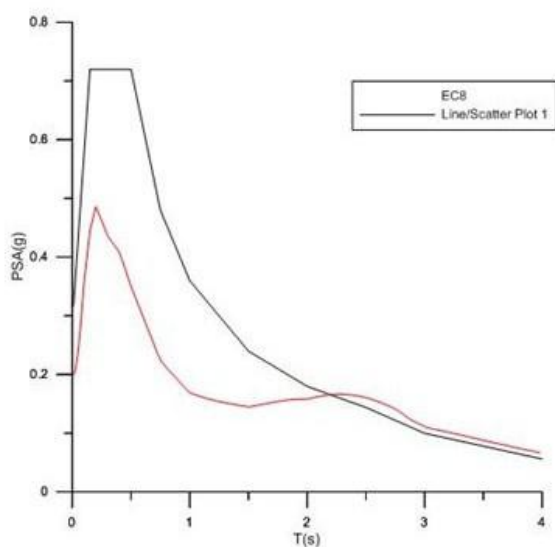


Με τυπική απόκλιση

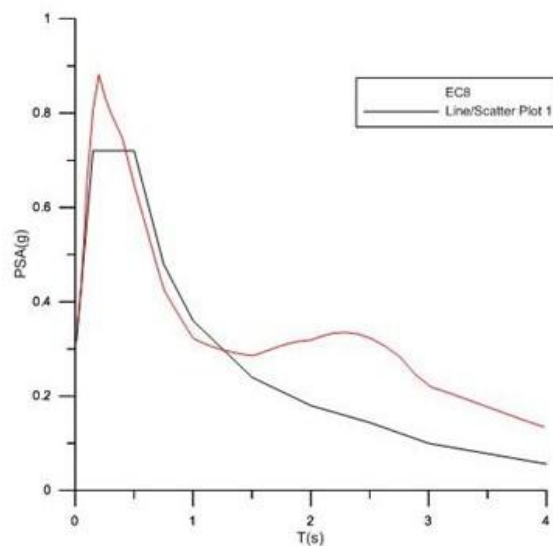


•Απόσταση 10 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση



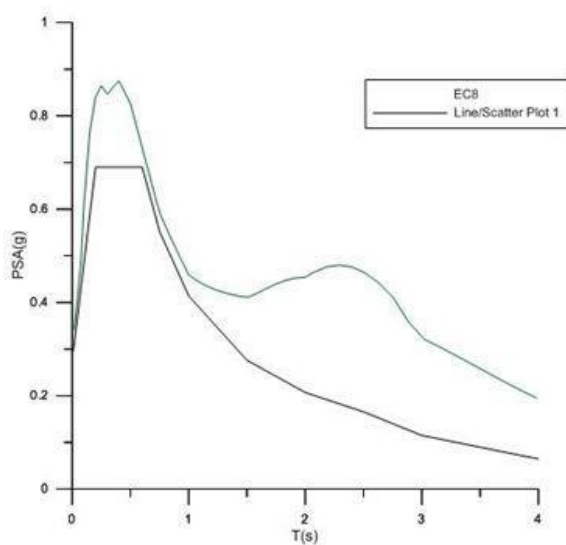
Με τυπική απόκλιση



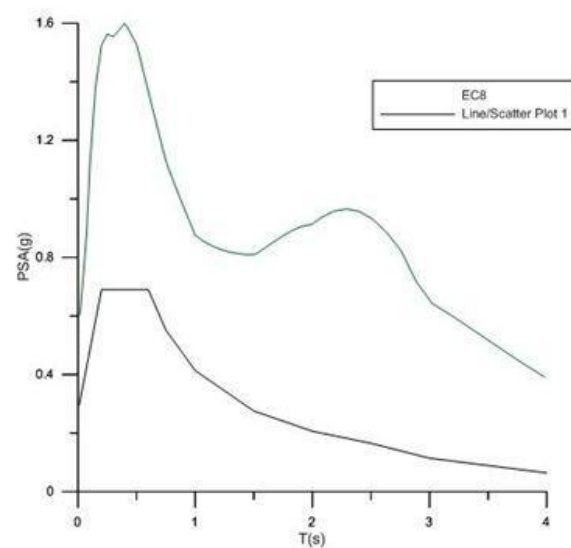
Έδαφος C

•Απόσταση 0 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση

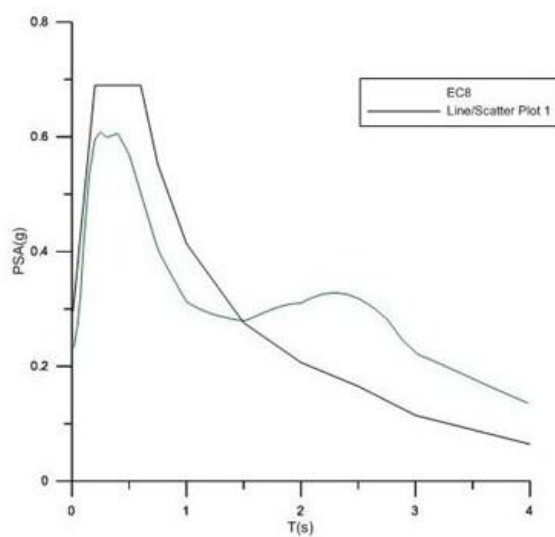


Με τυπική απόκλιση

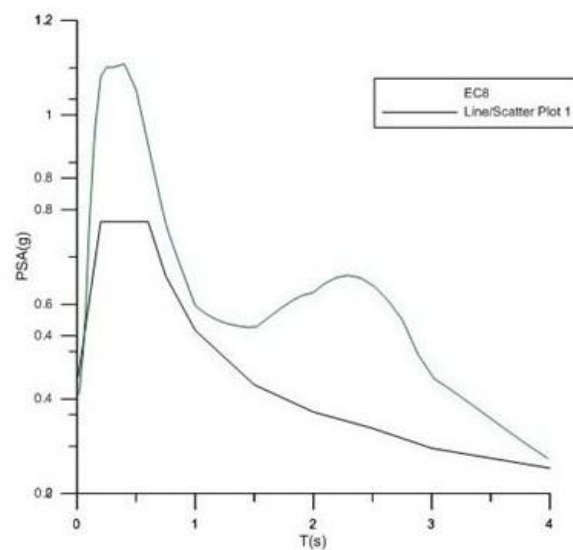


•Απόσταση 5 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση

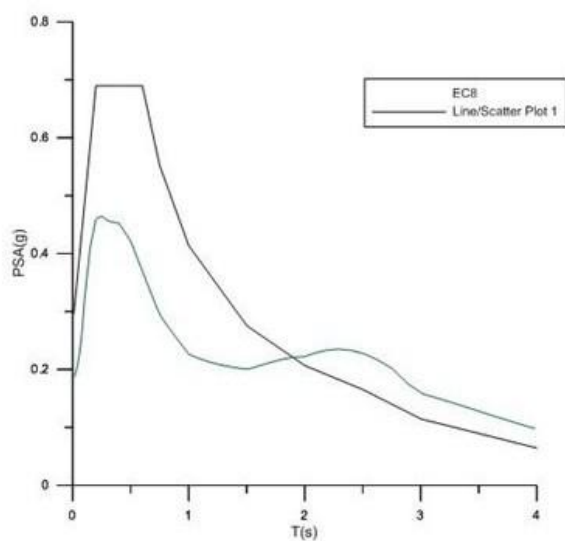


Με τυπική απόκλιση

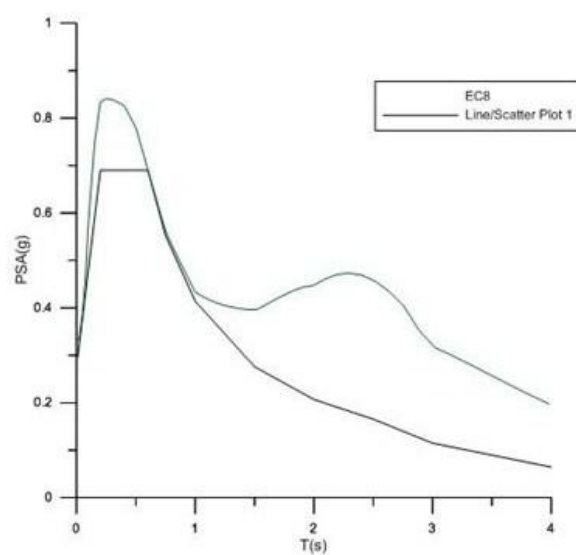


•Απόσταση 10 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση



Με τυπική απόκλιση



Κεφάλαιο 5

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

5.1 Εισαγωγή

5.2 Αποτελέσματα

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο της διπλωματικής, παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες που αντιστοιχούν στα φάσματα επιτάχυνσης που προέκυψαν από το μοντέλο των Boore & Atkinson. Οι χρονοϊστορίες αντιστοιχούν στα φάσματα των ενδεικτικών τιμών 0, 5, 10 km, με και χωρίς τυπική απόκλιση και για τους τρεις τύπους εδαφών.

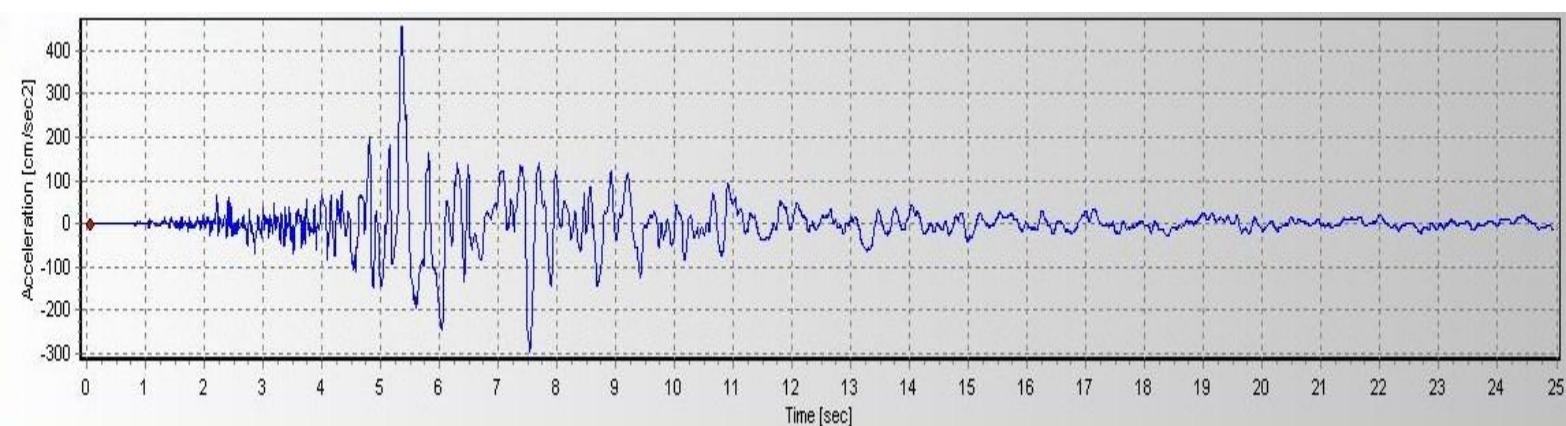
Αρχικά, με τη βοήθεια του προγράμματος Seismomatch εξήγαμε τις χρονοϊστορίες που αντιστοιχούν σε κάθε φάσμα. Στη συνέχεια, με βάση το πρόγραμμα Seismosignal τροποποιήσαμε τις χρονοϊστορίες εξαλείφοντας τις μεγάλες συχνότητες (πάνω από 0,2 Hz). Η τροποποίηση αυτή χρειάστηκε καθώς η ύπαρξη μεγάλων συχνοτήτων δημιουργεί ημιτονοειδή σχήματα στις χρονοϊστορίες της ταχύτητας και της μετατόπισης, επηρεάζοντας έντονα τα αποτελέσματα.

5.2 Αποτελέσματα

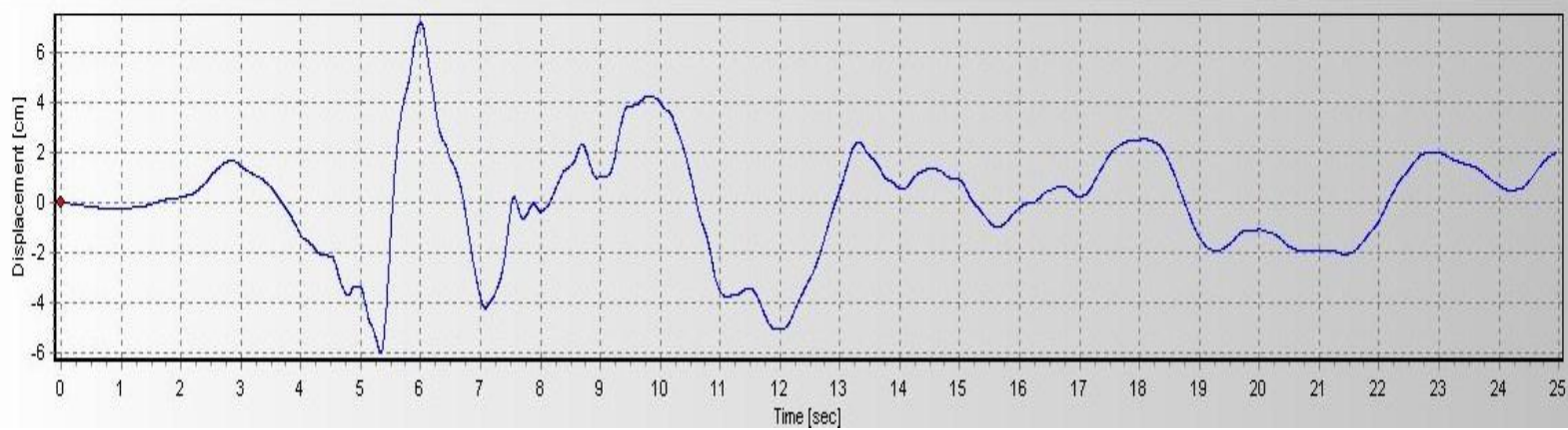
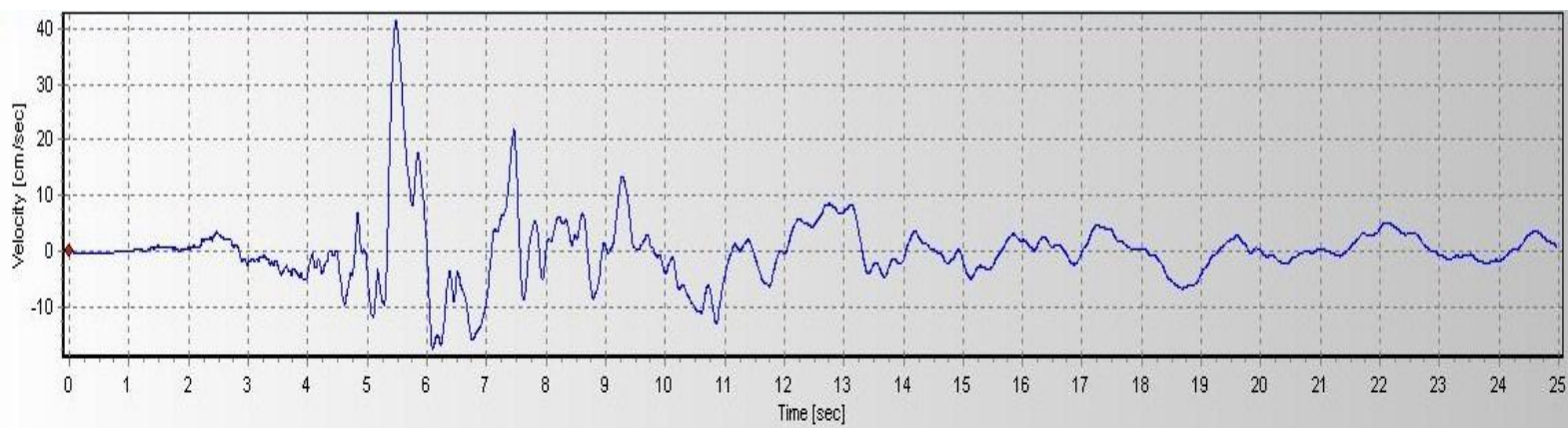
Παρακάτω παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης που εξάγαμε για το έδαφος B, χωρίς να ληφθεί υπόψη η τυπική απόκλιση για όλες τις ενδεικτικές αποστάσεις. Οι υπόλοιπες χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης για τους όλους τύπους εδαφών με και χωρίς τυπική απόκλιση και για όλες τις αποστάσεις παρουσιάζονται στο παράρτημα της διπλωματικής.

Έδαφος B

- Απόσταση 0 km:

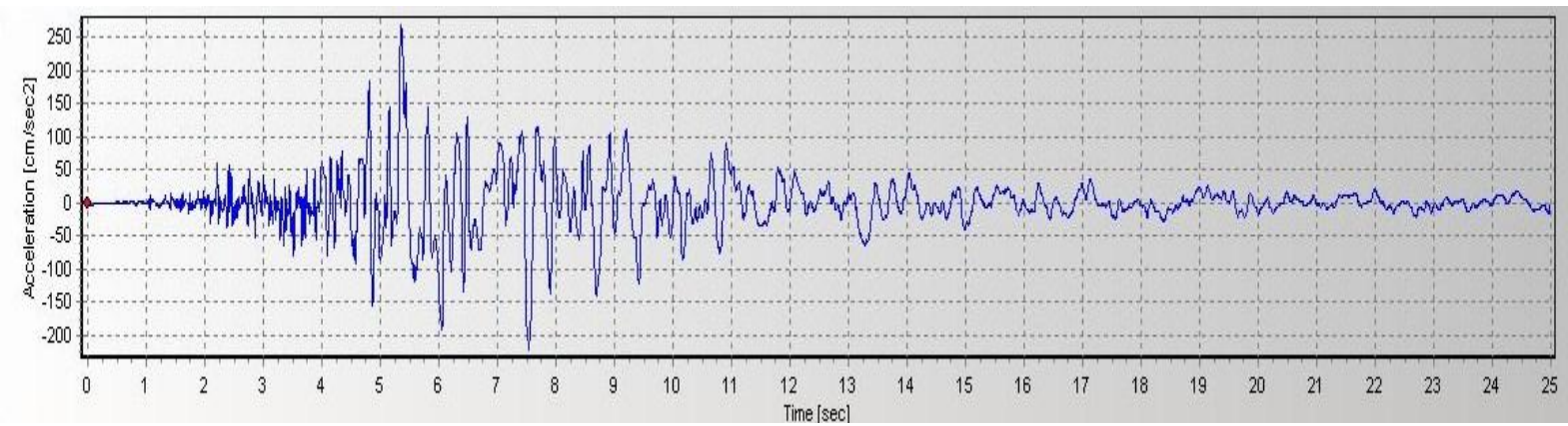


ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

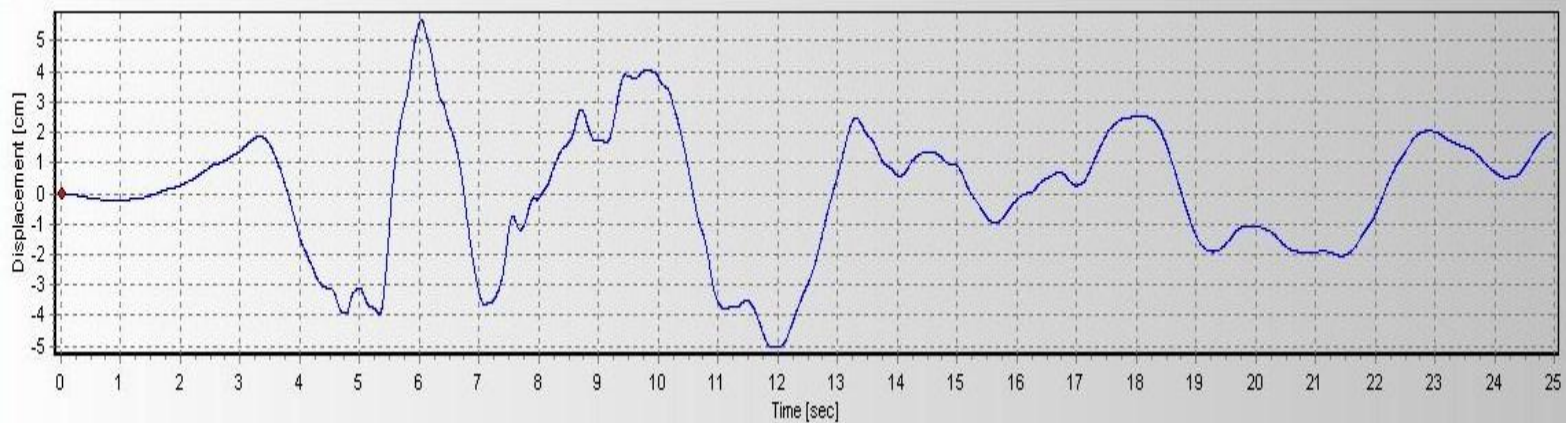


Χωρίς τυπική απόκλιση

- **Απόσταση 5 km:**

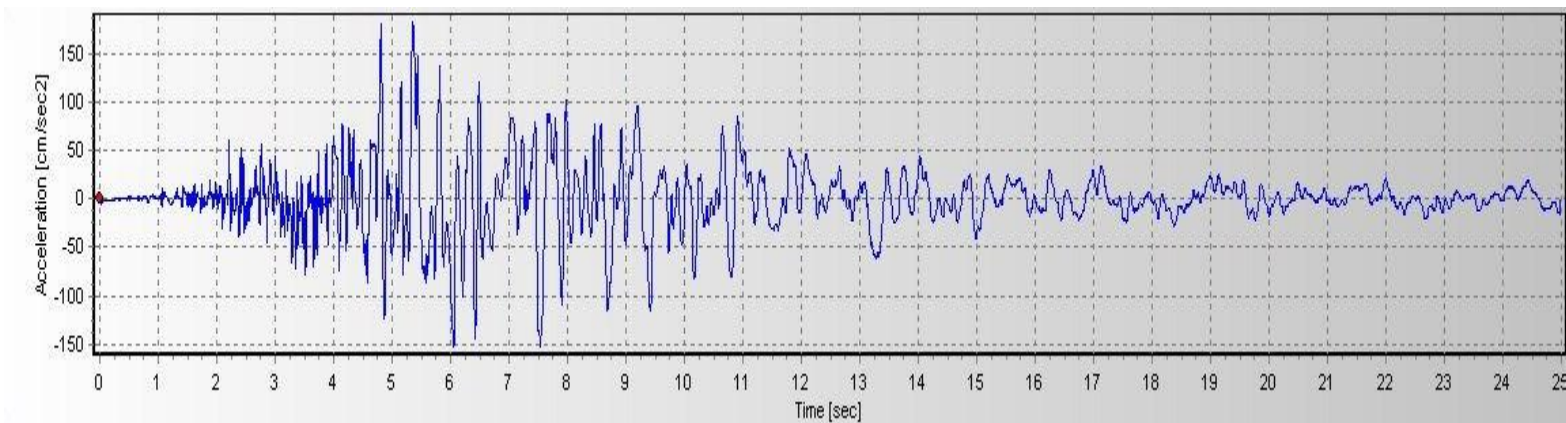


ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

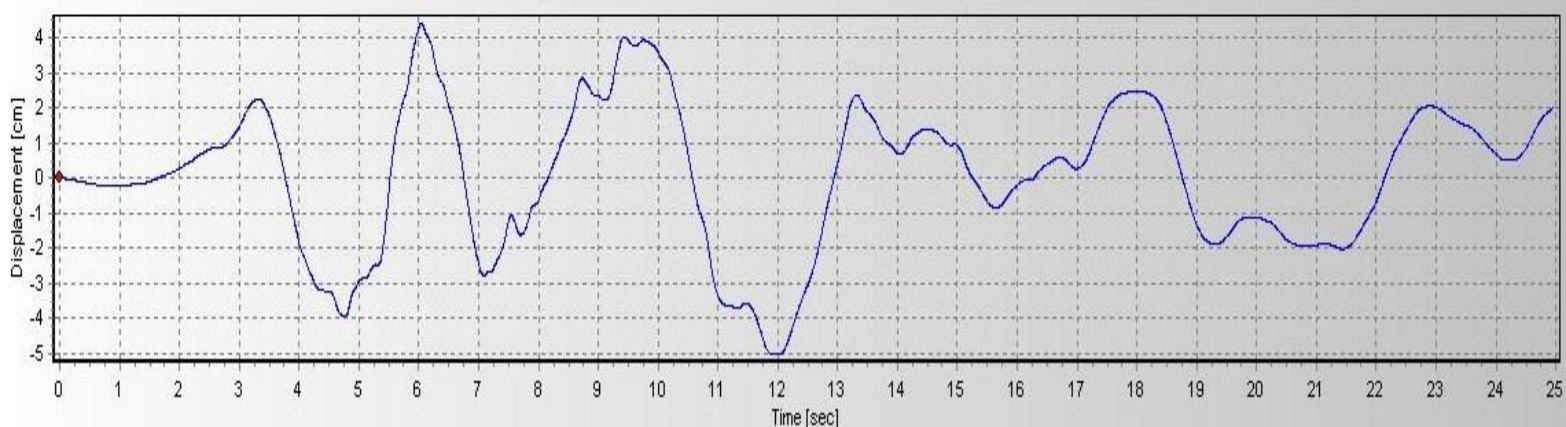
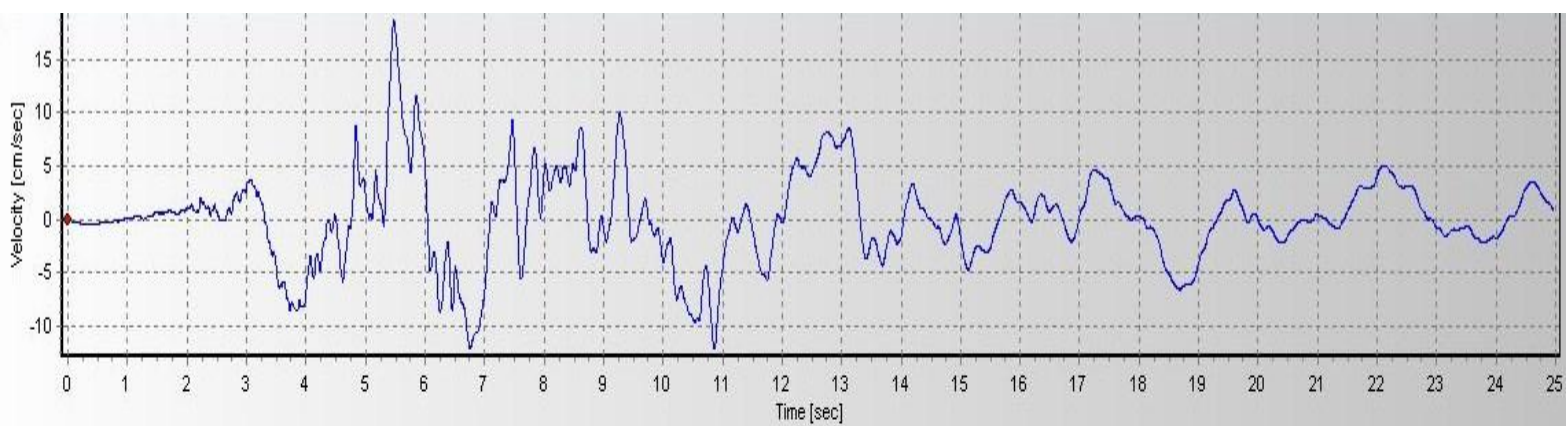


Χωρίς τυπική απόκλιση

- Απόσταση 10 km:



ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ



Χωρίς τυπική απόκλιση

Κεφάλαιο 6

ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΑΥΡΟΕΙΔΙΣ & ΡΑΠΑΓΕΟΡΓΙΟΥ– ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΕΣ ΣΤΟ ΚΟΝΤΙΝΟ ΠΕΔΙΟ

6.1 Εισαγωγή

6.2 Το μοντέλο των Mavroeidis & Papageorgiou

6.3 Η σχέση της περιόδου του παλμού με το σεισμικό μέγεθος

6.4 Εφαρμογή του μοντέλου των Mavroeidis & Papageorgiou για τη δημιουργία χρονοϊστοριών.

6.1 Εισαγωγή

Ο αυξανόμενος αριθμός των καταγεγραμμένων χρονοϊστοριών κοντινού πεδίου, ώθησε πολλούς σεισμολόγους να αναλύσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τη συμπεριφορά της εδαφικής κίνησης στο κοντινό πεδίο. Στην παρούσα διπλωματική, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο των Mavroeidis & Papageorgiou προκειμένου να εξάγουμε τις χρονοϊστορίες που συμπεριλαμβάνουν τα φαινόμενα αυτά.

Οι Mavroeidis & Papageorgiou (2002) παρουσίασαν ένα απλό και ταυτόχρονα αποτελεσματικό μοντέλο ανάλυσης για να προσομοιάσουν την εδαφική κίνηση στο κοντινό πεδίο. Το μοντέλο αυτό περιγράφει την εδαφική κίνηση ποιοτικά και ποσοτικά. Για τη συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε ένας μεγάλος αριθμός καταγραφών εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου από ποικίλα τεκτονικά περιβάλλοντα παγκοσμίως. Λήφθηκε υπόψη μία βάση δεδομένων 169 τέτοιων καταγραφών από όλους τους τύπους ρηγμάτων (οριζοντίου διάρρηξης, ανάστροφα, κανονικά) καθώς και από διαφορετικά σεισμικά μεγέθη ($M_w = 5,6-8,1$). Όλες οι καταγραφές αντιστοιχούν σε μια μέγιστη απόσταση 20 km από το ρήγμα.

Το μοντέλο αυτό προσομοιάζει με επιτυχία όλες τις καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες της εδαφικής μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης στο κοντινό πεδίο καθώς και τα αντίστοιχα φάσματα απόκρισης. Επιπροσθέτως, καθορίζει τη διάρκεια του παλμού καθώς και τη σχέση των παραμέτρων του μοντέλου με το σεισμικό μέγεθος. Τέλος, παρουσιάζεται μία απλοποιημένη μέθοδος για τη σύνθεση ρεαλιστικών εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην ανάλυση και στο σχεδιασμό των μηχανικών.

6.2 Το μοντέλο των Mavroeidis & Papageorgiou

Το αναλυτικό μοντέλο των Mavroeidis & Papageorgiou διαμορφώθηκε ώστε να ικανοποιεί τα εξής κριτήρια:

- Ο συνθετικός παλμός πρέπει να εκφράζεται από ένα μοντέλο με απλή μαθηματική έκφραση και μικρό αριθμό παραμέτρων με σαφή φυσική ερμηνεία.
- Ο συνθετικός παλμός πρέπει να μπορεί να προσομοιάζει όσο το δυνατό περισσότερες καταγραφές εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου.
- Η μαθηματική έκφραση του παλμού πρέπει να είναι τέτοια ώστε να προκύπτουν εύκολα εκφράσεις κλειστής μορφής όπως αυτή του μετασχηματισμού Fourier και των φασμάτων απόκρισης.

Ο συνθετικός παλμός που ικανοποιεί καλύτερα αυτά τα κριτήρια είναι αυτός του Gabor. Ο παλμός προκύπτει από μια αρμονική ταλάντωση και μία συνάρτηση κωδωνοειδούς μορφής (περιβάλλουσα Gaussian). Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται αποτελούν τα βασικά χαρακτηριστικά για να προσδιορισθεί ο παλμός της ταχύτητας στο κοντινό πεδίο. Συγκεκριμένα, είναι η δεσπόζουσα συχνότητα (f_p), το εύρος του παλμού της ταχύτητας (Δ), η γωνία που καθορίζει τη φάση της ταλάντωσης (ν) (π.χ. $\nu=0$ και $\nu=\pi/2$ για συμμετρικούς και αντισυμμετρικούς παλμούς αντίστοιχα) και ο αριθμός των ημικυκλίων που περιλαμβάνει η ταλάντωση (γ) (δηλαδή ο αριθμός των τμήσεων με το 0. Π.χ για μικρές τιμές του γ ο παλμός έχει σχημα “Δ” ενώ καθώς η παράμετρος γ αυξάνεται, ο αριθμός των τμήσεων με το 0 αυξάνεται). Η σχέση του Gabor είναι:

$$f(t) = Ae^{-(2\pi f_p/\gamma)^2 t^2} \cos[2\pi f_p t + \nu]$$

Παρόλα αυτά, το τρίτο κριτήριο δεν ικανοποιείται όσον αφορά την απόκριση ενός μονοβαθμίου συστήματος όταν ταλαντώνεται από ένα συνθετικό παλμό Gabor. Η ύπαρξη εκφράσεων κλειστής μορφής θα διευκόλυνε αισθητά την παραμετρική ανάλυση, γεγονός μεγάλης σημασίας για τους σεισμολόγους. Το πρόβλημα αυτό προκύπτει από την εκθετική συνάρτηση στη σχέση του Gabor. Οι Mavroeidis & Papageorgiou προκειμένου να αποφύγουν αυτό το πρόβλημα, πρότειναν ένα αναλυτικό μοντέλο που στηρίζεται στο συνθετικό παλμό του Gabor (αριθμός παραμέτρων, φυσική ερμηνεία τους, απλή μαθηματική έκφραση) αλλά ταυτόχρονα αποδίδει μια έκφραση κλειστής μορφής όσον αφορά την απόκριση ενός μονοβαθμίου. Για το λόγο αυτό αντικαταστήθηκε η περιβάλλουσα Gaussian της σχέσης του Gabor από μία άλλη συνάρτηση συμμετρικής κωδωνοειδούς μορφής (μετατοπισμένη ημιτονοειδής συνάρτηση) ενώ η αρμονική ταλάντωση παρέμεινε ίδια. Ο προτεινόμενος αναλυτικός παλμός είναι ο παρακάτω:

$$f(t) = A \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma} t\right) \right] \cos(2\pi f_p t + \nu) \quad (1)$$

Αξίζει να σημειωθούν οι εξής παρατηρήσεις:

- Η μετατοπισμένη ημιτονοειδής συνάρτηση είναι μια περιοδική συνάρτηση. Συνεπώς δεν δημιουργεί μια περιβάλλουσα με μόνο μία καμπύλη όπως η συνάρτηση Gaussian. Αυτό διορθώνεται εύκολα περιορίζοντας το χρονικό διάστημα του παλμού ως εξής:

$$-\frac{\gamma}{2f_P} \leq t \leq \frac{\gamma}{2f_P}$$

(2a)

- Η περίοδος της αρμονικής ταλάντωσης πρέπει να είναι μικρότερη από την περίοδο της περιβάλλουσας, η οποία απεικονίζεται με τη συνάρτηση συνημίτονο, προκειμένου να παράγονται φυσικώς αποδεκτοί παλμοί. Έτσι:

$$\frac{1}{f_P} < \frac{\gamma}{f_P} \Rightarrow \gamma > 1$$

(2b)

- Είναι επίσης σημαντικό να υπάρξει μια αλλαγή χρόνου, το, στην εξίσωση (1) προκειμένου να προσδιορισθεί η στιγμή που η περιβάλλουσα παρουσιάζει το μέγιστο.

$$t \Rightarrow t - t_0$$

(2c)

Ο συνδυασμός των εξισώσεων (1) και (2) διατυπώνει το αναλυτικό μοντέλο των Mavroeidis & Papageorgiou για τους παλμούς εδαφικής ταχύτητας στο κοντινό πεδίο.

$$v(t) = \left\{ A \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi f_P}{\gamma} (t - t_0)\right) \right] \cos[2\pi f_P(t - t_0) + \nu], \right.$$

$$\text{όπου } t_0 - \frac{\gamma}{2f_P} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_P} \quad \text{με } \gamma > 1$$

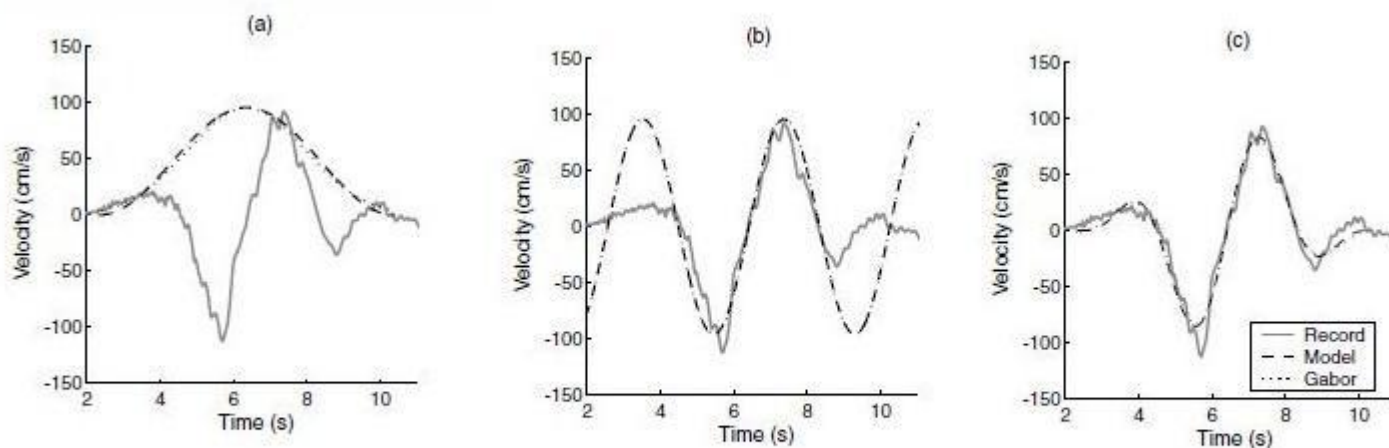
αλλιώς ισούται με 0

(3)

Οι παράμετροι A , f_p , v , γ είναι ίδιοι με αυτούς του Gabor.

Το μοντέλο των Mavroeidis & Papageorgiou και το μοντέλο του Gabor παράγουν σχεδόν πανομοιότυπους παλμούς. Αυτό αποδεικνύεται στο σχήμα 6.1 στο οποίο παρουσιάζονται και τα δύο αναλυτικά μοντέλα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργήσουν παλμούς που να προσομοιάζουν τη κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα του παλμού της ταχύτητας του σεισμού του Imperial Valley, California, 1979. Η αρμονική ταλάντωση είναι ίδια ενώ η περιβάλλουσα είναι παρόμοια.

Σχήμα 6.1: Σύγκριση περιβάλλουσων (a), αρμονικών ταλαντώσεων (b), και παλμών (c) που



δημιουργήθηκαν από τα αναλυτικά μοντέλα των Mavroeidis & Papageorgiou και Gabor προσομοιάζοντας τη κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα του παλμού της ταχύτητας του σεισμού του Imperial Valley, California, 1979.

Ένα σημαντικό στοιχείο του μοντέλου των Mavroeidis & Papageorgiou είναι ο καθορισμός της διάρκειας του παλμού με βάση τις παραμέτρους. Στο συγκεκριμένο μοντέλο ο προσδιορισμός της διάρκειας του παλμού (T_p) γίνεται έτσι ώστε να είναι συμβατή με την φυσική υπόσταση του προβλήματος και συνεπώς ορίζεται ως το ανάστροφο της συχνότητας:

$$T_p = \frac{1}{f_p}$$

(4)

Οι αναλυτικές εκφράσεις για τις χρονοϊστορίες της εδαφικής επιτάχυνσης και της μετατόπισης με βάση την εδαφική ταχύτητα (εξίσωση 3) παρουσιάζονται στις εξισώσεις (5) και (6) αντίστοιχα:

$$a(t) = \begin{cases} -\frac{A\pi f_p}{\gamma} \left[\sin\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t - t_0)\right) \cos[2\pi f_p(t - t_0) + v] + \gamma \sin[2\pi f_p(t - t_0) + v] \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t - t_0)\right) \right] \right], \\ \text{όπου } t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_p} \text{ με } \gamma > 1, \end{cases}$$

αλλιώς ισούται με 0

(5)

$$d(t) = \begin{cases} \frac{A}{4\pi f_p} \left[\sin[2\pi f_p(t - t_0) + v] + \frac{1}{2} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \sin\left[\frac{2\pi f_p(\gamma - 1)}{\gamma}(t - t_0) + v\right] + \frac{1}{2} \frac{\gamma}{\gamma + 1} \sin\left[\frac{2\pi f_p(\gamma + 1)}{\gamma}(t - t_0) + v\right] \right] + C, & \text{όταν } t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_p} \\ \frac{A}{4\pi f_p} \frac{1}{(1 - \gamma^2)} \sin(v - \pi\gamma) + C, & \text{όταν } t < t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \\ \frac{A}{4\pi f_p} \frac{1}{(1 - \gamma^2)} \sin(v + \pi\gamma) + C, & \text{όταν } t > t_0 + \frac{\gamma}{2f_p} \end{cases} \quad \gamma > 1$$

(6)

Προκειμένου να προσδιορισθεί ο άγνωστος C μελετήθηκαν ποικίλες επιλογές. Η πιο απλή επιλογή που ήταν συμβατή με την πλειοψηφία των καταγραφών είναι ότι C=0.

Μία παραμετρική μελέτη των όρων v και γ (με σταθερές τις παραμέτρους f_p και A) των κανονικοποιημένων παλμών της επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση τις παραπάνω εξισώσεις. Η κανονικοποιημένη μεταβλητή όσον αφορά το χρόνο δίνεται:

$$\bar{t} = 2\pi f_p(t - t_0)$$

(7)

Οι κανονικοποιημένες χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης προκύπτει ξαναγράφοντας τις εξισώσεις (5), (3) και (6) αντίστοιχα ως εξής:

$$\bar{a}(\bar{t}) = \frac{a(t)}{Af_p} = \begin{cases} -\frac{\pi}{\gamma} \left[\sin\left(\frac{\bar{t}}{\gamma}\right) \cos(\bar{t} + v) + \gamma \sin(\bar{t} + v) \left(1 + \cos\left(\frac{\bar{t}}{\gamma}\right)\right) \right], & \text{όπου } -\pi\gamma \leq \bar{t} \leq \pi\gamma \text{ με } \gamma > 1 \\ \text{αλλιώς ισούται με } 0 \end{cases}$$

(8)

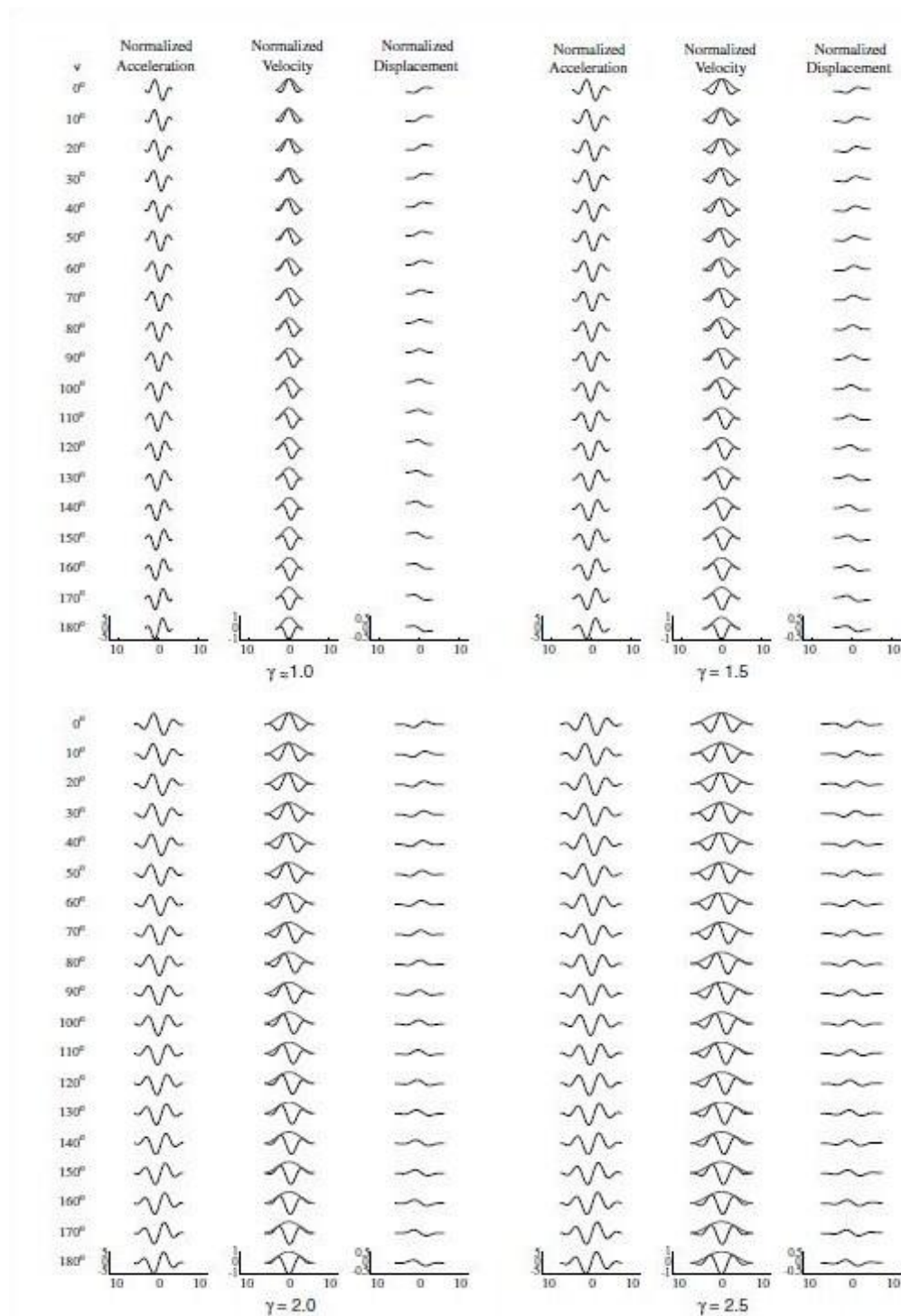
$$\bar{v}(\bar{t}) = \frac{v(\bar{t})}{A} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{\bar{t}}{\gamma}\right) \right] \cos(\bar{t} + v), & \text{όπου } -\pi\gamma \leq \bar{t} \leq \pi\gamma \text{ με } \gamma > 1 \\ \text{αλλιώς ισούται με } 0 \end{cases}$$

(9)

$$\bar{d}(\bar{t}) = \frac{d(t)}{(A/f_p)} = \begin{cases} \frac{1}{4\pi} \left[\sin(\bar{t} + v) + \frac{1}{2} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \sin\left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \bar{t} + v\right) + \frac{1}{2} \frac{\gamma}{\gamma + 1} \sin\left(\frac{\gamma + 1}{\gamma} \bar{t} + v\right) \right], & \text{όταν } -\pi\gamma \leq \bar{t} \leq \pi\gamma \\ \frac{1}{4\pi} \frac{1}{(1 - \gamma^2)} \sin(v - \pi\gamma), & \text{όταν } \bar{t} < -\pi\gamma \\ \frac{1}{4\pi} \frac{1}{(1 - \gamma^2)} \sin(v + \pi\gamma), & \text{όταν } \bar{t} > \pi\gamma \end{cases} \quad \gamma > 1$$

(10)

Στο σχήμα 6.2 παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις κανονικοποιημένες χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης για διάφορες τιμές των παραμέτρων v και γ . Για $v = 0$ και 180 μοίρες, προκύπτουν συμμετρικοί παλμοί ενώ για $v = 90$ και 270 μοίρες αντισυμμετρικοί. Επιπλέον, παρατηρείται ότι καθώς η παράμετρος γ αυξάνεται έχουμε περισσότερα ημικύκλια στο παλμό. Επίσης, η παράμετρος A επηρεάζει το εύρος της επιτάχυνσης και της μετατόπισης μόνο όταν η f_p επηρεάζει το χρονικό διάστημα των χρονοϊστοριών που δημιουργήθηκαν. Αντιθέτως, το εύρος της ταχύτητας είναι ανεξάρτητο από την f_p .



Σχήμα 6.2: Κανονικοποιημένοι παλμοί επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης, με βάση τον κανονικοποιημένο χρόνο, για διάφορες τιμές των παραμέτρων ν και γ . Οι πάνω γραμμές στους παλμούς της ταχύτητας δείχνουν την περιβάλλουσα.

6.3 Η σχέση της περιόδου του παλμού με το σεισμικό μέγεθος

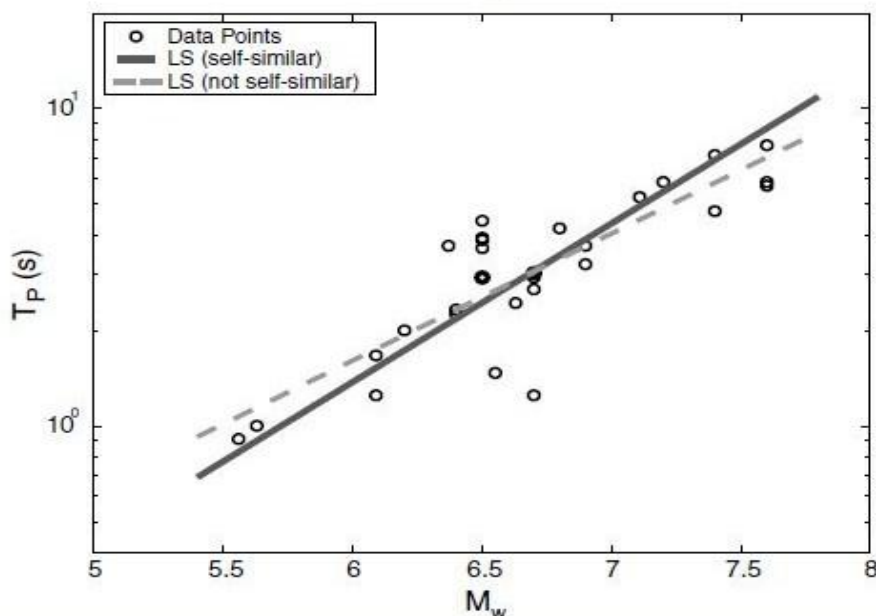
Η δεσπόζουσα συχνότητα και κατ' επέκταση η περίοδος του παλμού T_p συνδέεται άμεσα με το σεισμικό μέγεθος M_w . Οι Mavroeidis & Papageorgiou λαμβάνοντας υπόψη τις καταγραφές που συμπεριελάμβαναν το φαινόμενο της κατευθυντικότητας, κατέληξαν σε κάποιες εμπειρικές σχέσεις που δείχνουν την αλληλεξάρτηση της περιόδου του παλμού με το σεισμικό μέγεθος. Υποθέτοντας ότι η διάρκεια του παλμού είναι ανεξάρτητη από την απόσταση του ρήγματος από την ενδιαφερόμενη θέση, εάν απέχουν λιγότερο από 10 km, η περίοδος του παλμού και το σεισμικό μέγεθος σχετίζονται με την παρακάτω εμπειρική σχέση που προέκυψε από τη μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων :

$$\log T_p = -2.2 + 0.4 M_w \quad (11a)$$

Προκειμένου να υπάρχει συνοχή και ομοιομορφία και με τα αποτελέσματα άλλων μεθοδολογιών (Aki et al.1997, Papageorgiou και Aki 1938b, Aki 1992, Somerville et al. 1999) η παραπάνω σχέση παίρνει τελικά τη μορφή:

$$\log T_p = -2.9 + 0.5 M_w \quad (11b)$$

Στο σχήμα 6.3 απεικονίζονται αυτές οι εμπειρικές σχέσεις καθώς και τα αποτελέσματα των καταγραφών.



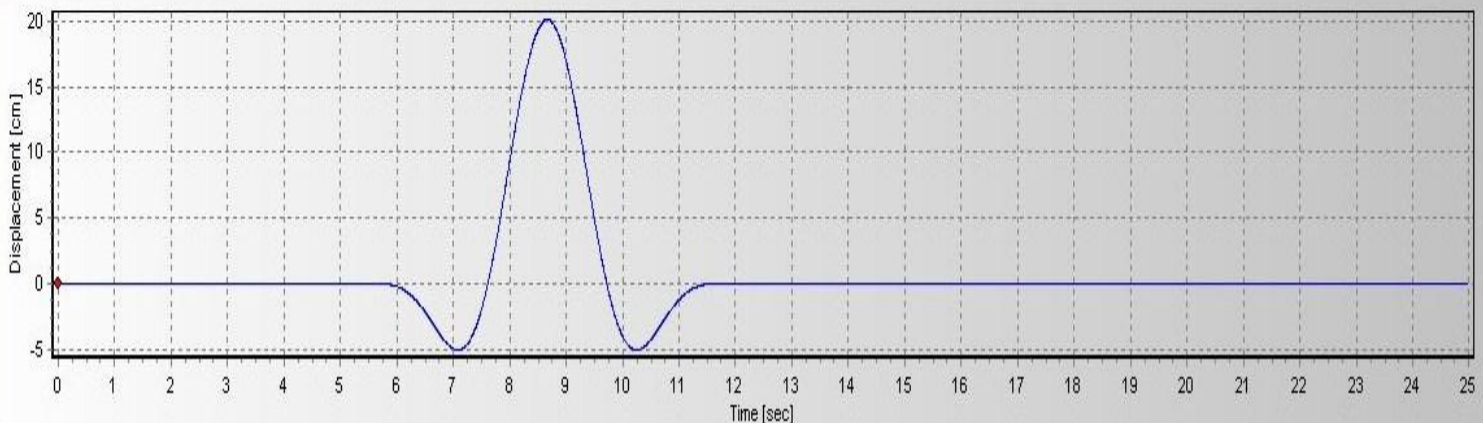
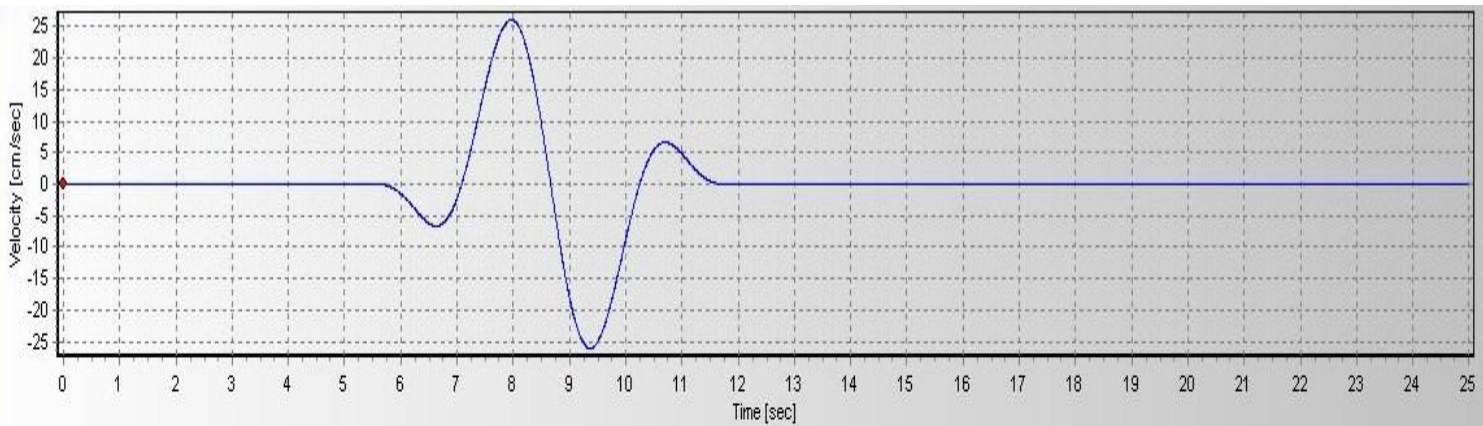
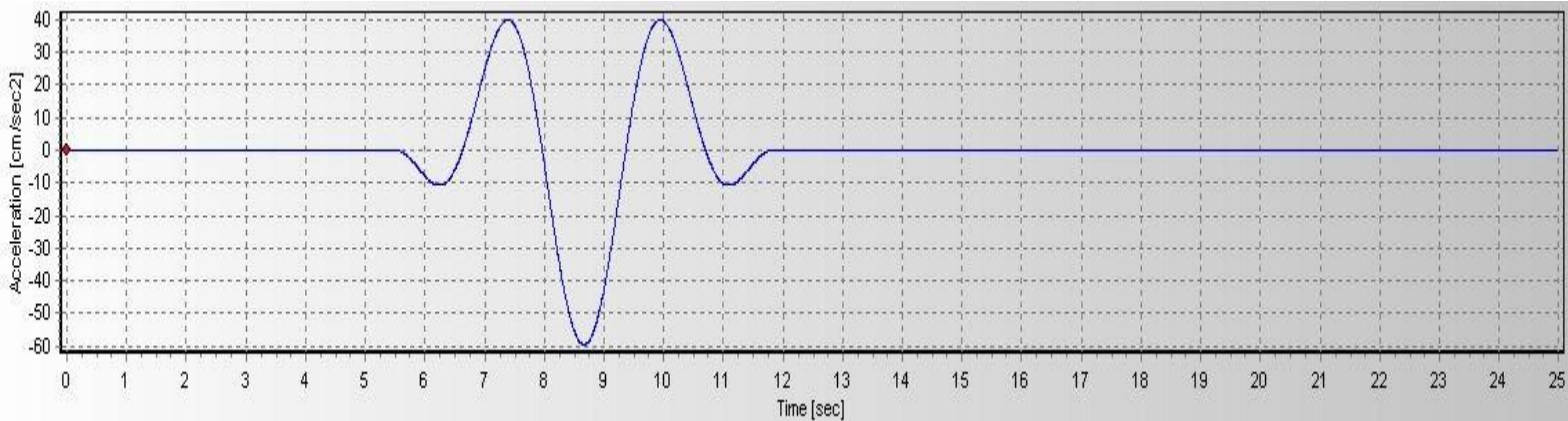
Σχήμα 6.3: Οι εμπειρικές σχέσεις που προέκυψαν από τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων λαμβάνοντας υπόψη και μη την ομοιομορφία με τις άλλες σχέσεις. Οι καταγραφές που απεικονίζονται περιλαμβάνουν το φαινόμενο της κατευθυντικότητας.

6.4 Εφαρμογή του μοντέλου των Mavroeidis & Parageorgiou για τη δημιουργία χρονοϊστοριών.

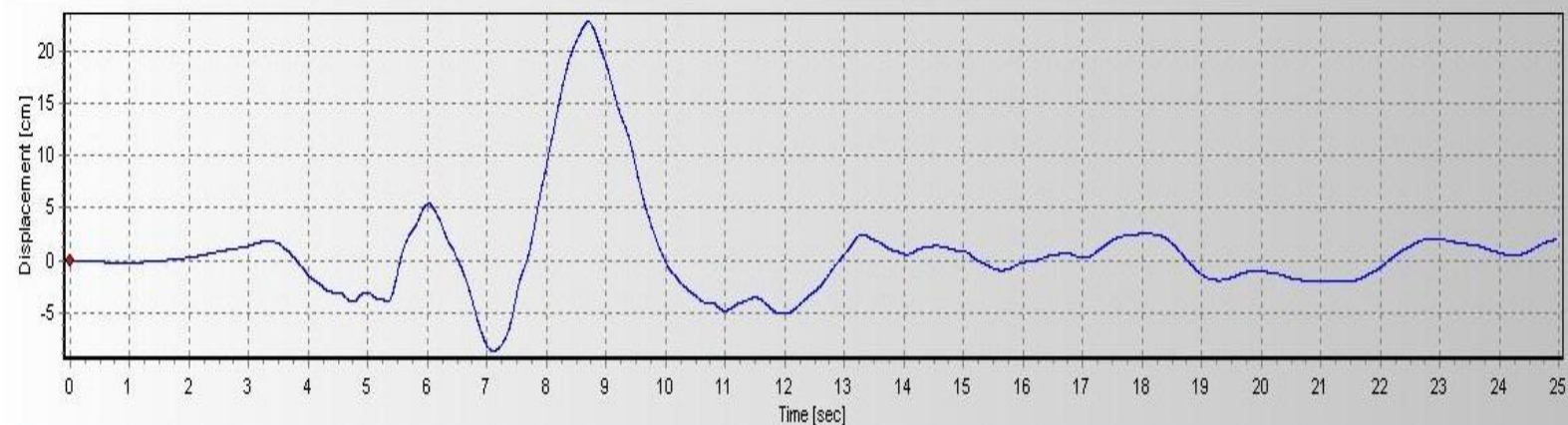
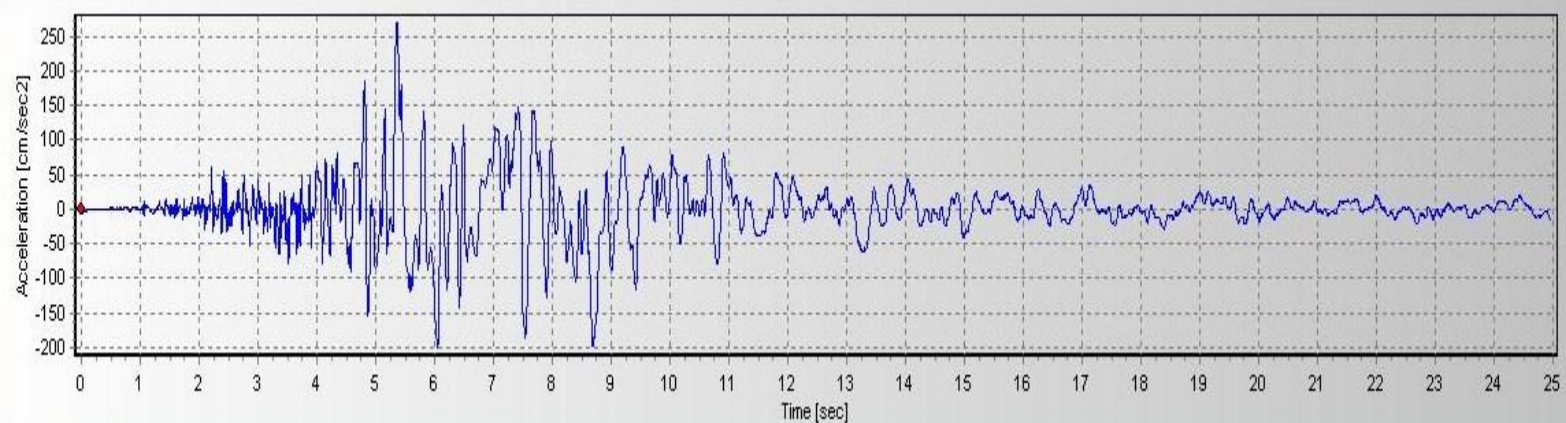
Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο των Mavroeidis & Parageorgiou για να συνθέσουμε χρονοϊστορίες στις οποίες συμπεριλαμβάνεται το φαινόμενο της κατευθυντικότητας. Παρακάτω αναλύεται η ακριβής πορεία που ακολουθήσαμε μέσω της παρουσίασης της σύνθεσης της χρονοϊστορίας σε μία απόσταση 5 km από το ρήγμα, εδάφους B και χωρίς να ληφθεί υπόψη η τυπική απόκλιση. Οι υπόλοιπες χρονοϊστορίες που δημιουργήσαμε, των άλλων ενδεικτικών αποστάσεων, των άλλων τύπων εδαφών, με και χωρίς τυπική απόκλιση, με μέγεθος σεισμού το μέγιστο ($M=6,8$), παρουσιάζονται στο παράρτημα της παρούσας διπλωματικής.

Βήμα 1ο: Δημιουργήσαμε τον παλμό κατευθυντικότητας της μεθοδολογίας των Mavroeidis & Parageorgiou. Όσον αφορά τις τιμές των παραμέτρων, εισάγαμε ως συχνότητα f_p το αντίστροφο της περιόδου του παλμού που είχαμε υπολογίσει στο 4ο κεφάλαιο ($1/3,162 = 0,316$). Επιπλέον, θεωρήσαμε αριθμό ημικυκλίων $\gamma=2$ καθώς στην πλειοψηφία των παλμών που συνθέθηκαν στην έρευνα των Mavroeidis & Parageorgiou η παράμετρος γ κυμαινόταν από 1 έως 3. Την φάση της ταλάντωσης

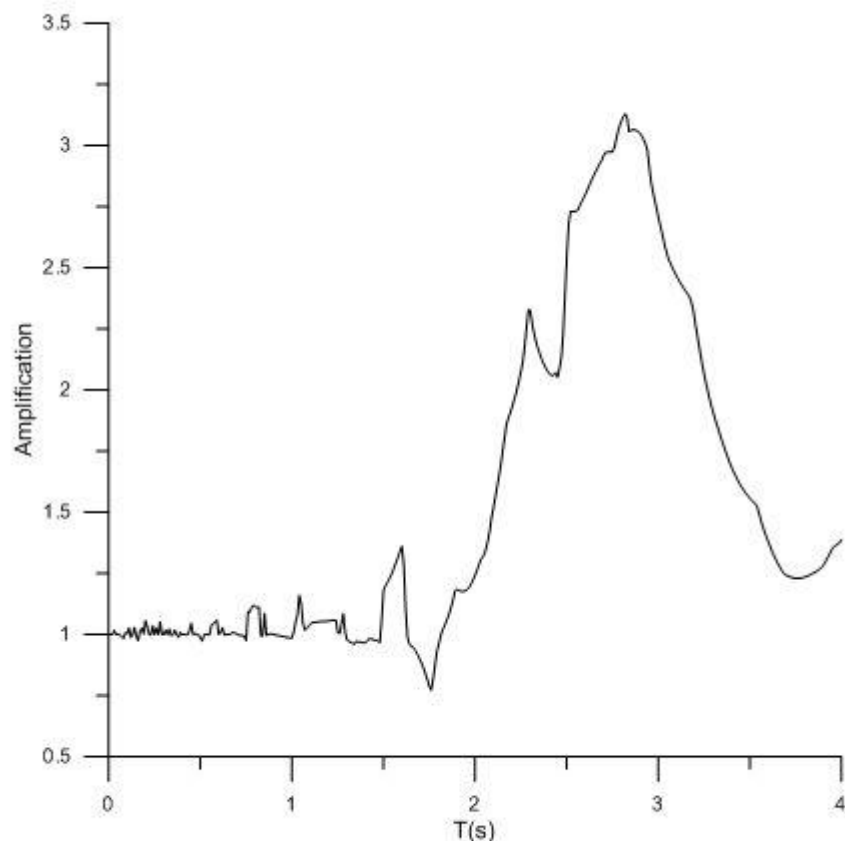
την θεωρήσαμε $\pi/2$. Τέλος, όσον αφορά το εύρος του παλμού της ταχύτητας, επιλέξαμε μία τυχαία τιμή από 35 έως 50 cm/s. Οι παλμοί της επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης που δημιουργήσαμε για μία θέση σε απόσταση 5 km από το ρήγμα, εδάφους B και χωρίς να λάβουμε υπόψη την τυπική απόκλιση παρουσιάζεται παρακάτω:



Βήμα 2ο: Δημιουργήσαμε τις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης στις οποίες συμπεριλαμβάνεται το φαινόμενο της κατευθυντικότητας. Αυτό επιτεύχθηκε με το συνδυασμό των αντίστοιχων χρονοϊστοριών (ίδια απόσταση, τύπος εδάφους) που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5, με τους παλμούς του προηγούμενου βήματος. Οι τελικές χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης είναι:



Βήμα 3ο: Σε αυτό το βήμα που είναι και το τελευταίο ελέγξαμε εάν η τιμή του εύρους της ταχύτητας του παλμού που υποθέσαμε είναι η κατάλληλη. Συγκεκριμένα, μέσω του προγράμματος Seismosignal, πήραμε το ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης και το φάσμα επιτάχυνσης με 5% απόσβεση που αντιστοιχούσαν στην χρονοϊστορία του βήματος 2. Τα ίδια φάσματα εξάγαμε (χρησιμοποιώντας το ίδιο πρόγραμμα) και για τις χρονοϊστορίες στις οποίες δεν συμπεριλαμβάνεται ο παλμός. Δημιουργώντας την αναλογία ανάμεσα στην περίπτωση ύπαρξης παλμού και μη, ελέγξαμε εάν έχουμε ενίσχυση τάξεως 3 στην κωδωνοειδή καμπύλη περίπου στην περίοδο του παλμού (T_p), όπως ορίζεται από το μοντέλο των Shahi & Baker (κεφάλαιο 4). Εάν το αποτέλεσμα ήταν αποδεκτό θεωρήσαμε το εύρος που επιλέξαμε σωστό. Διαφορετικά επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία μέχρι να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα, αλλάζοντας την τιμή του εύρους επιλέγοντας μία τιμή από 35-50. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την επιθυμητή ενίσχυση της τάξεως του 3 της κωδωνοειδής καμπύλης:



Κεφάλαιο 7

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ-MONTELO GLAISTER & PINHO

7.1 Εισαγωγή

7.2 Παρουσίαση του μοντέλου Glaister & Pinho

7.3 Η παράμετρος του ενεργού ύψους

7.4 Σχέσεις ύψους-καμπύλες ικανότητας μετακίνησης

7.4.1 Οριακή κατάσταση διαρροής

7.4.2 Οριακές καταστάσεις μετά τη διαρροή

7.4.3 Πλαστιμότητα σε κάθε οριακή κατάσταση

7.5 Σχέσεις ύψους-περιόδου

7.5.1 Οριακή κατάσταση διαρροής

7.5.2 Οριακές καταστάσεις μετά τη διαρροή

7.6 Καμπύλες ικανότητας

7.7 Φάσματα απόκρισης-Καμπύλες ζήτησης

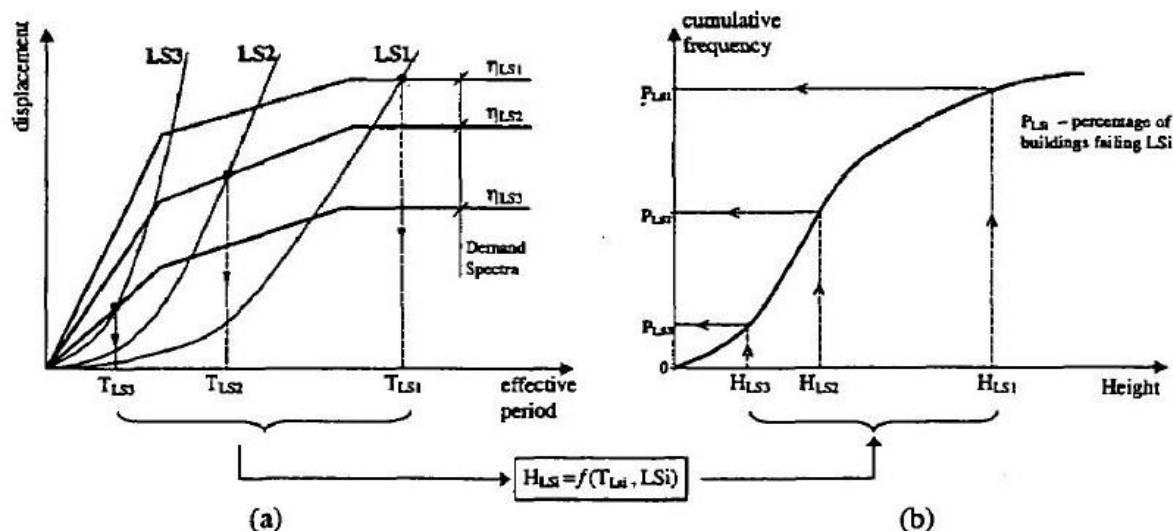
7.8 Εφαρμογή του μοντέλου των Glaister & Pinho

7.1 Εισαγωγή

Πολλά μοντέλα έχουν προταθεί προκειμένου να αξιολογηθούν οι σεισμικές απώλειες στις κατασκευές είτε με βάση τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA), είτε τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV), είτε με βάση την ένταση. Το μοντέλο των Glaister & Pinho που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική, επιλέγει ως πιο κατάλληλη ένδειξη των σεισμικών απωλειών, την περίοδο της ταλάντωσης της κατασκευής και τις μετατοπίσεις της κατασκευής. Εξίσου σημαντική είναι και η σχέση μεταξύ των διαφορετικών καταστάσεων απώλειας.

7.2 Παρουσίαση του μοντέλου Glaister & Pinho

Στο σχήμα 7.1 παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία του μοντέλου. Χρησιμοποιώντας αναλυτικές σχέσεις μεταξύ του ύψους της κατασκευής και της μέγιστης δυνατής μετατόπισης και εμπειρικές σχέσεις μεταξύ του ύψους και της ελαστικής περιόδου, είναι εφικτό να καθοριστούν οι καμπύλες ικανότητας για τα διάφορα στάδια απωλειών, συνάρτηση της περιόδου και της μετατόπισης (σχήμα 7.1a). Τα σημεία τμήσεως μεταξύ του φάσματος μετακίνησης (στο οποίο συμπεριλαμβάνεται η απόσβεση η_{LSi} με βάση την αντίστοιχη πλαστιμότητα μ_{LSi}) και των καμπύλων ικανότητας, προσδιορίζουν τις περιόδους T_{LSi} που δείχνουν τα όρια του κάθε σταδίου απωλειών. Συνεπώς, όλες οι περίοδοι αριστερά από το σημείο τμήσης αντιπροσωπεύουν κτίρια στα οποία η ζήτηση υπερβαίνει την ικανότητα ενώ όλες οι περίοδοι στα δεξιά κτίρια στα οποία η ικανότητα υπερβαίνει τη ζήτηση. Οι περίοδοι αυτές μετά μετασχηματίζονται σε αντίστοιχα ύψη δημιουργώντας μία αθροιστική συνάρτηση κατανομής των κτιρίων με τα ύψη προκειμένου να βρεθεί ποίο ύψος αστοχεί στο κάθε στάδιο απωλειών (σχήμα 7.1b). Προκύπτει λοιπόν εύλογα ότι προσδιορίζοντας τις σχέσεις μεταξύ περιόδου, ύψους και μετατόπισης είναι δυνατό να υπολογιστούν οι απώλειες στα κτίρια σε μία δεδομένη τοποθεσία και με βάση ένα δεδομένο σεισμό. Αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο μοντέλο ισχύει για πλαίσια από οπλισμένο σκυρόδεμα τα οποία αστοχούν είτε με μηχανισμό δοκού (νεώτερες κατασκευές) είτε με μηχανισμό υποστυλώματος.



Σχήμα 7.1: Μοντέλο των Glaister & Pinho (a) καμπύλες ικανότητας και φάσματα απόκρισης συναρτήση της μετατόπισης (b) Αθροιστική συνάρτηση κατανομής για τα ύψη των κτιρίων

7.3 Η παράμετρος του ενεργού ύψους

Προκειμένου να προκύψουν οι καμπύλες ικανότητας, λήφθηκε υπόψη ότι η ζήτηση προσδιορίζεται από ένα φάσμα μετακίνησης το οποίο δείχνει την αναμενόμενη μετακίνηση σε ένα μονοβάθμιο σύστημα με συγκεκριμένη περίοδο και απόσβεση. Συνεπώς και η καμπύλη ικανότητας πρέπει να αντιστοιχεί στο ίδιο μονοβάθμιο σύστημα και όχι στο πραγματικό κτίριο. Έτσι, οι καμπύλες ικανότητας πρέπει να είναι συναρτήσει της παραμέτρου του ενεργού ύψους (ef_h). Η παράμετρος αυτή προκύπτει ως το πηλίκο μεταξύ του ύψους στο μονοβάθμιο σύστημα (H_{SDOF}) όπου η ικανή μετακίνηση είναι ίδια με αυτή του πραγματικού κτιρίου στο ύψος του σημείου επιβολής της σεισμικής δύναμης (H_{csf}), και του συνολικού ύψους του πραγματικού κτιρίου (H_T) όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 7.2.

Όσον αφορά το μηχανισμό αστοχίας δοκού, ο όρος H_{csf} είναι συνάρτηση του ολικού ύψους, με τιμή από $0,67H_T$ μέχρι $0,61H_T$ καθώς ο αριθμός των ορόφων αυξάνεται από 4 σε 20. Αυτή η διαφοροποίηση δεν είναι σημαντική και έτσι ορίζεται ότι $H_{csf} = 0,64H_T$ ανεξαρτήτως του αριθμού των ορόφων. Η παράμετρος του ενεργού ύψους για μηχανισμό αστοχίας δοκού είναι συνάρτηση του αριθμού των ορόφων όπως φαίνεται στην εξίσωση 1:

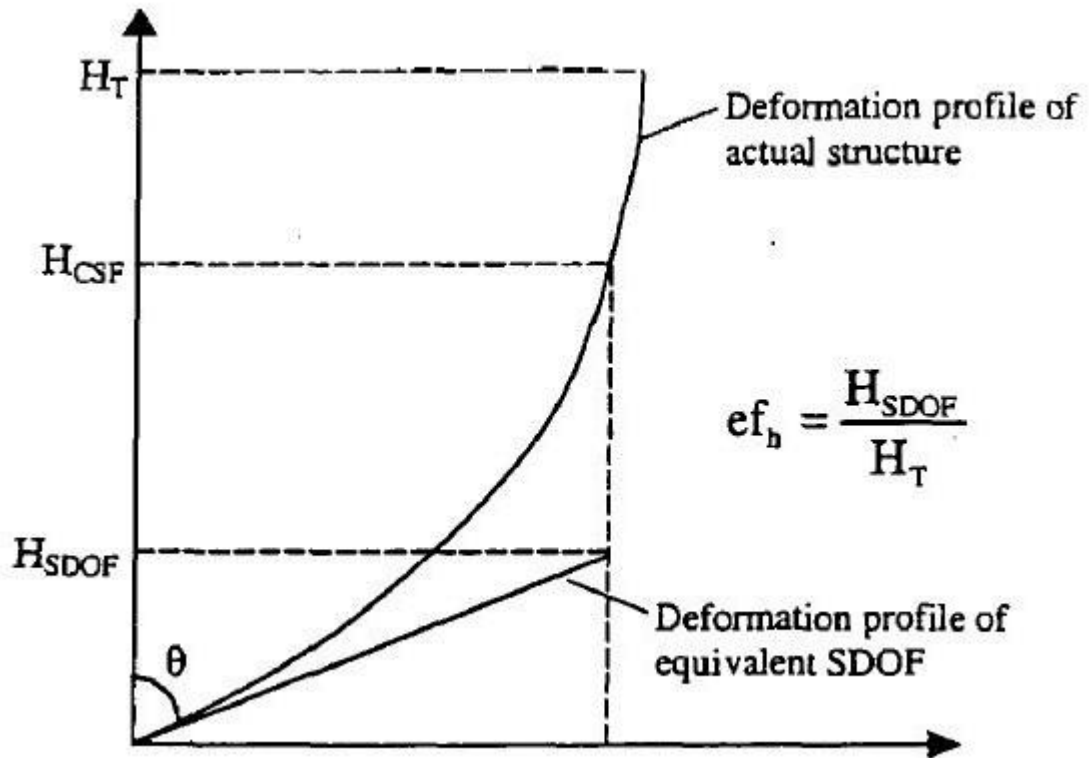
$$\begin{aligned}
 ef_h &= 0.64 & n &\leq 4 \\
 ef_h &= 0.64 - 0.0125(n - 4) & 4 < n < 20 \\
 ef_h &= 0.44 & n &\geq 20
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Όσον αφορά το μηχανισμό αστοχίας υποστηλώματος, ο όρος H_{csf} μειώνεται καθώς οι ανελαστικές παραμορφώσεις αυξάνονται, ξεκινώντας από 0,67 για μικρή πλαστιμότητα φτάνοντας 0,5 για μεγάλη πλαστιμότητα. Συνεπώς, κρίνεται σημαντικό ο όρος ef_h να συνδέεται με την πλαστιμότητα της κατασκευής (μ) με την εξής σχέση:

$$ef_h = 0.67 - 0.17 \frac{\mu - 1}{\mu}
 \tag{2}$$

Επειδή όμως η πλαστιμότητα ορίζεται συναρτήσει του ef_h , όπως προσδιορίζεται παρακάτω, η σχέση (2) οδηγεί σε πολύ περίπλοκες σχέσεις με μικρό όφελος όσον αφορά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Γι' αυτό το λόγο, η σχέση (2) αντικαθιστάται από την εξίσωση (3) όπου ο όρος ef_h εκφράζεται συναρτήσει των ιδιοτήτων των υλικών.

$$ef_h = 0.67 - 0.17 \frac{\varepsilon_{S(Lsi)} - \varepsilon_y}{\varepsilon_{S(Lsi)}}
 \tag{3}$$



Σχήμα 7.2: Καθορισμός της παραμέτρου του ενεργού ύψους

7.4 Σχέσεις ύψους-καμπύλες ικανότητας μετακίνησης

7.4.1 Οριακή κατάσταση διαρροής

Θεωρώντας ότι σε όλα τα στάδια πριν τη διαρροή η μετακίνηση είναι γραμμική σε σχέση με το ύψος και ότι η μέση στροφή στο όριο διαρροής πρέπει να αντιστοιχεί στο θεωρητικό σημείο διαρροής μιας ιδεατής διγραμμικής απόκρισης, τότε η μετακίνηση του αντίστοιχου μονοβαθμίου στο όριο διαρροής του οπλισμένου σκυροδέματος (Δ_{LSy}) προκύπτει από την εξίσωση 4. Στην εξίσωση αυτή η παράμετρος θ_y αντιπροσωπεύει την στροφή του πλαισίου στη διαρροή και είναι αντίστοιχη της στροφής στη βάση του μονοβάθμιου συστήματος.

$$\Delta_{LSy} = ef_b H_T \theta_y$$

(4)

Για τον υπολογισμό της θ_y , πρέπει να καθοριστεί η καμπυλότητα στη διαρροή (Φ_y) συναρτήσει του ορίου διαρροής του χάλυβα (ε_y) και του πλάτους της δοκού (h_b). Με βάση τη μελέτη του Priestley [1993,1998] υπολογίστηκε η καμπυλότητα (εξίσωση 5a-6a) η οποία έπειτα χρησιμοποιήθηκε για να βρεθεί η στροφή στο όριο διαρροής (θ_{by} -εξίσωση 5b-6b) όπου l_b είναι το μήκος της δοκού. Η τελική στρόφη προέκυψε με τον πολλαπλασιασμό της θ_{by} με εμπειρικούς συντελεστές προκειμένου να συνυπολογισθεί η ευκαμψία αρθρωμένων και πλαισιωτών μελών. Οι εξισώσεις παρουσιάζονται παρακάτω:

Για μηχανισμό αστοχίας δοκού:

$$\Phi_y = 1.7 \frac{\varepsilon_y}{h_b} \quad (5a)$$

$$\theta_{by} = \frac{1}{6} \Phi_y l_b = 0.283 \varepsilon_y \frac{l_b}{h_b} \quad (5b)$$

$$\theta_y = 1.75 \times \theta_{by} = 0.5 \varepsilon_y \frac{l_b}{h_b} \quad (5c)$$

Για μηχανισμό αστοχίας υποστηλώματος:

$$\Phi_y = 2.14 \frac{\varepsilon_y}{h_c} \quad (6a)$$

$$\theta_{cy} = \frac{1}{6} \Phi_y h_s = 0.357 \varepsilon_y \frac{h_s}{h_c} \quad (6b)$$

$$\theta_y = 1.2 \times \theta_{cy} = 0.43 \varepsilon_y \frac{h_s}{h_c} \quad (6c)$$

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι ενώ η εξίσωση (5c) που αφορά την ευκαμψία των αρθρωτών και πλαισιωτών μελών ακολουθεί τη μελέτη του Priestley, η εξίσωση (6c), υποτέθηκε από τους Glaister & Pinho ώστε να υπάρχει συνοχή στα αποτελέσματα, χωρίς να υπάρχει άμεση σχέση με την ευκαμψία των αρθρωτών και πλαισιωτών μελών.

Αντικαθιστώντας τις τελικές εξισώσεις (5c) και (6c) στην εξίσωση (4) προκύπτει η μέγιστη δυνατή μετακίνηση στο όριο διαρροής για μηχανισμό δοκού (7) και μηχανισμό υποστηλώματος (8) αντίστοιχα:

$$\Delta_{LSy} = 0.5ef_h H_T \varepsilon_y \frac{l_b}{h_b} \quad (7)$$

$$\Delta_{LSy} = 0.43ef_h H_T \varepsilon_y \frac{h_s}{h_c} \quad (8)$$

7.4.2 Οριακές καταστάσεις μετά τη διαρροή

Η σύνθεση της σχέσης μεταξύ καμπύλης ικανότητας και ύψους για τα στάδια μετά τη διαρροή προκύπτει εύκολα προσθέτοντας στην παραπάνω εξίσωση έναν δεύτερο όρο που αντιπροσωπεύει την ανελαστική συμπεριφορά της καμπύλης ικανότητας της μετακίνησης συναρτήσει του ύψους και της οριακής κατάστασης (limit state).

Η μέγιστη καμπυλότητα (Φ_{LSi}) προσδιορίζεται από την εξίσωση (9a) όπου h_x είναι το ύψος της δοκού (h_b) για μηχανισμό αστοχίας δοκού και το πλάτος του υποστηλώματος (h_c) για μηχανισμό αστοχίας υποστηλώματος. Η μέγιστη πλαστική καμπυλότητα προκύπτει ως η διαφορά ανάμεσα στη μέγιστη καμπυλότητα και την καμπυλότητα στο όριο διαρροής (9b). Το μήκος της πλαστικής άρθρωσης (L_{ph}) καθορίζεται από την εξίσωση (9c), που προτάθηκε από τους Paulay & Priestley [1992], και έπειτα χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της πλαστικής στροφής (θ_{pi}) στην εξίσωση (9d). Τέλος, το στοιχείο που εκφράζει την πλαστική συμπεριφορά της μετακίνησης (Δ_{pi}) προκύπτει πολλαπλασιάζοντας την προηγούμενη εξίσωση με το ύψος του στοιχείου που διαρρέει H_x , το οποίο είναι το ολικό ενεργό ύψος ($ef_h H_T$) για μηχανισμό αστοχίας δοκού και το ύψος του ορόφου (h_s) για μηχανισμό αστοχίας υποστηλώματος.

$$\Phi_{LSi} = (\epsilon_{C(LSi)} + \epsilon_{S(LSi)}) \frac{1}{h_x} \quad (9a)$$

$$\Phi_{pi} = \Phi_{LSi} - \Phi_y \quad (9b)$$

$$L_{ph} = e f_p h_x = 0.5 h_x \quad (9c)$$

$$\theta_{pi} = L_{ph} (\Phi_{LSi} - \Phi_y) = 0.5 h_x (\Phi_{LSi} - \Phi_y) \quad (9d)$$

$$\Delta_{pi} = \theta_{pi} H_x = 0.5 h_x (\Phi_{LSi} - \Phi_y) H_x \quad (9e)$$

Η μετακίνηση για μια συγκεκριμένη οριακή κατάσταση μετά τη διαρροή είναι αποτέλεσμα της σύνθεσης των συστατικών παραμόρφωσης στη διαρροή και μετά τη διαρροή. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην εξίσωση 10 και 11 για μηχανισμό αστοχίας δοκού και μηχανισμό αστοχίας υποστηλώματος αντίστοιχα:

$$\Delta_{LSi} = 0.5 e f_h H_T \left[\epsilon_{C(LSi)} + \epsilon_{S(LSi)} - \left(1.7 - \frac{1_b}{h_b} \right) \epsilon_y \right] \quad (10)$$

$$\Delta_{LSi} = 0.43 e f_h H_T \epsilon_y \frac{h_s}{h_c} + 0.5 (\epsilon_{C(LSi)} + \epsilon_{S(LSi)} - 2.14 \epsilon_y) h_s \quad (11)$$

7.4.3 Πλαστιμότητα σε κάθε οριακή κατάσταση

Η πλαστιμότητα σε κάθε οριακή κατάσταση ορίζεται ως το πηλίκο της μέγιστης μετατόπισης προς τη μετατόπιση διαρροής. Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει η πλαστιμότητα σε κάθε οριακή κατάσταση για μηχανισμό αστοχίας δοκού (12) και μηχανισμό αστοχίας υποστηλώματος (13):

$$\mu_{LSi} = \frac{\Delta_{LSi}}{\Delta_{LSy}} = 1 + \frac{\varepsilon_{C(LSi)} + \varepsilon_{S(LSi)} - 1.7\varepsilon_y}{\varepsilon_y} \frac{h_b}{l_b} \quad (12)$$

$$\mu_{LSi} = \frac{\Delta_{LSi}}{\Delta_{LSy}} = 1 + \frac{\varepsilon_{C(LSi)} + \varepsilon_{S(LSi)} - 2.14\varepsilon_y}{0.86\varepsilon_y} \frac{h_c}{e f_h H_T} \quad (13)$$

7.5 Σχέσεις ύψους-περιόδου

7.5.1 Οριακή κατάσταση διαρροής

Στις οριακές καταστάσεις όπου η πλαστιμότητα είναι ίση ή μικρότερη από τη μονάδα, η περίοδος του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος (T_{LSy}) ισούται με την πραγματική περίοδο του κτιρίου πριν τη διαρροή και δίνεται από την εμπειρική σχέση που προτείνει ο EC8:

$$T_{LSy} = \alpha H_T^\beta = 0.1 \cdot H_T^{3/4} \quad (14)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή της μεταβλητής α διαφέρει από αυτή που προτείνεται από τον EC8, όπου $\alpha=0,075$ για την εκτίμηση της περιόδου μη ρηγματωμένων κτιρίων. Στην παρούσα έρευνα των Glaister & Pinho σκοπός είναι να προσδιορισθεί η περίοδος για ρηγματωμένα κτίρια και συνεπώς αυξάνεται η τιμή του α κατά 1,35 εκτιμώντας την ακαμψία των ρηγματωμένων κτιρίων περίπου ίση με το 55% των αρηγματωτων.

7.5.2 Οριακές καταστάσεις μετά τη διαρροή

Στις οριακές καταστάσεις όπου η κατασκευή αναμένεται να παρουσιάσει ανελαστικές παραμορφώσεις, υπάρχει άμεση σχέση της περιόδου με την πλαστιμότητα της κατασκευής. Δεδομένης μια ελαστοπλαστικής σχέσης ανάμεσα στη δύναμη και τη μετατόπιση, η τέμνουσα δυσκαμψία στο σημείο της μέγιστης εκτροπής (k_{LSi}) είναι συνάρτηση της ελαστικής δυσκαμψίας (k_y) και της πλαστιμότητας (μ_{LSi}). Εφόσον η ελαστική περίοδος είναι επίσης συνάρτηση της ελαστικής δυσκαμψίας, είναι προφανές ότι και η ενεργή περίοδος (T_{LSi}) της ανελαστικής κατασκευής είναι συνάρτηση της ελαστικής περιόδου και της πλαστιμότητας. Οι εξισώσεις 15a-15d παρουσιάζουν αυτή ακριβώς τη πορεία καταλήγοντας σε μία σχέση που δίνει την ενεργή περίοδο σε μια οριακή κατάσταση i σε σχέση με τη πλαστιμότητα ακι την ενεργή περίοδο, ανεξάρτητη πλήρως από το μηχανισμό αστοχίας:

$$f_y = k_y \Delta_y = k_{LSi} \Delta_{LSi} \quad (15a)$$

$$k_{LSi} = \frac{k_y \Delta_y}{\Delta_{LSi}} = \frac{k_y}{\mu_{LSi}} \quad (15b)$$

$$T \propto k^{-1/2} \propto \mu^{1/2} \quad (15c)$$

$$T_{LSi} = T_{LSy} \sqrt{\mu_{LSi}} \quad (15d)$$

Με βάση τις εξισώσεις (12) και (13) όπου η πλαστιμότητα εκφράζεται συναρτήσει του ύψους, των διαστάσεων της δοκού και τις ιδιότητες των υλικών, την εξίσωση (14) όπου η ελαστική περίοδος εκφράζεται συναρτήσει του ύψους και την παραπάνω εξίσωση (15d) προκύπτει η εξίσωση του ύψους του κτιρίου σε σχέση με την ενεργό περίοδο για μηχανισμό αστοχίας δοκού (16) και υποστηλώματος (17) αντίστοιχα:

$$H_T(T_{LSi}) = C_3 T_{LSi}^{4/3} \quad (16)$$

$$H_T(T_{LSi}) = \left(\frac{C_2}{3} - \frac{C_1}{ef_h C_2} \right)^2 \quad (17)$$

όπου C_1 , C_2 και C_3 :

$$C_1 = \frac{\varepsilon_{C(LSi)} + \varepsilon_{S(LSi)} - 2.14\varepsilon_y}{0.86\varepsilon_y} h_c \quad (18a)$$

$$C_2 = \left[1350 \cdot T_{LSi}^2 + 3 \sqrt{3 \left(\frac{C_1}{ef_h} \right)^3 + 202500 \cdot T_{LSi}^4} \right]^{1/3} \quad (18b)$$

$$C_3 = 10^{4/3} \left(1 + \frac{\varepsilon_{C(LSi)} + \varepsilon_{S(LSi)} - 1.7\varepsilon_y}{\varepsilon_y} \frac{h_b}{l_b} \right)^{-2/3} \quad (18c)$$

7.6 Καμπύλες ικανότητας

Η μόρφωση των καμπύλων ικανότητας που παρουσιάζουν τη μέγιστη δυνατή μετακίνηση συναρτήσει της ενεργούς περιόδου προκύπτει εύκολα από τα παραπάνω κεφάλαια. Οι εξισώσεις (19a) και (19b) εκφράζουν τις καμπύλες ικανότητας για μηχανισμό αστοχίας δοκού και οι εξισώσεις (20a) και (20b) για μηχανισμό αστοχίας υποστηλώματος στην οριακή κατάσταση διαρροής και στις οριακές καταστάσεις μετά τη διαρροή αντίστοιχα:

$$\Delta_{LSy}(T_{LSy}) = \frac{0.5ef_h l_b \varepsilon_y}{h_b} (10 \cdot T_{LSy})^{4/3} \quad (19a)$$

$$\Delta_{LSi}(T_{LSi}) = 0.5ef_h C_3 T_{LSi}^{4/3} \left[\varepsilon_{C(LSi)} + \varepsilon_{S(LSi)} - \left(1.7 - \frac{l_b}{h_b} \right) \varepsilon_y \right] \quad (19b)$$

$$\Delta_{LSy}(T_{LSy}) = \frac{0.43ef_h h_s \varepsilon_y}{h_c} (10 \cdot T_{LSy})^{4/3} \quad (20a)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{LSi}(T_{LSi}) = & \frac{0.43ef_h h_s \varepsilon_y}{h_c} \left(\frac{C_2}{3} - \frac{C_1}{ef_h C_2} \right)^2 \\ & + 0.5(\varepsilon_{C(LSi)} + \varepsilon_{S(LSi)} - 2.14\varepsilon_y) h_s . \end{aligned} \quad (20b)$$

Στην μελέτη των Glaister & Pinho προτάθηκαν τιμές τόσο για τις ιδιότητες των υλικών όσο και για τις διαστάσεις της δοκού και του υποστηλώματος. Συγκεκριμένα:

- $\varepsilon_y = 0,0016$ (παραμόρφωση διαρροής χάλυβα)
- $\varepsilon_{c(LSi)} = 0,005$ (παραμόρφωση σκυροδέματος σε μία οριακή κατάσταση μετά τη διαρροή-μηχανισμός αστοχίας δοκού και υποστηλώματος)
- $\varepsilon_{s(LSi)} = 0,015$ (παραμόρφωση χάλυβα σε μία οριακή κατάσταση μετά τη διαρροή-μηχανισμός αστοχίας δοκού)
- $\varepsilon_{s(LSi)} = 0,04$ (παραμόρφωση χάλυβα σε μία οριακή κατάσταση μετά τη διαρροή-μηχανισμός αστοχίας υποστηλώματος)
- $h_s = 3 \text{ m}$ (ύψος ορόφου)
- $l_b = 6 \text{ m}$ (μήκος δοκού)
- $h_b = 0,45 \text{ m}$ (ύψος δοκού)
- $h_c = 0,4 \text{ m}$ (πλάτος υποστηλώματος)

Οι διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την αλλαγή των παραπάνω παραμέτρων είναι σημαντικές όμως δεν αποτέλεσαν αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής. Παρουσιάζονται αναλυτικά στην ολοκληρωμένη έρευνα των Glaister & Pinho που υπάρχει στις αναφορές της βιβλιογραφίας.

7.7 Φάσματα απόκρισης-Καμπύλες ζήτησης

Η πλαστιμότητα της κατασκευής επηρεάζει σημαντικά τις καμπύλες ζήτησης του σεισμού. Σημαντικά επίπεδα πλαστιμότητας στις κατασκευές έχουν σαν αποτέλεσμα την απορρόφηση ενέργειας μέσω της υστέρησης και συνεπώς μείωση της μετακίνησης που προκαλείται από το σεισμό. Πρέπει λοιπόν να συμπεριληφθεί η επίδραση της πλαστιμότητας στο ελαστικό φάσμα του σεισμού. Η σχέση μεταξύ της ιξώδους απόσβεσης (ξ) και της πλαστιμότητας που χρησιμοποιήθηκε από τους Glaister & Pinho είναι η εξής:

$$\xi = a \left(1 - \frac{1}{\mu_i^b} \right) + \xi_E \quad (21)$$

Οι παράμετροι a , b δείχνουν την απορρόφηση ενέργεια και ισούνται με $a=25$ και $b=0,5$. Ο όρος ξ_E είναι η ιξώδης απόσβεση του ελαστικού συστήματος και λαμβάνεται ίση με 2%.

Η ιξώδης απόσβεση που προκύπτει από την εξίσωση (21) χρησιμοποιείται στην εξίσωση (22), που προτάθηκε από τον Bonner et al.[2000] και συμπεριλαμβάνεται και τον EC8, προκειμένου να υπολογισθεί ο μειωτικός συντελεστής που θα εφαρμοσθεί στο φάσμα απόκρισης με 5% απόσβεση.

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \quad (22)$$

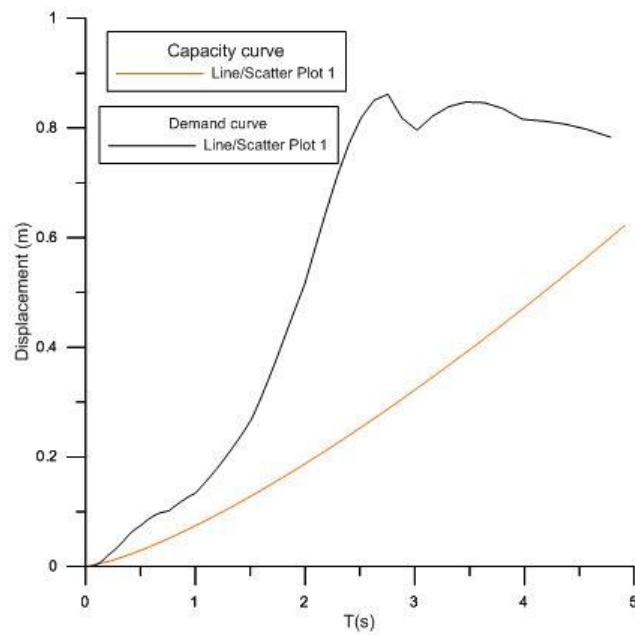
7.8 Εφαρμογή του μοντέλου των Glaister & Pinho

Αρχικά, τροποποιήσαμε τα φάσματα απόκρισης που έχουμε βρει στην παρούσα διπλωματική (για τρεις κατηγορίες εδάφους, για την απόσταση των 0 km (δυσμενέστερη), με και χωρίς απόκλιση, με και χωρίς κατευθυντικότητα και για μέγεθος σεισμού 6,8) σύμφωνα με το κεφάλαιο 7.7 λαμβάνοντας υπόψη την πλαστιμότητα των κατασκευών και μετατρέποντάς τα σε φάσματα μετακίνησης. Έτσι προέκυψαν σε κάθε περίπτωση τόσο το ελαστικό φάσμα μετακίνησης για τα στάδια πριν τη διαρροή (LS1) όσο και το ανελαστικό για τις οριακές καταστάσεις μετά τη διαρροή (LS2) για μηχανισμό αστοχίας δοκού και υποστυλώματος. Έπειτα, κατασκευάσαμε και τις αντίστοιχες καμπύλες ικανότητας για τα δύο αυτά στάδια, LS1-LS2, και για τους δύο αυτούς μηχανισμούς αστοχίας και ελέγξαμε σε ποιές περιόδους η ζήτηση υπερβαίνει την ικανότητα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα αυτά συμπεριλαμβανομένου του φαινομένου της κατευθυντικότητας. Ενδεικτικά παρουσιάζονται και δυο περιπτώσεις που δεν έχουμε κατευθυντικότητα προκειμένου να φανεί η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων.

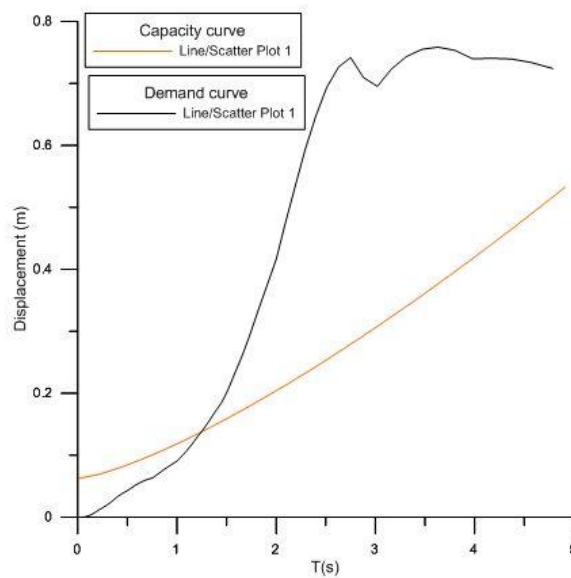
Μηχανισμός αστοχίας υποστυλώματος (παλαιότερες κατασκευές)

- Απόσταση 0 km:

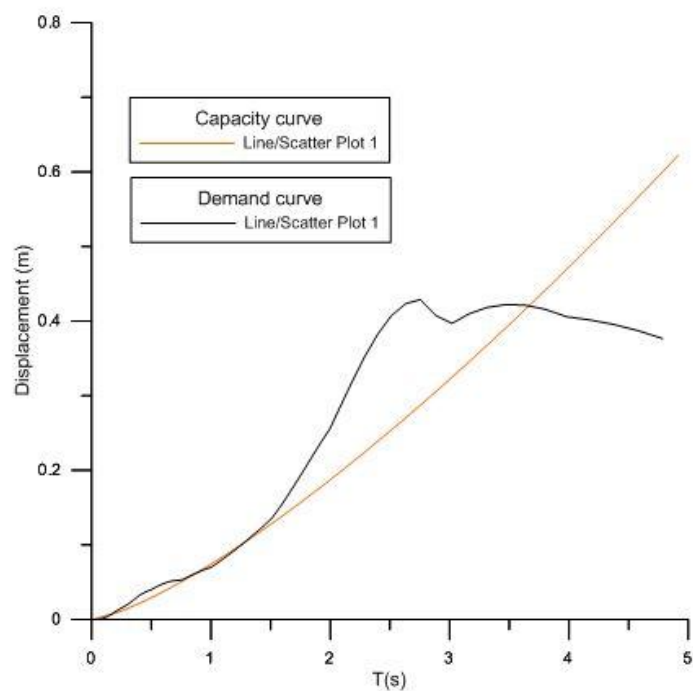
Έδαφος A
Με κατευθυντικότητα



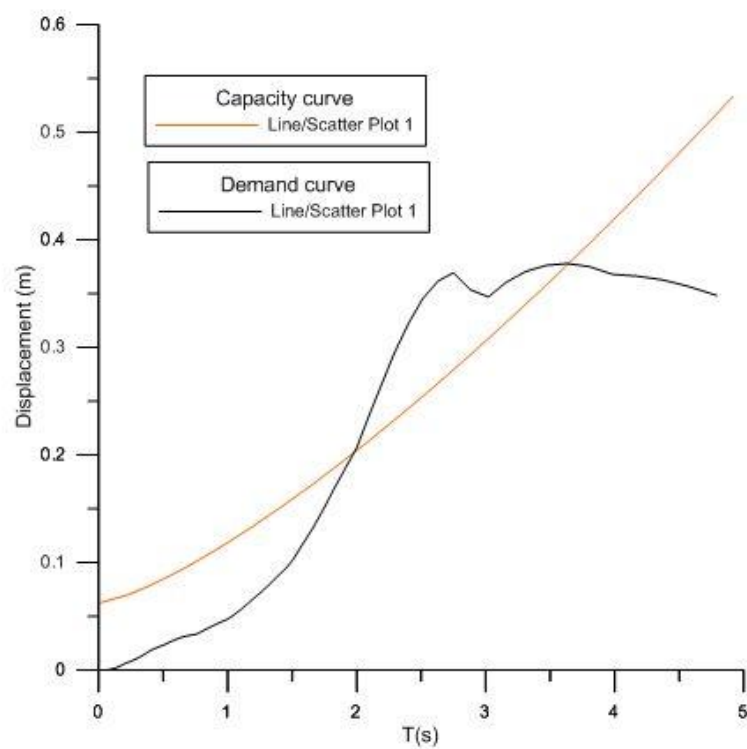
LS1-Με τυπική απόκλιση



LS2-Με τυπική απόκλιση

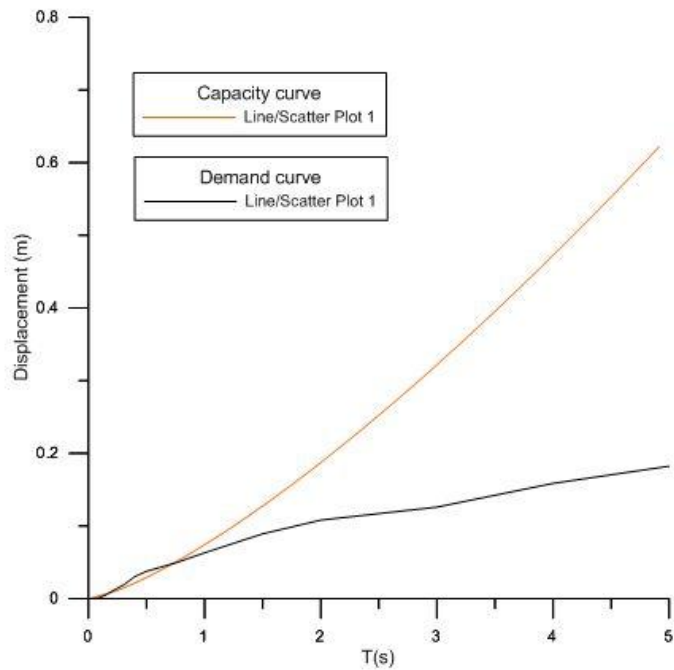


LS1-Χωρίς τυπική απόκλιση

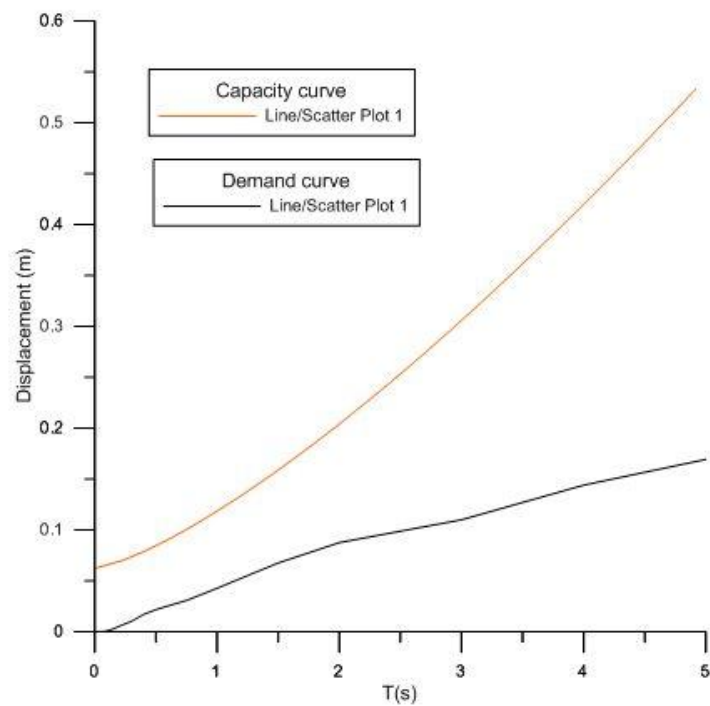


LS2-Χωρίς τυπική απόκλιση

Χωρίς κατευθυντικότητα



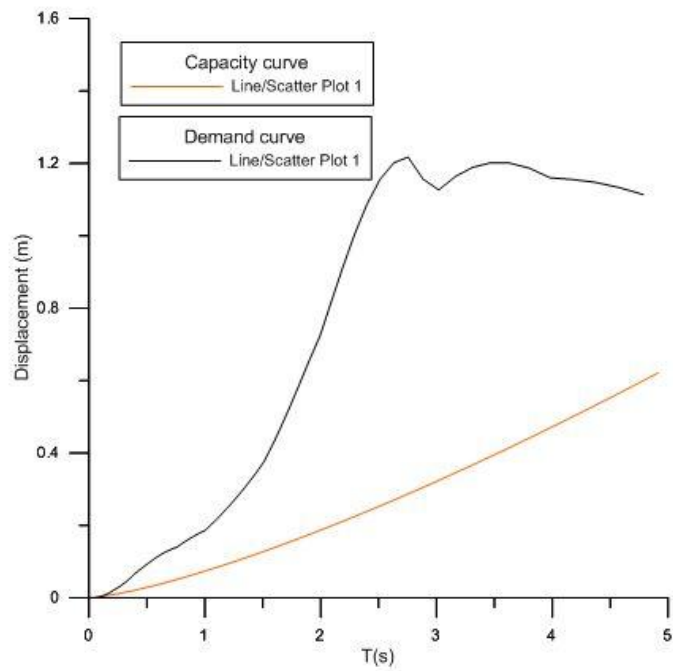
LS1-Χωρίς τυπική απόκλιση



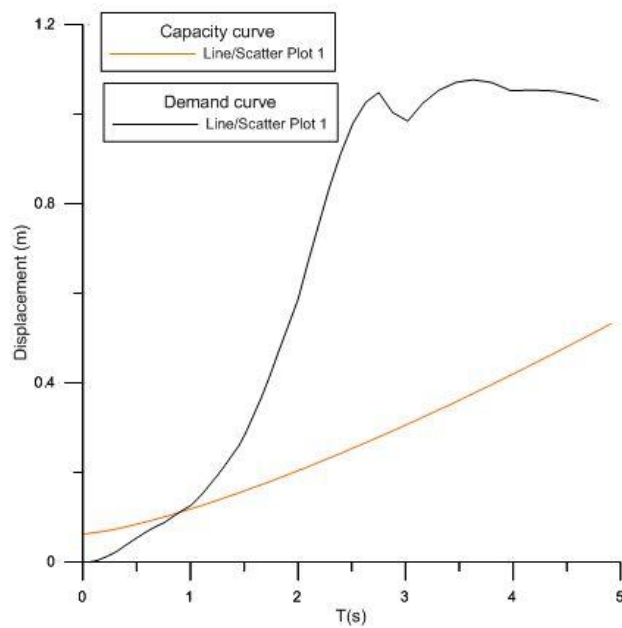
LS2-Χωρίς τυπική απόκλιση

Έδαφος Β

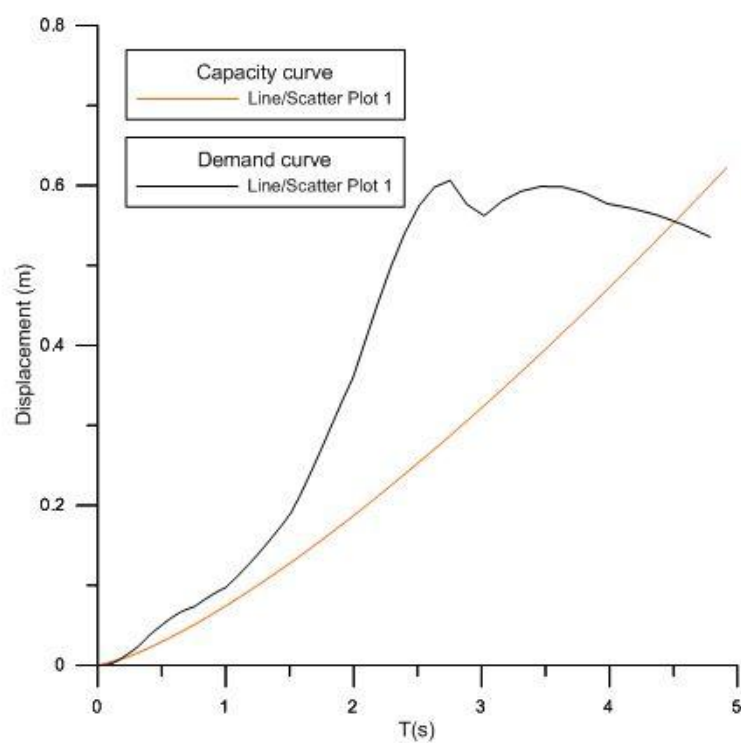
Με κατευθυντικότητα



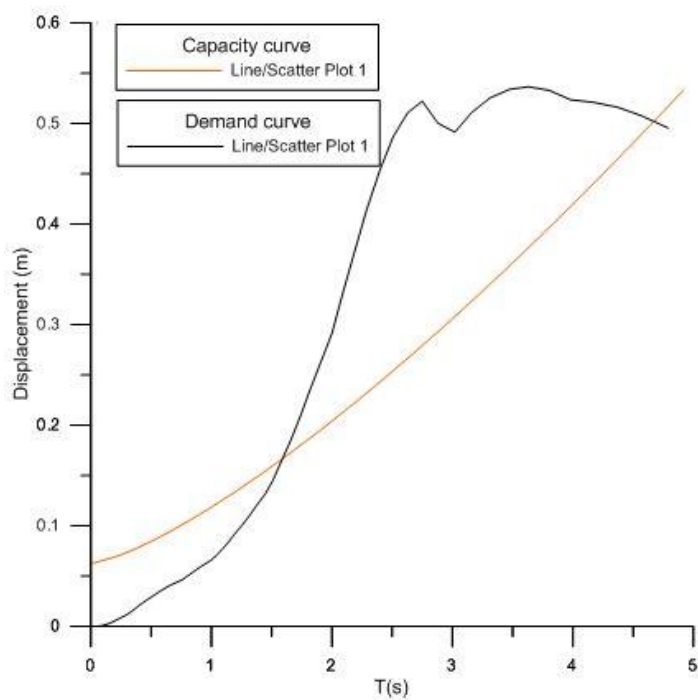
LS1-Με τυπική απόκλιση



LS2-Με τυπική απόκλιση

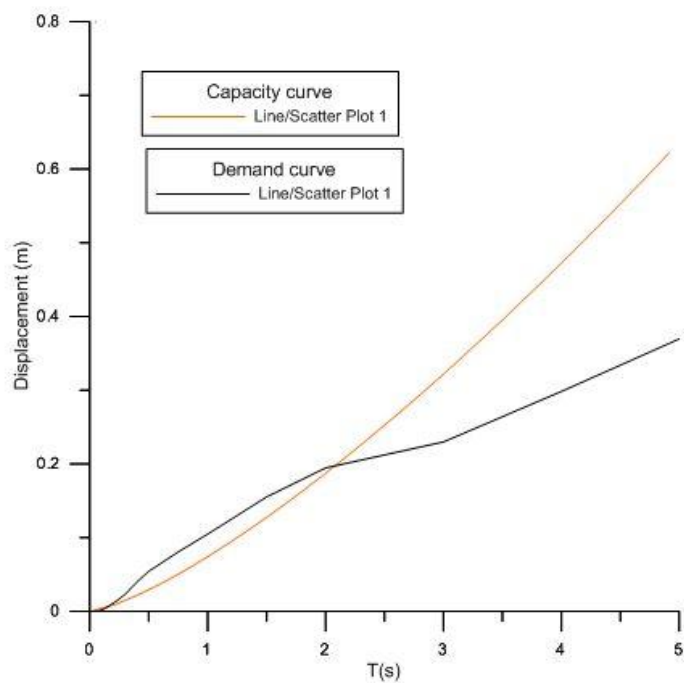


LS1-Χωρίς τυπική απόκλιση

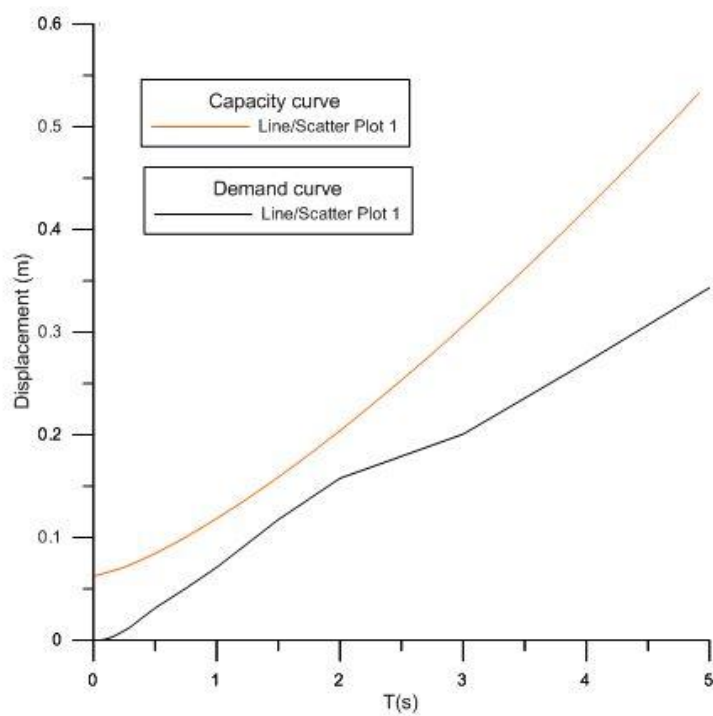


LS2-Χωρίς τυπική απόκλιση

Χωρίς κατευθυντικότητα



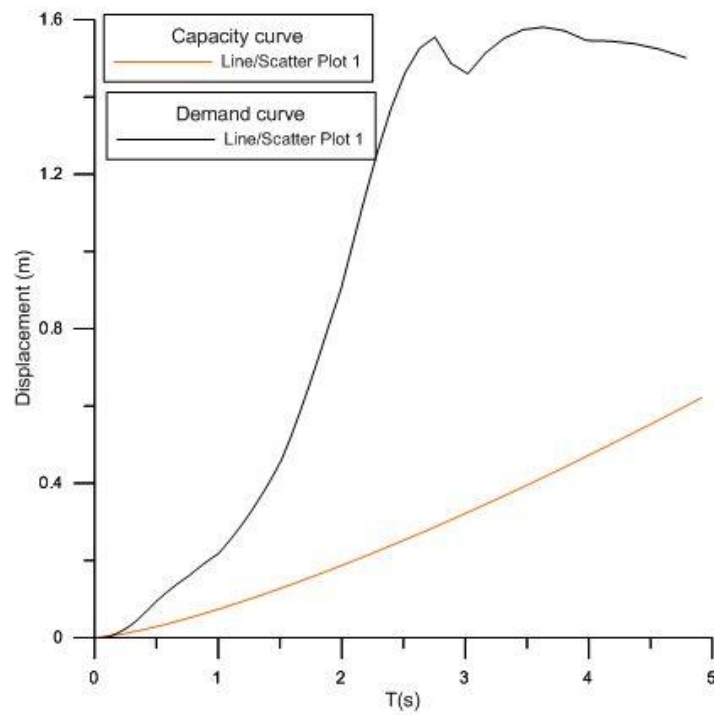
LS1-Με τυπική απόκλιση



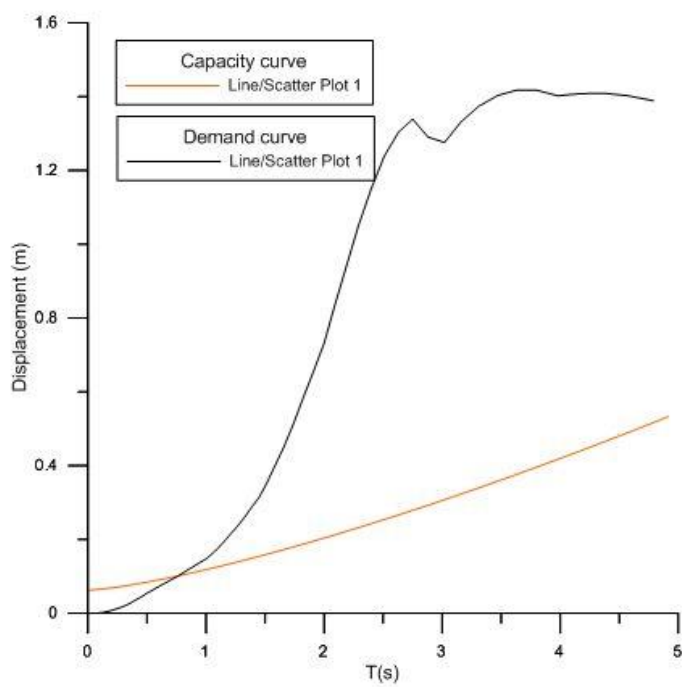
LS2-Με τυπική απόκλιση

Έδαφος C

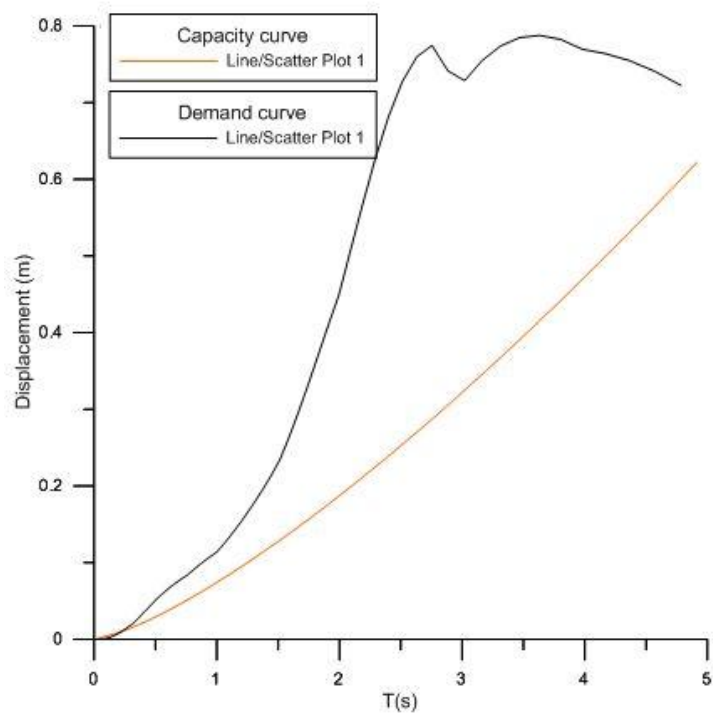
Με κατευθυντικότητα



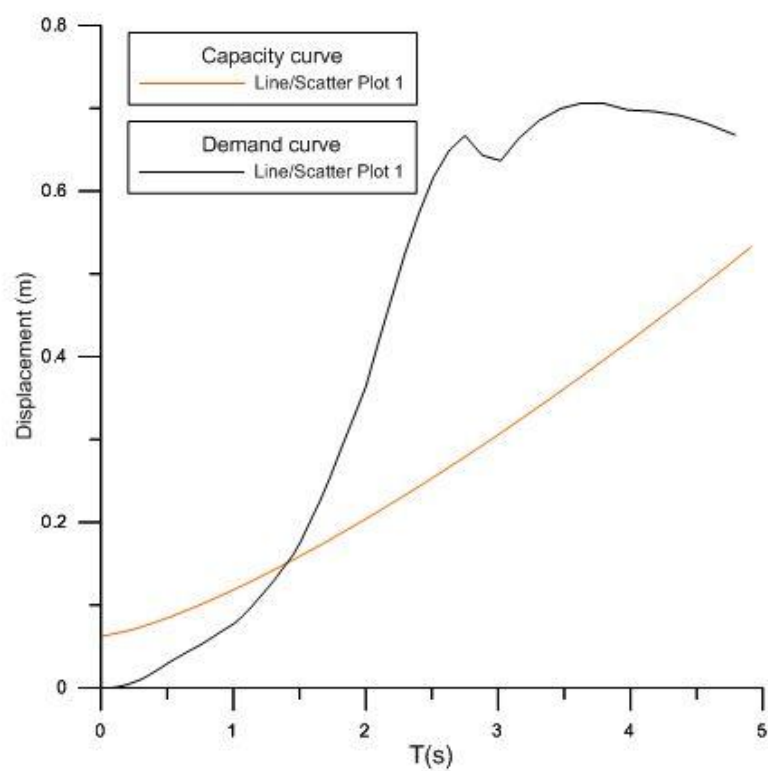
LS1-Με τυπική απόκλιση



LS2-Με τυπική απόκλιση



LS1-Χωρίς τυπική απόκλιση



LS2-Χωρίς τυπική απόκλιση

Παρατηρήσεις αποτελεσμάτων για τον μηχανισμό αστοχίας υποστηλώματος (παλαιότερες κατασκευές):

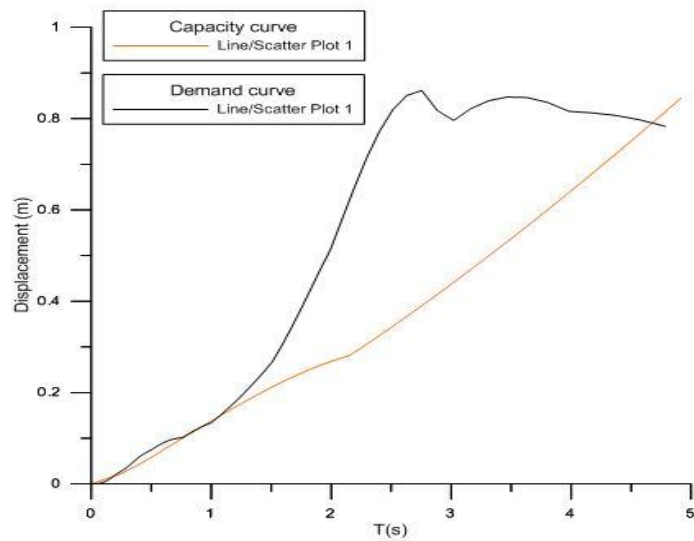
- Αρχικά παρατηρούμε ότι στα φάσματα απόκρισης που δεν συμπεριλαμβάνεται το φαινόμενο της κατευθυντικότητας, στην οριακή κατάσταση διαρροής παρατηρείται τμήση των δύο καμπυλών. Συγκεκριμένα, η τμήση παρατηρείται στις κατασκευές με μικρές περιόδους που σημαίνει ότι η πλειοψηφία των συνήθων κατασκευών διαρρέει. Στην οριακή κατάσταση μετά τη διαρροή δεν υπάρχει τμήση των δύο καμπυλών. Η καμπύλη ικανότητας καλύπτει την καμπύλη ζήτησης σ' όλες τις περιπτώσεις και συνεπώς τα κτίρια με ελαστική περίοδο έως και 5s (60 όροφοι) δεν παρουσιάζουν κίνδυνο σημαντικών ζημιών.
- Σε όλα τα διαγράμματα που συμπεριλαμβάνουν το φαινόμενο της κατευθυντικότητας, στην οριακή κατάσταση διαρροής η καμπύλη ζήτησης καλύπτει την καμπύλη ικανότητας σε όλες τις περιόδους. Συνεπώς, όλες οι κατασκευές διαρρέουν, σε όλους τους τύπους εδαφών λαμβάνοντας υπόψη ή μη την τυπική απόκλιση.
- Τμήση μεταξύ των δύο καμπυλών στις οριακές καταστάσεις μετά τη διαρροή και άρα κίνδυνο κατάρρευσης παρουσιάζουν ορισμένες κατασκευές σε όλα τα φάσματα που συμπεριλαμβάνεται ο παλμός της κατευθυντικότητας. Ειδικότερα στα φάσματα που λαμβάνεται υπόψη η τυπική απόκλιση, η τμήση των δύο καμπυλών παρατηρείται σε μικρές περιόδους κατασκευών γεγονός που σημαίνει ότι πολλές κατασκευές παρουσιάζουν κίνδυνο σημαντικών βλαβών, έως και κατάρρευσης.

Μηχανισμός αστοχίας δοκού (νεώτερες κατασκευές)

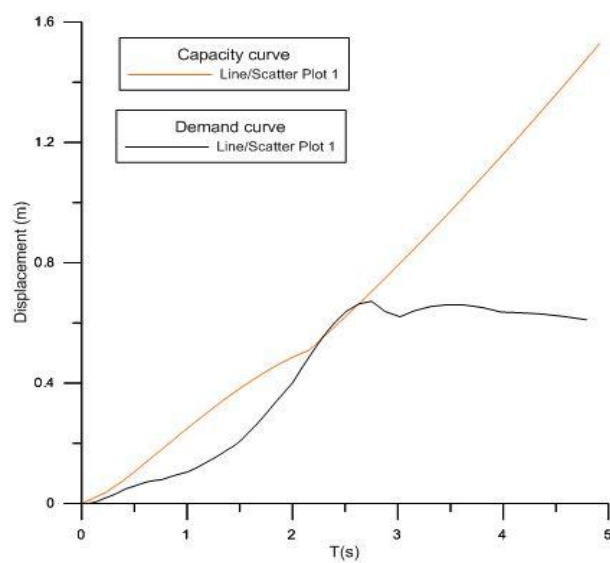
- Απόσταση 0 km:

Έδαφος Α

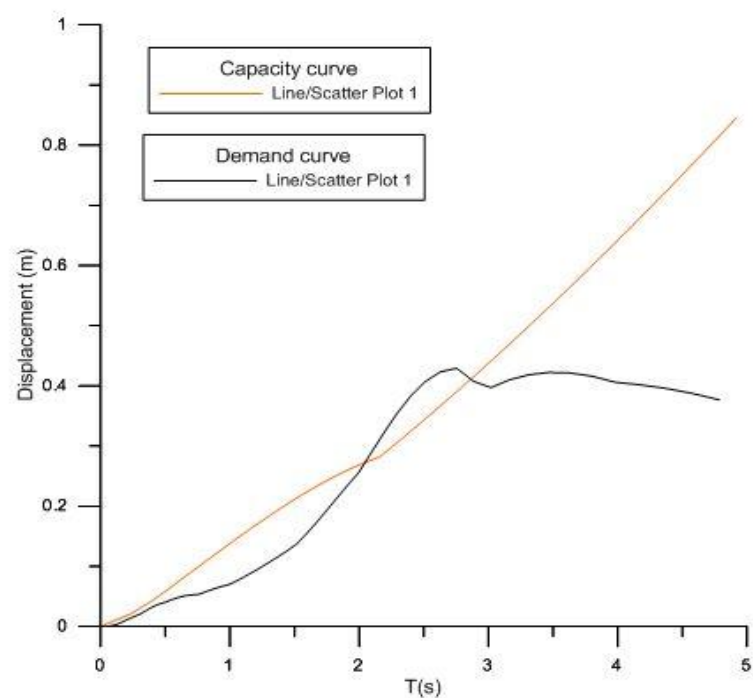
Με κατευθυντικότητα



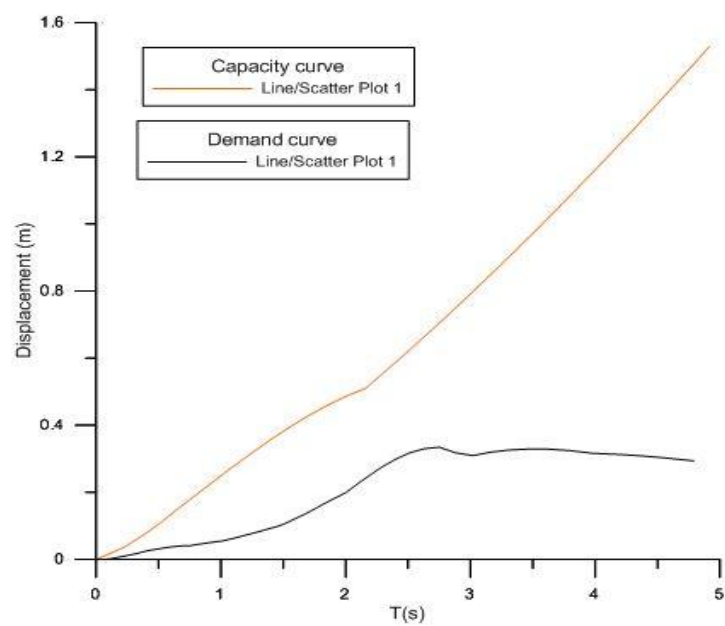
LS1-Με τυπική απόκλιση



LS2-Με τυπική απόκλιση

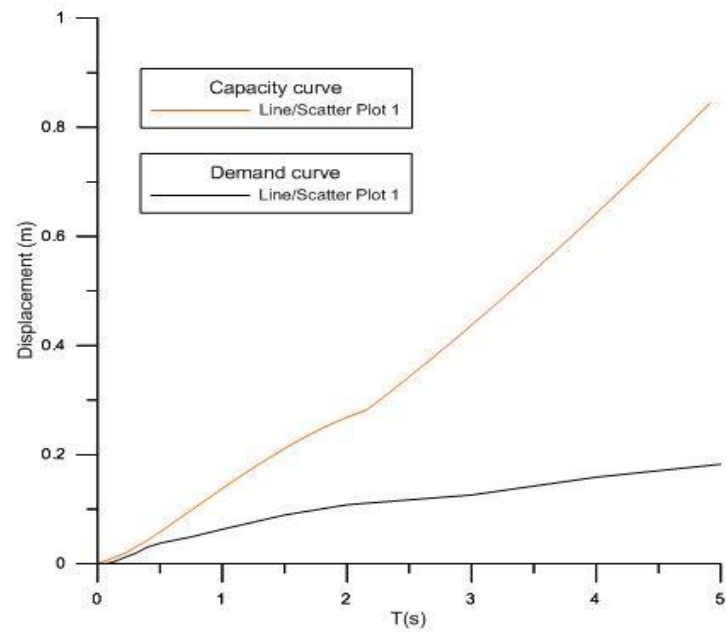


LS1-Χωρίς τυπική απόκλιση

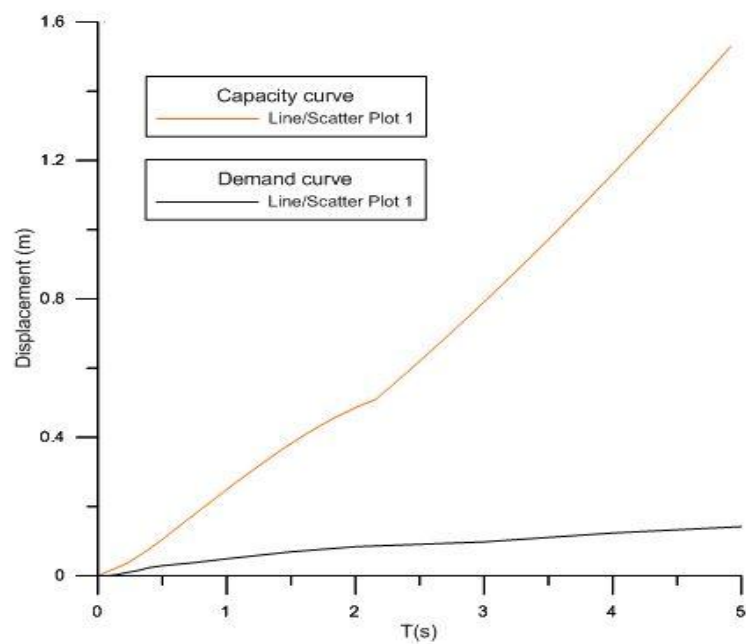


LS2-Χωρίς τυπική απόκλιση

Χωρίς κατευθυντικότητα



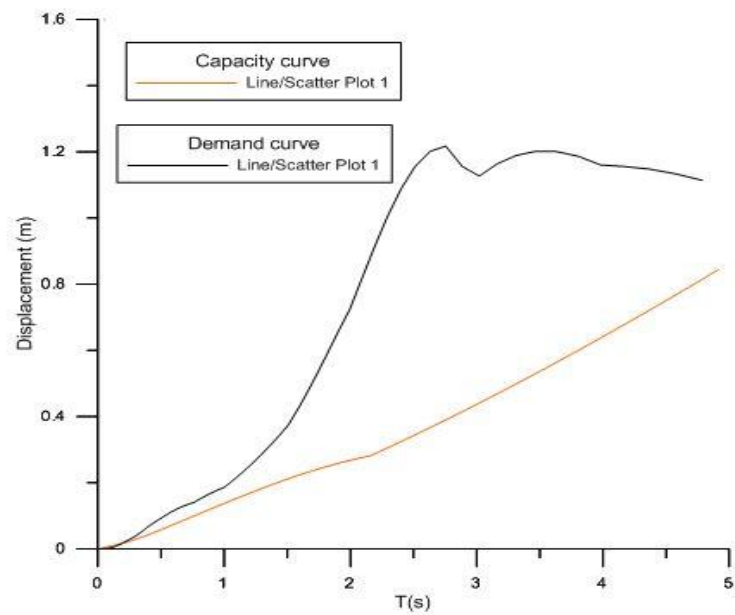
LS1-Χωρίς τυπική απόκλιση



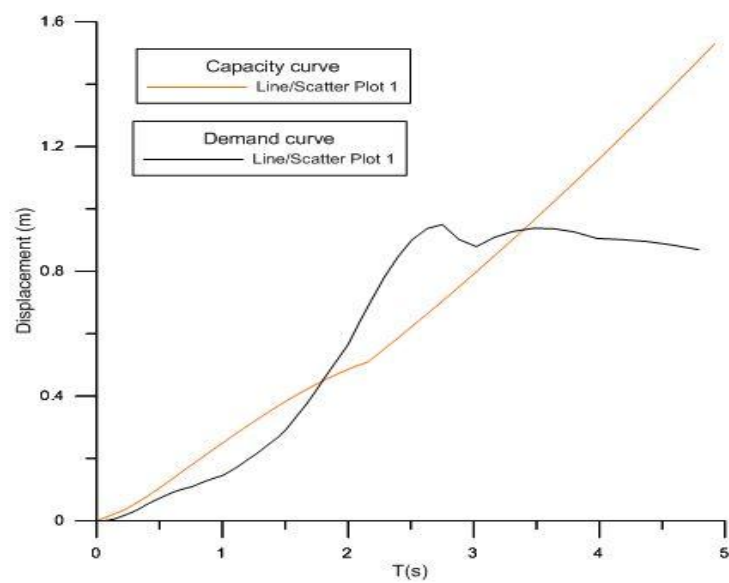
LS2-Χωρίς τυπική απόκλιση

Έδαφος Β

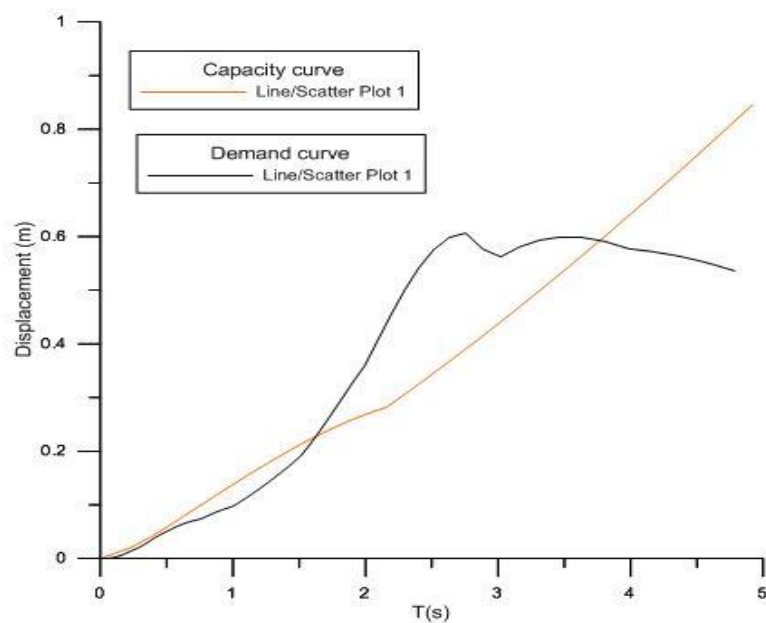
Με κατευθυντικότητα



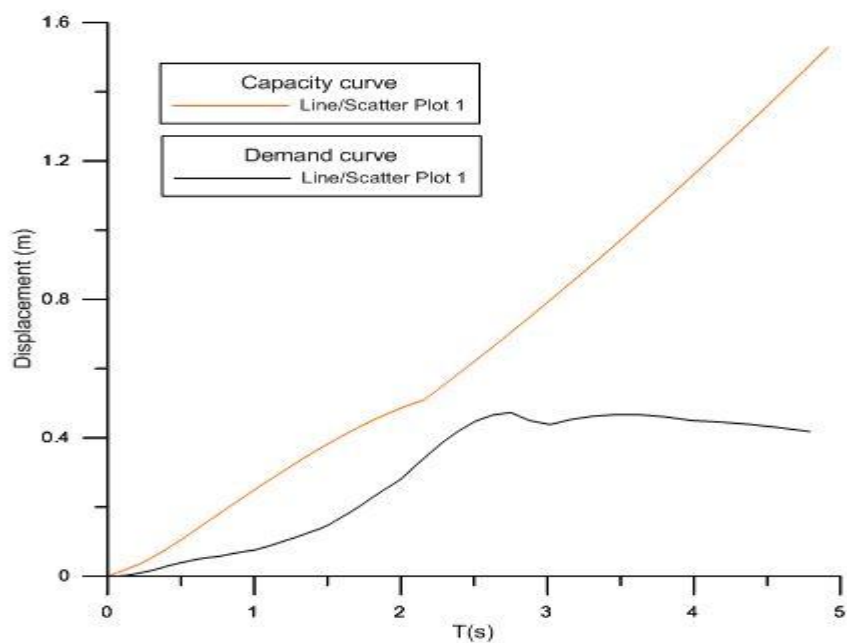
LS1-Με τυπική απόκλιση



LS2-Με τυπική απόκλιση

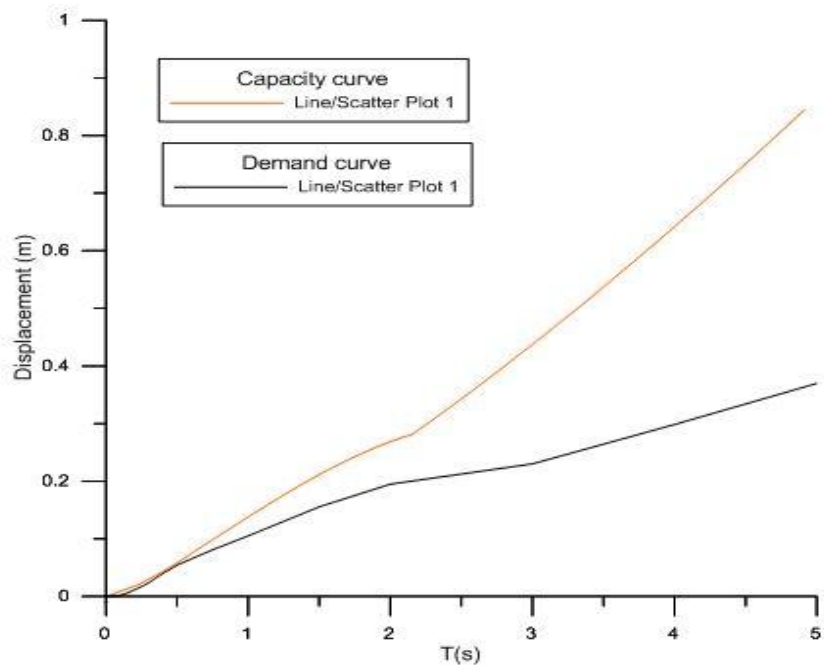


LS1-Χωρίς τυπική απόκλιση

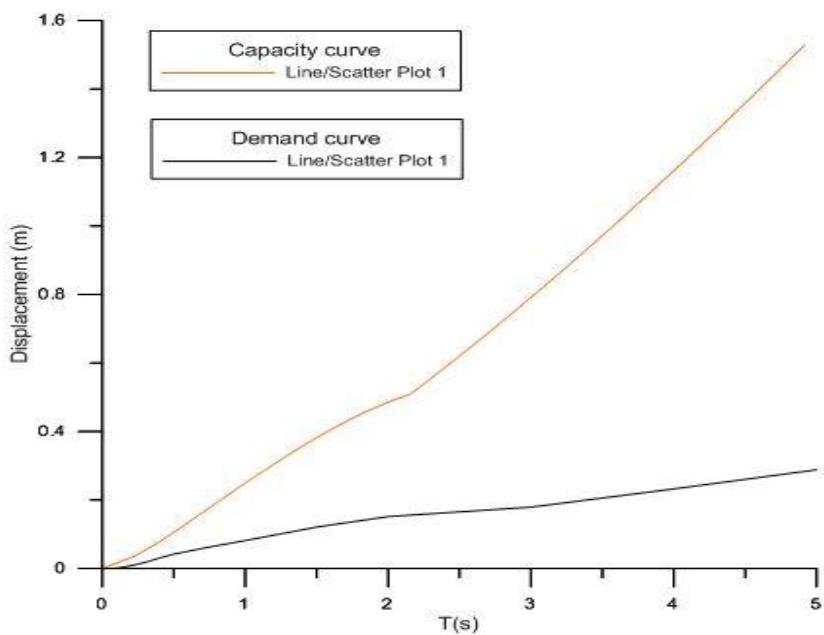


LS2-Χωρίς τυπική απόκλιση

Χωρίς κατευθυντικότητα



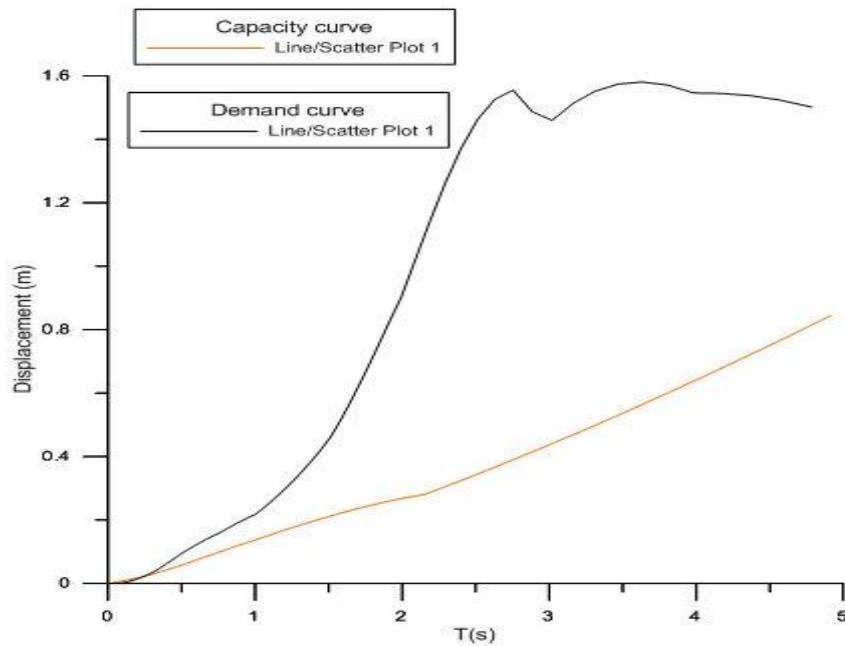
LS1-Με τυπική απόκλιση



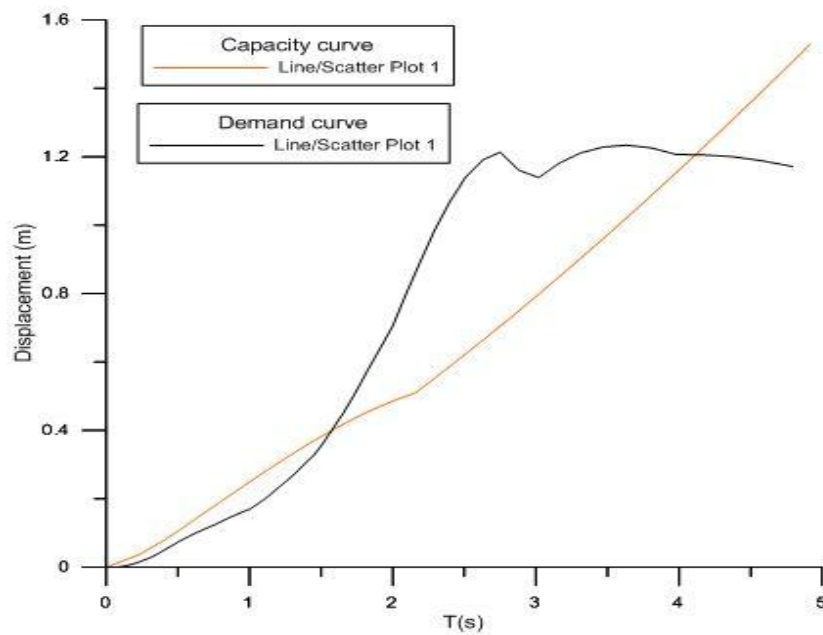
LS2-Με τυπική απόκλιση

Έδαφος C

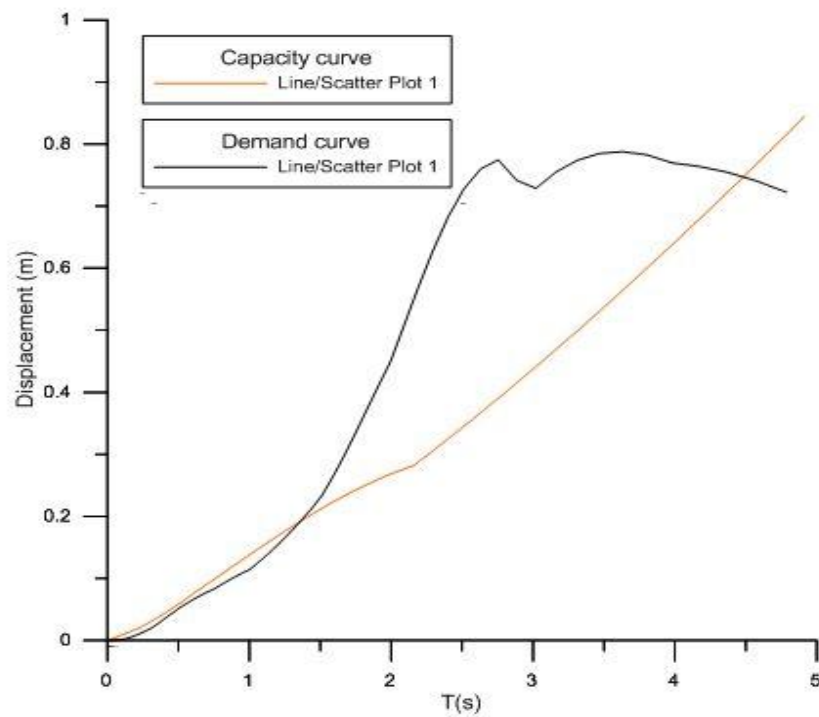
Με κατευθυντικότητα



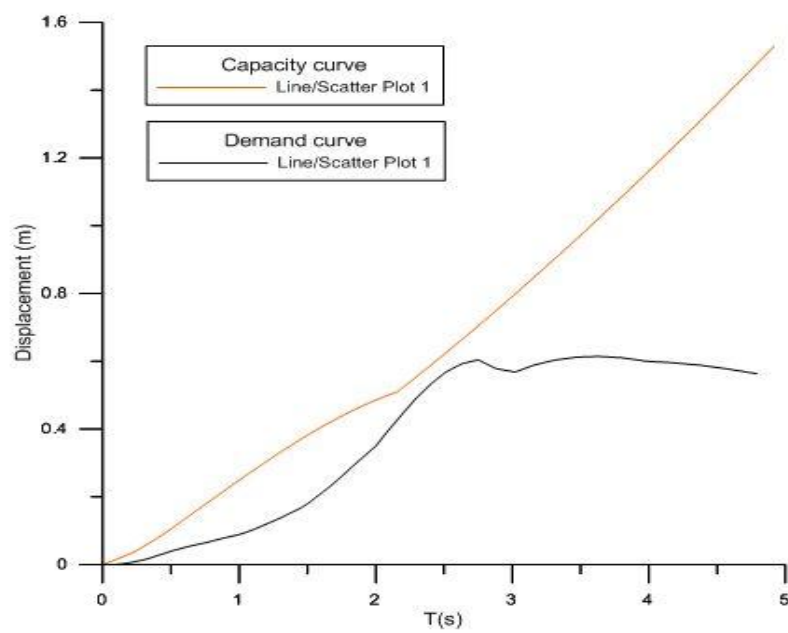
LS1-Με τυπική απόκλιση



LS2-Με τυπική απόκλιση



LS1-Χωρίς τυπική απόκλιση



LS2-Χωρίς τυπική απόκλιση

Παρατηρήσεις αποτελεσμάτων για τον μηχανισμό αστοχίας δοκού:

- Αρχικά παρατηρούμε ότι στα φάσματα απόκρισης που δεν συμπεριλαμβάνεται το φαινόμενο της κατευθυντικότητας, δεν υπάρχει τμήση των δύο καμπυλών. Η καμπύλη ικανότητας καλύπτει την καμπύλη ζήτησης σ' όλες τις περιπτώσεις και συνεπώς τα κτίρια με ελαστική περίοδο έως και 5s (60 όροφοι) δεν παρουσιάζουν κίνδυνο.
- Όλα τα διαγράμματα που συμπεριλαμβάνουν το φαινόμενο της κατευθυντικότητας, παρουσιάζουν τμήση στην οριακή κατάσταση διαρροής γεγονός που σημαίνει ότι υπάρχουν κατασκευές που διαρρέουν, σε όλους τους τύπους εδαφών λαμβάνοντας υπόψη ή μη την τυπική απόκλιση.
- Επιπλέον παρατηρείται ότι στα διαγράμματα με κατευθυντικότητα που αντιστοιχούν στις οριακές καταστάσεις μετά τη διαρροή (LS2) και στα οποία δεν λαμβάνεται υπόψη η τυπική απόκλιση, δεν έχουμε τμήση των δύο καμπυλών. Αυτό σημαίνει ότι σε αυτές τις περιπτώσεις ακόμα και αν η κατασκευή διαρρεύσει, δεν υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης.
- Τμήση μεταξύ των δύο καμπυλών στις οριακές καταστάσεις μετά τη διαρροή και άρα κίνδυνο κατάρρευσης παρουσιάζουν ορισμένες κατασκευές στα φάσματα των οποίων λαμβάνεται υπόψη η τυπική απόκλιση. Σε όλους τους τύπους εδαφών όταν συμπεριληφθεί το φαινόμενο της κατευθυντικότητας και η τυπική απόκλιση παρατηρείται υπέρβαση της ικανότητας από τη ζήτηση. Παρόλα αυτά η τμήση παρατηρείται σε μεγάλες περιόδους (πάνω από 1,5 s) που έχουν ελάχιστες κατασκευές.

Κεφάλαιο 8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική αξιολογείται ο σεισμικός κίνδυνος και η διακινδύνευση στην περιοχή της Βοιωτίας.

Αρχικά, μελετήσαμε την σεισμική δράση στην περιοχή της Βοιωτίας και ειδικότερα τα ρήγματα του Καπαρελλίου, του Λεοντάρι, της Τανάγρας και του Ασωπού. Τα ρήγματα είναι κοντά σε κατοικημένες περιοχές και συνεπώς κρίθηκε σημαντικό να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της κατευθυντικότητας στην εξαγωγή των φασματικών επιταχύνσεων. Αφού υπολογίσαμε το πιθανό σεισμικό μέγεθος των ρηγμάτων αυτών, με βάση το μοντέλο των Boore & Atkinson εξήγαμε τα φάσματα επιτάχυνσης διαφόρων κοντινών περιοχών σε κάθε ρήγμα. Για τη διευκόλυνση των υπολογισμών της συνολικής μελέτης, χρησιμοποιήσαμε ενδεικτικά τρεις αποστάσεις (0, 5, 10 km) και το μέγιστο πιθανό σεισμικό μέγεθος (του ρήγματος του Ασωπού $M=6,8$). Εξήγαμε λοιπόν φάσματα επιτάχυνσης για αυτές τις αποστάσεις, για τρεις διαφορετικούς τύπους εδάφους και λαμβάνοντας ή μη την τυπική απόκλιση. Έπειτα, με βάση το μοντέλο των Shahi & Baker, ενισχύσαμε τα παραπάνω φάσματα ώστε να συμπεριληφθεί και το φαινόμενο κατευθυντικότητας που αφορά τις περιοχές κοντινού πεδίου. Όλα τα φάσματα που εξήγαμε συγκρίθηκαν με αυτά που προτείνει ο EC8 για κάθε τύπο εδάφους.

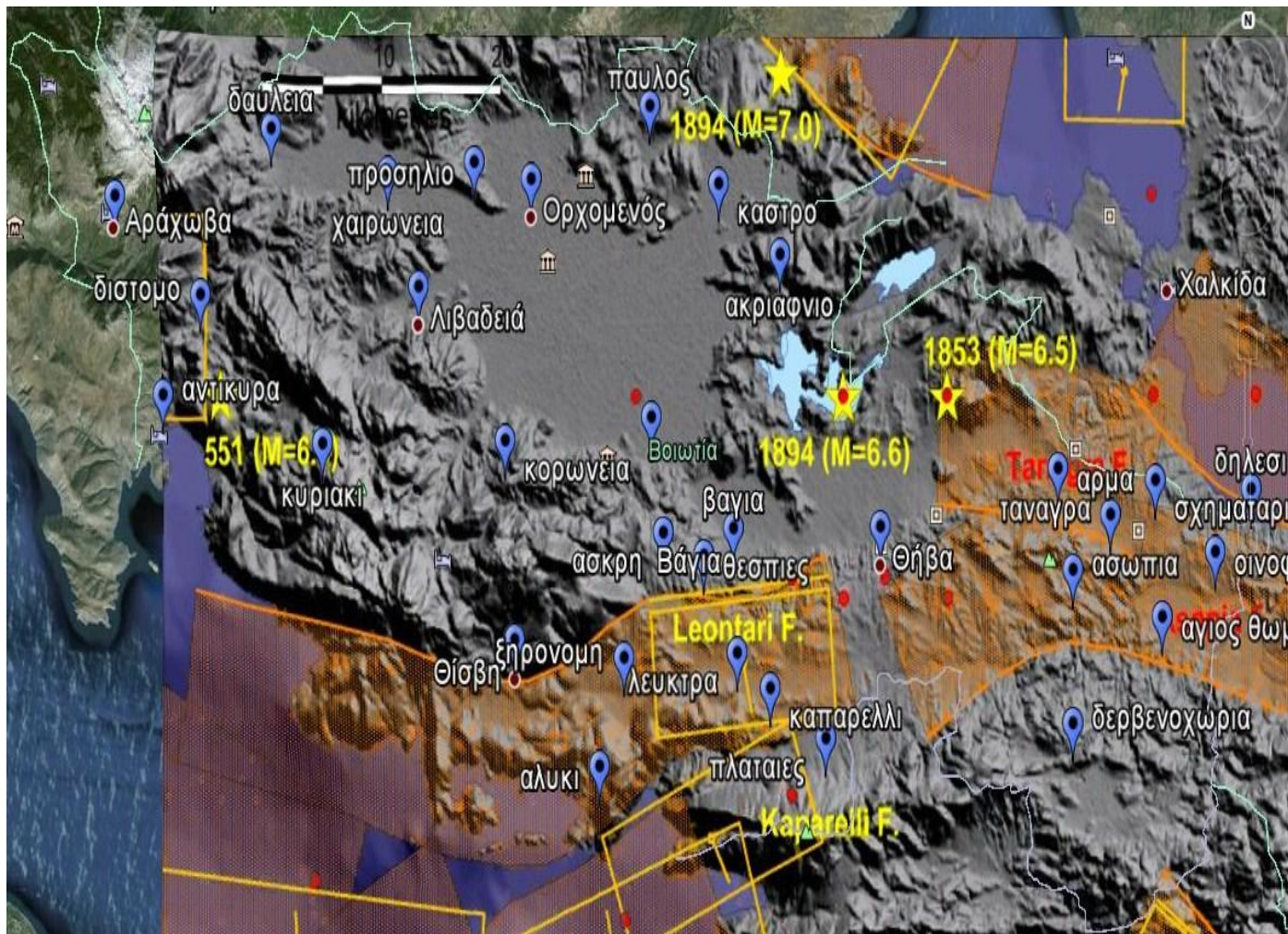
Επόμενος στόχος ήταν η δημιουργία των τεχνητών χρονοϊστοριών της επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης. Χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα Seismomatch, με το οποίο σε κάθε φάσμα των Boore & Atkinson αντιστοιχίσαμε τις χρονοϊστορίες εδαφικής κίνησης που του αναλογούν. Για τη σύνθεση των τεχνητών χρονοϊστοριών, στις οποίες συμπεριλαμβάνεται ο παλμός κατευθυντικότητας, χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο των Manroeidis & Papageorgiou. Με βάση το πρόγραμμα Seismosignal, εντάξαμε τον παλμό κατευθυντικότητας που προέκυψε από το μοντέλο στις χρονοϊστορίες που είχαμε βρεί από το Seismomatch.

Τέλος, διερευνήσαμε τη σεισμική διακινδύνευση των συνήθων κατασκευών στην περιοχή της Βοιωτίας. Με βάση το μοντέλο των Glaister & Pinho, δημιουργήσαμε τις καμπύλες ικανότητας των κατασκευών και τις καμπύλες σεισμικού κινδύνου (φάσματα μετακίνησης) για την οριακή κατάσταση διαρροής (LS1) και την οριακή κατάσταση μετά τη διαρροή (LS2), για μηχανισμό αστοχίας δοκού (νεώτερες κατασκευές) και υποστυλώματος (παλαιότερες κατασκευές). Με αυτό τον τρόπο ελέγξαμε ποιες κατασκευές αντιμετωπίζουν προβλήματα σε κάθε στάθμη επιτελεστικότητας. Παρακάτω παρουσιάζεται πιο αναλυτικά η συγκεκριμένη πορεία, τονίζοντας τα βασικά σημεία της διπλωματικής και παρουσιάζοντας χαρακτηριστικά σχήματα για την καλύτερη αντίληψη των αποτελεσμάτων.

Παρακάτω παρουσιάζεται πιο αναλυτικά η συγκεκριμένη πορεία, τονίζοντας τα βασικά σημεία της διπλωματικής και παρουσιάζοντας χαρακτηριστικά σχήματα για την καλύτερη αντίληψη των αποτελεσμάτων.

ΤΑ ΡΗΓΜΑΤΑ ΣΤΗ ΒΟΙΩΤΙΑ

- Ρήγμα Καπαρελλίου: Μήκος ρήγματος: 17,0 km
Πιθανό μέγεθος σεισμού: 6,6
- Ρήγμα Λεοντάρι: Μήκος ρήγματος: 15,0 km
Πιθανό μέγεθος σεισμού: 6,5
- Ρήγμα Τανάγρας: Μήκος ρήγματος: 17,4 km
Πιθανό μέγεθος σεισμού: 6,5
- Ρήγμα Ασωπού: Μήκος ρήγματος: 35,8 km
Πιθανό μέγεθος σεισμού: 6,8



ΦΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ-MONTELO BOORE & ATKINSON

Χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο των Boore & Atkinson (BA07) προκειμένου να βρούμε τα φάσματα επιτάχυνσης με 5% απόσβεση σε διάφορες αποστάσεις από τα παραπάνω ρήγματα. Όσον αφορά το συγκεκριμένο μοντέλο οι βασικές μεταβλητές που περιλαμβάνονται στις εξισώσεις είναι:

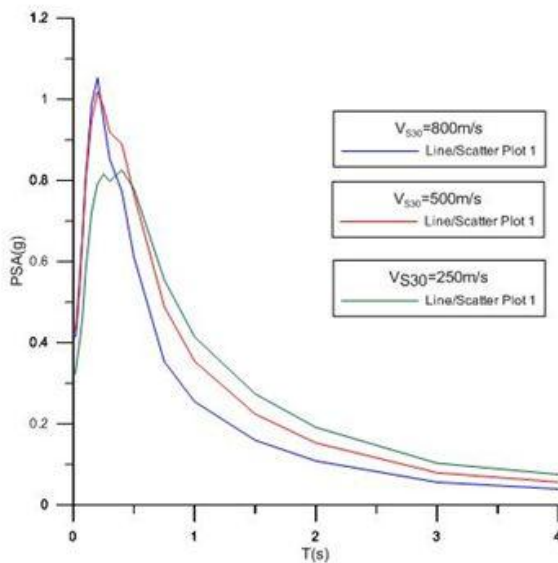
- Το σεισμικό μέγεθος (M)
- Η κοντινότερη οριζόντια απόσταση στην επιφανειακή προβολή του ρήγματος (R_{JB})
- Ο τύπος του ρήγματος
- Η μέση διατμητική ταχύτητα των κυμάτων από την επιφάνεια μέχρι τα 30 m βάθος (V_{S30})

Αξίζει να σημειωθεί ότι η σημαντική διαφορά του μοντέλου αυτού με τα άλλα μοντέλα, είναι η εισαγωγή του όρου **pga4nl** που εκφράζει την εδαφική επιτάχυνση στο βράχο. Ο όρος αυτός σχετίζεται με την ανελαστική- μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους.

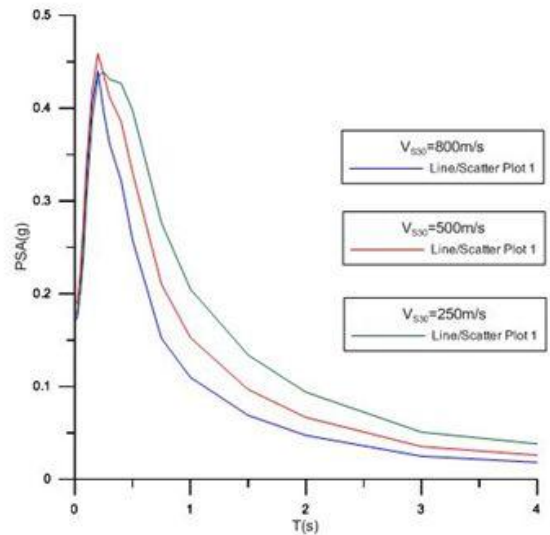
- Σε μικρές περιόδους και για μεγάλες τιμές του όρου pga4nl, παρουσιάζεται μείωση της μέγιστης φασματικής επιτάχυνσης για μαλακά εδάφη σε σχέση με τη μέγιστη φασματική επιτάχυνση στην περίπτωση του βράχου. Αυτό οφείλεται στην έντονη πλαστικοποίηση των μαλακών εδαφικών αποθεμάτων.
- Σε μεγάλες περιόδους και για μεγάλες τιμές του όρου pga4nl αντίστοιχα, παρουσιάζεται μείωση της φασματικής επιτάχυνσης για μαλακά εδάφη αν και οι τιμές παραμένουν μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στο βράχο. Για περιόδους μεγαλύτερες από 0,75s, δεν υπάρχει συνεισφορά του μη γραμμικού όρου στην ενίσχυση για $V_{S30} > 300$ m/s. Αυτό συμβαίνει διότι σε μεγάλες ταχύτητες V_{S30} το έδαφος είναι πιο σκληρό και έτσι η δυνατότητα πλαστικοποίησης του (μη γραμμικός όρος) δεν είναι πολύ μεγάλη.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια από τα φάσματα που εξήγαμε μέσω του μοντέλου Boore & Atkinson. Αναφέρονται στις ενδεικτικές αποστάσεις των **0 , 5 , 10 km** , σε τρεις τύπους εδαφών **A , B , C** σύμφωνα με τον EC8, με και χωρίς τυπική απόκλιση. Για τη διευκόλυνση των υπολογισμών, λάβαμε υπόψη το μέγιστο σεισμικό μέγεθος του ρήγματος του Ασωπού ($M= 6,8$).

Απόσταση 0 km- Χωρίς τυπική απόκλιση



Απόσταση 10 km- Χωρίς τυπική απόκλιση

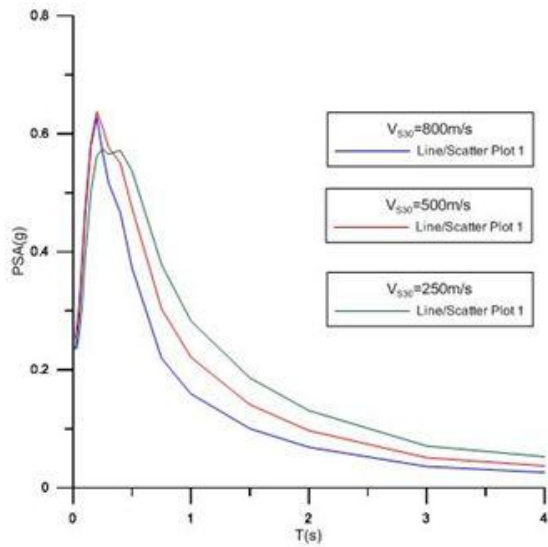


- Έδαφος A: $V_{S30} = 800 \text{ m/s}$
- Έδαφος B: $V_{S30} = 500 \text{ m/s}$
- Έδαφος C: $V_{S30} = 250 \text{ m/s}$

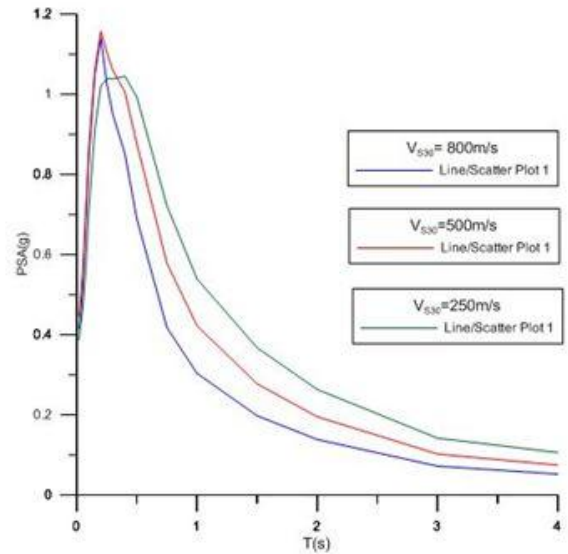
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- ❖ Αρχικά παρατηρούμε ότι οι εδαφικές επιταχύνσεις στο φάσμα επιτάχυνσης σε μηδενική απόσταση από το ρήγμα, είναι 0,32 g για το μαλακό έδαφος και 0,41 g για τα πιο σκληρά εδάφη. Οι τιμές αυτές είναι αισθητά μικρότερες στο φάσμα επιτάχυνσης στην απόσταση των 10 km από το ρήγμα, όπου η εδαφική επιτάχυνση κυμαίνεται για όλα τα εδάφη στα 0,18 g.
- ❖ Σημαντική είναι η επιρροή της ανελαστικής συμπεριφοράς του εδάφους. Στα 0 km, όπου το φαινόμενο της πλαστικοποίησης είναι πιο έντονο, το μαλακό έδαφος C έχει αισθητά μικρότερη επιτάχυνση στις μικρές περιόδους από τους άλλους τύπους εδαφών. Επιπλέον, λόγω πλαστικοποίησης, αυξάνεται η περίοδος του μαλακού εδάφους με αποτέλεσμα να εμφανίζει μεγαλύτερη ενίσχυση στις μεγάλες περιόδους. Η επιρροή της μη γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους γίνεται αντιληπτή και στην απόσταση των 10 km, όπου η διαφορά των τιμών είναι πολύ μικρή με το έδαφος C να ξεπερνάει το έδαφος A.

Απόσταση 5 km- Χωρίς τυπική απόκλιση



Απόσταση 5 km- Με τυπική απόκλιση



- ❖ Μεγάλη διαφοροποίηση παρατηρείται λαμβάνοντας υπόψη την τυπική απόκλιση. Οι εδαφικές επιταχύνσεις χωρίς τυπική απόκλιση είναι κοντά στα 0,25 g και η φασματική επιτάχυνση μεγιστοποιείται φτάνοντας τα 0,64 g για τα εδάφη A και B. Αντίθετα, όταν ληφθεί υπόψη η τυπική απόκλιση, οι εδαφικές επιταχύνσεις είναι 0,4 g ενώ η μέγιστη φασματική επιτάχυνση φτάνει τα 1,17 g για τα εδάφη A και B.

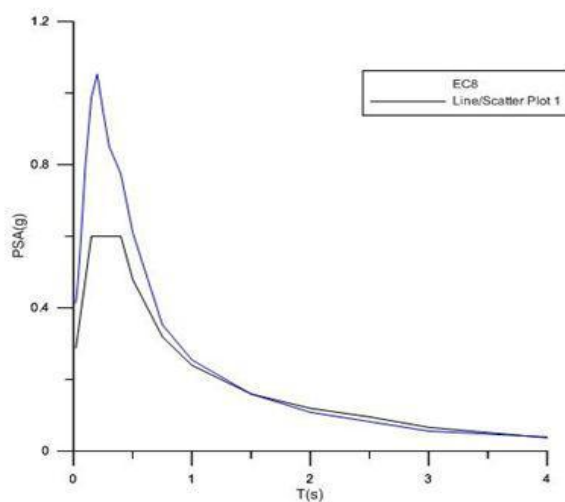
Τα παραπάνω φάσματα συγκρίθηκαν με τα φάσματα επιτάχυνσης με 5% απόσβεση που προτείνει ο EC8 για κάθε τύπο εδάφους. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η σύγκριση των φασμάτων του μοντέλου και του EC8 για το έδαφος A.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

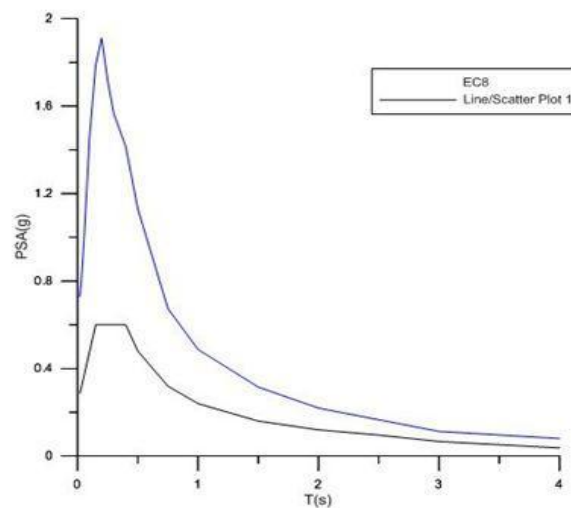
Έδαφος Α

• Απόσταση 0 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση

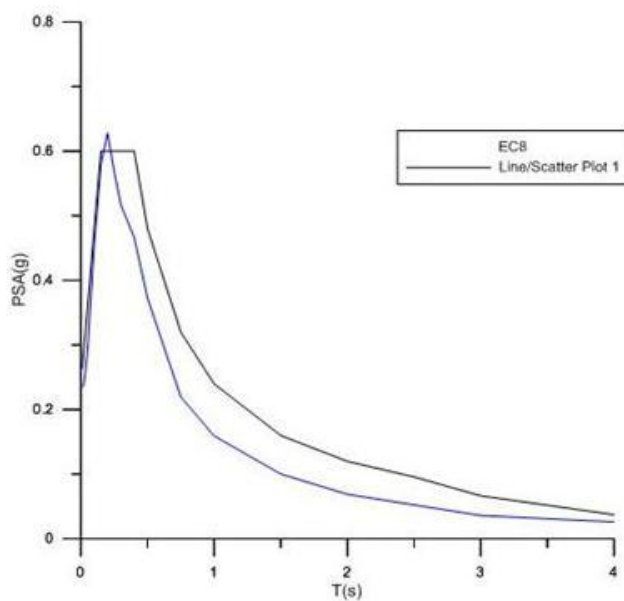


Με τυπική απόκλιση

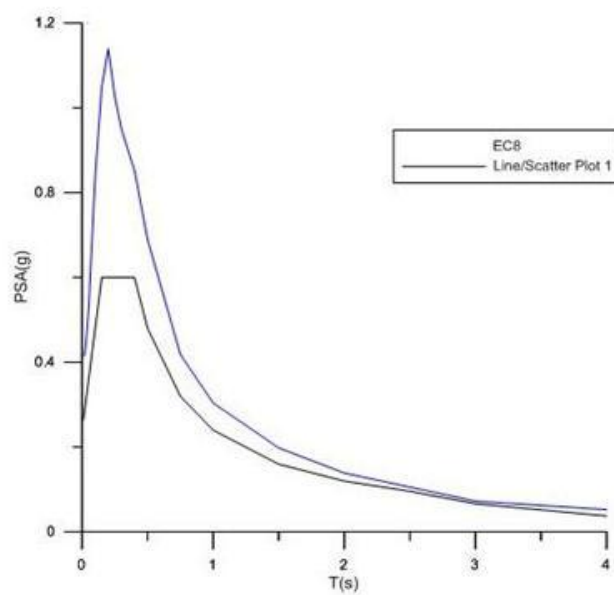


• Απόσταση 5 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση

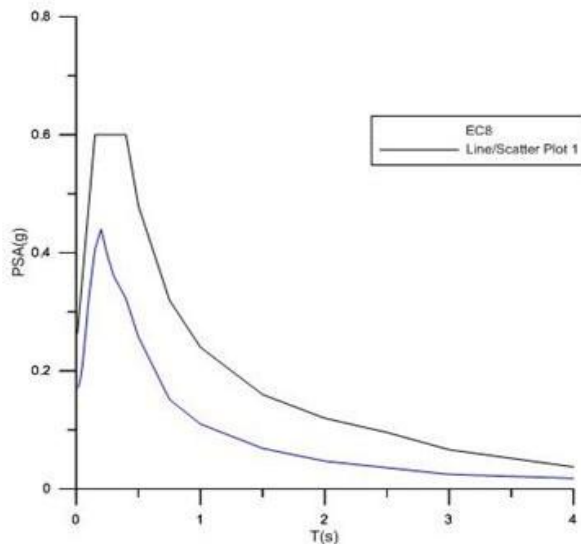


Με τυπική απόκλιση

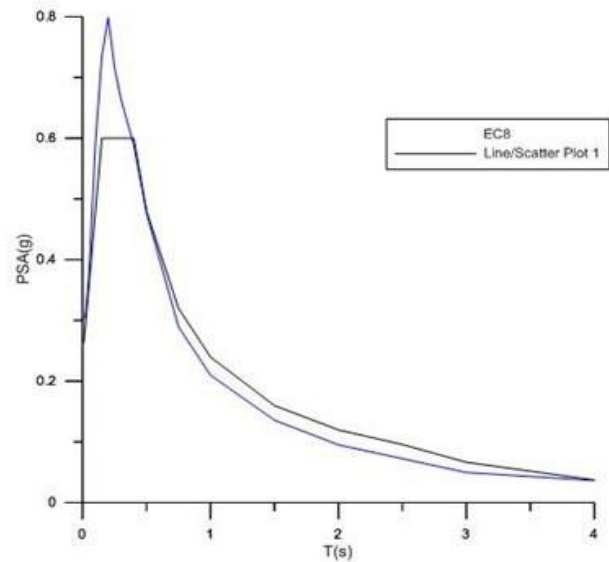


•Απόσταση 10 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση



Με τυπική απόκλιση



- Παρατηρείται ότι παρόμοιες τιμές με τα φάσματα του EC8 παρουσιάζουν τα φάσματα χωρίς τυπική απόκλιση στην απόσταση των 5 km.

ΦΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΠΑΛΜΟΥ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ-MONTELO SHAHI & BAKER

Το μοντέλο των Shahi & Baker χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να ενισχυθούν τα φάσματα απόκρισης λόγω της παρουσίας παλμού κατευθυντικότητας. Η σχέση του μοντέλου αυτού για την επαύξηση του φάσματος απόκρισης είναι:

$$\ln S_{a,pulse} = \ln A_f + \ln S_{a,gmm}$$

όπου $\ln S_{a,gmm}$: εδαφική επιτάχυνση με βάση τα παραδοσιακά προσομοιώματα εδαφικής κίνησης

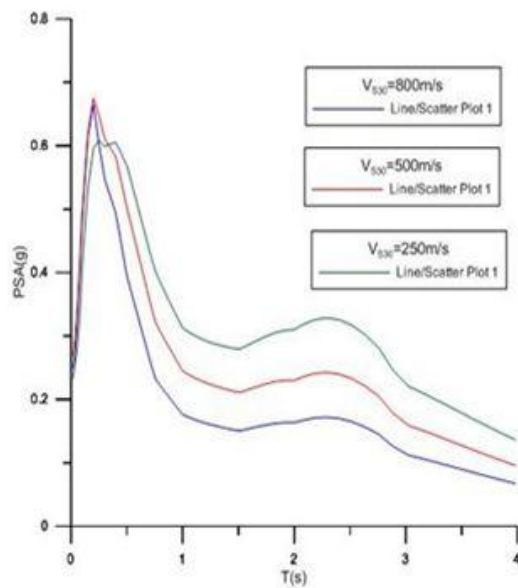
$\ln A_f$: συντελεστής ενίσχυσης λόγω παρουσίας παλμού

Εφαρμόσαμε το μοντέλο αυτό στα φάσματα που εξήγαμε από τους Boore & Atkinson προκειμένου να συμπεριλάβουμε το φαινόμενο της κατευθυντικότητας. Υπολογίσαμε την περίοδο του παλμού με τη σχέση των Mavroeidis & Papageorgiou:

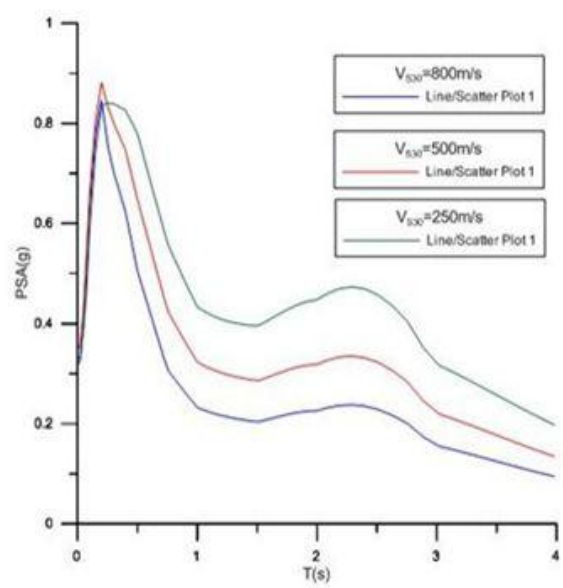
$$\log T_p = -2,9 + 0,5 \cdot M$$

όπου $M=6,8$ και άρα $T_p = 3,162s$.

•Απόσταση 5 km-Χωρίς τυπική απόκλιση



•Απόσταση 10 km-Χωρίς τυπική απόκλιση



Παρατηρείται καμπύλη κωδωνοειδούς μορφής κοντά στην τιμή $T = T_p = 3 s$

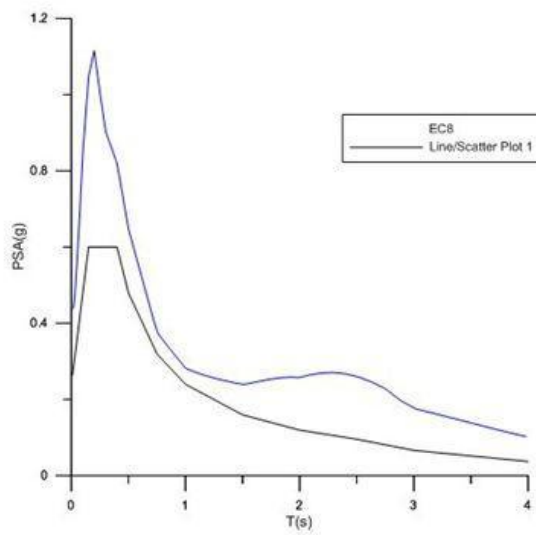
Τα παραπάνω φάσματα συγκρίθηκαν με τα φάσματα επιτάχυνσης με 5% απόσβεση που προτείνει ο EC8 για κάθε τύπο εδάφους. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η σύγκριση των φασμάτων του μοντέλου και του EC8 για το έδαφος A.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

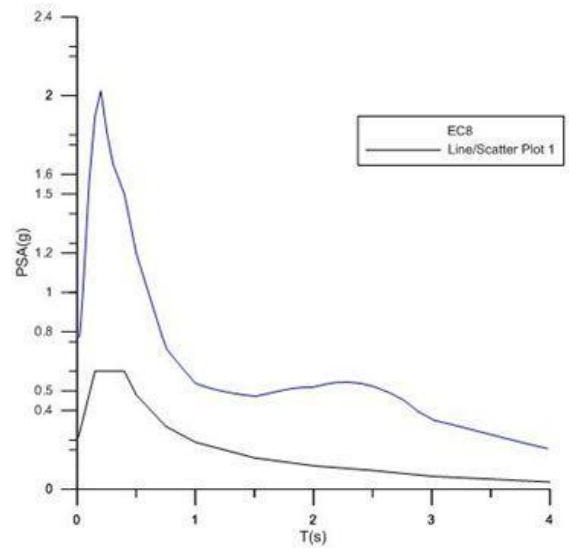
Έδαφος Α

•Απόσταση 0 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση

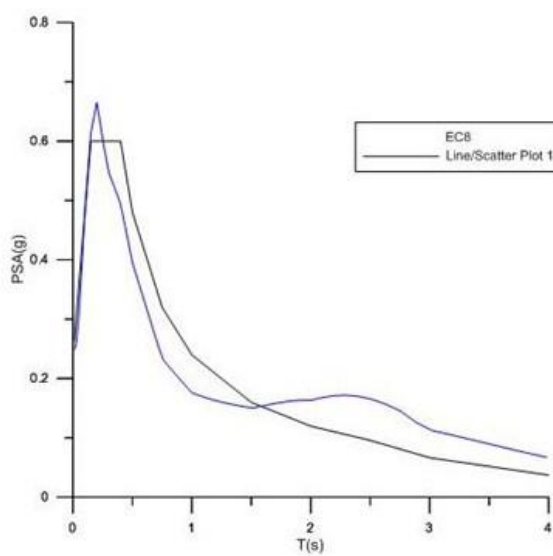


Με τυπική απόκλιση

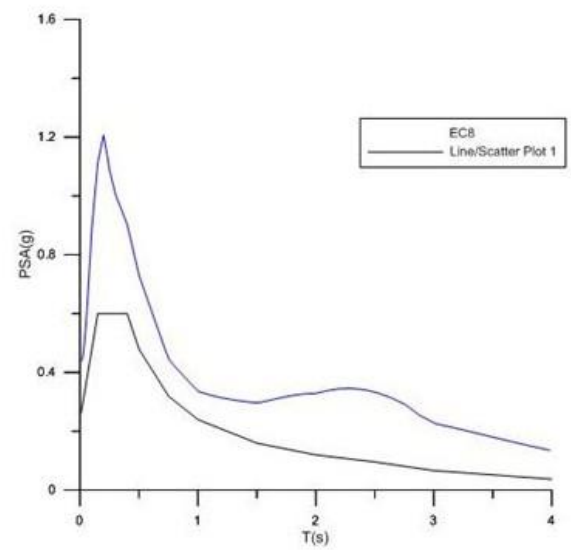


•Απόσταση 5 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση

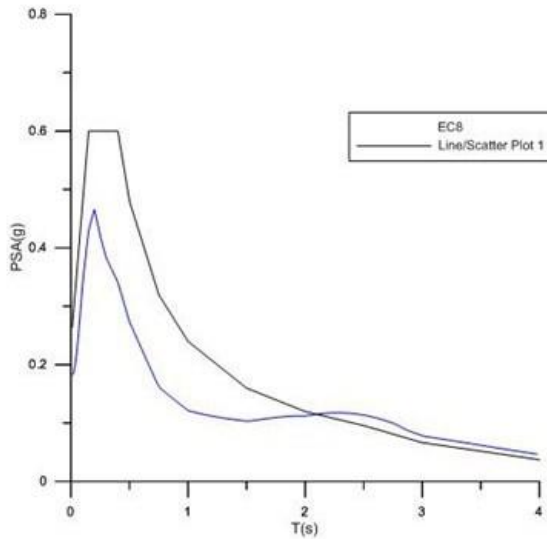


Με τυπική απόκλιση

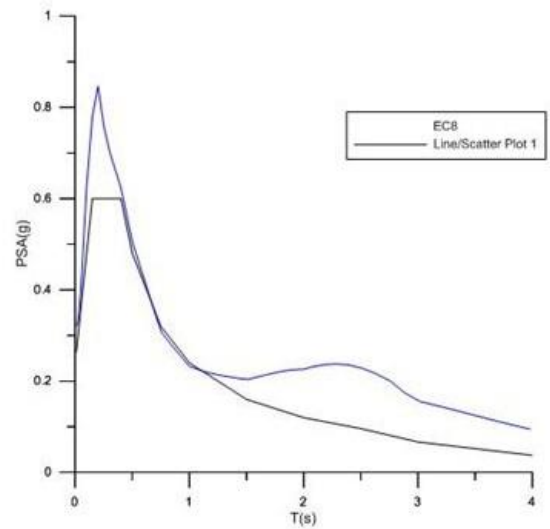


•Απόσταση 10 km:

Χωρίς τυπική απόκλιση



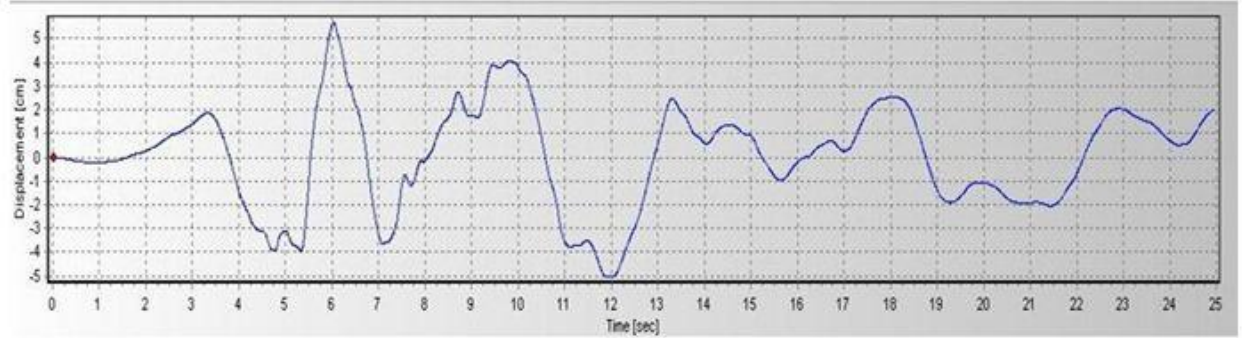
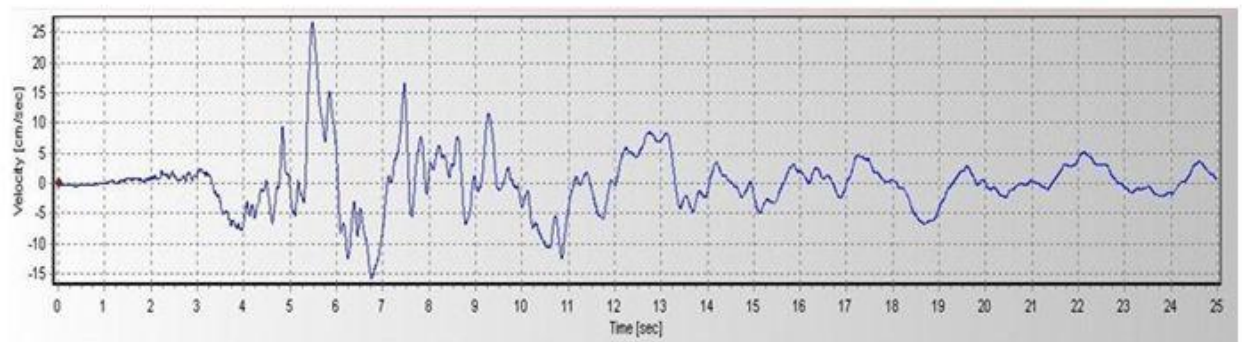
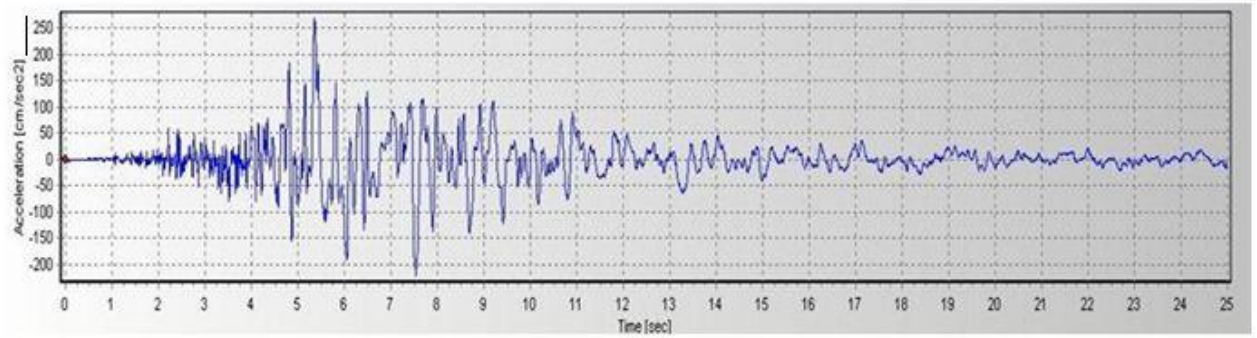
Με τυπική απόκλιση



**ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΜΕΣΩ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ**

Παρουσιάζονται ενδεικτικά οι τεχνητές χρονοϊστορίες της εδαφικής κίνησης για την απόσταση των 5 km, για το έδαφος B ($V_{S30} = 500$ m/s) και χωρίς να λάβουμε υπόψη την τυπική απόκλιση.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

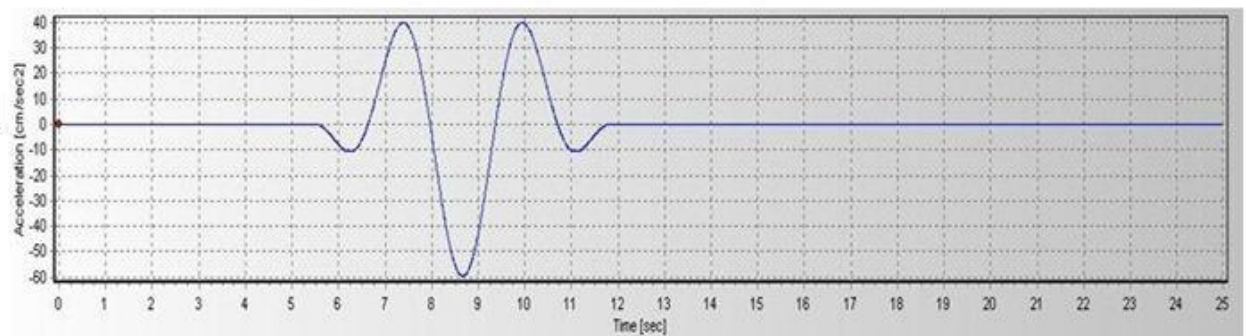


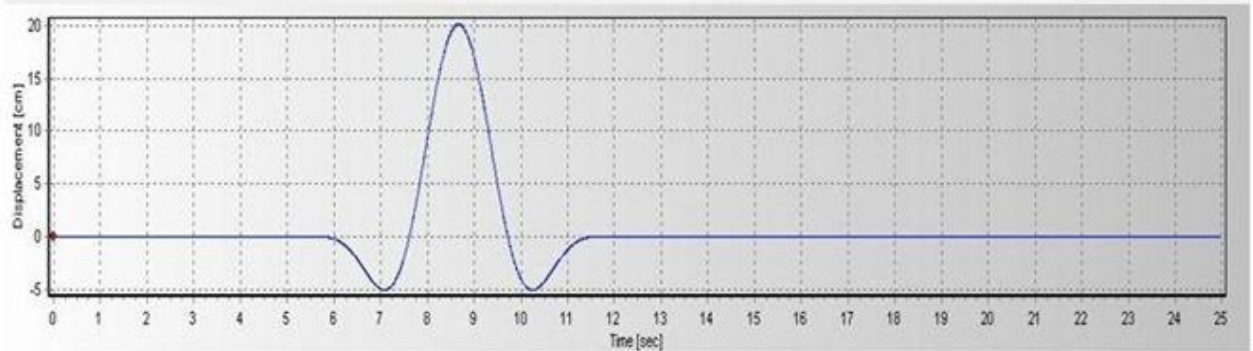
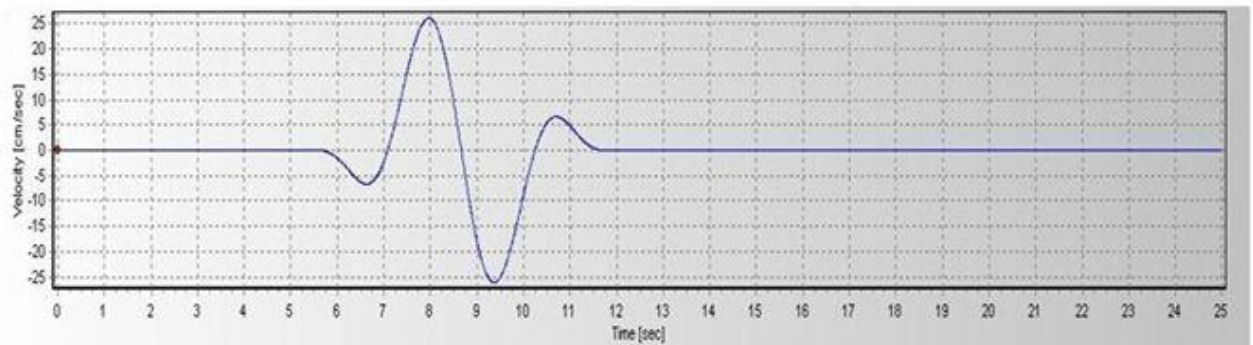
ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΕΣ ΣΤΟ ΚΟΝΤΙΝΟ ΠΕΔΙΟ-MONTELO ΜΑΥΡΟΕΙΔΙΣ & ΡΑΠΑΓΕΟΡΓΙΟΥ

Το μοντέλο των Mavroeidis & Papageorgiou εντάσσει στις χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης ένα παλμό ώστε να προσομοιάσει την επιρροή των φαινομένων κοντινού πεδίου. Χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο αυτό για να συνθέσουμε χρονοϊστορίες στις οποίες συμπεριλαμβάνεται ο παλμός της κατευθυντικότητας μέσω του προγράμματος Seismosignal. Παρακάτω παρουσιάζεται η ακριβής πορεία που ακολουθήσαμε για τη σύνθεση της χρονοϊστορίας σε μία απόσταση 5 km από το ρήγμα, εδάφους B και χωρίς να ληφθεί υπόψη η τυπική απόκλιση.

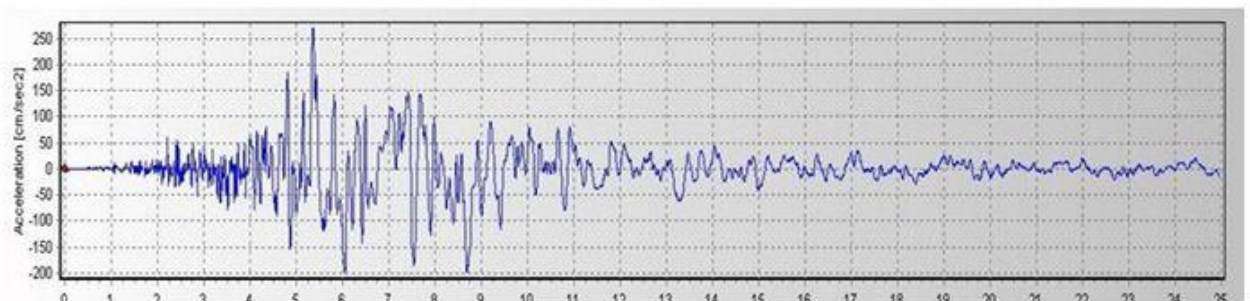
Βήμα 1: Δημιουργία του παλμού κατευθυντικότητας. Παράμετροι:

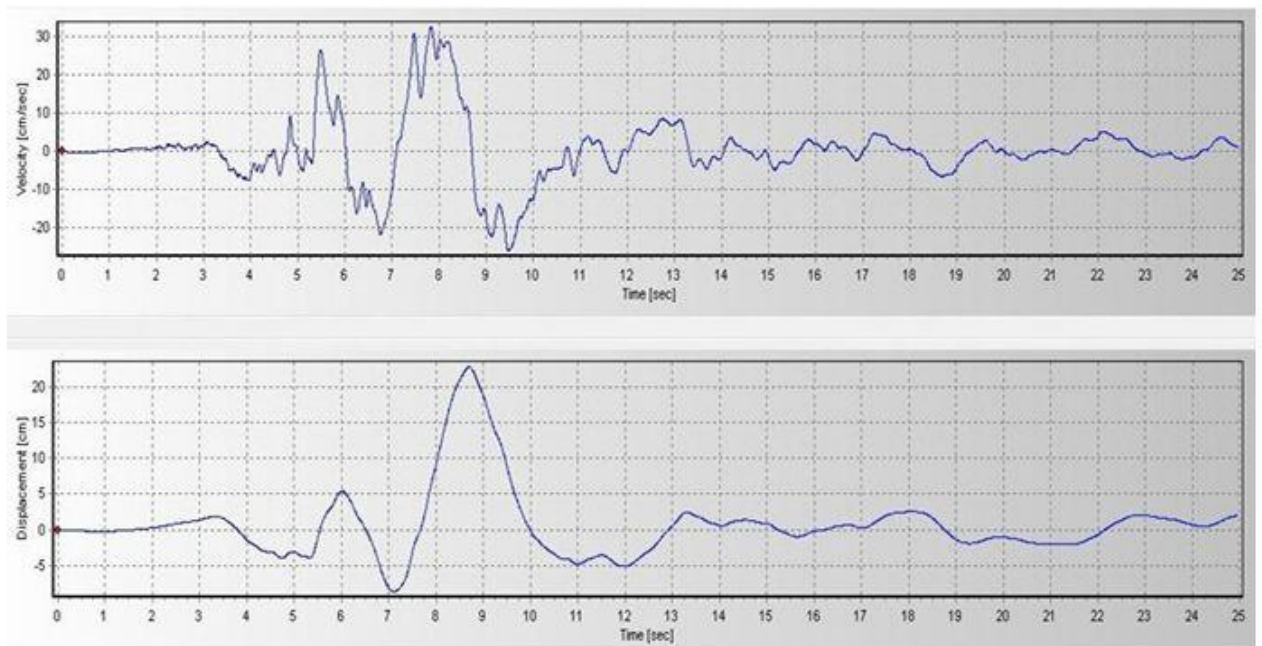
- Συχνότητα παλμού $f_p = 1/T_p = 0,316 \text{ s}^{-1}$
- Φάση ταλάντωσης $\nu = \pi/2$
- Αριθμό ημικυκλίων $\gamma=2$
- Εύρος παλμού ταχύτητας- δοκιμές $A= 35\text{-}50 \text{ cm/s}$





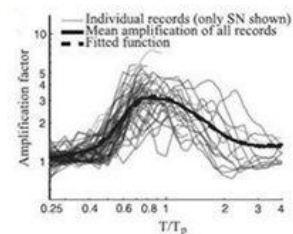
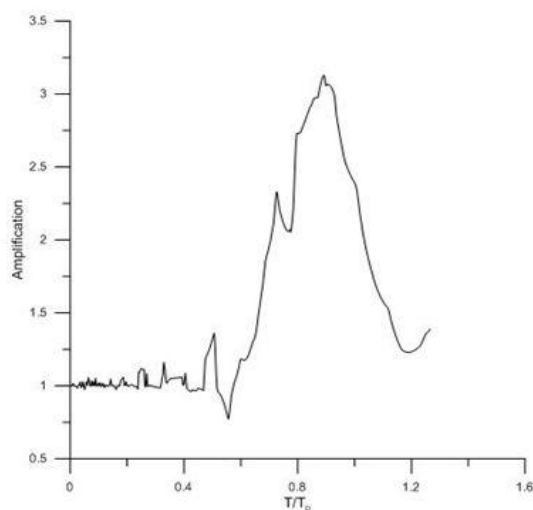
Βήμα 2: Σύνθεση των χρονοϊστοριών συμπεριλαμβάνοντας τον παλμό κατευθυντικότητας στις χρονοϊστορίες που εξήγαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.





Βήμα 3: Έλεγχος της τιμής του εύρους του παλμού της ταχύτητας που επιλέξαμε.

- Δημιουργία του ελαστικού φάσματος επιτάχυνσης και του φάσματος επιτάχυνσης με 5% απόσβεση των χρονοϊστοριών του βήματος 2, μέσω του προγράμματος Seismosignal.
- Δημιουργία των ίδιων φασμάτων και για τις χρονοϊστορίες στις οποίες δεν συμπεριλαμβάνεται ο παλμός.
- Δημιουργία αναλογίας ανάμεσα στην περίπτωση ύπαρξης ή μη παλμού και έλεγχος αν η κωδωνοειδής καμπύλη παρουσιάζει ενίσχυση της τάξεως του 3 όταν $T / T_p = 1$.



Κωδωνοειδής καμπύλη ενίσχυσης του μοντέλου [Shahi & Baker](#)

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ- MONTELO GLAISTER & PINHO

Το μοντέλο των Glaister & Pinho χρησιμοποιεί αναλυτικές σχέσεις μεταξύ του ύψους της κατασκευής και της μέγιστης δυνατής μετατόπισης και εμπειρικές σχέσεις μεταξύ του ύψους και της ελαστικής περιόδου, προκειμένου εκτιμήσει τη σεισμική διακινδύνευση των κατασκευών με βάση το μηχανισμό αστοχίας δοκού και υποστυλώματος.

Καμπύλες ικανότητας

Μετατροπή σε αντίστοιχο μονοβάθμιο σύστημα μέσω της παραμέτρου του ενεργού ύψους ef_h

- **Οριακή κατάσταση διαρροής (LS1):**

$$\Delta_{LSy} = ef_h H_T \theta_y$$

Καμπυλότητα στη διαρροή Φ_y των κρίσιμων διατομών συναρτήσει των παραμορφώσεων του φορέα και των διαστάσεων των μελών. Στροφή του πλαισίου στο όριο διαρροής θ_{by} . Συνυπολογίζοντας την ευκαμψία των αρθρωτών και πλαισιωτών μελών- τελική στροφή θ_y . Άρα έχουμε τελικά:

$$\Delta_{LSy} = 0.5ef_h H_T \epsilon_y \frac{l_b}{h_b}$$

Μηχανισμός αστοχίας δοκού

$$\Delta_{LSy} = 0.43ef_h H_T \epsilon_y \frac{h_s}{h_c}$$

Μηχανισμός αστοχίας υποστυλώματος

▪ **Οριακή κατάσταση μετά τη διαρροή (LS2):**

Προσθέτοντας τον ανελαστικό όρο.

Μέγιστη καμπυλότητα στη διαρροή Φ_{LSi} των κρίσιμων διατομών συναρτήσει των παραμορφώσεων των υλικών και διαστάσεων των μελών. Μέγιστη πλαστική καμπυλότητα Φ_{pi} μήκος πλαστικής άρθρωσης L_{pi} $\rightarrow$ πλαστική στροφή θ_{pi} Πλαστική συμπεριφορά της μετακίνησης κορυφής Δ_{pi} . Άρα έχουμε τελικά:

$$\Delta_{LSi} = 0.5ef_h H_T \left[\varepsilon_{C(LSi)} + \varepsilon_{S(LSi)} - \left(1.7 - \frac{l_b}{h_b} \right) \varepsilon_y \right]$$

Μηχανισμός αστοχίας δοκού

$$\Delta_{LSi} = 0.43ef_h H_T \varepsilon_y \frac{h_s}{h_c} + 0.5(\varepsilon_{C(LSi)} + \varepsilon_{S(LSi)} - 2.14\varepsilon_y)h_s$$

Μηχανισμός αστοχίας υποστυλώματος

Παραμορφώσεις υλικών και διαστάσεις μελών:

- $\varepsilon_y = 0,0016$ (παραμόρφωση διαρροής χάλυβα)
- $\varepsilon_{c(LSi)} = 0,005$ (παραμόρφωση σκυροδέματος σε μία οριακή κατάσταση μετά τη διαρροή-μηχανισμός αστοχίας δοκού και υποστυλώματος)
- $\varepsilon_{s(LSi)} = 0,015$ (παραμόρφωση χάλυβα σε μία οριακή κατάσταση μετά τη διαρροή-μηχανισμός αστοχίας δοκού)
- $\varepsilon_{s(LSi)} = 0,04$ (παραμόρφωση χάλυβα σε μία οριακή κατάσταση μετά τη διαρροή-μηχανισμός αστοχίας υποστυλώματος)
- $h_s = 3 \text{ m}$ (ύψος ορόφου)
- $l_b = 6 \text{ m}$ (μήκος δοκού)
- $h_b = 0,45 \text{ m}$ (ύψος δοκού)
- $h_c = 0,4 \text{ m}$ (πλάτος υποστυλώματος)

Πλαστιμότητα

$$\mu_{LSi} = \frac{\Delta_{LSi}}{\Delta_{LSy}} = 1 + \frac{\varepsilon_{C(LSi)} + \varepsilon_{S(LSi)} - 1.7\varepsilon_y}{\varepsilon_y} \frac{h_b}{l_b}$$

Μηχανισμός αστοχίας δοκού

$$\mu_{LSi} = \frac{\Delta_{LSi}}{\Delta_{LSy}} = 1 + \frac{\varepsilon_{C(LSi)} + \varepsilon_{S(LSi)} - 2.14\varepsilon_y}{0.86\varepsilon_y} \frac{h_c}{ef_h H_T}$$

Μηχανισμός αστοχίας υποστυλώματος

Σχέσεις ύψους- περιόδου

- Οριακή κατάσταση διαρροής:

$$T_{LSy} = \alpha H_T^\beta = 0.1 \cdot H_T^{3/4}$$

- Οριακή κατάσταση μετά τη διαρροή:

$$H_T(T_{LSi}) = C_3 T_{LSi}^{4/3}$$

Μηχανισμός αστοχίας δοκού

$$H_T(T_{LSi}) = \left(\frac{C_2}{3} - \frac{C_1}{ef_h C_2} \right)^2$$

Μηχανισμός αστοχίας υποστυλώματος

Όπου C_1, C_2, C_3 συντελεστές.

Με βάση τις προηγούμενες σχέσεις καταλήγουμε στις σχέσεις των καμπυλών ικανότητας εκφράζοντας τη μέγιστη δυνατή μετατόπιση συναρτήσει της περιόδου.

Καμπύλες ζήτησης-Φάσματα μετακίνησης

- Απομείωση του ελαστικού φάσματος μετακίνησης λόγω πλαστιμότητας. Σχέση ιξώδους απόσβεσης πλαστιμότητας:

$$\xi = a \left(1 - \frac{1}{\mu_i^b} \right) + \xi_E$$

Εφαρμογή του μοντέλου:

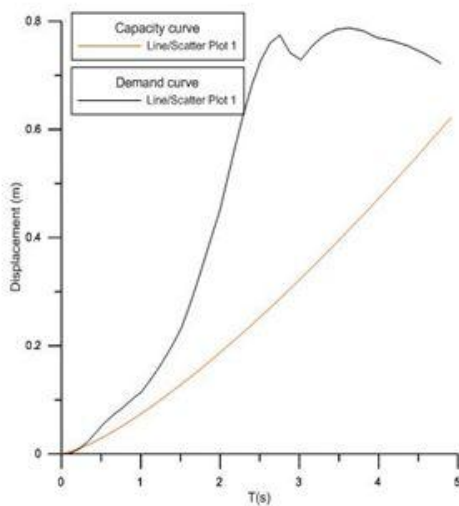
- ❑ Καμπύλες ζήτησης: Ελαστικό φάσμα μετακίνησης για LS1 και ανελαστικό φάσμα μετακίνησης (συνυπολογίζοντας την πλαστιμότητα) LS2.
- ❑ Καμπύλες ικανότητας: LS1 και LS2.

Ενδεικτικά παρατίθενται κάποια διαγράμματα από την **απόσταση των 0 km** που παρουσιάζουν τις καμπύλες ζήτησης και ικανότητας και για τους δύο μηχανισμούς αστοχίας.

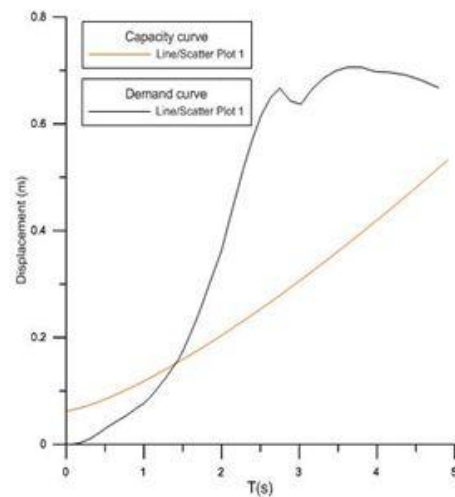
Μηχανισμός αστοχίας υποστυλώματος (παλαιότερες κατασκευές)

Έδαφος C-Mε κατευθυντικότητα

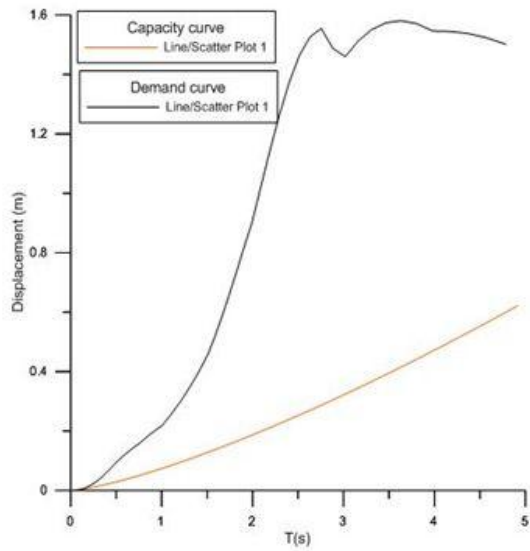
LS1-Χωρίς τυπική απόκλιση



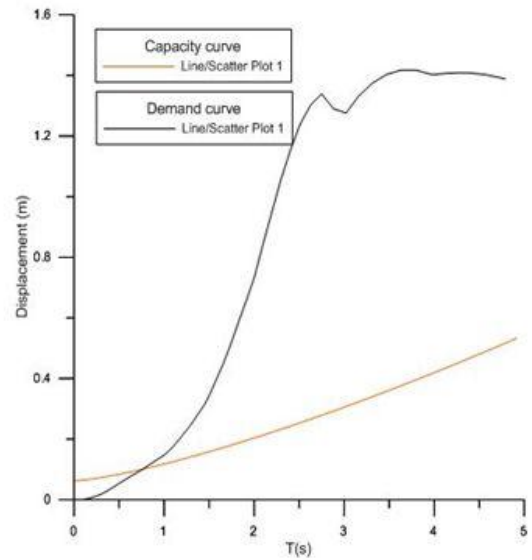
LS2- Χωρίς τυπική απόκλιση



LS1-Με τυπική απόκλιση

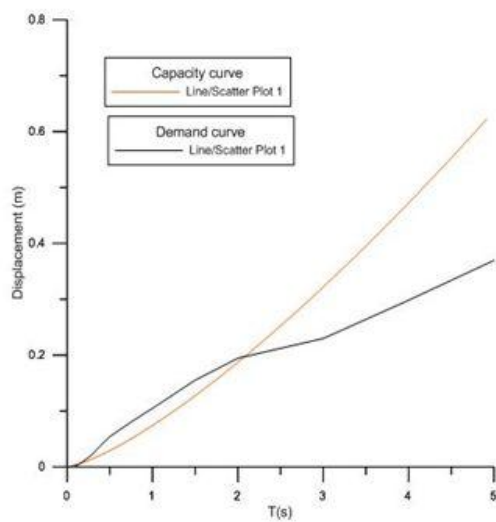


LS2-Με τυπική απόκλιση

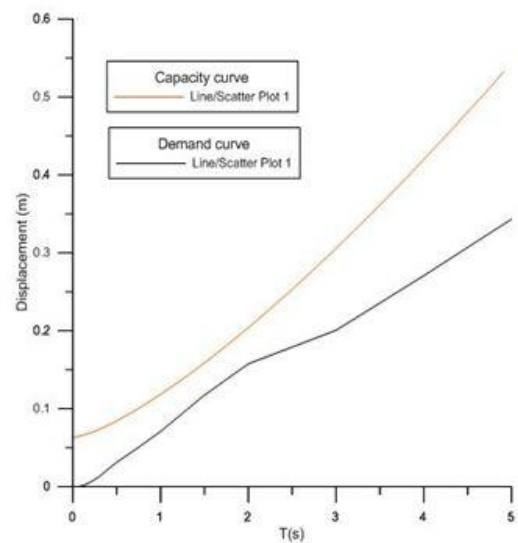


Έδαφος Β-Χωρίς κατευθυντικότητα

LS1-Με τυπική απόκλιση



LS2-Με τυπική απόκλιση



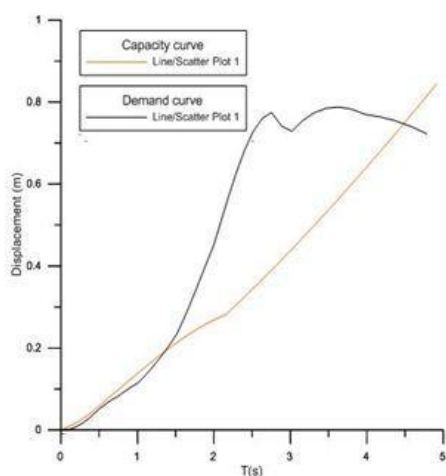
Παρατηρήσεις για το μηχανισμό αστοχίας υποστρώματος

- Στα φάσματα που δεν συμπεριλαμβάνεται η κατευθυντικότητα, στην οριακή κατάσταση διαρροής (LS1) η ζήτηση υπερβαίνει την ικανότητα στις μικρές περιόδους γεγονός που σημαίνει ότι η πλειοψηφία των κατασκευών διαρρέει. Στην οριακή κατάσταση μετά τη διαρροή (LS2) δεν υπάρχει τμήση των δύο καμπυλών. Η ικανότητα πάντα υπερβαίνει τη ζήτηση.
- Σε όλα τα διαγράμματα που συμπεριλαμβάνεται η κατευθυντικότητα, στην οριακή κατάσταση διαρροής (LS1) η καμπύλη ζήτησης καλύπτει την καμπύλη ικανότητας. Όλες οι κατασκευές διαρρέουν.
- Τμήση μεταξύ των δύο καμπυλών στις οριακές καταστάσεις μετά τη διαρροή (LS2) και άρα κίνδυνο κατάρρευσης παρουσιάζουν ορισμένες κατασκευές σε όλα τα φάσματα που συμπεριλαμβάνεται ο παλμός της κατευθυντικότητας. Ειδικότερα στα φάσματα που λαμβάνεται υπόψη η τυπική απόκλιση, η τμήση των δύο καμπυλών παρατηρείται σε μικρές περιόδους κατασκευών γεγονός που σημαίνει ότι πολλές κατασκευές παρουσιάζουν κίνδυνο σημαντικών βλαβών, έως και κατάρρευσης.

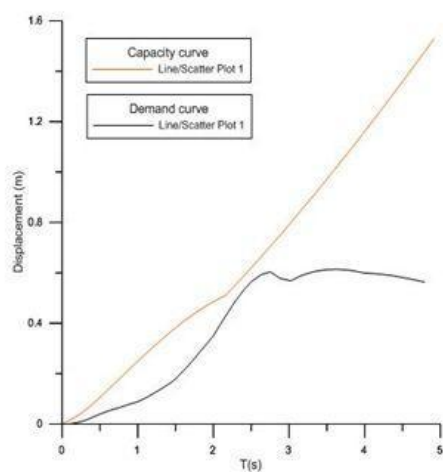
Μηχανισμός αστοχίας δοκού (νεώτερες κατασκευές)

Έδαφος C-Mε κατευθυντικότητα

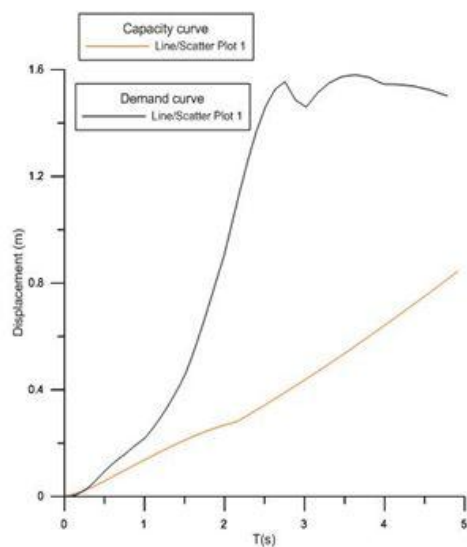
LS1-Χωρίς τυπική απόκλιση



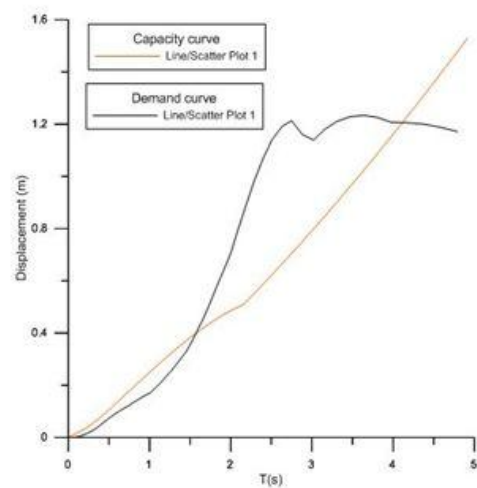
LS2-Χωρίς τυπική απόκλιση



LS1-Με τυπική απόκλιση

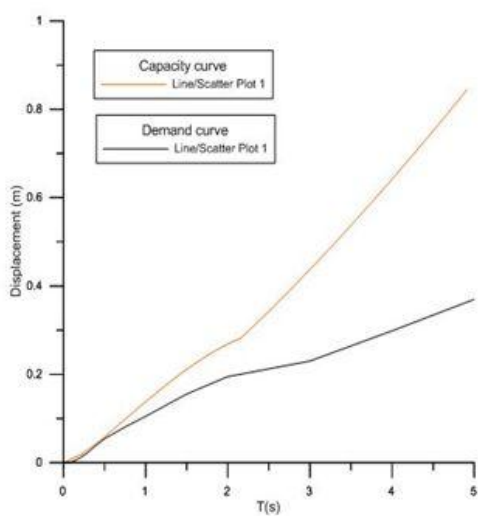


LS2-Με τυπική απόκλιση

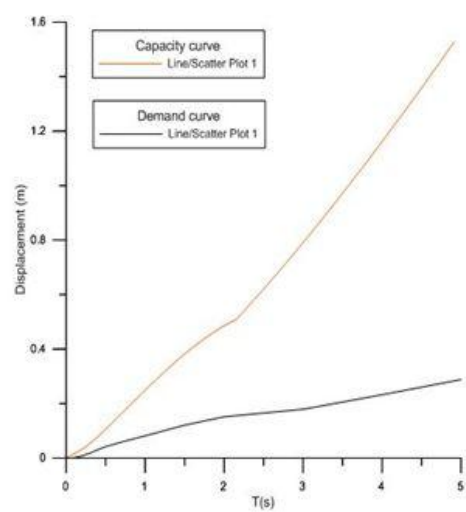


Έδαφος Β-Χωρίς κατευθυντικότητα

LS1-Με τυπική απόκλιση



LS2-Με τυπική απόκλιση



Παρατηρήσεις για το μηχανισμό αστοχίας δοκού

- Στα φάσματα που δεν συμπεριλαμβάνεται η κατευθυντικότητα δεν υπάρχει τμήση των δύο καμπυλών. Η ικανότητα πάντα υπερβαίνει τη ζήτηση.
- Σε όλα τα διαγράμματα που συμπεριλαμβάνεται η κατευθυντικότητα, οι δύο καμπύλες τέμνονται στην οριακή κατάσταση διαρροής (LS1). Ορισμένες κατασκευές διαρρέουν.
- Στα διαγράμματα που συμπεριλαμβάνουν το φαινόμενο της κατευθυντικότητας αλλά δεν λαμβάνεται υπόψη η τυπική απόκλιση, δεν παρατηρείται τμήση στην οριακή κατάσταση μετά τη διαρροή (LS2). Δεν υπάρχει κίνδυνος σοβαρών ζημιών.
- Στα διαγράμματα που συμπεριλαμβάνεται η κατευθυντικότητα και έχουμε τυπική απόκλιση παρατηρείται τμήση και στην οριακή κατάσταση μετά τη διαρροή (LS2). Κίνδυνος σοβαρών ζημιών, ακόμα και κατάρρευσης ορισμένων κατασκευών. Παρόλα αυτά η τμήση παρατηρείται σε κατασκευές με περιόδους μεγαλύτερες από 1,5 s (13 όροφοι) που είναι ελάχιστες.

Αναφορές

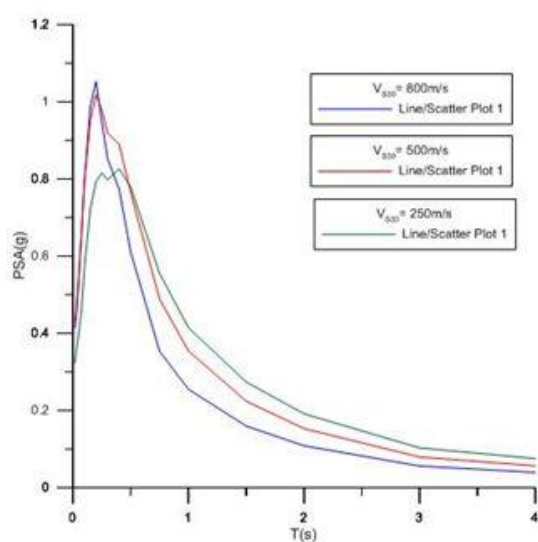
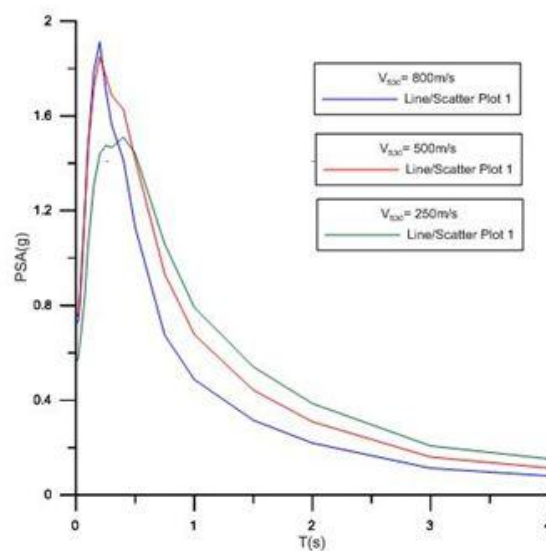
- Sboras S. , Ganas A. , Pavlides S. **Morphotectonic Analysis of the Neotectonic and Active Faults of Beotia (Central Greece) Using G.I.S Techniques**, 2010
- http://el.wikipedia.org/wiki/Νομός_Βοιωτίας
- Stewart J.P., Chiou S.J., Bray J.D., Somerville P.G., Graves R.W., Abrahamson N.A. **Ground Motion Evaluation Procedures for Performance-Based Design**, 2001
- http://lee.civil.ntua.gr/pdf/mathimata/tehniki_seismologia/simeioseis/prostheses_simeiwseis2.pdf
- http://lee.civil.ntua.gr/pdf/mathimata/tehniki_seismologia/simeioseis/tehniki_seismologia.pdf
- Boore D.M. , Atkinson G.M. , **Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s**, 2007
- 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, No. 2, pp. 742-755, April 2011
- Mavroeidis G. , Papageorgiou A., **A Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions**, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93 , No. 3, pp. 1099-1131 , June 2003
- Glaister S. , Pinho R., **Development of a Simplified Deformation-Based Method for Seismic Vulnerability Assessment**, Journal of Earthquake Engineering, 2009

Παράρτημα

Φάσματα επιτάχυνσης με 5% απόσβεση με και χωρίς κατευθυντικότητα**Ρήγμα Ασωπού $M=6.8$ $T_p=3.162$**

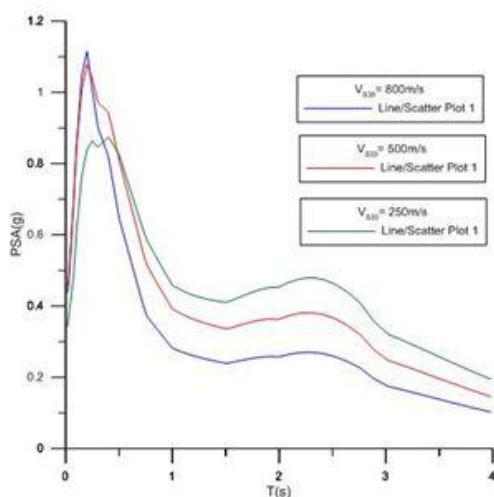
	R_{JB} (km)
Άρμα	0
Σχηματάρι	0
Τανάγρα	0
Ασωπία	0
Άγιος Θωμάς	0
Οινόφυτα	0
Δήλεσι	0.60
Θήβα	1.36
Δερβενοχώρια	6.6

- Άρμα-Σχηματάρι-Τανάγρα-Ασωπία-Άγιος Θωμάς-Οινόφυτα (μηδενική απόσταση)

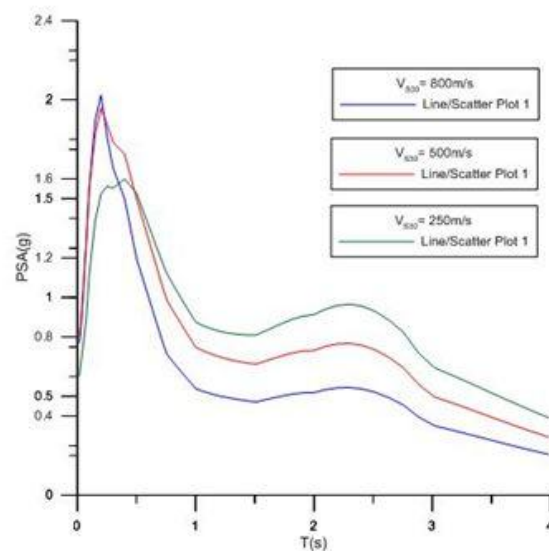
Χωρίς κατευθυντικότητα**Χωρίς τυπική απόκλιση****Με τυπική απόκλιση**

Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



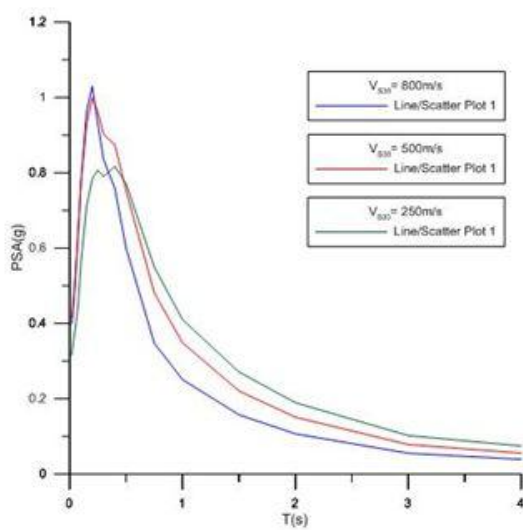
Με τυπική απόκλιση



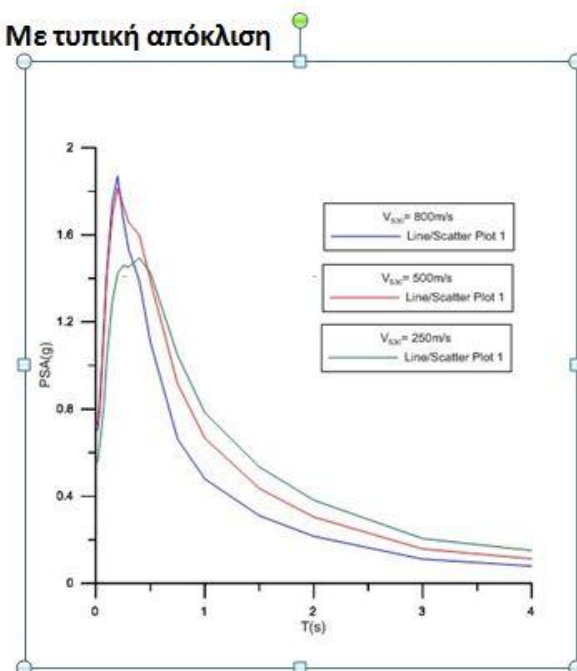
- Δήλεσι

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση

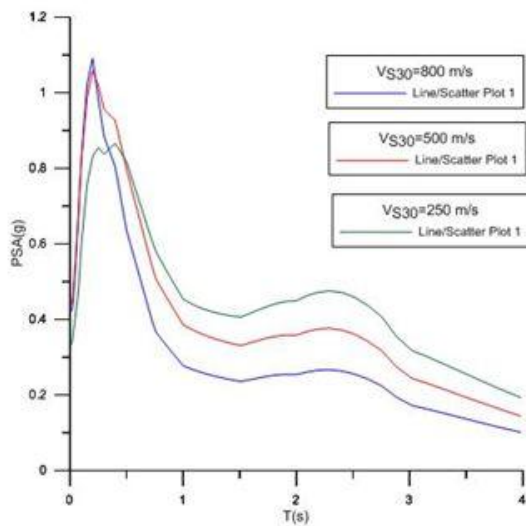


Με τυπική απόκλιση

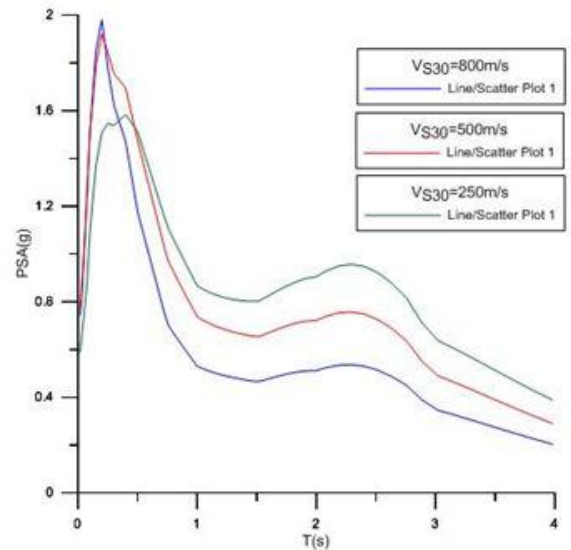


Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



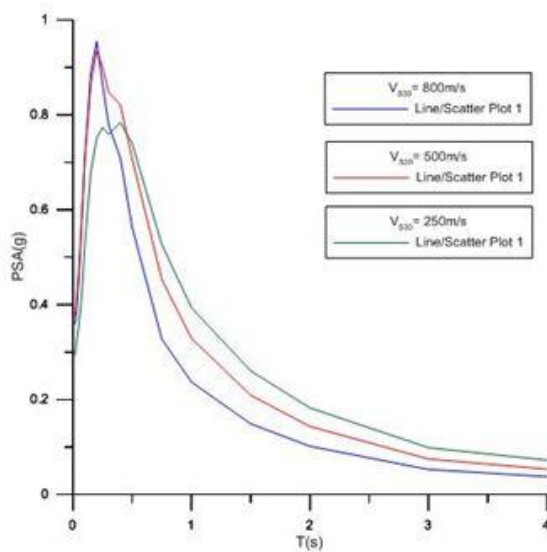
Με τυπική απόκλιση



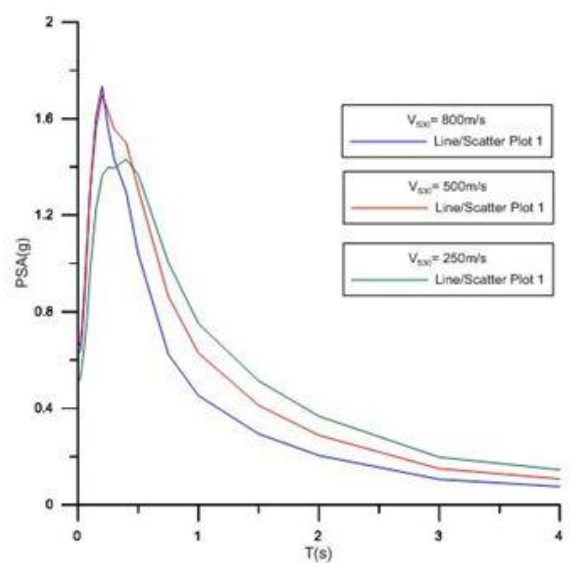
- Θήβα

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση

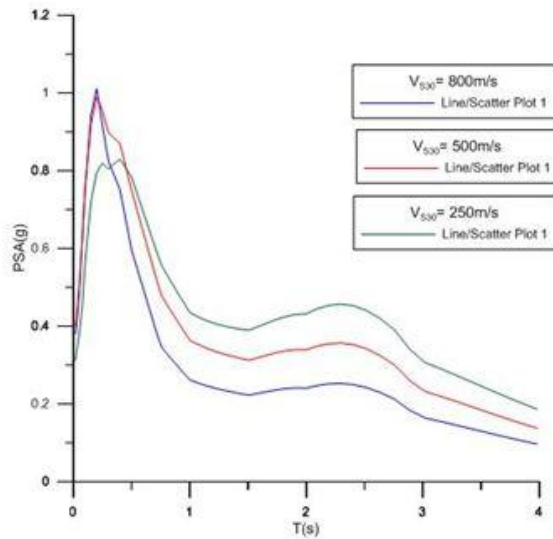


Με τυπική απόκλιση

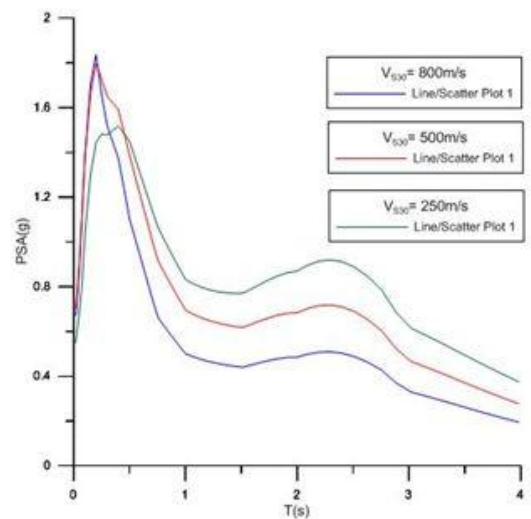


Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



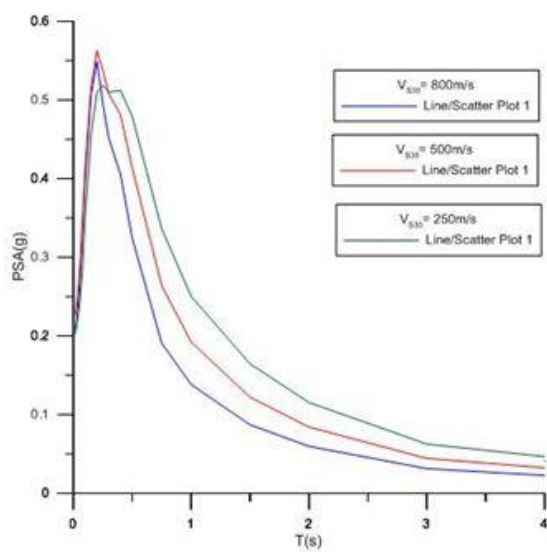
Με τυπική απόκλιση



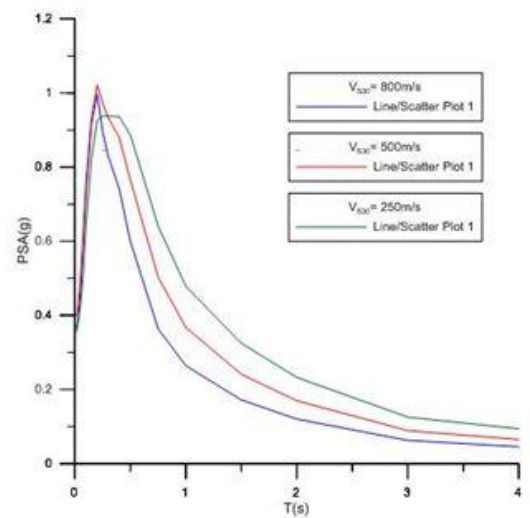
- Δερβανοχώρια

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση

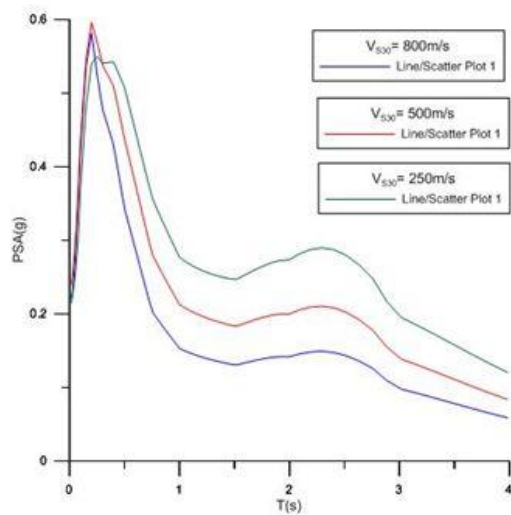


Με τυπική απόκλιση

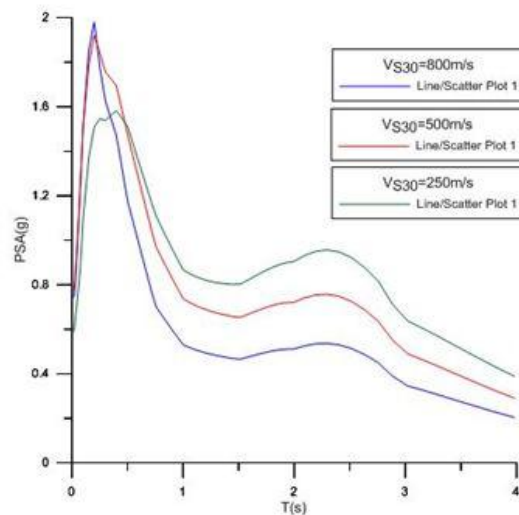


Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



Με τυπική απόκλιση



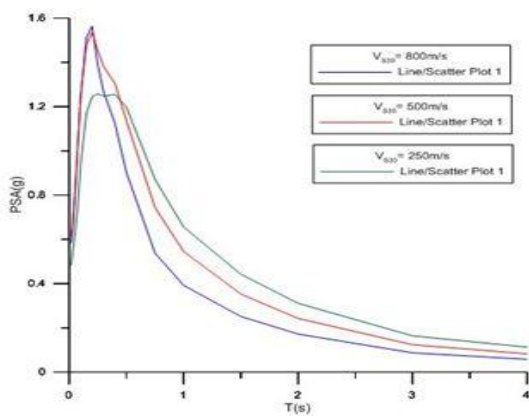
Ρήγμα Καπαρελλίου $M=6.6$ $T_p=2.512$

	R_{JB} (km)
Πλαταιές	1,47

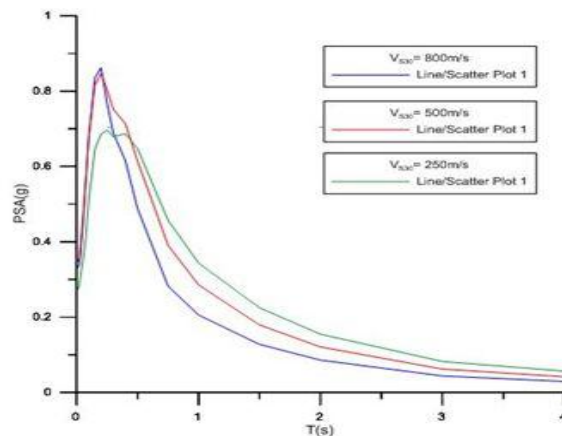
- Πλαταιές

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



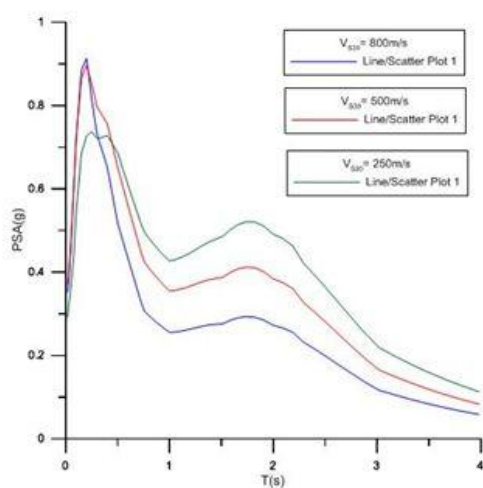
Με τυπική απόκλιση



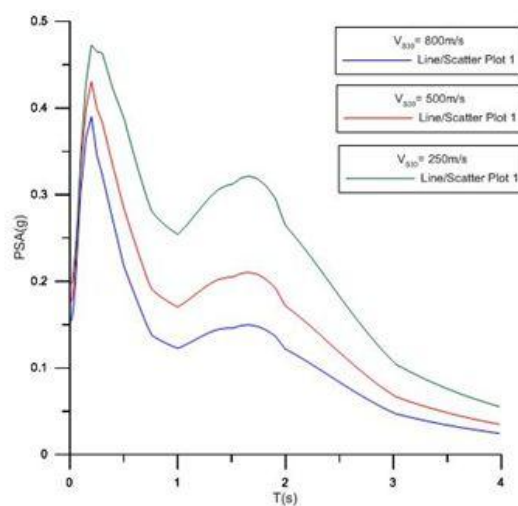
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



Με τυπική απόκλιση



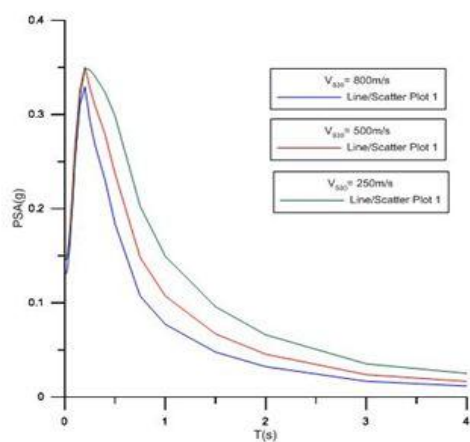
Ρήγμα Τανάγρας M=6,6 T_p=2,512

	R _{JB} (km)
Ακράϊφνιο	13.75
Κάστρο	19.83

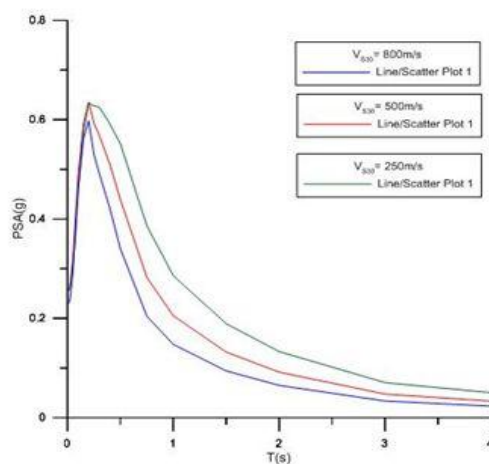
- Ακράϊφνιο

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση

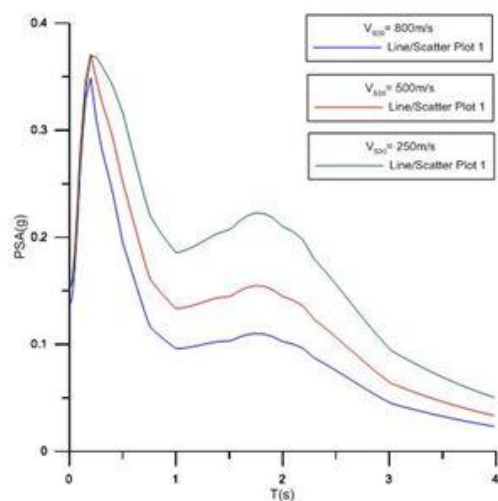


Με τυπική απόκλιση

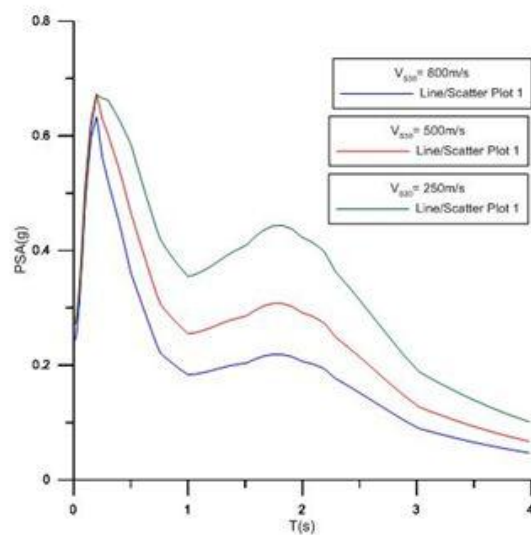


Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



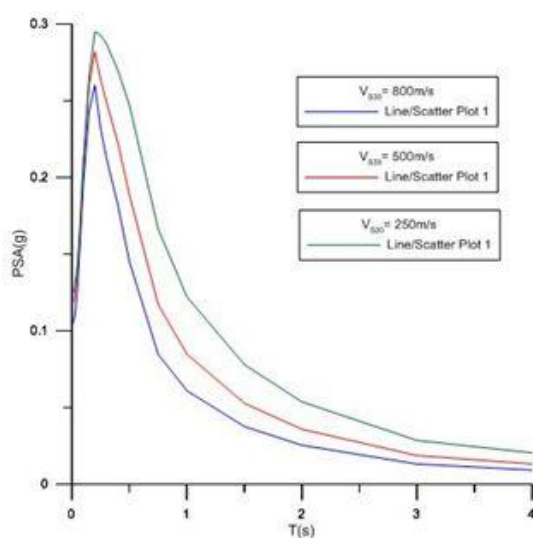
Με τυπική απόκλιση



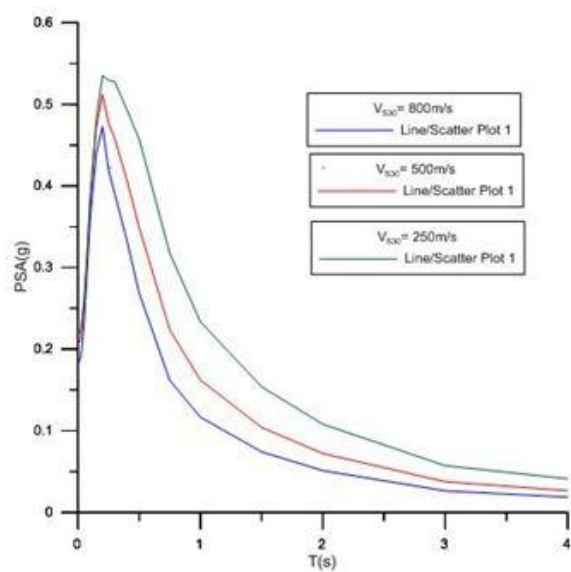
- Κάστρο

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



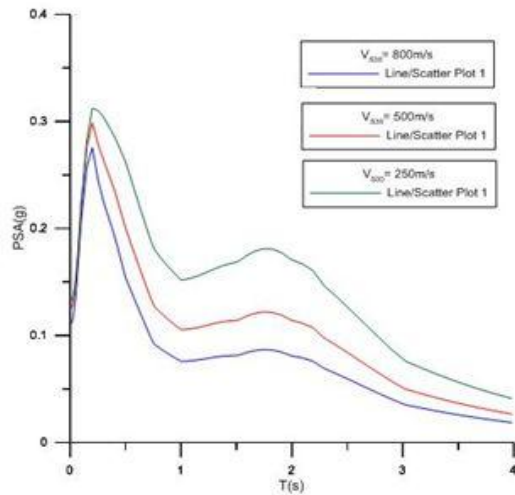
Με τυπική απόκλιση



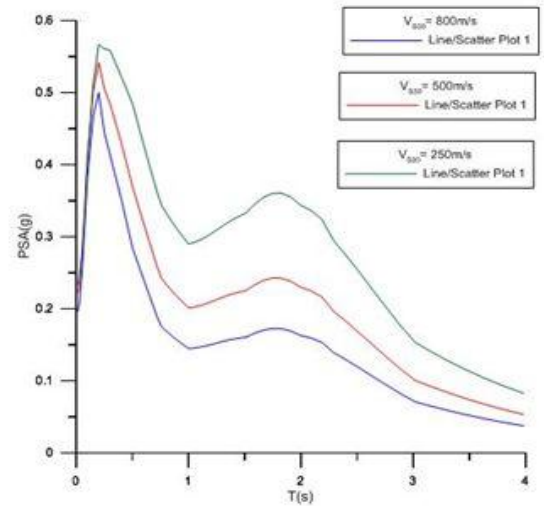
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



Με τυπική απόκλιση



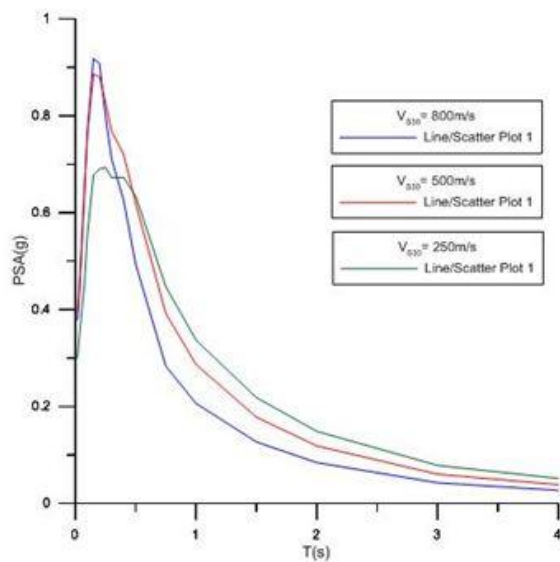
Ρήγμα Λεοντάρι M=6,5 T_p=2.239

	R _{JB} (km)
Θίσβη	0
Ξηρονόμη	0
Αλυκή	0
Λεύκτρα	0
Καπαρέλλι	0
Θεσπιές	0
Αράχωβα	21.35
Δίστομο	14.5
Αντίκυρα	9.17
Κυριάκι	7.64
Δαύλεια	24.69
Χαιρώνεια	23.76
Λιβαδειά	17.79
Προσήλιο	25.97
Κορώνεια	11.25
Άσκηρη	1.24
Βάγια	1.6
Ορχομενός	23.66
Αλίαρτος	7.87
Παύλος	25.53

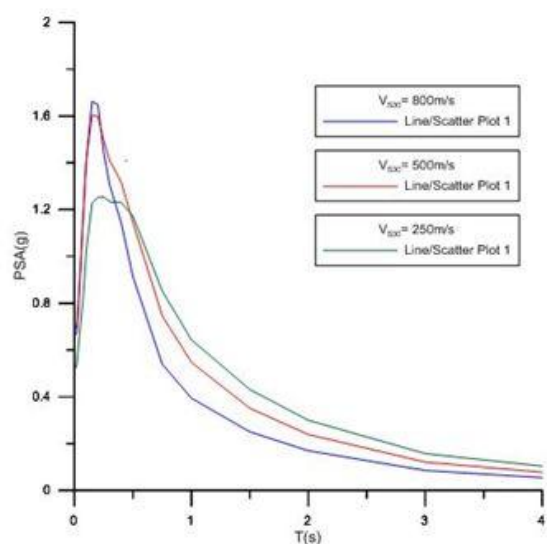
- Θίσβη-Ξηρονόμη-Αλυκή-Λεύκτρα-Καπαρέλλι-Θεσπιές (μηδενική απόσταση)

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση

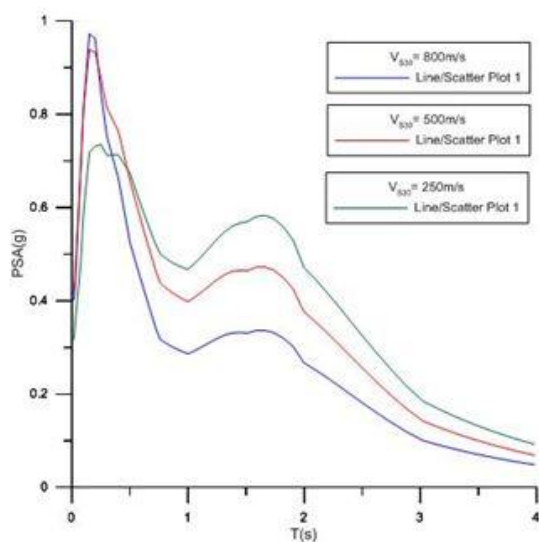


Με τυπική απόκλιση

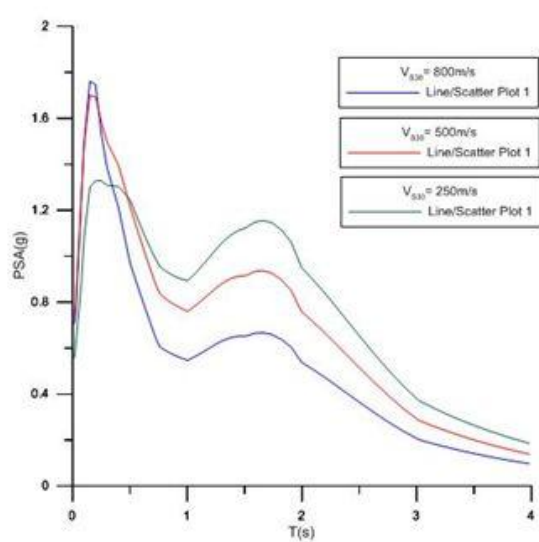


Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



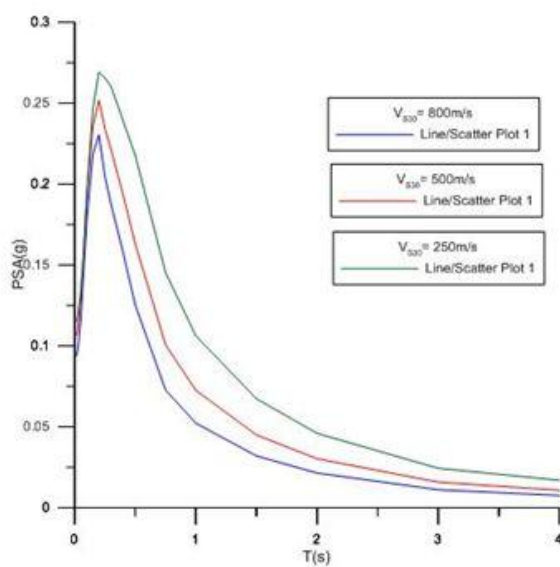
Με τυπική απόκλιση



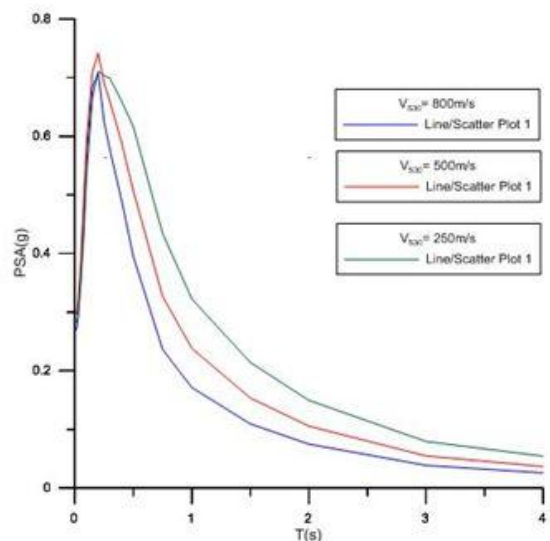
- Αράχωβα

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση

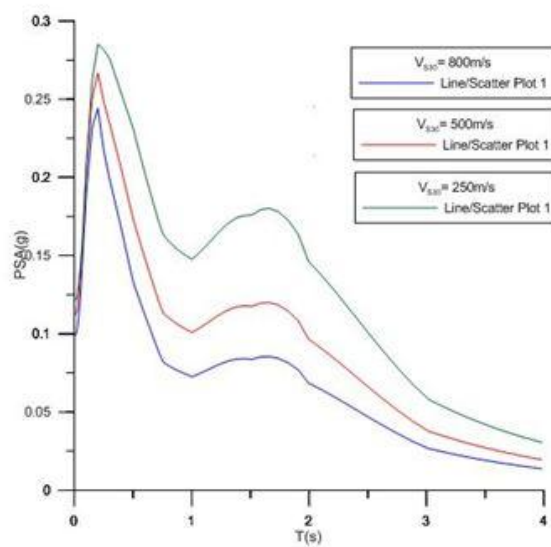


Με τυπική απόκλιση

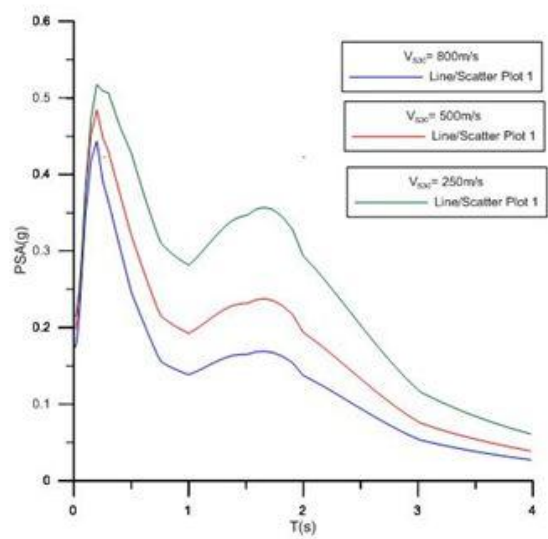


Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



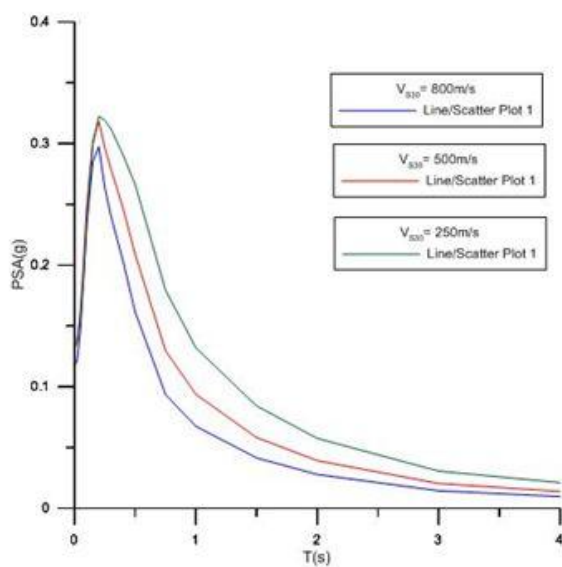
Με τυπική απόκλιση



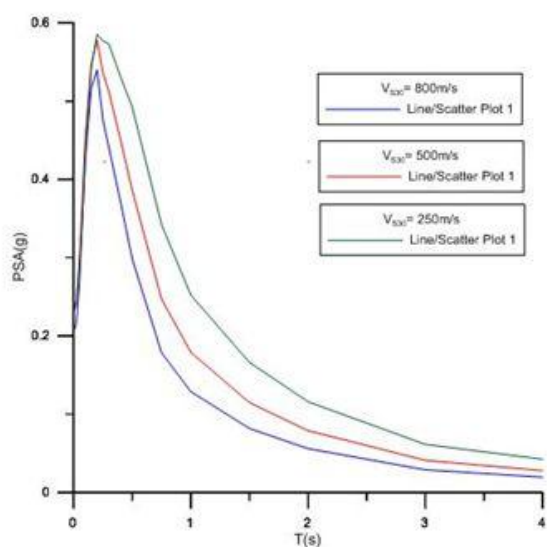
- Δίστομο

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση

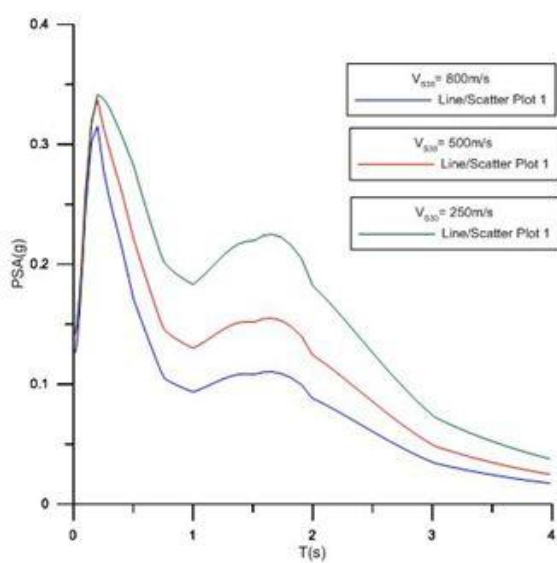


Με τυπική απόκλιση

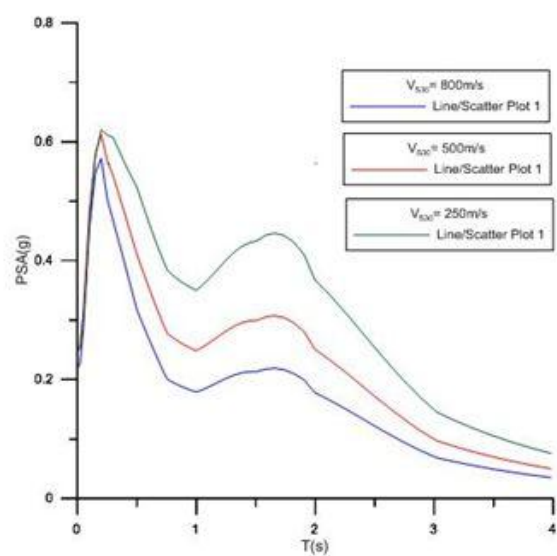


Με κατευθυντικότητα

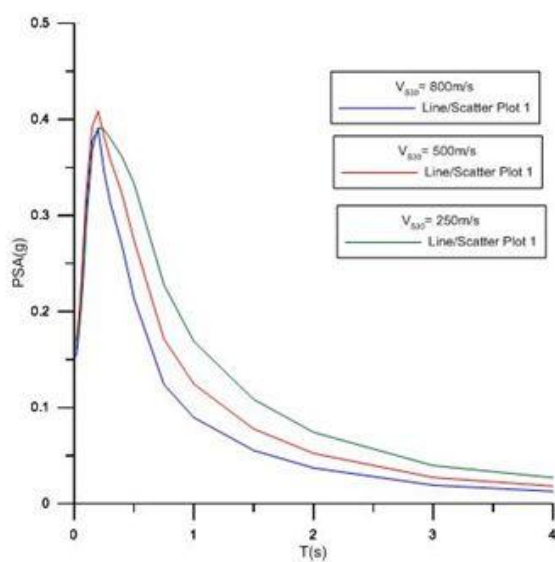
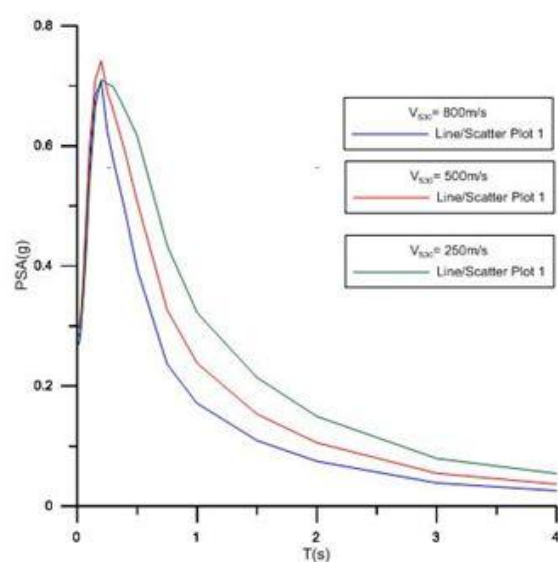
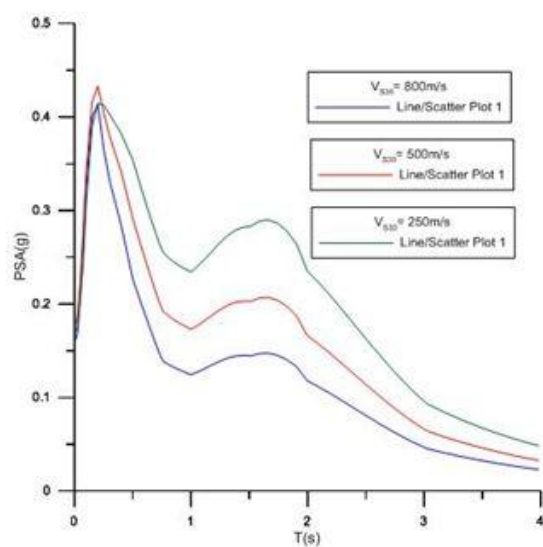
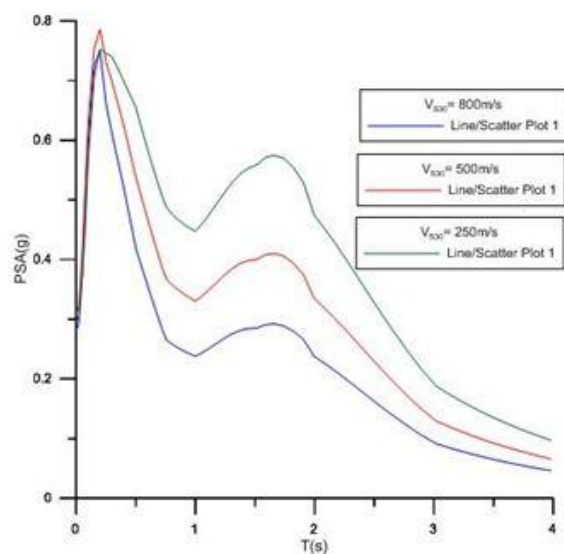
Χωρίς τυπική απόκλιση



Με τυπική απόκλιση



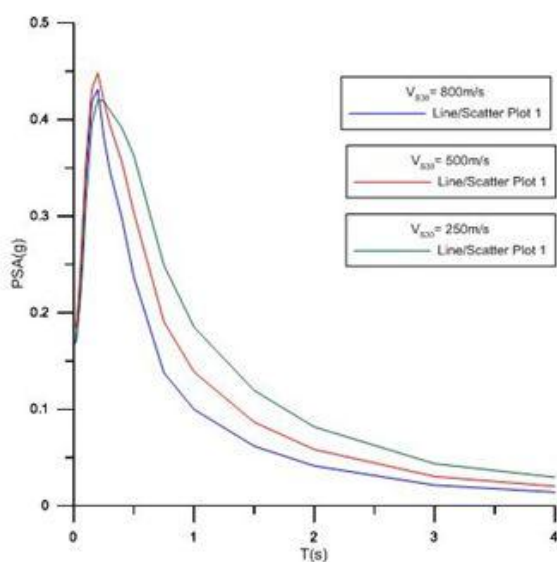
- Αντικύρα

Χωρίς κατευθυντικότηταΧωρίς τυπική απόκλισηΜε τυπική απόκλισηΜε κατευθυντικότηταΧωρίς τυπική απόκλισηΜε τυπική απόκλιση

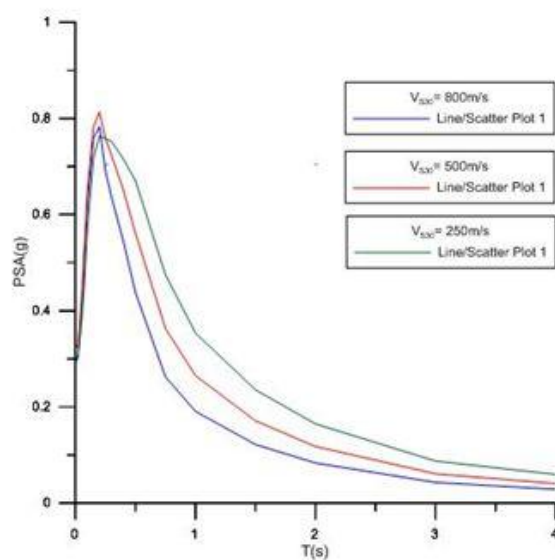
- Κυριάκι

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση

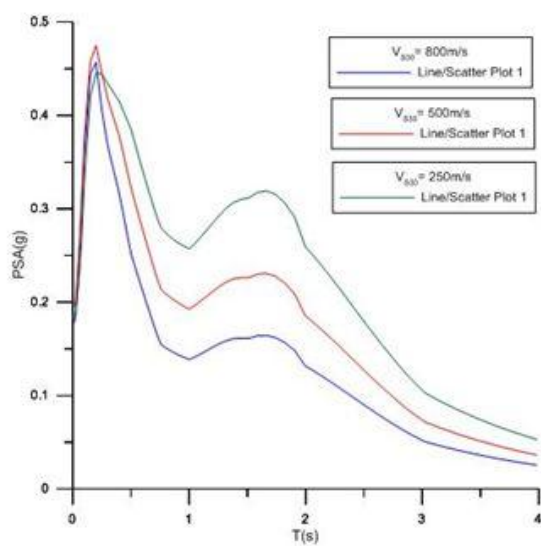


Με τυπική απόκλιση

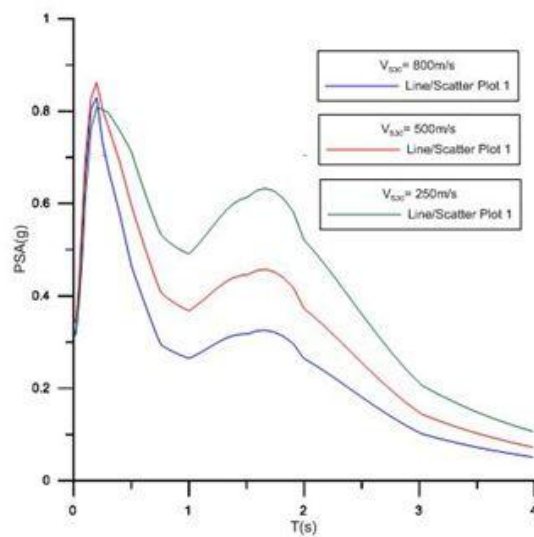


Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



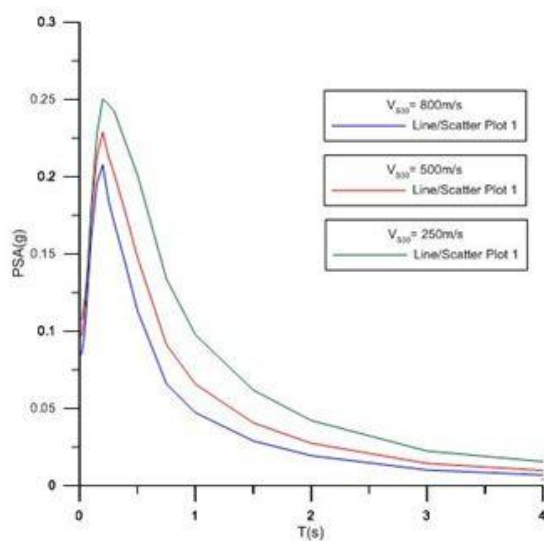
Με τυπική απόκλιση



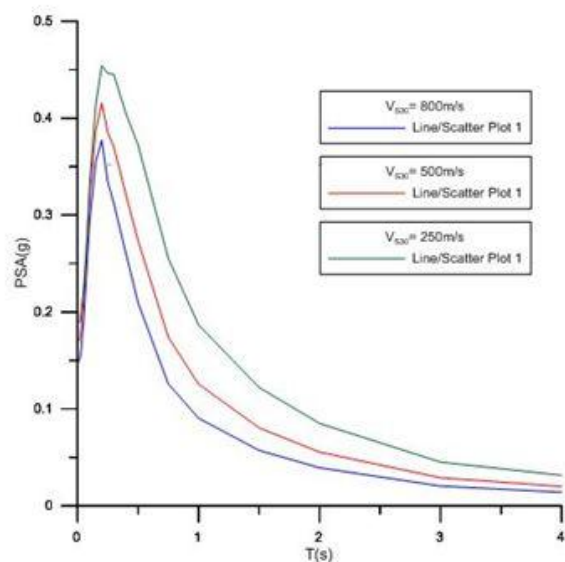
• Δαύλεια

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση

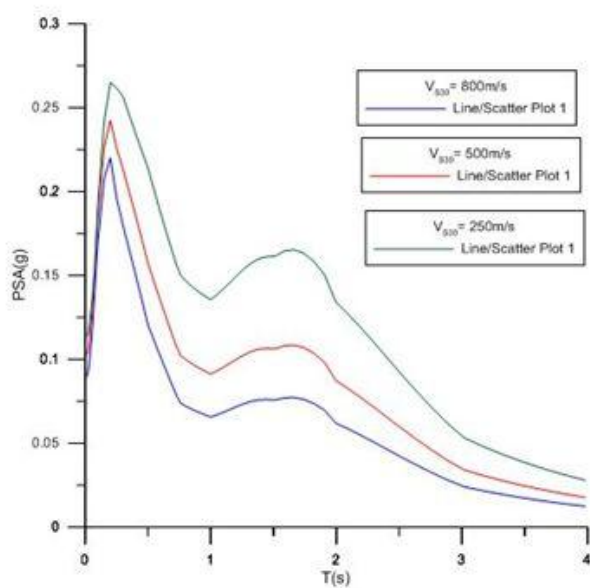


Με τυπική απόκλιση

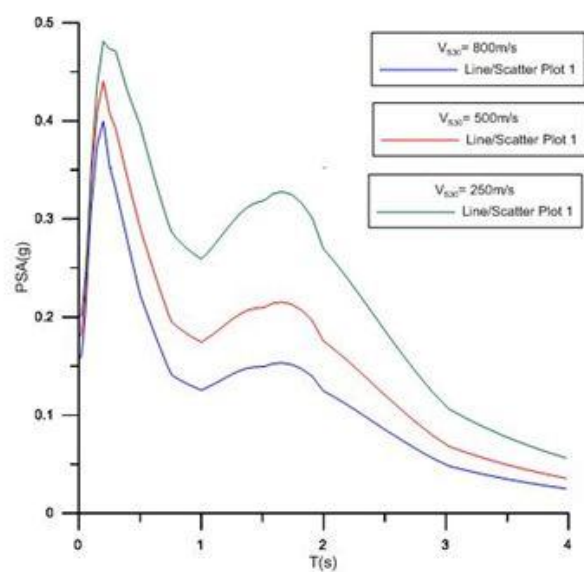


Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



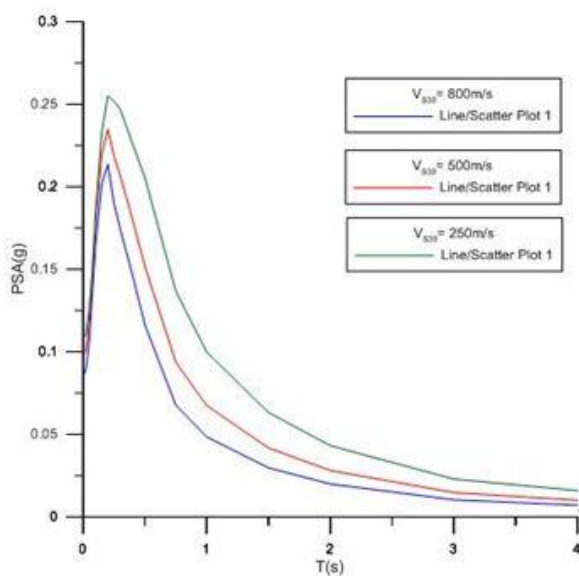
Με τυπική απόκλιση



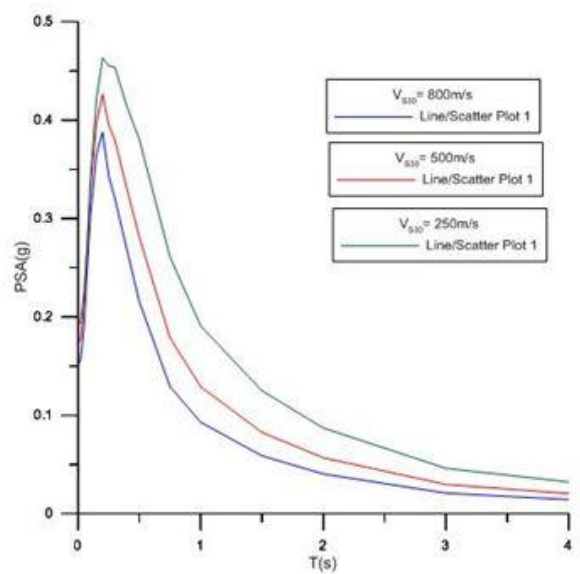
- Χαίρωνα

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση

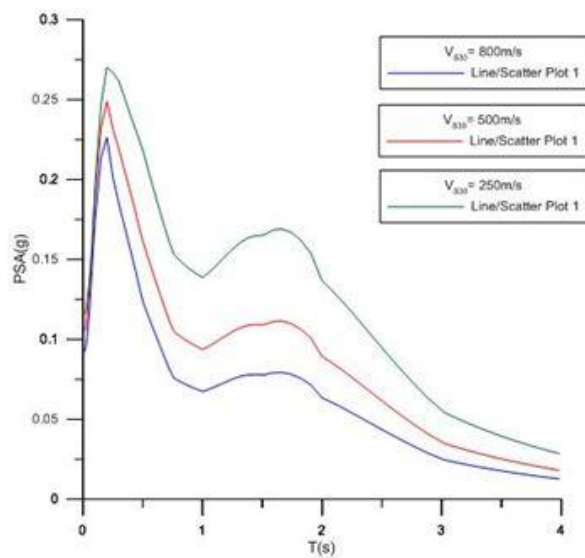


Με τυπική απόκλιση

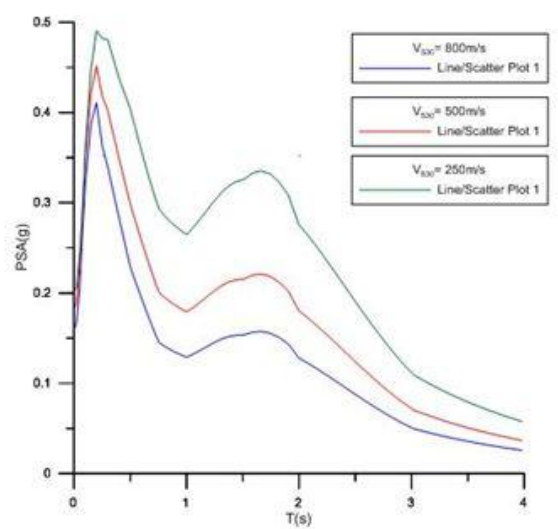


Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



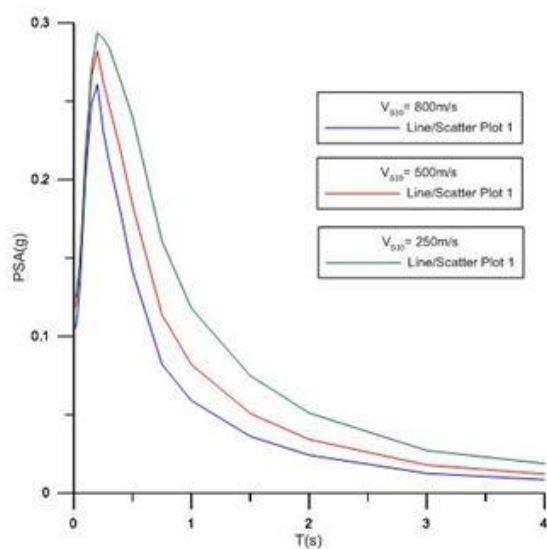
Με τυπική απόκλιση



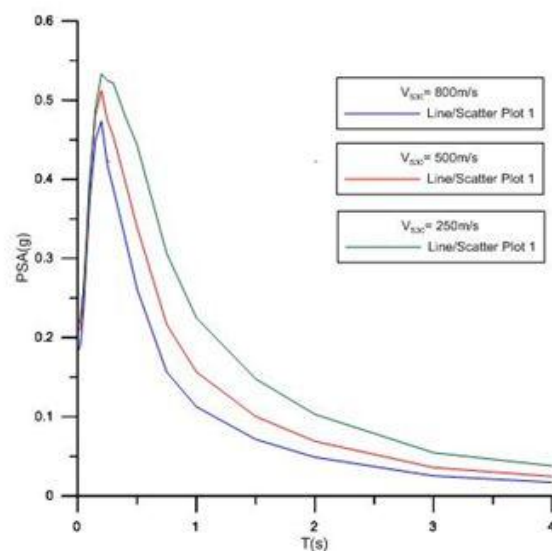
- Λιβαδειά

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση

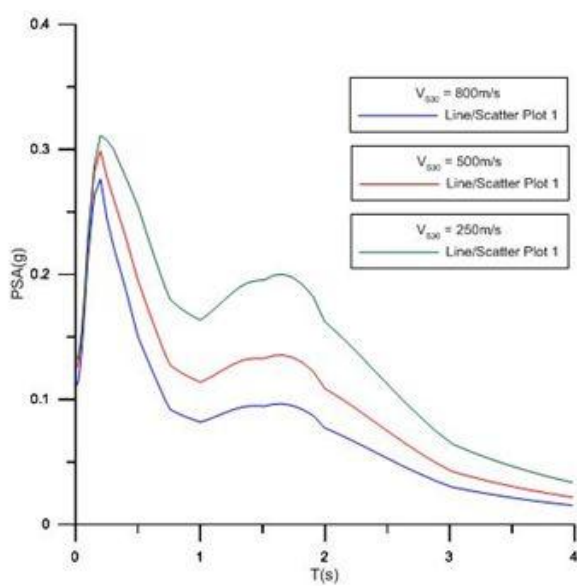


Με τυπική απόκλιση

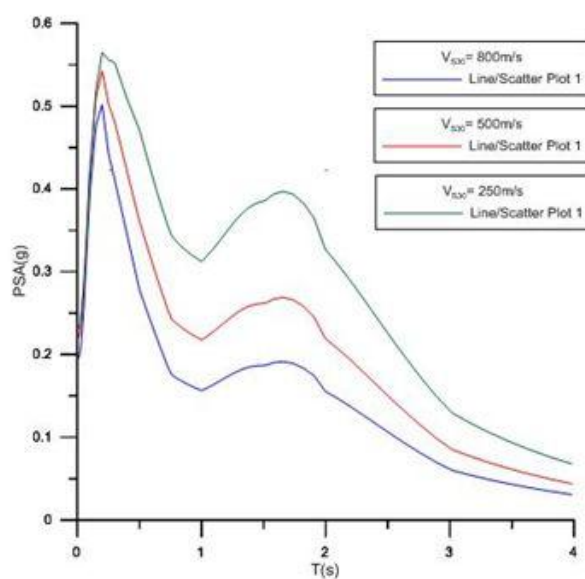


Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



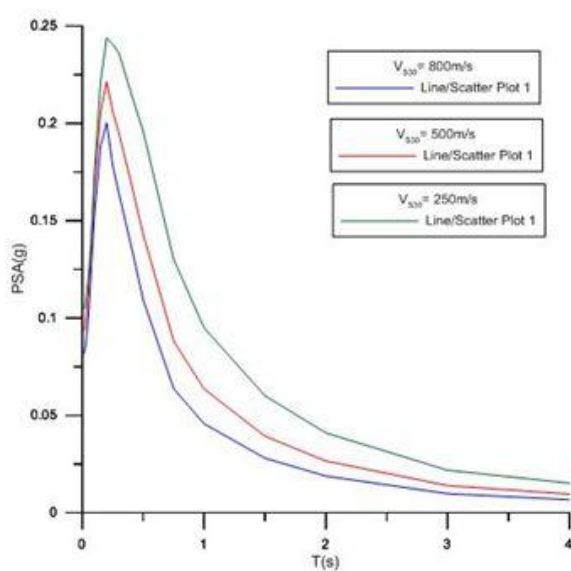
Με τυπική απόκλιση



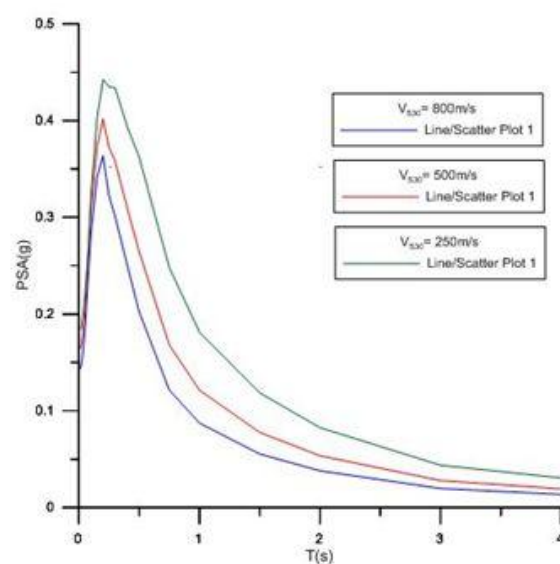
- Προσέλιο

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση

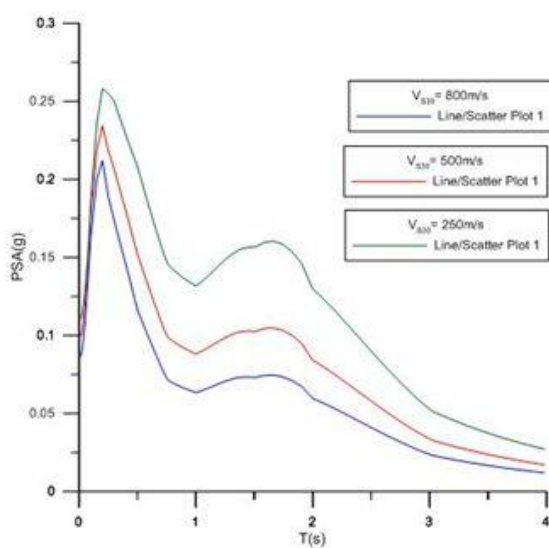


Με τυπική απόκλιση

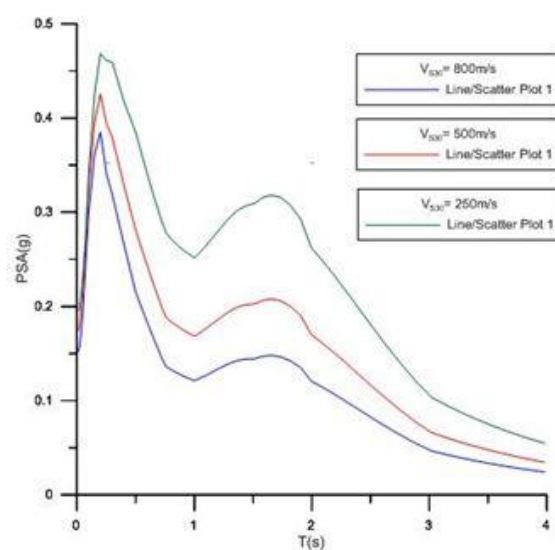


Με κατευθυντικότητα

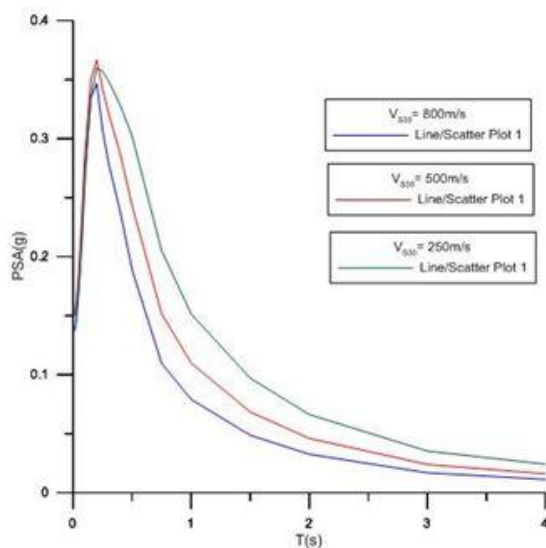
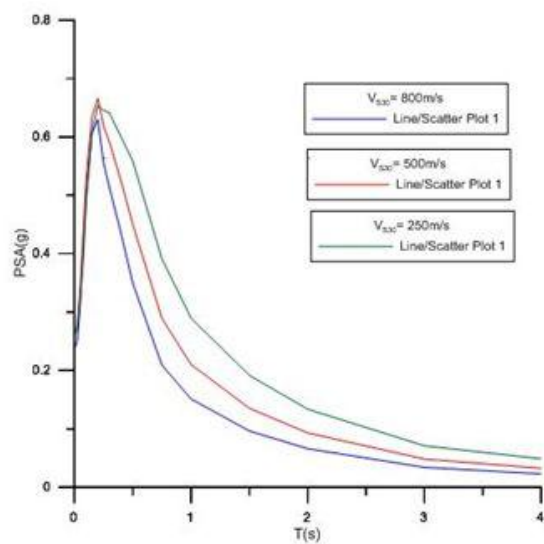
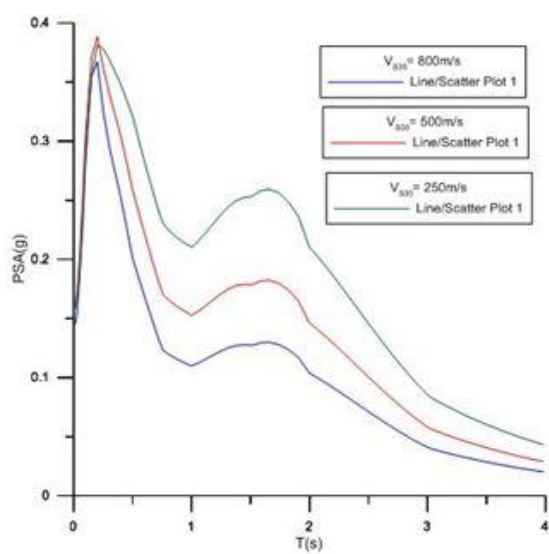
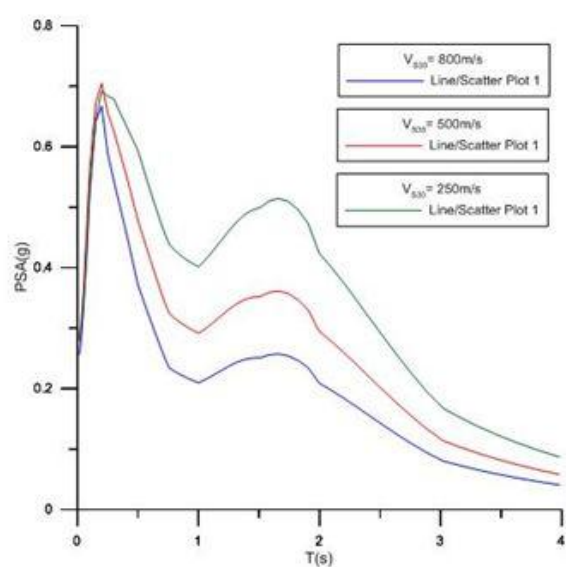
Χωρίς τυπική απόκλιση



Με τυπική απόκλιση



- Κορώνεια

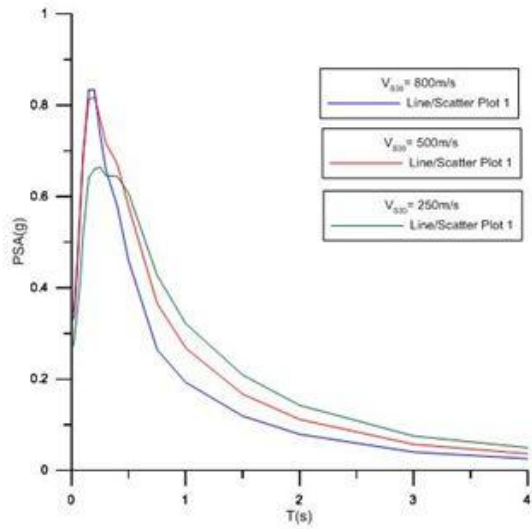
Χωρίς κατευθυντικότηταΧωρίς τυπική απόκλισηΜε τυπική απόκλισηΜε κατευθυντικότηταΧωρίς τυπική απόκλισηΜε τυπική απόκλιση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

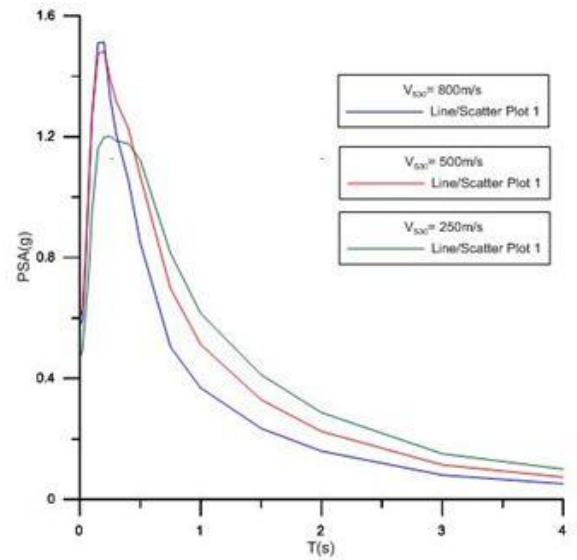
- Άσκη

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση

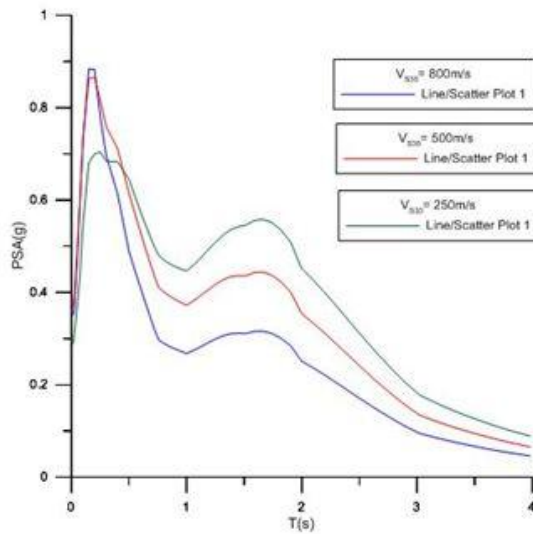


Με τυπική απόκλιση

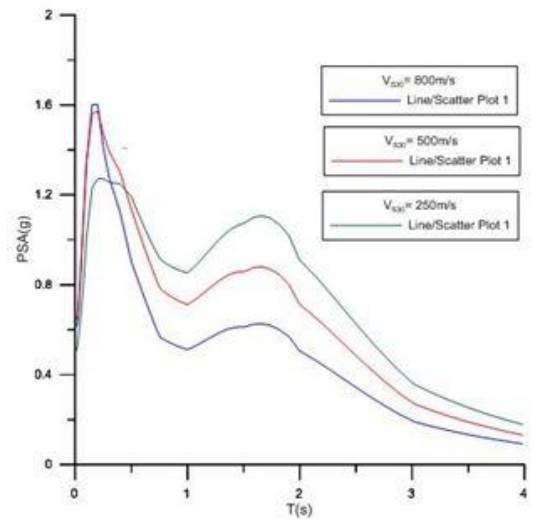


Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



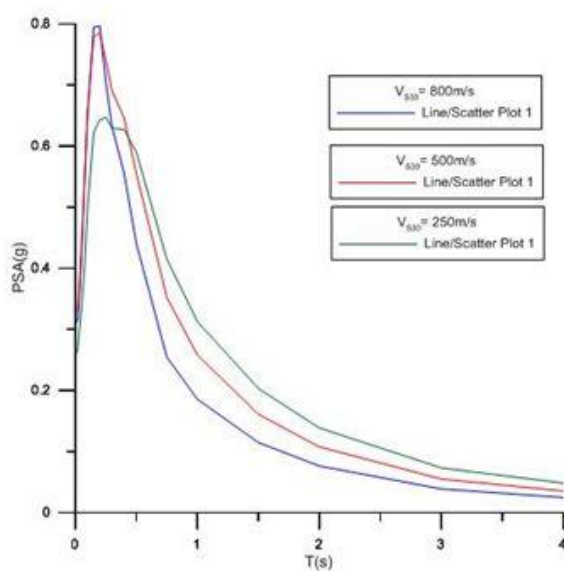
Με τυπική απόκλιση



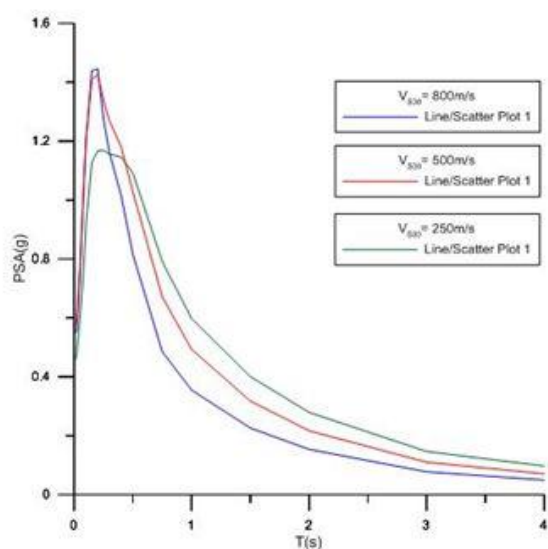
- Βάγια

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση

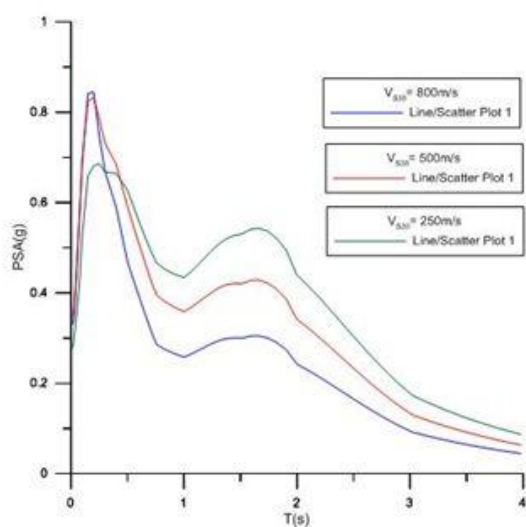


Με τυπική απόκλιση

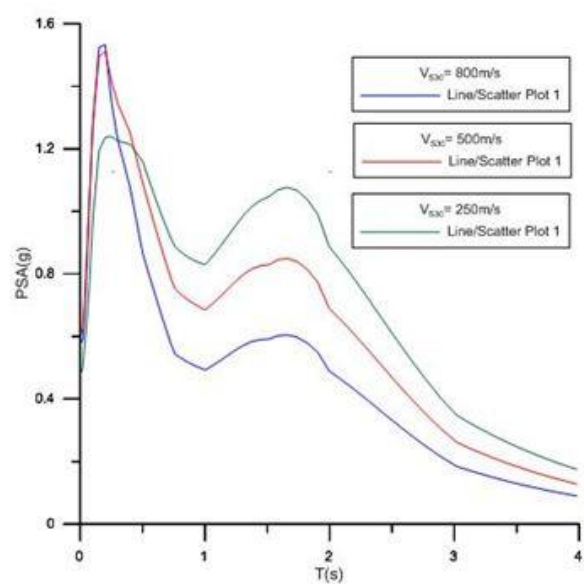


Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



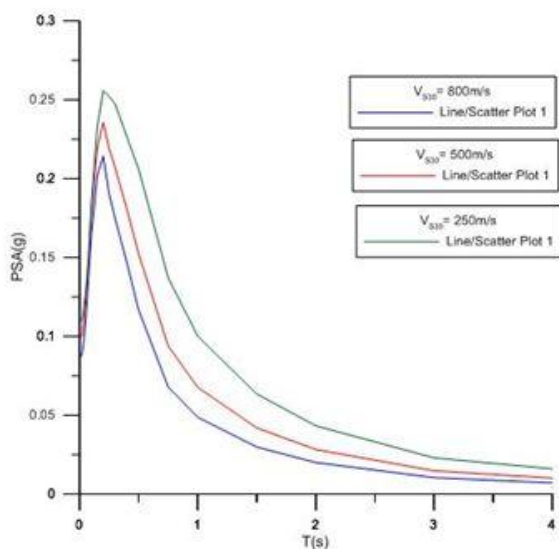
Με τυπική απόκλιση



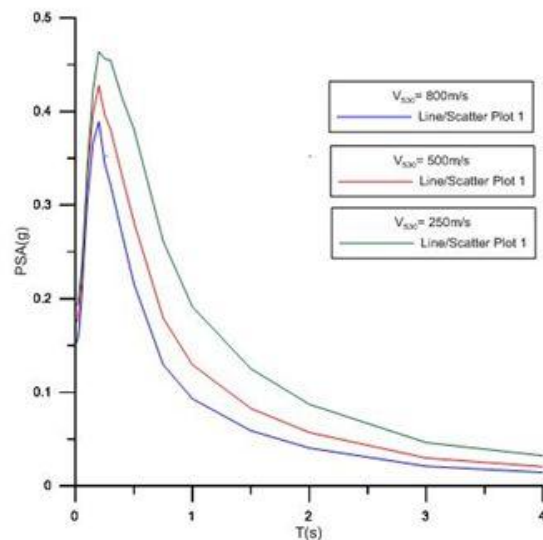
- Ορχομενός

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση

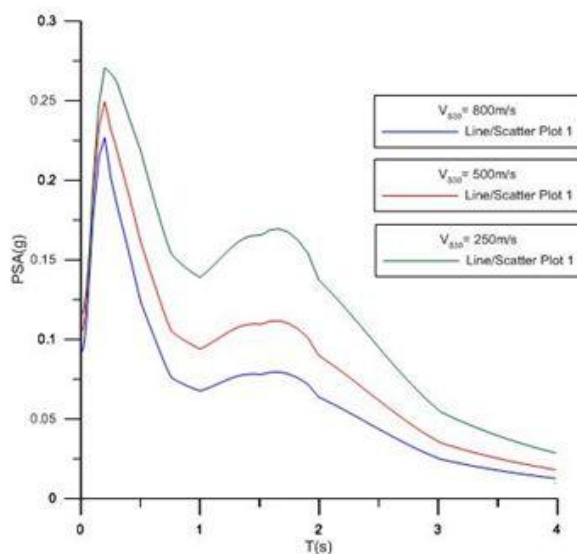


Με τυπική απόκλιση

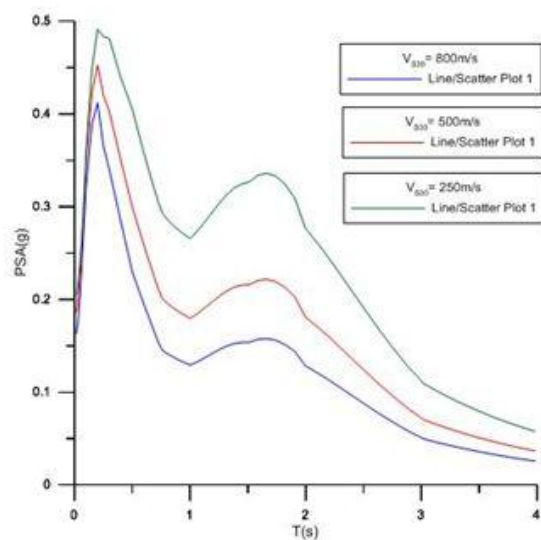


Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



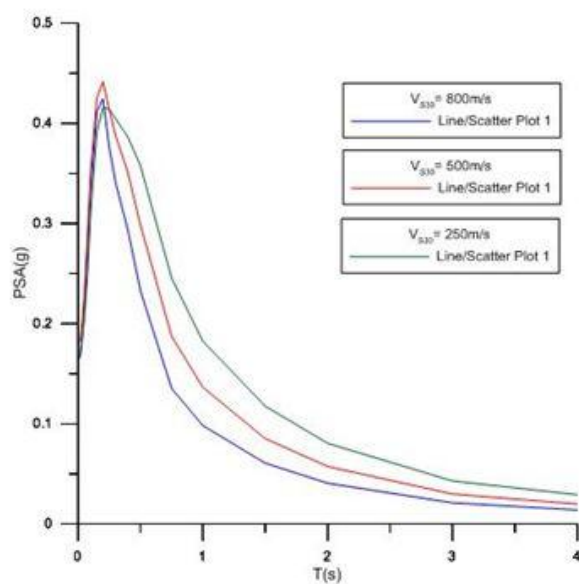
Με τυπική απόκλιση



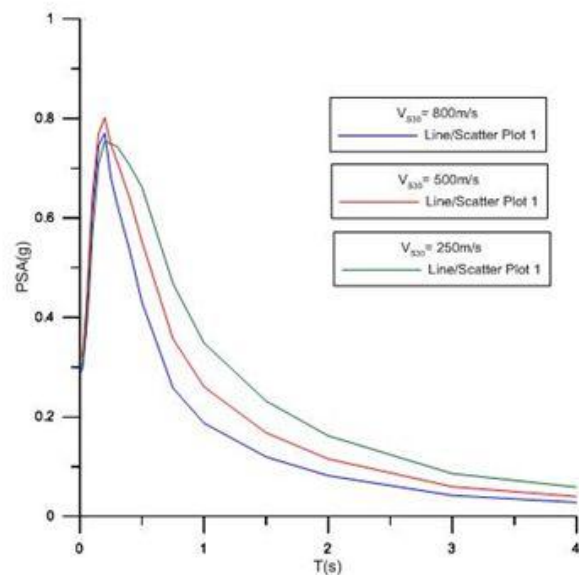
- Αλίαρτος

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση

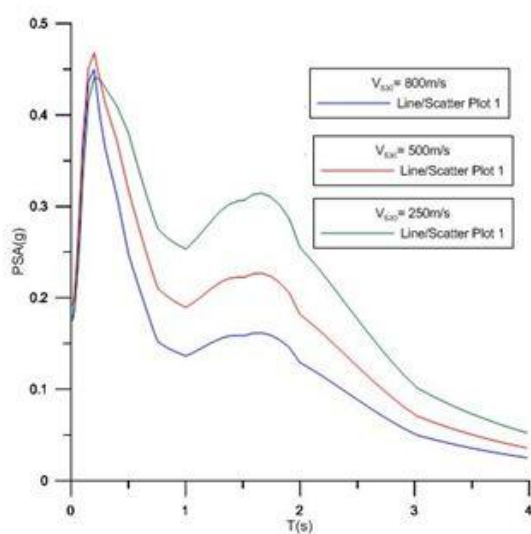


Με τυπική απόκλιση

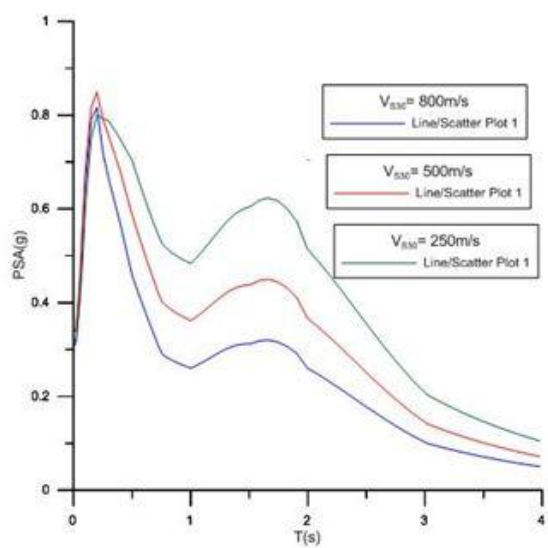


Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



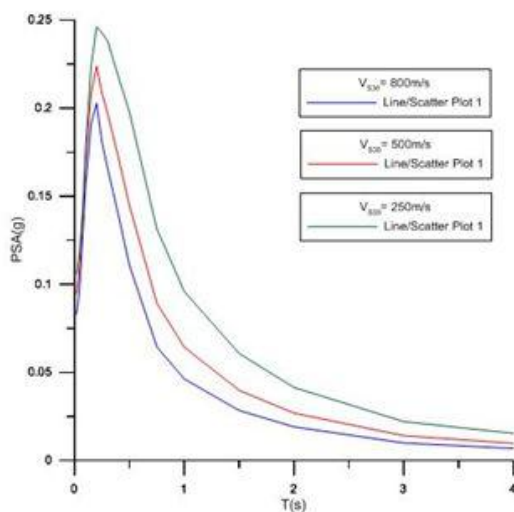
Με τυπική απόκλιση



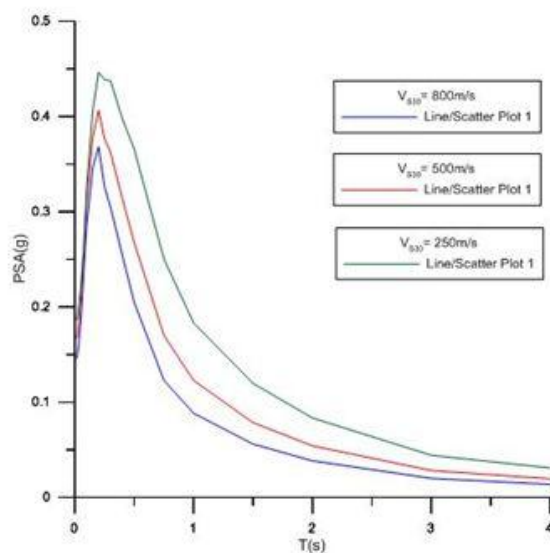
- Παύλος

Χωρίς κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση

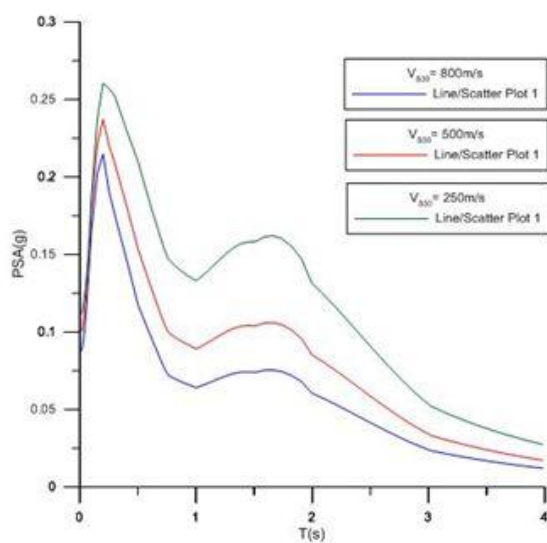


Με τυπική απόκλιση

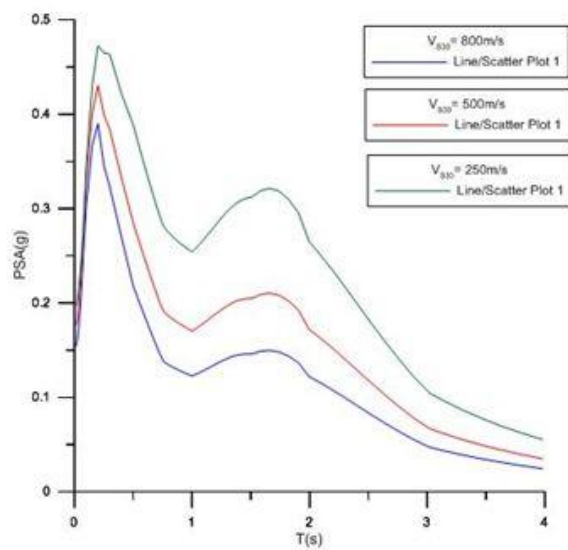


Με κατευθυντικότητα

Χωρίς τυπική απόκλιση



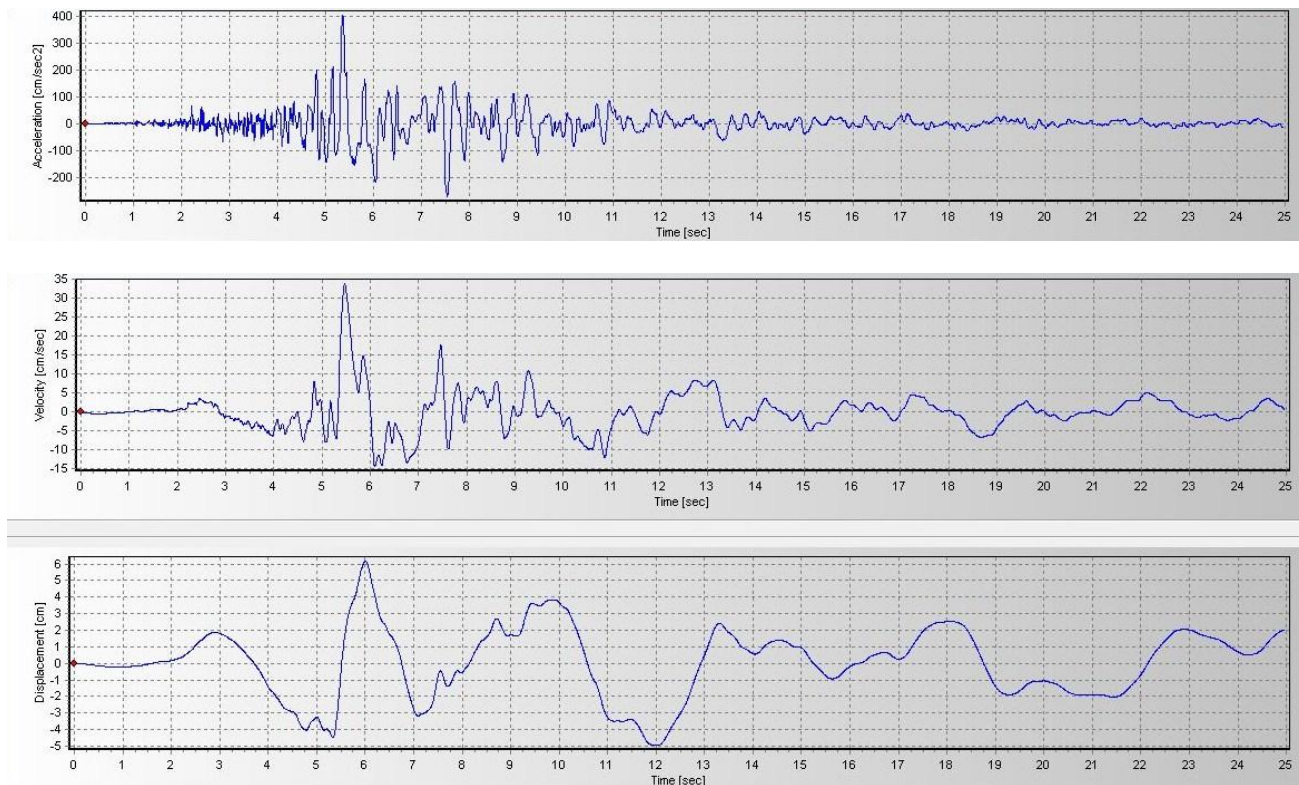
Με τυπική απόκλιση



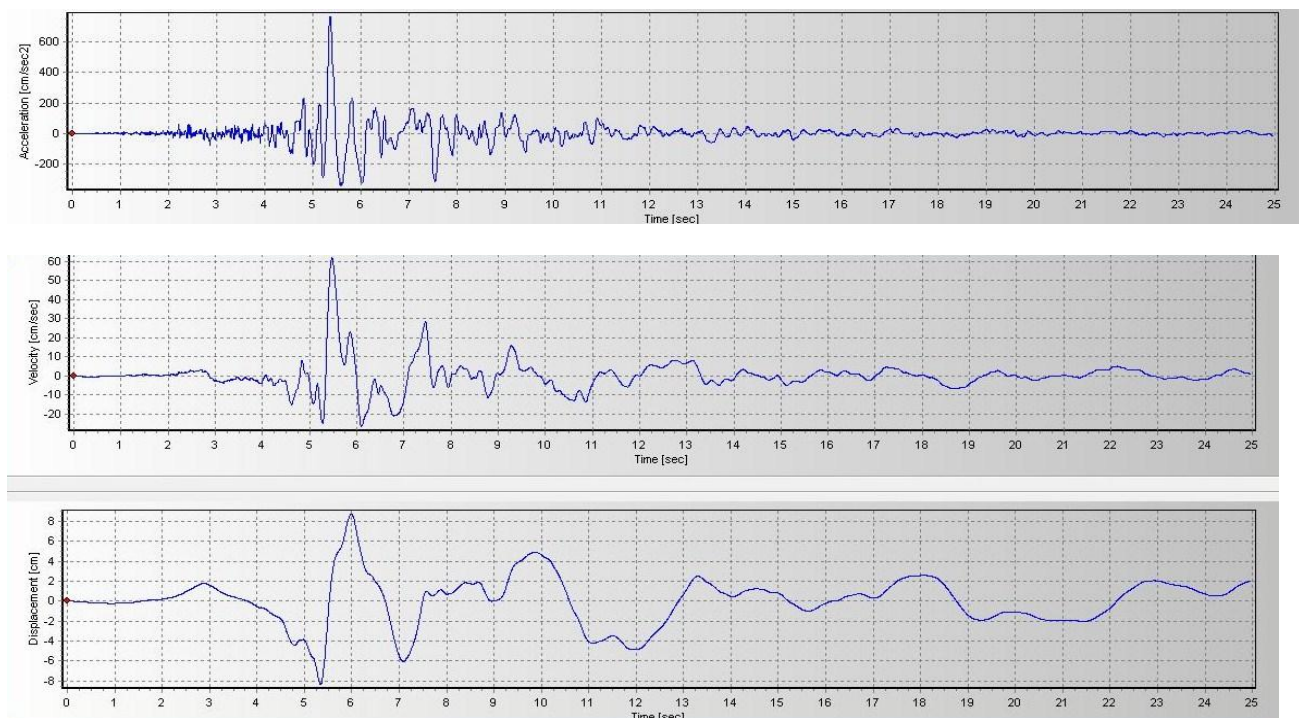
Τεχνητές χρονοϊστορίες εδαφικής κίνησης-χωρίς παλμό κατευθυντικότητας

Έδαφος Α

- Απόσταση 0 km:



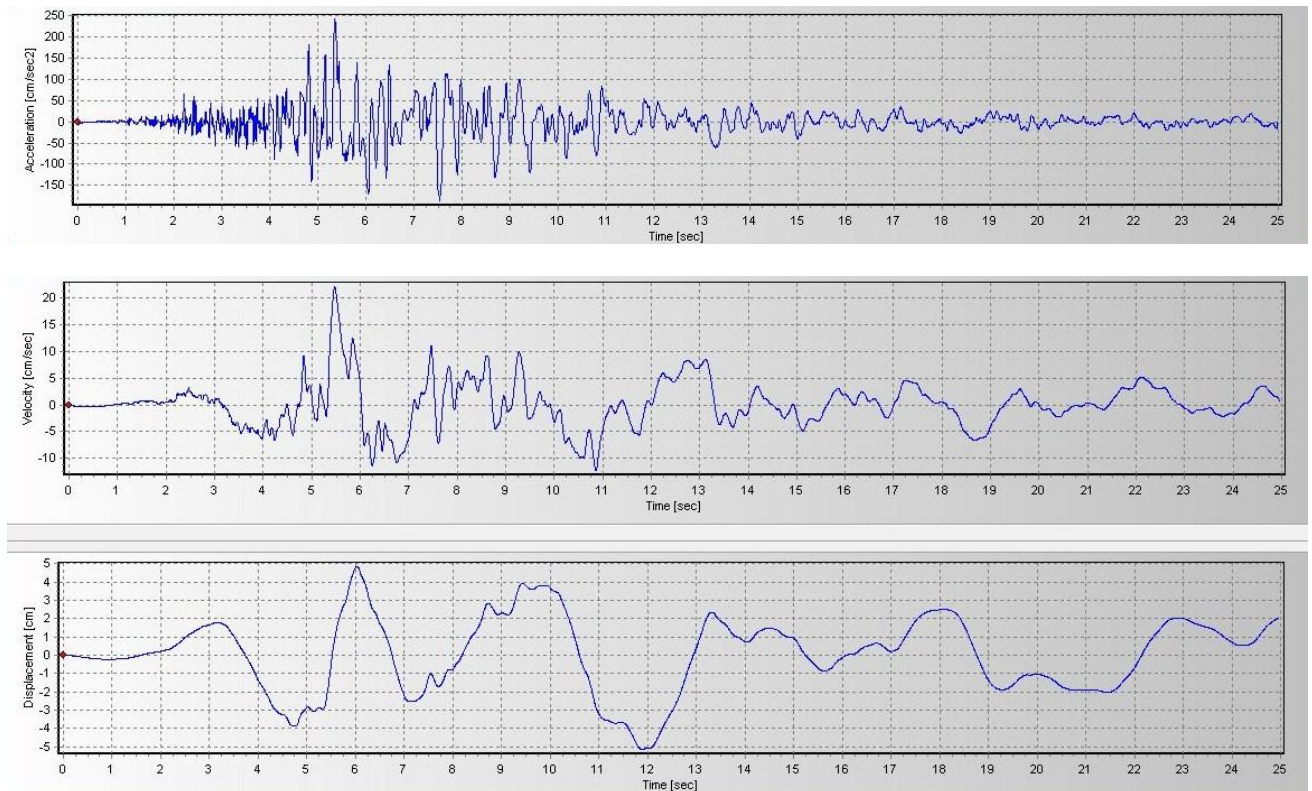
Χωρίς τυπική απόκλιση



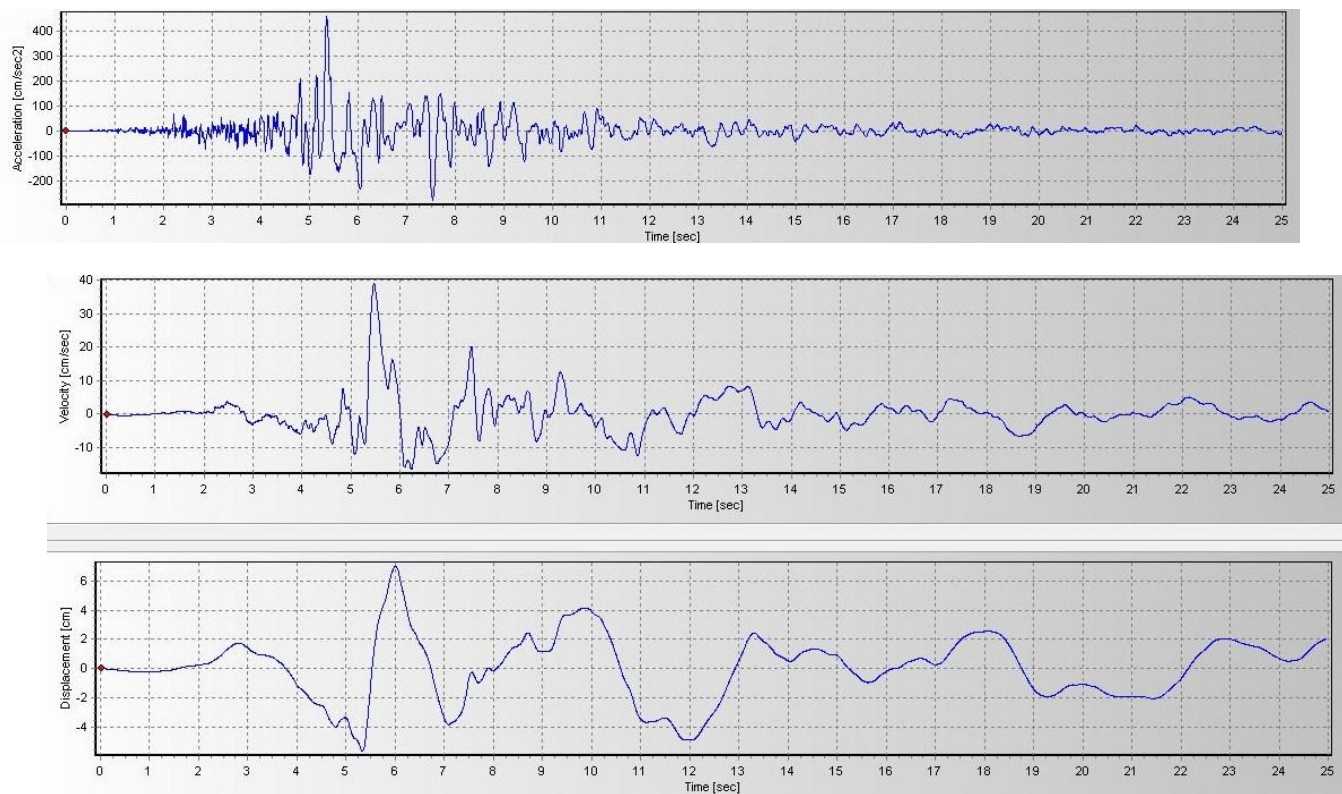
Με τυπική απόκλιση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- Απόσταση 5 km:



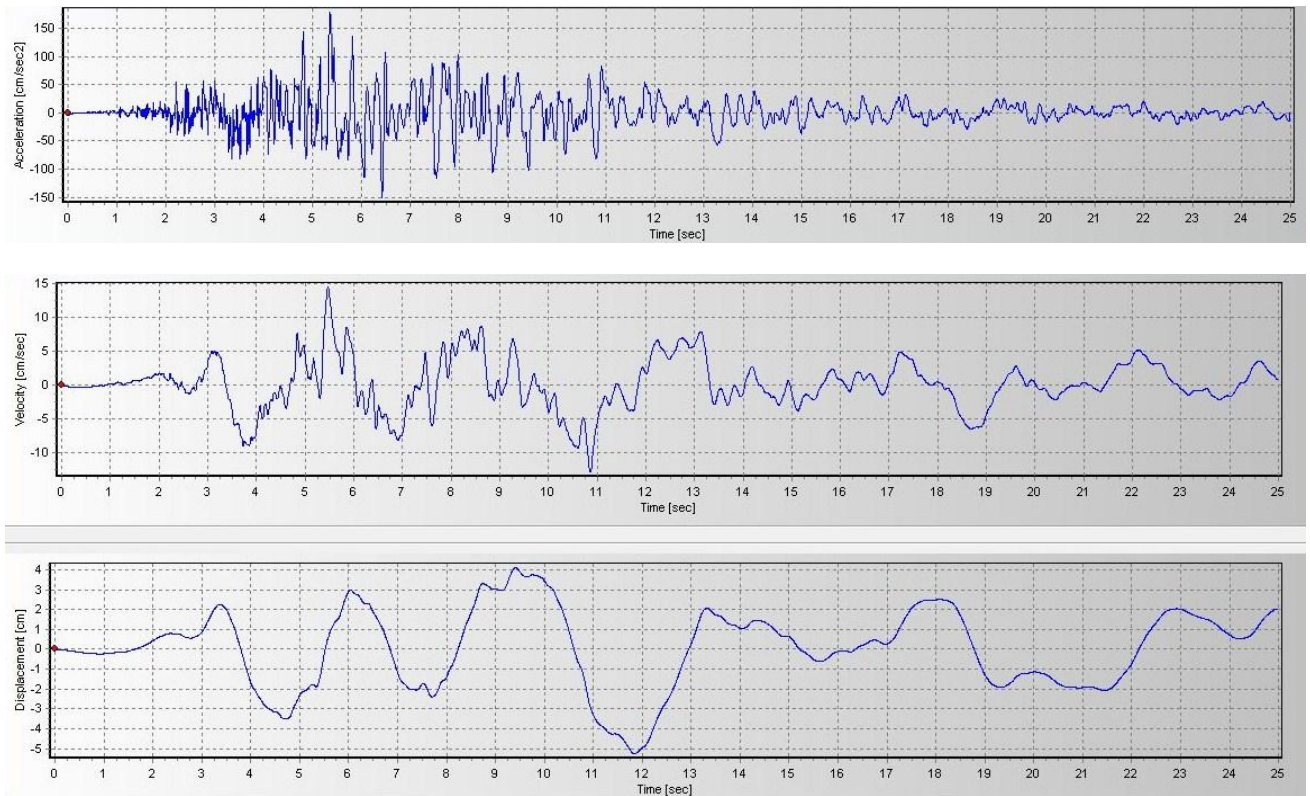
Χωρίς τυπική απόκλιση



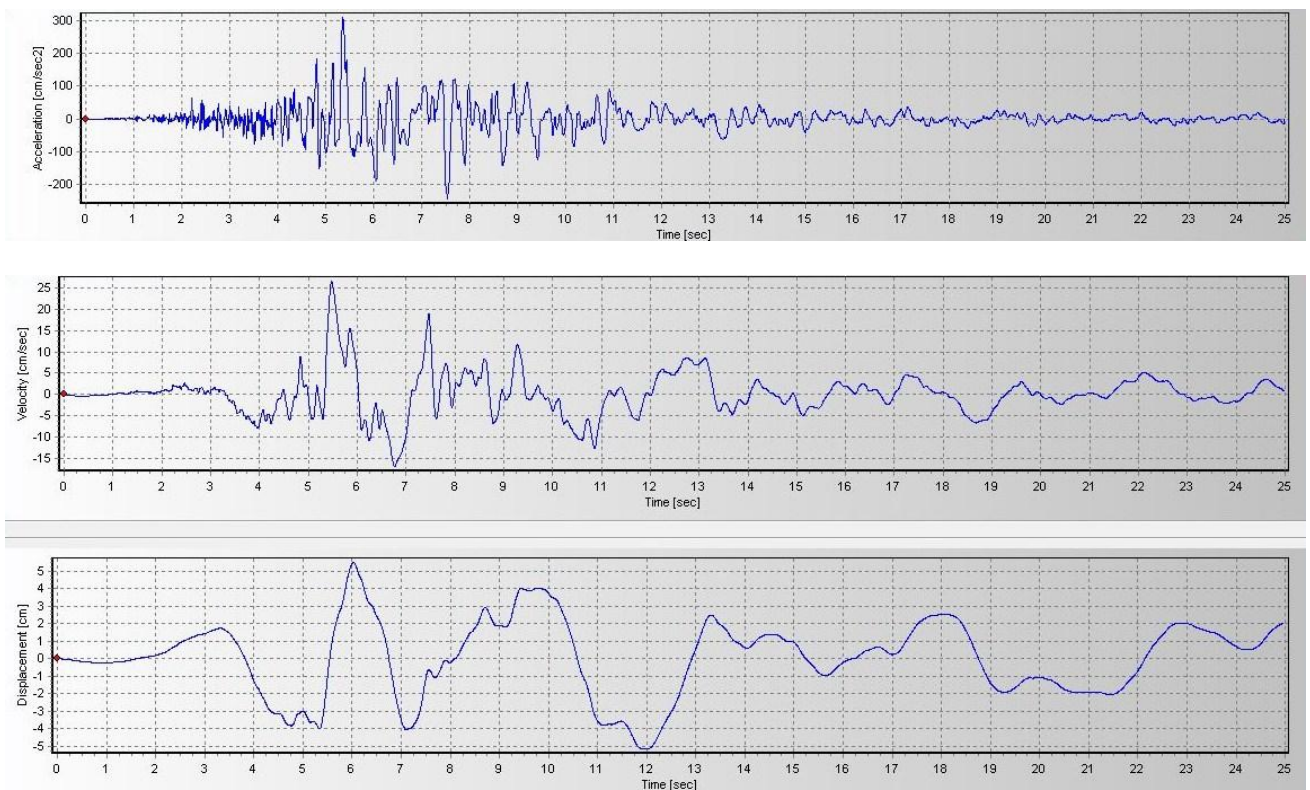
Με τυπική απόκλιση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- Απόσταση 10 km:



Χωρίς τυπική απόκλιση

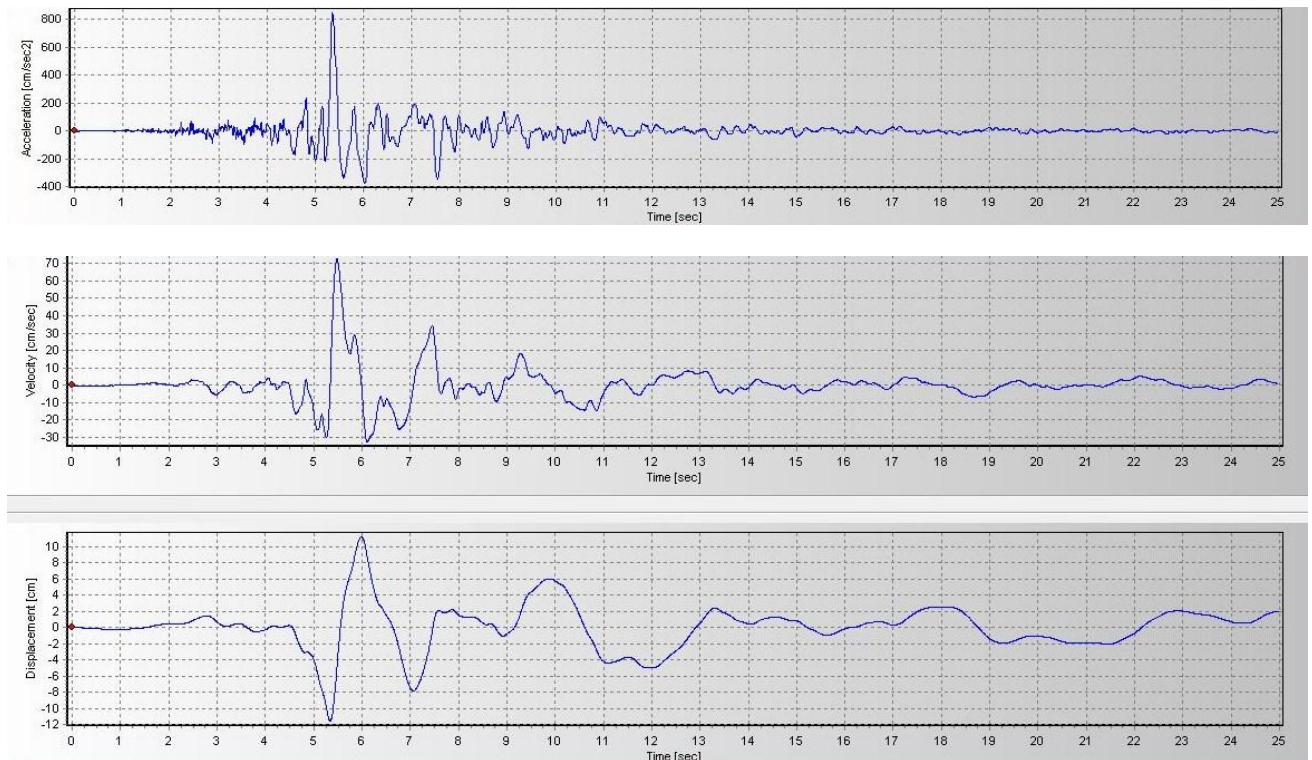


Με τυπική απόκλιση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Έδαφος Β

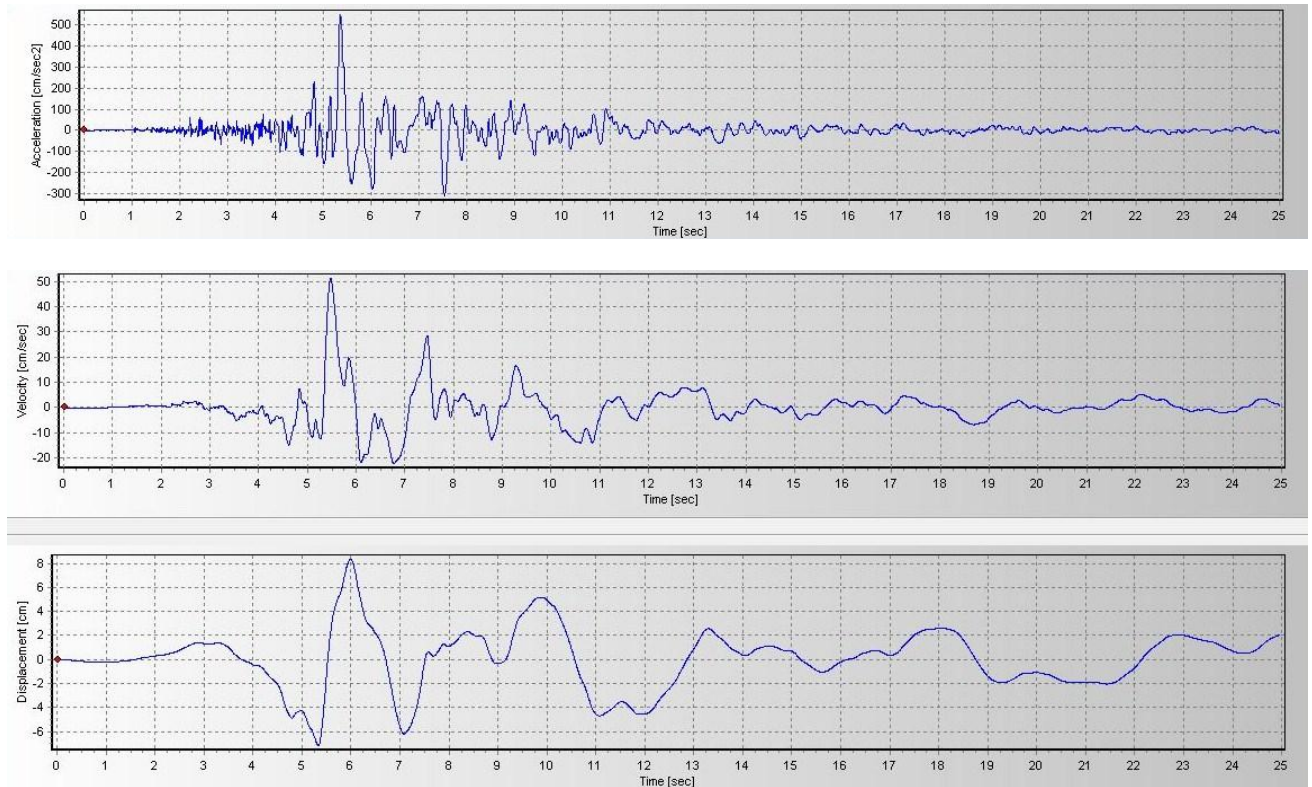
- Απόσταση 0 km:



Με τυπική απόκλιση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

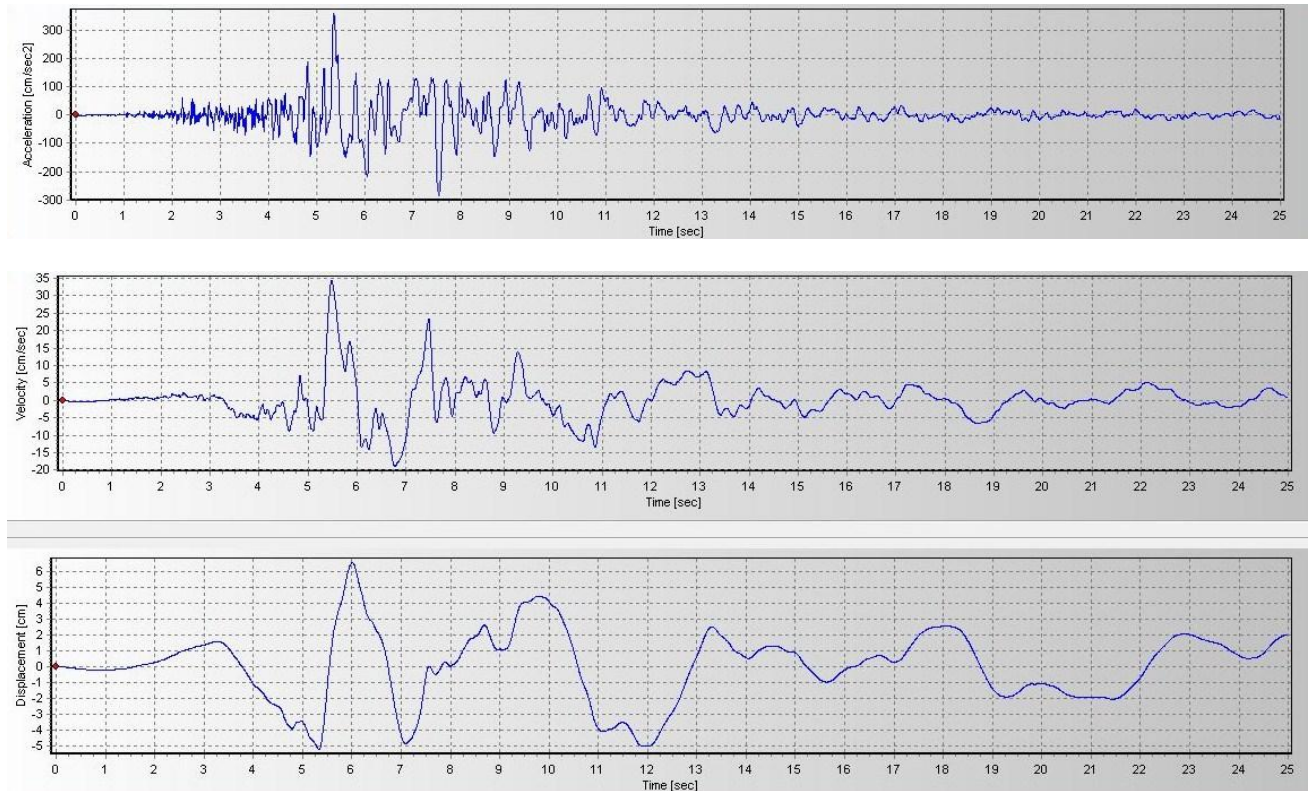
- Απόσταση 5 km:



Με τυπική απόκλιση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- Απόσταση 10 km:

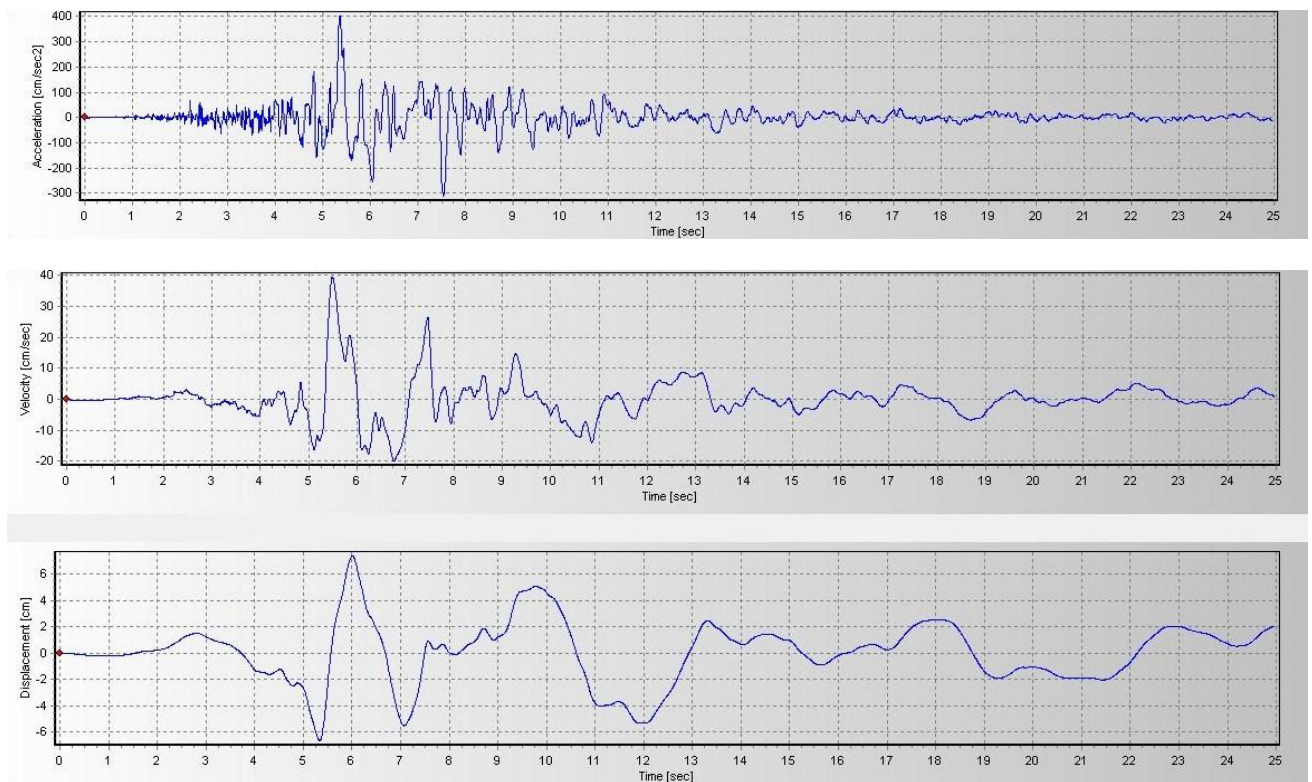


Με τυπική απόκλιση

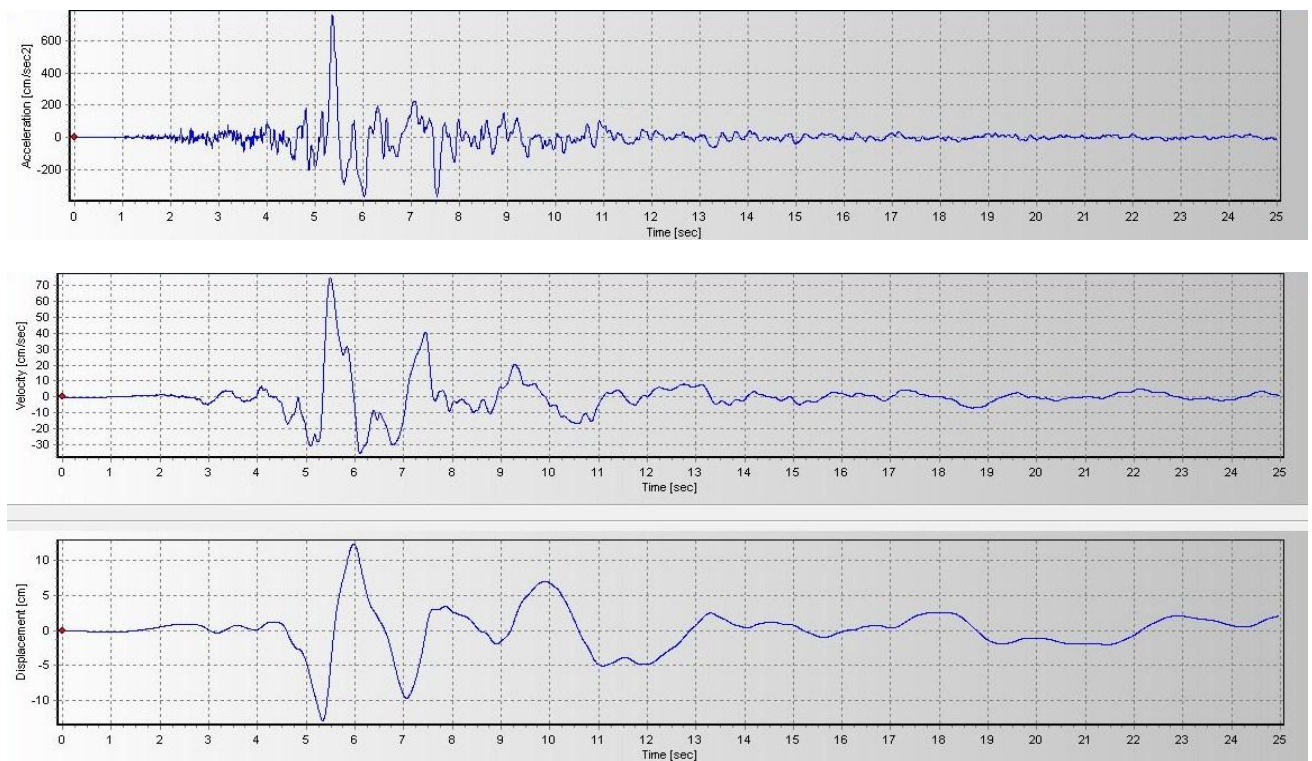
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Έδαφος C

- Απόσταση 0 km:



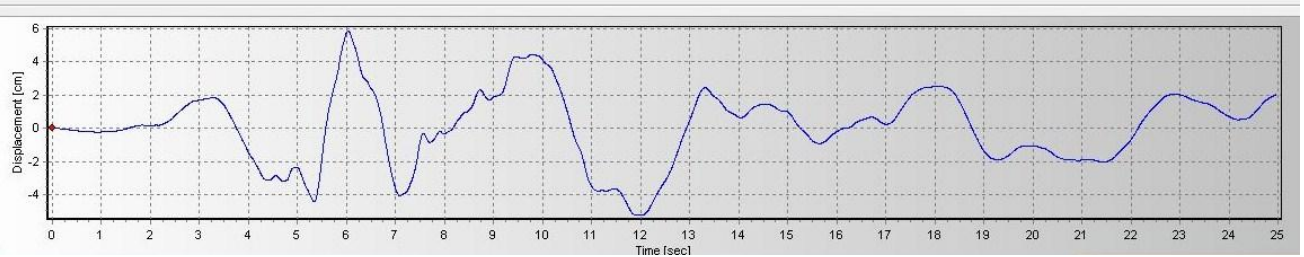
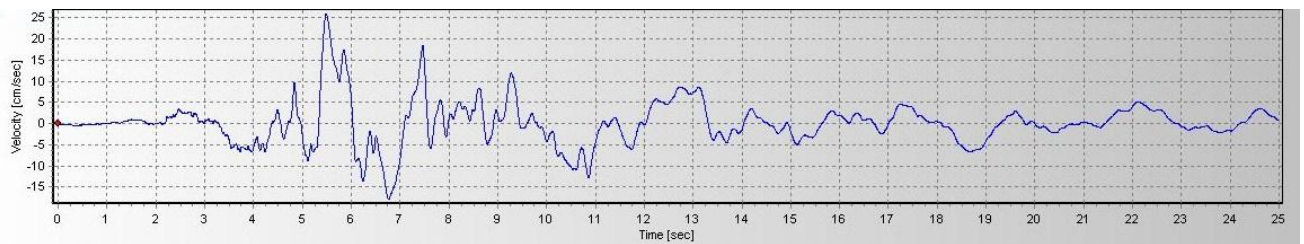
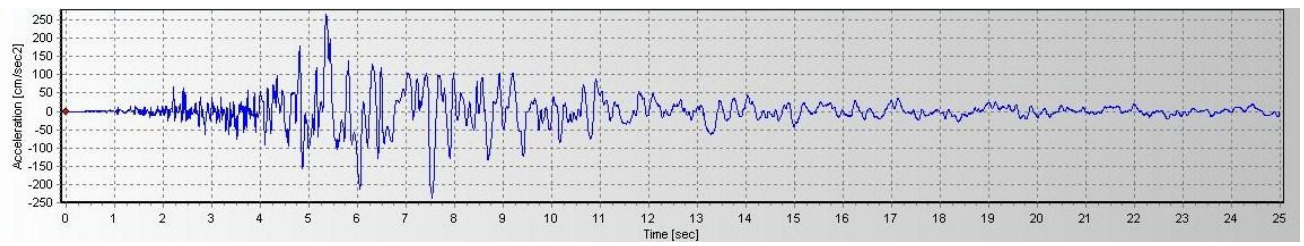
Χωρίς τυπική απόκλιση



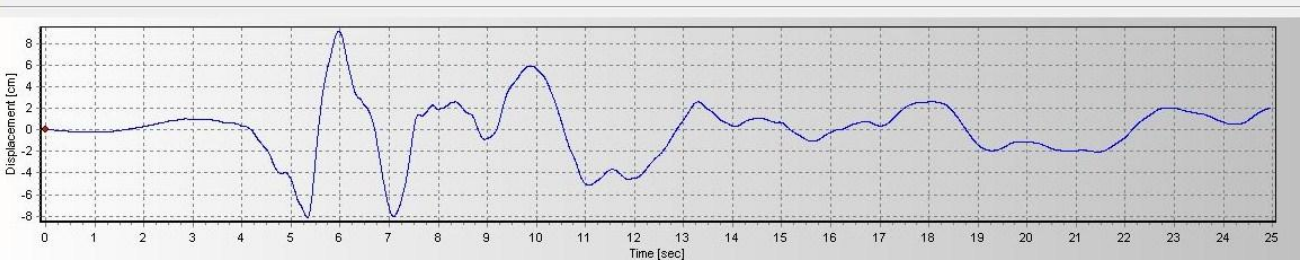
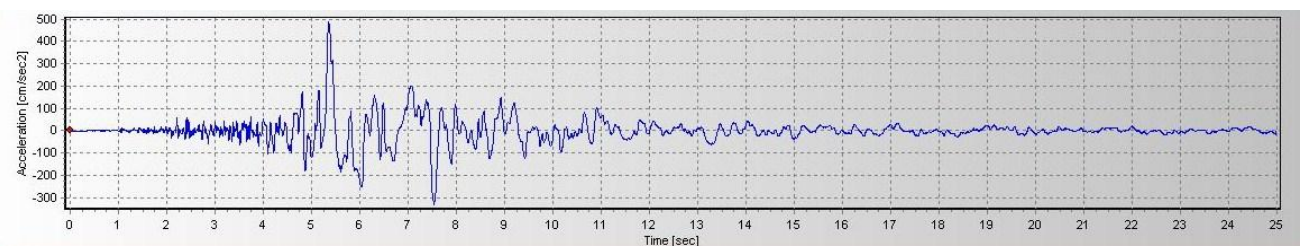
Με τυπική απόκλιση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- Απόσταση 5 km:



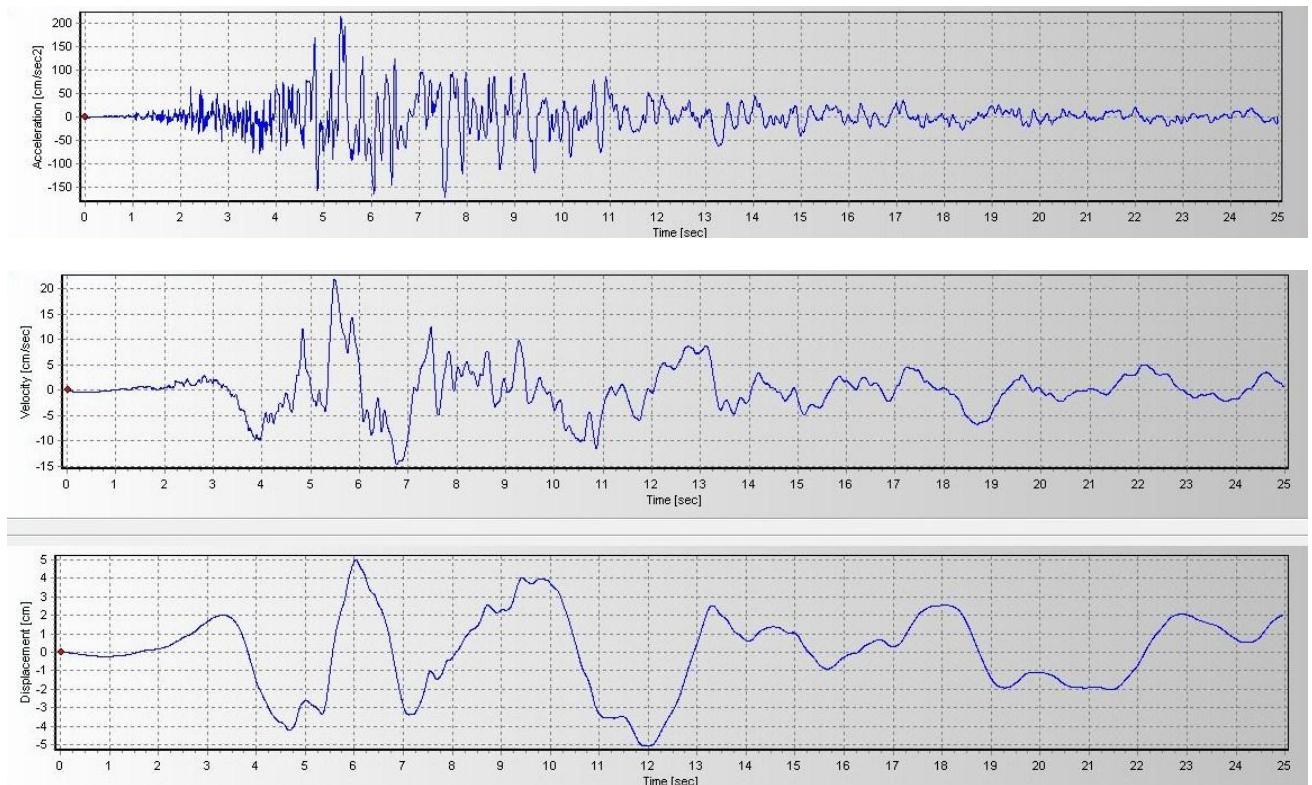
Χωρίς τυπική απόκλιση



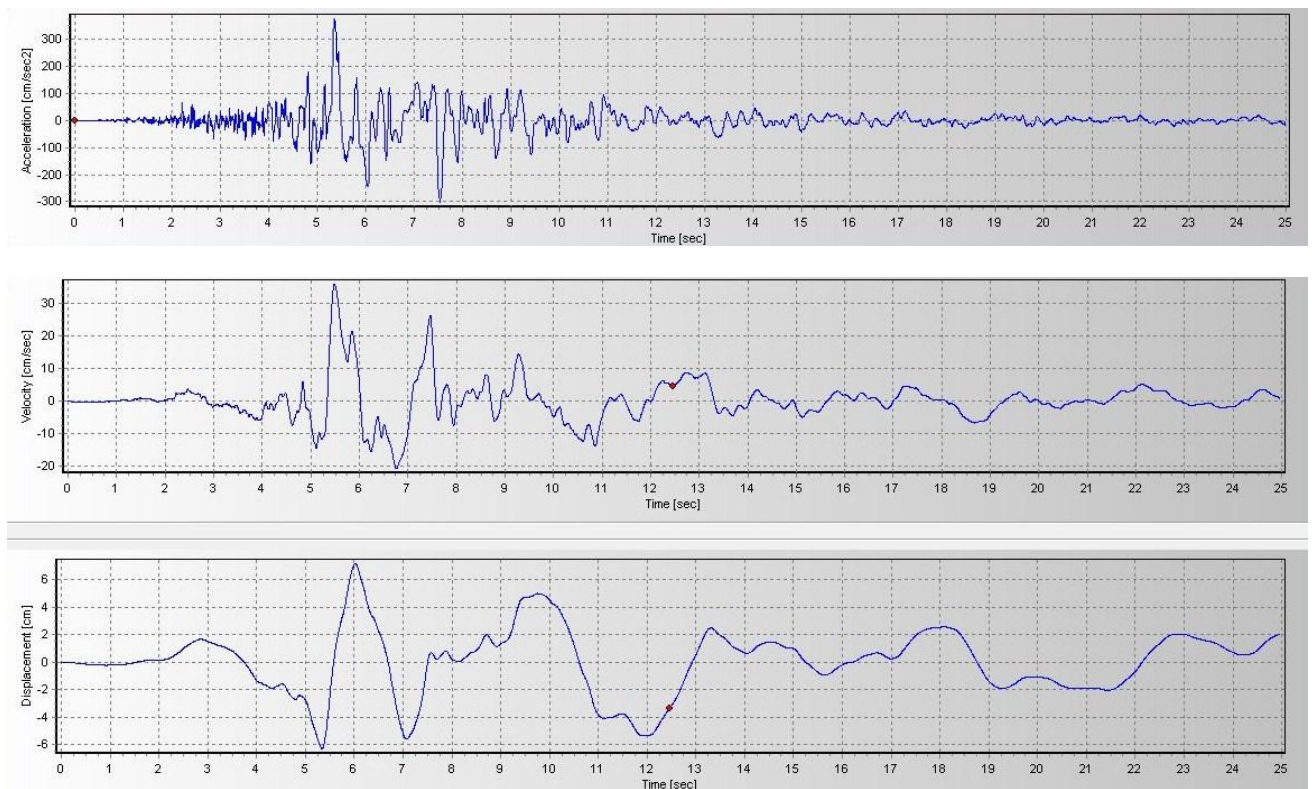
Με τυπική απόκλιση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- Απόσταση 10 km:



Χωρίς τυπική απόκλιση

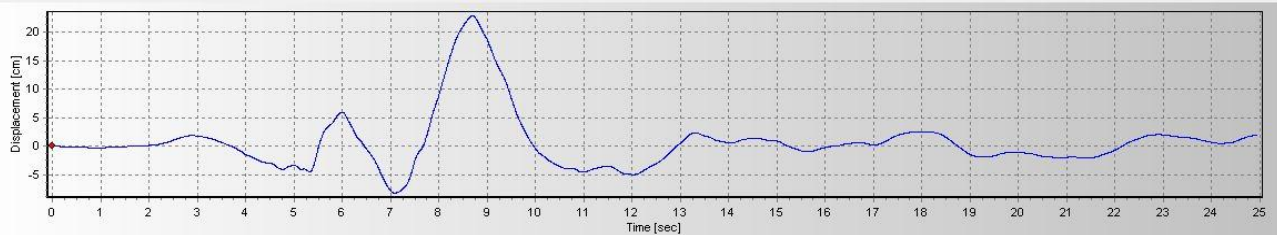
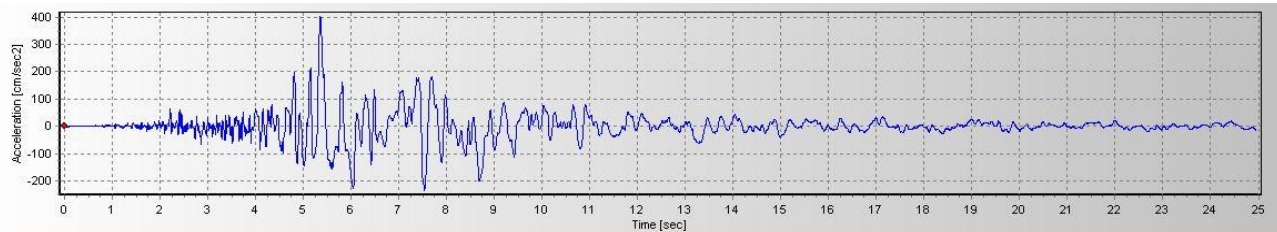


Με τυπική απόκλιση

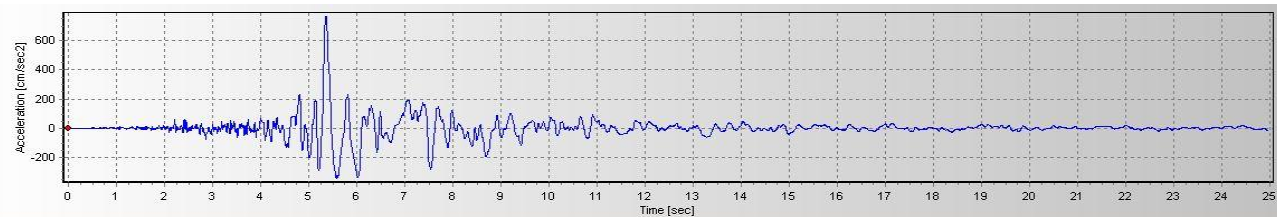
Τεχνητές χρονοϊστορίες εδαφικής κίνησης-με παλμό κατευθυντικότητας

Έδαφος Α

- Απόσταση 0 km:



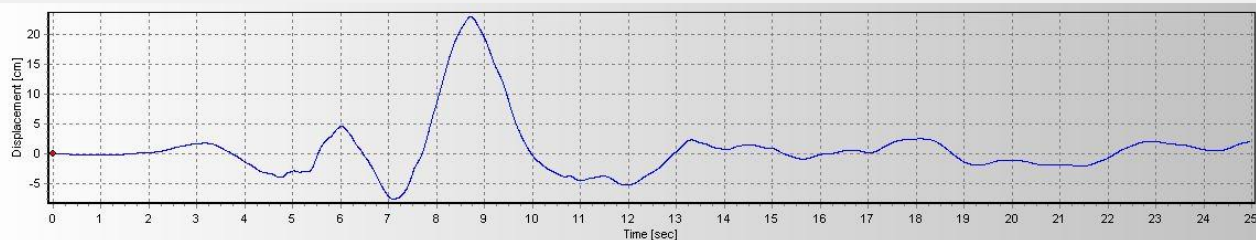
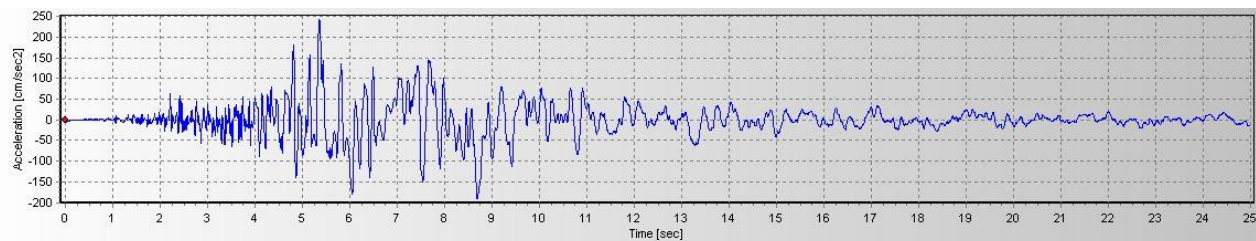
Χωρίς τυπική απόκλιση



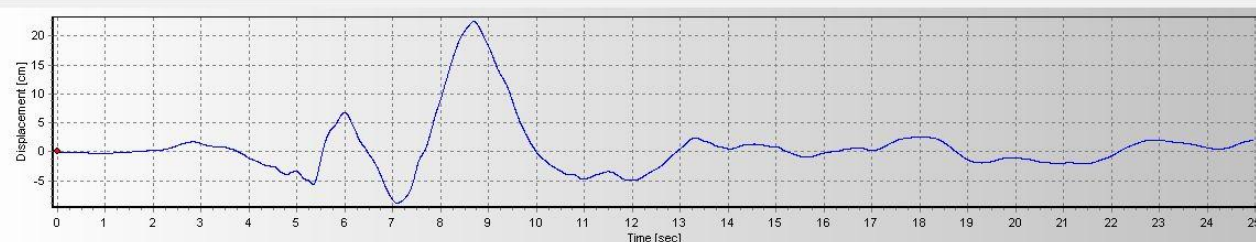
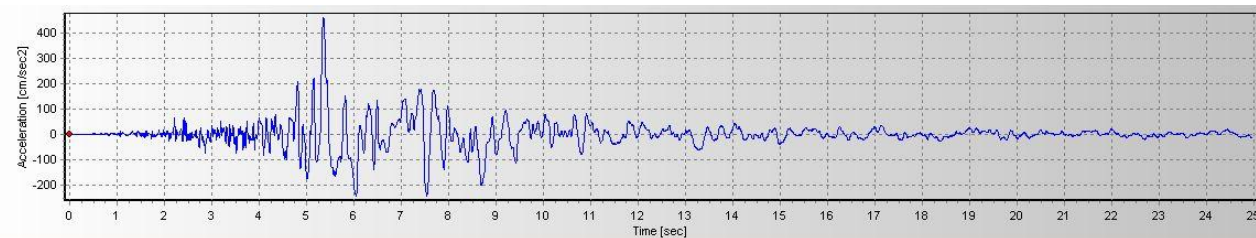
Με τυπική απόκλιση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- Απόσταση 5 km:



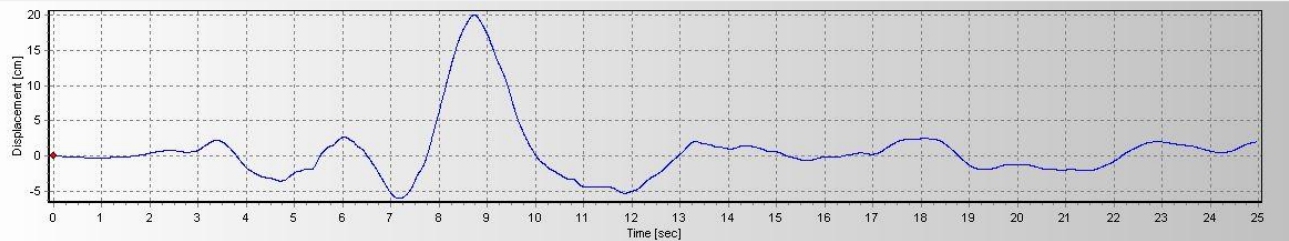
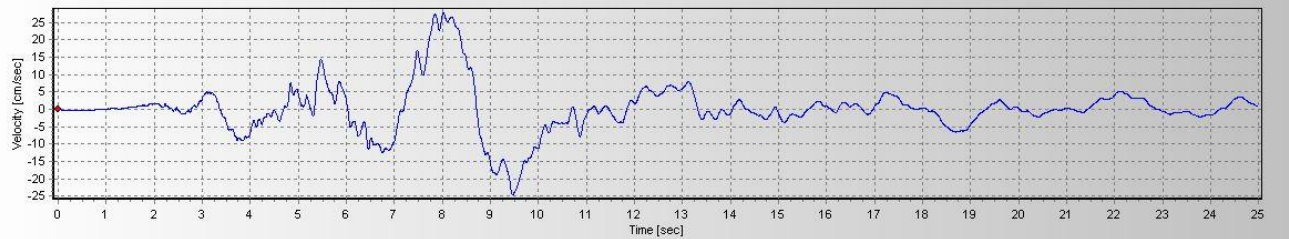
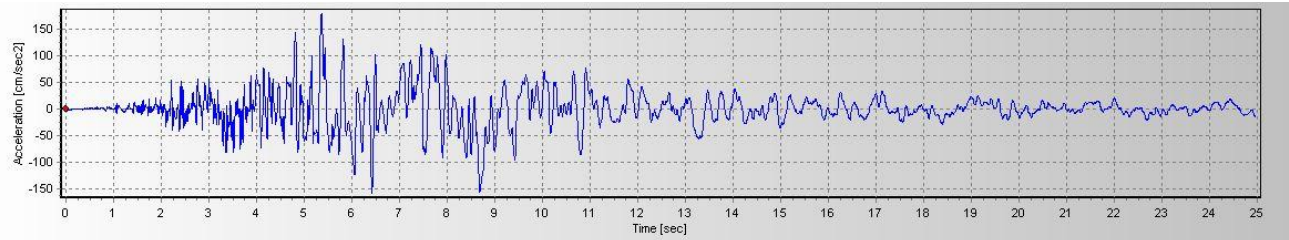
Χωρίς τυπική απόκλιση



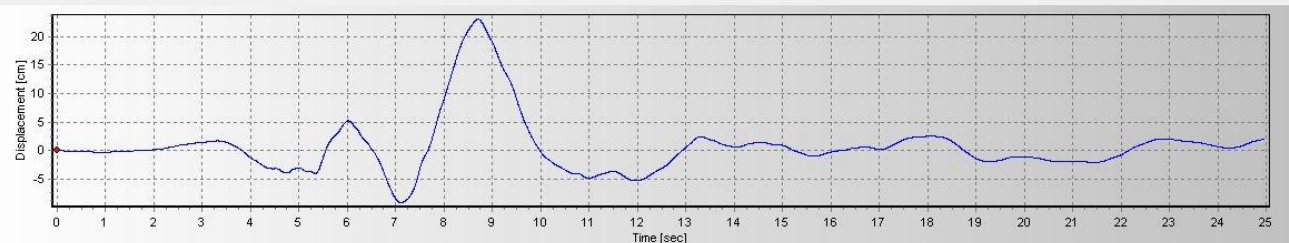
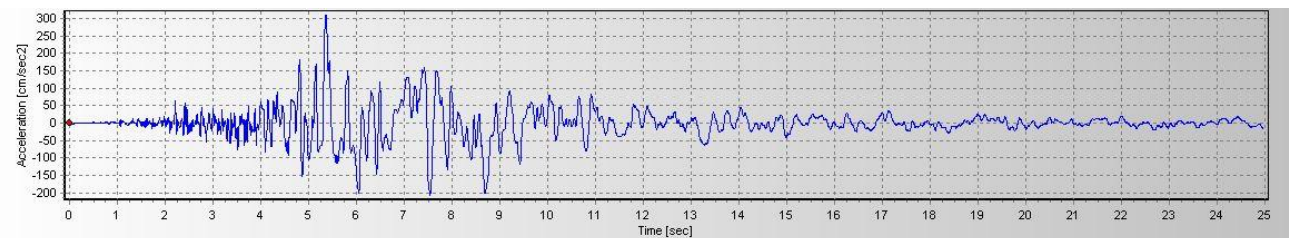
Με τυπική απόκλιση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- Απόσταση 10 km:



Χωρίς τυπική απόκλιση

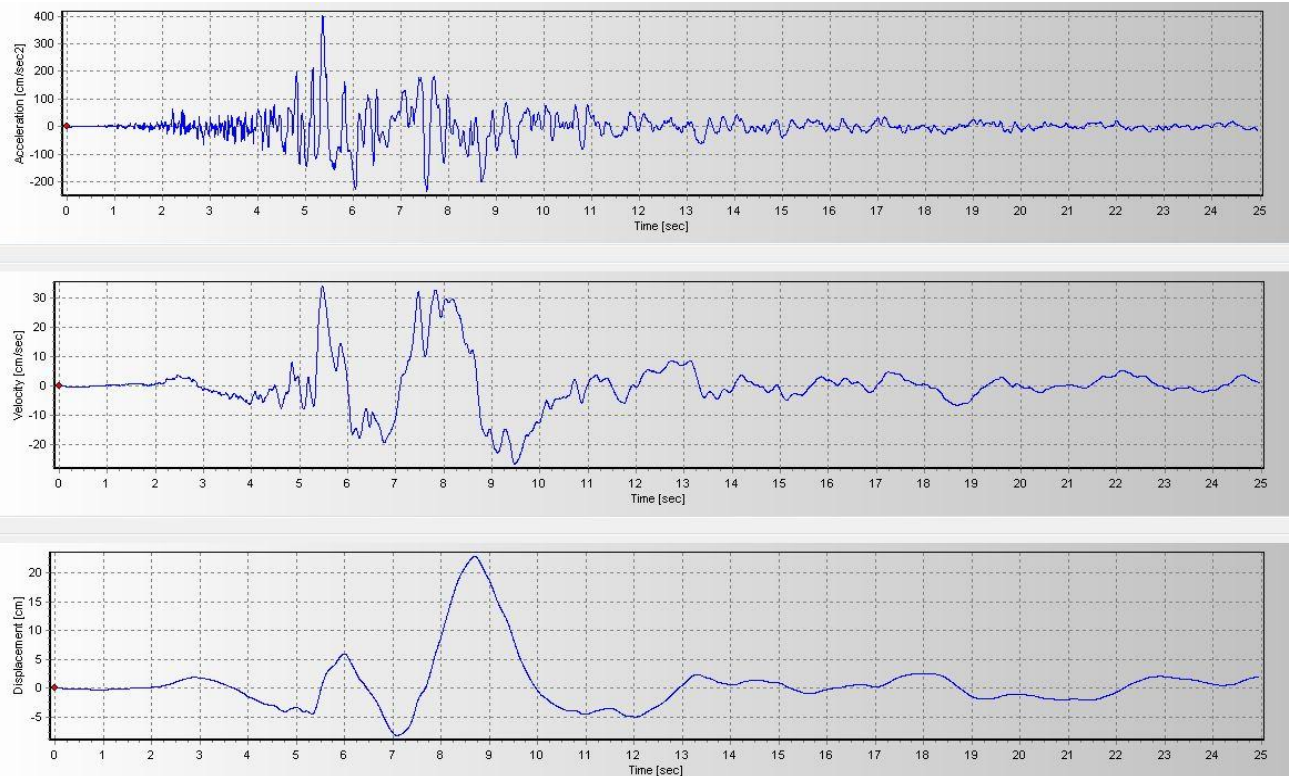


Με τυπική απόκλιση

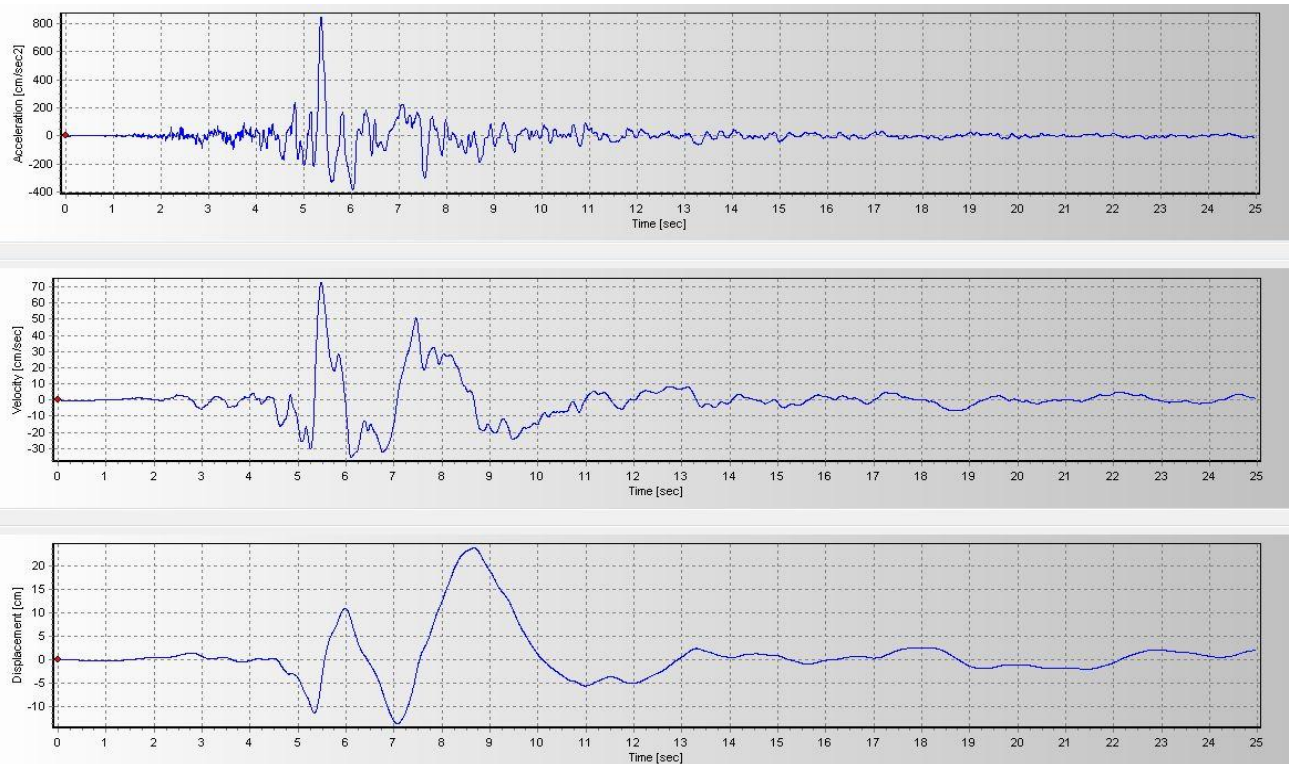
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Έδαφος Β

- Απόσταση 0 km:



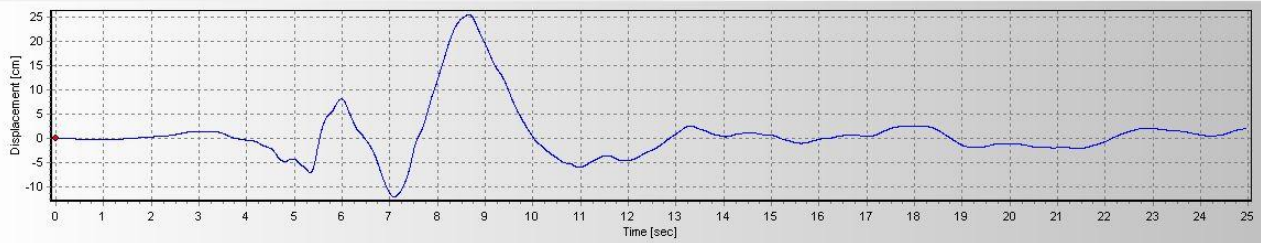
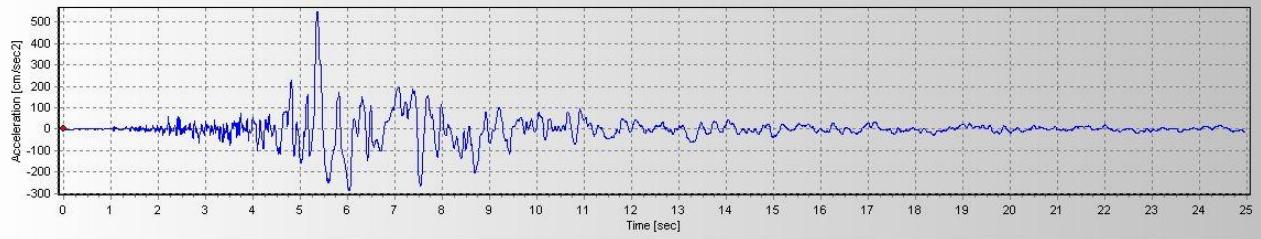
Χωρίς τυπική απόκλιση



Με τυπική απόκλιση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

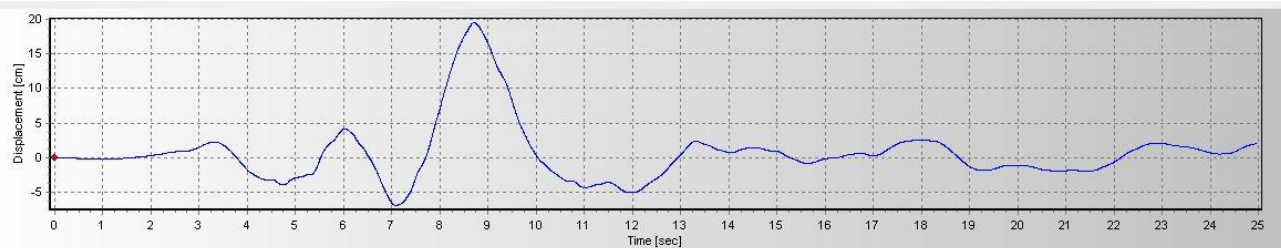
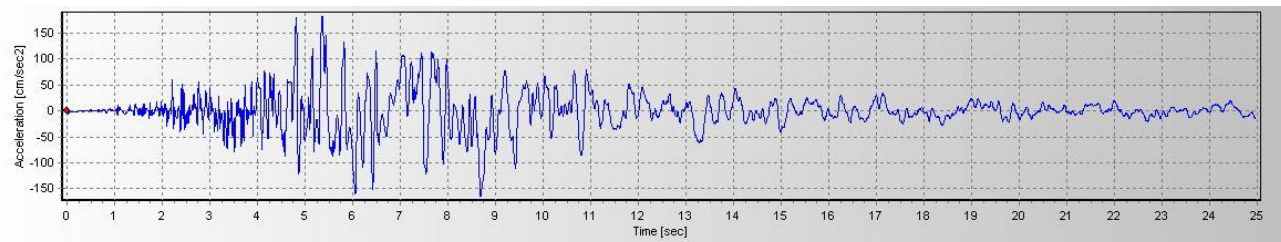
- Απόσταση 5 km:



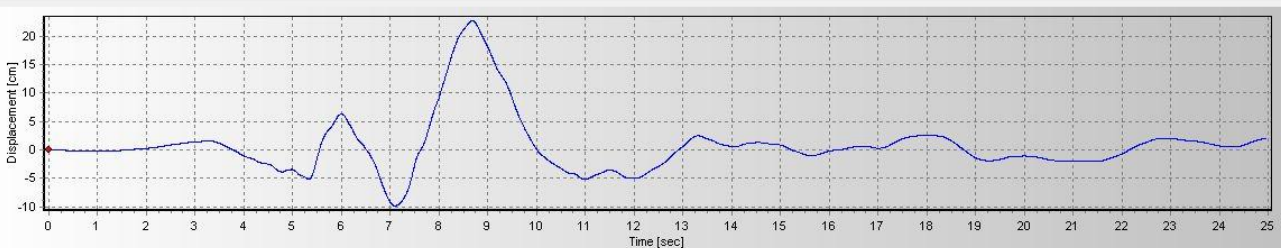
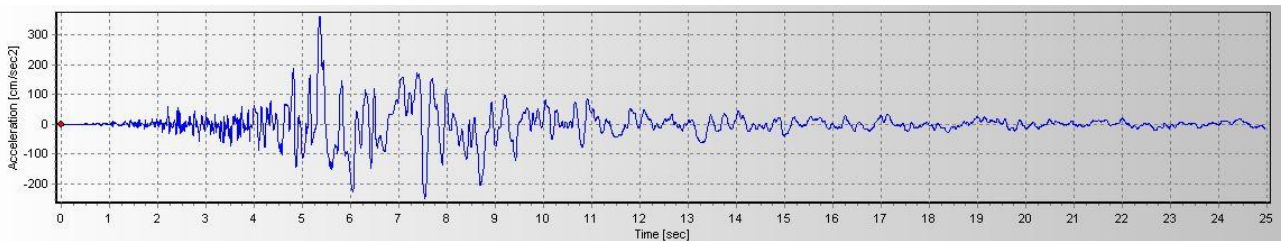
Με τυπική απόκλιση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- Απόσταση 10 km:



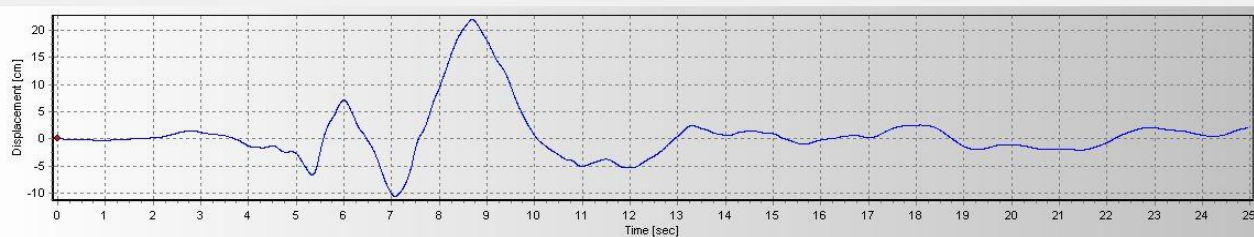
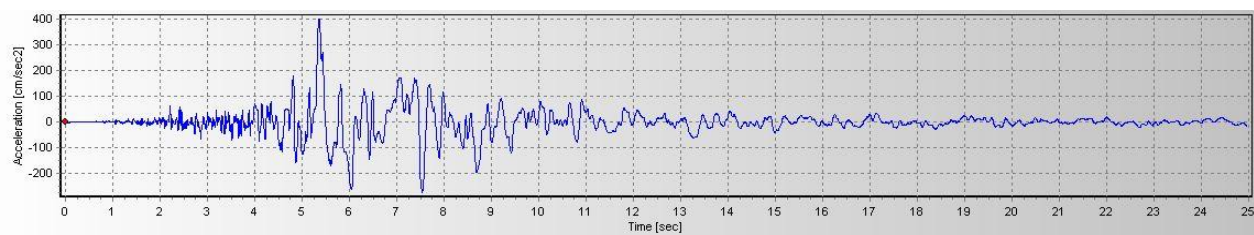
Χωρίς τυπική απόκλιση



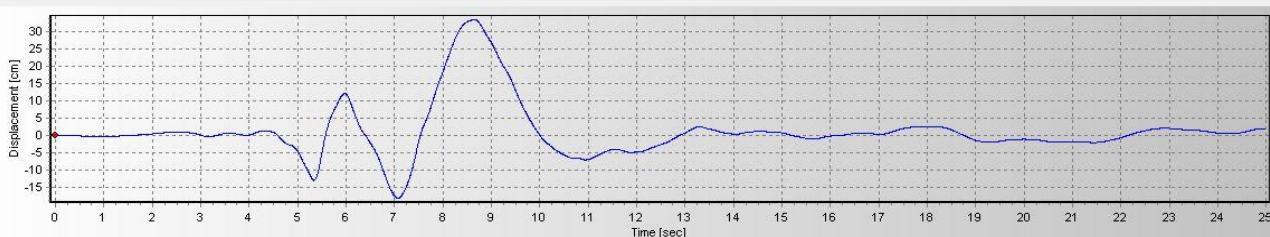
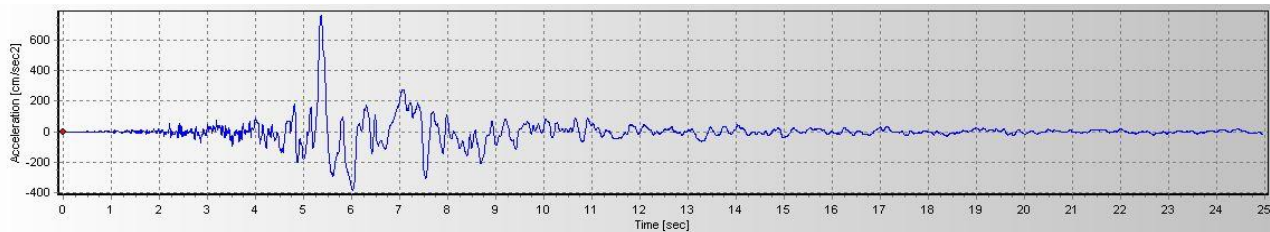
Με τυπική απόκλιση

Έδαφος C

- Απόσταση 0 km:



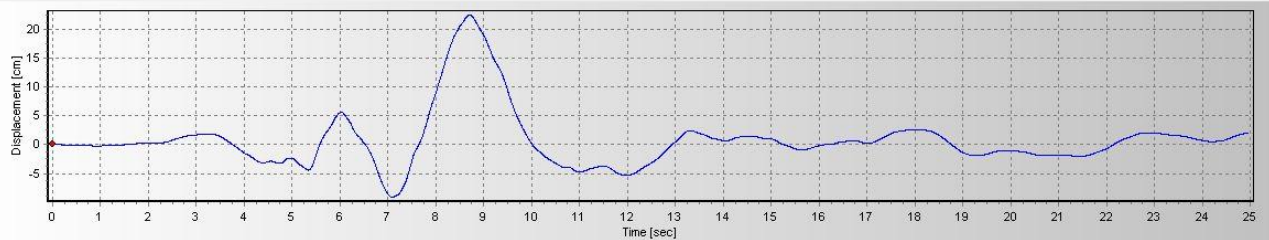
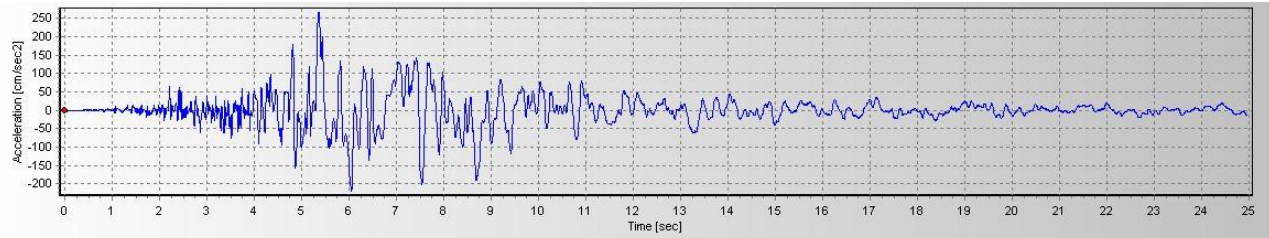
Χωρίς τυπική απόκλιση



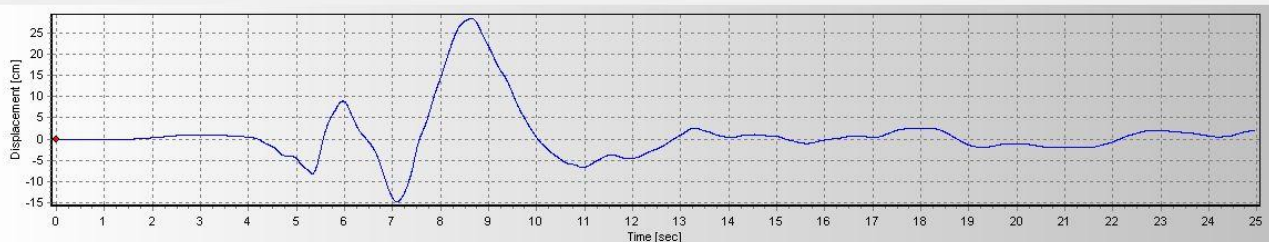
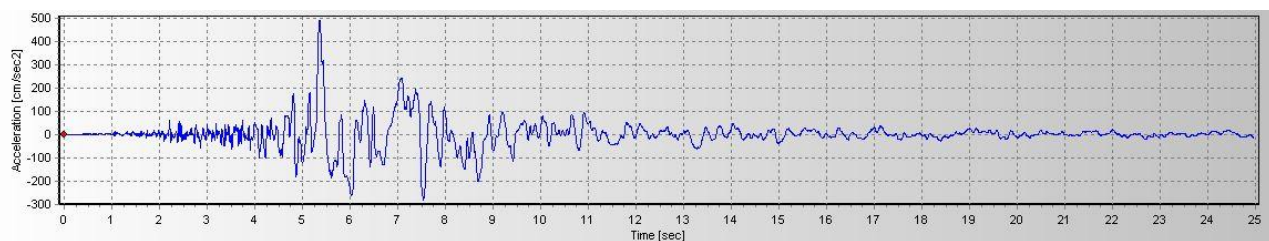
Με τυπική απόκλιση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- Απόσταση 5 km:



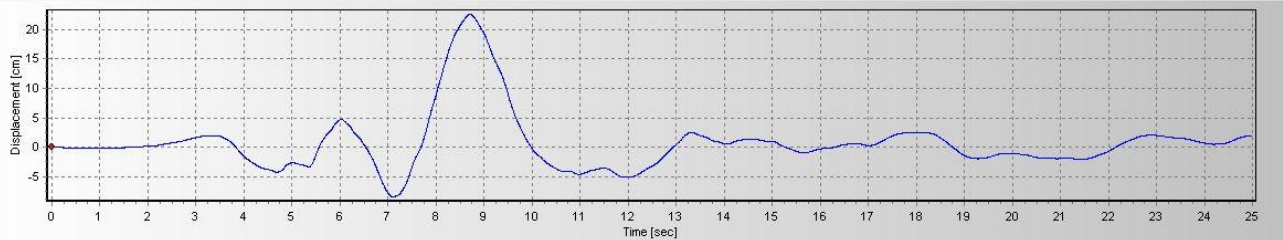
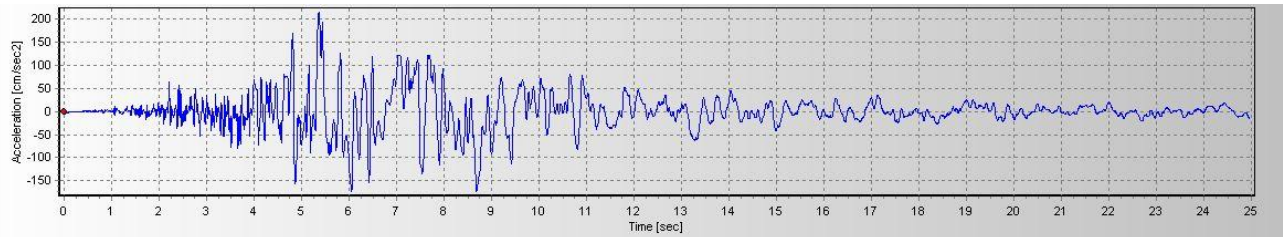
Χωρίς τυπική απόκλιση



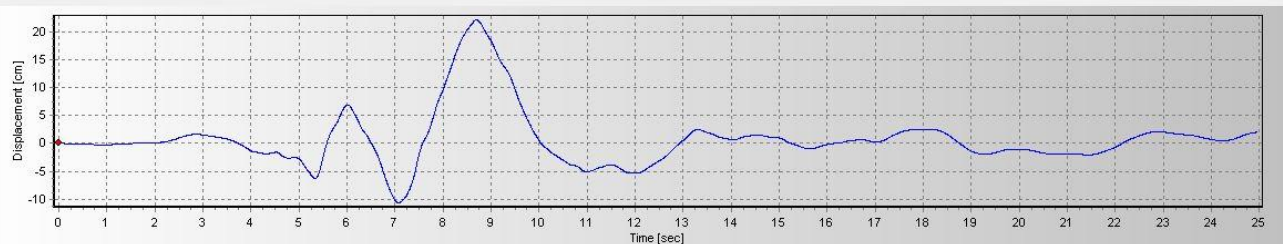
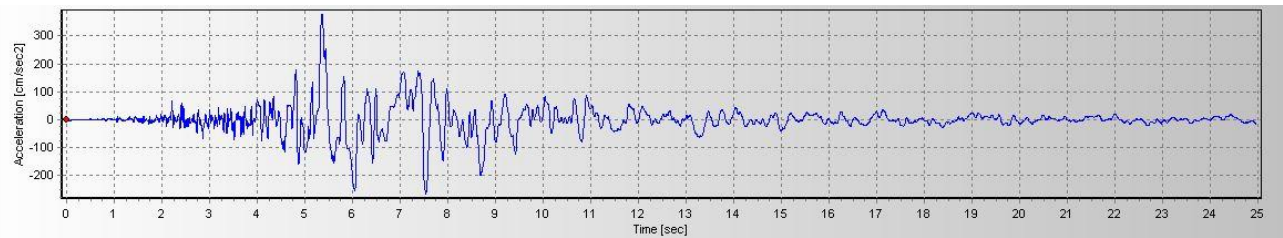
Με τυπική απόκλιση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- Απόσταση 10 km:



Χωρίς τυπική απόκλιση



Με τυπική απόκλιση

