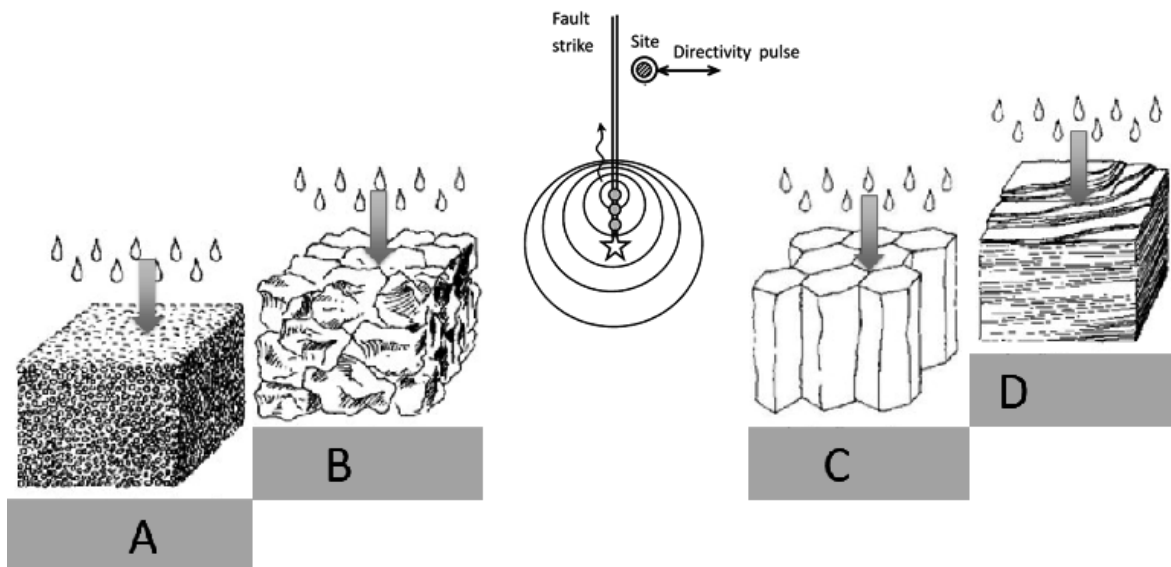




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας

Προπτυχιακή Διπλωματική Εργασία:

**Επιρροή του εδάφους στα χαρακτηριστικά σεισμικών  
κινήσεων με παλμούς κατευθυντικότητας**



Επιμέλεια: Δημουλά Παρασκευή

Επιβλέπων : Ι. Ν. Ψυχάρης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2017





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας

Προπτυχιακή Διπλωματική Εργασία:

**Επιρροή του εδάφους στα χαρακτηριστικά σεισμικών  
κινήσεων με παλμούς κατευθυντικότητας**

Επιμέλεια: Δημουλά Παρασκευή

Επιβλέπων : Ι. Ν . Ψυχάρης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2017





## Ευχαριστίες

Με τη ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω θερμές ευχαριστίες σε όσους συνέβαλαν σε αυτή τη διαδικασία.

Αρχικά, στον κ. Ιωάννη Ν. Ψυχάρη, καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ και επιβλέποντα της εργασίας, για την εμπιστοσύνη, την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος αλλά και την επιστημονική και εκπαιδευτική του καθοδήγηση.

Στη Βασιλική Καρδούτσου, Υποψήφια Διδάκτωρ ΕΜΠ, για το ανιδιοτελές ενδιαφέρον, την πολύτιμη βοήθεια, το σημαντικό χρόνο που μου αφιέρωσε, τις συμβουλές και παρατηρήσεις αλλά και τη διαρκή στήριξη σε κάθε στάδιο αυτής της εργασίας.

Στους γονείς μου και στον αγαπημένο μου αδερφό, Στέργιο, θα ήθελα να εκφράσω την απέραντη ευγνωμοσύνη μου για όλα όσα μου έχουν προσφέρει στη διάρκεια των μαθητικών και φοιτητικών χρόνων, για την ανοχή, την υπομονή και την άμεση υποστήριξή τους σε κάθε μου επιλογή.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω αυτή μου την προσπάθεια σε όλους μου τους φίλους, νέους και παλιούς, που κατέχουν σημαντική θέση στην καρδιά μου. Εύχομαι να συνεχίσουμε να πορευόμαστε μαζί για πολλά ακόμα χρόνια, να ζήσουμε αμέτρητες αξέχαστες και όμορφες στιγμές και να κυνηγάμε τα όνειρά μας υπερπηδώντας κάθε είδους εμπόδιο.

*Παρασκευή Δημουλά*

*Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*

*Μάρτιος 2017*



## Σύντομη Περίληψη

Οι εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου έχουν αποτελέσει συχνά αντικείμενο μελέτης στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού λόγω της σημαντικής επίδρασής τους στα τεχνικά έργα. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι η εμφάνιση ενός δεσπόζοντος παλμού στην ιστορία της ταχύτητας ο οποίος οφείλεται σε φαινόμενα κατευθυντικότητας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η επιρροή που ασκεί το είδος του εδάφους στον εν λόγω παλμό και στα χαρακτηριστικά του.

Αρχικά, δίδεται μια περιγραφή των φαινομένων κατευθυντικότητας που εκδηλώνονται στη ζώνη κοντινού πεδίου, ενώ ταυτόχρονα, παρατίθενται ορισμένες γεωμετρικές παράμετροι του μηχανισμού διάρρηξης που έχουν συνδεθεί με τους παλμούς των εδαφικών κινήσεων. Επιπλέον, παρουσιάζεται η ποσοτική μέθοδος ταξινόμησης του Baker, ο οποίος μέσω κυματικής ανάλυσης εισήγαγε μια διαδικασία για τη μαθηματική περιγραφή μιας εδαφικής κίνησης και την κατηγοριοποίηση της ως “παλμική” ή “μη παλμική” .

Ακολούθως, αναλύεται η μεθοδολογία που προτάθηκε από τους Mavroeidis και Parageorgiou για την αναπαράσταση του παλμού με τη χρήση ενός σύνθετου κυματιδίου. Επίσης, παρουσιάζεται η υπολογιστική διαδικασία των Mimoglou, Psycharis και Taflampas για την αναγνώριση των σημαντικών παλμών μιας κίνησης καθώς και τον προσδιορισμό των βασικών χαρακτηριστικών αυτών (περίοδος, πλάτος, πλήθος κύκλων, διαφορά φάσης, συντελεστής συσχέτισης), με αξιοποίηση του παραπάνω σύνθετου κυματιδίου.

Στο πλαίσιο της ανάλυσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκαν 86 εδαφικές καταγραφές της βάσης δεδομένων NGA (*Next Generation Attenuation*) οι οποίες είχαν ταξινομηθεί από την ανάλυση του Baker ως “παλμικές”. Προκειμένου να εξεταστεί η επιρροή του είδους του εδάφους που μεσολαβεί μεταξύ βραχώδους υποβάθρου και επιφάνειας στους παλμούς κατευθυντικότητας και τα χαρακτηριστικά τους ακολουθήθηκε μια διαδικασία που εφαρμόστηκε για τις τέσσερις εδαφικές κατηγορίες του *Ευρωκώδικα 8* (A, B, C και D). Η μελέτη περιορίστηκε στην αναγνώριση του πρώτου σημαντικού “παλμού” της εδαφικής ταχύτητας και στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών αυτού με αξιοποίηση του αλγορίθμου των Mimoglou et al. για εκδήλωση στις τέσσερις επιφανειακές εδαφικές κατηγορίες. Έπειτα, εξετάστηκε η επιρροή της κατηγορίας εδάφους σε συνδυασμό με την ύπαρξη του παλμού κατευθυντικότητας που εκδηλώνεται στην αρχική ιστορία εδαφικής ταχύτητας, στη μορφή και τα χαρακτηριστικά του ελαστικού φάσματος επιτάχυνσης. Για το σκοπό αυτό, σχεδιάζονται τα αδιαστατοποιημένα φάσματα εδαφικής επιτάχυνσης για τη βάση και την επιφάνεια της υπό εξέταση εδαφικής ζώνης. Μέσα από αυτά, δίνεται η δυνατότητα αναγνώρισης της τάξης επιρροής -ενίσχυσης ή αποενίσχυσης- που προκαλείται τόσο στο μέγεθος της φασματικής επιτάχυνσης όσο και στο συχνοτικό της πεδίο, ανάλογα πάντα με τον τύπο του εδάφους. Τέλος, εξετάζεται η επάρκεια των

προβλέψεων του *Ευρωκώδικα 8* μέσω του συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης  $S$  και των συνόρων των φασματικών συχνοτικών πεδίων του κανονισμού.

## **Abstract**

The ground motions of near fault sites has repeatedly been subject of study in the science of civil engineering because of their great effect in structures. An extremely significant characteristic of them is the appearance of a predominant pulse in ground velocity time history, which is resulted due to directivity effects. This diploma thesis investigates the influence of the ground category in this velocity pulse and its characteristics.

At first, there is a description of the directivity effects that occur in the near fault zone, and also some of the geometric parameters of rupture mechanism that have been connected with the near fault pulses are pointed out. Furthermore, a quantitative classification for the recorded ground motions by Baker is presented, who via wavelet analysis introduced a process for the mathematical description of ground motions and a categorization of them in “pulse-like” or “non-pulse-like”.

Subsequently, the methodology proposes by Mavroeidis and Papageorgiou for the representation of the pulse with the use of a synthetic wavelet is analyzed. Moreover, the computational procedure of Mimoglou, Psycaris and Taflampas for the recognition of the significant pulses of a motion and the determination of their basic characteristics (period, amplitude, oscillation factor, phase shift, cross correlation factor) using the above synthetic wavelet is presented.

In the analysis of this diploma thesis 86 ground motion records of the NGA (*Next Generation Attenuation*) database are studied, which were previously classified as “pulse-like” by Baker’s analysis. In order to examine the influence of the ground type between bedrock and ground surface in directivity pulses and their characteristics a procedure was followed, which applied in the four ground categories of *Eurocode 8* (A, B, C and D). The study contained the recognition of the first significant “pulse” in ground velocity and the determination of its characteristics using the algorithm of Mimoglou et al. when appeared in the four surface ground categories. Then, the influence of the ground category in combination with the existence of a directivity pulse in the form and the characteristics of the elastic acceleration spectrum is examined. For this purpose, normalized spectra of ground acceleration, referring to the surface of the examined ground zone are drawn. Via those data, it is possible to recognize the rate of influence –amplification or deamplification- that is caused not only to the amplitude of the spectral acceleration but also to its frequency field, also in accordance with the ground type. Finally, the adequacy of *Eurocode 8* predictions is examined via the ground amplification factor  $S$  and the limits of the spectral frequency intervals of EC8.



## Διάρθρωση Εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η επιρροή του είδους του εδάφους στα χαρακτηριστικά του παλμού κατευθυντικότητας που εκδηλώνεται σε σεισμούς κοντινού πεδίου.

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζονται κάποια εισαγωγικά στοιχεία σχετικά με το Κανονιστικό Πλαίσιο, την επιλογή των εδαφικών παραμέτρων και τα Μέσα Ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου και αναλύονται τα φαινόμενα κατευθυντικότητας, δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα στον παλμό κατευθυντικότητας που δημιουργείται στην εδαφική ταχύτητα. Επιπλέον, εξετάζεται η συσχέτιση αυτού του φαινομένου με τις γεωμετρικές παραμέτρους του ρήγματος και παρουσιάζονται τα εγχειρήματα παραμετροποίησης του παλμού από προγενέστερες έρευνες.

Στο **Κεφάλαιο 3** αναπτύσσεται η μέθοδος που είχε εισαχθεί από τον Baker (2007) με στόχο την αναγνώριση των σημαντικών παλμών εδαφικής ταχύτητας μέσω κυματικής ανάλυσης αλλά και η διαδικασία ταξινόμησης εδαφικών κινήσεων σε παλμικές και μη. Επίσης, γίνεται αναφορά στην επιρροή του παλμού σε διάφορους προσανατολισμούς ως προς το ρήγμα αλλά και στην ενίσχυση των φασματικών τιμών της επιτάχυνσης.

Στο **Κεφάλαιο 4** αναλύεται το μοντέλο που εισήχθη από τους Manroeidis και Parageorgiou (2003) για την αναπαράσταση του παλμού κατευθυντικότητας στην εδαφική ταχύτητα με την χρήση ενός σύνθετου κυματιδίου.

Στο **Κεφάλαιο 5** περιγράφεται η μέθοδος εντοπισμού των παλμών ταχύτητας αλλά και προσδιορισμού των χαρακτηριστικών τους, όπως έχει εισαχθεί από τους Mimoglou, Psycharis και Taflampas (2014). Στη μέθοδο αυτή, οι σημαντικοί παλμοί αναγνωρίζονται με τη βοήθεια του M&P σύνθετου κυματιδίου για το οποίο γίνεται λόγος στο προηγούμενο Κεφάλαιο ενώ για τον προσδιορισμό της περιόδου του παλμού χρησιμοποιείται το φάσμα συνέλιξης  $S_d \times S_v$  για απόσβεση 5%.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του παλμού ταχύτητας που αναγνωρίζει ο υπολογιστικός αλγόριθμος των Mimoglou et al. σε εδάφη κατηγορίας A, B, C και D. Επιπλέον, μελετώνται οι επιδράσεις στις φασματικές τιμές της επιτάχυνσης και η επάρκεια των προβλέψεων του Ευρωκώδικα 8 κυρίως μέσω των προτεινόμενων τιμών του συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης  $S$  αλλά και της χαρακτηριστικής περιόδου  $T_c$ . Στο πλαίσιο αυτό, διαμορφώνονται προτάσεις με στόχο την μείωση των αδυναμιών του κανονισμού.

Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.





## Πίνακας Περιεχομένων

1.	Εισαγωγικά στοιχεία.....	1
1.1	Επιλογή τιμών.....	3
1.2	Μέσα ανάλυσης.....	8
2.	Εδαφική κίνηση κοντινού πεδίου.....	9
2.1	Εισαγωγή.....	11
2.2	Ρήγματα.....	11
2.2.1	Γενικά.....	11
2.2.2	Βασικοί τύποι Ρηγμάτων.....	11
2.2.3	Γεωμετρία ρήγματος.....	14
2.3	Φαινόμενα κατευθυντικότητας.....	16
2.3.1	Κατευθυντικότητα διάρρηξης.....	16
2.3.2	Μόνιμη στατική μετακίνηση.....	19
2.4	Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου.....	20
2.4.1	Οι συνθήκες εκδήλωσης του φαινομένου.....	20
2.4.2	Ο παλμός κατευθυντικότητας στην ιστορία της ταχύτητας.....	22
3.	Μέθοδος Baker- Ταξινόμηση εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου με χρήση κυματικής ανάλυσης .....	27
3.1	Εισαγωγή.....	29
3.1.1	Γενικά στοιχεία για τη μέθοδο Baker.....	29
3.1.2	Γενεσιουργά αίτια παλμού ταχύτητας.....	30
3.1.3	Η επιλογή της διαδικασίας ταξινόμησης.....	30
3.2	Ανάλυση κυματιδίων.....	31
3.3	Ταξινόμηση ιστοριών.....	33
3.3.1	Γενικά.....	33
3.3.2	Η εξαγωγή του παλμού.....	33
3.3.3	Εκτίμηση της σημαντικότητας του εξαγόμενου παλμού.....	34
3.3.4	Αποκλεισμός των παλμών που εμφανίζονται αργά στην ιστορία.....	36
3.3.5	Αποκλεισμός των εδαφικών κινήσεων με $PVG < 30\text{cm/s}$ .....	38
3.4	Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού.....	38
3.5	Παλμοί σε διάφορους προσανατολισμούς ως προ το ρήγμα.....	41
3.6	Ενίσχυση στη φασματική επιτάχυνση λόγω παλμού.....	42
4.	Αναπαράσταση του παλμού με τη χρήση σύνθετου κυματιδίου κατά Μανροειδής & Παράγεοργιου.....	45
4.1	Εισαγωγικά στοιχεία.....	47
4.2	Βάση Δεδομένων.....	47
4.3	Το προτεινόμενο μοντέλο.....	50
4.4	Η προσαρμογή- ρύθμιση του μοντέλου.....	55
4.5	Η αξιολόγηση του μοντέλου.....	57
5.	Προσδιορισμός χαρακτηριστικών παλμού- Χρήση φάσματος συνέλιξης.....	59
5.1	Εισαγωγή.....	61
5.2	Περιγραφή της προτεινόμενης διαδικασίας.....	62
5.2.1	Η ανάγκη εισαγωγής του φάσματος συνέλιξης.....	62
5.2.2	Διερεύνηση και κριτήρια για τον αποκλεισμό μη σημαντικών παλμών.....	65
5.3	Εκτίμηση των παραμέτρων των κυματιδίων.....	66

5.4	Κωδικοποίηση της μεθοδολογίας σε βήματα.....	67
6.	Αναλύσεις.....	69
6.1	Μεταβολή των χαρακτηριστικών του παλμού.....	71
6.2	Επιδράσεις στα ελαστικά φάσματα επιτάχυνσης.....	89
6.3	Επάρκεια του ΕΚ8.....	98
6.3.1	Συντελεστής εδαφικής ενίσχυσης S και περίοδος $T_c$ .....	98
6.3.2	Προτάσεις βελτίωσης του ΕΚ8.....	103
7.	Συμπεράσματα.....	109
Παράρτημα Α:	Παλμικές εδαφικές κινήσεις κατά Μέθοδο Baker- Βάση Δεδομένων NGA.....	113
Παράρτημα Β:	Αδιαστατοποιημένα ελαστικά φάσματα επιτάχυνσης .....	119
	Βιβλιογραφικές αναφορές.....	169

## Λίστα Εικόνων

Εικ. 2.1:	Οι δυνατές μετατοπίσεις κατά μήκος μιας κεκλιμένης ρηξιγενούς επιφάνειας (Brinkmann, 1972).....	11
Εικ. 2.2 :	Κανονικό Ρήγμα.....	12
Εικ. 2.3 :	Ανάστροφο Ρήγμα.....	12
Εικ. 2.4 :	Α. Εφιππευτικού χαρακτήρα ανάστροφο ρήγμα ( $> 45^\circ$ ), Β. Επωθητικού χαρακτήρα ανάστροφο ρήγμα ( $< 45^\circ$ ).....	13
Εικ. 2.5 :	Ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης.....	13
Εικ. 2.6:	α) Δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης, β) Αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης.....	13
Εικ. 2.7 :	Οι κυριότεροι τύποι των ρηγμάτων: Α. κανονικό ρήγμα, Β. πλάγιο κανονικό ρήγμα αριστερόστροφο, C. πλάγιο κανονικό ρήγμα δεξιόστροφο, D. ανάστροφο ρήγμα. Ε. πλάγιο ανάστροφο ρήγμα αριστερόστροφο. F. πλάγιο ανάστροφο ρήγμα δεξιόστροφο, G. ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με κατακόρυφη ρηξιγενή επιφάνεια αριστερόστροφο, H. ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με κεκλιμένη ρηξιγενή επιφάνεια αριστερόστροφο, I. ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με κατακόρυφη ρηξιγενή επιφάνεια δεξιόστροφο.....	14
Εικ. 2.8 :	Γεωμετρικές παράμετροι ενός ρήγματος (NGA Database Documentation File).....	15
Εικ. 2.9 :	Εστία, επίκεντρο και εστιακό βάθος.....	15
Εικ. 2.10:	Κλείθρα στην επιφάνεια ρήγματος (asperities).....	17
Εικ. 2.11:	Οι εκφάνσεις του φαινομένου της κατευθυντικότητας.....	17
Εικ. 2.12:	Σχηματική απεικόνιση : Συμβολή των παλμών στην έμπροσθεν κατευθυντικότητα.....	18
Εικ. 2.13:	Φαινόμενα Κατευθυντικότητας Διαρρήξεως μέσα από καταγραφόμενες χρονοιστορίες μετατόπισης για το σεισμό Loma Prieta 1989, για την κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση (αριστερά) και για την παράλληλη στο ρήγμα διεύθυνση (δεξιά). Πηγή: EERI, 1995.....	18
Εικ. 2.14:	Σχηματική απεικόνιση του προσανατολισμού της μόνιμης εδαφικής μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγματα κεκλιμένης και οριζόντιας ολίσθησης.....	19
Εικ. 2.15:	Σχηματική απεικόνιση των χρονοιστοριών για ρήγματα κεκλιμένης και οριζόντιας ολίσθησης στις οποίες η μόνιμη στατική μετακίνηση και παλμός κατευθυντικότητας απεικονίζονται μαζί και μεμονωμένα.....	20
Εικ. 2.16:	Παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον ορισμό των συνθηκών εκδήλωσης κατευθυντικότητας διάρρηξης.....	21
Εικ. 2.17:	Οι προβλέψεις από τη σχέση των Somerville et al (1997a) για διάφορες συνθήκες κατευθυντικότητας.....	21
Εικ. 2.18:	Απλοποιημένοι Παλμοί που χρησιμοποιήθηκαν από ερευνητές...	22
Εικ. 2.19:	Παράμετροι απαιτούμενοι για τον ορισμό των συνιστωσών κάθετα και παράλληλα στο ρήγμα του απλοποιημένου παλμού ταχύτητας ( Rodriguez- Marek 2000).....	24
Εικ. 2.20:	Χρονοιστορίες ταχύτητας στην κάθετη και στην παράλληλη ως προς το ρήγμα διεύθυνση & τροχιακά διαγράμματα της οριζόντιας ταχύτητας για δύο καταγραφές. Οι παράλληλες προς το ρήγμα κινήσεις των δύο καταγραφών διαφοροποιούνται	

	σημαντικά.....	25
Εικ. 3.1 :	Παραδείγματα εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου στη διεύθυνση κάθετα στο ρήγμα.....	30
Εικ. 3.2 :	Συνήθη μητρικά κυματίδια που χρησιμοποιούνται στην κυματική ανάλυση .....	31
Εικ. 3.3 :	Διαδικασία αποσύνθεσης για την απομόνωση του παλμικού τμήματος της εδαφικής κίνησης.....	34
Εικ. 3.4 :	Διάγραμμα Διασποράς των μεταβλητών πρόβλεψης που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση.....	35
Εικ. 3.5 :	(α) Παλμός στην αρχή της ιστορίας , (β) Παλμός στο τέλος της ιστορίας.....	37
Εικ. 3.6 :	Εδαφική κίνηση που φαίνεται να είναι παλμική αλλά πρέπει να αποκλειστεί λόγω μικρής τιμής PVG.....	38
Εικ. 3.7 :	Κυματίδιο Daubechies και ημιτονικό κύμα με περίοδο ίση με τη μέγιστη της κυματομορφής από το φάσμα Fourier.....	39
Εικ. 3.8 :	$T_p$ για τη μέγιστη τιμή του φάσματος ταχύτητας και $T_p$ από την ψευδοπερίοδο του κυματιδίου για τις 91 εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου.....	39
Εικ. 3.9 :	(α) Χρονοϊστορίες ταχύτητας , (β) Φάσματα Ταχύτητας με σημασμένες τις τιμές $T_p$ προσδιορισμένες από τις δύο μεθόδους.....	40
Εικ. 3.10:	Περίοδος παλμού και μέγεθος σεισμού για παρατηρηθείσες παλμικές εδαφικές κινήσεις .....	41
Εικ. 3.11:	Τιμές του παλμικού δείκτη ως συνάρτηση του προσανατολισμού. Οι σκιασμένες περιοχές υποδεικνύουν τις διευθύνσεις όπου είναι εμφανείς ισχυροί παλμοί (Imperial Valley 1979 , Πηγή: EC Country Center).....	42
Εικ. 3.12:	Φάσμα απόκρισης από το σεισμικό γεγονός Imperial Valley 1979 ( El Centro Array #5 ), προσανατολισμός εδαφικής κίνησης κάθετα στο ρήγμα, μέση πρόβλεψη των Boore και Atkinson και φάσμα απόκρισης απομένουσας εδαφικής κίνησης .....	43
Εικ. 3.13:	Παράγοντας ενίσχυσης της φασματικής επιτάχυνσης λόγω παρουσίας παλμικών χαρακτηριστικών στην εδαφική κίνηση. (α) Αναπαράσταση της εξίσωσης πρόβλεψης μαζί με δεδομένα από παρατηρήσεις, (β) Μέση ενίσχυση λόγω παλμών προσανατολισμένων σε διάφορες κατευθύνσεις.....	43
Εικ. 4.1 :	Ισχυρές εδαφικές καταγραφές με διακριτούς παλμούς ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκαν για τη ρύθμιση του αναλυτικού μοντέλου.....	50
Εικ. 4.2 :	Σύγκριση κυματιδίου Mavroeidis & Papageorgiou και κυματιδίου Garbor , 1979 Imperial Valley, California.....	53
Εικ. 4.3 :	Συνδυασμός τριών συνθετικών παλμών για την προσαρμογή της καταγεγραμμένης εδαφικής κίνησης κατά τη διάρκεια σεισμού στο Kobe της Ιαπωνίας (1995), σταθμός KOB.....	57
Εικ. 5.1 :	(α) χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας, (β) φάσμα απόκρισης ψευδοταχύτητας για 5% απόσβεση (καταγραφή G06-320 από το σεισμό Coyote Lake 1979).....	62
Εικ. 5.2 :	Σύγκριση του φάσματος Fourier εδαφικής ταχύτητας με το φάσμα απόκρισης μετακίνησης για μηδενική απόσβεση	

	(καταγραφή G06-320 από το σεισμό Coyote Lake 1979).....	63
Εικ. 5.3 :	Φάσμα απόκρισης μετακίνησης για 5% απόσβεση (καταγραφή G06-320 από το σεισμό Coyote Lake 1979).....	63
Εικ. 6.1 :	Στιγμιότυπα από την επεξεργασία και την εξαγωγή δεδομένων με τον κώδικα Seismosignal.....	72
Εικ. 6.2 :	Στιγμιότυπο εφαρμογής του κώδικα CROSS5NEW-5.....	72
Εικ. 6.3 :	Επιφάνεια εδαφικής κατηγορίας A προς βραχώδες υπόβαθρο : μηδαμινή διαφοροποίηση χαρακτηριστικών παλμού.....	75
Εικ. 6.4 :	Διαγράμματα του συντελεστή συσχέτισης σε βάση και επιφάνεια για τις εδαφικές κατηγορίες B, C και D.....	77
Εικ. 6.5 :	Ελαστικά φάσματα ταχύτητας για τις καταγραφές Chi- Chi, Taiwan (1999, TCU065 και TCU098) .....	79
Εικ. 6.6 :	Ελαστικά φάσματα ταχύτητας για την καταγραφή Erzincan, Turkey (1992, Erzincan).....	80
Εικ. 6.7 :	Διαγράμματα της περιόδου όπου το φάσμα συνέλιξης δίνει τη μέγιστη τιμή του σε βάση και επιφάνεια για τις εδαφικές κατηγορίες B, C και D.....	82
Εικ. 6.8 :	Διαγράμματα του πλήθους κύκλων $\gamma$ σε βάση και επιφάνεια για τις εδαφικές κατηγορίες B, C και D.....	84
Εικ. 6.9 :	Διαγράμματα του πλάτους παλμού A σε βάση και επιφάνεια για τις εδαφικές κατηγορίες B, C και D.....	86
Εικ. 6.10:	Ταχυνσιογραφήματα για τις εδαφικές καταγραφές (1) San Fernando, Pacoima Dam(upper left abut) (1971), (41) και Landers, Yermo Fire Station (1992).....	88
Εικ. 6.11:	Στιγμιότυπα της ανάλυσης από το υπολογιστικό περιβάλλον του Strata: (α), (β) εισαγωγή εδαφικών παραμέτρων, (γ) ολοκλήρωση υπολογισμών (δ) εξαγωγή αποτελεσμάτων.....	90
Εικ. 6.12:	Αδιαστατοποιημένα ελαστικά φάσματα EK8.....	91
Εικ. 6.13:	Ανεπαίσθητες μεταβολές στη φασματική επιτάχυνση βραχώδους βάσης και επιφάνειας A.....	92
Εικ. 6.14:	Οι περιοχές ενίσχυσης- εξασθένισης του φάσματος επιφάνειας σε σύγκριση με το εκείνο της βάσης.....	93
Εικ. 6.15:	Ο παλμός κατευθυντικότητας στο αδιαστατοποιημένο φάσμα του βραχώδους υποβάθρου.....	94
Εικ. 6.16:	Ενίσχυση του αδιαστατοποιημένου φάσματος επιτάχυνσης στην περίοδο του παλμού κατευθυντικότητας (26) $T_p = 1,49$ s. Taiwan SMART1(40), SMART1 C00 (1986) και (43) $T_p = 2,93$ s. Northridge-01, Jensen Filter Plant (1994).....	96
Εικ. 6.17:	Εξασθένιση του αδιαστατοποιημένου φάσματος επιτάχυνσης στην περίοδο του παλμού κατευθυντικότητας (6) $T_p = 4,78$ s. Imperial Valley-06, Brawley Airport (1979) και (65) $T_p = 5,68$ s. Chi- Chi, Taiwan, TCU040 (1999).....	97
Εικ. 6.18:	Τιμές του συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης S για τις πραγματικές καταγραφές και κατά EK8 για τις εδαφικές κατηγορίες B, C και D.....	99
Εικ. 6.19:	Τιμές του συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης S για τις πραγματικές καταγραφές μέσος όρος καταγραφών και τιμές	100

	κατά ΕΚ8 για τις εδαφικές κατηγορίες Β, C και D.....	
Εικ. 6.20:	Αδιαστατοποιημένα φάσματα καταγραφών και ΕΚ8 ως προς τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας και καμπύλες μέσου όρου καταγραφών.....	102
Εικ. 6.21:	Αδιαστατοποιημένα φάσματα ως προς τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας εφαρμόζοντας τη βελτιωτική μέθοδο επαύξησης του συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης S του ΕΚ8.....	104
Εικ. 6.22:	Αδιαστατοποιημένα φάσματα ως προς τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας εφαρμόζοντας τη βελτιωτική μέθοδο επαύξησης της χαρακτηριστικής περιόδου $T_c$ του ΕΚ8.....	106
Εικ. 6.23:	Αδιαστατοποιημένα φάσματα ως προς τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας εφαρμόζοντας τις τελικές βελτιωτικές προτάσεις για το φάσμα του ΕΚ8.....	108

## Λίστα Πινάκων

Π. 1.1 :	Κατάταξη εδαφών κατά ΕΚ8.....	4
Π. 1.2 :	Τιμές $a_{gR}/g$ .....	5
Π. 1.3 :	Κατηγορίες Σπουδαιότητας για κτήρια.....	5
Π. 1.4 :	Τιμές παραμέτρων $\gamma$ και $V_s$ .....	6
Π. 1.5 :	Τιμές χαρακτηριστικών περιόδων και συντελεστή εδάφους για την οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης.....	7
Π. 2.1 :	Παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον ορισμό των απλοποιημένων ημιτονικού παλμού εδαφικών κινήσεων (Rodriguez- Marek 2000).....	23
Π. 4.1 :	Καταγραφές κοντινού πεδίου με διακριτούς παλμούς ταχύτητας για τη ρύθμιση του αναλυτικού μοντέλου.....	48
Π. 4.2 :	Συνήθη αναλυτικά κυματίδια που χρησιμοποιούνται στην Σεισμολογία (A: πλάτος, $f_p$ : δεσπόζουσα συχνότητα, $\nu$ : γωνία φάσης, $\gamma$ :πλήθος κύκλων, $n$ : ασυμμετρία περιβάλλουσας συνάρτησης, $k$ : ελέγχει τον αριθμό των “λοβών”, $m$ : ελέγχει τον αριθμό των ημικύκλων).....	51
Π. 4.3 :	Παράμετροι που προέκυψαν από την εφαρμογή του αναλυτικού μοντέλου στις καταγραφές κοντινού πεδίου.....	55
Π. 6.1:	Χαρακτηριστικά “παλμού” για τις εδαφικές καταγραφές (1) San Fernando, Pacoima Dam(upper left abut) (1971), (41) και Landers, Yermo Fire Station (1992).....	86
Π. 6.2 :	Πίνακας τιμών συντελεστή $S$ κατά ΕΚ8 και ως μέσος όρος των καταγραφών μαζί με τα αντίστοιχα ποσοστά επάρκειας.....	101
Π. 6.3:	Τιμές συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης $S$ κατά ΕΚ8 και προτάσεις επαύξησης.....	103
Π. 6.4:	Τιμές της χαρακτηριστικής περιόδου $T_c$ κατά ΕΚ8 και προτάσεις επαύξησης.....	105
Π. 6.5:	Συγκεντρωτικές προτάσεις βελτίωσης του φάσματος του ΕΚ8.....	107





# **Κεφάλαιο 1**

## **Εισαγωγικά στοιχεία**



## 1.1 Επιλογή τιμών

Στα πλαίσια της ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν οι βασικές διατάξεις του αντισεισμικού κανονισμού Ευρωκώδικα 8. Στον ΕΚ8 προδιαγράφονται πέντε βασικές κατηγορίες εδάφους Α, Β, C, D και Ε με βάση τη στρωματογραφία και τις ακολούθως περιγραφόμενες παραμέτρους. Επιπλέον, υπάρχουν και δύο ειδικές κατηγορίες εδαφών, οι  $S_1$  και  $S_2$  που απαιτούν περισσότερο εξειδικευμένες μελέτες για τον καθορισμό των σεισμικών δράσεων. Πιο συγκεκριμένα, για την κατηγορία  $S_1$  απαιτείται ειδική μελέτη για τον καθορισμό της τοπικής μεγέθυνσης (site amplification) και της αλληλεπίδρασης εδάφους- κατασκευής. Όσο για την κατηγορία  $S_2$  λαμβάνεται υπόψη και η πιθανότητα αστοχίας του εδάφους υπό τα σεισμικά φορτία σχεδιασμού.

Η κατάταξη των εδαφών πραγματοποιείται με βάση την ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων  $V_{s,30}$ , εάν είναι διαθέσιμη, διαφορετικά χρησιμοποιείται η τιμή  $N_{SPT}$  (αριθμός κρούσεων για πρότυπη δείσδυση 30 cm). Η ταχύτητα  $V_{s,30}$  αντιστοιχεί στη μέση ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων στα ανώτερα 30m εδάφους και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{v_i}} \quad (1.1)$$

όπου:

$h_i$ = πάχος στρώματος (m)

$v_i$ = ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων στρώματος  $i$  (για  $\gamma \leq 10^{-5}$ , δηλαδή για πρακτικά ελαστική συμπεριφορά)

$N$  = το πλήθος στρωμάτων στα ανώτερα 30m εδάφους

Γενικά, απαιτείται έλεγχος του εδάφους για τον καθορισμό της κατηγορίας του. Σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα, η έκταση της απαιτούμενης εδαφοτεχνικής έρευνας- μελέτης εξαρτάται από την *Κατηγορία Εδάφους*, τη *Σεισμικότητα* και τη *Σπουδαιότητα* του κτιρίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις δίνεται η δυνατότητα παράλειψης της εδαφοτεχνικής έρευνας καθώς επιτρέπεται η εκτίμηση της κατηγορίας και της φέρουσας ικανότητας του εδάφους στηριζόμενη σε υπάρχουσα εμπειρία από γειτονικές κατασκευές οι οποίες είναι θεμελιωμένες σε όμοιους εδαφικούς σχηματισμούς. Ωστόσο, επιβάλλεται οι κατασκευές αυτές να μην έχουν εμφανίσει αξιόλογες υποχωρήσεις και να έχουν αντεπεξέλθει ικανοποιητικώς σε προγενέστερες σημαντικές σεισμικές δράσεις. Η κατάταξη των εδαφών φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Κατηγορία εδάφους	Περιγραφή στρωματογραφίας	Παράμετροι		
		$V_{s,30}$	$N_{SPT}$	$C_u$ (kPa)
A	Βράχος ή άλλος βραχώδης γεωλογικός σχηματισμός που περιλαμβάνει το πολύ 5m ασθενέστερου επιφανειακού υλικού	>800	-	-
B	Αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλίκων, ή πολύ σκληρής αργίλου, πάχους τουλάχιστον αρκετών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος	360 - 800	> 50	>250
C	Βαθιές αποθέσεις πυκνής ή μετρίως πυκνής άμμου, χαλίκων ή σκληρής αργίλου πάχους από δεκάδες έως πολλές εκατοντάδες μέτρων	180-360	15-50	70-250
D	Αποθέσεις χαλαρών έως μετρίως χαλαρών μη συνεκτικών υλικών (με ή χωρίς κάποια μαλακά στρώματα συνεκτικών υλικών), ή κυρίως μαλακά έως μετρίως σκληρά συνεκτικά υλικά	<180	<15	<70
E	Εδαφική τομή που αποτελείται από ένα επιφανειακό στρώμα ιλύος με τιμές $V_s$ κατηγορίας C ή D και πάχος που ποικίλλει μεταξύ περίπου 5m και 20m, με υπόστρωμα από πιο σκληρό υλικό $V_s > 800$ m/s			
$S_1$	Αποθέσεις που αποτελούνται ή που περιέχουν ένα στρώμα πάχους τουλάχιστον 10m μαλακών αργίλων/ιλών με υψηλό δείκτη πλαστικότητας ( $PI > 40$ ) και υψηλή περιεκτικότητα σε νερό	<100(ενδεικτικό)	-	10-20
$S_2$	Στρώματα ρευστοποιήσιμων εδαφών, ευαίσθητων αργίλων, ή οποιαδήποτε άλλη εδαφική τομή που δεν περιλαμβάνεται στους τύπους A-E ή $S_1$			

Π. 1.1 : Κατάταξη εδαφών κατά ΕΚ8

Όσον αφορά τη σεισμική δράση, σε κάθε ζώνη χαρακτηρίζεται από την επιτάχυνση του εδάφους  $a_{gR}$ , η οποία αντιστοιχεί σε έδαφος κατηγορίας A. Σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα, για τις ζώνες  $Z_1$ ,  $Z_2$  και  $Z_3$  υιοθετούνται οι ζώνες I, II και III του

ΕΑΚ 2003 και οι τιμές  $\alpha_{gR}$  παίρνουν τις τιμές που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Ζώνη	$\alpha_{gR}/g$
Z <sub>1</sub>	0.16
Z <sub>2</sub>	0.24
Z <sub>3</sub>	0.36

Π. 1.2 : Τιμές  $\alpha_{gR}/g$

Η τιμή αναφοράς  $\alpha_{gR}$  της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης για έδαφος κατηγορίας Α αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς  $T_{NRC} = 475$  έτη, όπου  $T_{NRC}$  είναι η περίοδος επανάληψης της σεισμικής δράσης που ικανοποιεί το κριτήριο της μη-κατάρρευσης (η περίοδος επανάληψης  $T_{NRC}$  καθορίζεται από την πιθανότητα μη υπέρβασης  $P_{NRC}$  σε 50 έτη). Για διαφορετικές περιόδους επανάληψης ορίζεται συντελεστής σπουδαιότητας  $\gamma_i$  και η επιτάχυνση σχεδιασμού για έδαφος Α προκύπτει από τη σχέση:

$$\alpha_g = \gamma_i * \alpha_{gR} \quad (1.2)$$

Για το συντελεστή σπουδαιότητας ορίζονται τέσσερις κατηγορίες I, II, III και IV. Η κατηγοριοποίηση των κτιρίων στις τέσσερις κατηγορίες δίνεται από τον επόμενο πίνακα μαζί με το συντελεστή  $\gamma_i$  σε κάθε κατηγορία.

Κατηγορία σπουδαιότητας	$\gamma_i$	Περιγραφή
I	0.80	Κτίρια δευτερεύουσας σημασίας για τη δημόσια ασφάλεια, π.χ. γεωργικά κτίρια κλπ.
II	1.00	Συνήθη κτίρια που δεν ανήκουν στις άλλες κατηγορίες
III	1.20	Κτίρια των οποίων η σεισμική ασφάλεια είναι σημαντική, λαμβάνοντας υπόψη τις συνέπειες κατάρρευσης, π.χ. σχολεία, αίθουσες συνάθροισης, πολιτιστικά ιδρύματα κλπ.
IV	1.40	Κτίρια των οποίων η ακεραιότητα κατά τη διάρκεια σεισμών είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία των πολιτών, π.χ. νοσοκομεία, πυροσβεστικοί σταθμοί, σταθμοί παραγωγής ενέργειας κλπ.

Π. 1.3 : Κατηγορίες Σπουδαιότητας για κτήρια

Στην παρούσα ανάλυση, η μελέτη αφορούσε εδαφικές στρώσεις μονής στρωματογραφίας για καθεμία από τις κατηγορίες A, B, C και D με πάχος στρώσης 30m πάνω από το βραχώδες υπόβαθρο και για κατηγορία σπουδαιότητας II ( $\gamma_i = 1.00$ ). Οι τιμές για τις παραμέτρους  $V_s$  και  $\gamma$  επιλέχθηκαν αντιστοιχίζοντας κάθε κατηγορία εδάφους με ένα συγκεκριμένο εδαφικό προφίλ. Για τα μοντέλα μεταβολής του παράγοντα απόσβεσης  $\xi$  (Damping Model) και του λόγου μέτρων διάτμησης  $G/G_{max}$  ( $G/G_{max}$  Model) συναρτήσεως της αύξησης της διατμητικής παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες Vucetic & Dobby για διαφορετικές τιμές του δείκτη πλαστιμότητας PI. Οι τιμές αυτές συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Τύπος Εδάφους	Εδαφικό προφίλ	Ταχύτητα Διάδοσης Διατμητικών Κυμάτων $V_s$ (m/s)	Ειδικό Βάρος $\gamma$ ( $kN/m^3$ )	Δείκτης Πλαστιμότητας PI
Βραχώδες υπόβαθρο	Βράχος	1000	22	
A	Βραχώδης σχηματισμός	810	21	0
B	Πυκνή Άμμος	500	18	0
C	Σκληρή Άργιλος	300	15	15
D	Μαλακή Άργιλος	110	18	200

Π. 1.4 : Τιμές παραμέτρων  $\gamma$  και  $V_s$

Τα ελαστικά φάσματα που αφορούσαν την επιφάνεια των τεσσάρων διαφορετικών κατηγοριών εδαφικών στρώσεων έπρεπε να συγκριθούν με τα αντίστοιχα του κανονισμού. Η ελαστική επιτάχυνση σχεδιασμού σε κάθε περιοχή υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2.5 - 1) \right] \quad \text{για } 0 \leq T \leq T_B \quad (1.3.a)$$

$$S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \quad \text{για } T_B \leq T \leq T_C \quad (1.3.β)$$

$$S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C}{T} \quad \text{για } T_C \leq T \leq T_D \quad (1.3.γ)$$

$$S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \quad \text{για } T_D \leq T \leq 4 \text{ sec} \quad (1.3.δ)$$

όπου

$$\alpha_g = \gamma_i \cdot \alpha_{gR}$$

$S$  = συντελεστής εδάφους σύμφωνα με τον Πίνακα Π. 1.5

$T_B$  = περίοδος που αντιστοιχεί στην αρχή της περιοχής σταθερής φασματικής επιτάχυνσης και η τιμή της προκύπτει σύμφωνα με τον Πίνακα Π. 1.5 ανάλογα με την κατηγορία εδάφους

$T_C$  = περίοδος που αντιστοιχεί στο τέλος της περιοχής σταθερής φασματικής επιτάχυνσης και την αρχή της περιοχής σταθερής φασματικής ταχύτητας. Η τιμή της προκύπτει σύμφωνα με τον Πίνακα Π. 1.5 ανάλογα με την κατηγορία εδάφους

$T_D$  = περίοδος που αντιστοιχεί στο τέλος της περιοχής σταθερής φασματικής ταχύτητας και την αρχή της περιοχής σταθερής φασματικής μετακίνησης. Η τιμή προκύπτει σύμφωνα με τον Πίνακα Π. 1.5

$\eta$  = συντελεστής απόσβεσης. Για  $\zeta=5\%$  τίθεται  $\eta=1$ , δηλαδή οι παραπάνω σχέσεις αντιστοιχούν σε απόσβεση  $\zeta=5\%$ . Για διαφορετικές τιμές απόσβεσης, η τιμή του  $\eta$  υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \zeta}} \geq 0.55 \quad (1.4)$$

Ο ΕΚ8 προβλέπει δύο τύπους ελαστικού φάσματος σχεδιασμού, τύπου 1 και τύπου 2, στους οποίους ισχύουν διαφορετικές τιμές για τις χαρακτηριστικές περιόδους  $T_B$ ,  $T_C$  και  $T_D$  και το συντελεστή εδάφους  $S$ . Σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα, στην Ελλάδα εφαρμόζεται το φάσμα τύπου 1 με τις τιμές των χαρακτηριστικών περιόδων και του συντελεστή εδάφους  $S$  όπως δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

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

**Π. 1.5 :** Τιμές χαρακτηριστικών περιόδων και συντελεστή εδάφους για την οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης

## 1.2 Μέσα ανάλυσης

Κατά τη διεξαγωγή της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν ως βασικά εργαλεία τα εξής δύο λογισμικά προγράμματα: Strata και Seismosignal.

Το πρόγραμμα Strata χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή αποτελεσμάτων που αφορούσαν τόσο το βραχώδες υπόβαθρο όσο και την επιφάνεια, διαφορετικής κάθε φορά κατηγορίας, εδάφους ( A, B, C και D). Πιο συγκεκριμένα, εισάγοντας αρχικά τις εδαφικές παραμέτρους και έπειτα τα δεδομένα κάθε καταγραφής από τα 86 σεισμικά γεγονότα που μελέτησε ο Baker εξήχθησαν :

- Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης σε βάση και επιφάνεια
- Ελαστικά φάσματα απόκρισης επιτάχυνσης για βάση και επιφάνεια
- Ποσοστό φασματικών τιμών επιταχύνσεων στην επιφάνεια προς τις αντίστοιχες φασματικές τιμές επιτάχυνσης στη βάση κλπ.

Το πρόγραμμα Seismosignal της εταιρείας Seismosoft χρησιμοποιήθηκε ομοίως για την εξαγωγή χρονοϊστοριών επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης για τις ίδιες σεισμικές καταγραφές.

Τα παραπάνω μελετήθηκαν για ποσοστό απόσβεσης 5%.

Τέλος, όλα τα παραπάνω αποτελέσματα επεξεργάστηκαν και μορφοποιήθηκαν σε διαγράμματα για ευκολότερη οπτική ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος Excel του Microsoft Office.



## **Κεφάλαιο 2**

### **Εδαφική κίνηση κοντινού πεδίου**



## 2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες και οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τα φαινόμενα παλμικής εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου λόγω σεισμικής διέγερσης. Αρχικά, παρατίθενται οι τρεις βασικοί μηχανισμοί διάρρηξης και τα αντίστοιχα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους. Ακολούθως, αναλύεται το φαινόμενο της κατευθυντικότητας ενός παλμού, μελετώντας τον τρόπο δημιουργίας και μετάδοσής του, αλλά και οι διαφοροποιήσεις που παρουσιάζει ως προς την επιρροή που ασκεί σε περιοχές με διαφορετικές σχετικές θέσεις ως προς την επιφάνεια του ρήγματος. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στις βασικές παραμέτρους που διέπουν το φαινόμενο της κατευθυντικότητας, με βάση διατυπώσεις και εκτεταμένες μελέτες ερευνητών που ασχολήθηκαν με την κατανόηση και ερμηνεία του εν λόγω φαινομένου.

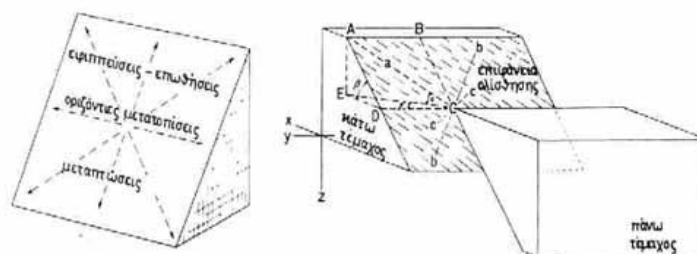
## 2.2 Ρήγματα

### 2.2.1 Γενικά

Με τον όρο ρήγμα (*fault*) καλείται στην επιστήμη της Γεωλογίας η διακοπή της συνέχειας μιας ομάδας στρωμάτων πετρωμάτων του στερεού φλοιού της Γης, που συμβαίνει κατά επίπεδη επιφάνεια και σε μεγάλη έκταση. Οφείλεται κυρίως στις ορογενετικές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών. Όταν, λόγω των κινήσεων αυτών, οι τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα ή περισσότερα στρώματα υπερβούν το όριο θραύσης του, τότε παρατηρείται διάρρηξη του πετρώματος και πυροδοτείται σχετική κίνηση μεταξύ των δύο εκατέρωθεν τμημάτων κατά μήκος μιας συγκεκριμένης επιφάνειας ολίσθησης.

### 2.2.2 Βασικοί τύποι ρηγμάτων

Τα ρήγματα διακρίνονται σε κατηγορίες με βάση τις διευθύνσεις των μετατοπίσεων που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα κατά μήκος μιας ρηξιγενούς επιφάνειας

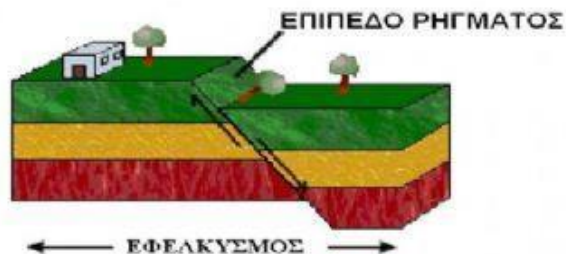


**Εικ. 2.1:** Οι δυνατές μετατοπίσεις κατά μήκος μιας κεκλιμένης ρηξιγενούς επιφάνειας (Brinkmann, 1972).

Πιο συγκεκριμένα, ο τρόπος κίνησης των επιμέρους τμημάτων του γεωλογικού σχηματισμού εκατέρωθεν του ρήγματος οδηγεί στη διάκριση τους σε δύο βασικές κατηγορίες:

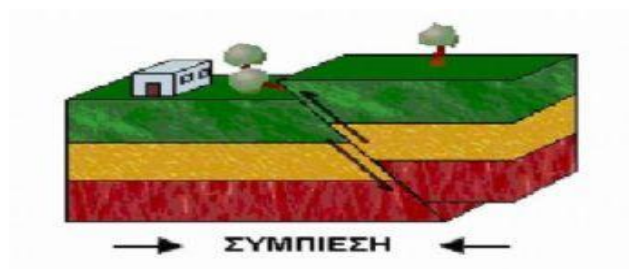
(1) Ρήγματα Κεκλιμένης ολίσθησης ή κατακόρυφης βύθισης (Dip-Slip fault) και ανάλογα με την κίνηση του άνω τεμάχους προκύπτουν οι ακόλουθες υποκατηγορίες:

- Κανονικά ρήγματα/ Ρήγματα εκτάσεως/ απομακρύνσεως (Normal Faults) : Σε αυτή την περίπτωση το υπερκείμενο τέμαχος ολισθαίνει προς τα κάτω με αποτέλεσμα τα δύο τεμάχη να απομακρύνονται υπό καθεστώς εφεκλυστικών τάσεων (Μετάπτωση).

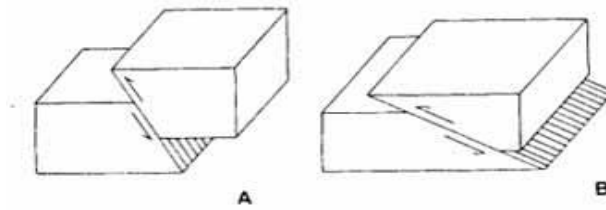


Εικ. 2.2: Κανονικό Ρήγμα

- Ανάστροφα ρήγματα / Ρήγματα σμίκρυνσης (Reverse fault): Το υποκείμενο τέμαχος ωθείται προς τα κάτω, επομένως τα δύο τεμάχη πλησιάζουν υπό καθεστώς θλιπτικών τάσεων. Αποτέλεσμα της δράσης αυτών, ανάλογα με τη γωνία κλίσης του ρήγματος, είναι η δημιουργία επιπτώσεων ( $>45^\circ$ ) και επωθήσεων ( $<45^\circ$ ). Μπορεί επίσης να παρατηρηθούν φαινόμενα κίνησης μόνο του κάτω τεμάχους (υπόθεση- υποθητικό ρήγμα), λεπιώσεις και τεκτονικά καλύμματα.

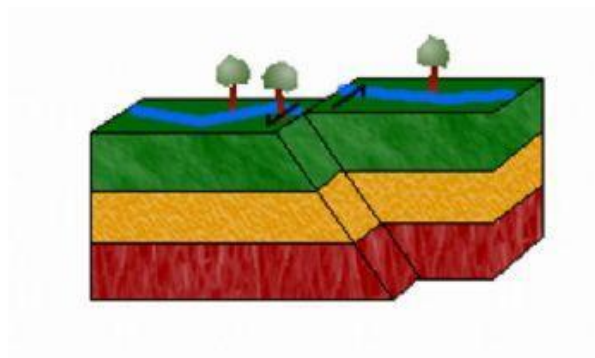


Εικ. 2.3 : Ανάστροφο Ρήγμα



**Εικ. 2.4 :** Α. Εφιππευτικού χαρακτήρα ανάστροφο ρήγμα ( $> 45^\circ$ )  
 Β. Επωθητικού χαρακτήρα ανάστροφο ρήγμα ( $< 45^\circ$ )

(2) Ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης / Διατμητικά ρήγματα (Strike-slip fault) : προκαλούν οριζόντια μετατόπιση των εκατέρωθεν της κατακόρυφης, εντός του πετρώματος, ρηξιγενούς επιφάνειας τμημάτων του γεωλογικού σχηματισμού λόγω κυρίως συμπιεστικών και λιγότερο εφελκυστικών τάσεων (διατμητικό πεδίο τάσεων). Διακρίνονται ανάλογα με τη φορά προς την οποία ολισθαίνουν τα επιμέρους τεμάχια σε *Δεξιόστροφα (Dextral strike-slip faults)* και *Αριστερόστροφα (Sinistral strike-slip faults)*.



**Εικ. 2.5 :** Ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης

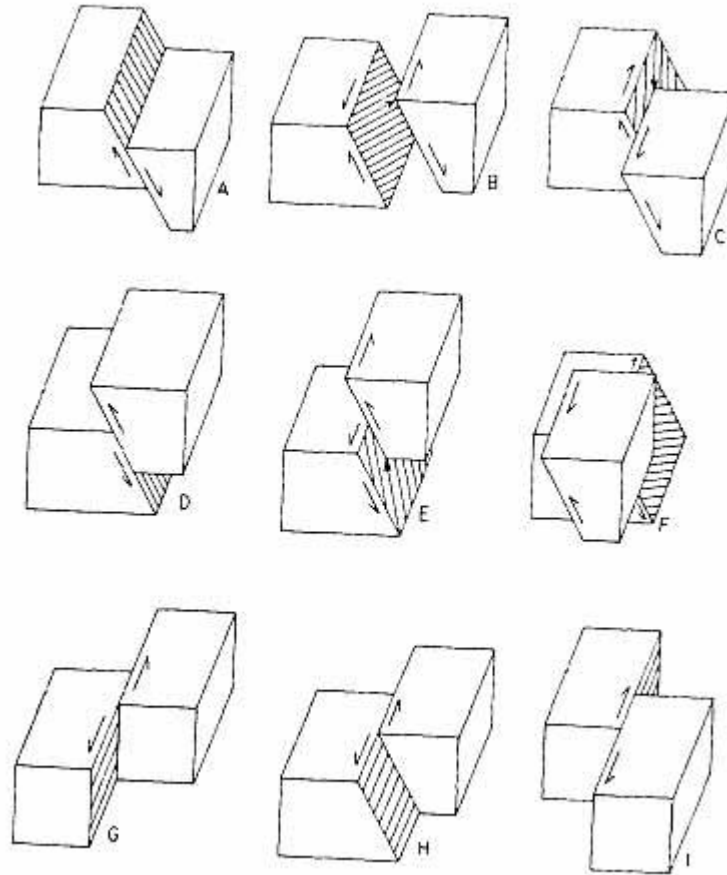


(α)

(β)

**Εικ. 2.6 :** α) Δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης, β) Αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης.

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



**Εικ. 2.7 :** Οι κυριότεροι τύποι των ρηγμάτων: *A.* κανονικό ρήγμα, *B.* πλάγιο κανονικό ρήγμα αριστερόστροφο, *C.* πλάγιο κανονικό ρήγμα δεξιόστροφο, *D.* ανάστροφο ρήγμα. *E.* πλάγιο ανάστροφο ρήγμα αριστερόστροφο. *F.* πλάγιο ανάστροφο ρήγμα δεξιόστροφο, *G.* ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με κατακόρυφη ρηξιγενή επιφάνεια αριστερόστροφο, *H.* ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με κεκλιμένη ρηξιγενή επιφάνεια αριστερόστροφο, *I.* ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με κατακόρυφη ρηξιγενή επιφάνεια δεξιόστροφο.

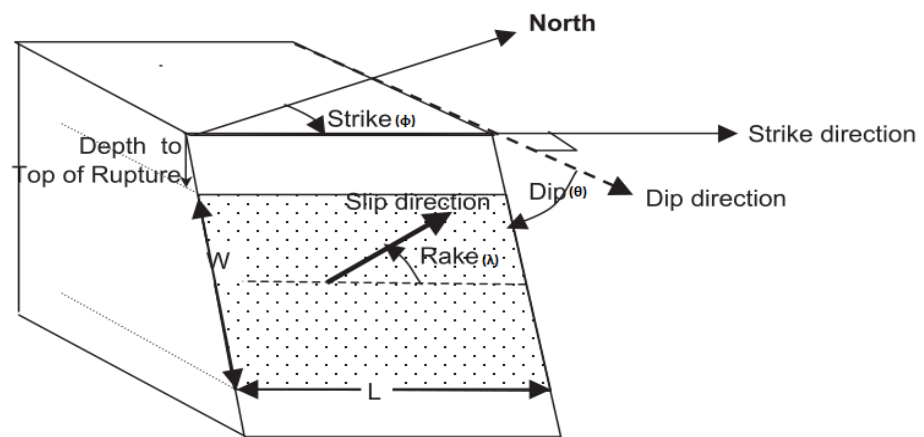
### 2.2.3 Γεωμετρία ρήγματος

Η τομή του επιπέδου του ρήγματος με ένα οριζόντιο επίπεδο ονομάζεται *ίχνος του ρήγματος* με θετική φορά προς τα δεξιά όταν παρατηρούμε το ρήγμα από την άνω πλευρά. Βασικές γεωμετρικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για το χαρακτηρισμό ενός ρήγματος είναι η *γωνία διεύθυνσης  $\varphi$*  καθώς και η *γωνία βύθισης ή κλίση*. Με τον όρο *γωνία διεύθυνσης  $\varphi$  (Strike)* καλείται η δεξιόστροφη γωνία μεταξύ του γεωγραφικού Βορρά και της θετικής φοράς του ίχνους του ρήγματος. Η τιμή της κυμαίνεται εντός του συνόλου  $[0^\circ, 360^\circ]$ . Η *γωνία βύθισης ή κλίση ( $Dip$ )* είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο οριζόντιο επίπεδο και στο επίπεδο του ρήγματος και λαμβάνει τιμές έως  $90^\circ$ .

Επιπλέον σημαντικά μεγέθη θεωρούνται οι διαστάσεις του ρήγματος που μετρώνται σε χιλιόμετρα επάνω στο επίπεδο της διάρρηξης. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για το μήκος  $L$  του ρήγματος που υπολογίζεται παράλληλα προς τη διεύθυνση Strike καθώς και το πλάτος  $W$  αυτού που μετράται επί της επιφάνειας του ρήγματος από το ανώτερο ως το κατώτερο τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης.

Για την αναγνώριση του μηχανισμού διάρρηξης (Rupture mechanism) εισάγεται ένα επιπρόσθετο μέγεθος που καλείται γωνία ολίσθησης  $\lambda$  (Rake). Πρόκειται για την αριστερόστροφη γωνία που μετράται μεταξύ της θετικής φοράς του ίχνους του ρήγματος και του διανύσματος ολίσθησης. Λαμβάνει τιμές εντός του συνόλου  $[-180^\circ, 180^\circ]$  και δίνει τη δυνατότητα χαρακτηρισμού της σχετικής μετακίνησης του άνω ως προς το κάτω τμήμα του ρήγματος.

Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση των εν λόγω παραμέτρων :



Εικ. 2.8 : Γεωμετρικές παράμετροι ενός ρήγματος (NGA Database Documentation File)

Αξιοσημείωτα μεγέθη κατά τη μελέτη ενός σεισμικού γεγονότος αποτελούν η εστία του σεισμού και το επίκεντρο. *Εστία του σεισμού* ή *υπόκεντρο* καλείται το σημείο της επιφάνειας του ρήγματος από το οποίο πυροδοτείται η διάρρηξη ενώ *επίκεντρο* καλείται η οριζόντια προβολή αυτού του σημείου στην επιφάνεια της Γής και προσδιορίζεται είτε μικροσεισμικά, μέσω ενόργανων σεισμολογικών μετρήσεων είτε μακροσεισμικά από παρατηρήσεις. Τέλος, η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ υποκέντρου και επίκεντρου ονομάζεται *εστιακό βάθος*.



Εικ. 2.9 : Εστία, επίκεντρο και εστιακό βάθος

Κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος εκλύεται ενέργεια μέτρο της οποίας αποτελεί το παραγόμενο κατά τη διάρκεια ολίσθησης έργο. Ορίζεται έτσι η σεισμική ροπή ως το γινόμενο του εμβαδού της επιφάνειας διαρρήξεως επί το μέτρο διάτμησης του υλικού του φλοιού επί την ολίσθηση του ρήγματος.

$$M_0 = A \cdot G \cdot \delta = (L \cdot W) \cdot G \cdot \delta \quad \text{σε (κN*m)} \quad (2.1)$$

Το μέγεθος σεισμικής ροπής ορίζεται με τη βοήθεια της σεισμικής ροπής ως :

$$M_w = 2/3 \cdot \log M_0 - 6 \quad (2.2)$$

### 2.3 Φαινόμενα κατευθυντικότητας

Οι εδαφικές κινήσεις κοντά στην περιοχή διάρρηξης δύναται να διαφοροποιούνται σημαντικά σε σύγκριση με περιοχές που βρίσκονται αρκετά μακριά από την πηγή του σεισμικού γεγονότος (ρήγμα). Ορίζεται λοιπόν μια ζώνη, που ονομάζεται *κοντινό πεδίο* (*Near Fault Zone / Near Field Zone*), σε απόσταση περίπου 20- 60 km από την περιοχή διαρρήξεως. Εντός αυτής της ζώνης επικεντρώνονται οι βλάβες κατά τη διάρκεια του σεισμού και οι εδαφικές κινήσεις επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό από :

- Το μηχανισμό διάρρηξης
- Την κατεύθυνση μετάδοσης της διάρρηξης σχετικά με την εξεταζόμενη τοποθεσία και
- Τη πιθανή μόνιμη εδαφική μετακίνηση ως αποτέλεσμα της ολίσθησης του ρήγματος.

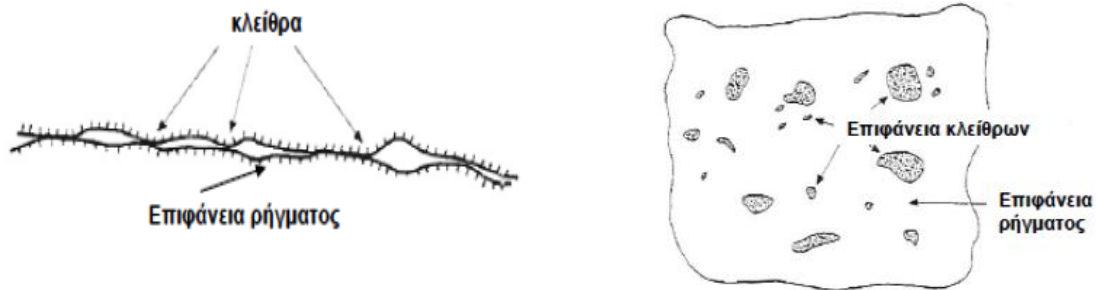
Οι παράγοντες που προαναφέρθηκαν οδηγούν στη εκδήλωση των εξής φαινομένων : “*Κατευθυντικότητα της Διάρρηξης*” (*Rupture-Directivity*) & “*Μόνιμη Στατική Παραμόρφωση*” (*Fling Step*). Σαφώς, για την εκτίμηση του εδαφικών κινήσεων πλησίον ενός ενεργού ρήγματος θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα παραπάνω φαινόμενα στα εδαφικά προσομοιώματα.

#### 2.3.1 Κατευθυντικότητα διάρρηξης

Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας παρουσιάζει τρεις διαφορετικές εκφάνσεις ανάλογα με τη σχετική διεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης ως προς την εξεταζόμενη τοποθεσία. Αρχικά, υπάρχει η *Έμπροσθεν Κατευθυντικότητα* (*Forward Directivity*) που λαμβάνει χώρα όταν η διάρρηξη μεταδίδεται προς μια τοποθεσία και η κατεύθυνση ολίσθησης του ρήγματος κλίνει και αυτή προς την ίδια τοποθεσία. Τότε παρουσιάζεται ένα φαινόμενο αντίστοιχο με το γνωστό από την επιστήμη της Φυσικής *φαινόμενο Doppler*. Η διάρρηξη στις επιμέρους περιοχές του ρήγματος είναι σταδιακή καθώς συνάδει με την θραύση των κλειθρων του ρήγματος. Με τον όρο *κλείθρες* (*asperities*) εννοούνται τα φυσικά εξογκώματα στην επιφάνεια του ρήγματος που διαθέτουν μεγάλη τραχύτητα και παρουσιάζουν σημαντική αντίσταση στη θραύση τους σε σχέση με την υπόλοιπη επιφάνεια του ρήγματος, όπου η διάρρηξη πραγματοποιείται σχετικά εύκολα. Κατά τη διάρκεια κάθε επιμέρους διάρρηξης παράγεται ένας παλμός ταχύτητας που μεταδίδεται ως κύμα S με ταχύτητα ανάλογη προς την ταχύτητα διάρρηξης. Επειδή η ταχύτητα



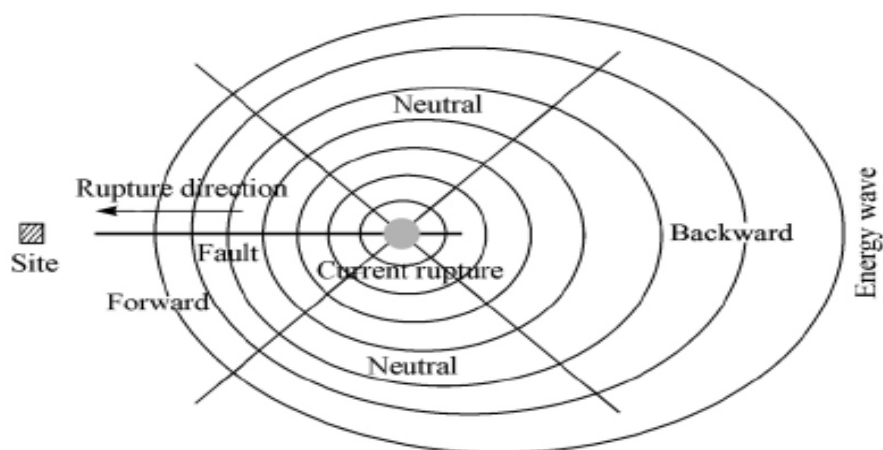
διάδοση της διάρρηξης έχει τιμή πολύ κοντινή (γενικά ελαφρώς μικρότερη) στην τιμή της ταχύτητας διαμητικού κύματος του βράχου κοντά στην πηγή, όταν η διάρρηξη πλησιάζει προς μια τοποθεσία παρατηρείται συμβολή των παλμών ταχύτητας των επιμέρους διαρρήξεων. Δημιουργείται κατ' αυτόν τον τρόπο ένας παλμός ταχύτητας μεγάλου εύρους και μικρής διάρκειας.



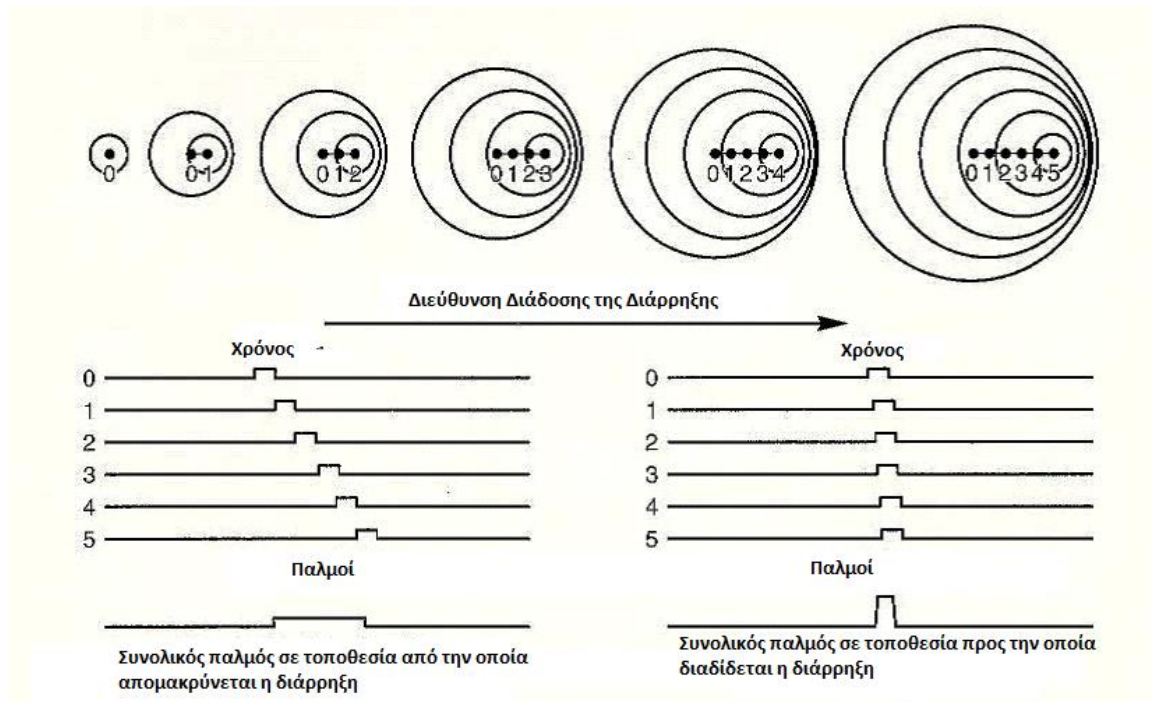
Εικ. 2.10: Κλείθρα στην επιφάνεια ρήγματος (asperities)

Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν η υπό εξέταση τοποθεσία βρίσκεται κοντά στο επίκεντρο, δηλαδή η διάρρηξη μεταδιδόμενη απομακρύνεται από την τοποθεσία, οι παλμοί ακολουθούν ο ένας τον άλλον. Έτσι, προκύπτει μια σειρά παλμών κατανεμημένων ως προς το χρόνο που χαρακτηρίζονται από μικρό εύρος και συνολικά μεγάλη διάρκεια. Πρόκειται για το φαινόμενο της *Όπισθεν κατευθυντικότητας* (*Backward Directivity*).

Επίσης, υπάρχει και η *Ουδέτερη Κατευθυντικότητα* (*Neutral Directivity*) για τοποθεσίες εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος οπότε η διάρρηξη δε διαδίδεται ούτε προς ούτε μακριά από αυτές.

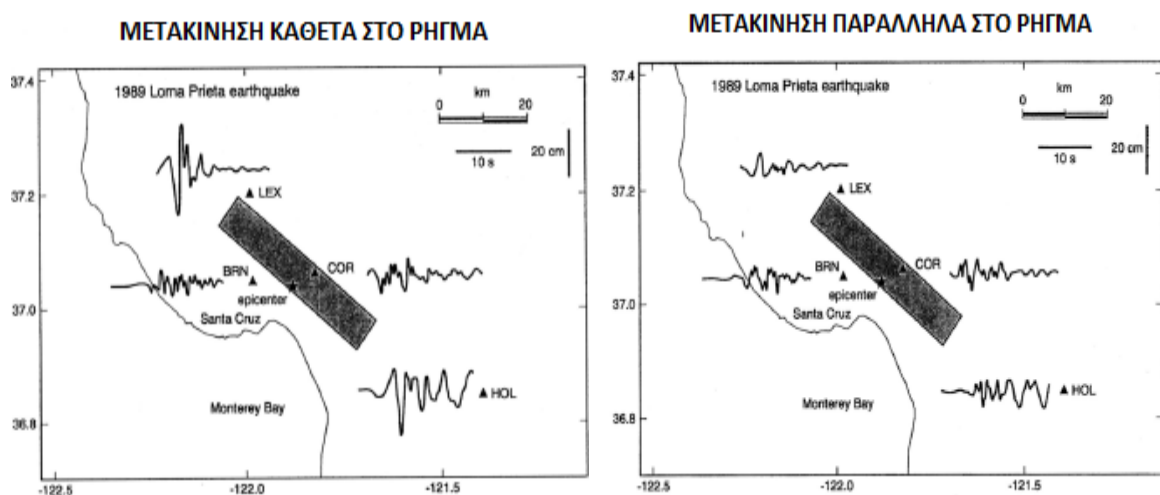


Εικ. 2.11: Οι εκφάνσεις του φαινομένου της κατευθυντικότητας



**Εικ. 2.12:** Σχηματική απεικόνιση : Συμβολή των παλμών στην έμπροσθεν κατευθυντικότητα

Για την κατανόηση των επιπτώσεων της *Κατευθυντικότητας Διαρρήξεως* στις εδαφικές μετακινήσεις παρατηρούνται οι καταγραφές κατά τη διάρκεια του σεισμού Loma Prieta εν έτει 1989. Στο επίκεντρο του σεισμού, εξαιτίας της όπισθεν κατευθυντικότητας, οι οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις είναι μέτριες τόσο στην κάθετη όσο και στην παράλληλη προς το ρήγμα συνιστώσα. Αντιθέτως, στα άκρα του ρήματος, η έμπροσθεν κατευθυντικότητα ενισχύει τις οριζόντιες εδαφικές κινήσεις κάνοντας τις περισσότερο παλμικές αλλά και έντονότερες στην κάθετη συνιστώσα απ' ότι στην παράλληλη. Επομένως, οι έντονες παλμικές κινήσεις εμφανίζονται μόνο μακριά από το επίκεντρο και μόνο στην κάθετη προς το ρήγμα διεύθυνση.

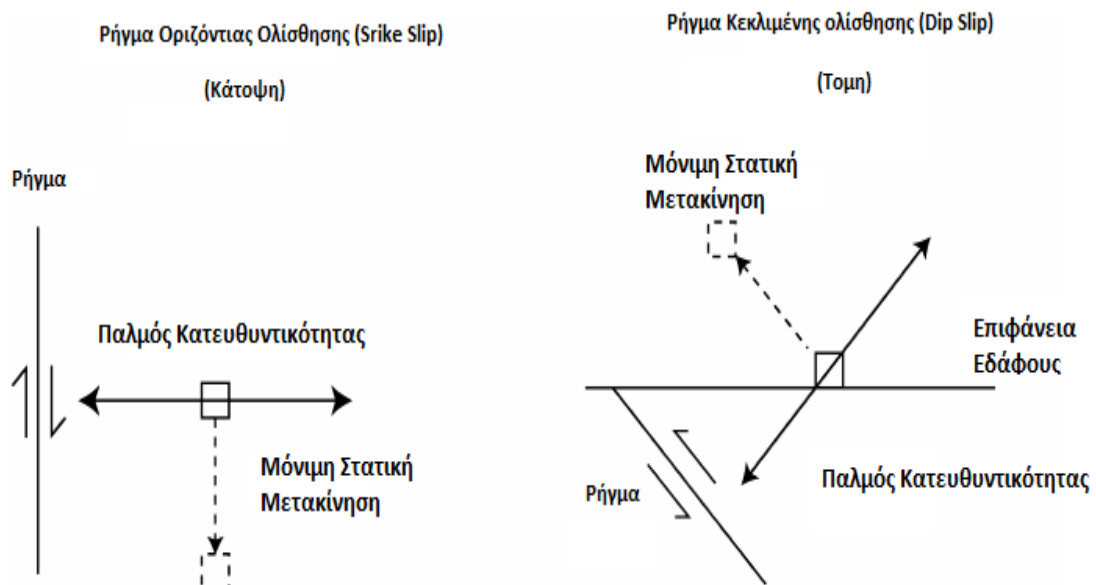


**Εικ. 2.13 :** Φαινόμενα Κατευθυντικότητας Διαρρήξεως μέσα από καταγεγραμμένες χρονιστορίες μετατόπισης για το σεισμό Loma Prieta 1989, για την κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση (αριστερά) και για την παράλληλη στο ρήγμα διεύθυνση (δεξιά). Πηγή: EERI, 1995

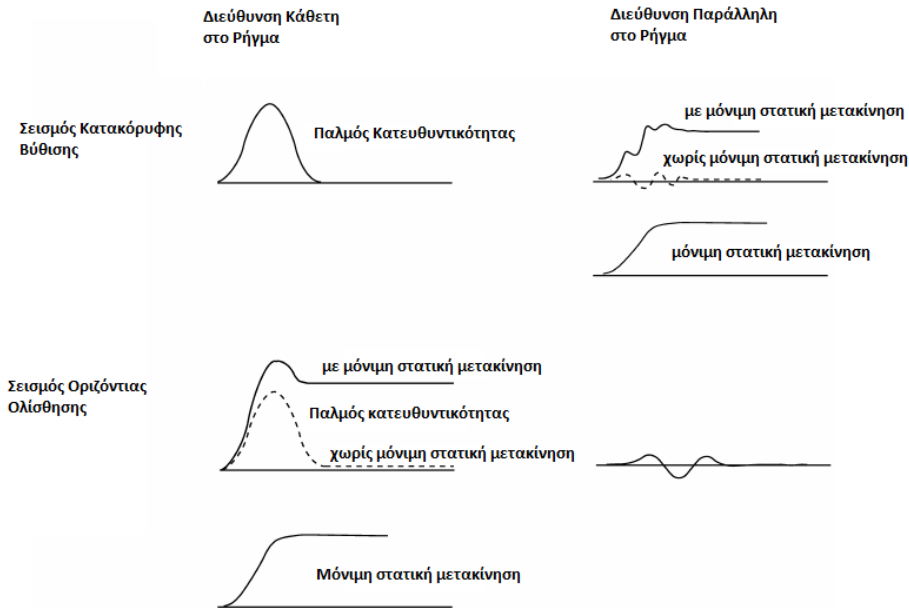
Τα φαινόμενα κατευθυντικότητας διαρρήξεως μπορούν να εντοπιστούν τόσο σε ρήγματα κεκλιμένης (dip-slip) όσο και σε ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης (strike-slip). Μάλιστα, στα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης, η έμπροσθεν κατευθυντικότητα εμφανίζεται σε τοποθεσίες που βρίσκονται κοντά στο ανερχόμενο τέμαχος. Όπως και στους μηχανισμούς οριζόντιας ολίσθησης, η διάδοση της διατμητικής μετατόπισης σε ένα ανάστροφο ρήγμα προκαλεί τον παλμό της κίνησης στη διεύθυνση που είναι κάθετη στη διάρρηξη του ρήγματος.

### 2.3.2 Μόνιμη στατική μετακίνηση

Σύγχρονες ψηφιακές καταγραφές εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, περιέχουν τις μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις που οφείλονται στη στατική αποδόμηση του πεδίου λόγω του σεισμού. Αυτές οι στατικές μετακινήσεις, για τις οποίες χρησιμοποιείται ο όρος “fling step” συμβαίνουν εντός ενός διακριτού χρονικού διαστήματος αρκετών δευτερολέπτων καθώς αναπτύσσεται η ολίσθηση του ρήγματος. Το φαινόμενο αυτό εκδηλώνεται στην κατεύθυνση ολίσθησης του ρήγματος και διαφοροποιείται αρκετά από το δυναμικό φαινόμενο της κατευθυντικότητας που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Πιο ξεκάθαρα, για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, ο παλμός κατευθυντικότητας συμβαίνει στην κάθετη ως προς το ρήγμα συνιστώσα ενώ η μόνιμη μετακίνηση παρατηρείται στην παράλληλη προς το ρήγμα συνιστώσα. Από την άλλη, για τα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης και τα δύο φαινόμενα εκδηλώνονται στην κάθετη προς το ρήγμα συνιστώσα. Ακολουθούν σχηματικές απεικονίσεις του προσανατολισμού εκδήλωσης των φαινομένων για τους δυο διαφορετικούς τύπους ολίσθησης καθώς και διαγράμματα χρονοϊστοριών όπου τα δύο φαινόμενα παρουσιάζονται μεμονωμένα και ξεχωριστά.



**Εικ. 2.14:** Σχηματική απεικόνιση του προσανατολισμού της μόνιμης εδαφικής μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγματα κεκλιμένης και οριζόντιας ολίσθησης



**Εικ. 2.15:** Σχηματική απεικόνιση των χρονιοιστοριών για ρήγματα κεκλιμένης και οριζόντιας ολίσθησης στις οποίες η μόνιμη στατική μετακίνηση και παλμός κατευθυντικότητας απεικονίζονται μαζί και μεμονωμένα

## 2.4 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου

### 2.4.1 Οι συνθήκες εκδήλωσης του φαινομένου

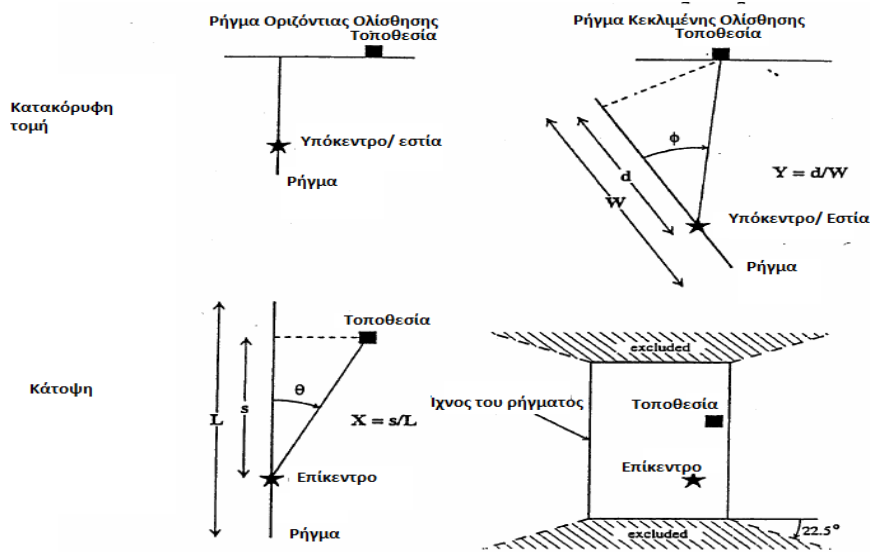
Οι Sommerville et al. (1997a) παραμετροποίησαν τις συνθήκες που οδηγούν στην εκδήλωση των φαινομένων έμπροσθεν και όπισθεν κατευθυντικότητας. Η χωρική παρέκκλιση των φαινομένων κατευθυντικότητας εξαρτάται από :

- (1) Τη γωνία ανάμεσα στη διεύθυνση διάδοσης της ρήξης και τη διεύθυνση των κυμάτων που ταξιδεύουν από το ρήγμα στην υπό εξέταση τοποθεσία (γωνία  $\theta$  για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και γωνία  $\varphi$  για ρήγματα κεκλιμένης ολίσθησης)
- (2) Το κλάσμα της ρηξιγενούς επιφάνειας που κείται μεταξύ του υποκέντρου και της εξεταζόμενης τοποθεσία ( $X$  για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και  $Y$  για ρήγματα κεκλιμένης ολίσθησης)

Αξίζει να σημειωθεί ότι η έμπροσθεν κατευθυντικότητα εκδηλώνεται για μικρές γωνίες  $\theta$  και  $\varphi$  και για μεγάλες τιμές κλασμάτων  $X$  και  $Y$ . Επίσης, υπάρχει πιθανότητα, ενώ ικανοποιούνται τα παραπάνω γεωμετρικά κριτήρια να μην εκδηλώνονται φαινόμενα κατευθυντικότητας. Παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων είναι τα ακόλουθα:

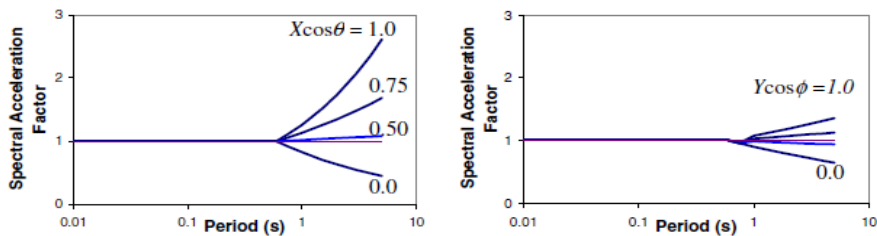
- ένας σταθμός καταγραφών που βρίσκεται στο πέρας του ρήγματος και η διάρρηξη εκδηλώνεται προς το σταθμό αλλά η ολίσθηση συγκεντρώνεται κοντά στο πέρας του ρήγματος όπου βρίσκεται ο σταθμός
- όταν σε μία τοποθεσία η μεμονωμένη θραύση κλείθρων δημιουργεί ισχυρούς παλμούς ταχύτητας
- σε πολύπλοκους εδαφικούς σχηματισμούς, όπως το άκρο μιας γεωλογικής λεκάνης, όπου είναι πιθανή η συμβολή των σεισμικών

κυμάτων στη δομή του εδάφους κατά τη διέλευσή τους από αυτό καθώς και η δημιουργία παλμών ταχύτητας (basin effects)

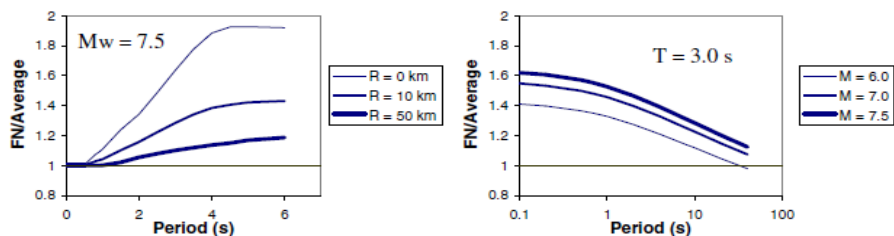


Εικ. 2.16: Παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον ορισμό των συνθηκών εκδήλωσης κατευθυντικότητας διάρρηξης

Οι Somerville et al. (1997a) συσχέτισαν τα κατάλοιπα των φασματικών συντεταγμένων απόκρισης (για απόσβεση 5%) με τις προαναφερθείσες γεωμετρικές παραμέτρους. Οι προβλέψεις τους φαίνονται στα ακόλουθα διαγράμματα.



(α) Μέση αναλογία φασματικής απόκρισης εξαρτώμενη από την περίοδο και τις παραμέτρους κατευθυντικότητας



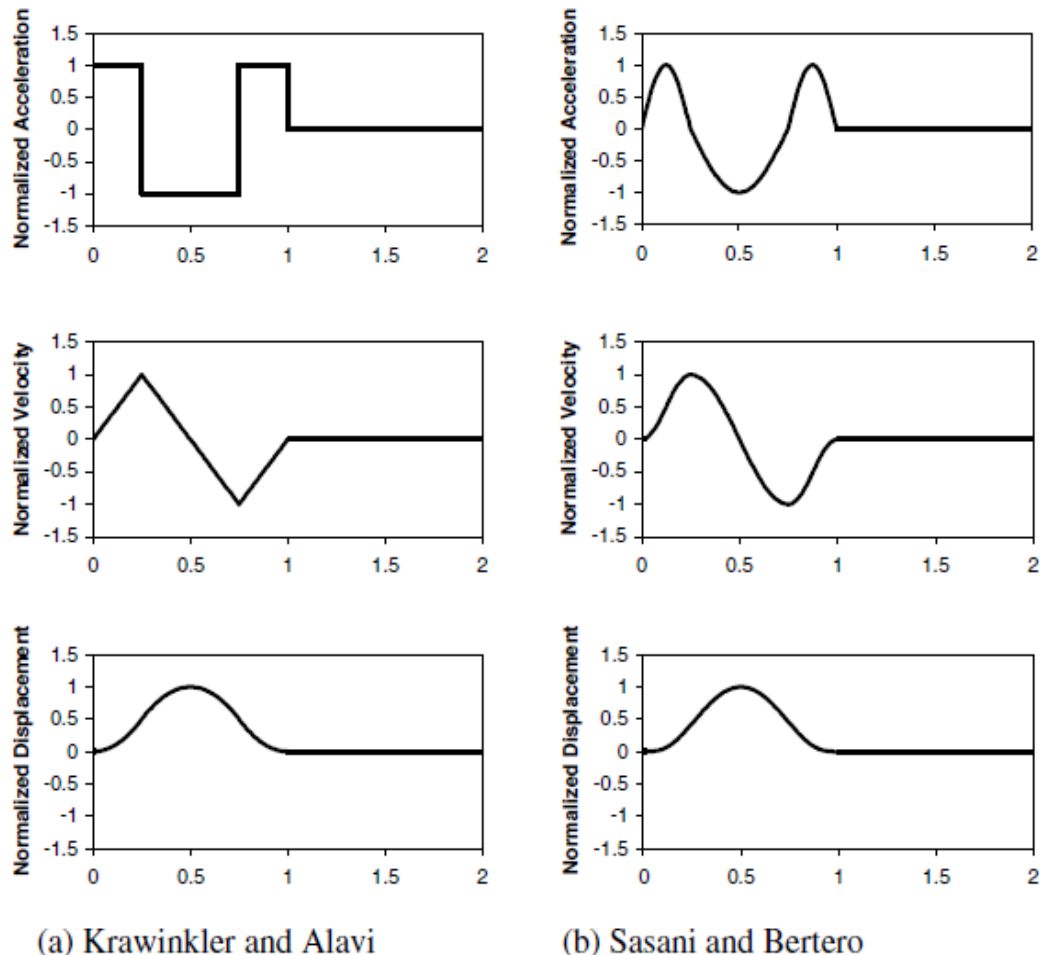
(β) Αναλογία οριζόντιας φασματικής απόκρισης κάθετη στη διάρρηξη προς τη μέση οριζόντια για συνθήκες μέγιστης έμπροσθεν κατευθυντικότητας ( $X \cos \theta = 1$ )

Σχ. 2.17 : Οι προβλέψεις από τη σχέση των Somerville et al (1997a) για διάφορες συνθήκες κατευθυντικότητας

### 2.4.2 Ο παλμός κατευθυντικότητας στη χρονοϊστορία ταχύτητας

Αρχικά, αξίζει να σημειωθεί ότι για τη μελέτη του φαινομένου της κατευθυντικότητας είναι προτιμότερη η απεικόνιση των κινήσεων με μια χρονοϊστορία απ' ό,τι η απεικόνιση με ένα φάσμα απόκρισης. Αυτό συμβαίνει γιατί μέσα σε ένα φάσμα απόκρισης η μελέτη πραγματοποιείται σε ένα πεδίο συχνοτήτων, πράγμα που υπονοεί ότι η ενέργεια είναι σχετικά ομοιογενώς κατανομημένη καθ' όλη τη διάρκεια την κίνησης. Εάν η ενέργεια είναι συγκεντρωμένη σε μερικούς παλμούς της κίνησης, όπως στις υπό εξέταση περιπτώσεις, το φαινόμενο που αναλαμβάνει να αναπαραστήσει το φάσμα απόκρισης μπορεί να μην διαθέτει επαρκή χρόνο ώστε να εκδηλωθεί.

Προγενέστερες μελέτες (Krawinkler & Alavi (1998) και Sasani & Bertero (2000)) έδειξαν ότι απλές απεικονίσεις του παλμού ταχύτητας μπορούν να αιχμαλωτίσουν τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά απόκρισης κατασκευών που υποβλήθηκαν σε εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Μερικοί από αυτούς τους απλοποιημένους παλμούς δίνονται στην ακόλουθη εικόνα.



**Εικ. 2.18:** Απλοποιημένοι Παλμοί που χρησιμοποιήθηκαν από ερευνητές

Οι απλοποιημένες απεικονίσεις ημιτονοειδούς παλμού χρονοϊστοριών ταχύτητας ορίζονται από τα τρία ακόλουθα μεγέθη :

- (1) Τον αριθμό ισοδύναμων ημι- κύκλων
- (2) Την περίοδο καθενός ημικύκλου
- (3) Τα αντίστοιχα πλάτη

Ένας απλός χαρακτηρισμός του παλμού είναι εφικτός με τη χρήση:

- (1) Της κορυφαίας οριζόντιας ταχύτητας (*Peak Horizontal Velocity- PHV*)
- (2) Της περιόδου του δεσπόζοντος παλμού ( $T_v$ )
- (3) Του πλήθους των σημαντικών ημικύκλων της κίνησης για την κάθετη ως προς το ρήγμα διεύθυνση.

Στο σημείο αυτό, καλό θα ήταν να εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο ορίζεται η περίοδος του παλμού. Ο προσδιορισμός της μπορεί να γίνει είτε ως το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων μηδενισμού της ταχύτητας στον άξονα του χρόνου (*zero crossing time*) είτε ως το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η ταχύτητα είναι ίση με το 10% της κορυφαίας ταχύτητας για το συγκεκριμένο παλμό. Είναι προφανές ότι αυτός ο ορισμός χαρακτηρίζεται από υποκειμενικότητα και μπορεί να οδηγήσει σε ποικίλες εκτιμήσεις της  $T_v$ . Ωστόσο, η αβεβαιότητα που συνδέεται με την πρόβλεψη της  $T_v$  από σεισμολογικές παραμέτρους είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τα σφάλματα εκτίμησης της από τη μέθοδο *zero crossing*.

Οι Krawinkler & Alavi (1998) αναγνωρίζουν τον παλμό ταχύτητας ως ένα προφανές και ολικό μέγιστο στο φάσμα απόκρισης ταχύτητας της εδαφικής κίνησης. Όμως η εκτίμηση τη περιόδου του ισοδύναμου παλμού ( $T_{v-p}$ ) είναι σχετικά αμφίβολη.

Για μονοπαλμικές κινήσεις, οι διαφορετικοί αυτοί ορισμοί της περιόδου του παλμού οδηγούν σε ισοδύναμα αποτελέσματα, αλλά για περισσότερο σύνθετες καταγραφές η διαφοροποίηση είναι σημαντική. Η σύμπτωση των  $T_v$  και  $T_{v-p}$  για μια σεισμική εδαφική κίνηση δείχνει ότι ο παλμός ταχύτητας περιέχει ενέργεια σε ένα στενό πεδίο περιόδων.

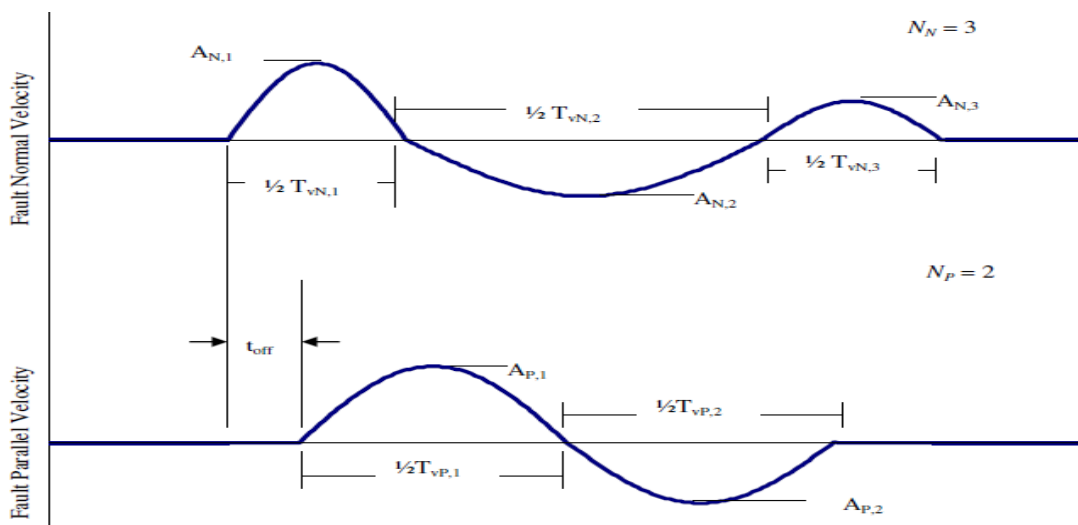
Για την αναπαράσταση κίνησης σε δύο διευθύνσεις, απαιτείται μια επιπλέον ημιτονικού παλμού αναπαράσταση για τη συνιστώσα την παράλληλη προς το ρήγμα καθώς και η χρονική απόκλιση μεταξύ ενάρξεων των συνιστωσών κάθετα και παράλληλα στο ρήγμα ( $t_{off}$ ). Στη συνέχεια ακολουθεί πίνακας και σχεδιάγραμμα με τις παραμέτρους που ορίζουν ένα απλοποιημένο ημιτονικό παλμό.

Παράμετρος	Συμβολισμός	Μεθοδολογία προσδιορισμού της παραμέτρου
Αριθμός σημαντικών παλμών	$N$	Αριθμός ημικύκλων παλμών στην χρονοϊστορία ταχύτητας με πλάτος τουλάχιστον όσο το 50% της αιχμής της εδαφικής ταχύτητας στην καταγραφή



Περίοδος παλμών	$T_{v,i}$	Για κάθε μισό ημιτονικό παλμό, $T_{v,i} = 2(t_2 - t_1)$ , όπου $t_1$ και $t_2$ είναι είτε ο χρόνος μηδενισμού της ταχύτητας, είτε ο χρόνος κατά τον οποίο η ταχύτητα είναι ίση με το 10% της αιχμής της ταχύτητας του παλμού, εάν η τιμή αυτή διαφοροποιείται σημαντικά από την προηγούμενη. $T_v$ που αντιστοιχεί στον παλμό με το μέγιστο πλάτος είναι η συνολική αντιπροσωπευτική περίοδος του παλμού ταχύτητας
Δεσπόζουσα περίοδος από το φάσμα απόκρισης ψευδοταχύτητας	$T_{p-v}$	Περίοδος που αντιστοιχεί το προφανές και ολικό μέγιστο του φάσματος απόκρισης ψευδοταχύτητας για απόσβεση 5%
Πλάτος παλμού	$A_i$	Για κάθε μισό ημιτονικό παλμό, η μέγιστη εδαφική ταχύτητα εντός του χρονικού διαστήματος $[t_1, t_2]$
Αιχμή εδαφικής ταχύτητας	$PHV$	Η μέγιστη ταχύτητα, ορισμένη ως η μέγιστη τιμή των πλατών $A_i$
Λόγος πλατών της παράλληλης προς την κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση	$PHV_{P/N}$	Ορισμένο από το λόγο του μεγίστου $A_p$ προς το μέγιστο $A_N$ , όπου το P αναφέρεται στην παράλληλη στο ρήγμα κίνηση και το N στην κάθετη στο ρήγμα κίνηση αντίστοιχα
Χρονική καθυστέρηση ανάμεσα στους παλμούς της κάθετης και της παράλληλης προς το ρήγμα διεύθυνσης	$t_{off}$	Ο χρόνος έναρξης του παλμού στην παράλληλη προς το ρήγμα διεύθυνση μείον τον χρόνο έναρξης του παλμού στην κάθετη προς το ρήγμα διεύθυνση

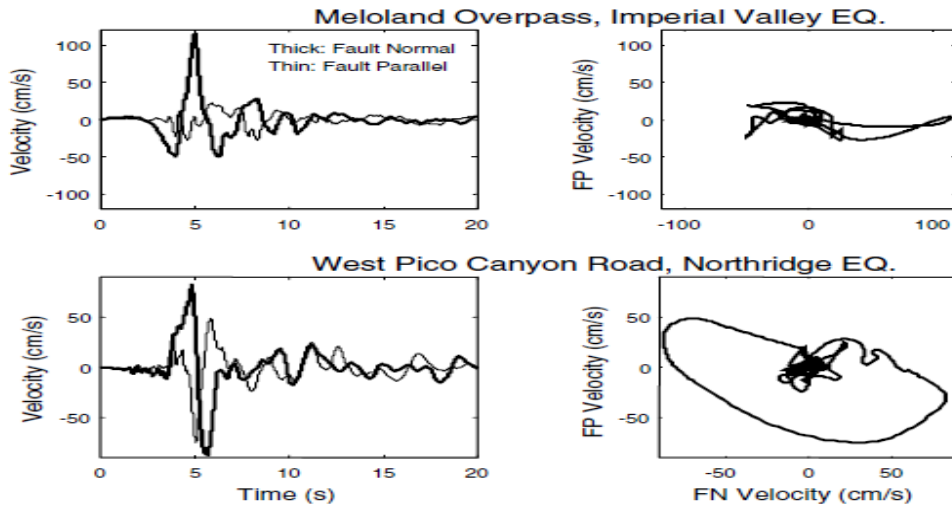
**Π. 2.1 :** Παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον ορισμό των απλοποιημένων ημιτονικού παλμού εδαφικών κινήσεων (Rodriguez- Marek 2000)



**Εικ. 2.19:** Παράμετροι απαιτούμενοι για τον ορισμό των συνιστωσών κάθετα και παράλληλα στο ρήγμα του απλοποιημένου παλμού ταχύτητας ( Rodriguez- Marek 2000)



Γενικά, οι μελέτες απόκρισης των κατασκευών για κινήσεις κοντινού πεδίου εστιάζουν σε φαινόμενα στην μεγαλύτερη – κάθετη στη διεύθυνση του ρήγματος συνιστώσα (Alavi & Krawinkler). Ωστόσο υπάρχουν και περιπτώσεις όπου και η κίνηση στην παράλληλη προς το ρήγμα συνιστώσα μπορεί να αποβεί εξίσου σημαντική. Ενδεικτικά αναφέρεται ως παράδειγμα ότι η μείωση της εδαφικής δυσκαμψίας ως απόκριση στην έντονη κίνηση στην κάθετη προς το ρήγμα συνιστώσα επιτρέπει την ανάπτυξη μεγαλύτερης έντασης στην παράλληλη προς το ρήγμα διεύθυνση. Μάλιστα, μη γραμμικές αναλύσεις της διαξονικής εδαφικής απόκρισης από τους Rodriguez & Marek (2000) οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες δύναται να επηρεάσουν τις τιμές των PHV και  $T_n$  και στις δύο διευθύνσεις.



**Εικ. 2.20 :** Χρονοϊστορίες ταχύτητας στην κάθετη και στην παράλληλη ως προς το ρήγμα διεύθυνση & τροχιακά διαγράμματα της οριζόντιας ταχύτητας για δύο καταγραφές. Οι παράλληλες προς το ρήγμα κινήσεις των δύο καταγραφών διαφοροποιούνται σημαντικά



### **Κεφάλαιο 3**

**Μέθοδος Baker- Ταξινόμηση εδαφικών κινήσεων  
κοντινού πεδίου με χρήση κυματικής ανάλυσης**



### 3.1 Εισαγωγή

#### 3.1.2 Γενικά στοιχεία για τη μέθοδο του Baker

Αρχικά, επισημαίνεται η ανάγκη ποσοτικής αναγνώρισης των εδαφικών κινήσεων που περιέχουν ισχυρούς παλμούς ταχύτητας, όπως εκείνοι που εμφανίζονται ως φαινόμενα κατευθυντικότητας κοντινού πεδίου. Ο καθηγητής Jack W. Baker προτείνει μια μέθοδο ταξινόμησης των εν λόγω κινήσεων που αποβαίνει χρήσιμη σε ζητήματα μηχανικής και σεισμολογίας, όπως η πιθανοτική ανάλυση σεισμικής διακινδύνευσης, η κατάρτιση μοντέλων πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης (Μοντέλα Απόσβεσης ) και η μη γραμμική ανάλυση των κατασκευών. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί κυματική ανάλυση για την αναγνώριση και εξαγωγή του μεγαλύτερου παλμού ταχύτητας μιας δεδομένης εδαφικής κίνησης. Η εδαφική κίνηση ταξινομείται ως “παλμική” έπειτα από σύγκριση του εξαγόμενου παλμού με την αρχική εδαφική κίνηση. Μάλιστα, για να αναγνωριστεί εάν μια συγκεκριμένη παλμική καταγραφή οφείλεται σε φαινόμενα κατευθυντικότητας, εισήχθησαν δύο επιπλέον κριτήρια:

- Ο παλμός πρέπει να “φτάνει” νωρίς κατά την εδαφική κίνηση
- Το απόλυτο πλάτος του παλμού ταχύτητας να είναι “μεγάλο”

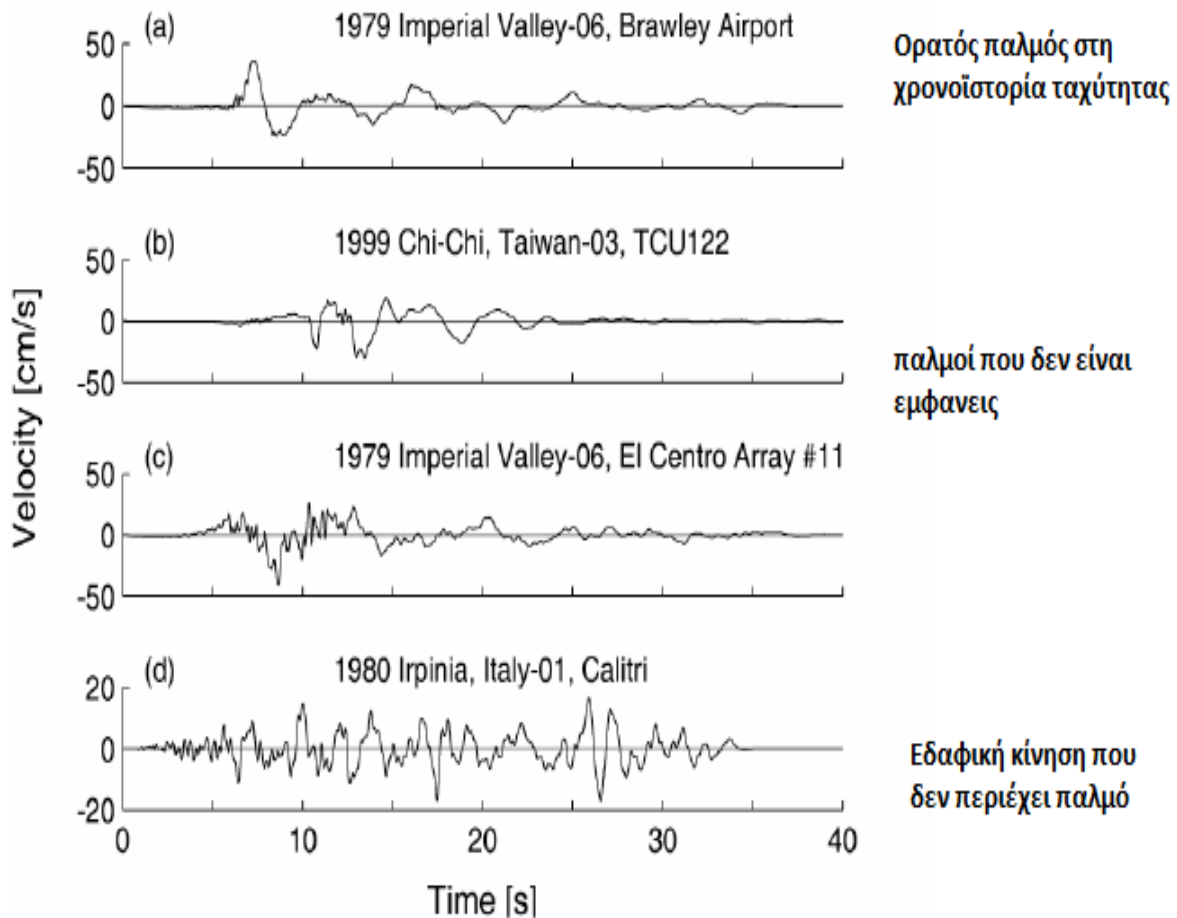
Τα δύο αυτά κριτήρια θα εξηγηθούν περισσότερο αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο. Η διαδικασία αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί είτε ως αυτόνομο κριτήριο ταξινόμησης είτε ως φίλτρο για την αναγνώριση εδαφικών κινήσεων που ενδεχομένως να συνδέονται με φαινόμενα κατευθυντικότητας και χρήζουν πιο προσεκτικής μελέτης.

Σε προγενέστερες μελέτες, οι εδαφικές κινήσεις επιλέγονταν είτε επειδή ήταν ορατός ένας ισχυρός παλμός στη χρονοϊστορία ταχύτητας είτε επειδή η γεωμετρία κοντά στην πηγή υποδείκνυε ότι στη θέση της καταγραφής είναι πιθανό να εμφανιστεί ένας παλμός κατευθυντικότητας. Ωστόσο, αυτές οι προσεγγίσεις απαιτούσαν κρίση, ενώ παράλληλα, για πολλές εδαφικές κινήσεις η κατάταξη δεν ήταν προφανής.

Η έλλειψη ποσοτικής ταξινόμησης για καταγεγραμμένες εδαφικές κινήσεις εμπόδιζε τη εξαγωγή συμπερασμάτων όπως η πιθανότητα για δεδομένο μέγεθος σεισμού, για δεδομένη γεωμετρία στην περιοχή της πηγής και για δεδομένη απόσταση από αυτή να εμπεριέχεται ένας παλμός ταχύτητας στην υπό εξέταση εδαφική καταγραφή. Επιπλέον, λόγω της έλλειψης αυτής, οι ηλεκτρονικές βιβλιοθήκες με καταγραφές εδαφικών κινήσεων δεν έχουν καταρτίσει στατιστικές μελέτες που να δείχνουν εάν μια δεδομένη εδαφική κίνηση περιέχει παλμό ταχύτητας. Επομένως, ήταν περιορισμένη η δυνατότητα πρόσβασης των επιστημόνων και μηχανικών σε αυτές τις εδαφικές κινήσεις και η μελέτη των σχετικών φαινομένων τόσο για ερευνητικές όσο και για πρακτικές εφαρμογές.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί η περίοδος ενός παλμού ταχύτητας είναι μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα παράμετρος για τους μηχανικούς. Η προσέγγιση του Baker δίνει τη δυνατότητα εύκολου υπολογισμού της τιμής της.

Στην εικόνα που ακολουθεί περιλαμβάνονται παραδείγματα εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου στη διεύθυνση κάθετα στο ρήγμα.



Εικ. 3.1 : Παραδείγματα εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου στη διεύθυνση κάθετα στο ρήγμα

### 3.1.2 Γενεσιουργά αίτια παλμού ταχύτητας

Για τους σκοπούς της μελέτης, όπως ορίστηκε και προηγουμένως, *παλμική εδαφική κίνηση* θεωρείται μια καταγραφή με έναν μονό, διπλό ή τριπλό παλμό που εμφανίζεται νωρίς στην χρονοϊστορία της ταχύτητας και διαθέτει μεγάλο πλάτος. Η πρωταρχική αιτία δημιουργίας αυτών των παλμών ταχύτητας όπως, επίσης, αναφέρθηκε νωρίτερα είναι τα φαινόμενα έμπροσθεν κατευθυντικότητας στην περιοχή κοντινού πεδίου. Ως γνωστόν, τόσο για ρήγματα κατακόρυφης βύθισης όσο και οριζόντιας ολίσθησης, η έμπροσθεν κατευθυντικότητα εμφανίζεται στη διεύθυνση κάθετα στο ρήγμα. Γι' αυτό το λόγο, δίνεται έμφαση στην κάθετη προς το ρήγμα συνιστώσα της εδαφικής κίνησης. Το φαινόμενο της μόνιμης στατικής μετακίνησης του εδάφους, φαινόμενο κατευθυντικότητας και αυτό ως αποτέλεσμα της διάρρηξης, γενικά δεν ανιχνεύεται από τη διαδικασία. Σημειώνεται λοιπόν ότι το συγκεκριμένο μοντέλο παλμού δεν ανιχνεύει απομένουσες μετακινήσεις.

### 3.1.3 Η επιλογή της διαδικασίας ταξινόμησης

Για την επιλογή της διαδικασίας ταξινόμησης ποικίλα κριτήρια θεωρήθηκαν σημαντικά. Το πιο σημαντικό που πρέπει να είναι σε θέση να διαχωρίσει είναι αν κάποια μορφή που εμπεριέχεται στη χρονοϊστορία της ταχύτητας αποτελεί παλμό

ή όχι. Παρ' όλο που η διάκριση δε δύναται να είναι εγγενώς δυαδική τίθεται ένα όριο που μετατρέπει την ταξινόμηση σε δυαδική με τη βοήθεια δεικτών που εκφράζουν κατά πόσο μία καταγραφή προσεγγίζει την παλμική ( "Pulse Like") και κατά πόσο όχι ( "Non Pulse Like"). Επιπλέον, η διαδικασία ταξινόμησης οφείλει να έχει τέτοια μορφή ώστε να απαιτείται η, όσο το δυνατόν, λιγότερη παρέμβαση ή κρίση του αναλυτή ώστε να μην υπάρχουν περιθώρια λάθους και αμφισβήτησης.

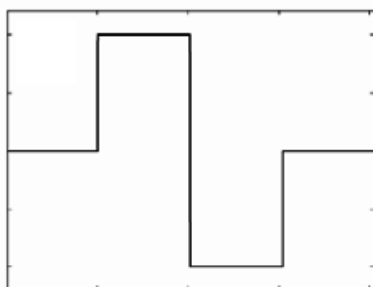
Οι παραπάνω απαιτήσεις ικανοποιούνται χρησιμοποιώντας ένα σχετικά απλό μοντέλο παλμού. Μια απλοποιημένη αναπαράσταση αποδεικνύεται περισσότερο εφαρμόσιμη για αυτοματοποιημένη διαλογή και ταξινόμηση μεγάλου πλήθους εδαφικών κινήσεων έναντι λεπτομερέστερων παλμικών μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί. Μάλιστα, ένα απλό μοντέλο είναι σε θέση να αποδώσει περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα στην αναγνώριση των παλμών απ' ότι ένα μοντέλο που απαιτεί την εισαγωγή και χρήση αρκετών παραμέτρων.

Η κυματική ανάλυση είναι μια διαδικασία επεξεργασίας σημάτων που ανταποκρίνεται στην ταξινόμηση που επιδιώκεται. Όπως αναλύεται λεπτομερέστερα και παρακάτω, μέσω αυτής οι παλμοί ταχύτητας μπορούν να αναγνωριστούν και να εξαχθούν εύκολα, και να αξιοποιηθούν είτε για ταξινόμηση είτε σε άλλες παραμετρικές μελέτες.

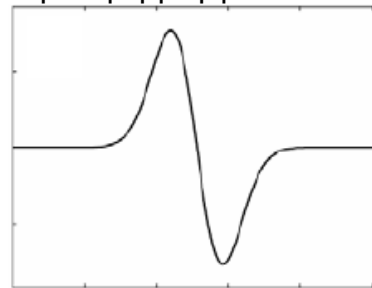
### 3.2 Ανάλυση Κυματιδίων

Η βασική κατανόηση της εν λόγω ανάλυσης γίνεται συγκρίνοντας τη με την ανάλυση Fourier. Η ανάλυση Fourier αναπαριστά ένα σήμα χρησιμοποιώντας γραμμικό συνδυασμό ημιτονικών κυμάτων, καθένα από τα οποία αναπαριστά ένα σήμα απείρου μήκους και μοναδικής συχνότητας. Εν αντιθέσει, η ανάλυση κυματιδίων αποσυνθέτει/ αναλύει ένα σήμα σε κυματίδια που είναι διακριτά τοποθετημένα στο χρόνο και αντιστοιχούν σε ένα ορισμένο πεδίο συχνοτήτων. Για μη στάσιμα σήματα, όπως οι σεισμικές εδαφικές κινήσεις είναι περισσότερο συμφέρουσα η αναπαράστασή τους ως ένα άθροισμα κυματιδίων έναντι μιας αναπαράστασης τους ως άθροισμα στάσιμων ημιτονικών κυμάτων.

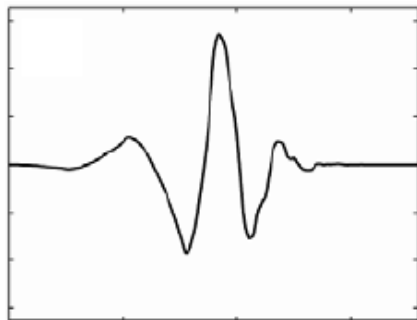
Τα κυματίδια (*wavelets*) είναι βασικές συναρτήσεις που ικανοποιούν ένα σύνολο μαθηματικών απαιτήσεων. Για την αποσύνθεση ενός σήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλά πρότυπα κυματίδια. Η πρότυπη συνάρτηση καλείται *μητρικό κυματίδιο* ( "mother wavelet" ), ενώ προσαρμόζεται και μεταφέρεται στο χρόνο για το σχηματισμό μιας σειράς βασικών συναρτήσεων. Για την επιλογή του κατάλληλου μητρικού κυματιδίου λαμβάνεται υπόψη ποικιλία θεωρητικών παραγόντων, όπως η συμμετρία, η ορθογωνικότητα, η συμβατότητα κλπ ( Mallat 1999). Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζονται μερικά κυματίδια που έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως και θεωρούνται κατάλληλα για εφαρμογή.



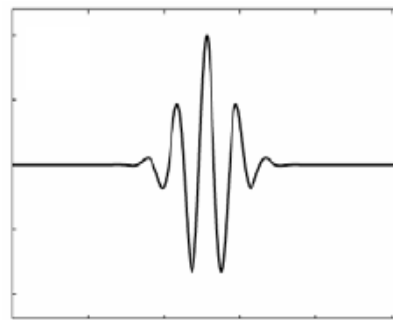
(α) κυματίδιο Haar



(β) γκαουσιανό κυματίδιο 1<sup>ης</sup> τάξης



(γ) κυματίδιο Daubechies 4<sup>ης</sup> τάξης



(δ) κυματίδιο Morlet

**Εικ. 3.2 :** Συνήθη μητρικά κυματίδια που χρησιμοποιούνται στην κυματική ανάλυση

Η βασική κυματική συνάρτηση σε χρόνο  $t$  ορίζεται από την ακόλουθη μαθηματική σχέση :

$$\Phi_{s,l}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Phi\left(\frac{t-l}{s}\right) \quad (3.1)$$

Όπου  $\Phi(\cdot)$  είναι η μητρική κυματική συνάρτηση  
 $s$  είναι η παράμετρος κλίμακας που διαστέλλει το κυματίδιο  
 $l$  είναι η χωρική παράμετρος που μεταφέρει το κύμα στο χρόνο.

Οποιοδήποτε σήμα  $f(t)$  μπορεί να αναπαρασταθεί ως γραμμικός συνδυασμός των βασικών συναρτήσεων, ενώ οι συντελεστές αυτού του γραμμικού συνδυασμού υπολογίζονται από το ακόλουθο ολοκλήρωμα, του οποίου η σύλληψη της μορφής είναι πανομοιότυπη με το μετασχηματισμό Fourier και καλείται *ολοκλήρωμα συνέλιξης (convolution integral)*.

$$C_{s,l} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Phi_{s,l}(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \Phi\left(\frac{t-l}{s}\right) dt \quad (3.2)$$

Για την ανάλυση ψηφιακών σημάτων, όπως οι χρονοϊστορίες ταχύτητας εδαφικής κίνησης, η παραπάνω σχέση διακριτοποιείται σε ένα άθροισμα και όχι σε ολοκλήρωμα, με τις βασικές αρχές ορισμού να παραμένουν ίδιες.

Για το μετασχηματισμό αυτό χρησιμοποιούνται δύο προσεγγίσεις : ο *συνεχής* και ο *διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίων (continuous & discrete wavelet transform)*. Ο πρώτος μετασχηματισμός υπολογίζει τους συντελεστές κυματιδίων που σχετίζεται με κάθε ακέραια τιμή των παραμέτρων κλίμακας και θέσης. Ο δεύτερος παρέχει τους  $n$  συντελεστές που περιγράφουν το πλάτος  $n$  κυματιδίων για διάφορες τιμές των παραμέτρων κλίμακας και τοποθεσίας. Αυτό εφαρμόζεται όταν τα κυματίδια είναι ορθογωνικά και, επομένως, μόνο  $n$  κυματίδια, άρα περιορισμένος αριθμός συντελεστών απαιτούνται για την περιγραφή οποιουδήποτε ψηφιακού χρονικού σήματος μήκους  $n$ .



Συγκρίνοντας τους δύο μετασχηματισμούς παρατηρείται ότι ο συνεχής παρουσιάζει δύο βασικά πλεονεκτήματα έναντι του διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίων:

- ❖ Παρ' όλο που ενέχει μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος και παράγει πολύ περισσότερους συντελεστές από όσους απαιτούνται για την περιγραφή του σήματος, αυτή η υψηλότερη ανάλυση που πραγματοποιεί είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ακριβή αναγνώριση του μεγαλύτερου συντελεστή, η οποία θα υποδείξει την περίοδο και τη θέση του παλμού κοντινού πεδίου
- ❖ Οι συντελεστές που προκύπτουν δεν επηρεάζονται από το αν υπάρχουν πολλά και συνεχόμενα μηδενικά στην αρχή ή το τέλος του σήματος, πράγμα που συμβαίνει με το διακριτό μετασχηματισμό.

Στο ακόλουθο κριτήριο ταξινόμησης χρησιμοποιούνται και οι δύο αυτοί μετασχηματισμοί.

### 3.3 Ταξινόμηση των χρονοϊστοριών

#### 3.3.1 Γενικά

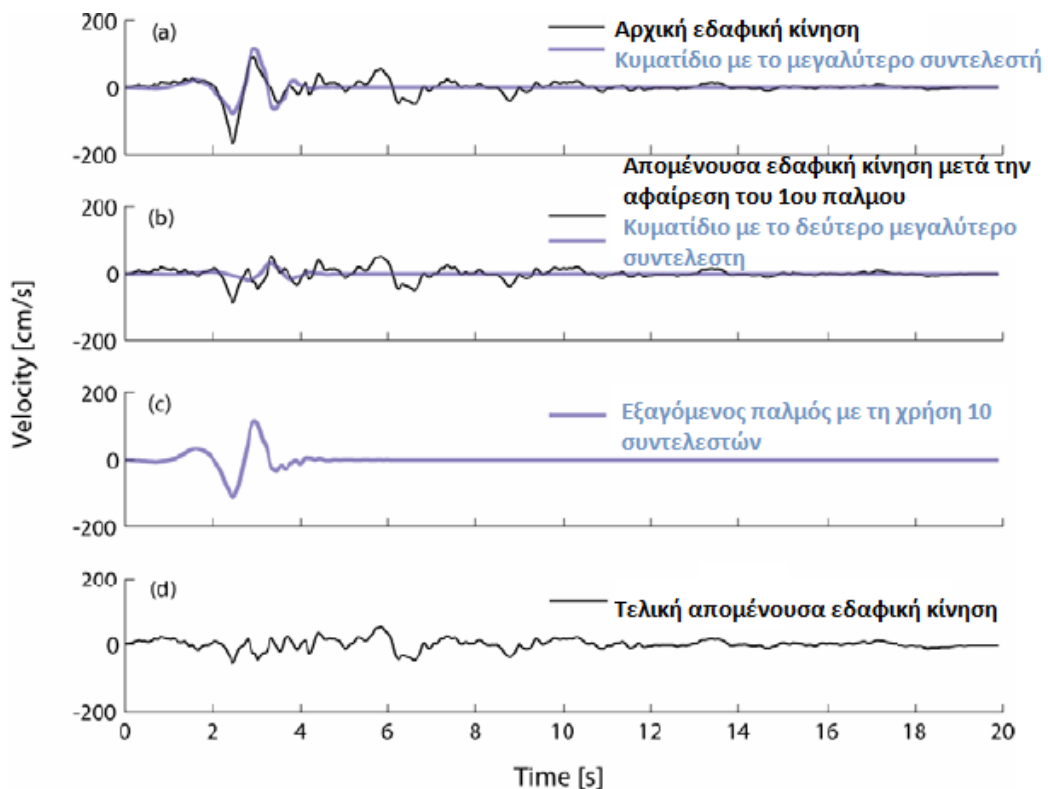
Κατά τη διαδικασία αυτή ο μεγαλύτερος παλμός της εδαφικής κίνησης εξάγεται ώστε να αποφανθεί εάν αντιπροσωπεύει σημαντικό τμήμα της χρονοϊστορίας. Αναφέρονται ξανά το δύο πρόσθετα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για να αναγνωριστεί κατά πόσο είναι πιθανό ο παλμός να οφείλεται σε φαινόμενα κατευθυντικότητας:

- Ο παλμός που αναγνωρίζεται πρέπει να εμφανίζεται νωρίς στη διάρκεια της εδαφικής κίνησης
- Η εδαφική κίνηση πρέπει να έχει μια υψηλή τιμή ως αιχμή (μέγιστο) ταχύτητας. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο για την εξάλειψη εδαφικών κινήσεων από μικρούς σεισμούς που μπορεί να μοιάζουν με παλμικές λόγω της απλότητας της χρονοϊστορίας.

#### 3.3.2 Η εξαγωγή του παλμού ταχύτητας

Για κάθε εξεταζόμενη εδαφική κίνηση, εξάγεται ο μεγαλύτερος παλμός ταχύτητας με τη διαδικασία κυματικής αποσύνθεσης που περιγράφηκε νωρίτερα. Ως μητρικό κυματίδιο χρησιμοποιείται το κυματίδιο Daubechies τέταρτης τάξης, καθώς προσεγγίζει τη μορφή πολλών παλμών ταχύτητας και φαίνεται να λειτουργεί περισσότερο ικανοποιητικά σε σχέση με άλλες κυματιδιακές συναρτήσεις. Για την εκτίμηση της εδαφικής κίνησης, αρχικά υπολογίζεται ο συνεχής κυματιδιακός σχηματισμός της χρονοϊστορίας ταχύτητας και αναγνωρίζεται ο συντελεστής με την μεγαλύτερη απόλυτη τιμή, και κατ' επέκταση ο παλμός που περιέχει τη μεγαλύτερη ενέργεια. Από το κυματίδιο που συνδέεται με αυτό το συντελεστή προσδιορίζουμε την περίοδο και τη θέση του παλμού. Το κυματίδιο αυτό εξάγεται από την εδαφική κίνηση και ο συνεχής κυματιδιακός μετασχηματισμός πραγματοποιείται αυτή τη φορά για την απομένουσα εδαφική κίνηση. Και σε αυτή την περίπτωση προσδιορίζονται οι μεγαλύτεροι συντελεστές. Συνήθως, απαιτούνται ένας, ή το πολύ δύο συντελεστές για την περιγραφή του παλμού. Εδώ

για περισσότερο λεπτομερή αναπαράσταση προσδιορίζεται ένα σύνολο δέκα συντελεστών. Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση της εν λόγω διαδικασίας.



**Εικ. 3.3 :** Διαδικασία αποσύνθεσης για την απομόνωση του παλμικού τμήματος της εδαφικής κίνησης

Μέσα από αυτή τη διαδικασία, ένας παλμός μπορεί να απομονωθεί από οποιαδήποτε εδαφική κίνηση, είτε αποτελεί σημαντικό παλμό κατευθυντικότητας είτε όχι. Όσον αφορά μη παλμικές καταγραφές, ο εξαγόμενος παλμός αποτελεί ήσσονος σημασίας χαρακτηριστικό της εδαφικής κίνησης και η απομένουσα εδαφική κίνηση μοιάζει εξαιρετικά με την αρχική καταγραφή. Συνεπώς, για την ταξινόμηση των καταγραφών απαιτείται να αναγνωριστούν χαρακτηριστικά των εξαγόμενων παλμών που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτοματοποιημένη ταξινόμηση.

### 3.3.3 Εκτίμηση της σημαντικότητας του εξαγόμενου παλμού

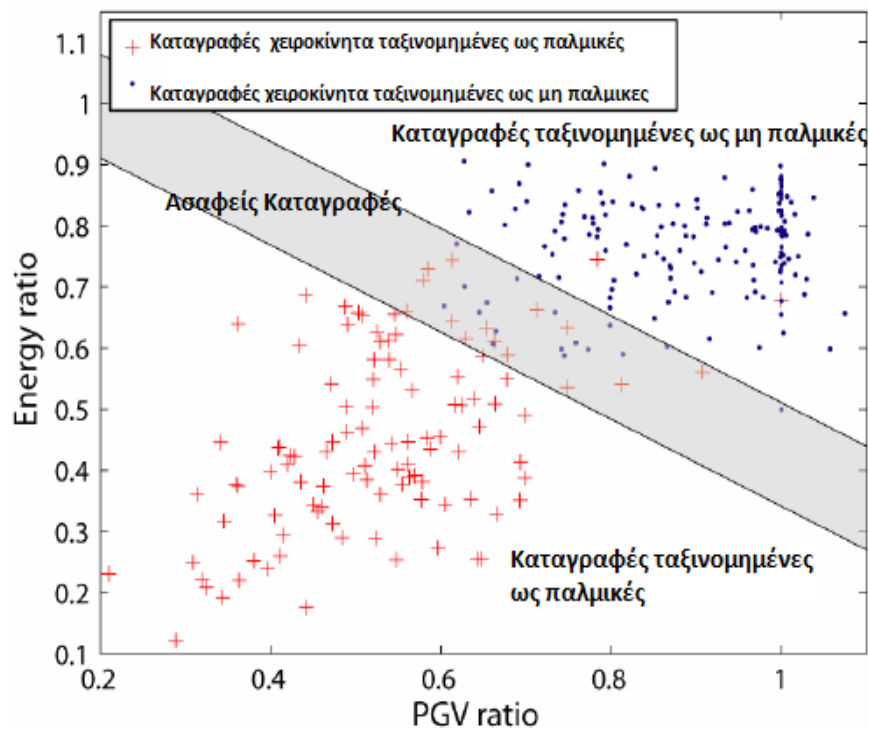
Για να αποφανθούμε εάν μια εδαφική κίνηση είναι παλμική, χρησιμοποιούμε την αρχική καταγραφή καθώς και την απομένουσα, μετά την απομάκρυνση του παλμού. Στην παρούσα προσέγγιση, ο Baker χρησιμοποίησε καταγραφές από τη βιβλιοθήκη εδαφικών κινήσεων Next Ground Attenuation (NGA) οι οποίες ελήφθησαν εντός 30 km από τη περιοχή του σεισμικού γεγονότος και με σεισμικό μέγεθος μεγαλύτερο από 5,5. Αρχικά, οι καταγραφές ταξινομήθηκαν μέσω οπτικών ελέγχων με βάση την αναγνώριση παλμών στις χρονοϊστορίες ταχύτητας. Έτσι, προέκυψαν τρεις κατηγορίες : οι προφανώς παλμικές, οι προφανώς μη παλμικές και ασαφείς καταγραφές. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία

στατιστικής πρόβλεψης που να αναπαράγουν την παραπάνω ταξινόμηση βάσει αυτοματοποιημένων προβλέψεων, με χρήση κυματικής ανάλυσης.

Στην προσπάθεια αυτή θεωρήθηκε μια ποικιλία μεταβλητών πρόβλεψης που περιλαμβάνουν το μέγεθος των συντελεστών που προέκυψαν από την κυματιδιακή αποσύνθεση, φασματικές τιμές απόκρισης, μέγιστες εδαφικές ταχύτητες και ενεργειακές τιμές. Έπειτα από δοκιμές, οι ακόλουθες δύο μεταβλητές πρόβλεψης θεωρήθηκαν καταλληλότερες τόσο από άποψη ευκολίας υπολογισμού όσο και άποψη ικανότητας πρόβλεψης:

- Η αναλογία μέγιστης εδαφικής ταχύτητας ( "PVG ratio" ) που ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας της απομένουσας καταγραφής προς την αντίστοιχη τιμή της αρχικής καταγραφής
- Η αναλογία ενέργειας ( "Energy ratio" ) που ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας την απομένουσας καταγραφής προς την ενέργεια της αρχικής καταγραφής

Στην ακόλουθη εικόνα αντικατοπτρίζεται η αποτελεσματικότητα αναπαραγωγής της ταξινόμησης με τη βοήθεια των δύο αυτών μεταβλητών.



Εικ. 3.4 : Διάγραμμα Διασποράς των μεταβλητών πρόβλεψης που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση

Η παρακάτω εξίσωση προκύπτει έπειτα από γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των δύο παραπάνω μεγεθών.

$$Pulse Indicator = \frac{1}{1 + e^{-23.3+14.6(PVG\ ratio)+20.5(Energy\ ratio)}} \quad (3.3)$$

Ο *Παλμικός Δείκτης* ( *Pulse Indicator* ) εκφράζει την πιθανότητα μια δεδομένη καταγραφή να είναι παλμική και λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Μάλιστα, όσο πιο υψηλή η τιμή τόσο πιο ισχυρή η ένδειξη ότι η υπό εξέταση εδαφική κίνηση είναι παλμική. Ωστόσο, επειδή οι προβλέψεις του δείκτη αυτού εντάσσονται σε ένα συνεχές φάσμα εντός του συνόλου [0, 1] εισάγονται δύο εσωτερικά όρια τροποποιώντας την κατάταξη ως εξής:

- Για τιμές μεγαλύτερες του 0,85 οι καταγραφές χαρακτηρίζονται ως *παλμικές* ( *Pulse-Like* )
- Για τιμές μικρότερες του 0,15 οι καταγραφές χαρακτηρίζονται ως *μη παλμικές* ( *Non-Pulse-Like* )
- Για τιμές εντός του συνόλου [0,15 , 0,85] οι καταγραφές χαρακτηρίζονται *ασαφείς* ( *Ambiguous* )

### 3.3.4 Αποκλεισμός των παλμών που εμφανίζονται αργά στην χρονοϊστορία

Στο σημείο αυτό, αναλύεται το πρόσθετο κριτήριο που επιτρέπει την αναγνώριση μόνο των παλμών που εμφανίζονται “νωρίς” στη χρονοϊστορία ταχύτητας, οι οποίοι σύμφωνα με τη θεωρητική σεισμολογία συνδέονται με την κατευθυντικότητα.

Οι παλμοί που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία μπορούν να εντοπιστούν υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας ( *Cumulative Squared Velocity – CSV* ) για την αρχική καταγραφή και για τον εξαγόμενο παλμό. Για τυχαία χρονική στιγμή τιμή, το ολοκλήρωμα αυτό δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$CSV(t) = \int_0^t V^2(u) du \quad (3.4)$$

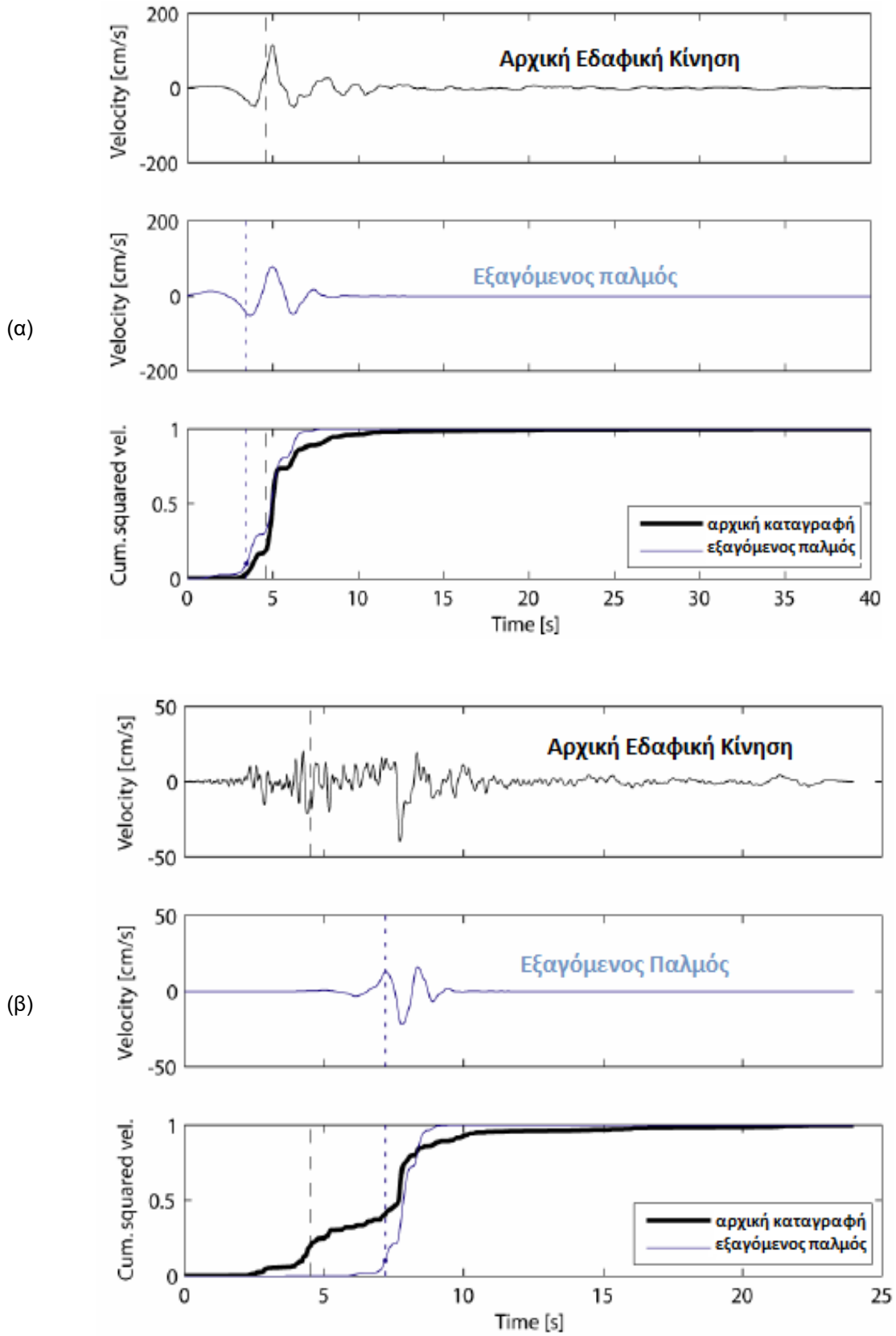
όπου ο όρος CSV (t) δηλώνει την αθροιστική τετραγωνισμένη ταχύτητα σε χρόνο t και V(u) είναι η ταχύτητα της εδαφικής κίνησης σε χρόνο u. Υπολογίζοντας τα ολοκληρώματα για την αρχική εδαφική κίνηση και για τον εξαγόμενο παλμό, καθορίζονται οι χρονικές στιγμές για τις οποίες καθένα από αυτά φτάνει το x % του ολικού CSV (  $t_{x\%, orig}$  και  $t_{x\%, pulse}$  αντίστοιχα ).

Ο εξαγόμενος παλμός θεωρείται ότι εμφανίζεται στο ξεκίνημα της εδαφικής κίνησης όταν φτάνει το 10% του ολικού του CSV προτού η αρχική εδαφική κίνηση φτάσει το 20% του αντίστοιχου ολικού της CSV. Με άλλα λόγια, οι παλμοί που εμφανίζονται νωρίς στη χρονοϊστορία διαθέτουν τιμές που ικανοποιούν την παρακάτω μαθηματική σχέση :

$$t_{20\%, orig} > t_{10\%, pulse} \quad (3.5)$$

Κατ’ αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται ότι ένα σημαντικό ποσοστό της ενέργειας του παλμού έχει εκδηλωθεί προτού αναπτυχθεί σημαντικό μέρος της ενέργειας της αρχικής χρονοϊστορίας. Ακολουθούν παραδείγματα που φτάνουν νωρίς και αργά στη χρονοϊστορία της ταχύτητας.

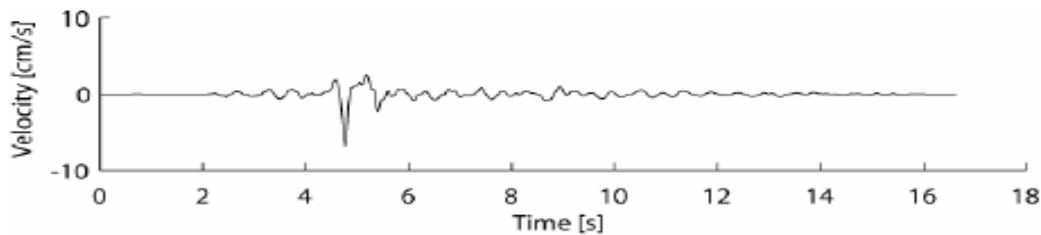
Μέθοδος Baker- Ταξινόμηση εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου με χρήση κυματικής ανάλυσης



Εικ. 3.5 : (α) Παλμός στην αρχή της χρονοϊστορίας , (β) Παλμός στο τέλος της χρονοϊστορίας

### 3.3.5 Αποκλεισμός των εδαφικών κινήσεων με $PVG < 30 \text{ cm/s}$

Όπως σημειώθηκε και νωρίτερα, υπάρχουν και περιπτώσεις εμφάνισης παλμών σε εδαφικές κινήσεις μικρής έντασης, οι οποίοι όμως δεν οφείλονται στην κατευθυντικότητα αλλά στο γεγονός ότι εμπεριέχονται σε μια σχετικά απλή χρονοϊστορία ταχύτητας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν εδαφικές κινήσεις μικρής διάρκειας λόγω σεισμικών γεγονότων μικρού μεγέθους που εμφανίζουν ανακλάσεις κατά τη διάδοση σεισμικών κυμάτων. Ενδεικτικά, παρατίθεται μια τέτοια χρονοϊστορία στην παρακάτω εικόνα:



**Εικ. 3.6 :** Εδαφική κίνηση που φαίνεται να είναι παλμική αλλά πρέπει να αποκλειστεί λόγω μικρής τιμής PVG

Για τον αποκλεισμό αυτών των καταγραφών, απαιτείται να οριστεί ένα κάτω όριο για την τιμή της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας. Ύστερα από αρκετές θεωρήσεις, το επίπεδο των  $30 \text{ cm/s}$  φάνηκε να είναι το καταλληλότερο για τον αποκλεισμό των παλμών που δεν οφείλονται στην κατευθυντικότητα. Μάλιστα, το κριτήριο αυτό απομακρύνει αυτόματα και τις καταγραφές μακρινού πεδίου.

Στο Παράρτημα Α συμπεριλαμβάνονται οι 91 εδαφικές κινήσεις που έπειτα από μελέτη αποδείχτηκε ότι ανταποκρίνονται και στα 3 κριτήρια που χρησιμοποιούνται για τη αναγνώριση των κατευθυντικών παλμών. Συγκεντρωτικά αυτά είναι:

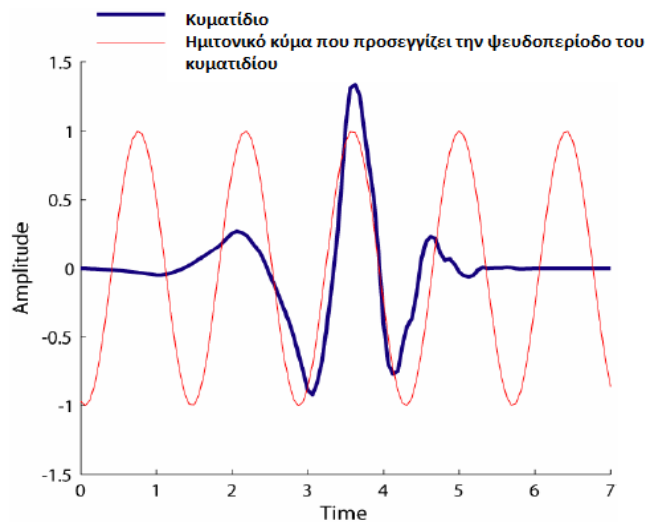
- (1) Η τιμή του Παλμικού δείκτη πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0,85
- (2) Ο παλμός πρέπει να φτάνει νωρίς στη χρονοϊστορία ( $t_{20\%, \text{orig}} > t_{10\%, \text{pulse}}$ )
- (3) Η μέγιστη εδαφική ταχύτητα στην αρχική καταγραφή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από  $30 \text{ cm/s}$

### 3.4 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού

Η περίοδος του παλμού ταχύτητας είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς ο λόγος της περιόδου του παλμού προς τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της κατασκευής επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την απόκρισή της (Alavi & Krawinkler 2001, Anderson & Bertero 1987, Maueroeidis et al 2004). Στην παρούσα ανάλυση, η εκτίμηση της περιόδου του παλμού πραγματοποιήθηκε εξετάζοντας την δεσπάζουσα συχνότητα του κυματιδίου που χρησιμοποιήθηκε για την αναγνώριση του παλμού.

Στην περίπτωση των κυματιδίων, η έννοια της περιόδου δεν είναι ξεκάθαρα ορισμένη, όπως συμβαίνει στα ημιτονικά κύματα της ανάλυσης Fourier. Ωστόσο, η περίοδος που σχετίζεται με το μέγιστο πλάτος Fourier ενός κυματιδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό μιας ψευδοπεριόδου. Έπεται σχηματική απεικόνιση ενός κυματιδίου και του ημιτονικού κύματος με περίοδο ίση με εκείνη κατά την οποία παρατηρείται το μέγιστο πλάτος Fourier του κυματιδίου. Η

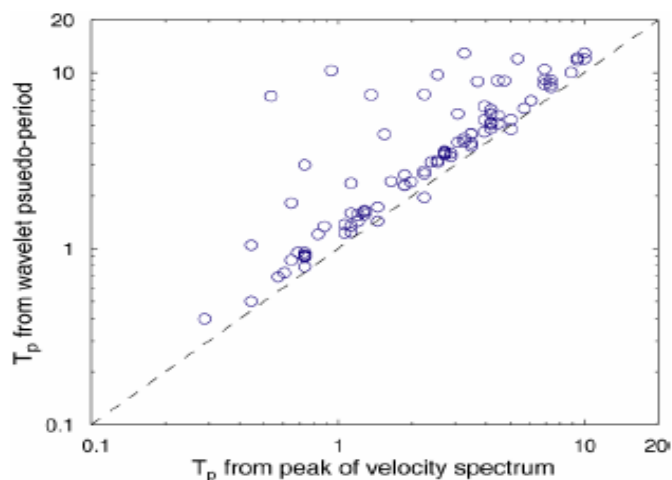
ψευδοπερίοδος του μεγαλύτερου συντελεστή του κυματιδίου χρησιμοποιείται ως η περίοδος παλμού της εδαφικής κίνησης.



**Εικ. 3.7 :** Κυματίδιο Daubechies και ημιτονικό κύμα με περίοδο ίση με τη μέγιστη της κυματομορφής από το φάσμα Fourier

Για την εκτίμηση της περιόδου του παλμού ταχύτητας έχουν προταθεί και πολλές άλλες μέθοδοι, οι οποίες, όμως, σε κάποιο βαθμό εξαρτώνται από την κρίση του ερευνητή. Σε αυτές εντάσσονται η μέθοδος που έχει ήδη αναφερθεί ως zero crossing method και λαμβάνει υπόψη το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών μηδενισμών των τιμών του κυματιδίου αλλά και άλλες που κάνουν χρήση μη γραμμικής βελτιστοποίησης για την παρεμβολή ενός περικομμένου ημιτόνου μέσα στον παλμό.

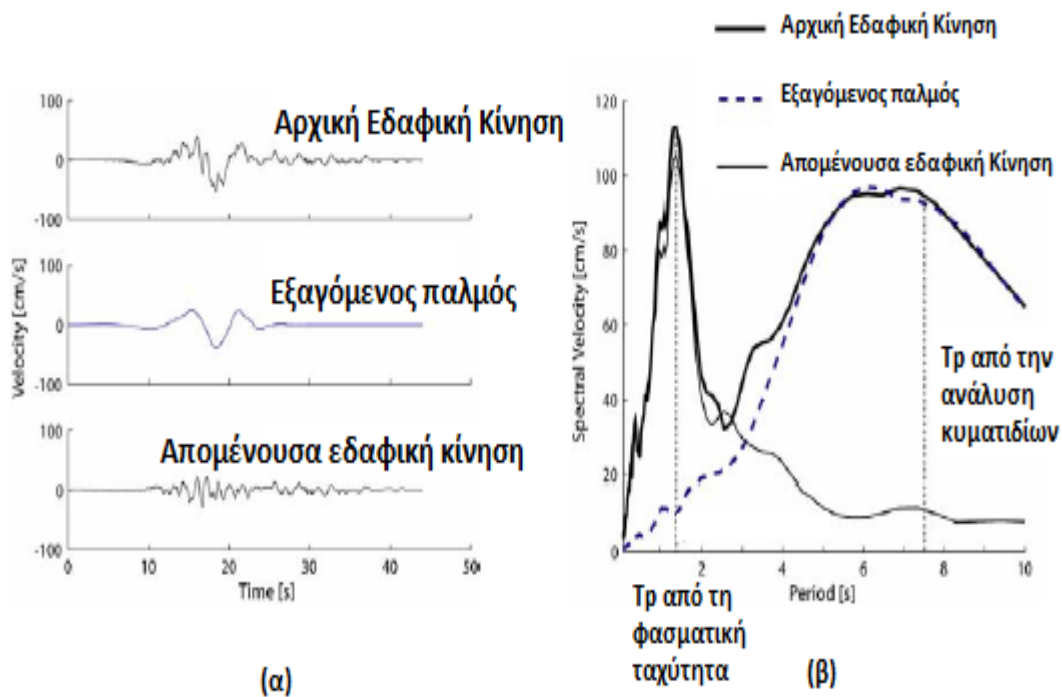
Η κύρια εναλλακτική για την εκτίμηση της περιόδου του παλμού είναι να επιλεχθεί η περίοδος που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του φάσματος ταχύτητας της εδαφικής κίνησης. Στο επόμενο διάγραμμα φαίνονται οι εκτιμήσεις της περιόδου παλμού με τις δύο μεθόδους που περιγράφηκαν για τις 91 περιπτώσεις παλμικών εδαφικών κινήσεων που μελέτησε ο Baker.



**Εικ. 3.8 :**  $T_p$  για τη μέγιστη τιμή του φάσματος ταχύτητας και  $T_p$  από την ψευδοπερίοδο του κυματιδίου για τις 91 εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου

Όπως παρατηρείται και από το διάγραμμα οι δύο προσεγγίσεις δίνουν γενικά παρόμοια αποτελέσματα με την τιμή  $T_p$  που υπολογίστηκε βάσει κυματιδίου να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη που υπολογίστηκε μέσω του φάσματος ταχύτητας. Παρ' όλα αυτά, υπάρχει πιθανότητα, οι δύο αυτές τιμές να διαφοροποιούνται σημαντικά. Σε τέτοιου είδους περιπτώσεις, η "κυματιδιακή" περίοδος που συνδέεται με τον ορατό παλμό αποτελεί περισσότερο αξιόπιστη εκτίμηση έναντι εκείνης που αντιστοιχεί στη μέγιστη φασματική ταχύτητα που με τη σειρά της συνδέεται γενικά με υψίσυχνες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης. Ένα παράδειγμα απεικονίζεται στη συνέχεια.

	Οπτική Εκτίμηση	Υπολογιστικές Εκτιμήσεις	
	Μέθοδος Zero Crossing	Μέθοδος Κυματιδιακής Ψευδοπεριόδου	Μέθοδος Φασματικής Ταχύτητας
$T_p$	7.3 s	7.5s	1.4s

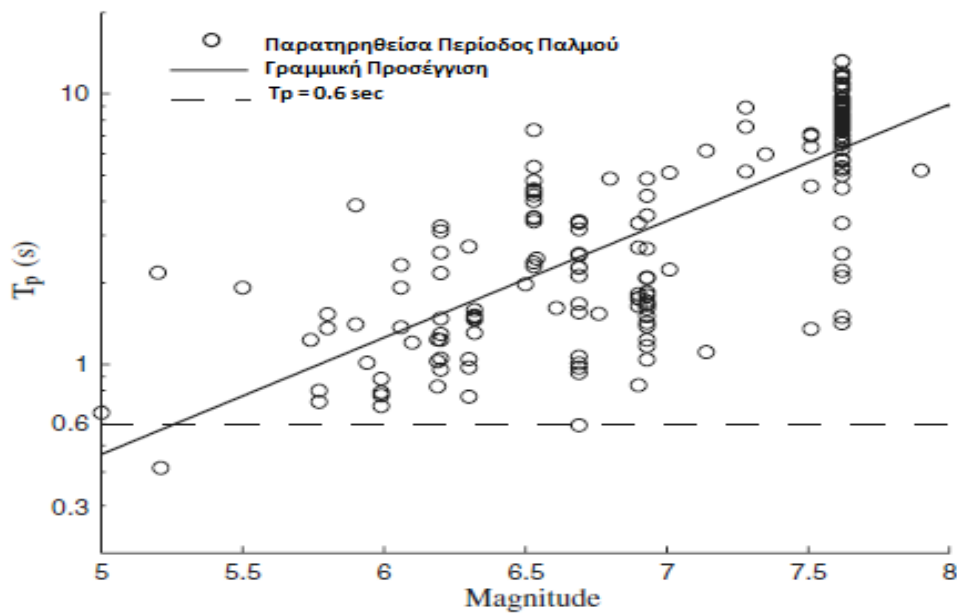


**Εικ. 3.9 :** (α) Χρονοϊστορίες ταχύτητας , (β) Φάσματα Ταχύτητας με σημειωμένες τις τιμές  $T_p$  προσδιορισμένες από τις δύο μεθόδους

Συνοψίζοντας, η μέθοδος της ψευδοπεριόδου είναι περισσότερο αξιόπιστη έναντι άλλων μεθόδων τόσο γιατί εκτιμάται μέσα από αυτοματοποιημένη διαδικασία και είναι απαλλαγμένη από κάθε είδους υποκειμενικότητα του ερευνητή αλλά και επειδή παρουσιάζει ορθότερα αποτελέσματα σε σχέση με την μέθοδο της φασματικής ταχύτητας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με το ακόλουθο διάγραμμα, το πλήθος των παλμικών εδαφικών κινήσεων με χαμηλή  $T_p$  είναι μικρό. Οι τιμές  $T_p < 0.6$  s είναι σπάνιες και οι παλμοί κατευθυντικότητας με τόσο χαμηλές περιόδους δεν ενισχύουν σημαντικά τη σεισμική επικινδυνότητα.





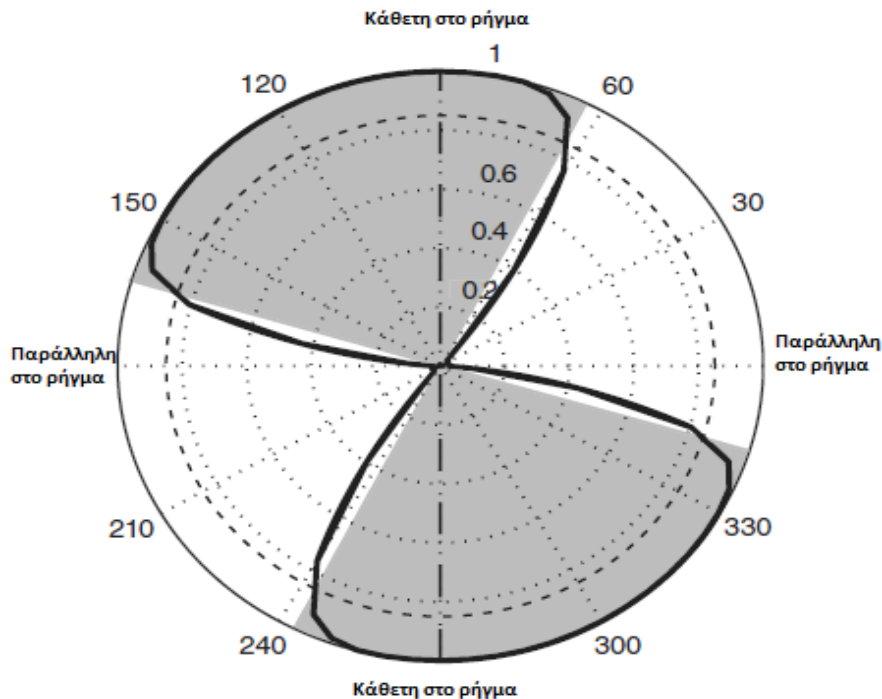
Εικ. 3.10 : Περίοδος παλμού και μέγεθος σεισμού για παρατηρηθείσες παλμικές εδαφικές κινήσεις

### 3.5 Παλμοί σε διάφορους προσανατολισμούς ως προς το ρήγμα

Η μελέτη του Baker εστιάζει κυρίως στον εντοπισμό παλμών που εμφανίζονται στη διεύθυνση της κάθετης συνιστώσας της εδαφικής κίνησης. Ωστόσο, η προτεινόμενη διαδικασία ανταποκρίνεται και σε εδαφικές κινήσεις τυχαίας διεύθυνσης – με δύο συνιστώσες. Αυτό είναι ιδιαίτερα βολικό καθώς οι παλμοί κατευθυντικότητας μπορούν να επηρεάσουν τις κατασκευές σε μια πληθώρα διευθύνσεων, καθώς ακόμη και αν παρατηρείται σε μια γωνία διαφορετική από πρωταρχική διεύθυνση μπορεί να είναι ισχυροί σε σχέση με ασθενέστερα μη παλμικά τμήματα της καταγραφής. Επιπλέον, η μελέτη άλλων εδαφικών κινήσεων έχει δείξει ότι ο παλμός ταχύτητας μερικές φορές εμφανίζεται με προσανατολισμό που διαφοροποιείται σημαντικά από την κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση.

Οι Shrey K. Shahi και Jack W. Baker (2011), στην προσπάθειά τους να ενσωματώσουν την επιρροή των παλμών κοντινού πεδίου στην εκτίμηση σεισμικού κινδύνου, ασχολήθηκαν και με τα αποτελέσματα που έχει το φαινόμενο της κατευθυντικότητας σε τυχαίους προσανατολισμούς ως προς το ρήγμα. Στην προσπάθειά τους αυτή, τροποποίησαν τον αλγόριθμο που είχε προταθεί από τον Baker (2007) για την ταξινόμηση των παλμικών εδαφικών κινήσεων, περιστρέφοντας την εδαφική κίνηση και εντοπίζοντας παλμούς σε ένα εύρος προσανατολισμών πέρα από την κάθετη προς το ρήγμα διεύθυνση. Αναλυτικότερα, οι εδαφικές κινήσεις περιστράφηκαν σε όλες τις πιθανές διευθύνσεις και για κάθε διεύθυνση η εδαφική κίνηση ταξινομήθηκε ως παλμική ή μη παλμική. Κατ' αυτόν τον τρόπο, θεωρήθηκε ότι όποια τοποθεσία έχει υποστεί παλμική εδαφική κίνηση σε οποιαδήποτε διεύθυνση η εδαφική κίνηση έχει ταξινομηθεί ως παλμική. Για βαθύτερη κατανόηση, παρατίθεται μια εικόνα που δείχνει την τιμή του παλμικού δείκτη σε μια θέση σε διάφορους προσανατολισμούς (υπενθυμίζεται ότι παλμικές χαρακτηρίζονται οι εδαφικές κινήσεις που διαθέτουν υψηλό παλμικό δείκτη, μεγαλύτερο από την τιμή 0,85). Μάλιστα, πρόκειται για μια

απλή περίπτωση όπου οι παρατηρούμενοι παλμοί βρίσκονται γύρω από κάθετη προς το ρήγμα διεύθυνση. Υπάρχουν και περισσότερες σύνθετες περιπτώσεις, αν και λίγες, όπου η κάθετη προς το ρήγμα διεύθυνση δε συμπεριλαμβάνεται στο εύρος τον προσανατολισμός που εκδηλώνονται οι παλμοί.



**Εικ.3.11** : Τιμές του παλμικού δείκτη ως συνάρτηση του προσανατολισμού. Οι σκιασμένες περιοχές υποδεικνύουν τις διευθύνσεις όπου είναι εμφανείς ισχυροί παλμοί (Imperial Valley 1979 , Πηγή: EC Country Center)

Σ' αυτό το σημείο, ας επισημανθεί ότι αυτή η μέθοδος ταξινόμησης εντοπίζει παλμούς μόνο σε οριζόντιες διευθύνσεις και είναι πιθανό να αγνοήσει παλμικές εδαφικές κινήσεις των οποίων ο παλμός κείται εκτός του οριζοντίου επιπέδου, όπως, για παράδειγμα, σε περιπτώσεις ρηγμάτων κεκλιμένης βύθισης.

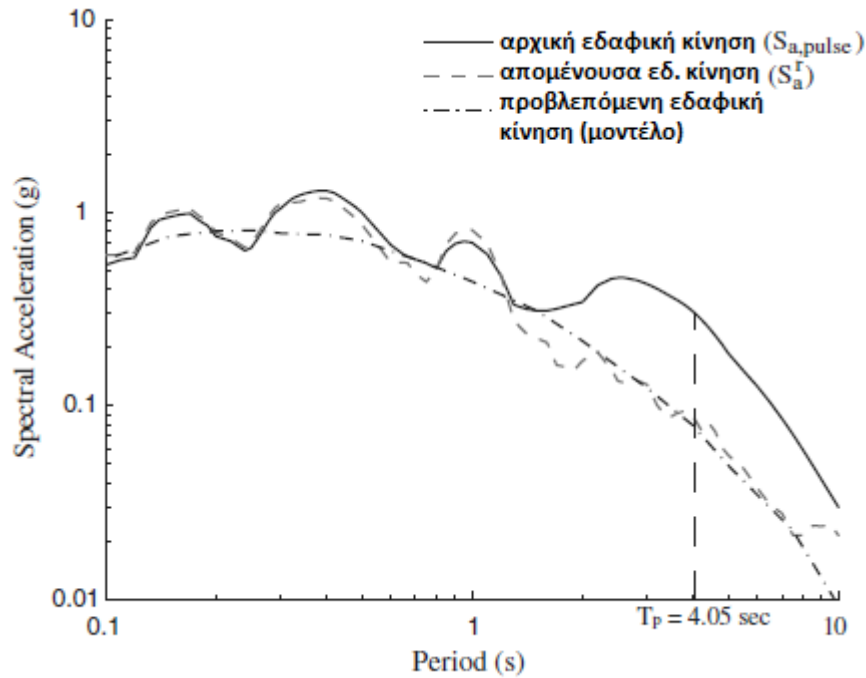
### 3.6 Ενίσχυση στη φασματική επιτάχυνση λόγω παλμού

Το προτεινόμενο μοντέλο εδαφικών κινήσεων θα πρέπει να είναι σε θέση να εκτιμά τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση του μεγέθους  $\ln S_{a, pulse}$  σε μία περιοχή στις περιπτώσεις που εντοπίζεται ένας παλμός. Για την απλοποίηση του μοντέλου, το προαναφερθέν μέγεθος, δηλαδή ο νεπέριος λογάριθμος της φασματικής επιτάχυνσης της αρχικής καταγραφής μπορεί να διασπαστεί σε δύο επιμέρους λογαρίθμους:

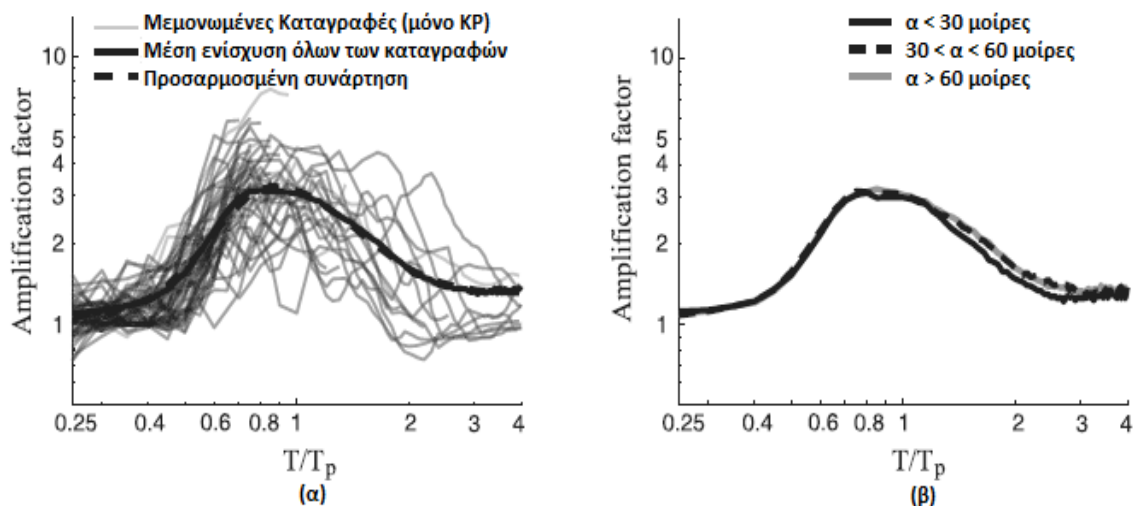
$$\ln S_{a, pulse} = \ln \left( \frac{S_{a, pulse}}{S_a^r} \cdot S_a^r \right) = \ln(A_f \cdot S_a^r) = \ln A_f + \ln S_a^r \quad (3.6)$$

Ο όρος  $S_a^r$  στην παραπάνω εξίσωση εκφράζει τη φασματική επιτάχυνση της απομένουσας εδαφικής κίνησης, δηλαδή την κίνησης μετά την απομάκρυνση του

παρατηρούμενου παλμού ενώ ο όρος  $A_f$  αποτελεί τον παράγοντα ενίσχυσης που οφείλεται στην παρουσία του παλμού ( $A_f = S_{a,pulse}/S_a^r$ ). Αυτή η μορφή αναπαράστασης δίνει τη δυνατότητα ξεχωριστής μοντελοποίησης της ενίσχυσης λόγω παλμικών χαρακτηριστικών και της απομένουσας εδαφικής κίνησης σε μια τοποθεσία. Στο ακόλουθο διάγραμμα απεικονίζονται οι φασματικές επιταχύνσεις για την αρχική και την απομένουσα καταγραφή της εδαφικής κίνησης:



**Εικ. 3.12:** Φάσμα απόκρισης από το σεισμικό γεγονός Imperial Valley 1979 ( El Centro Array #5 ), προσανατολισμός εδαφικής κίνησης κάθετα στο ρήγμα, μέσω πρόβλεψη των Boore και Atkinson και φάσμα απόκρισης απομένουσας εδαφικής κίνησης



**Εικ. 3.13 :** Παράγοντας ενίσχυσης της φασματικής επιτάχυνσης λόγω παρουσίας παλμικών χαρακτηριστικών στην εδαφική κίνηση. (α) Αναπαράσταση της εξίσωσης πρόβλεψης μαζί με δεδομένα από παρατηρήσεις, (β) Μέση ενίσχυση λόγω παλμών προσανατολισμένων σε διάφορες κατευθύνσεις

Οι Shahi και Baker υπολόγισαν παράγοντες ενίσχυσης  $A_f$  ως λόγο  $S_a$  για την αρχική εδαφική κίνηση προς  $S_a$  για την απομένουσα εδαφική κίνηση. Στο διάγραμμα (α) της εικόνας 3.13 παρουσιάζονται αυτοί οι παράγοντες ενίσχυσης

συναρτήσει ενός λόγου περιόδων  $T/T_p$  – όπου  $T$  η περίοδος ενδιαφέροντος και  $T_p$  η περίοδος του παλμού. Η μέση τιμή αυτών σχηματίζει μια κωδωνοειδή καμπύλη με κέντρο κοντά στο  $T/T_p=1$ . Οι δύο μελετητές κατέληξαν στην ακόλουθη συνάρτηση για την προσομοίωση της μέσης τιμής αυτής της ενίσχυσης:

$$\mu_{ln_{A_f}} = \begin{cases} 1.131 \cdot \exp(-3.11 \cdot (\ln(T/T_p) + 0.127)^2) + 0.058 & \text{αν } T \leq 0,88 \cdot T_p \\ 0.896 \cdot \exp(-2.11 \cdot (\ln(T/T_p) + 0.127)^2) + 0.255 & \text{αν } T > 0,88 \cdot T_p \end{cases} \quad (3.7)$$

Στο προαναφερθέν διάγραμμα (3.13(α)) φαίνεται και το προσαρμοσμένο μοντέλο μαζί με τις παρατηρηθείσες ενισχύσεις. Στο διάγραμμα 3.13 (β) απεικονίζονται οι ενισχύσεις των παλμών για διάφορους προσανατολισμούς δείχνοντας ότι το μοντέλο ανταποκρίνεται και σε τέτοιου είδους περιπτώσεις.

## **Κεφάλαιο 4**

**Αναπαράσταση του παλμού με τη χρήση σύνθετου κυματιδίου κατά Manroeidis & Papageorgiou**



## 4.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Ο χαρακτηρισμός, η σωστή παραμετροποίηση, η αναλυτική μοντελοποίηση και η αριθμητική προσομοίωση των σεισμικών εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου καθώς επίσης και η μελέτη της επιρροής τους στη συμπεριφορά των κατασκευών αποτέλεσαν κατά καιρούς θέματα έρευνας τόσο για σεισμολόγους όσο και για σεισμικούς μηχανικούς. Μάλιστα, ο ολοένα και περισσότερο αυξανόμενος αριθμός καταγραφών χρονοϊστοριών κοντινού πεδίου έδωσε τη δυνατότητα ακριβέστερης ανάλυσης του χαρακτήρα τέτοιου είδους κινήσεων και, κατά συνέπεια, συνέβαλε στη φυσική κατανόηση των χαρακτηριστικών που ελέγχουν τέτοιου είδους φαινόμενα.

Οι Mavroeidis & Papageorgiou (2003) παρουσίασαν μια κατανοητή αναθεώρηση και μελέτη των παραγόντων που επηρεάζουν τις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Στη μελέτη τους αυτή, χρησιμοποιήθηκε μεγάλο πλήθος καταγραφών για να εξεταστούν τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την διαδικασία διάρρηξης. Προτάθηκε, λοιπόν, ένα απλό, ωστόσο, αποτελεσματικό αναλυτικό μοντέλο για την αναπαράσταση των ισχυρών εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου. Το μοντέλο αυτό περιγράφει επαρκώς τον παλμικό χαρακτήρα των συγκεκριμένων κινήσεων τόσο ποσοτικά, όσο και ποιοτικά και φαίνεται ότι μπορεί να αξιοποιηθεί για αναλυτική αναπαραγωγή εμπειρικών παρατηρήσεων που βασίζονται σε διαθέσιμες κοντινού πεδίου καταγραφές. Οι παράμετροι εισαγωγής του μοντέλου έχουν ξεκάθαρη και σαφή φυσική σημασία ενώ σχετίζονται με τις φυσικές παραμέτρους της διάρρηξης και της διαδικασίας διάδοσης κυμάτων. Το μοντέλο έχει προσαρμοστεί χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο πλήθος πραγματικών καταγραφών και προσομοιώνει επιτυχώς ολόκληρη την γκάμα των διαθέσιμων χρονοϊστοριών (για τα μεγέθη της μετακίνησης, της ταχύτητας και σε αρκετές περιπτώσεις και της επιτάχυνσης) καθώς και τα αντίστοιχα φάσματα απόκρισης. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το αναλυτικό αυτό μοντέλο διευκολύνει τη μελέτη της ελαστικής και μη ελαστικής απόκρισης συμβατικών, μη συμβατικών (base-isolated) αλλά και ειδικών κατασκευών (αναρτημένες γέφυρες, θάλαμοι αποθήκευσης ρευστών) που υποβάλλονται σε σεισμικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου ως συνάρτηση των παραμέτρων του μοντέλου και, εν τέλει, ως συνάρτηση του μεγέθους του σεισμού.

## 4.2 Βάση δεδομένων

Ως δεδομένα αυτής της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν 165 καταγραφές χρονοϊστοριών εδαφικών κινήσεων από διαφορετικούς τύπους ρηγμάτων (κανονικά, ανάστροφα, οριζόντιας ολίσθησης), με διάφορα σεισμικά μεγέθη ( $M_w$  5.6 – 8.1) από σεισμικά γεγονότα ευρέως γνωστά και εκτενώς μελετημένα που έλαβαν χώρα σε ΗΠΑ, Καναδά, Μεξικό, Ιαπωνία, Ελλάδα, Τουρκία, Ιράν, Ινδία, Ταϊβάν και πρώην Σοβιετική ένωση. Μαζί με αυτές συμπεριλήφθηκαν και

επιπλέον 5 καταγραφές που πυροδοτήθηκαν σε μεγάλα υποκεντρικά βάθη, διότι παρουσίαζαν παλμικά χαρακτηριστικά όμοια με εκείνα των καταγραφών κοντινού πεδίου ( Olympia, Washington-1949, Puget Sound, Washington- 1965, Bucharest, Romania- 1977). Με εξαίρεση αυτές τις 5 τελευταίες καταγραφές, όλες οι υπόλοιπες κινήσεις καταγράφηκαν σε σταθμούς που βρίσκονταν εντός 20 km από το ρήγμα. Παρά τη γεινίαση τους με την περιοχή του ρήγματος, λιγότερες από τις μισές αυτές καταγραφές εμφάνισαν ισχυρούς παλμούς ταχύτητας. Στον ακόλουθο πίνακα καταγράφονται οι χρονοϊστορίες ταχύτητας εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου που περιείχαν διακριτούς παλμούς, μαζί με πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες που επικρατούν στη θέση καταγραφής, την μικρότερη απόσταση από το ρήγμα και τις αντίστοιχες τιμές της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την προσαρμογή- ρύθμιση του αναλυτικού μοντέλου. Οι περισσότερες από αυτές τις καταγραφές υποδηλώνουν τη δράση της έμπροσθεν κατευθυντικότητας εκτός από 5 που προέκυψαν ως αποτέλεσμα μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων (permanent translation effect/ fling step).

#	Τοποθεσία	Ημ/νία	Μη-χανισμός Ρήξης	$M_w$	Σταθμός Κατάγραφής	Τύπος Εδάφους	Μικρότερη απόσταση από το ρήγμα (km)	Διεύθυνση	PVG (cm/sec)	Φαινόμενο
1	Parkfield, CA, USA	27-Ιαν-1966	OO	6.20	C02	EI	0.1	KP	75.1	EK
2	San Fernando, CA, USA	9-Φεβ-1971	AP	6.55	PCD	ΣΒ	3.0	KP	120.0	EK
3	Gazli, USSR	17-Μαΐ-1976	AP	6.80	KAR	IB	3.0	A	60.0	EK
4	Bucharest, Romania	4-Μαρ-1977	AP	7.27	BRI	EI	190.0	KP	74.9	EK
5	Tabas, Iran	16-Σεπ-1978	AP	7.11	TAB	EI	1.2	ΠΡ	122.0	EK
6	Coyote Lake, CA, USA	8-Ιουν-1979	OO	5.63	GA6	IB	1.2	KP	47.5	EK
7	Imperial Valley, CA, USA	15-Οκτ-1979	OO	6.50	E04	EI	6.0	KP	78.3	EK
					E05	EI	2.7	KP	91.8	EK
					E06	EI	0.3	KP	112.0	EK
					E07	EI	1.8	KP	109.0	EK
EMO	EI	1.2	KP	115.0	EK					
8	Mexicali Valley, Mexico	9-Ιουν-1980	OO	6.37	VCT	EI	3.0	KP	76.7	EK
9	Morgan Hill, CA, USA	24-Απρ-1984	OO	6.15	HAL	EI	2.0	KP	39.8	EK
10	Palm Springs, CA, USA	8-Ιουλ-1986	ΛΡ	6.09	NPS	EI ή IB	4.0	KP	73.6	EK
					DSP	EI	6.4	KP	29.2	EK



## Αναπαράσταση του παλμού με τη χρήση σύνθετου κυματιδίου κατά Manroeidis & Papageorgiou

11	Whittier Narrows, CA, USA	10-Οκτ-1987	AP	5.93	DOW	EI	16.4	KP	30.7	EK
					NWK	EI	15.7	KP	20.0	EK
12	Superstition Hills, CA, USA	28-Ιουλ-1991	OO	6.00	PTS	?	0.7	KP	109.0	EK
					ELC	EI	13.6	KP	52.0	EK
13	Loma Prieta, CA, USA	17-Οκτ-1989	AP	6.90	LGP	ΣΒ	3.0	KP	102.0	EK
					STG	EI	8.3	KP	56.4	EK
14	Sierra Madre, CA, USA	28-Ιουν-1991	AP	5.56	COG	?	9.4	A	15.3	EK
15	Erxincan, Turkey	13-Μαρ-1992	OO	6.63	ERZ	EI	2.0	KP	95.2	EK
16	Landers, CA, USA	28-Ιουν-1992	OO	7.20	LUC	EI	1.1	KP	114.0	EK
17	Northbridge, CA, USA	17-Ιαν-1994	AP	6.70	JFA	EI	5.2	KP	105.0	EK
					RRS	EI	6.0	KP	173.0	EK
					SCG	EI	5.1	KP	134.0	EK
					SCH	EI	5.0	KP	122.0	EK
					NWS	EI	5.3	KP	117.0	EK
18	Aigion, Greece	15-Ιουν-1995	KP	6.33	AEG	EI ή IB	6.0		40.9	EK
					AEG	EI ή IB	6.0	E	52.0	EK
19	Izmit, Turkey	17-Αυγ-1999	OO	7.40	ARC	IB	14.0	KP	44.3	EK
					SKR	IB	3.1	ΠΡ	80.3	ΜΣΜ
					YPT	EI	2.6	ΠΡ	87.8	ΜΣΜ
					GBZ	IB	11.0	KP	41.4	EK
					GBZ	IB	11.0	ΠΡ	28.7	ΜΣΜ
20	Chi-Chi, Taiwan	20-Σεπ-1999	AP	7.60	TCU052	EI	0.8	KP	270.0	ΜΣΜ
					TCU068	EI	0.2	KP	380.0	ΜΣΜ
					TCU075	EI	0.6	KP	115.0	EK
					TCU076	EI	2.3	KP	88.0	EK
					TCU129	EI	1.5	KP	68.0	EK

OO:Οριζόντιας Ολίσθησης, AP:Ανάστροφο Ρήγμα, LP:Λοξό Ρήγμα, KP:Κανονικό Ρήγμα

ΣΒ:Σκληρός Βράχος, IB:Ιζηματογενής και Βραχώδη Συσσωματώματα, EI: Εδαφος και Ιλύς

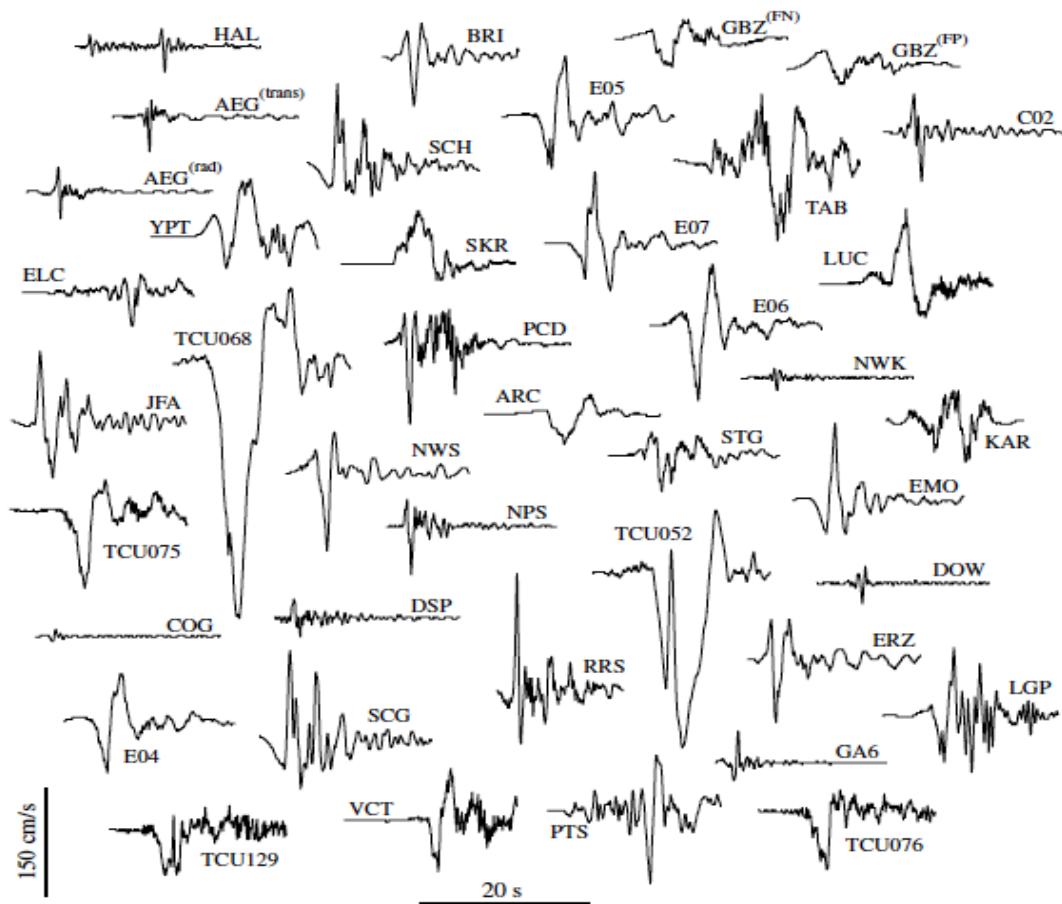
KP:Κάθετα στο Ρήγμα, ΠΡ: Παράλληλα στο Ρήγμα, A:Ακτινική, ΓΜ: Γεωγραφικού Μήκους, E: Εγκάρσια

EK:Έμπροσθεν Κατευθυντικότητα, ΜΣΜ: Μόνιμη Στατική Μετακίνηση

### Π. 4.1 : Καταγραφές κοντινού πεδίου με διακριτούς παλμούς ταχύτητας για τη ρύθμιση του αναλυτικού μοντέλου

Στην επόμενη εικόνα φαίνονται οι παλμοί ταχύτητας όλων των παραπάνω καταγραφών. Παρατηρώντας αυτά τα σήματα, είναι προφανές ότι πολλά από αυτά

μοιάζουν μεταξύ τους. Θα μπορούσε να ειπωθεί, λοιπόν, ότι η κατευθυντικότητα διάρρηξης παράγει έναν στενού εύρους παλμό ταχύτητας, του οποίου η περίοδος αυξάνει ανάλογα με το μέγεθος του σεισμού.



**Εικ. 4.1 :** Ισχυρές εδαφικές καταγραφές με διακριτούς παλμούς ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκαν για τη ρύθμιση του αναλυτικού μοντέλου.

### 4.3 Το προτεινόμενο μοντέλο

Οι παράμετροι-κλειδιά για τον ορισμό των κυματιδιακών χαρακτηριστικών των παλμών ταχύτητας κοντινού πεδίου είναι:

- Η διάρκεια του παλμού (περίοδος)
- Το πλάτος του παλμού (εύρος ταχύτητας εδαφικής κίνησης)
- Το πλήθος των κύκλων
- Η διαφορά φάσης μεταξύ των κύκλων

Συνεπώς, οι Manroeidis & Parageorgiou θεώρησαν ότι ένα μοντέλο βάσει αυτών των τεσσάρων παραμέτρων θα ήταν επαρκές για την περιγραφή ολόκληρου του συνόλου των παλμών ταχύτητας που δημιουργήθηκαν εξαιτίας της έμπροσθεν κατευθυντικότητας ή της μόνιμης εδαφικής μετακίνησης.

Το αναλυτικό μοντέλο θα πρέπει να διαθέτει τις εξής ιδιότητες:

- (1) Το σύνθετο κυματίδιο θα πρέπει να εκφράζεται με μία καταλλήλως παραμετροποιημένη απλή μαθηματική έκφραση, η οποία, με τον ελάχιστο αριθμό εισαγόμενων παραμέτρων που διαθέτουν σαφή φυσική ερμηνεία, επιτρέπει την αποτελεσματική αναπαράσταση των παλμών κοντινού πεδίου
- (2) Το σύνθετο κυματίδιο θα πρέπει να είναι σε θέση να προσομοιώνει όσο το δυνατόν περισσότερες ή ιδανικά όλες τις καταγραφές κοντινού πεδίου του πίνακα Π. 4.1
- (3) Η μαθηματική έκφραση του κυματιδίου θα πρέπει να επιτρέπει την ανάπτυξη κλειστών λύσεων για την εκτίμηση φασμάτων απόκρισης και τον προσδιορισμό των φασματικών χαρακτηριστικών σε μορφή Fourier, διευκολύνοντας την παραμετρική εκτίμηση της απόκρισης των κατασκευών σε παλμούς κοντινού πεδίου.

Όσον αφορά τα κυματίδια, παρ' όλο που στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί ποικίλα, μόνο ένα περιορισμένο πλήθος εξ αυτών είναι δημοφιλή και χρησιμοποιούνται συχνά στην πράξη. Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται τα περισσότερα κοινά κυματίδια μαζί με τις αναλυτικές εκφράσεις τους.

Κυματίδιο	Αναλυτική Έκφραση
Gabor	$f(t) = Ae^{-t^2(2\pi f_p/\gamma)^2} \cos(2\pi f_p t + v)$
Berlage	$f(t) = AH(t)t^n e^{-t(2\pi f_p/\gamma)} \cos[2\pi f_p t + v]$ $H(t)$ : Heaviside unit step function
Generalized Rayleigh	$f(t) = A(-1)^k \frac{e^{i(v+\pi/2)}}{\left(i + \frac{2\pi f_p t}{k}\right)^{k+1}}$
Küpper	$f(t) = A \left[ \sin\left(m \frac{\pi t}{T}\right) - \frac{m}{m+2} \sin\left((m+2) \frac{\pi t}{T}\right) \right]$ για $0 < t < T$
Ricker	Three-loop (symmetric): $f(t) = A(1 - 2\pi^2 f_p^2 t^2) e^{-(\pi f_p)^2 t^2}$ Two-loop(antisymmetric): $f(t) = Ate^{-(\sqrt{2}\pi f_p)^2 t^2}$

**Π. 4.2 :** Συνήθη αναλυτικά κυματίδια που χρησιμοποιούνται στην Σεισμολογία (A: πλάτος,  $f_p$ : δεσπόζουσα συχνότητα, v: γωνία φάσης,  $\gamma$ :πλήθος κύκλων, n: ασυμμετρία περιβάλλουσας συνάρτησης, k: ελέγχει τον αριθμό των “λοβών”, m: ελέγχει τον αριθμό των ημικύκλων)

Από τα κυματίδια του παραπάνω πίνακα, το αναλυτικό μοντέλο που ανταποκρίνεται ως ένα βαθμό στις προαναφερθείσες απαιτούμενες ιδιότητες και με ορισμένη τροποποίηση δύναται να τις καλύψει πλήρως είναι το *κυματίδιο*

*Garbor* (*Garbor wavelet*). Το συγκεκριμένο σήμα αποτελείται από μια αρμονική ταλάντωση και μια κωδωνοειδή συνάρτηση (περιβάλλουσα Gauss) και ορίζεται από τις εξής τέσσερις παραμέτρους που όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του παλμού: το πλάτος  $A$ , τη δεσπόζουσα συχνότητα  $f_p$ , τη διαφορά φάσης  $\nu$  και πλήθος κύκλων  $\gamma$ . Ωστόσο, η εκθετική συνάρτηση λόγω της Γκαουσιανής περιβάλλουσα που περιέχεται εντός της μαθηματικής έκφρασης του συγκεκριμένου κυματιδίου δεν παρέχει κλειστές λύσεις για την απόκριση ενός μονοβάθμιου συστήματος. Με σκοπό να εξαλείψουν αυτή την ανικανότητα, αλλά διατηρώντας τα πλεονεκτήματα του κυματιδίου Garbor (αριθμός παραμέτρων με ξεκάθαρη φυσική ερμηνεία, απλή μαθηματική έκφραση, μεγάλη ευελιξίας στις σύνθετες κυματομορφές) οι δύο ερευνητές αντικατέστησαν την Γκαουσιανή περιβάλλουσα με μια άλλη συμμετρική κωδωνοειδούς σχήματος συνάρτηση, που προκύπτει από έναν μετατοπισμένο κύκλο συνημιτόνου και απλοποιεί την αναλυτική έκφραση. Πλέον, το σήμα εκφράζεται με την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$f(t) = A \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma} t\right) \right] \cos(2\pi f_p t + \nu) \quad (4.1)$$

Στο προτεινόμενο μοντέλο μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις και διορθώσεις:

- Ο μετατοπισμένο κύκλος συνημιτόνου αποτελεί μια περιοδική συνάρτηση και επομένως δεν παρουσιάζει μια μοναδική κορυφή όπως στην περίπτωση της Γκαουσιανής περιβάλλουσας στο κυματίδιο Garbor. Για το λόγο αυτό περιορίζεται το πεδίο ορισμού του σήματος στο παρακάτω χρονικό διάστημα:

$$-\frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq \frac{\gamma}{2f_p} \quad (4.2.a)$$

- Η περίοδος του αρμονικού σήματος θα πρέπει να είναι μικρότερη από την περίοδο της νέας περιβάλλουσας ώστε τα παραγόμενα σήματα να έχουν φυσική σημασία. Δηλαδή, ισχύει:

$$\frac{1}{f_p} < \frac{\gamma}{f_p} \Rightarrow \gamma > 1 \quad (4.2.β)$$

- Για την ανάπτυξη του μοντέλου εξυπηρετεί ιδιαίτερα η εισαγωγή μιας χρονικής στιγμής  $t_0$  στην εξίσωση (4.1) για τον ακριβή προσδιορισμό του μεγίστου της περιβάλλουσας. Η παράμετρος αυτή επιτρέπει τη μετάθεση του σήματος κατά μήκος του χρονικού άξονα. Έτσι,

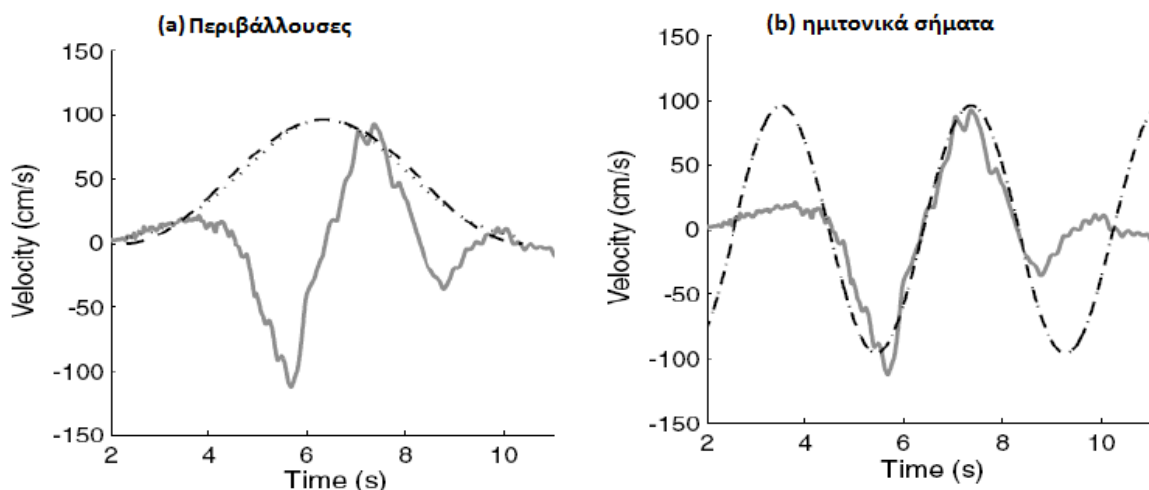
$$t \Rightarrow t - t_0 \quad (4.2. \gamma)$$

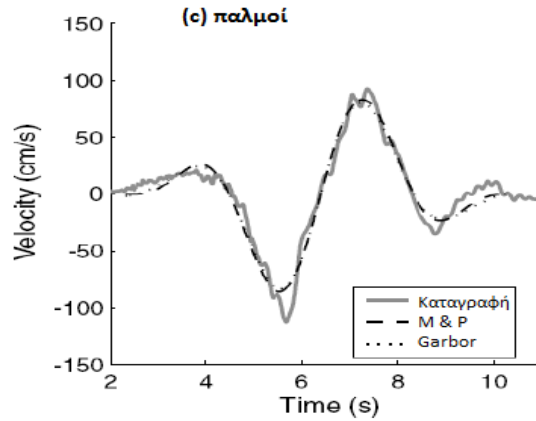
Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει η διατύπωση του προτεινόμενου αναλυτικού μοντέλου για τους παλμούς ταχύτητας κοντινού πεδίου:

$$v(t) = \begin{cases} A \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t - t_0)\right) \right] \cos[2\pi f_p(t - t_0) + \nu], & t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_p} \text{ με } \gamma < 1 \\ 0, & \text{στις άλλες περιπτώσεις} \end{cases} \quad (4.3)$$

Η παράμετρος  $A$  ελέγχει το πλάτος του σήματος ή διαφορετικά το εύρος της εδαφικής ταχύτητας,  $f_p$  είναι η δεσπόζουσα συχνότητα του σήματος,  $\nu$  η διαφορά φάσης της ημιτονικής συνιστώσας ( $\nu=0$  και  $\nu=\pm\pi/2$ , για συμμετρικό και αντισυμμετρικό σήμα αντίστοιχα),  $\gamma$  η παράμετρος που ορίζει τον χαρακτήρα της ταλάντωσης του σήματος (π.χ. με τη μέθοδο zero crossing)- για μικρές τιμές  $\gamma$  το σήμα παρουσιάζει παλμού τύπου  $\Delta$ , ενώ για υψηλότερες τιμές του  $\gamma$  αυξάνονται τα σημεία μηδενισμού, δηλαδή ο αριθμός των κύκλων- και  $t_0$  η περιοχή της κορυφής της περιβάλλουσας.

Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζεται η παραγωγή σύνθετων σημάτων για την προσομοίωση του παλμού ταχύτητας σε διεύθυνση κάθετη προς το ρήγμα για το σεισμικό γεγονός του 1979 Imperial Valley στην California. Τα σήματα παράγονται τόσο με το αρχικό κυματίδιο Garbor όσο και με το τροποποιημένο κατά τους Mavroeidis & Papageorgiou για να αποδειχθεί ότι τα δύο σήματα παράγουν πανομοιότυπους παλμούς και ότι δικαιολογείται η αντικατάσταση της Γκαουσιανής περιβάλλουσας από τη μετατοπισμένη συνημιτονική συνάρτηση. Συγκρίνοντας, προκύπτει ότι το ημιτονικό σήμα είναι το ίδιο και για τους δύο παλμούς ενώ οι περιβάλλουσες συναρτήσεις μοιάζουν σημαντικά.





**Εικ. 4.2 :** Σύγκριση κυματιδίου Μανροειδής & Παραγεωργίου και κυματιδίου Garbor , 1979 Imperial Valley, California

Όσο για την περίοδο  $T_P$ , το μέγεθός που έχει απασχολήσει αρκετούς ερευνητές, οι Μανροειδής & Παραγεωργίου πρότειναν ένα αντικειμενικό ορισμό της διάρκειας του παλμού ως τον αντίστροφο της δεσπόζουσας συχνότητας  $f_P$ .

$$T_P = \frac{1}{f_P} \quad (4.4)$$

Οι αναλυτικές εκφράσεις για τον προσδιορισμό των χρονοϊστοριών εδαφικής επιτάχυνσης και εδαφικής μετακίνησης σύμφωνα με τη σχέση (4.3) που δίνει την εδαφική ταχύτητα είναι οι εξής:

$$\alpha(t) = \begin{cases} -\frac{A\pi f_P}{\gamma} \left[ \begin{array}{l} \sin\left(\frac{2\pi f_P}{\gamma}(t-t_0)\right) \cos[2\pi f_P(t-t_0) + \nu] \\ + \gamma \sin[2\pi f_P(t-t_0) + \nu] \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi f_P}{\gamma}(t-t_0)\right) \right] \end{array} \right], t_0 - \frac{\gamma}{2f_P} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_P} \text{ με } \gamma > 1 \\ 0, \text{ στις άλλες περιπτώσεις} \end{cases} \quad (4.5)$$

$$d(t) = \begin{cases} \frac{A}{4\pi f_P} \left[ \begin{array}{l} \sin[2\pi f_P(t-t_0) + \nu] + \frac{1}{2} \sin\left[\frac{2\pi f_P(\gamma-1)}{\gamma}(t-t_0) + \nu\right] \\ + \frac{1}{2\gamma+1} \sin\left[\frac{2\pi f_P(\gamma+1)}{\gamma}(t-t_0) + \nu\right] \end{array} \right] + C, t_0 - \frac{\gamma}{2f_P} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_P} \text{ με } \gamma > 1 \\ \frac{A}{4\pi f_P} \frac{1}{(1-\gamma^2)} \sin(\nu - \pi\gamma) + C, t < t_0 - \frac{\gamma}{2f_P} \\ \frac{A}{4\pi f_P} \frac{1}{(1-\gamma^2)} \sin(\nu + \pi\gamma) + C, t > t_0 + \frac{\gamma}{2f_P} \end{cases} \quad (4.6)$$

Οι σταθερές τιμές μετακίνησης για  $t < t_0 - \frac{\gamma}{2f_P}$  και  $t > t_0 + \frac{\gamma}{2f_P}$  προσδιορίστηκαν για λόγους συνέχειας της συνάρτησης ενώ η σταθερά  $C$  λαμβάνεται απλοποιητικά ίση με 0.

#### 4.4 Η προσαρμογή – ρύθμιση του μοντέλου

Η ρύθμιση του προτεινόμενου αναλυτικού μοντέλου έγινε χρησιμοποιώντας τις πραγματικές ισχυρές εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου του πίνακα Π. 4.1. Το μαθηματικό μοντέλο προσαρμόστηκε ταυτόχρονα στις χρονοϊστορίες μετακίνησης επιτάχυνσης και ταχύτητας καθώς επίσης και στα αντίστοιχα ελαστικά φάσματα απόκρισης. Οι Mavroeidis & Papageorgiou επισημαίνουν ότι θα μπορούσαν να προσαρμόσουν το αναλυτικό μοντέλο μόνο βάσει των καταγεγραμμένων χρονοϊστοριών ταχύτητας και έπειτα να χρησιμοποιήσουν τις εκτιμώμενες παραμέτρους εισόδου για την παραγωγή των αντίστοιχων συνθετικών χρονοϊστοριών επιτάχυνσης και μετακίνησης καθώς επίσης και των συνθετικών φασμάτων απόκρισης. Ωστόσο, με μια τέτοια διαδικασία οι παραγόμενοι παλμοί ταχύτητας θα προσέγγιζαν επαρκώς τις καταγραφές αλλά δεν θα ήταν επιτυχής η αναπαραγωγή των συνθετικών μετακινήσεων και των φασμάτων απόκρισης σε συμφωνία με τις αντίστοιχες καταγραφές. Συνεπώς, θεώρησαν ότι είναι περισσότερο αξιόπιστη και αποτελεσματική η ρύθμιση του αναλυτικού μοντέλου με ταυτόχρονη προσαρμογή των χρονοϊστοριών και των φασμάτων.

Η εκτίμηση των παραμέτρων  $T_p$ ,  $A$ ,  $\nu$ ,  $\gamma$  δεν πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων αλλά χρησιμοποιώντας μια βήμα προς βήμα διαδικασία. Η διάρκεια του παλμού  $T_p$  προσδιορίστηκε ώστε το φάσμα απόκρισης ψευδοταχύτητας της συνθετικής και της καταγεγραμμένης εδαφικής κίνησης να εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές τους στην ίδια περίπου περίοδο. Με όμοιο τρόπο, προσδιορίστηκε και το πλάτος  $A$ . Οι παράμετροι  $\nu$  και  $\gamma$  προσαρμόστηκαν έτσι ώστε να βελτιστοποιήσουν την προσαρμογή των συνθετικών καταγραφών ταχύτητας και μετακίνησης. Μάλιστα, αξίζει να σημειωθεί ότι οι παράμετροι  $A$ ,  $\nu$  και  $\gamma$  εκτιμώνται ταυτόχρονα μέσω δοκιμών καθώς το  $\gamma$  επηρεάζει τα φασματικά πλάτη της ψευδοταχύτητας. Οι παράμετροι που προέκυψαν από αυτή τη διαδικασία συνοψίζονται στον πίνακα Π. 4.3

No.	Τοποθεσία	Σταθμός Καταγραφής	Διεύθυνση	A	$\gamma$	$\nu(^{\circ})$	$f_p$ (Hz)	$t_0$ (sec)
1	Parkfield, CA, USA	C02	KP	60.0	1.700	100.0	0.500	4.100
2	San Fernando, CA, USA	PCD	KP	115.0	1.600	180.0	0.680	3.000
3	Gazli, USSR	KAR	A	45.0	2.900	70.0	0.238	8.400
4	Bucharest, Romania	BRI	KP	62.0	2.400	200.0	0.470	3.830
5	Tabas, Iran	TAB	ΠP	104.0	2.200	180.0	0.190	12.400
6	Coyote Lake, CA, USA	GA6	KP	48.0	1.550	315.0	1.000	2.600
7	Imperial Valley, CA, USA	E04	KP	71.0	1.900	305.0	0.225	6.100
		E05	KP	84.0	1.900	300.0	0.255	6.600
		E06	KP	96.0	2.100	265.0	0.260	6.350
		E07	KP	79.0	2.100	25.0	0.275	6.100
		EMO	KP	78.0	2.300	0.0	0.340	4.950
8	Mexicali Valley, Mexico	VCT	KP	80.0	1.500	270.0	0.270	11.550

## Κεφάλαιο 4

9	Morgan Hill, CA, USA	HAL	KP	38.0	1.750	130.0	1.150	10.450
10	Palm Springs, CA, USA	NPS	KP	60.0	1.700	170.0	0.800	2.890
		DSP	KP	21.0	2.000	80.0	0.600	2.520
11	Whittier Narrows, CA, USA	DOW	KP	29.0	2.200	220.0	1.200	5.350
		NWK	KP	20.0	2.100	200.0	1.350	4.300
12	Superstition Hills, CA, USA	PTS	KP	112.0	1.800	237.0	0.445	12.295
		ELC	KP	46.0	1.650	210.0	0.430	13.180
13	Loma Prieta, CA, USA	LGP	KP	60.0	3.000	280.0	0.310	7.600
		STG	KP	47.0	1.900	150.0	0.270	6.500
14	Sierra Madre, CA, USA	COG	A	9.2	2.300	260.0	1.100	2.190
15	Erxincan, Turkey	ERZ	KP	67.0	2.500	210.0	0.410	3.700
16	Landers, CA, USA	LUC	KP	100.0	1.210	55.0	0.170	10.500
17	Northbridge, CA, USA	JFA	KP	87.0	2.300	100.0	0.330	4.120
		RRS	KP	142.0	1.700	20.0	0.800	2.430
		SCG	KP	93.0	2.500	0.0	0.340	3.650
		SCH	KP	80.0	2.300	0.0	0.330	3.770
		NWS	KP	94.0	1.700	200.0	0.370	4.770
18	Aigion, Greece	AEG		44.5	1.450	75.0	1.400	3.840
		AEG	E	61.0	1.200	205.0	1.480	4.340
19	Izmit, Turkey	ARC	KP	41.0	1.380	225.0	0.140	14.700
		SKR	ΠΡ	67.0	1.023	5.0	0.105	9.000
		YPT	ΠΡ(1ος παλμός)	35.0	1.550	90.0	0.190	9.150
			ΠΡ (2ος παλμός)	91.5	1.050	10.0	0.137	12.050
		GBZ	KP	34.5	2.200	220.0	0.210	6.600
GBZ	ΠΡ	28.0	1.800	85.0	0.165	4.900		
20	Chi-Chi, Taiwan	TCU052	KP	225.0	1.048	190.0	0.079	35.400
		TCU068	KP	332.0	1.055	190.0	0.082	36.300
		TCU075	KP	105.0	1.200	220.0	0.170	28.500
		TCU076	KP	70.0	1.088	200.0	0.175	27.280
		TCU129	KP	52.0	1.090	200.0	0.130	27.100
21	Kobe, Japan	KOB	ΚΡ(1ος παλμός)	85.0	1.550	270.0	1.000	7.600
			ΚΡ(2ος παλμός)	75.0	1.700	270.0	1.100	8.400
			ΚΡ(3ος παλμός)	45.0	2.000	70.0	0.500	9.300

**Π. 4.3 :** Παράμετροι που προέκυψαν από την εφαρμογή του αναλυτικού μοντέλου στις καταγραφές κοντινού πεδίου

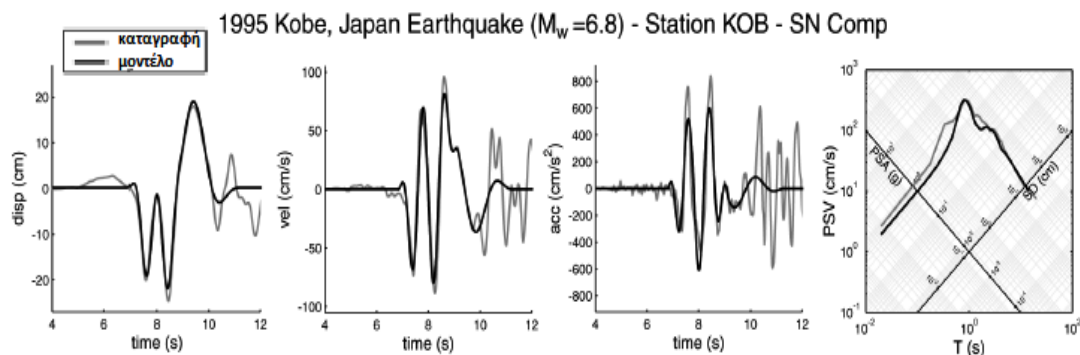


## 4.5 Αξιολόγηση του μοντέλου

Εξετάζοντας τις τιμές του προηγούμενου πίνακα παρατηρείται ότι η τιμή της παραμέτρου  $\gamma$  κυμαίνεται μεταξύ 1 και 3. Όποτε υπάρχει μόνιμη μετακίνηση στην καταγεγραμμένη εδαφική κίνηση, η τιμή του  $\gamma$  προσεγγίζει τη μονάδα και ο παλμός ταχύτητας λαμβάνει συμμετρική μορφή με την παράμετρο  $\nu$  να παίρνει τιμές είτε κοντά στις  $0^\circ$  είτε στις  $180^\circ$ . Αντίθετα, όταν η κίνηση περιέχει πλήθος ταλαντώσεων χρησιμοποιείται μεγαλύτερη τιμή για το  $\gamma$ . Επιπλέον, η περίοδος ορισμένη κατά τη σχέση (4.4) είναι αρκετά κοντά με την περίοδο κατά την οποία το φάσμα απόκρισης ψευδοταχύτητας παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή του για την πλειονότητα των καταγεγραμμένων εδαφικών κινήσεων. Τέλος, όσον αφορά το πλάτος  $A$ , παρουσιάζει τιμές ελαφρώς μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές μέγιστης εδαφικής ταχύτητας (PVG) κατά τον πίνακα Π. 4.1.

Από τις εφαρμογές των δύο ερευνητών φάνηκε ότι το προτεινόμενο μοντέλο προσομοιώνει επιτυχώς όλη τη γκάμα καταγραφών κοντινού πεδίου για τις χρονοϊστορίες ταχύτητας, μετακίνησης και (πολλές φορές) επιτάχυνσης, ποιοτικά και ποσοτικά. Σκοπός τους ήταν η ακριβής αναπαραγωγή των χαρακτηριστικών της εδαφικής κίνησης για ενδιάμεσες και μεγάλες περιόδους. Επομένως, τα υψίσυχνα τμήματα εδαφικών κινήσεων που είναι προφανή στα επιταχυνσιογραφήματα δε δύναται να προσομοιωθούν με το παρόν μοντέλο. Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα του μοντέλου στην προσομοίωση των ελαστικών φασμάτων απόκρισης φαίνεται ότι ήταν αποτελεσματική στη “γειτονιά” της δεσπόζουσας συχνότητας του παλμού. Πιο συγκεκριμένα, για σεισμούς μεσαίας έντασης με παλμούς ταχύτητας σχετικά μικρής διάρκειας υπάρχει συμφωνία μεταξύ συνθετικών και καταγεγραμμένων φασμάτων σε όλο το εύρος συχνοτήτων, ενώ για ισχυρούς σεισμούς με μακράς διάρκειας παλμούς ταχύτητας η συμφωνία αυτή περιορίζεται μόνο στις περιοχές μεγάλης περιόδου.

Τυπικά, αναφέρεται ότι οι πραγματικές καταγραφές ταχύτητας κοντινού πεδίου μπορεί να αποτελούνται από περισσότερους από έναν παλμούς οφειλόμενους στη σχετική ολίσθηση τεμάχων στη ρηξιγενή περιοχή. Σε τέτοιες περιπτώσεις, χρησιμοποιείται μια ακολουθία συνθετικών παλμών για την προσομοίωση της καταγραφής. Ένα παράδειγμα τέτοιας περίπτωσης εικονίζεται παρακάτω:



**Εικ. 4.3 :** Συνδυασμός τριών συνθετικών παλμών για την προσαρμογή της καταγεγραμμένης εδαφικής κίνησης κατά τη διάρκεια σεισμού στο Kobe της Ιαπωνίας (1995), σταθμός KOB



## **Κεφάλαιο 5**

**Προσδιορισμός χαρακτηριστικών παλμού –  
Χρήση φάσματος συνέλιξης**



## 5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μία νέα μέθοδος για την αναγνώριση των σημαντικών παλμών που υπάρχουν εντός μιας εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου. Οι παλμοί αυτοί χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση καταγραφών που αναπαριστούν αποτελεσματικά τα φάσματα απόκρισης στο εύρος των μεσαίων και μεγάλων περιόδων αλλά και σε αναλύσεις, γραμμικές ή μη, χρονοϊστοριών. Για τον προσδιορισμό των αντίστοιχων περιόδων των παλμών εισάγεται ένα νέο φάσμα, για το οποίο θα γίνει λόγος σε επόμενη παράγραφο και καλείται *φάσμα συνέλιξης (convolution spectrum)*. Η νέα αυτή μέθοδος παρουσιάζεται σε βήματα, έχει ήδη ενσωματωθεί σε υπολογιστικό κώδικα και έχει εφαρμοστεί κατά την μελέτη των Mimosoglou et al. σε 90 καταγραφές αποδεικνύοντας ότι η αποτελεσματικότητα της είναι ικανοποιητική για μη γραμμικές αναλύσεις και για σχεδιαστικούς σκοπούς.

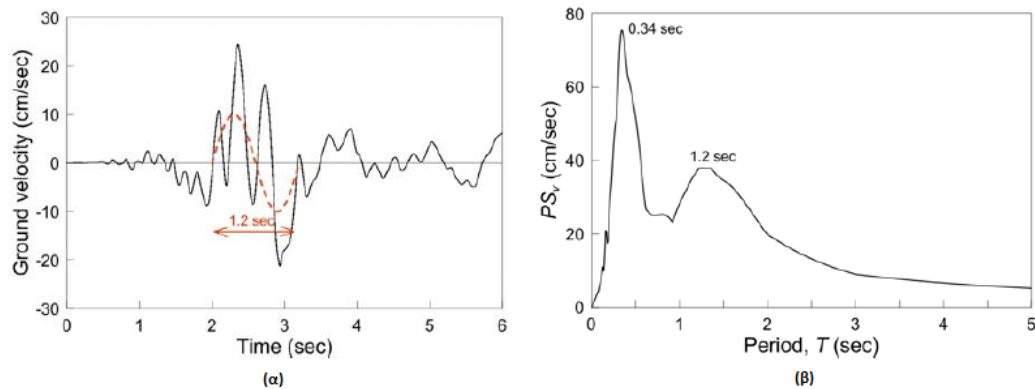
Όπως έχει ήδη αναλυθεί, οι σημαντικοί παλμοί ταχύτητας που παρατηρούνται στην χρονοϊστορία της εδαφικής κίνησης, κυρίως στην κάθετη προς το ρήγμα διεύθυνση, ενισχύουν τις συνιστώσες της εδαφικής κίνησης που αντιστοιχούν σε μεγάλες περιόδους, στις χρονοϊστορίες ταχύτητας και μετακίνησης αλλά και στα αντίστοιχα φάσματα. Γι' αυτό είναι ιδιαίτερης σημασίας, η αναγνώριση αυτών των σημαντικών παλμών αλλά και των χαρακτηριστικών τους (π.χ. περίοδος, πλάτος παλμού κλπ). Στην παρούσα μεθοδολογία αξιοποιείται η, αποδεδειγμένα αποτελεσματική, μαθηματική προσέγγιση των Mavroeidis & Parageorgiou (2003) που αναπτύχθηκε για την αναπαράσταση των παλμών κατευθυντικότητας ενώ παράλληλα συνδυάζεται με μια καλώς ορισμένη διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων των αντίστοιχων κυματιδίων. Επιτρέπεται, κατ' αυτόν τον τρόπο, η αναγνώριση και η εξαγωγή όλων των σημαντικών παλμών στη περιοχή των μεσαίων και των μεγάλων περιόδων που, στη συνέχεια συντίθενται για την προσομοίωση της εδαφικής κίνησης. Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των κυματιδίων πραγματοποιείται με τη βέλτιστη προσαρμογή του φάσματος απόκρισης ταχύτητας.

Συνοψίζοντας, η μέθοδος αυτή διαθέτει αμφίσημη σημαντικότητα. Κατ' αρχάς, είναι ένα ακόμη εργαλείο για την εξαγωγή των σημαντικών παλμών από τις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Επιπλέον, παρέχει απλοποιημένες τεχνητές χρονοϊστορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί των πραγματικών καταγραφών σε αντισεισμικές μελέτες σχεδιασμού των κατασκευών μέσω αναλύσεων χρονοϊστορίας. Μάλιστα, όσον αφορά το δεύτερο αυτό πλεονέκτημα, έχει αποδειχθεί ότι αν και οι σημαντικοί παλμοί έχουν οριστεί μέσω προσαρμογής σε ελαστικά φάσματα απόκρισης, οι παραγόμενες χρονοϊστορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ικανοποιητικά και για μη γραμμικές αναλύσεις.

## 5.2 Περιγραφή της προτεινόμενης διαδικασίας

### 5.2.1 Η ανάγκη εισαγωγής του φάσματος συνέλιξης

Κατά καιρούς, έχουν υιοθετηθεί πολλοί τρόποι για τον προσδιορισμό της περιόδου  $T_p$  του δεσπόζοντος παλμού στις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Μια συνήθης πρακτική είναι η εκτίμηση της από το μέγιστο του φάσματος απόκρισης ψευδοταχύτητας για απόσβεση 5%, η οποία, ωστόσο, έχει αμφισβητηθεί από πολλούς ερευνητές. Η αδυναμία αυτής της προσέγγισης φαίνεται με τη βοήθεια των ακόλουθων διαγραμμάτων.



**Εικ. 5.1 :** (α) χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας, (β) φάσμα απόκρισης ψευδοταχύτητας για 5% απόσβεση (καταγραφή G06-320 από το σεισμό Coyote Lake 1979)

Αναλυτικότερα, από τη χρονοϊστορία φαίνεται ότι στην εδαφική κίνηση περιέχεται ένας παλμός με περίοδο περίπου ίση με 1,2 sec, ίδια με την τιμή που προτείνει ο Baker στη μελέτη του (2007). Ωστόσο, η περίοδος που αντιστοιχεί στο μέγιστο του εικονιζόμενου φάσματος ψευδοταχύτητας είναι 0,34 sec ενώ το εύρος της φασματικής ταχύτητας που αντιστοιχεί στην περίοδο  $T= 1,2$  sec είναι σημαντικά μικρότερο.

Ένας εναλλακτικός τρόπος είναι ο προσδιορισμός της περιόδου  $T_p$  από τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης μετακίνησης και βασίζεται στις ακόλουθες παρατηρήσεις. Ως γνωστόν, οι φασματικές τιμές Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης μπορεί να είναι ίσες με τις αντίστοιχες τιμές των φασμάτων απόκρισης ταχύτητας στην περίπτωση που οι δεύτερες εμφανίζονται προς το τέλος της εδαφικής κίνησης (Hudson 1979). Επομένως, το φάσμα απόκρισης ταχύτητας χωρίς απόσβεση θεωρείται ικανοποιητική περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης, δηλαδή ισχύει:

$$\tilde{\alpha}_g(\omega) \leq S_{v,0}(\omega) \quad (5.1)$$

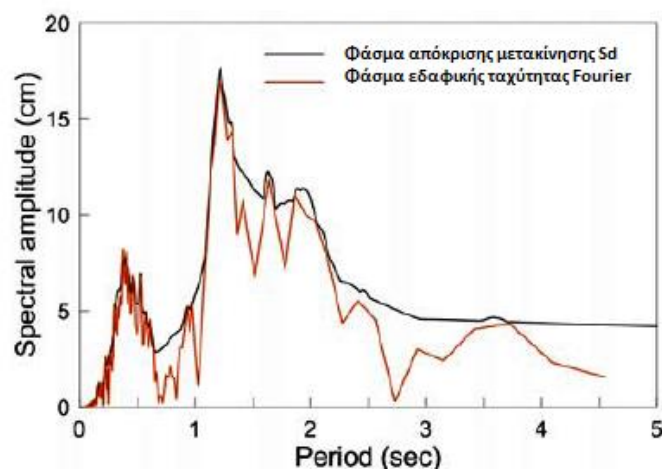
όπου  $\tilde{\alpha}_g(\omega) = \mathbb{F}(\alpha_g)$  είναι το φασματικό εύρος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης  $\alpha_g(t)$  και  $S_{v,0}(\omega)$  είναι η φασματική ταχύτητα απόκρισης για μηδενική απόσβεση.

Ομοίως, αποδεικνύεται ότι το φάσμα απόκρισης μετακίνησης για μηδενική απόσβεση αποτελεί ικανοποιητική περιβάλλουσα του φάσματος Fourier εδαφικής ταχύτητας, δηλαδή:

$$\tilde{v}_g(\omega) \leq S_{d,0}(\omega) \quad (5.2)$$

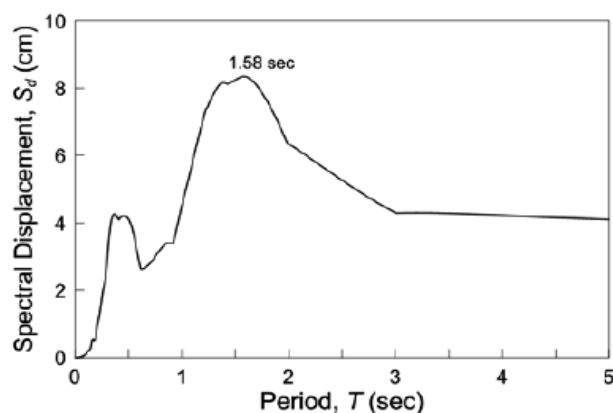
όπου  $\tilde{v}_g(\omega) = F(v_g)$  είναι το φασματικό εύρος Fourier της εδαφικής ταχύτητας  $v_g(t)$  και  $S_{d,0}(\omega)$  είναι η φασματική μετακίνηση απόκρισης για μηδενική απόσβεση

Μια ποιοτική απεικόνιση αυτής της παρατήρησης φαίνεται παρακάτω, για το ανωτέρω σεισμικό γεγονός και στον ίδιο σταθμό καταγραφής:



**Εικ. 5.2 :** Σύγκριση του φάσματος Fourier εδαφικής ταχύτητας με το φάσμα απόκρισης μετακίνησης για μηδενική απόσβεση (καταγραφή G06-320 από το σεισμό Coyote Lake 1979)

Για την ίδια καταγραφή ο εναλλακτικός ορισμός της περιόδου δίνει  $T_p = 1,58 \text{ sec}$  που προσεγγίζει αρκετά την τιμή 1,2 sec όπως εκτιμήθηκε από την καταγραφή εδαφικής ταχύτητας.



**Εικ. 5.3 :** Φάσμα απόκρισης μετακίνησης για 5% απόσβεση (καταγραφή G06-320 από το σεισμό Coyote Lake 1979)

Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου ακόμη και αυτός ο εναλλακτικός τρόπος δίνει μη έγκυρα αποτελέσματα. Ένας λόγος που τον καθιστά επίσης αναξιόπιστο είναι ότι το μέγιστο του φάσματος απόκρισης μετακίνησης μπορεί να επηρεάζεται από την παρουσία σφαλμάτων στις περιοχές μεγάλων περιόδων στην καταγραφή της εδαφικής επιτάχυνσης.

Επομένως, ούτε η μέθοδος με την ψευδοταχύτητα ούτε η μέθοδος με φάσμα απόκρισης μετακίνησης μπορούν να γενικευθούν για τη χρήση τους στην εκτίμηση της περιόδου του παλμού καθώς οδηγούν σε σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πολλές εδαφικές κινήσεις επηρεάζονται από περισσότερους του ενός παλμούς με διαφορετική περίοδο.

Η μέθοδος των Mimoglou et al. δίνει τη δυνατότητα εντοπισμού όλων των σημαντικών παλμών που σχετίζονται με τα φαινόμενα κατευθυντικότητας σε εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου μέσω συνδυασμού φασμάτων απόκρισης μετακίνησης και ταχύτητας. Πιο συγκεκριμένα, αναγνωρίζοντας ότι οι παλμικές συνιστώσες μιας εδαφικής κίνησης επηρεάζονται σε διαφορετικό βαθμό και από την εδαφική επιτάχυνση αλλά και από την εδαφική ταχύτητα καταλήγουν ότι η περίοδος θα πρέπει να δεσπάζει στη συνέλιξη των δύο αυτών χρονοϊστοριών. Επιπλέον, οι εξαιρετικά υψηλές και χαμηλές συχνότητες που εμπεριέχονται στην εδαφική επιτάχυνση και στην εδαφική ταχύτητα εξομαλύνονται. Κατά συνέπεια, τα μέγιστα της συνέλιξης επιτάχυνσης – ταχύτητας αντιστοιχούν στις περιόδους των σημαντικών παλμών που εμπεριέχονται στην εδαφική κίνηση.

Ως γνωστό, το φάσμα Fourier της συνέλιξης δύο σημάτων είναι ίσο με το γινόμενο των φασμάτων Fourier των συνελιχθέντων σημάτων. Σύμφωνα με όσα προειπώθηκαν, το φάσμα ταχύτητας για μηδενική απόσβεση  $S_{v,0}$  προσεγγίζει το φάσμα Fourier της εδαφική ταχύτητας και το φάσμα μετακίνησης για μηδενική απόσβεση  $S_{d,0}$  προσεγγίζει το φάσμα Fourier της εδαφικής ταχύτητας. Με βάση αυτά, το φάσμα Fourier της συνέλιξης προσδιορίζεται προσεγγιστικά ως το γινόμενο  $S_{v,0} \times S_{d,0}$  και οι περίοδοι των σημαντικών παλμών εκτιμώνται από τα μέγιστα του φάσματος συνέλιξης. Έτσι, η χρήση του φάσματος συνέλιξης επιτρέπει τον σωστό υπολογισμό της περιόδου του παλμού είτε αυτός συνδέεται με τη δεσπάζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης μετακίνησης είτε συνδέεται με τη δεσπάζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης ψευδοταχύτητας.

Παρόλο που το πιο πάνω συμπέρασμα έχει εφαρμογή στο φάσμα  $S_d \times S_v$  για μηδενική απόσβεση, στη μέθοδο των Mimoglou et al. προτείνεται ο προσδιορισμός της περιόδου να γίνεται μέσω του φάσματος  $S_d \times S_v$  για απόσβεση 5%. Οφείλει να επισημανθεί ότι η περίοδος που προκύπτει από το φάσμα για μηδενική απόσβεση, δεν συμπίπτει απαραίτητα με την αντίστοιχη για απόσβεση 5%. Ωστόσο, προτείνεται από τους ερευνητές η χρήση των φασμάτων για  $\xi=5\%$ , διότι τα αποτελέσματα συμφωνούν περισσότερο με εκείνα του Baker, που χρησιμοποιούνται ως δείκτες αναφοράς. Επιπρόσθετα, τα φάσματα απόκρισης για  $\xi=5\%$ , που χρησιμοποιούνται ευρύτερα στον τομέα του πολιτικού μηχανικού, προσεγγίζουν καλύτερα τα αντίστοιχα φάσματα των εξαγόμενων παλμών. Οι ακόλουθες αναλύσεις, λοιπόν, χρησιμοποιούν φάσμα για απόσβεση 5%.



Επίσης, σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι, επιτρέπει τον εντοπισμό πιθανών πρόσθετων σημαντικών παλμών που εμπεριέχονται στην εδαφική κίνηση στην περιοχή μέσων και χαμηλών συχνοτήτων. Το γεγονός ότι για την αξιόπιστη αναπαράσταση της εδαφικής κίνησης και την ικανοποιητική προσέγγιση των φασμάτων απόκρισης μπορεί να χρειάζονται παραπάνω από ένας παλμοί είχε αναγνωριστεί και από τους Manroei & Parageorgiou (2003). Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητος ο συνδυασμός περισσότερων κυματιδίων για την επιτυχημένη αναπαράσταση της πραγματικής καταγραφής.

### 5.2.2 Διερεύνηση και κριτήρια για τον αποκλεισμό μη σημαντικών παλμών

Οι πρόσθετοι παλμοί αναγνωρίζονται ως οι δευτερεύουσες κορυφές στο φάσμα συνέλιξης και μπορεί να αντιστοιχούν είτε σε μικρότερες είτε σε μεγαλύτερες περιόδους σε σύγκριση με την περίοδο του πρωτεύοντος σημαντικού παλμού. Επειδή, όμως, υπάρχουν και περιπτώσεις που οι παλμοί αυτοί δεν είναι ευδιάκριτοι προτείνεται η εκτίμηση τους να γίνεται επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία για τις αντίστοιχες απομένουσες εδαφικές κινήσεις που προκύπτουν από την εξαγωγή των προηγούμενων ορισμένων παλμών από την αρχική καταγραφή. Η διαδικασία αυτή οφείλει να επαναληφθεί τόσες φορές μέχρις ότου να εντοπιστούν όλοι οι σημαντικοί παλμοί.

Στο σημείο αυτό, όμως, αξίζει να αναφερθεί ότι δεν είναι όλοι οι προσδιορισμένοι παλμοί σημαντικοί. Γι' αυτό το λόγο, οι ερευνητές εισήγαγαν κριτήρια για να κρίνουν εάν ένας παλμός πρέπει να γίνει αποδεκτός ή να απορριφθεί. Τα κριτήρια αυτά συνάδουν με τα κριτήρια που είχε θέσει ο Baker στην ανάλυση του και παρουσιάζονται παρακάτω:

- (1) Αποκλεισμός παλμών που φτάνουν “αργά” άρα δεν οφείλονται σε φαινόμενα κατευθυντικότητας. Το κριτήριο αυτό είναι ελάχιστο τροποποιημένο σε σχέση με εκείνο που είχε θέσει ο Baker ορίζοντας ότι για να εμφανίζεται ένας εξαγόμενος παλμός στην αρχή της εδαφικής κίνησης θα πρέπει να φτάνει το 10% του ολικού του CSV προτού η αρχική εδαφική κίνηση φτάσει το 20% του αντίστοιχου ολικού της CSV δηλαδή όταν ισχύει η σχέση  $t_{20\%, orig} > t_{10\%, pulse}$  με CSV το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας ( παρ. 3.3.4 ). Εδώ, όλοι οι πρόσθετοι παλμοί που ξεκινούν πριν το τέλος του πρώτου παλμού θεωρούνται σημαντικοί ακόμα και αν δεν ικανοποιείται η παραπάνω μαθηματική σχέση.
- (2) Αποκλεισμός των μη σημαντικών παλμών. Το κριτήριο αυτό βασίζεται στην επίδραση που έχει κάθε παλμός στο φάσμα απόκρισης ταχύτητας. Στο πλαίσιο αυτό χρησιμοποιείται το αθροιστικό φάσμα απόκρισης ταχύτητας που ορίζεται από την ακόλουθη σχέση

$$CS_v = \int_0^{T_{max}} PS_{v,\xi}(T) dT \quad (5.3)$$

όπου  $PS_{v,\xi}(T)$  είναι η φασματική ψευδοταχύτητα για την επιθυμητή τιμή απόσβεσης  $\xi$  για περίοδο  $T$  με  $T_{max}$  την μέγιστη περίοδο του φάσματος-λαμβάνεται  $T_{max}=20sec$ .

Υπολογίζονται λοιπόν οι τιμές του παραπάνω ολοκληρώματος

- για την προσομοιωμένη εδαφική κίνηση που συντίθεται από όλους τους μέχρι τότε ορισμένους παλμούς ( $i$  pulses)  $CS_{v,sim,i}$  και
- για την προσομοιωμένη εδαφική κίνηση που συντίθεται από όλους τους προηγούμενους ορισμένους παλμούς πέραν του παλμού  $i$  ( $i-1$  pulses)  $CS_{v,sim,(i-1)}$

Ο παλμός  $i$  θεωρείται σημαντικός όταν συμβάλλει στο  $CS_{v,sim}$  περισσότερο από 5%, δηλαδή γίνεται αποδεκτός ως σημαντικός όταν ικανοποιείται το ακόλουθο κριτήριο:

$$\frac{CS_{v,sim,i} - CS_{v,sim,(i-1)}}{CS_{v,sim,(i-1)}} \geq 5\% \quad (5.4)$$

- (3) Πότε σταματά η διαδικασία. Η διαδικασία σταματά όταν ένα σημαντικό ποσοστό, περίπου 90%, του αθροιστικού φάσματος απόκρισης ταχύτητας της αρχικής καταγραφής,  $CS_{v,orig}$  έχει ήδη επιτευχθεί με την μέχρις ώρας προσομοιωμένη εδαφική κίνηση, δηλαδή όταν:

$$\frac{CS_{v,sim,i}}{CS_{v,orig}} \geq 90\% \quad (5.5)$$

### 5.3 Εκτίμηση των παραμέτρων των κυματιδίων

Η παρούσα διαδικασία υιοθετεί το κυματίδιο που προτάθηκε από τους Manroeidis & Parageorgiou (2003) – M&P κυματίδιο) για την αναγνώριση κάθε παλμού της εδαφικής κίνησης. Το κυματίδιο αυτό προκύπτει από το συνδυασμό ενός αρμονικού σήματος και μιας κωδωνοειδούς περιβάλλουσας ενώ για τον ορισμό του παλμού χρησιμοποιούνται οι παρακάτω 4 παράμετροι που έχουν ήδη προαναφερθεί:

- Η περίοδος  $T_P$  της αρμονικής ταλάντωσης του κυματιδίου
- Το πλάτος  $A$  της κωδωνοειδούς περιβάλλουσας που συνδέεται με το πλάτος της χρονοϊστορίας ταχύτητας
- Η διάρκεια  $\gamma$  του κυματιδίου, που μετρά τον αριθμό των ταλαντώσεων και ορίζεται ως  $\gamma = t_{tot}/T_P$  με  $\gamma > 1$  και  $t_{tot}$  τη διάρκεια του κυματιδίου
- Και τη γωνία φάσης  $\nu$

Μετά τον προσδιορισμό της περιόδου  $T_P$ , οι τρεις απομένουσες παράμετροι του κυματιδίου  $A$ ,  $\gamma$  και  $\nu$  εκτιμώνται έτσι ώστε το φάσμα απόκρισης μετακινήσεων του

παλμού για απόσβεση 5% να συμπίπτει όσο το δυνατόν περισσότερο με το αντίστοιχο φάσμα της καταγραφής. Εφόσον, όμως, η ψευδοταχύτητα συνδέεται άμεσα με τη μετακίνηση μέσω της σχέσης  $PS_v = \omega S_d$  το κυματίδιο θα συμπίπτει επίσης και με το φάσμα απόκρισης ψευδοταχύτήτων. Η εκτίμηση αυτή πραγματοποιείται με τη βοήθεια μιας νέας παραμέτρου της εδαφικής κίνησης που είχε εισαχθεί από τους Taflampas et al. (2009) και καλείται *CAD (Cumulative Absolute Displacement)*. Η παράμετρος αυτή ορίζεται ως το χρονικό ολοκλήρωμα της απόλυτης εδαφικής ταχύτητας, δηλαδή:

$$CAD = \int_0^{t_{tot}} |v_g| dt \quad (5.6)$$

Για τα κυματίδια M&P, η τιμή της παραμέτρου CAD συνδέεται άμεσα με τις παραμέτρους A και  $\gamma$ , σύμφωνα με τη σχέση:

$$CAD = \gamma A \cdot T_p / \pi \quad (5.7)$$

και το πλάτος A του  $i$  κυματιδίου προσδιορίζεται από τη σχέση :

$$A = \frac{4 \cdot \xi \cdot PS_{v,\xi}(T_p)}{(1 - e^{-2\pi\xi})[1 + (\gamma - 1)\xi]} \quad (5.8)$$

όπου  $PS_{v,\xi}(T_p)$  είναι η μέγιστη τιμή του φάσματος απόκρισης ψευδοταχύτητας της εδαφικής κίνησης για συντελεστή απόσβεσης  $\xi$ . Εφόσον για τον προσδιορισμό του A απαιτείται η γνώση της παραμέτρου  $\gamma$ , η επίλυση γίνεται με δοκιμές. Οι δοκιμές αφορούν αρχικά την παράμετρο  $\gamma$ , έπειτα την παράμετρο  $v$  και τέλος διατηρούνται τα κυματίδια με τις εκτιμηθείσες παραμέτρους που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συσχέτιση συγκριτικά με την αρχική καταγραφή. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται αναλυτικότερα στην επόμενη παράγραφο.

## 5.4 Κωδικοποίηση της μεθοδολογίας σε βήματα

Η παραπάνω μεθοδολογία για την εκτίμηση των σημαντικών παλμών και των χαρακτηριστικών παραμέτρων των αντίστοιχων M&P κυματιδίων που αναπαριστά με το βέλτιστο δυνατό τρόπο την εδαφική κίνηση έχει εύκολα κωδικοποιηθεί με τη βοήθεια υπολογιστή καταλήγοντας σε μία υπολογιστική διαδικασία που αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

1. Για την υπό μελέτη εδαφική κίνηση υπολογίζεται το φάσμα συνέλιξης πολλαπλασιάζοντας τα φάσματα απόκρισης ταχύτητας και μετακίνησης
2. Προσδιορίζεται η περίοδος που αντιστοιχεί στο μέγιστο του φάσματος συνέλιξης και τίθεται ίση με  $T_1$
3. Υπολογίζεται το φάσμα απόκρισης ψευδοταχύτητας για την επιθυμητή τιμή απόσβεσης  $\xi$  (εδώ  $\xi=5\%$ ) και εκτιμάται η περίοδος  $T_1'$  που είναι κοντά στην τιμή  $T_1$  και αντιστοιχεί στο τοπικό μέγιστο του φάσματος με τιμή  $PS_{v,5\%,\max}(T_1')$ . Εάν δεν υπάρχει μέγιστο γύρω από την περιοχή του  $T_1$ , τίθεται  $T_1' = T_1$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι προτιμάται το φάσμα ταχύτητας

έναντι μετακίνησης γιατί τα μέγιστα του είναι περισσότερο ξεκάθαρα, ιδιαίτερα στην περίπτωση των μικρών περιόδων.

4. Τίθεται μία μέγιστη τιμή για τη διάρκεια του M&P κυματιδίου,  $\gamma_{max}$  (συνήθως επαρκεί η τιμή  $\gamma_{max}=5$ ). Εφόσον η διάρκεια του κυματιδίου δεν είναι γνωστή εξ αρχής πρέπει να γίνουν δοκιμές για όλες τις πιθανές τιμές μεταξύ 1 και  $\gamma_{max}$ , συνήθως με βήμα  $\Delta\gamma=0,1$ , ώστε να βρεθεί το κατάλληλο κυματίδιο για τη συγκεκριμένη εδαφική κίνηση. Για κάθε τέτοια τιμή  $\gamma_j$  και για την προηγουμένως υπολογισθείσα τιμή  $PS_{v,5\%,max}(T_1')$  ορίζεται η αντίστοιχη τιμή του πλάτους  $A_j$  από την σχέση (5.8)
5. Για κάθε ζεύγος ( $A_j, \gamma_j$ ) που υπολογίστηκε και για τιμές της φάσης  $\nu$  μεταξύ  $0^\circ$  και  $360^\circ$  με βήμα  $\Delta\nu=5^\circ$  παράγεται το αναζητούμενο κυματίδιο M&P, παραμετροποιημένο ως προς  $t_0$ , θέτοντας  $T_P=T_1'$  χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4.5) και (4.6) του προηγούμενου Κεφαλαίου. Σε αυτό το βήμα, όλα τα κυματίδια των οποίων οι κορυφαίες τιμές επιτάχυνσης/ ταχύτητας/ μετακίνησης είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές της εδαφικής κίνησης,  $rga/ rgn/ rgd$  αντίστοιχα, απορρίπτονται.
6. Για κάθε παραγόμενο κυματίδιο και για όλες τις τιμές της παραμέτρου  $t_0$  μεταξύ  $t_0 = \gamma_j T_1' / 2$  (αντιστοιχεί στα κυματίδια που ξεκινούν τη χρονική στιγμή  $t=0$ ) και  $t_0 = t_{max} - \gamma_j T_1' / 2$  (αντιστοιχεί στα κυματίδια που τελειώνουν τη χρονική στιγμή  $t_{max}$ - χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στο τέλος της εδαφικής κίνησης- προσδιορίζεται η συσχέτιση ανάμεσα στη χρονοϊστορία ταχύτητας του κυματιδίου  $v_p(t)$  και τη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας  $v_g(t)$ . Το κυματίδιο με τη μεγαλύτερη συσχέτιση είναι το ζητούμενο και χαρακτηρίζεται από τις ήδη προσδιορισθείσες παραμέτρους του  $A_1, \gamma_1, \nu_1$  και  $t_{0,1}$ . Για μικρούς συντελεστές συσχέτισης τίθεται υπό αμφισβήτηση εάν η κίνηση είναι τελικά παλμική ή όχι.
7. Στη συνέχεια, εφαρμόζονται τα κριτήρια (1) και (3) της παραγράφου 5.2.1 για τον αποκλεισμό των παλμών που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία και για να αποφασιστεί αν επαρκεί η μέχρι τώρα διαδικασία ή αν απαιτείται να οριστούν επιπλέον παλμοί
8. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για την απομένουσα εδαφική κίνηση και για όλους τους πιθανούς σημαντικούς παλμούς ενώ παράλληλα εφαρμόζεται το κριτήριο (2) της παραγράφου 5.2.1 για τον αποκλεισμό των μη σημαντικών παλμών.

## **Κεφάλαιο 6**

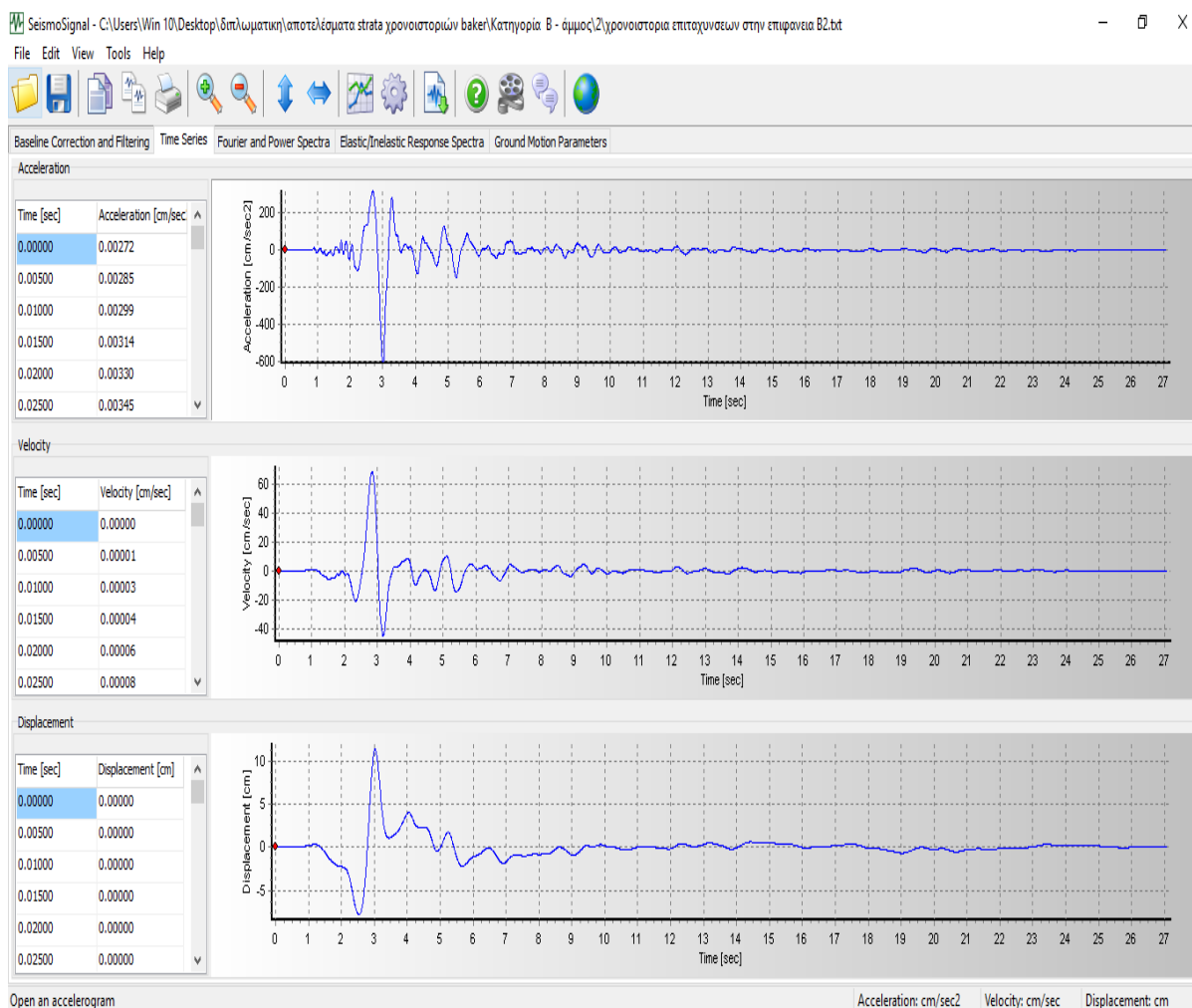
### **Αναλύσεις**



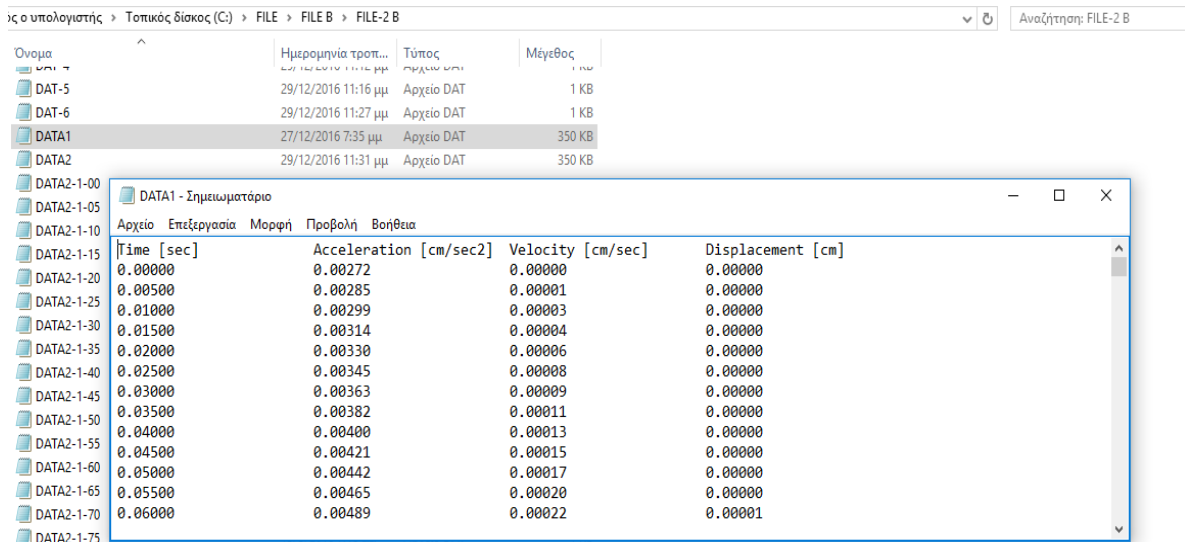
## 6.1 Μεταβολή των χαρακτηριστικών του παλμού

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε ανάλυση με στόχο την εκτίμηση της επιρροής των εδαφικών χαρακτηριστικών στην ενίσχυση του παλμού κατευθυντικότητας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 1 για τα χαρακτηριστικά των κατηγοριών εδάφους A, B, C, και D.

Αρχικά, μέσα από το λογιστικό περιβάλλον του προγράμματος Strata εξήχθησαν οι χρονοϊστορίες εδαφικής επιτάχυνσης για 86 εδαφικές καταγραφές που είχαν ταξινομηθεί από τον Baker ως “παλμικές”. Σημειώνεται ότι για τις ανάγκες της ανάλυσης επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν οι 91 καταγραφές του Baker, οι οποίες παρατίθενται στο Παράρτημα Α. Ωστόσο, δε συμπεριλήφθηκαν τελικά οι καταγραφές υπό αύξοντα αριθμό 56, 57 και 59 γιατί λόγω υπερφόρτωση δεδομένων δεν οδήγησαν σε αποτελέσματα ενώ αποκλείστηκαν και οι 34 και 89 καθώς τα αποτελέσματα που έδιναν παρουσίαζαν τεράστια απόκλιση οπότε θεωρήθηκαν λανθασμένα. Αυτή η διαδικασία εφαρμόστηκε για τις τέσσερις εδαφικές κατηγορίες του ΕΚ8 Α, Β, C και D. Τα δεδομένα που προέκυψαν επεξεργάστηκαν με τον κώδικα Seismosignal για την εξαγωγή των χρονοϊστοριών εδαφικής ταχύτητας και μετακίνησης.

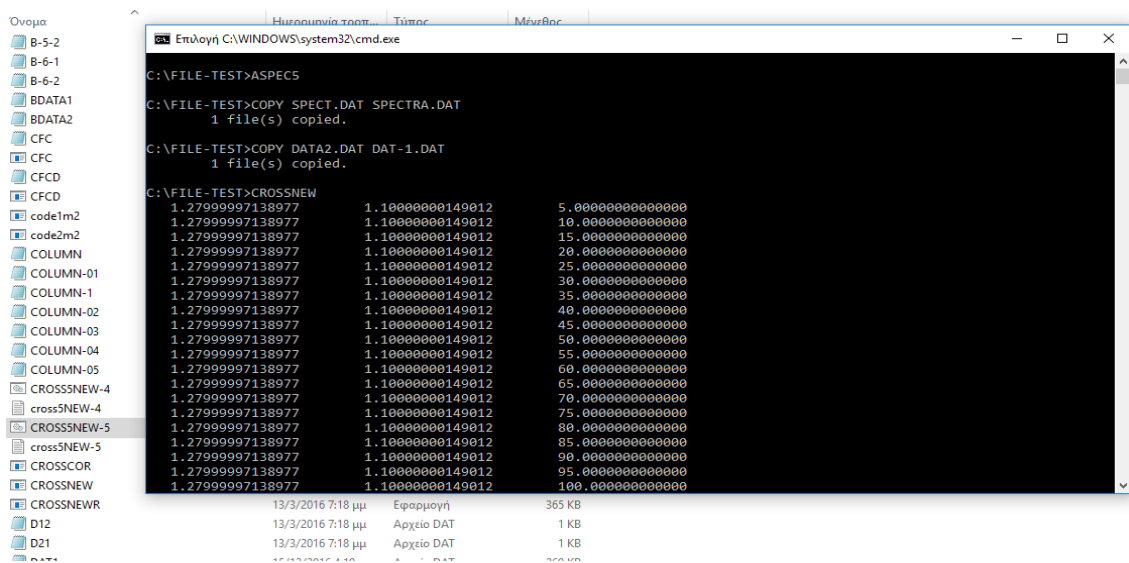


## Κεφάλαιο 6



**Εικ. 6.1 :** Στιγμιότυπα από την επεξεργασία και την εξαγωγή δεδομένων με τον κώδικα Seismosignal

Έχοντας διαθέσιμα αυτά τα αποτελέσματα, αξιοποιήθηκε ο υπολογιστικός κώδικας CROSS5NEW-5 που αποτελεί εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας των Mimoglou et al. για τη μετατροπή αυτών σε φάσματα και εν συνεχεία για τη μόνωση του φάσματος συνέλιξης. Ο συγκεκριμένος κώδικας περιγράφηκε εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 5, επομένως, δε θα πραγματοποιηθεί περαιτέρω ανάλυση επ’ αυτού. Έτσι, υπολογίστηκαν τα χαρακτηριστικά του παλμού κατευθυντικότητας της εδαφικής ταχύτητας ( Περίοδος T, Πλάτος A, πλήθος κύκλων γ και συντελεστής συσχέτισης cc) για τις τέσσερις εδαφικές κατηγορίες του ΕΚ8. Τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά για το βραχώδες υπόβαθρο ελήφθησαν από την προπτυχιακή διπλωματική εργασία των Κανάκη Σοφίας και Κουτσινίκα Σοφίας με τίτλο: «Διερεύνηση της επιρροής των παλμών κατευθυντικότητας σεισμών κοντινού πεδίου στην ανελαστική συμπεριφορά μονοβάθμιων συστημάτων». (2016)



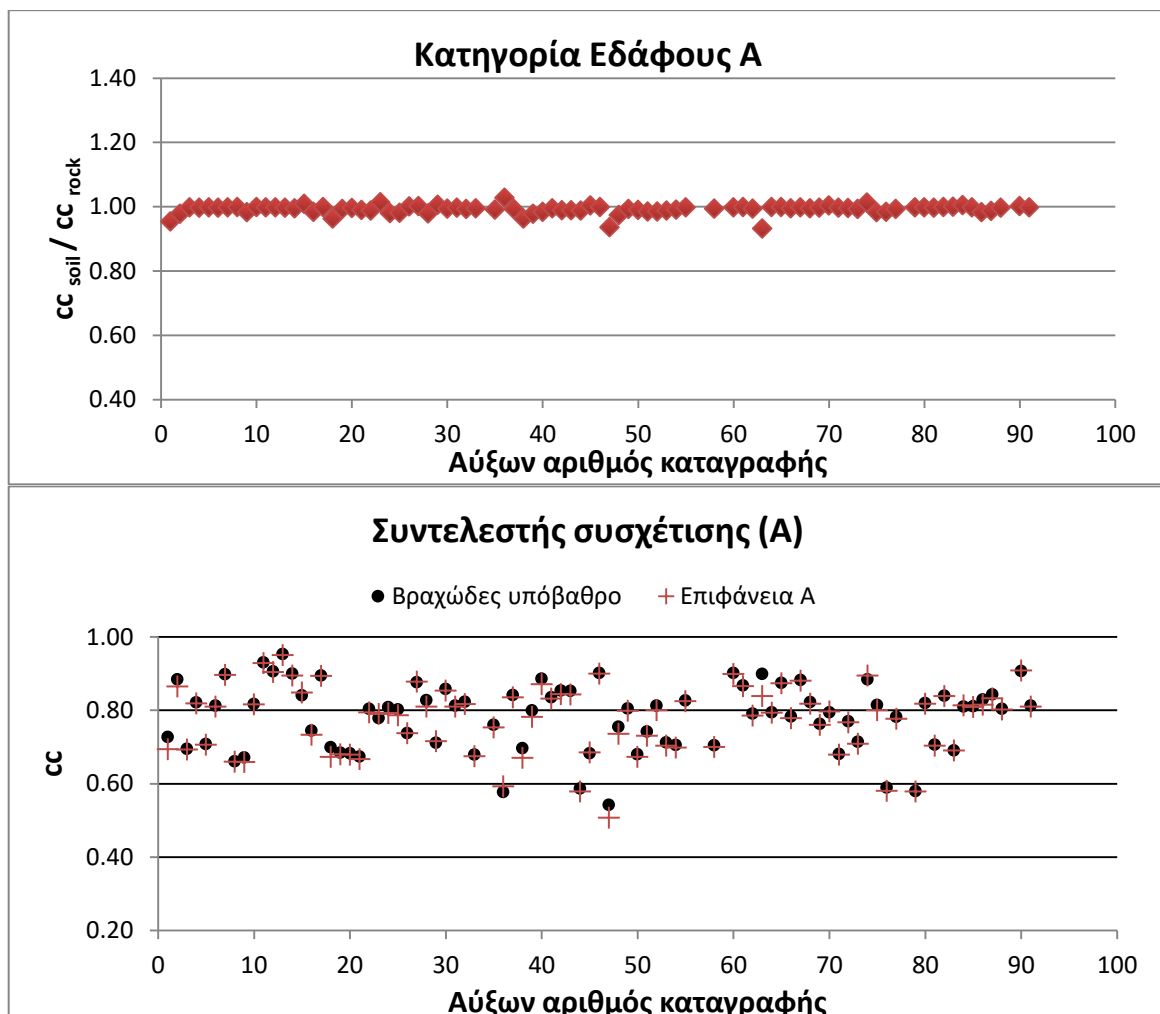
**Εικ. 6.2 :** Στιγμιότυπο εφαρμογής του κώδικα CROSS5NEW-5

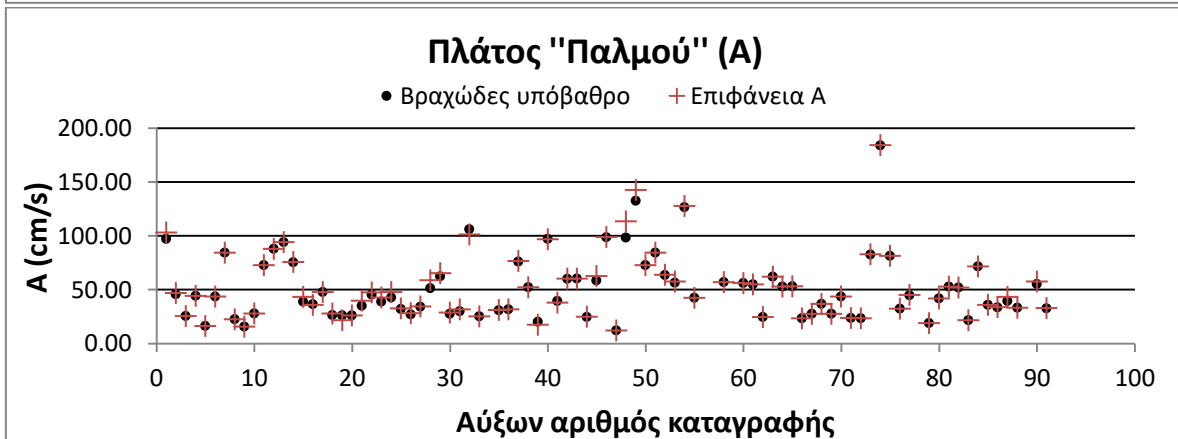
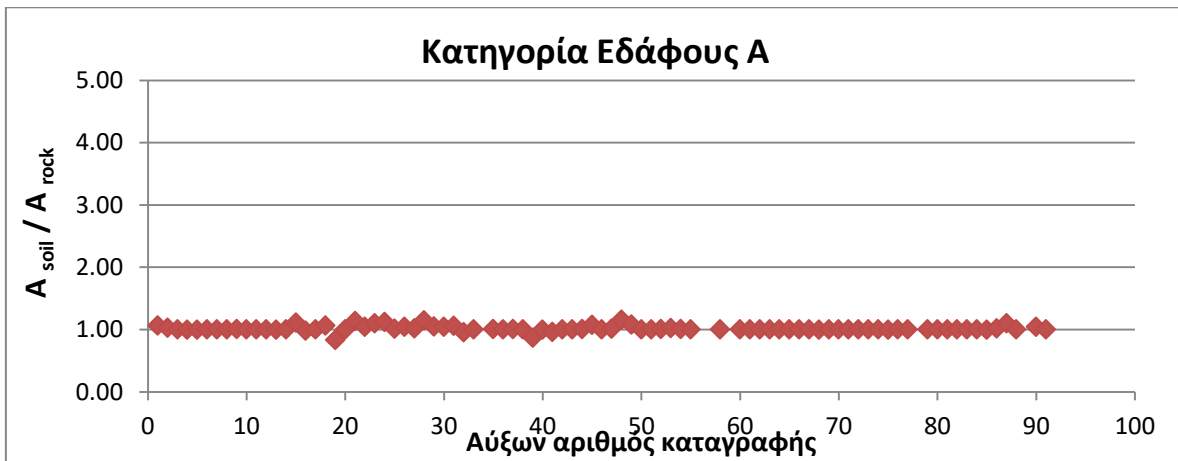
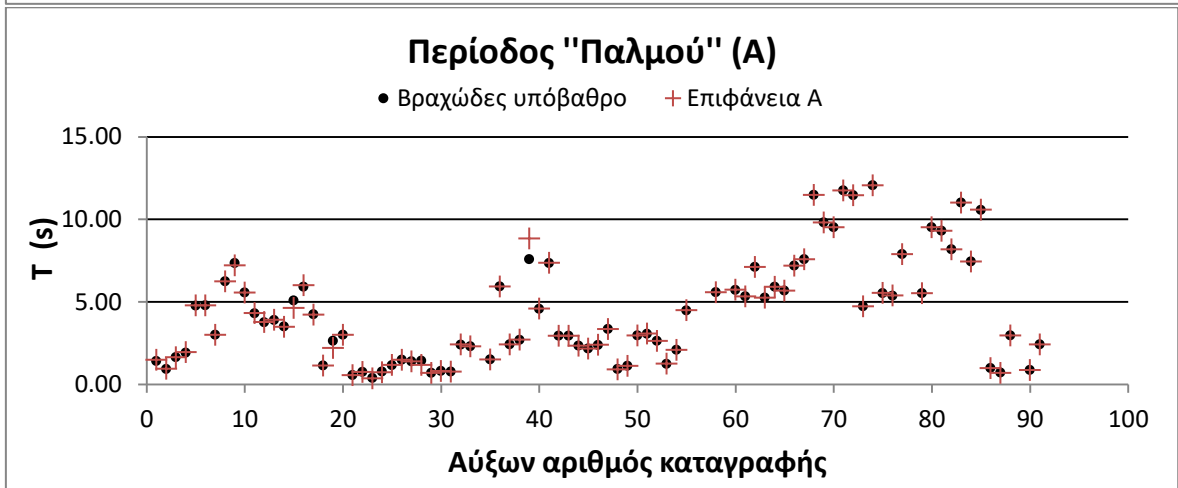
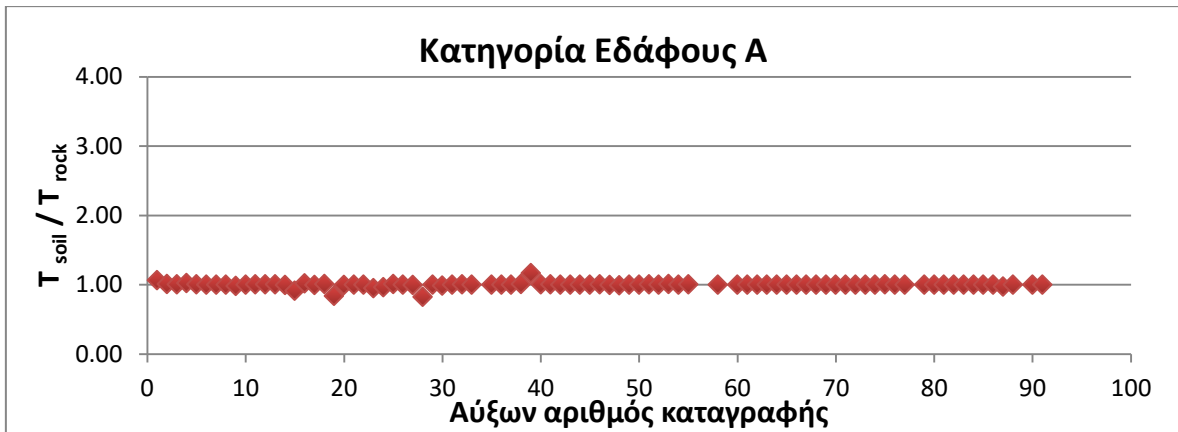


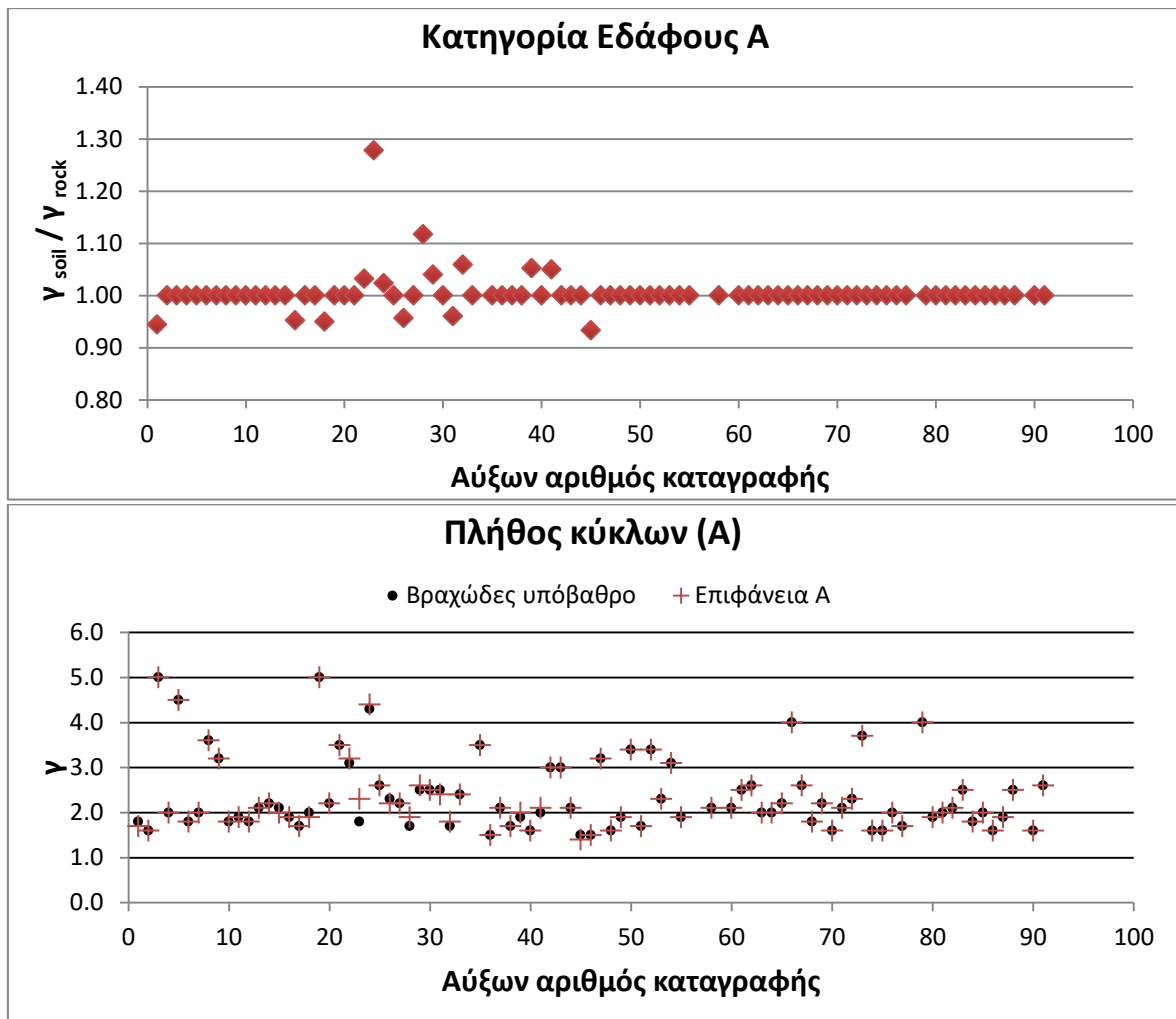
Έχοντας προσδιορίσει τα μεγέθη αυτά, καταρτίστηκαν διαγράμματα για τη σύγκριση ανάμεσα στα χαρακτηριστικά του “παλμού” που εντοπίζεται από τον κώδικα για τις τέσσερις κατηγορίες εδάφους του ΕΚ8 (A, B, C, D) στην επιφάνεια και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του στο βραχώδες υπόβαθρο. Κατά κύριο λόγο, παρατηρείται ότι τα χαρακτηριστικά του παλμού εμφανίζουν σημαντικότερη απόκλιση όταν το σεισμικό κύμα διέρχεται διαμέσου εδαφικής στρώσης κατηγορίας D. Υπενθυμίζεται ότι σε αυτή την κατηγορία υπάγονται τα πλέον μαλακά εδάφη με τη μικρότερη διατμητική αντοχή. Ωστόσο, στην πορεία θα αναγνωριστεί και η φυσική σημασία της εν λόγω απόκλισης.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, η οποία συνοδεύεται από παρατηρήσεις σχετικά με την επιρροή του τύπου του εδάφους στα τέσσερα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τον παλμό στην χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας.

Κατ’ αρχάς, σημειώνεται ότι και για τα τέσσερα υπό εξέταση μεγέθη, όταν η μελέτη αφορά την εδαφική κατηγορία A η διαφοροποίηση είναι ελάχιστη έως και σχεδόν μηδενική. Απόλυτα λογικό αποτέλεσμα αφού η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τους βραχώδεις εδαφικούς σχηματισμούς που προσεγγίζουν σε εξαιρετικό βαθμό τα χαρακτηριστικά του υποβάθρου.



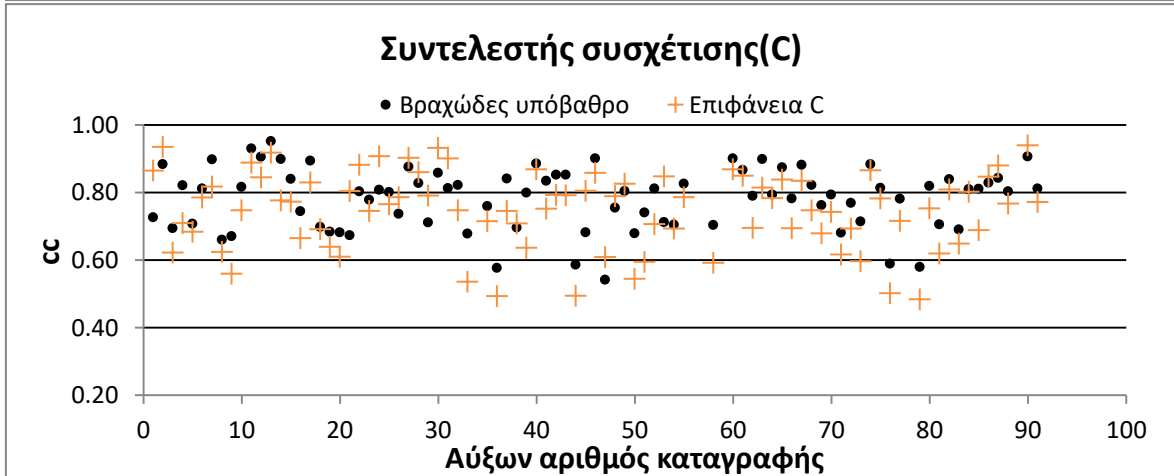
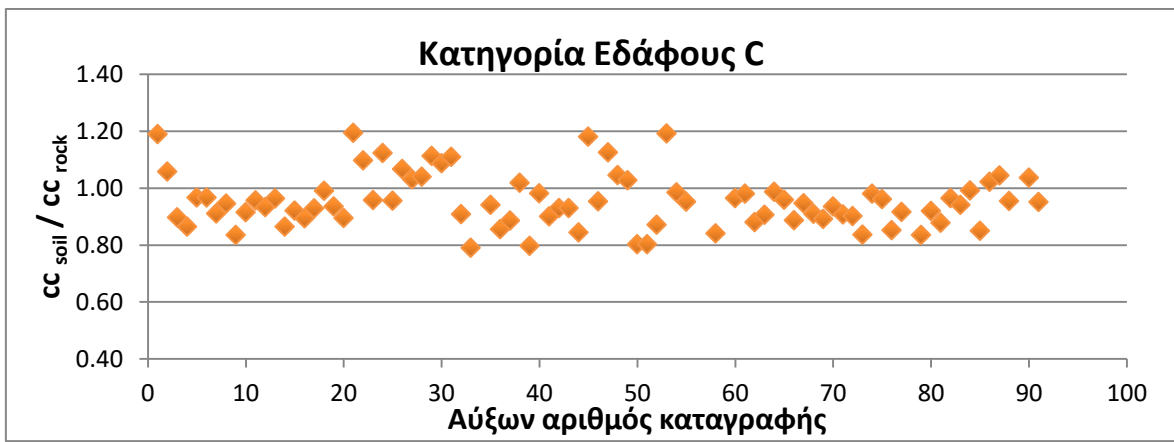
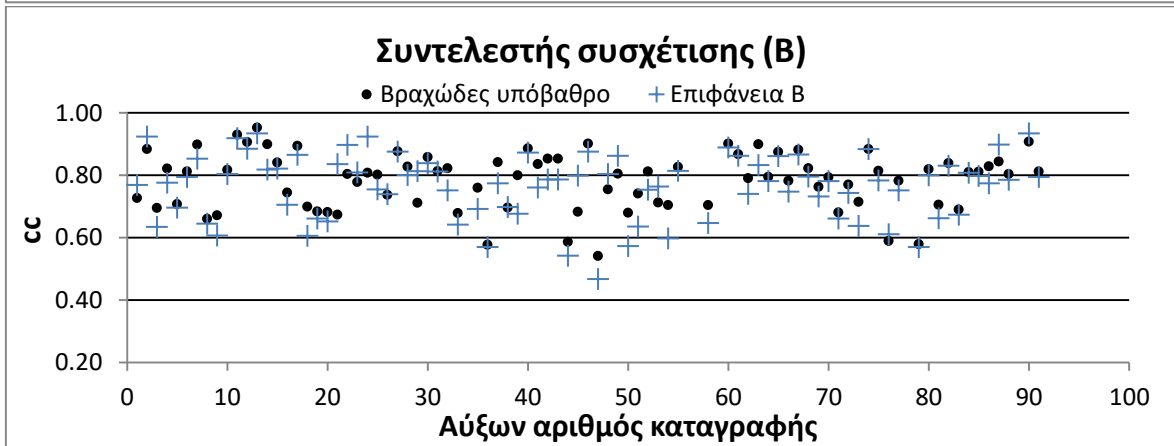
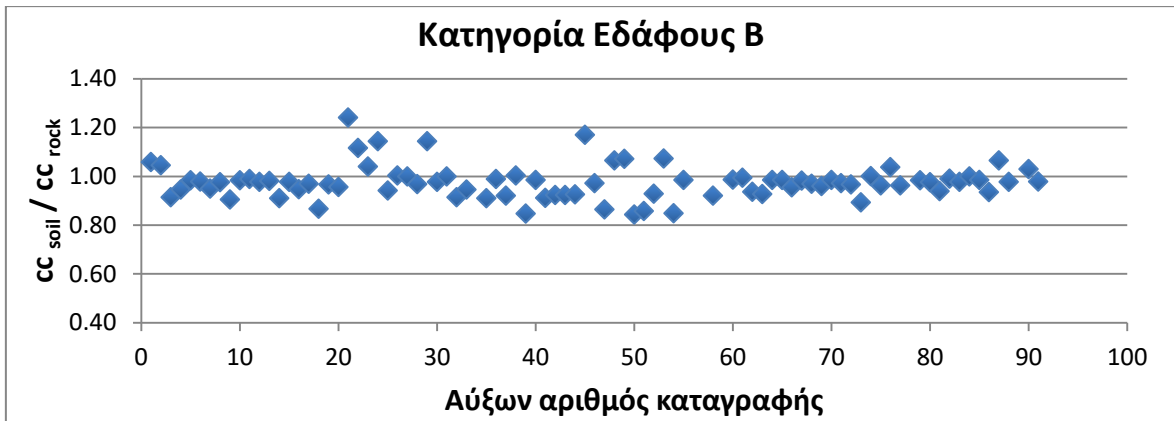


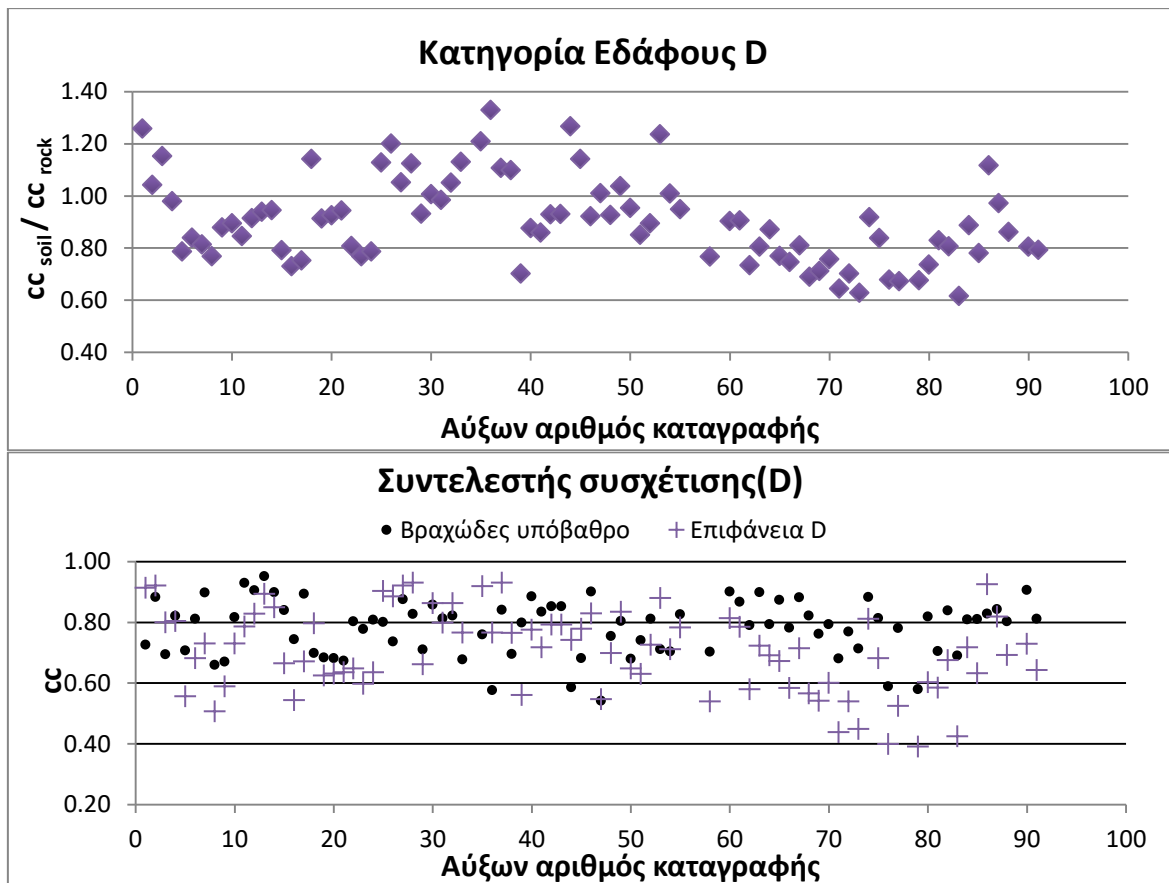


**Εικ. 6.3 :** Επιφάνεια εδαφικής κατηγορίας A προς βραχώδες υπόβαθρο : μηδαμινή διαφοροποίηση χαρακτηριστικών παλμού

Για την εξέταση των υπόλοιπων κατηγοριών του ΕΚ8 η παρατήρηση ξεκίνησε από τον συντελεστή συσχέτισης  $cc$ . Το μέγεθος αυτό ποσοτικοποιεί την αποτελεσματικότητα της προσομοίωσης που παρέχει το μοντέλο ως προς την υπό εξέταση καταγραφή. Δείχνει δηλαδή τον βαθμό κατά τον οποίο είναι επιτυχημένη η προσέγγιση της πραγματικής εδαφικής καταγραφής από το σύνθετο κυματίδιου που δημιουργείται από το μοντέλο. Επιπλέον, σύμφωνα με τη μελέτη των Mimoglou et al., αποτελεί δείκτη της παλμικότητας μιας εδαφικής κίνησης. Υπενθυμίζεται ότι για χαμηλές τιμές συντελεστής συσχέτισης  $cc$  είναι αμφίβολου ο χαρακτηρισμός της κίνησης ως “παλμικής”. Μάλιστα, ως ένα κάτω όριο για τον χαρακτηρισμό μιας εδαφικής κίνησης ως παλμική τίθεται η τιμή  $cc=0,60$ .

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται ο λόγος του συντελεστή συσχέτισης της επιφάνειας προς τη βάση ώστε να είναι εμφανής η επαύξηση ή η απομείωση καθώς επίσης και οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης για βάση και επιφάνεια ξεχωριστά για τις κατηγορίες εδάφους B, C και D.



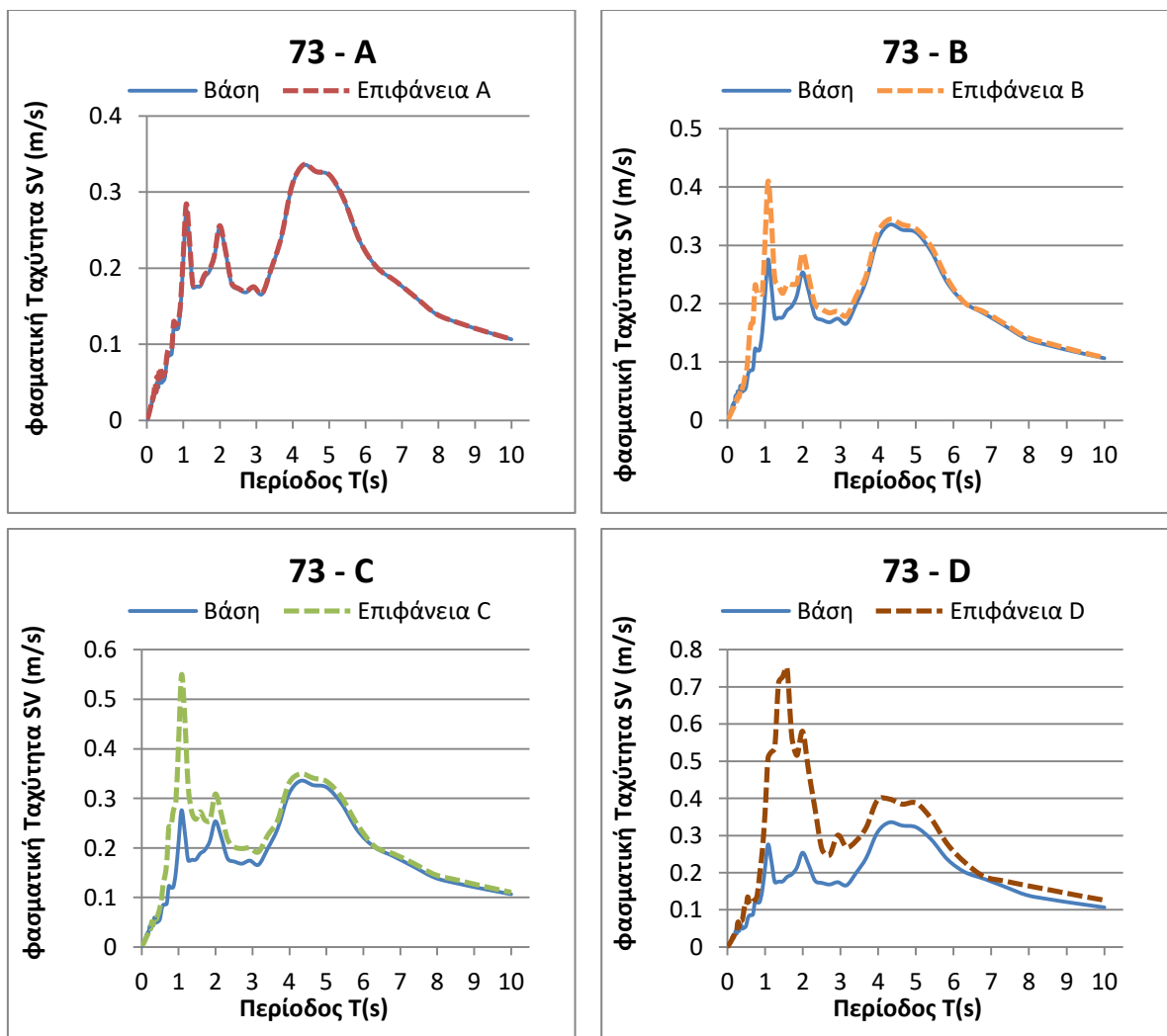


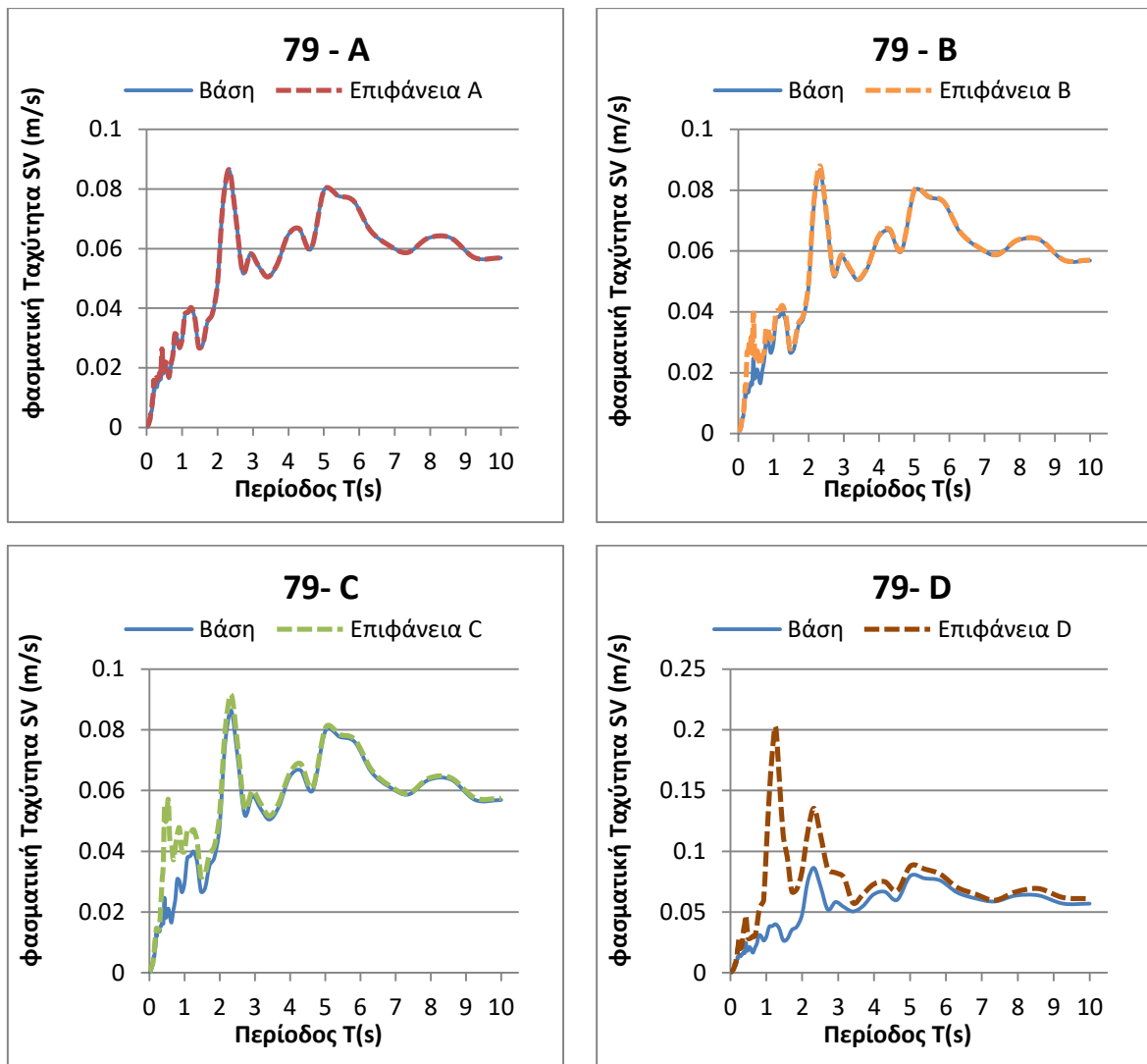
**Εικ. 6.4 :** Διαγράμματα του συντελεστή συσχέτισης σε βάση και επιφάνεια για τις εδαφικές κατηγορίες B, C και D.

Ξεκινώντας από την κατηγορία B, εντοπίζονται μικρές αποκλίσεις από την αρχική εκτίμηση του cc με τις περισσότερες καταγραφές να ακολουθούν φθίνουσα πορεία, δηλαδή παρατηρείται μείωση του συντελεστή συσχέτισης καθώς ο σεισμικός κυματισμός μεταβαίνει από το βραχώδες υπόβαθρο στην επιφάνεια. Μικρότερο είναι το πλήθος των καταγραφών που παρουσιάζουν ενίσχυση του εν λόγω μεγέθους. Προχωρώντας στην κατηγορία εδάφους C οι παρατηρήσεις είναι αντίστοιχες. Στην πλειονότητα δηλαδή των καταγραφών παρατηρείται μείωση του μεγέθους cc η οποία μάλιστα είναι λίγο μεγαλύτερη σε σύγκριση με την κατηγορία B. Όσον αφορά τις ελάχιστες σε σύνολο καταγραφές όπου έχουμε ενίσχυση του cc υπάρχει κι εκεί λίγο μεγαλύτερη προσαύξηση σε σχέση με την αντίστοιχη στην κατηγορία B, ενώ το πλήθος τους φαίνεται να είναι ελάχιστα μεγαλύτερο. Αποκορύφωμα αποτελεί το έδαφος τύπου D όπου η απόκλιση από τις αρχικές εκτιμήσεις του cc είναι άκρως δραματική. Και σε αυτή την περίπτωση η πλειοψηφία των καταγραφών χαρακτηρίζεται από μείωση του συντελεστή cc και μάλιστα μείωση αρκετά μεγαλύτερης τάξης σε σύγκριση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Οι καταγραφές που παρουσιάζουν αύξηση του συντελεστή cc διαφοροποιούνται κι αυτές ως προς την τάξη ενίσχυσης τους από την προηγούμενη εδαφική κατηγορία όμως παραμένουν “μειονότητα” ως προς το σύνολο που φαίνεται να ακολουθεί σε γενικές γραμμές φθίνουσα μεταβολή του συντελεστή συσχέτισης.

Με βάση αυτά τα δεδομένα, κλονίζεται η παλμικότητα της εδαφικής κίνησης υπό την έννοια ότι καθώς το σεισμικό κύμα κατά τη μετάδοσή του προς την επιφάνεια φιλτράρεται διαμέσου της εδαφικής ζώνης δεν έχουμε συχνά ενίσχυση στην περιοχή του παλμού. Στην πραγματικότητα, συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο. Παρατηρείται δηλαδή ανακούφιση του παλμού κατευθυντικότητας η οποία είναι εντονότερη όσο προς μεταβαίνουμε επιφανειακές ζώνες που διαφοροποιούνται σημαντικά από το βραχώδες υπόβαθρο. Επιπλέον, ήδη από την κατηγορία C αλλά και με αποκορύφωμα την κατηγορία D διαμορφώνονται εδαφικές καταγραφές οι οποίες φαίνεται να χαρακτηρίζονται από εξασθενημένη παλμικότητα, καθώς ο συντελεστής  $\sigma$  λαμβάνει τιμές ακόμα και κάτω από 0,6.

Προς κατανόηση αυτού του φαινομένου παρατίθενται τα ελαστικά φάσματα ταχύτητας για δύο καταγραφές εδαφικών κινήσεων όπου ο  $\sigma$  έχει υποστεί έντονη μείωση. Πρόκειται για τις καταγραφές 73 και 79 που αφορούν το σεισμικό γεγονός Chi- Chi στην περιοχή της Taiwan (1999) για τους σταθμούς TCU065 και TCU098 και φαίνονται παρακάτω για τις τέσσερις επιφανειακές εδαφικές κατηγορίες σε αντιπαραβολή με το βραχώδες υπόβαθρο.

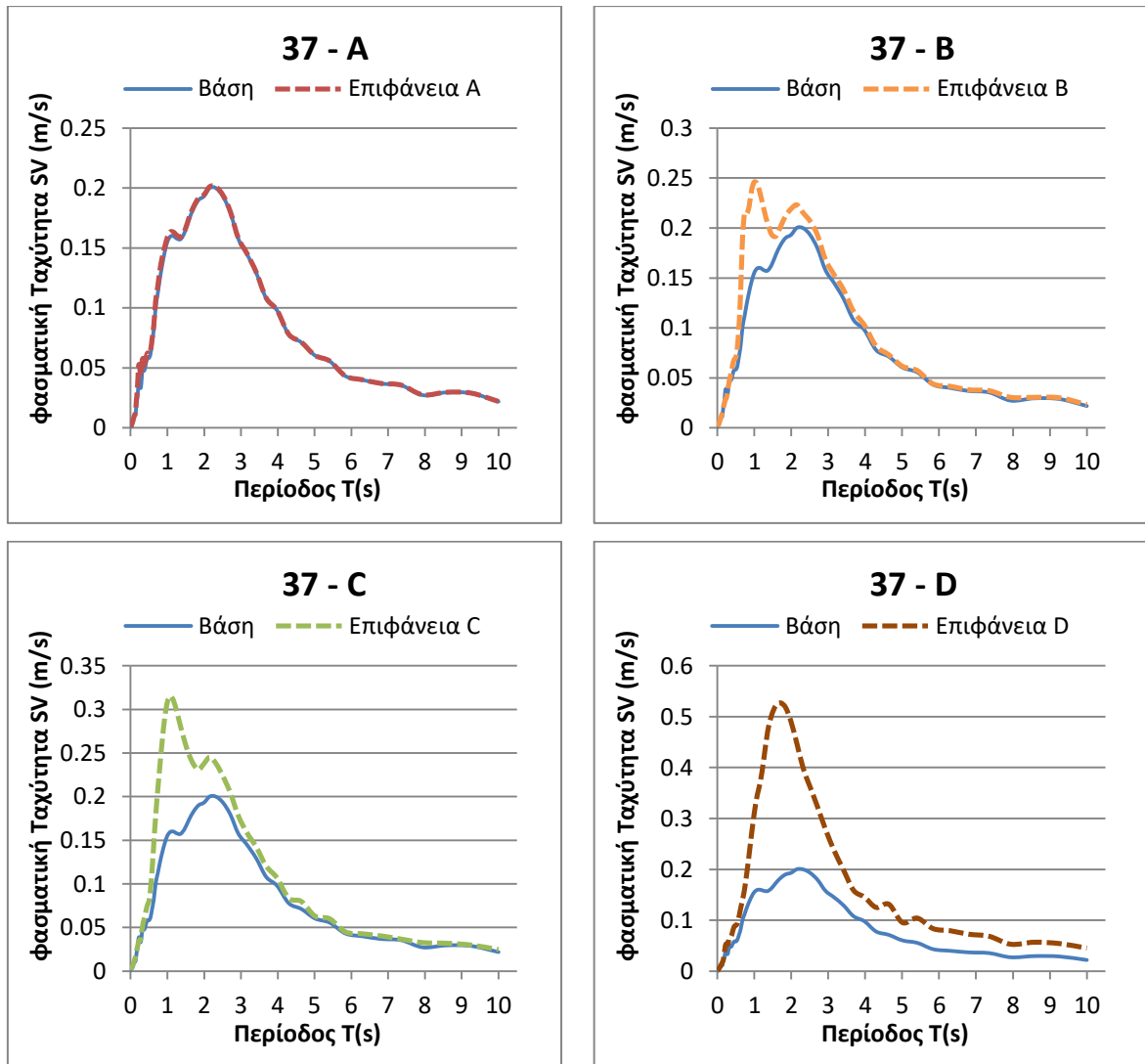




**Εικ. 6.5 :** Ελαστικά φάσματα ταχύτητας για τις καταγραφές Chi- Chi, Taiwan (1999, TCU065 και TCU098)

Από αυτά τα φάσματα επιβεβαιώνεται ότι η ενίσχυση που προκαλεί το φιλτράρισμα της σεισμικής διέγερσης μέσα από την εδαφική στρώση δεν είναι τόσο αξιοσημείωτη στην περιοχή του παλμού. Αντίθετα, το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται σε περιοχές αρκετά απομακρυσμένες από τη θέση του αρχικού παλμού, στο πεδίο των μικρών κυρίως περιόδων, όπου η ενίσχυση του υψίσχυνου κομματιού της εδαφικής κίνησης είναι αρκετά πιο έντονη. Θεωρείται λοιπόν ότι για την υπό εξέταση εδαφική κίνηση εξασθενεί ως ένα βαθμό η παλμικότητα υπό την έννοια ότι ο αρχικώς εντοπιζόμενος παλμός δεν διαδραματίζει τόσο κρίσιμο ρόλο.

Ενδεικτικά, παρουσιάζεται και η περίπτωση της καταγραφής υπό αύξων αριθμόν 37 του σεισμικού γεγονότος Erzincan της Τουρκίας στον ομώνυμο σταθμό καταγραφής (1992) όπου η εδαφική κίνηση φαίνεται να διατηρεί, ακόμη και να ενισχύει την παλμικότητα της. Από τα αντίστοιχα ελαστικά φάσματα θα μπορούσε να ειπωθεί ότι ενίσχυση του παλμού κατευθυντικότητας παρατηρείται συνηθέστερα όταν ο παλμός εντοπίζεται στο πεδίο των μικρών- μέσων περιόδων.

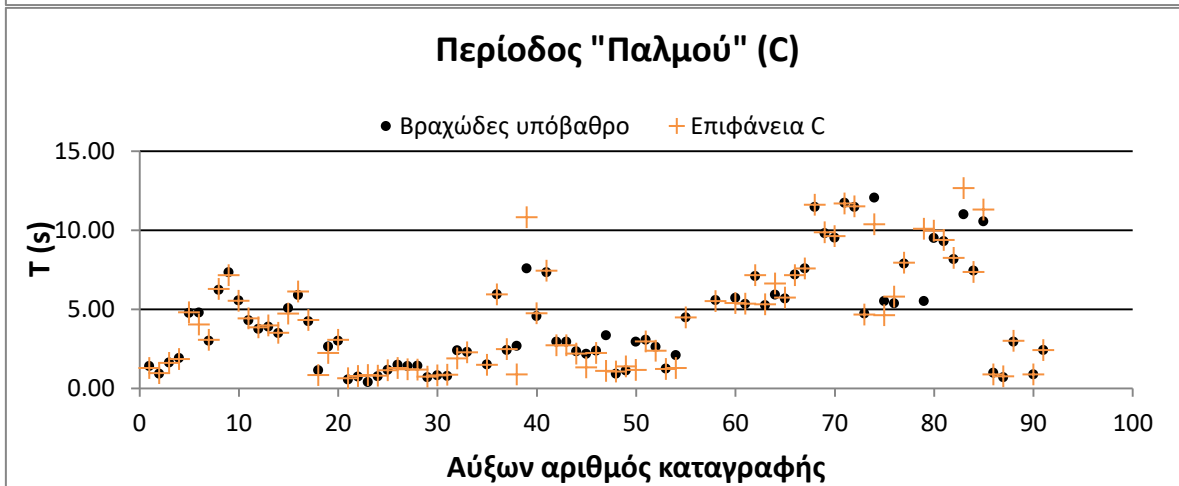
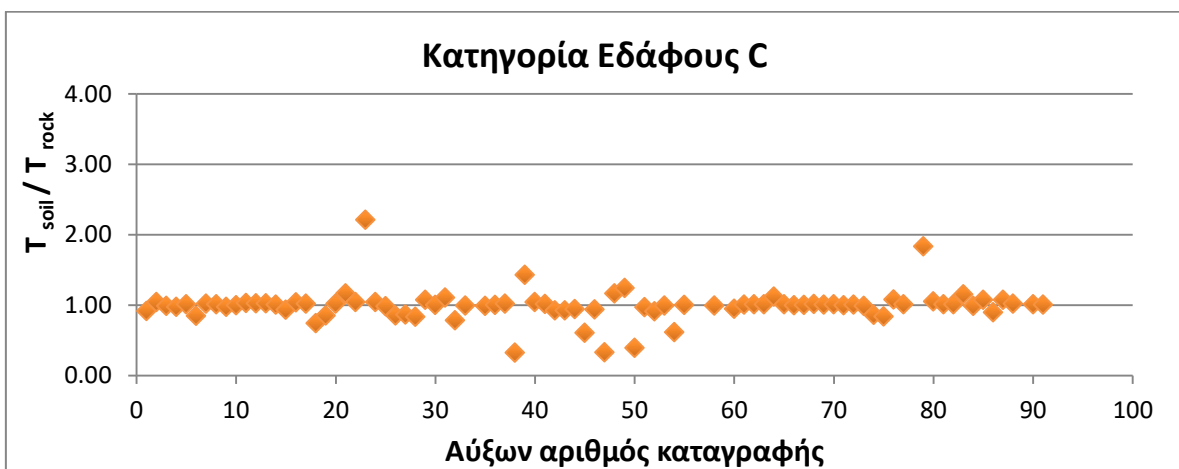
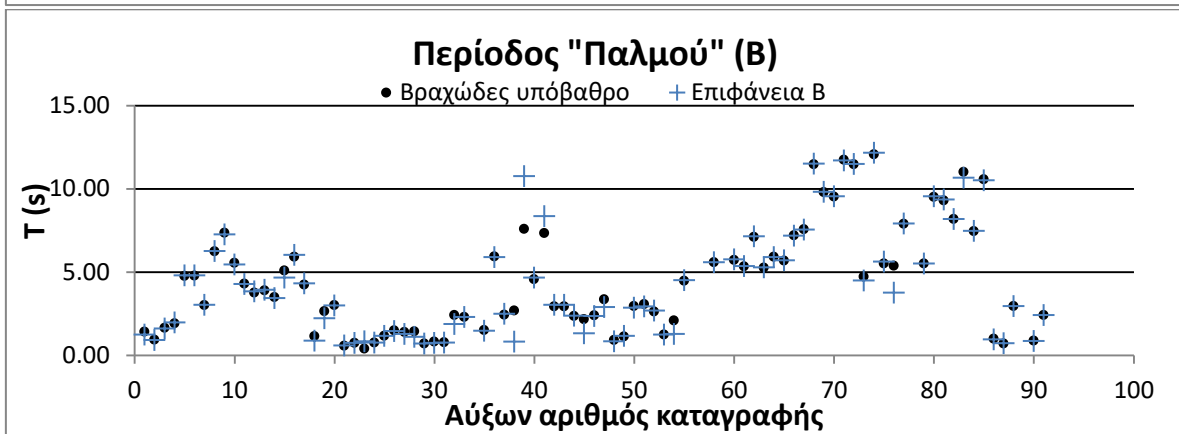
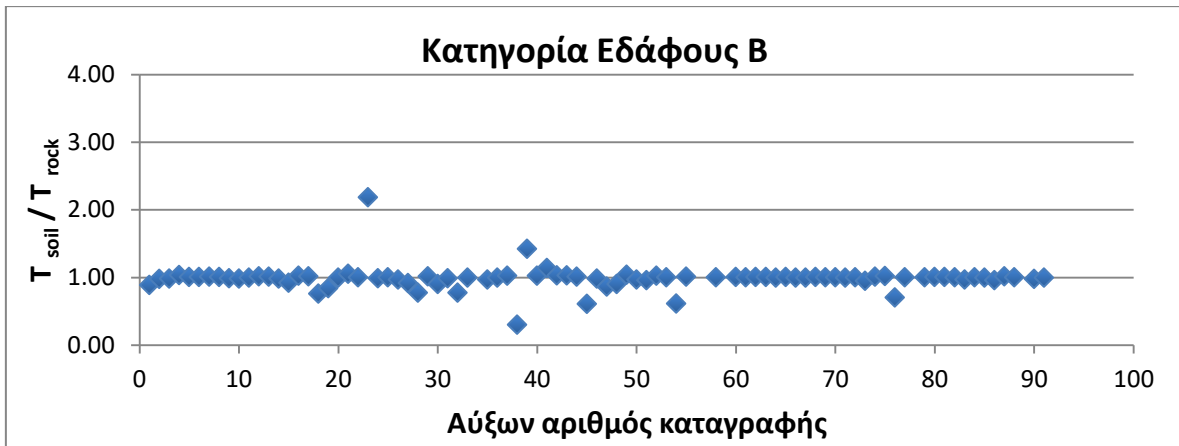


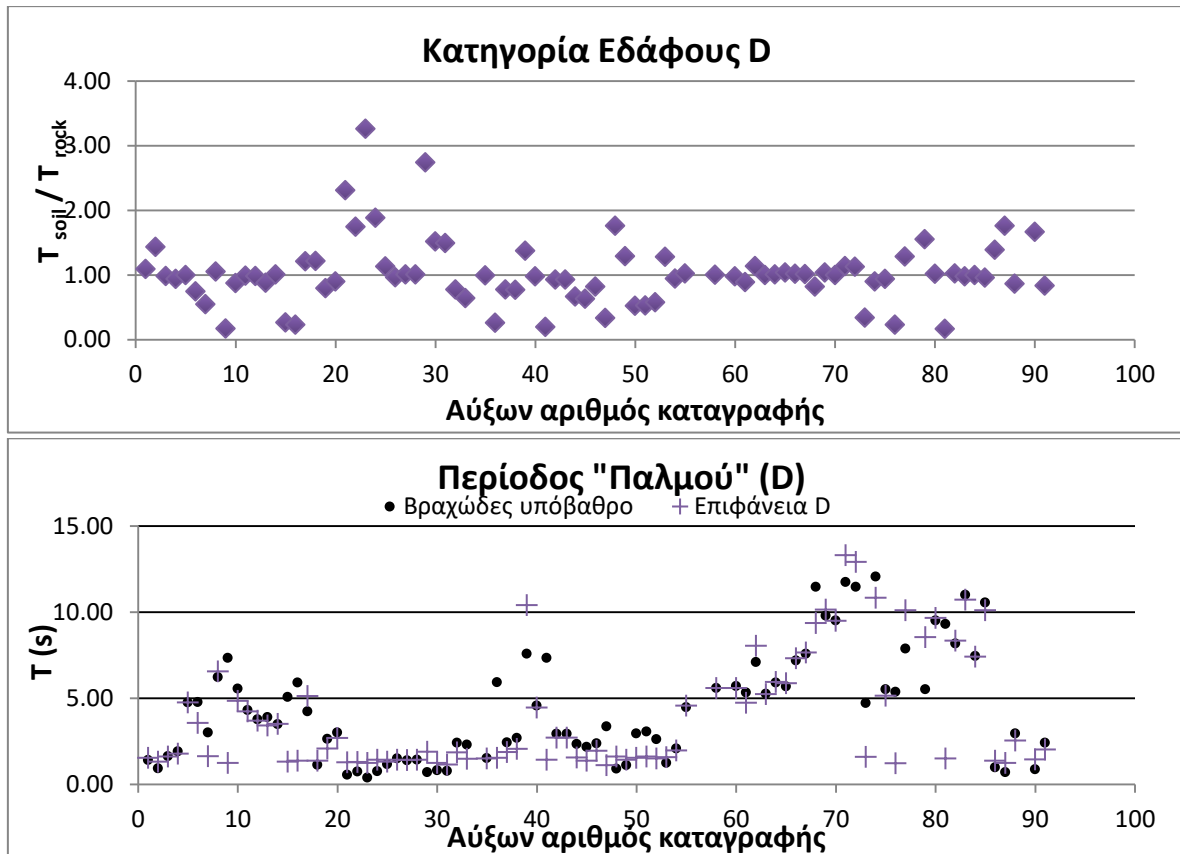
Εικ. 6.6 : Ελαστικά φάσματα ταχύτητας για την καταγραφή Erzincan, Turkey (1992, Erzincan)

Έχοντας, λοιπόν, κατά νου ότι η παλμικότητα μιας εδαφικής κίνησης δεν διατηρείται, αντίθετα εξασθενεί στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, θα εξεταστεί η επίδραση της κατηγορίας εδάφους στα λοιπά χαρακτηριστικά του αρχικού παλμού: την περίοδο, το εύρος και το πλήθος των κύκλων. Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, το κυματίδιο που αναγνωρίζει ο κωδικοποιημένος αλγόριθμος των Mimoglou et al. στην εκάστοτε επιφάνεια κατά τον ΕΚ8 δε σχετίζεται απόλυτα και πάντα με το αρχικό κυματίδιο που προσομοιώνει τον παλμό κατευθυντικότητας κατά την εκδήλωσή του στο μητρικό πέτρωμα.

Μια πιο προσεκτική ματιά δίνεται μελετώντας τα παρακάτω διαγράμματα που απεικονίζουν τη μεταβολή των μεγεθών  $T$ ,  $A$  και  $\gamma$  της επιφάνειας ως προς τη βάση. Στο πλαίσιο αυτό, η παρουσίαση ακολουθεί και πάλι το ίδιο μοτίβο: αρχικά δίνεται ο λόγος των μεγεθών επιφάνειας προς βάση και ακολουθούν οι μεμονωμένες τιμές των μεγεθών στις δύο υπό εξέταση θέσεις, για τις κατηγορίες B, C και D





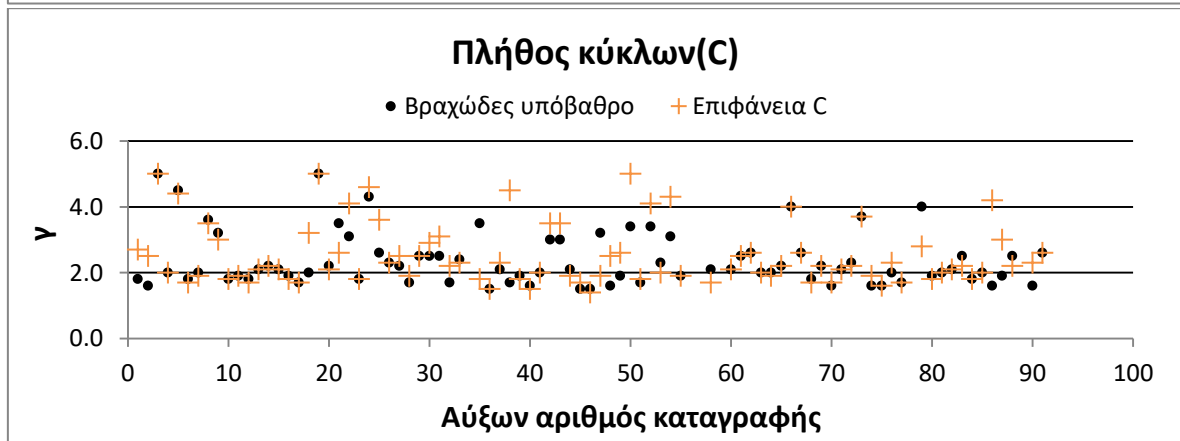
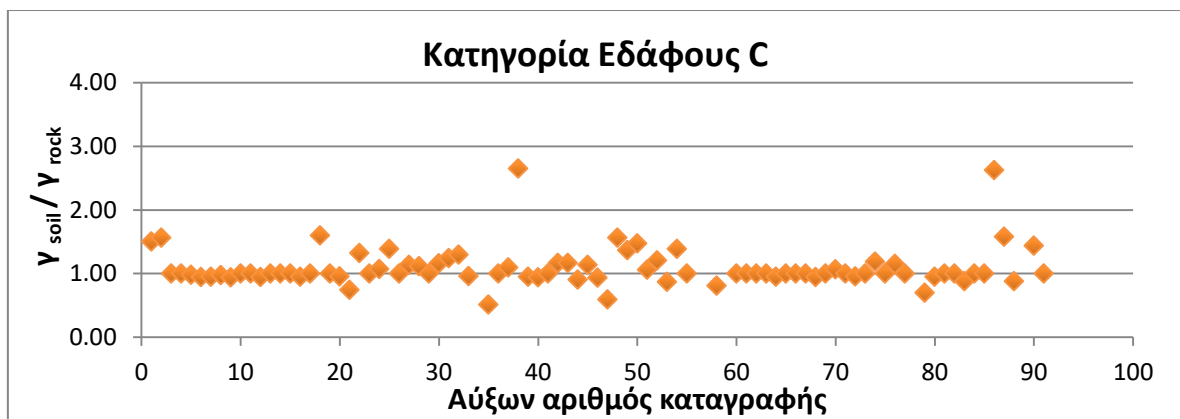
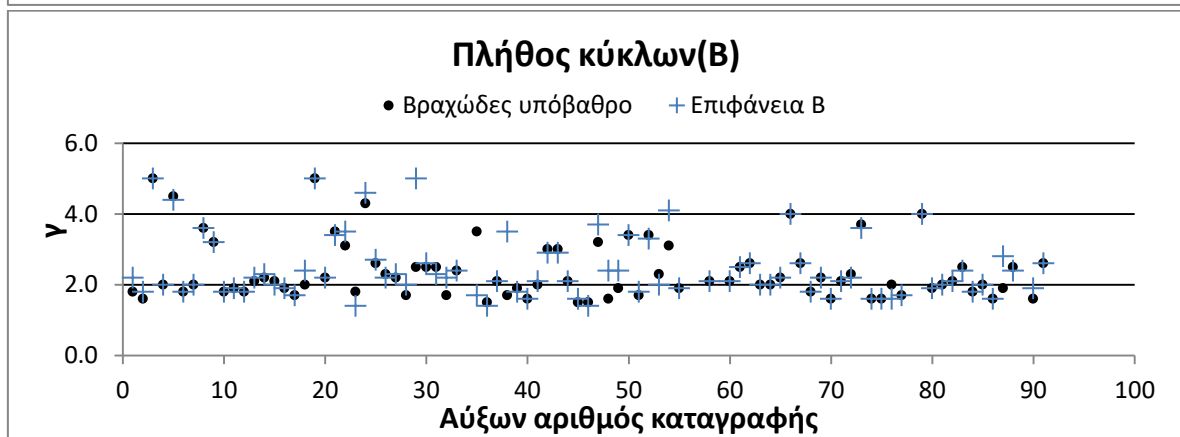
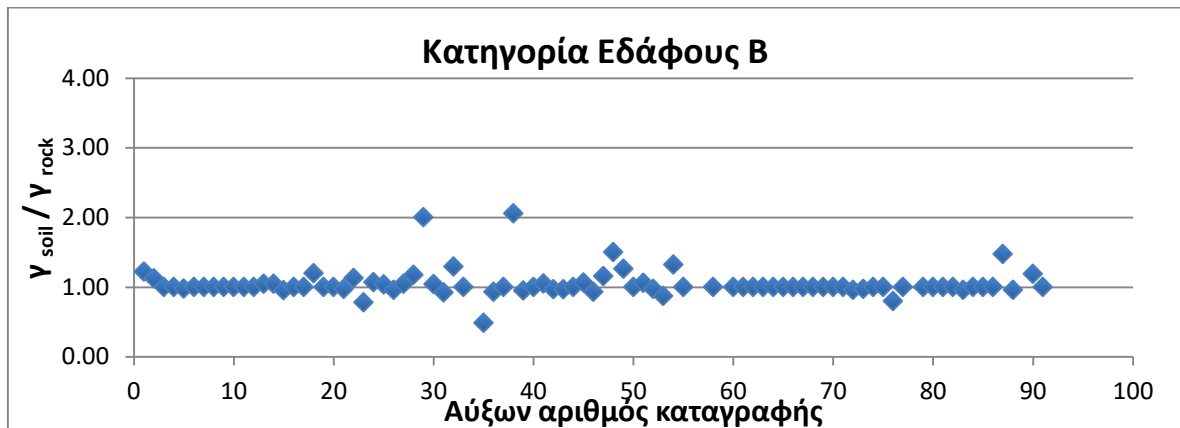


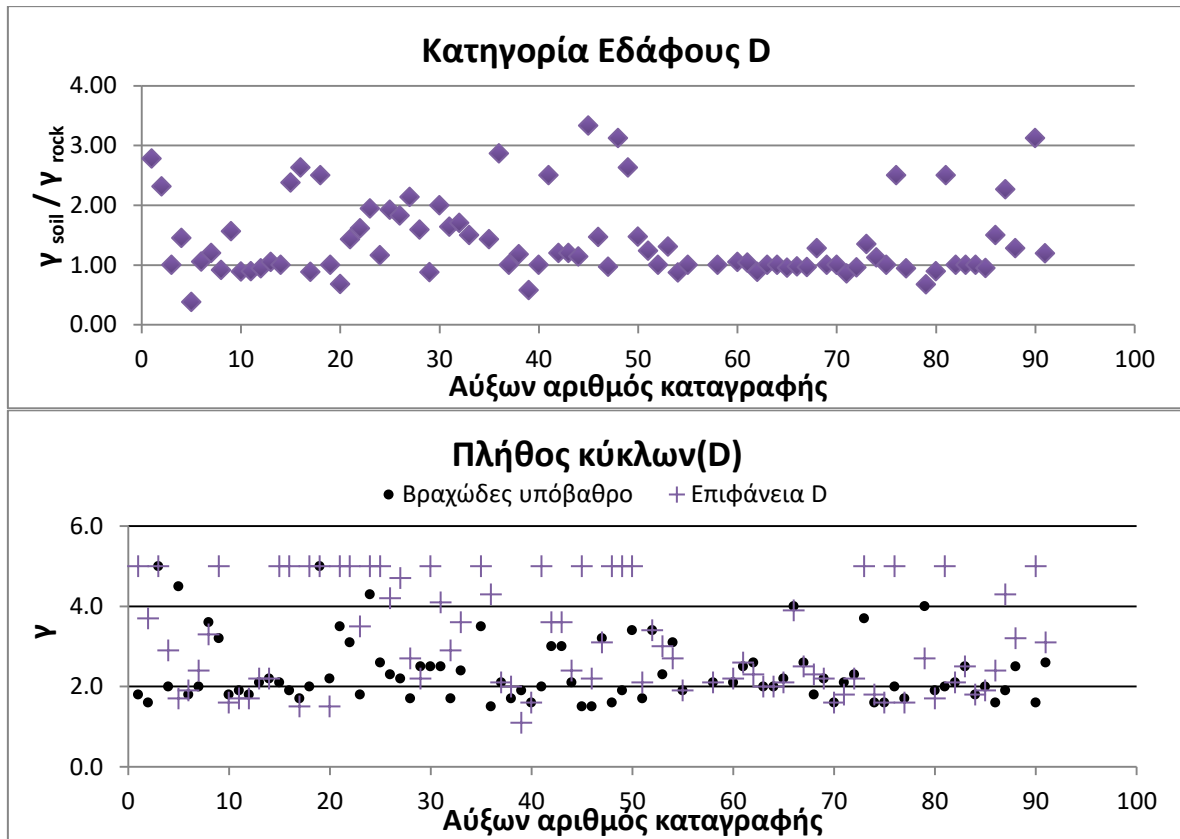
Εικ. 6.7 : Διαγράμματα της περιόδου όπου το φάσμα συνέλιξης δίνει τη μέγιστη τιμή του σε βάση και επιφάνεια για τις εδαφικές κατηγορίες B, C και D.

Για εδάφη κατηγορίας B και C, οι αποκλίσεις της περιόδου σε βάση και επιφάνεια είναι μικρές κυρίως ως προς το πλήθος τους. Στην πλειοψηφία τους οι καταγραφές παρουσιάζουν μηδενική ή ανεπαίσθητη μεταβολή. Ως προς το μέγεθος των μεταβολών, λίγες είναι οι καταγραφές που διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς τα χαρακτηριστικά της βάσης. Προχωρώντας από την κατηγορία B προς την κατηγορία C οι αποκλίσεις μεγαλώνουν, ενώ αποκορύφωμα αποτελεί η κατηγορία D όπου και εντοπίζονται οι περισσότερες ακραίες αποκλίσεις. Σε κάθε περίπτωση, όταν παρατηρείται μεταβολή πιο συχνή είναι η μείωση της περιόδου με βασικό χαρακτηριστικό το μεγάλο μέγεθος απόκλισης. Συνεπώς, το πλήθος των καταγραφών όπου η περίοδος μοιάζει να αυξάνεται είναι μικρό συγκριτικά με το σύνολο ενώ φαίνεται να σχετίζεται με αρκετά μικρή περίοδο του αρχικού παλμού, τάξης έως τα 2,5 s .

Επίσης σημαντικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τον παλμό κατευθυντικότητας είναι το πλήθος των κύκλων, δηλαδή το πλήθος των ταλαντώσεων που παρουσιάζει στη χρονοϊστορία ταχύτητας. Όσον αφορά αυτό το μέγεθος η κατάσταση φαίνεται να είναι πιο απλή. Με μια προσεκτική ματιά, το πλήθος των κύκλων εάν δεν παραμένει σταθερό αυξάνεται. Η αύξηση είναι μεγαλύτερη και περισσότερο συχνή στις καταγραφές που αφορούν σεισμικές διεγέρσεις που μεταδίδονται μέσω

εδafικής ζώνης κατηγορίας D. Παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα που οπτικοποιούν το ανωτέρω συμπέρασμα.

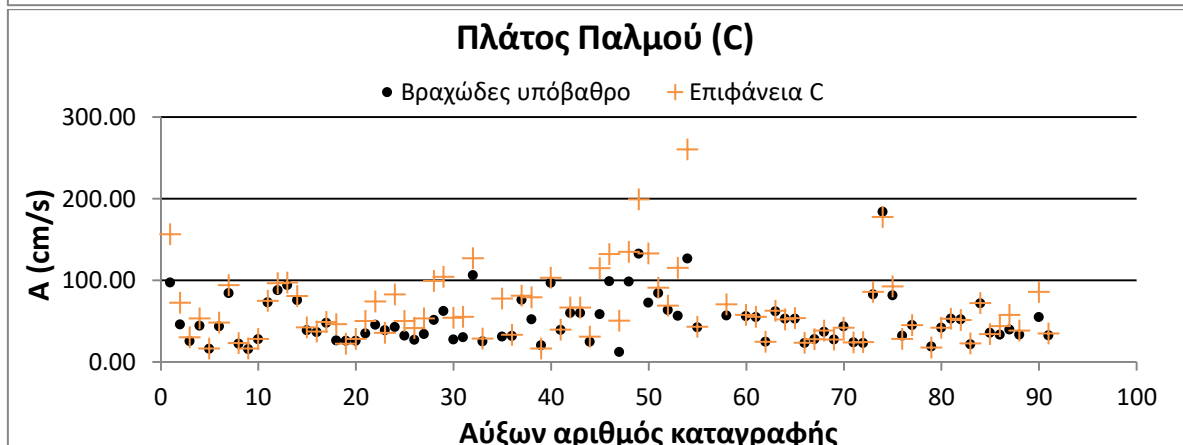
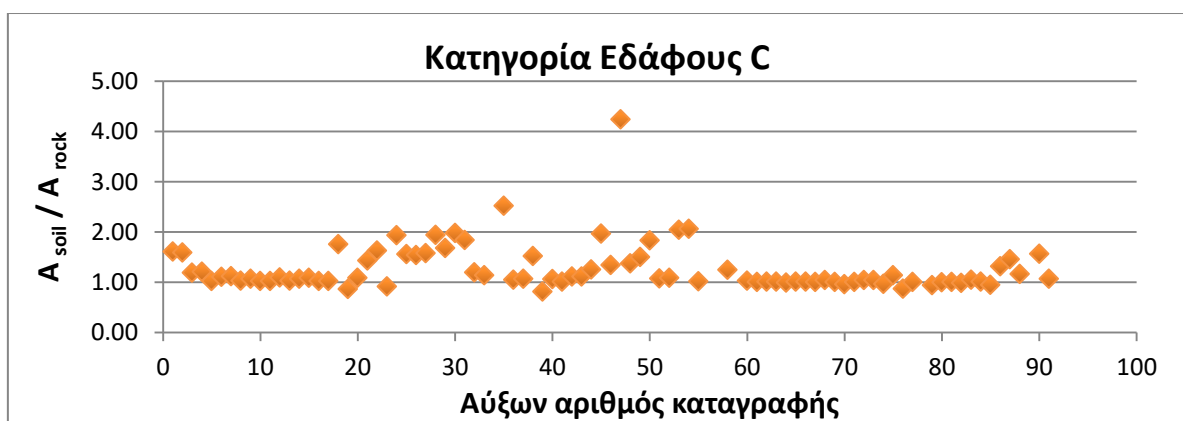
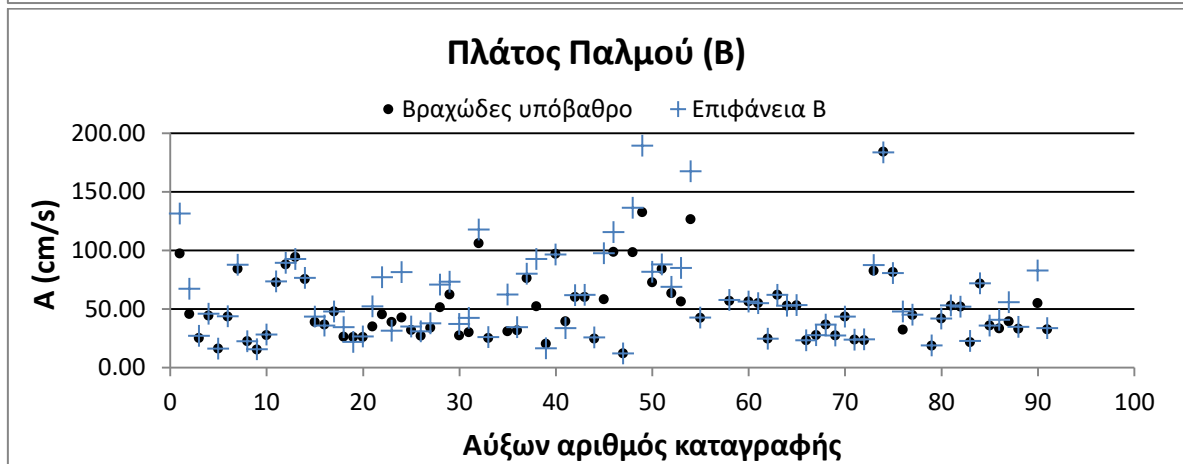
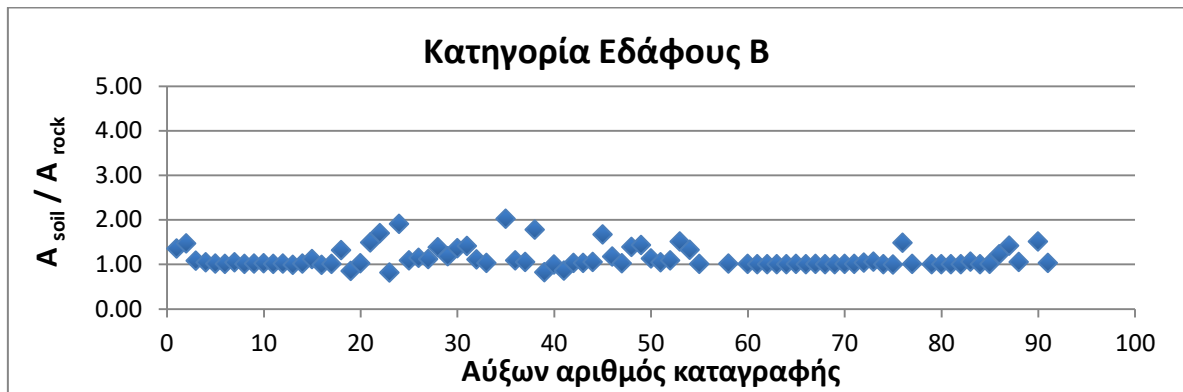


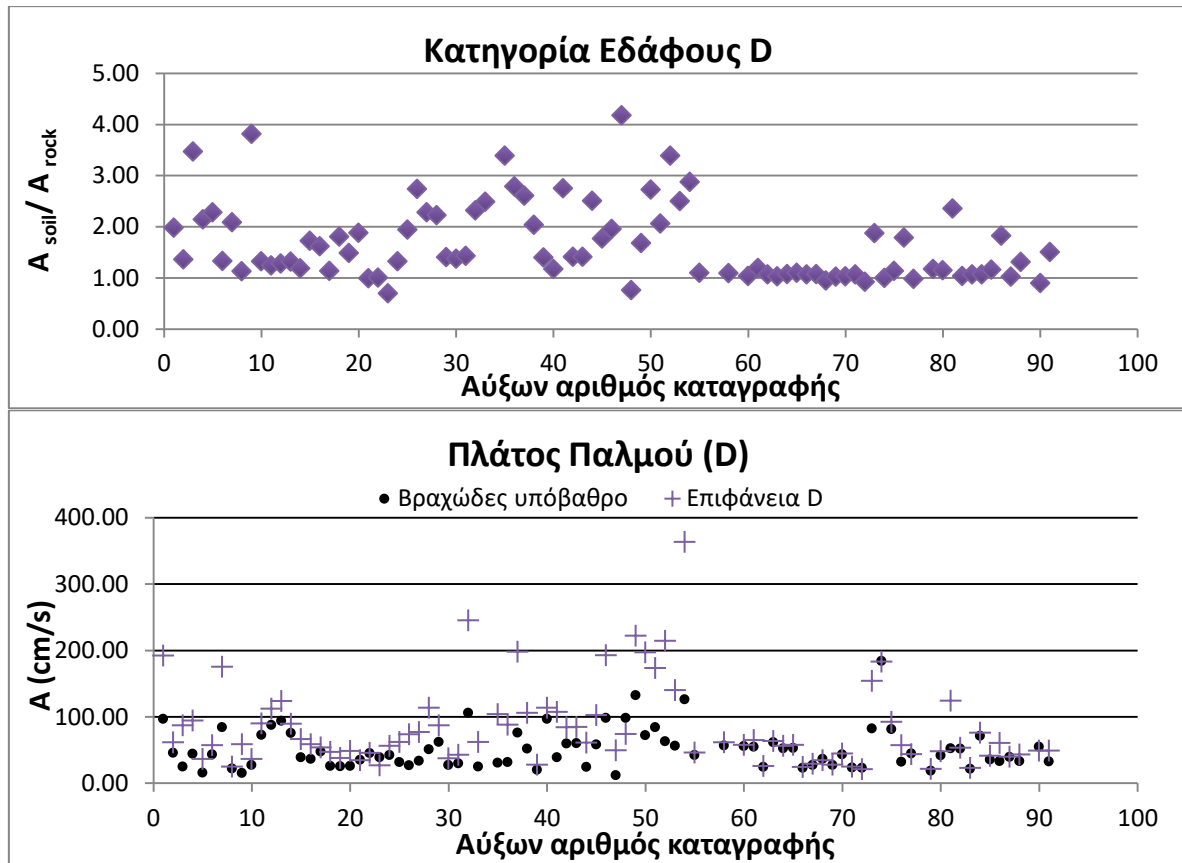


**Εικ. 6.8 :** Διαγράμματα του πλήθους κύκλων  $\gamma$  σε βάση και επιφάνεια για τις εδαφικές κατηγορίες B, C και D.

Ωστόσο, το πιο σημαντικό μέγεθος του παλμού κατευθυντικότητας που παρουσιάζεται στην χρονοϊστορία ταχύτητας είναι το πλάτος του. Με τη βοήθεια του υπολογιστικού κώδικα των Mimoglou et al. προσδιορίζεται το πλάτος A της κωδωνοειδούς περιβάλλουσας που προσομοιώνει την χρονοϊστορία της ταχύτητας και κατ' επέκταση τον παλμό που δύναται να περιέχει. Ανάλογα διαγράμματα με τα προηγούμενα καταρτίστηκαν και γι' αυτό το μέγεθος ώστε να μελετηθεί η επιρροή της εδαφικής κατηγορίας και στο πλάτος παλμού A. Ένα γενικό συμπέρασμα που συνάδει με την εικόνα των ακόλουθων διαγραμμάτων είναι ότι σε κάθε περίπτωση το πλάτος στην χρονοϊστορία της ταχύτητας ή θα παραμένει σταθερό ή θα παρουσιάζει αύξηση. Αρκετά σπάνια είναι η περίπτωση όπου παρατηρείται μείωση του πλάτους η οποία είναι ανεπαίσθητη. Το γεγονός ότι παραμένει σταθερό σημαίνει ότι, ο κώδικας αναγνωρίζει μια εδαφική κίνηση στην επιφάνεια που έχει το ίδιο ή παραπλήσιο πλάτος ταχύτητας με το αντίστοιχο του παλμού που εντοπίζεται στην αρχική καταγραφή του βραχώδους υποβάθρου όμως σε διαφορετική θέση. Η ενίσχυση μπορεί να οφείλεται σε ενίσχυση του αρχικού παλμού κυρίως στις περιπτώσεις που αυτός χαρακτηρίζεται από μικρή- μέση περίοδο ή σε εμφάνιση διαφορετικής και εντονότερης αιχμής στην χρονοϊστορία ταχύτητας της επιφάνειας. Και σε αυτή την περίπτωση, ο τύπος εδάφους D παρουσιάζει τις μεγαλύτερες αποκλίσεις κυρίως ως προς το μέγεθος, συγκριτικά με τις κατηγορίες B και C. Συνάγεται, λοιπόν, ότι όσο πιο μαλακή είναι η εδαφική

στρώση που μεσολαβεί μεταξύ βραχώδους υποβάθρου και επιφάνειας τόσο μεγαλύτερη είναι η ενίσχυση στο εύρος της εδαφικής ταχύτητας A.





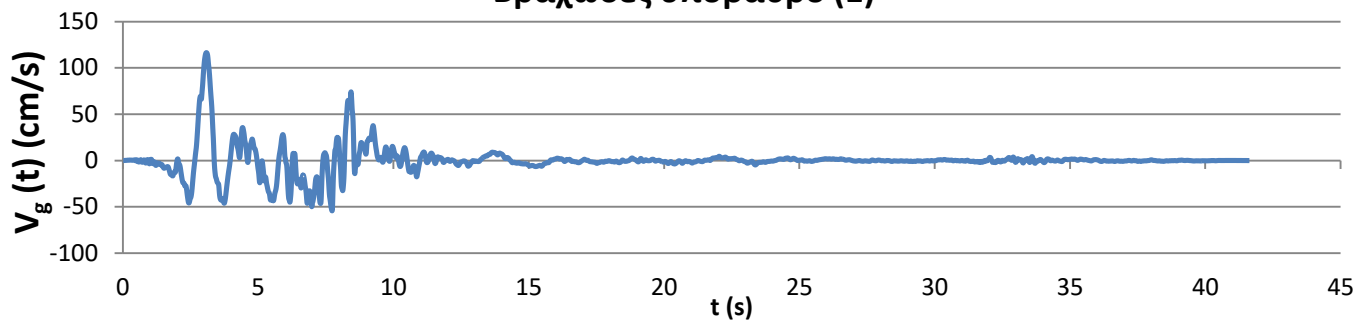
Εικ. 6.9 : Διαγράμματα του πλάτους παλμού A σε βάση και επιφάνεια για τις εδαφικές κατηγορίες B, C και D.

Ενδεικτικά, εμφανίζονται ακολούθως τα χαρακτηριστικά του “παλμού” που αναγνωρίζει ο αλγόριθμος των Mimoglou et al. καθώς και τα ταχυνσιογραφήματα σε βάση και επιφάνειες των τεσσάρων τύπων εδάφους κατά τον ΕΚ8 για δύο αρχικώς “παλμικές” καταγραφές. Στην καταγραφή (1) έχουμε ενίσχυση ενώ στην περίπτωση (41) εξασθένηση της παλμικότητας.

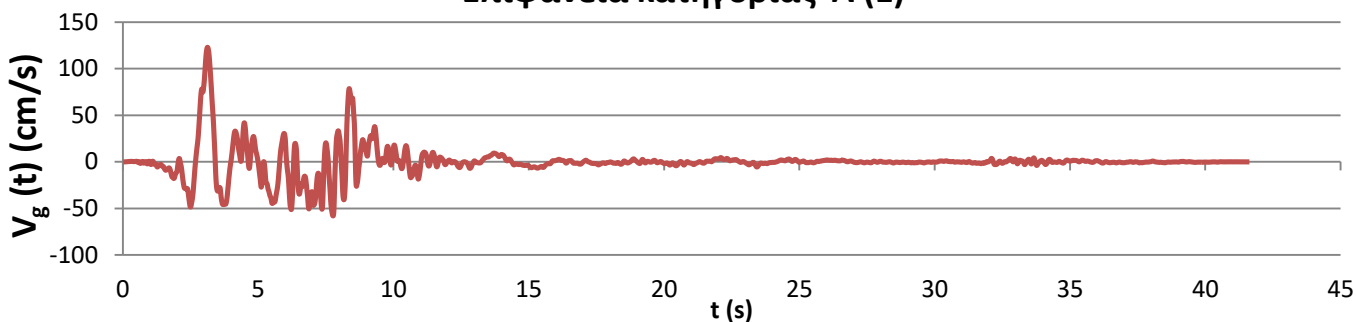
		<u>cc</u>	<u>T (s)</u>	<u>γ</u>	<u>A (cm/s)</u>
1	Βάση	0.7267	1.40	1.8	97.08
	Επιφάνεια A	0.6935	1.49	1.7	103.03
	Επιφάνεια B	0.7690	1.24	2.2	131.22
	Επιφάνεια C	0.8645	1.28	2.7	156.20
	Επιφάνεια D	0.9141	1.53	5.0	192.45
41	Βάση	0.8349	7.33	2.0	39.16
	Επιφάνεια A	0.8309	7.35	2.1	37.67
	Επιφάνεια B	0.7609	8.35	2.1	33.59
	Επιφάνεια C	0.7520	7.44	2.0	39.56
	Επιφάνεια D	0.7176	1.42	5.0	107.59

Π. 6.1 : Χαρακτηριστικά “παλμού” για τις εδαφικές καταγραφές (1) San Fernando, Pacoima Dam (upper left abut) (1971), (41) και Landers, Yermo Fire Station (1992)

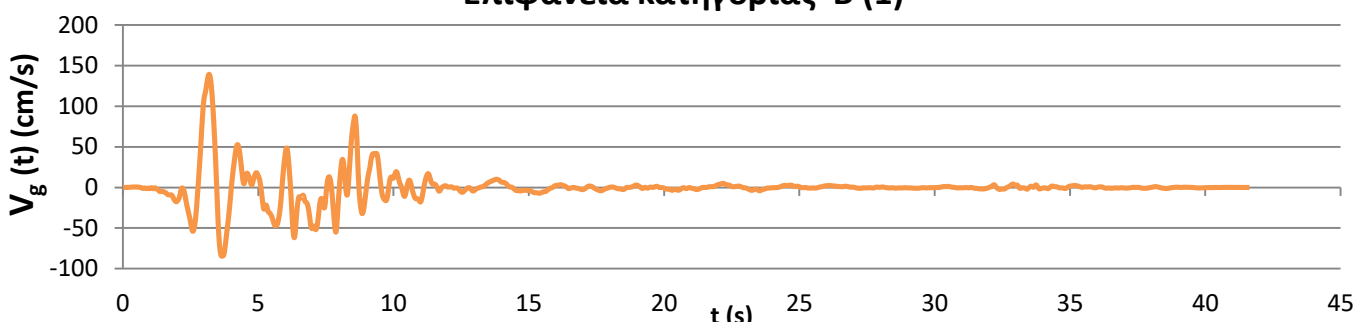
**Βραχώδες υπόβαθρο (1)**



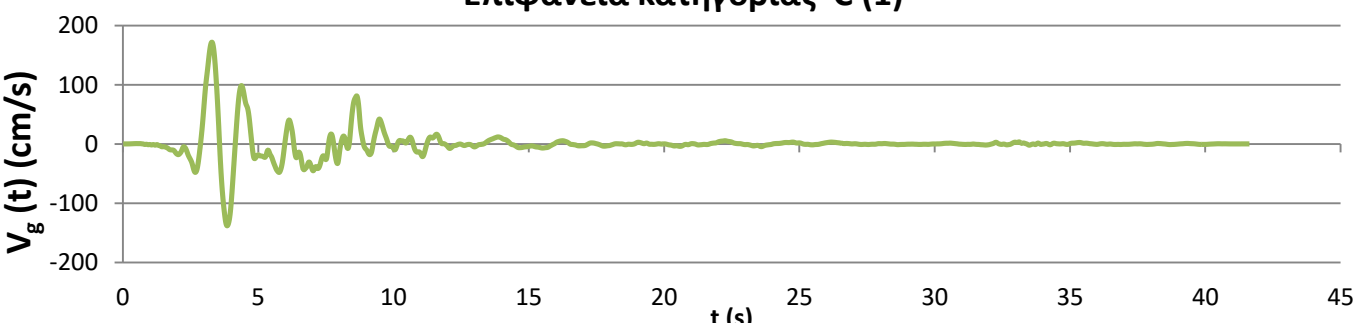
**Επιφάνεια κατηγορίας A (1)**



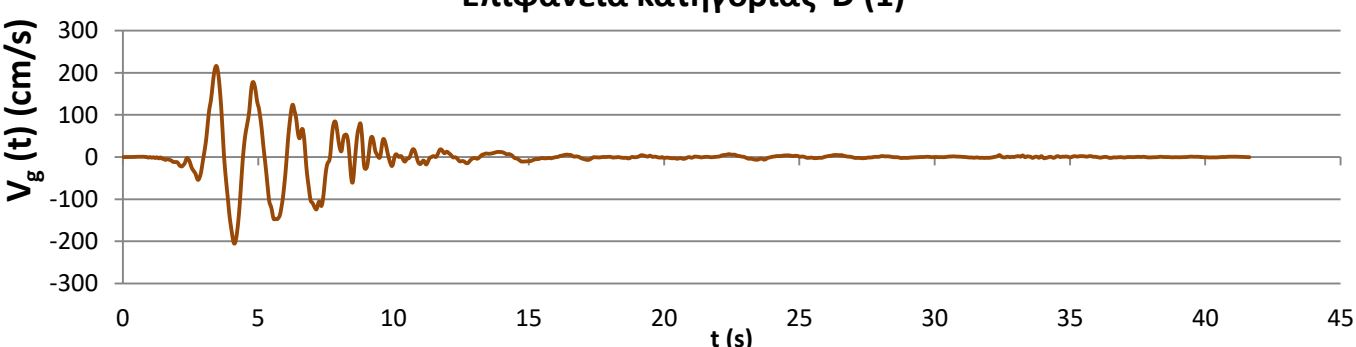
**Επιφάνεια κατηγορίας B (1)**

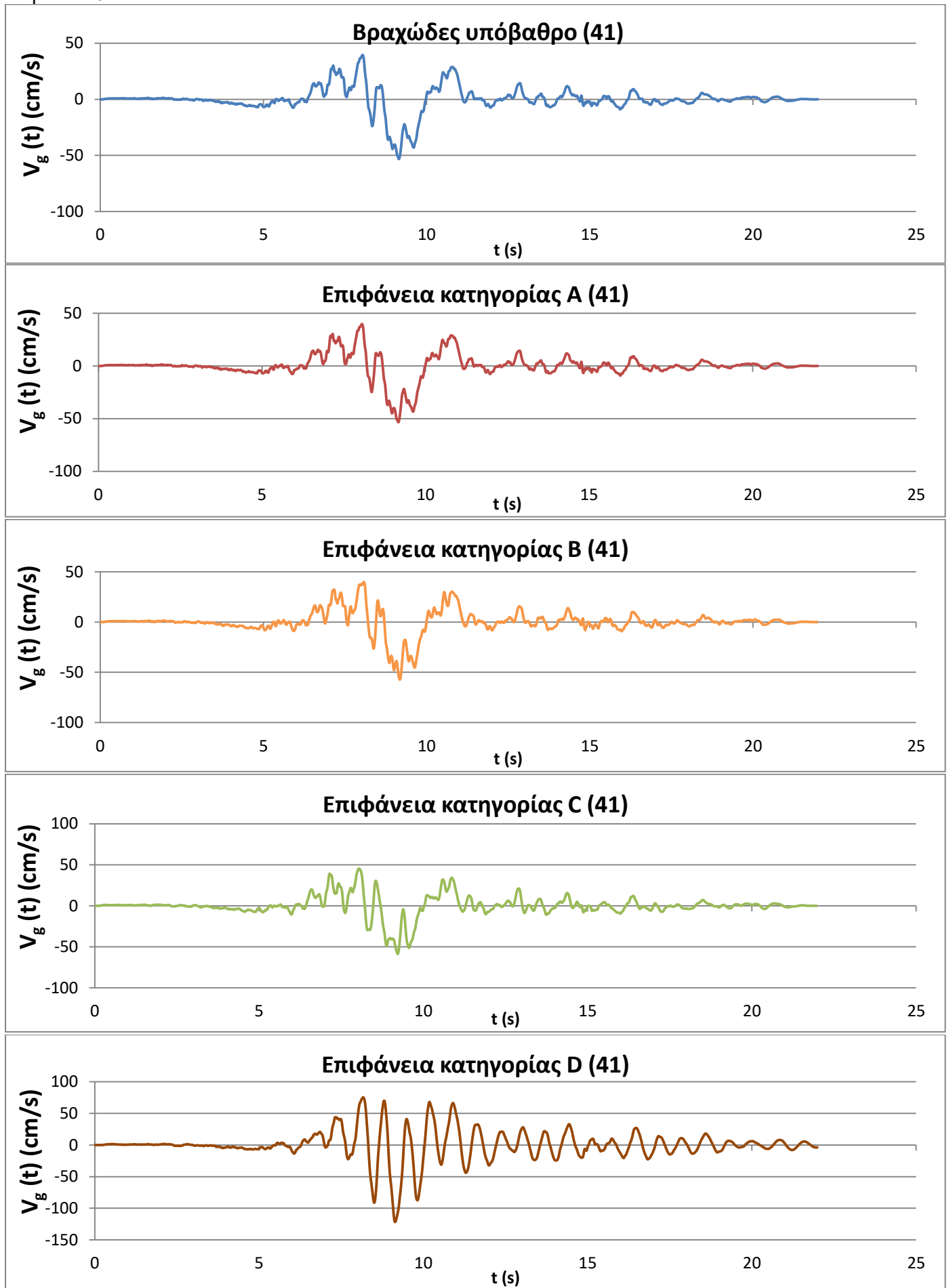


**Επιφάνεια κατηγορίας C (1)**



**Επιφάνεια κατηγορίας D (1)**





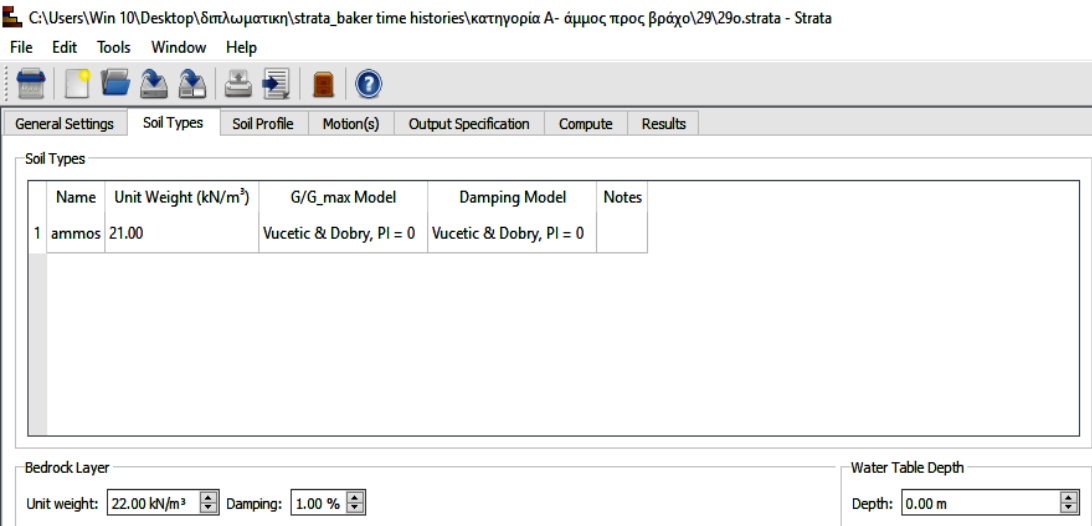
Εικ. 6.10 : Ταχυσιογραφήματα για τις εδαφικές καταγραφές (1) San Fernando, Pacoima Dam (upper left abut) (1971), (41) και Landers, Yermo Fire Station (1992)



Συνοψίζοντας λοιπόν, συμπεραίνεται ότι καθώς ο σεισμικός κυματισμός μεταδίδεται από το βραχώδες υπόβαθρο προς την επιφάνεια συνήθως εξασθενεί σταδιακά η παλμικότητα της. Ουσιαστικά, το φιλτράρισμα μέσω της εδαφικής ζώνης προκαλεί έντονη ενίσχυση σε ολόένα και περισσότερες αιχμές της εδαφικής ταχύτητας χωρίς να περιορίζεται στη θέση του παλμού. Η ενίσχυση αυτή είναι ισχυρότερη όσο μεγαλύτερη είναι η διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών του εδάφους ως προς το αρχικό βραχώδες μητρικό πέτρωμα, δηλαδή η εξασθένηση της παλμικότητας είναι όλο και πιο εμφανής κατά την εξέταση των εδαφικών κατηγοριών με πορεία από την A προς την D. Αυτά αντικατοπτρίζονται και στα μεγέθη της περιόδου, του πλήθους κύκλων και του πλάτους που το πρώτο τείνει να μειωθεί ενώ τα δύο άλλα παρουσιάζουν κυρίως αύξηση. Ωστόσο, υπάρχει και ένα μικρό πλήθος περιπτώσεων όπου η παλμικότητα της κίνησης διατηρείται ή και ενισχύεται σε ορισμένο βαθμό. Αυτό έχει να κάνει κυρίως με την αρχική περίοδο του παλμού αλλά και με την αρχική μορφή του ταχυσιογραφήματος, δηλαδή κατά την εκδήλωση στο βράχο. Τέτοια φαινόμενα παρατηρούνται για μικρές τιμές περιόδου (πλησίον της  $T=1$  sec) του αρχικού παλμού ενώ όσο πιο ομοιόμορφη είναι και χωρίς προεξοχές η χρονοϊστορία της ταχύτητας ώστε να προσομοιώνεται με ένα καθαρό ημίτονο τόσο πιο έντονη και εμφανής είναι η ενίσχυση στην περιοχή του παλμού. Αντίθετα, για σχετικώς πιο βαθμιδωτά ταχυσιογραφήματα που απαιτείται συνδυασμός περισσότερων ημιτόνων για την προσομοίωση κυριαρχεί η προαναφερθείσα εξασθένηση στην περιοχή του παλμού.

## 6.2 Επιδράσεις στα ελαστικά φάσματα επιτάχυνσης

Η ανάλυση δεν περιορίστηκε στο πως επηρεάζουν τα εδαφικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε κατηγορίας την παλμικότητα της εδαφικής ταχύτητας. Αντίθετα, επεκτάθηκε ώστε να προσδιοριστεί η επιρροή τόσο της κατηγορίας εδάφους όσο του παλμού κατευθυντικότητας στο μέγεθος της φασματικής επιτάχυνσης. Για το σκοπό αυτό, ήταν απαραίτητη η εξαγωγή των ελαστικών φασμάτων επιτάχυνσης τα οποία προέκυψαν και πάλι με τη χρήση του λογισμικού πρόγραμματος Strata.

(α)  C:\Users\Win 10\Desktop\δπλωματικη\strata\_baker time histories\κατηγορία A- άμμος προς βράχο\29\29o.strata - Strata

File Edit Tools Window Help

General Settings Soil Types Soil Profile Motion(s) Output Specification Compute Results

Soil Types

Name	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	G/G <sub>max</sub> Model	Damping Model	Notes
1 ammos	21.00	Vucetic & Dobry, PI = 0	Vucetic & Dobry, PI = 0	

Bedrock Layer

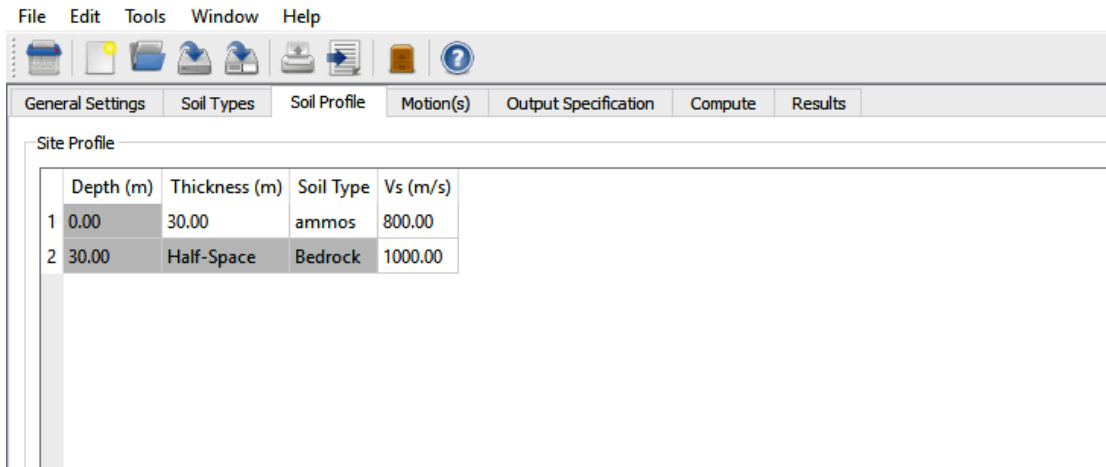
Unit weight: 22.00 kN/m<sup>3</sup> Damping: 1.00 %


Water Table Depth

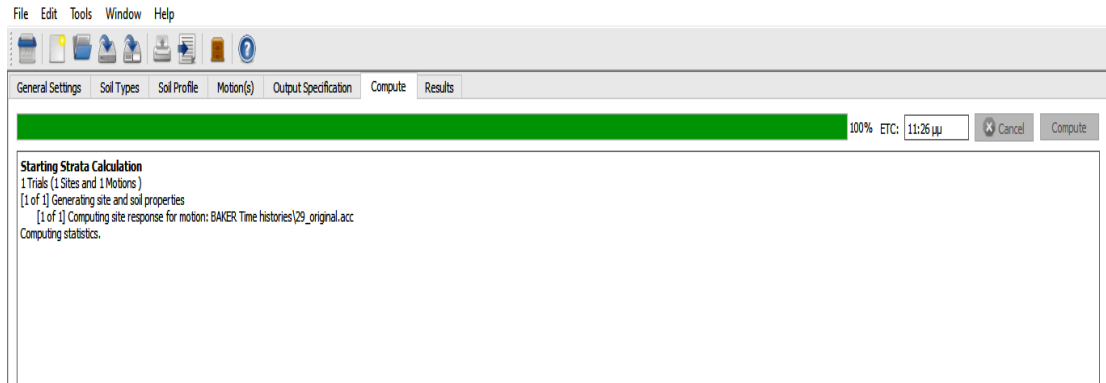
Depth: 0.00 m


## Κεφάλαιο 6

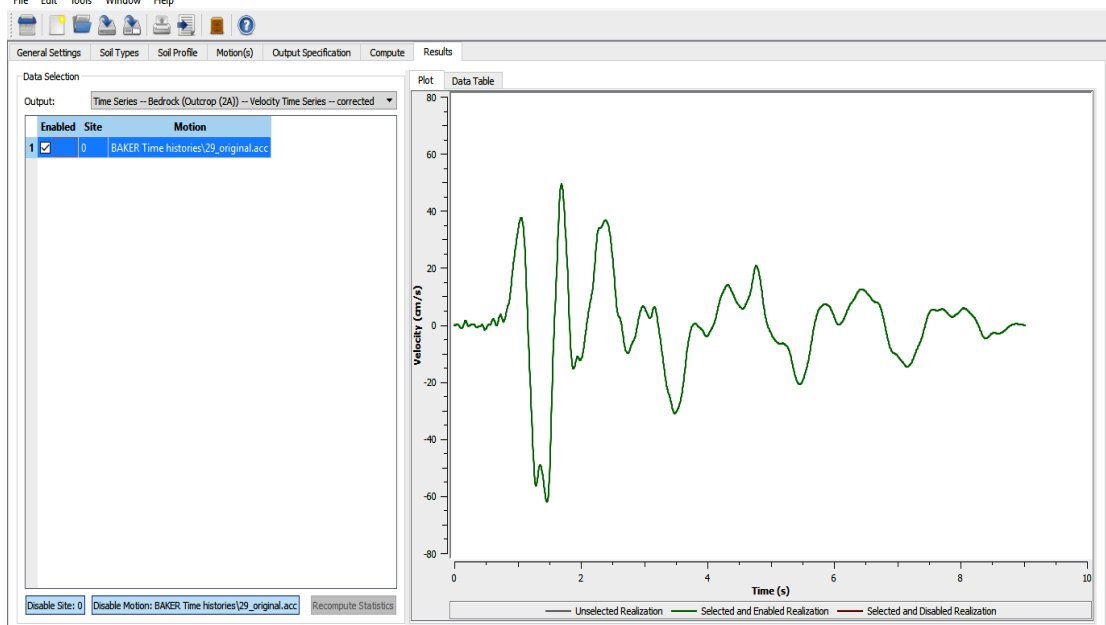
(β)  C:/Users/Win 10/Desktop/δπλωματικη/strata\_baker time histories/κατηγορια A- άμμος προς βράχο/29/29o.strata - Strata



(γ)  C:/Users/Win 10/Desktop/δπλωματικη/strata\_baker time histories/κατηγορια A- άμμος προς βράχο/29/29o.strata\* - Strata



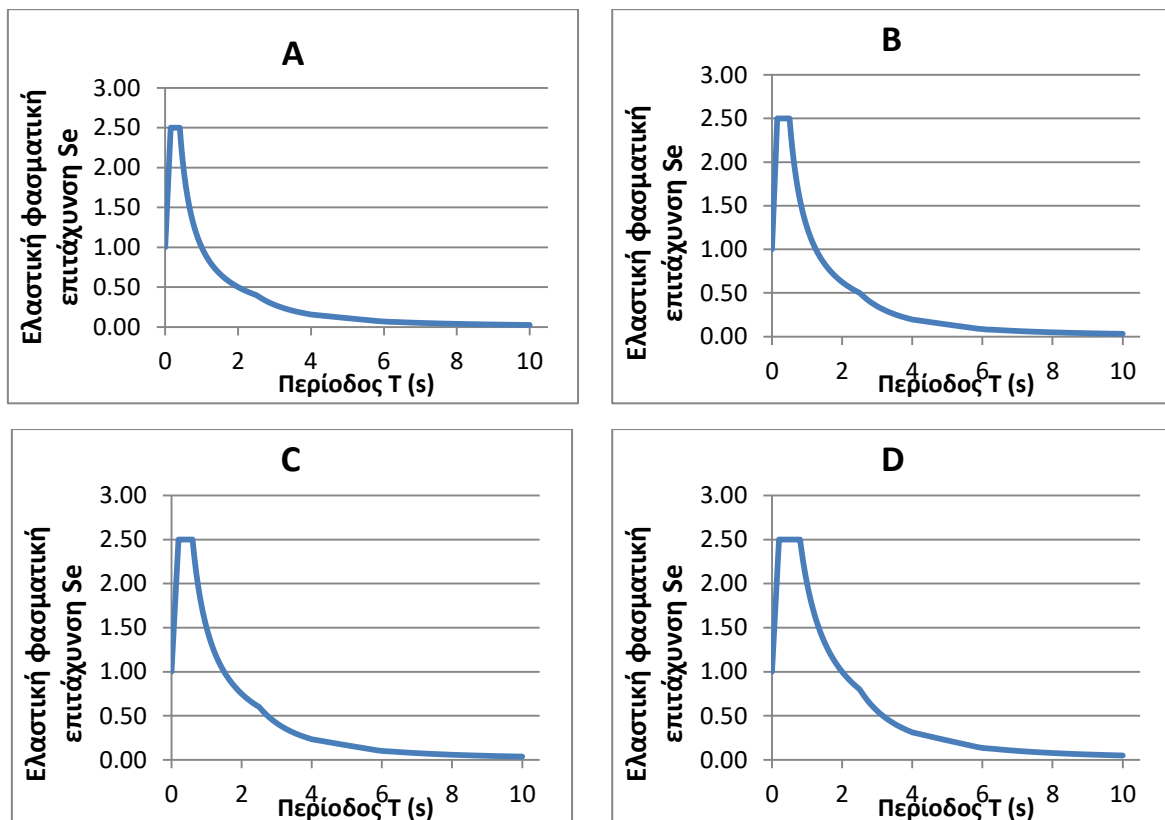
(δ)  C:/Users/Win 10/Desktop/δπλωματικη/strata\_baker time histories/κατηγορια A- άμμος προς βράχο/29/29o.strata\* - Strata



**Εικ. 6.11** : Στιγμιότυπα της ανάλυσης από το υπολογιστικό περιβάλλον του Strata: (α), (β) εισαγωγή εδαφικών παραμέτρων, (γ) ολοκλήρωση υπολογισμών (δ) εξαγωγή αποτελεσμάτων

Αξιοποιώντας τα αποτελέσματα του λογισμικού Strata σχεδιάστηκαν τα αδιαστατοποιημένα- κανονικοποιημένα, ως προς την τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, φάσματα επιτάχυνσης για το βραχώδες υπόβαθρο και τις 4 εδαφικές κατηγορίες του ΕΚ8 διαιρώντας τις φασματικές τιμές με τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, δηλαδή την τιμή για  $T=0$  s. Η κανονικοποίηση των διαγραμμάτων αποτελεί συχνά εφαρμοζόμενη πρακτική σε μελέτες ώστε να πραγματοποιείται σύγκριση ομοίων πραγμάτων. Αυτό διευκολύνει καθώς δεν απασχολεί ο έλεγχος των απόλυτων φασματικών τιμών αλλά κυρίως η μορφή των φασμάτων και κατά πόσο επαρκούν οι προτάσεις του κανονισμού στην κάλυψη των πραγματικών απαιτήσεων. Με αυτό τον τρόπο, λοιπόν, είναι ευκρινής η επίδραση της αρχικής εδαφικής επιτάχυνσης στις κατασκευές που χαρακτηρίζονται από περίοδο έως την τιμή των 10s ανάλογα με την στιβαρότητα/ δυσκαμψία τους. Στα ίδια διαγράμματα απεικονίζεται και το αδιαστατοποιημένο ελαστικό φάσμα του ΕΚ8, διαφορετικό για τις τέσσερις εδαφικές κατηγορίες, με σκοπό να υπογραμμιστεί ότι παρουσιάζει κάποιες αδυναμίες και υπάρχει ανάγκη ενσωμάτωσης των κινδύνων που ενέχει η μετάβαση ενός σεισμικού κύματος μέσω διαφορετικών εδαφικών προφίλ από τη βάση στην επιφάνεια σε συνδυασμό πάντα με την ύπαρξη ενός παλμού κατευθυντικότητας. Στην περίπτωση των ελαστικών φασμάτων του ΕΚ8 η τιμή της επιτάχυνσης διαιρέθηκε με την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, της οποίας η τιμή δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$a_{gs} = S \cdot a_{gr} \quad (6.1)$$

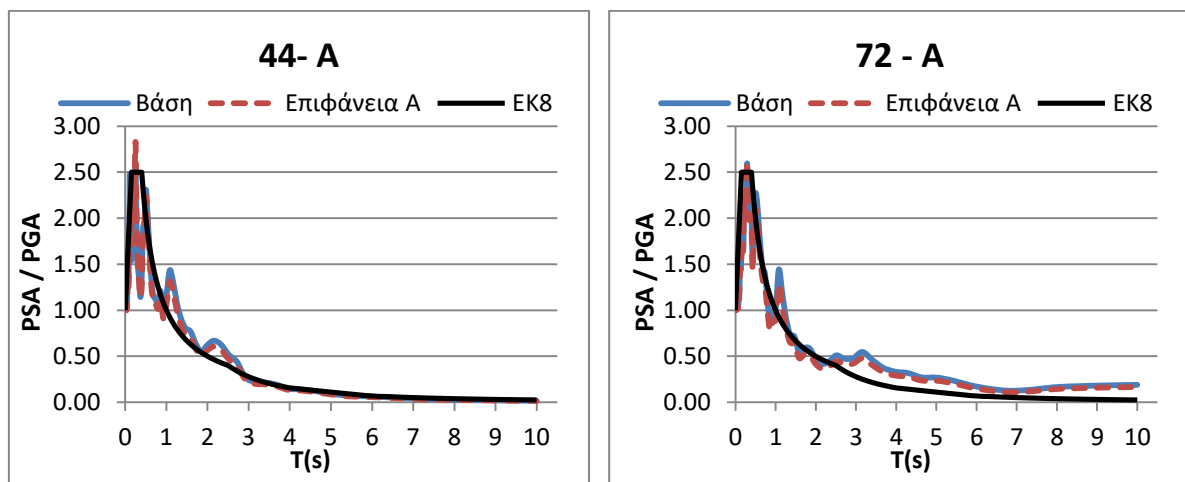


Εικ. 6.12 : Αδιαστατοποιημένα ελαστικά φάσματα ΕΚ8

Τα εν λόγω αδιαστατοποιημένα φάσματα επιτάχυνσης παρατίθενται συγκεντρωτικά στο Παράρτημα Β. Η κατάρτιση διαγραμμάτων που απεικονίζουν τα ελαστικά φάσματα επιτάχυνσης για τις 86 υπό εξέταση παλμικές καταγραφές οδήγησε σε ορισμένες παρατηρήσεις.

Αρχικά, εντοπίζεται κάτι που έχει να κάνει με μεταβολή στη γενικότερη μορφή των φασμάτων και αναγνωρίζεται εύκολα οπτικά. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται ότι καθώς το σεισμικό κύμα “φιλτράρεται” μέσα από τις τέσσερις εδαφικές κατηγορίες κατά τη μετάβασή του από το βραχώδες υπόβαθρο στην επιφάνεια αλλάζει το συχνοτικό του πεδίο. Με άλλα λόγια, το φάσμα απόκρισης για το μέγεθος της επιτάχυνσης ενώ είναι αρκετά υψίσυχο στη βάση μετατρέπεται σε περισσότερο μακροπερίοδο στην επιφάνεια της εδαφικής ζώνης. Μάλιστα, όσο πιο μαλακό είναι το έδαφος τόσο μεγαλύτερη η εξομάλυνση του φάσματος της επιφάνειας σε σύγκριση με εκείνο της βάσης.

Επιπλέον, αξίζει να υπογραμμιστεί για ακόμη μία φορά η ουδετερότητα της εδαφικής κατηγορίας Α του ΕΚ8 ως προς της μεταβολές που μπορεί να επιφέρει στα μεγέθη όλης της μελέτης, πράγμα αναμενόμενο καθώς η συγκεκριμένη κατηγορία δε διαφέρει σημαντικά ως προς τα χαρακτηριστικά σε σύγκριση με το μητρικό βραχώδες πέτρωμα. Έτσι, κατά τη μετάβαση του σεισμικού κύματος από τη βραχώδη βάση προς την επιφάνεια, κινούμενο εντός εδάφους κατηγορίας Α, οι μεταβολές στη φασματική επιτάχυνση είναι αμελητέες και συγκεντρώνονται περίξ της πολύ μικρής της περιόδου (0,15 sec). Πάντως, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων τα δύο φάσματα, για βραχώδη βάση και επιφάνεια κατηγορίας Α ταυτίζονται.



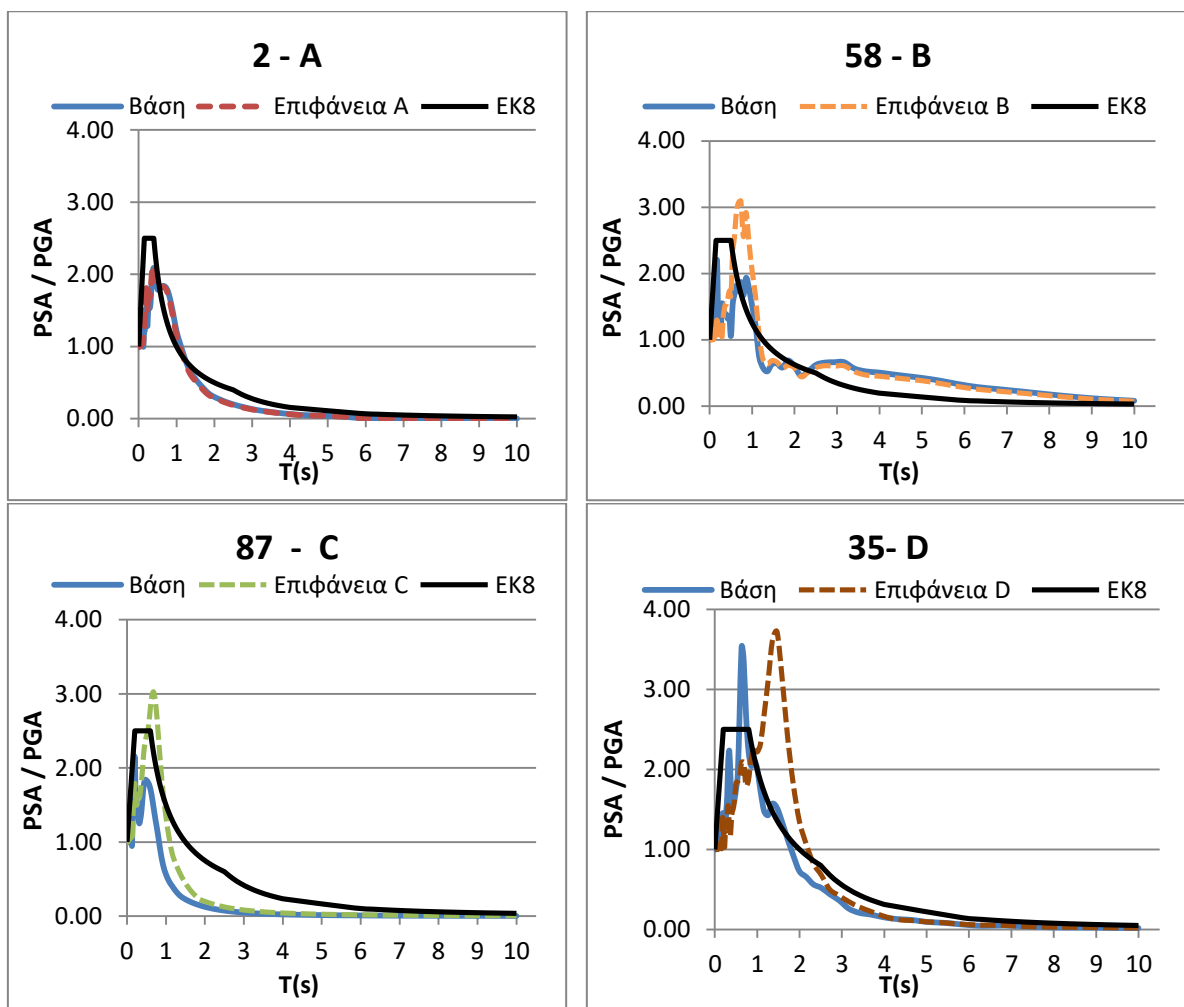
**Εικ. 6.13 :** Ανεπαίσθητες μεταβολές στη φασματική επιτάχυνση βραχώδους βάσης και επιφάνειας Α

Σημαντικότερες είναι οι επιδράσεις σε φάσματα που αφορούν τις υπόλοιπες τρεις εδαφικές κατηγορίες. Κατ' αρχάς, παρατηρείται ότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων και για το εύρος των χαμηλών περιόδων εντοπίζονται μικρές αλλά παρατηρήσιμες εξασθενίσεις των φασμάτων από τη βάση προς την επιφάνεια. Η

ενίσχυση των αδιαστατοποιημένων ελαστικών φασμάτων της βάσης προς την επιφάνεια παρατηρείται κυρίως στις περιοχές σταθερής φασματικής επιτάχυνσης και σταθερής φασματικής ταχύτητας. Σπανιότερη είναι η ενίσχυση στο πεδίο των σταθερών φασματικών μετακινήσεων όπου είναι κυρίαρχη η εξασθένηση του φάσματος επιφάνειας ως προς τη βάση ή σύμπτωση των δύο φασμάτων. Σ αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθεί ότι το έδαφος φαίνεται να ενισχύει επιλεκτικά διαφορετικό πεδίο περιόδων το οποίο μάλιστα συνδέεται με την θεμελιώδη εδαφική ιδιοπερίοδο της εκάστοτε κατηγορίας. Η ιδιοπερίοδος αυτή δίνεται από τη σχέση:

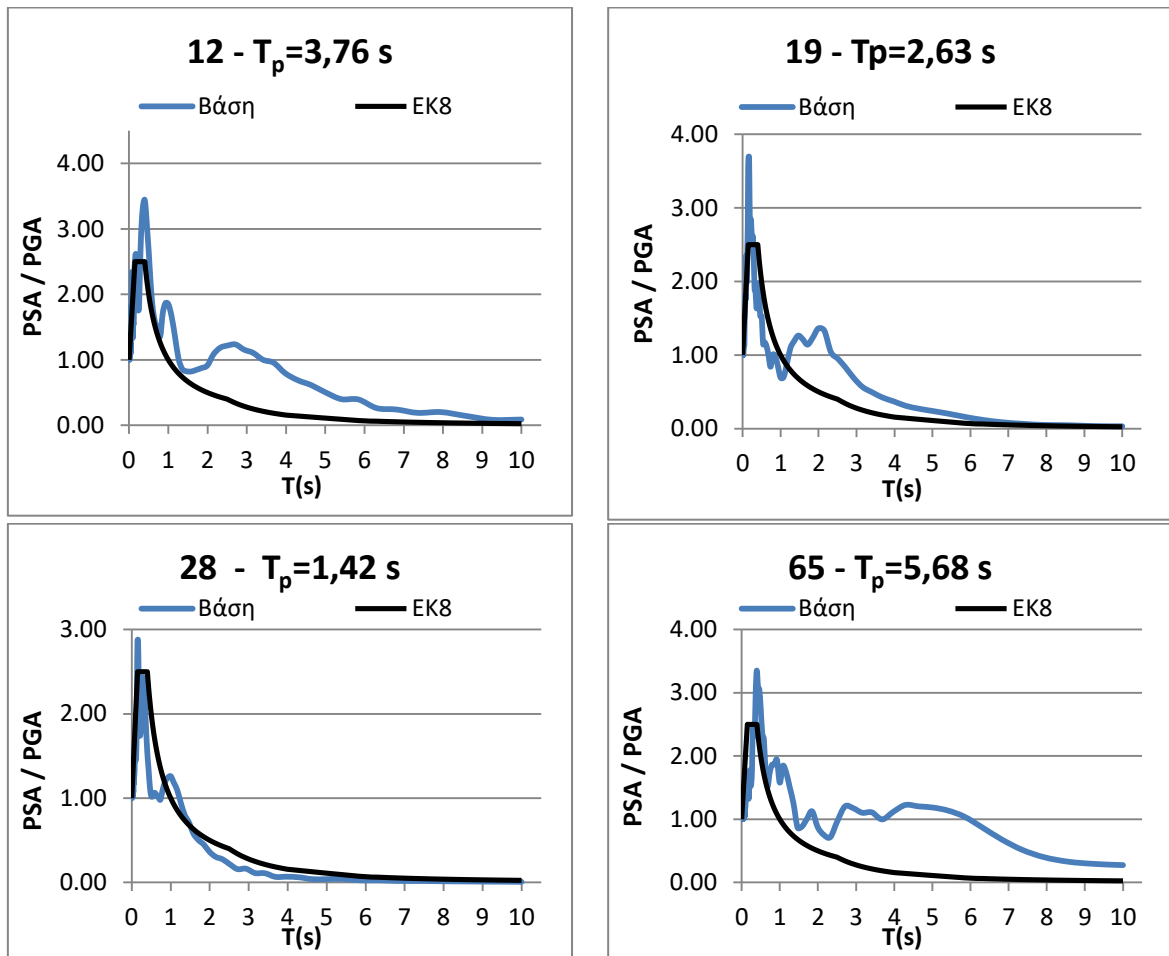
$$T_s = \frac{4h}{V_s} \quad (6.1)$$

Επομένως, στην ευρύτερη γειτονιά της εκάστοτε εδαφικής θεμελιώδους ιδιοπερίοδου παρατηρείται συγκέντρωση των ενισχύσεων των φασματικών επιταχύνσεων ως απόρροια του συντονισμού. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται τέσσερις τυχαίες καταγραφές για τις κατηγορίες εδάφους A, B, C, D που επιβεβαιώνουν τις παρατηρήσεις αυτές.



Εικ. 6.14: Οι περιοχές ενίσχυσης- εξασθένησης του φάσματος επιφάνειας σε σύγκριση με το εκείνο της βάσης.

Όσον αφορά τον παλμό κατευθυντικότητας, που όπως προαναφέρθηκε είναι ορατός κυρίως στην χρονοϊστορία της ταχύτητας, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι αποτυπώνεται και στο φάσμα της επιτάχυνσης ως μια κωδωνοειδής καμπύλη-ενίσχυση του φάσματος είτε στην περίοδο του παλμού είτε σε κάποια σημείο στην ευρύτερη “γειτονιά” του- συνηθέστερα σε λίγο μικρότερη περίοδο από εκείνη του παλμού. Ακολουθούν παραδείγματα καταγραφών στο βραχώδες υπόβαθρο όπου η καμπύλη αυτή είναι αρκετά εμφανής συνοδευόμενα από την περίοδο του παλμού για κάθε περίπτωση.



**Εικ. 6.15:** Ο παλμός κατευθυντικότητας στο αδιαστατοποιημένο φάσμα του βραχώδους υποβάθρου

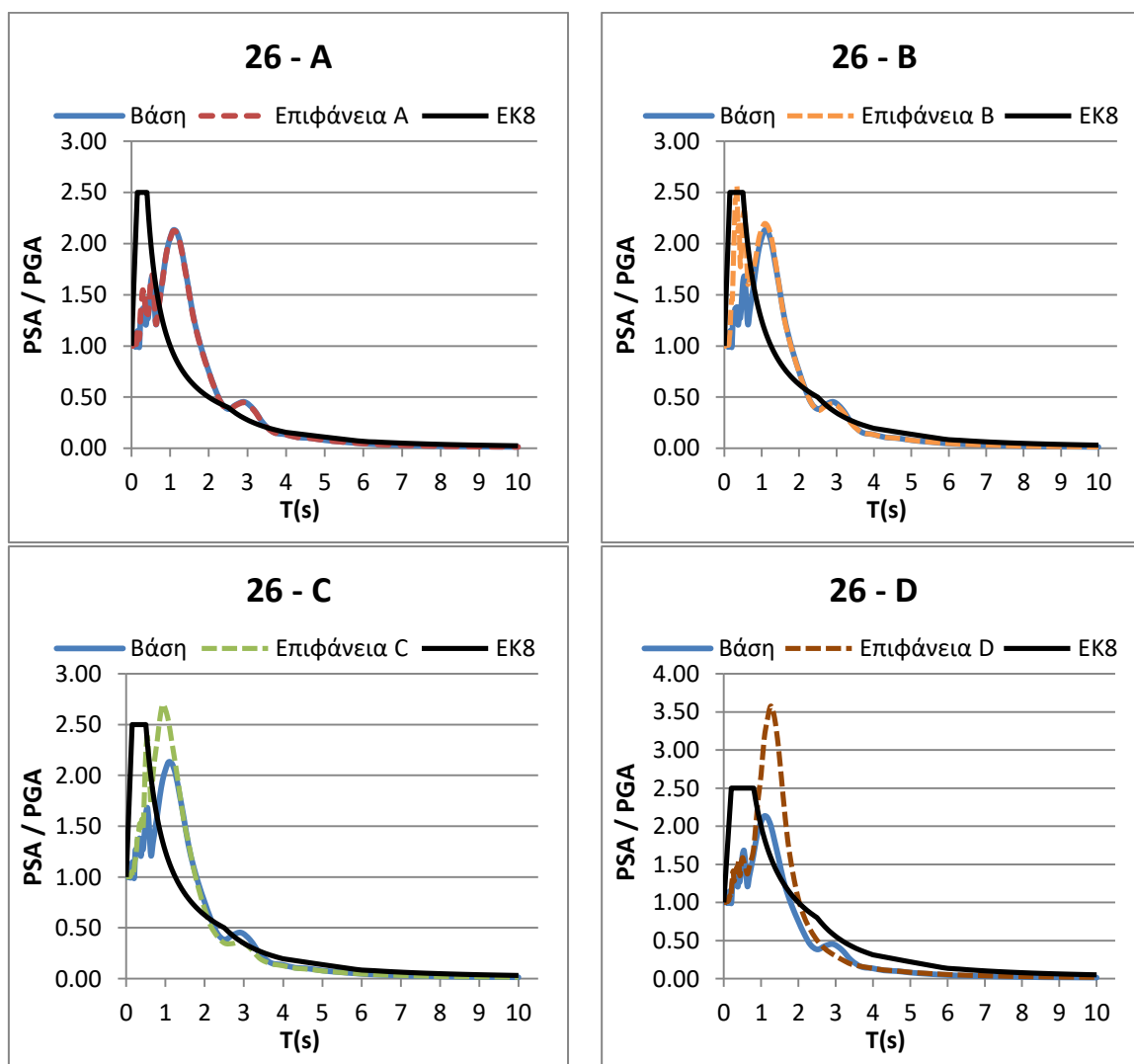
Ως προς την επιρροή της κατηγορίας του εδάφους στα φάσματα επιτάχυνσης στην επιφάνεια φαίνεται ότι υπάρχει ενίσχυση όταν ο παλμός εντοπίζεται σε μικρές προς μέσες περιόδους, δηλαδή στις περιοχές που αναφέρθηκαν και προηγουμένως, σταθερής φασματικής επιτάχυνσης και ταχύτητας κατά τον ΕΚ8. Η ενίσχυση αυτή είναι μεγαλύτερη και επηρεάζει ευρύτερο πεδίο περιόδων όσο πιο μαλακή είναι η εδαφική ζώνη μεταξύ επιφάνειας και βραχώδους βάσης. Συνεπώς, εντοπίζεται διαφοροποίηση ολοένα και μεγαλύτερη καθώς εξετάζουμε τις εδαφικές κατηγορίες του ΕΚ8 με πορεία από την Α προς την D. Επιπλέον, η ενίσχυση που επιφέρεται μέσω της εδαφικής στρώσης τείνει να μετατοπίζει την αιχμή της

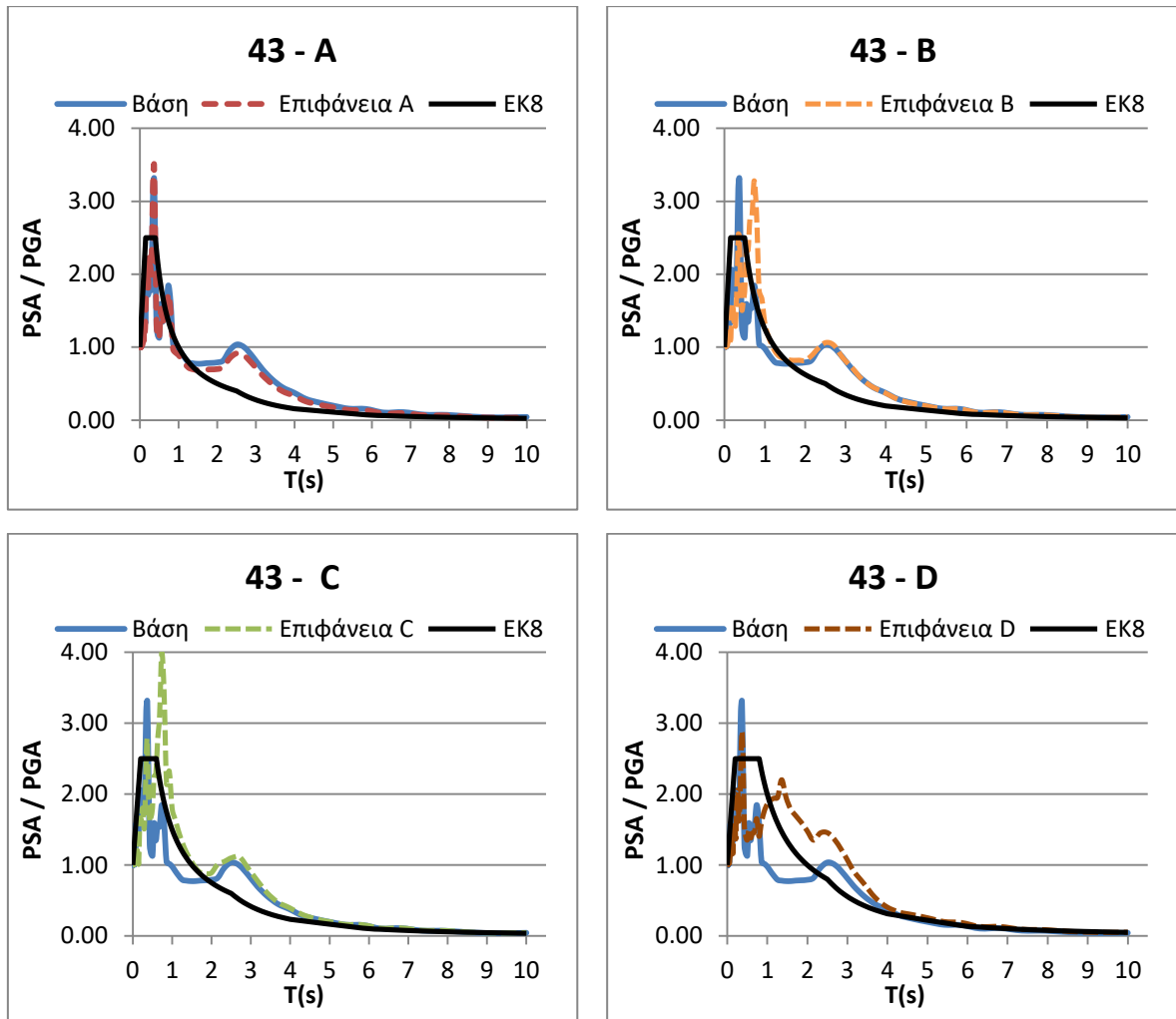
φασματικής επιτάχυνσης προς ελάχιστα μεγαλύτερες περιόδου, δηλαδή όλο και πιο κοντά στην περίοδο του παλμού.

Τα αποτελέσματα στην περίπτωση που ο αρχικός παλμός κατευθυντικότητας χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη περίοδο, στο πεδίο των σταθερών φασματικών μετακινήσεων δεν είναι ανάλογα. Όπως προαναφέρθηκε, σε εκείνη την περιοχή είναι περισσότερο συχνή η εξασθένηση της αρχικής εδαφικής επιτάχυνσης και μάλιστα μεγαλύτερη από την αντίστοιχη εξασθένηση στο φάσμα της βάσης. Ο ρόλος του εδάφους σχετίζεται και πάλι με το μέγεθος της αποενίσχυσης. Όσο πιο μαλακή η εδαφική στρώση σε σύγκριση με το βραχώδες μητρικό πέτρωμα τόσο πιο έντονη είναι η εν λόγω εξασθένηση.

Παρακάτω παρατίθενται δύο παραδείγματα καταγραφών από κάθε κατηγορία όπου :

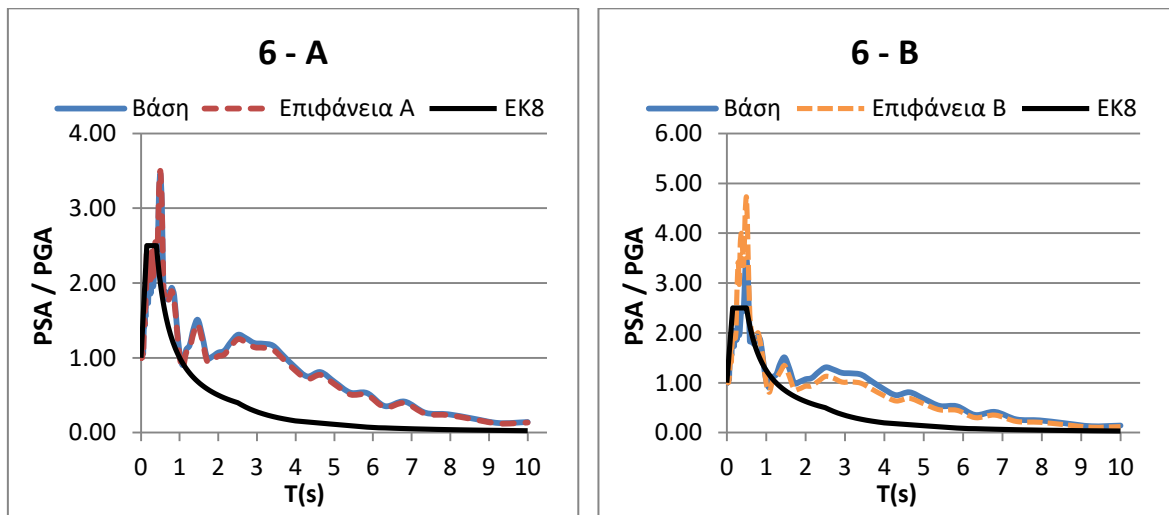
- ❖ Για μικρές προς μέσες περιόδους του παλμού κατευθυντικότητας της χρονοϊστορίας εδαφικής ταχύτητας, της τάξης των 0,3 – 3,0 s εντοπίζεται ενίσχυση της φασματικής καμπύλης που αποτυπώνει τον παλμό.



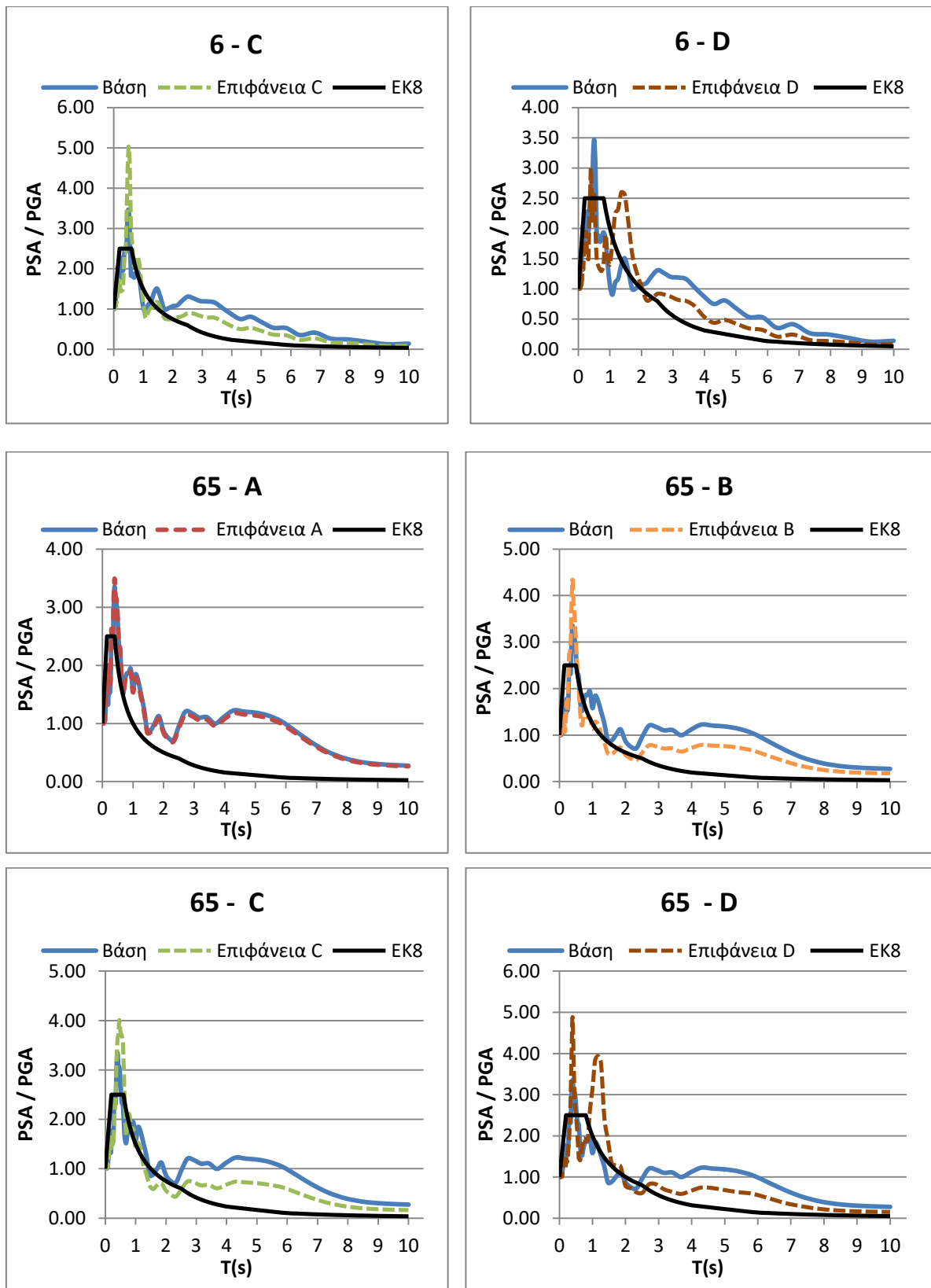


**Εικ. 6.16:** Ενίσχυση του αδιαστατοποιημένου φάσματος επιτάχυνσης στην περίοδο του παλμού κατευθυντικότητας (26)  $T_p = 1,49$  s. Taiwan SMART1(40), SMART1 C00 (1986) και (43)  $T_p = 2,93$ s. Northbridge-01, Jensen Filter Plant (1994)

- ❖ Για μεγάλες περιόδους παλμού, τυπικά τίθεται ένα κάτω όριο των 3s, το φάσμα δεν παρουσιάζει ενίσχυση στη θέση του παλμού κατά το φιλτράρισμά του μέσω της εδαφικής στρώσης







**Εικ. 6.17 :** Εξασθένιση του αδιαστατοποιημένου φάσματος επιτάχυνσης στην περίοδο του παλμού κατευθυντικότητας (6)  $T_p= 4.78s$ . Imperial Valley-06, Brawley Airport (1979) και (65)  $T_p= 5,68 s$ . Chi- Chi, Taiwan, TCU040 (1999)

Παρ' όλα αυτά, με μια πρόχειρη ματιά, φαίνεται ότι σε κάθε περίπτωση, είτε υπάγεται στη μία είτε στην άλλη κατηγορία, σύμφωνα με την ανωτέρω κατηγοριοποίηση, η αποτύπωση του παλμού κατευθυντικότητας παραμένει εμφανής μετά το "φιλτράρισμα" διαμέσου της εδαφικής ζώνης και στην πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν καλύπτεται από τις προτάσεις του αντισεισμικού κανονισμού. Παραμένει, λοιπόν, επιτακτική η ανάγκη τροποποίηση του κανονισμού ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι επαυξήσεις που επιφέρει στο φάσμα της επιτάχυνσης τόσο ο τύπος του εδάφους στον παλμό κατευθυντικότητας όσο και ο ίδιο εν γένει παλμός.

## 6.3 Επάρκεια του ΕΚ8

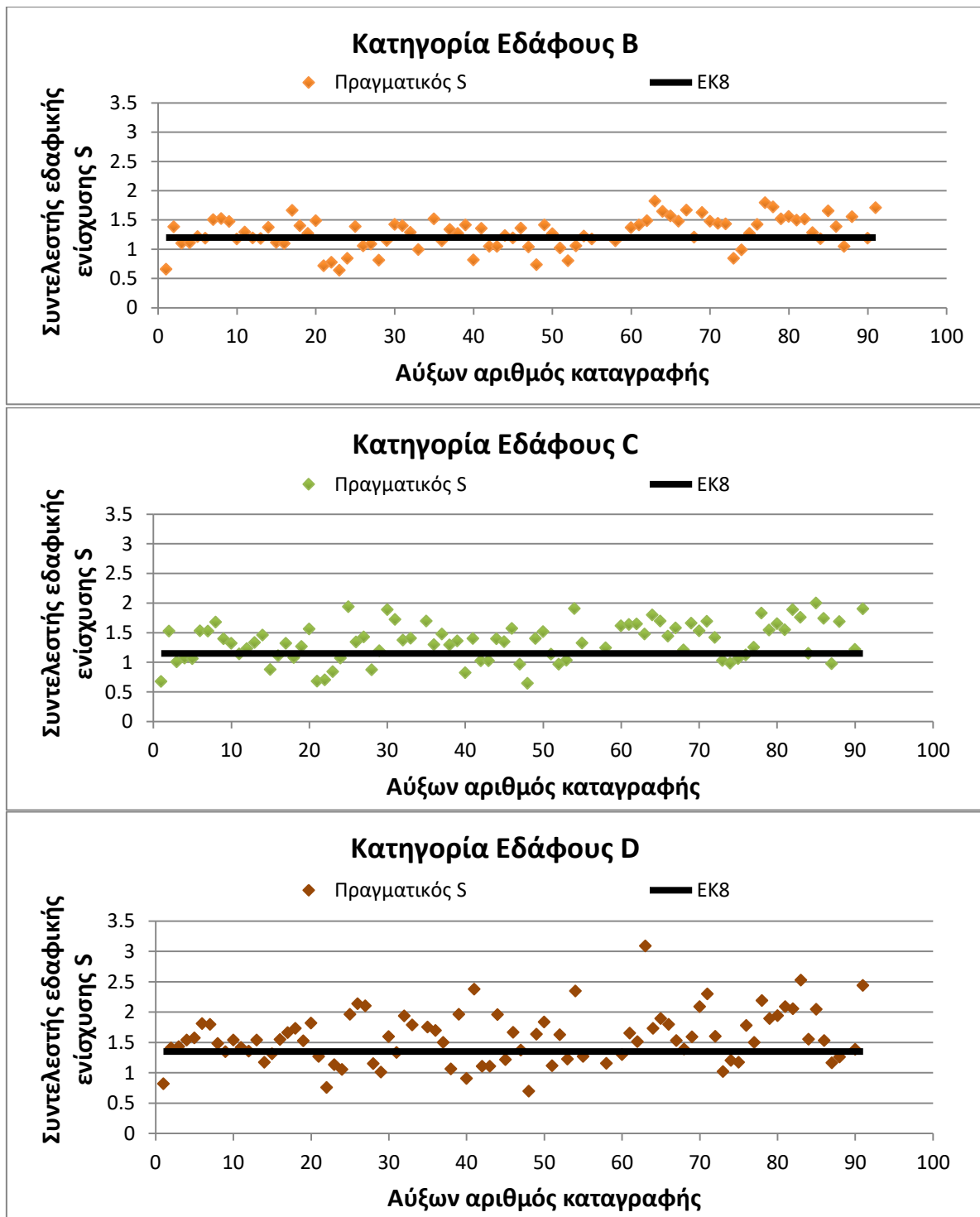
### 6.3.1 Συντελεστής εδαφικής ενίσχυσης $S$ και περίοδος $T_c$

Η επιρροή του εδάφους στη σεισμική δράση, δηλαδή στην επιτάχυνση σχεδιασμού μιας κατασκευής δίνεται μέσω του συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης  $S$ , που λαμβάνει τιμές ανάλογα με την κατηγορία του εδάφους στο οποίο εδράζεται η κατασκευή. Ο *Ευρωκώδικας 8* έχει προβλέψει τις τιμές του συντελεστή αυτού για τις κατηγορίες εδάφους που ορίζει. Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής  $S$  λαμβάνει τιμές 1, 1.2, 1.15 και 1.35 για τις εδαφικές κατηγορίες A, B, C και D αντίστοιχα.

Για τις ανάγκες της ανάλυσης, κρίθηκε απαραίτητος ο προσδιορισμός του πραγματικού συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης  $S$  για τις 86 υπό εξέταση παλμικές καταγραφές που μελετήθηκαν νωρίτερα με σκοπό να συγκριθεί με τις προβλέψεις του ΕΚ8 και να κριθεί εάν επαρκούν ή όχι. Στο πλαίσιο αυτό, ο πραγματικός συντελεστής  $S$  υπολογίστηκε ως η τιμή του λόγου των ελαστικών φασμάτων επιτάχυνσης (για απόσβεση 5%) στην ελεύθερη επιφάνεια για την εκάστοτε εξεταζόμενη κατηγορία (B, C, D) προς τις αντίστοιχες τιμές που αντιστοιχούν στο βραχύδες υπόβαθρο για  $T=0\text{sec}$ . Στη συνέχεια, καταρτίστηκαν διαγράμματα που απεικονίζουν την τιμή πραγματικού συντελεστή  $S$  για κάθε καταγραφή και καθεμία από τις τρεις εδαφικές κατηγορίες. Στα ίδια διαγράμματα χαράχτηκε και η σταθερή τιμή του αντίστοιχου συντελεστή  $S$  κατά τον ΕΚ8.

Σημαντικό θεωρείται να αναφερθεί ότι σε αυτό το στάδιο της μελέτης, η εδαφική κατηγορία A δεν ελήφθη υπόψη. Μια τέτοια κίνηση δικαιολογείται καθώς από την αρχή της ανάλυσης έχει θεωρηθεί ότι στην κατηγορία A υπάγονται οι βραχύδεις σχηματισμοί που ουσιαστικά δε διαφοροποιούνται κατά πολύ από το μητρικό βραχύδες πέτρωμα. Επομένως, δεν έχει φυσικό νόημα ο ορισμός ενός συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης  $S$  για τη συγκεκριμένη κατηγορία.

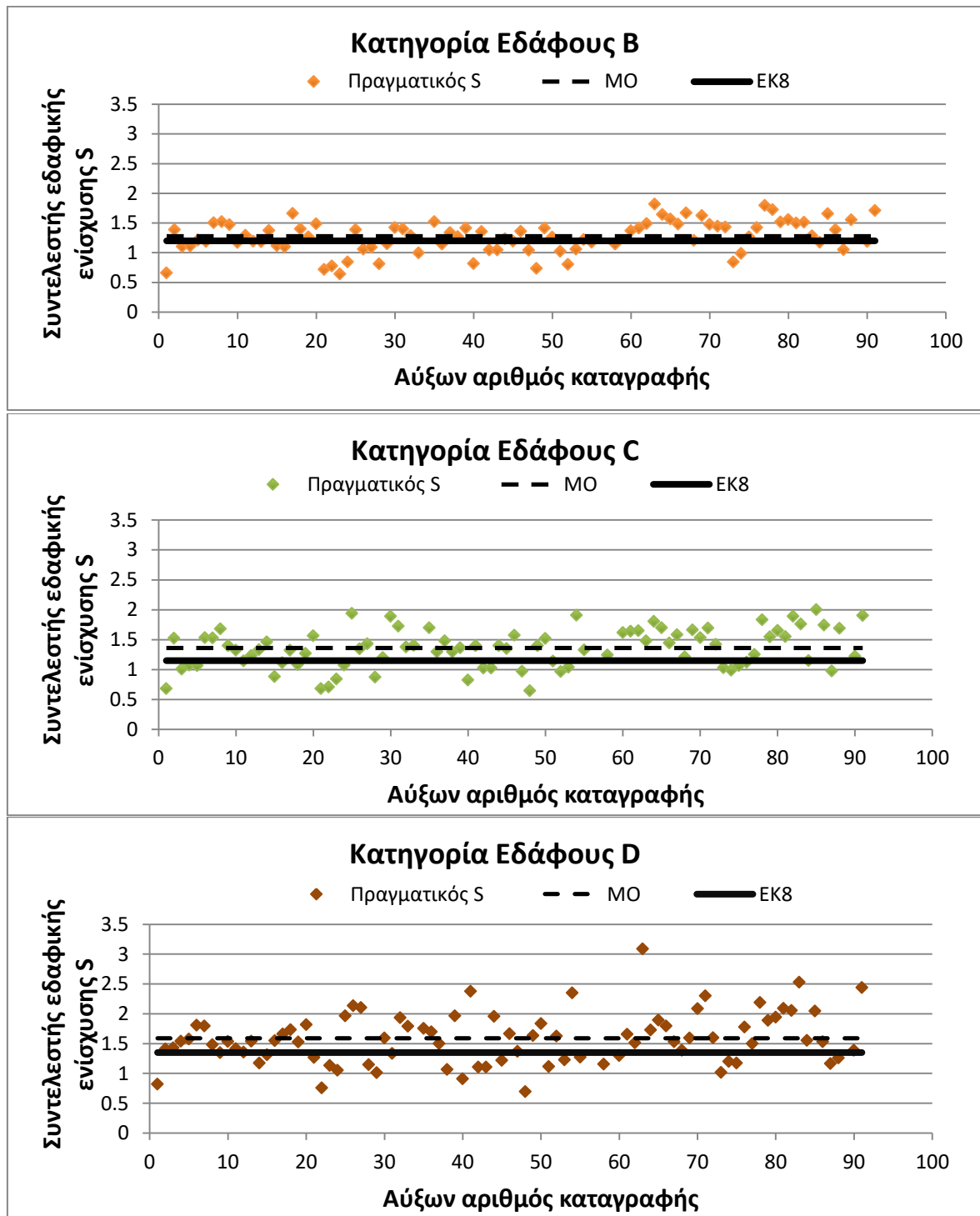
Ακολουθούν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα για τις κατηγορίες B, C και D κατά ΕΚ8.



**Εικ. 6.18:** Τιμές του συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης S για τις πραγματικές καταγραφές και κατά EK8 για τις εδαφικές κατηγορίες B, C και D

Με βάση τα ανωτέρω διαγράμματα είναι προφανής η αδυναμία του EK8 να καλύψει τις ανάγκες που παρουσιάζουν οι καταγραφές. Μια πρώτη εκτίμηση αυτής της αδυναμίας δίνεται μέσα από την παράθεση του μέσου όρου των καταγραφών αλλά και υπολογίζοντας το ποσοστό επάρκειας του EK8 σε καθεμία από τις τρεις περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, σε κανένα από τα ανωτέρω γραφήματα δε φαίνεται να καλύπτεται ο μέσος όρος των καταγραφών ενώ το σύνολο των καταγραφών που

βρίσκεται υπό το όριο του κανονισμού περιορίζεται περίπου στο 30%. Επομένως, η ευδιάκριτη τάση για αύξηση του πραγματικού S η οποία είναι ολοένα και μεγαλύτερη καθώς αμβλύνεται διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών μεταξύ βραχώδους μητρικού πετρώματος και επιφανειακής στρώση αυξάνει αξιοσημείωτα και τον βαθμό ανεπάρκειας του ΕΚ8, παρά την κατά βάση ανοδική πορεία που ακολουθούν οι προτάσεις του ( $S_B=1.20 < S_C=1.15 < S_D=1.35$ ).

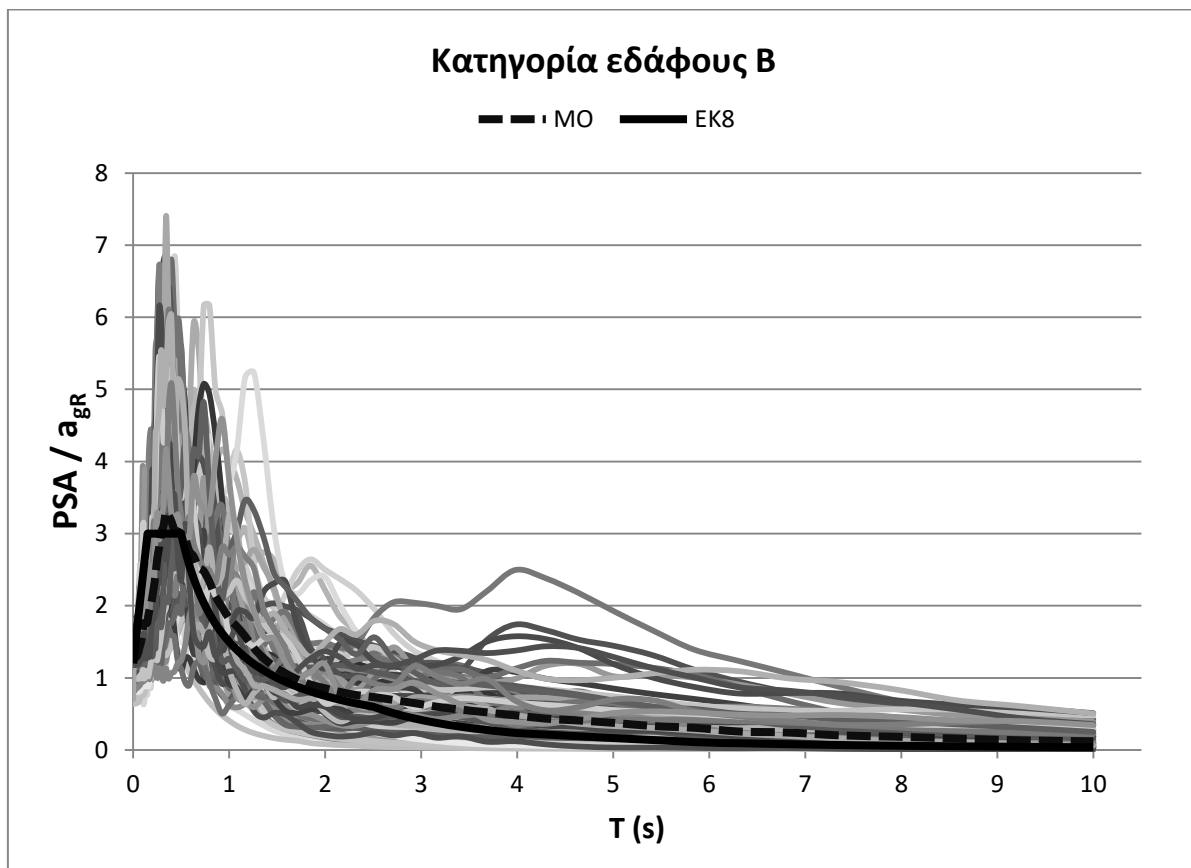


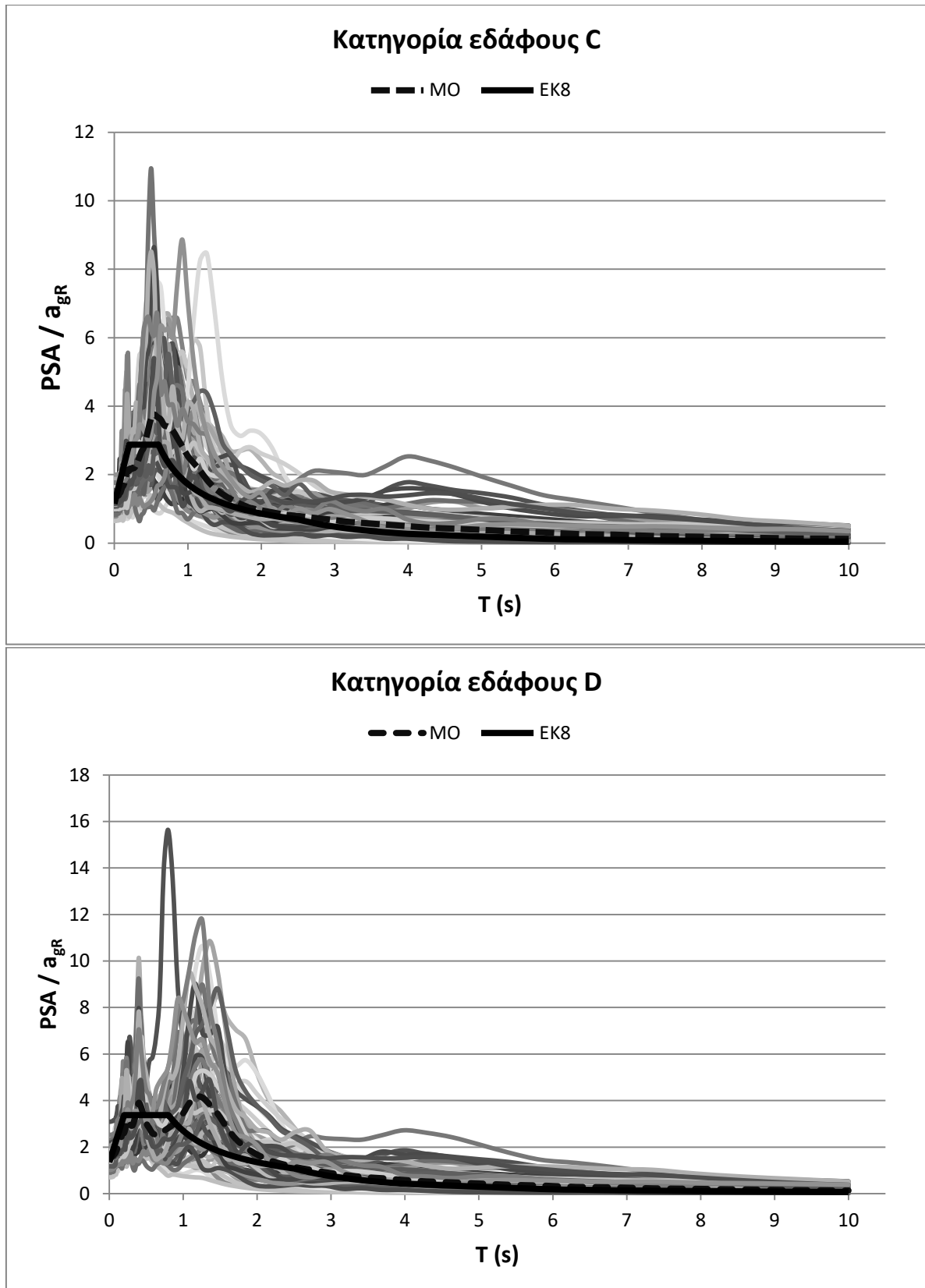
**Εικ. 6.19:** Τιμές του συντελεστής εδαφικής ενίσχυσης S για τις πραγματικές καταγραφές μέσος όρος καταγραφών και τιμές κατά ΕΚ8 για τις εδαφικές κατηγορίες B, C και D

	S κατά ΕΚ8	Ποσοστό Επάρκειας %	ΜΟ	Ποσοστό Επάρκειας %
<b>B</b>	1.20	30.1	1.28	50.0
<b>C</b>	1.15	30.2	1.36	50.0
<b>D</b>	1.35	30.2	1.59	50.0

**Π. 6.2 :** Πίνακας τιμών συντελεστή S κατά ΕΚ8 και ως μέσος όρος των καταγραφών μαζί με τα αντίστοιχα ποσοστά επάρκειας

Για μια περισσότερο ολοκληρωμένη εικόνα, κρίθηκε χρήσιμος ο σχεδιασμός φασμάτων για την εξέταση της επάρκειας του κανονισμού τόσο ως προς τις αιχμές των φασμάτων όσο και ως προς το συχνοτικό τους πεδίο. Στο πλαίσιο αυτό, καταρτίστηκαν διαγράμματα που προέκυψαν ως ο λόγος των φασματικών επιταχύνσεων στην εκάστοτε επιφάνεια (B, C και D) προς την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση στη θέση του βράχου, δηλαδή την τιμή της φασματικής επιτάχυνσης του βραχώδους υποβάθρου για  $T=0\text{sec}$ . Για τη χάραξη του φάσματος του κανονισμού πραγματοποιήθηκε αδιαστατοποίηση ως προς τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας. Επομένως, τα καταρτισμένα διαγράμματα είχαν εξάρτηση μόνο από τα χαρακτηριστικά των εδαφικών κατηγοριών. Επιπλέον, για τον έλεγχο επάρκειας χαράχτηκαν οι προσεγγιστικές μέσες τιμές των καταγραφών.





**Εικ. 6.20:** Αδιαστατοποιημένα φάσματα καταγραφών και ΕΚ8 ως προς τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας και καμπύλες μέσου όρου καταγραφών

Εξετάζοντας τα ανωτέρω διγράμματα γίνεται και πάλι εύκολα αναγνωρίσιμη η ανεπάρκεια των καμπυλών του κανονισμού ως προς τη μέση τιμή των καταγραφών. Συγκεκριμένα, η σημαντική αδυναμία αυτή εκδηλώνεται, όπως ήταν αναμενόμενο σύμφωνα με παρατηρήσεις προηγούμενων παραγράφων, στις περιοχές σταθερών φασματικών επιταχύνσεων και σταθερών φασματικών ταχυτήτων. Εκτός ασφαλείας παραμένουν τόσο οι αιχμές των φασμάτων όσο και σημαντικά τμήματα των φθίνοντων κλάδων των καμπυλών μέσου όρου. Μάλιστα, η ανασφάλεια αυτή για ακόμη μία φορά ακολουθεί το μοτίβο επαύξησης καθώς εξετάζονται οι καταγραφές με πορεία από την εδαφική κατηγορία Β προς τη C και τέλος την D. Στα τμήματα των φασμάτων που έπονται της χαρακτηριστικής περίοδο  $T_D = 2.50\text{sec}$  οι αποκλίσεις από τον κανονισμό είναι μικρές ενώ εντονίζονται και κάτω από το φασματικό σύνορο της μονάδας. Επιπλέον, η περίοδος  $T_D$  αποτελεί μια αρκετά μεγάλη τιμή ιδιοπεριόδου για συμβατικές κατασκευές οπότε δεν απασχολεί σημαντικά η ανεπάρκεια του κανονισμού σε περιόδους πέραν αυτό του ορίου.

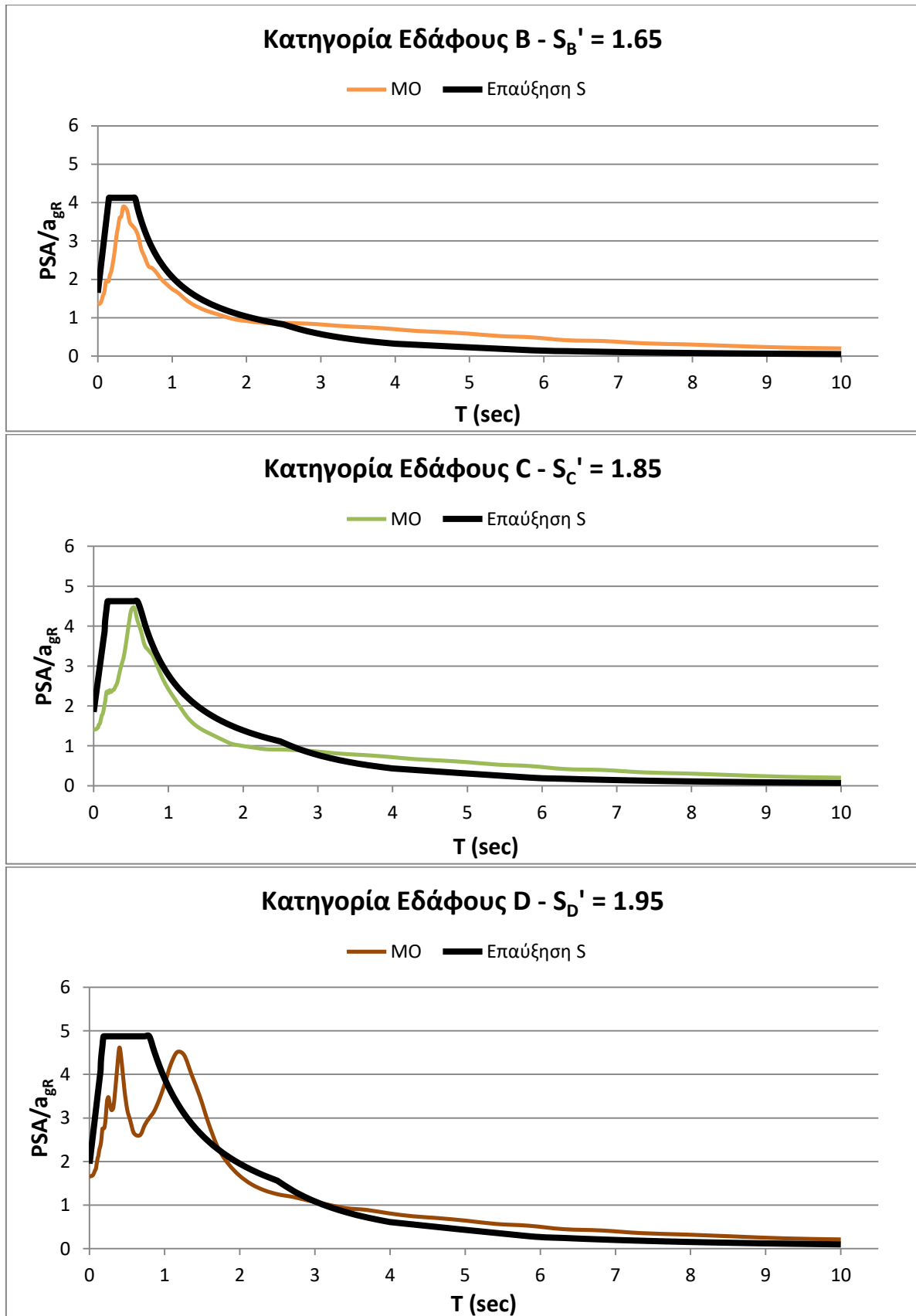
### 6.3.2 Προτάσεις βελτίωσης του ΕΚ8

Λαμβάνοντας υπόψη τις συγκρίσεις και τα συμπεράσματα της προηγούμενης παραγράφου κρίνεται ότι είναι επιτακτική η ανάγκη βελτίωσης των προτάσεων του ΕΚ8 ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των καταγεγραμμένων εδαφικών κινήσεων. Υπό το πρίσμα αυτό, θα μπορούσαν να δοθούν δύο προτάσεις βελτίωσης οι οποίες σχετίζονται με τον συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης  $S$  αλλά και με την χαρακτηριστική περίοδο  $T_C$  το άνω όριο του πεδίου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης. Στη συνέχεια, εξετάζονται περισσότερο αναλυτικά οι δύο αυτές προτάσεις μέσω παράθεσης των αποτελεσμάτων εφαρμογής καθεμίας βελτιωτικής πρότασης ξεχωριστά αλλά και του συνδυασμού αυτών.

1. **Επαύξηση του συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης  $S$ :** οι προτεινόμενες τιμές επαυξημένου συντελεστή  $S$  επιλέχθηκαν με κριτήριο την επάρκεια του κανονισμού στις θέσεις αιχμής των φασμάτων. Ωστόσο, μέσα από τα διαγράμματα που ακολουθούν γίνεται κατανοητό ότι μέσω μιας τέτοιου είδους βελτιωτικής κίνησης εξακολουθούν να εντοπίζονται ανασφαλείς περιοχές κυρίως στο τμήμα του φθίνοντος κλάδου του ΕΚ8 όσον αφορά την εδαφική κατηγορία D.

	S κατά ΕΚ8	Προτεινόμενοι επαυξημένοι S
<b>B</b>	1.20	1.65
<b>C</b>	1.15	1.85
<b>D</b>	1.35	1.95

Π. 6.3: Τιμές συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης  $S$  κατά ΕΚ8 και προτάσεις επαύξησης



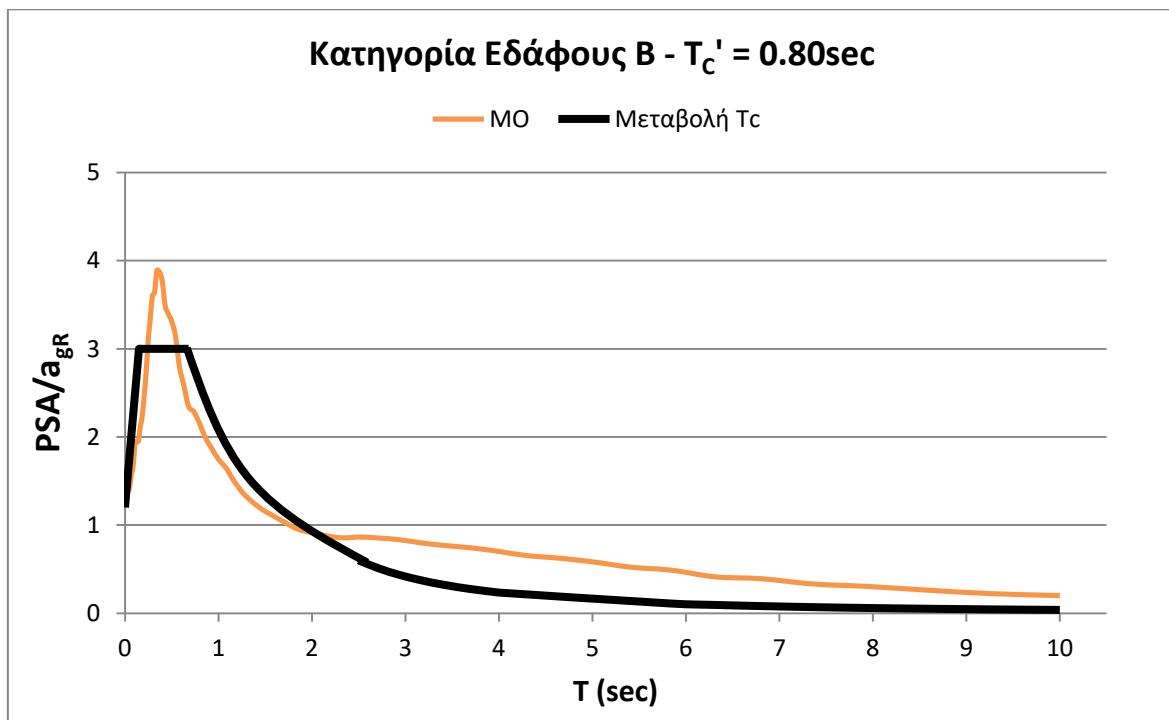
**Εικ. 6.21:** Αδιαστατοποιημένα φάσματα ως προς τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας εφαρμόζοντας τη βελτιωτική μέθοδο επαύξησης του συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης S του ΕΚ8

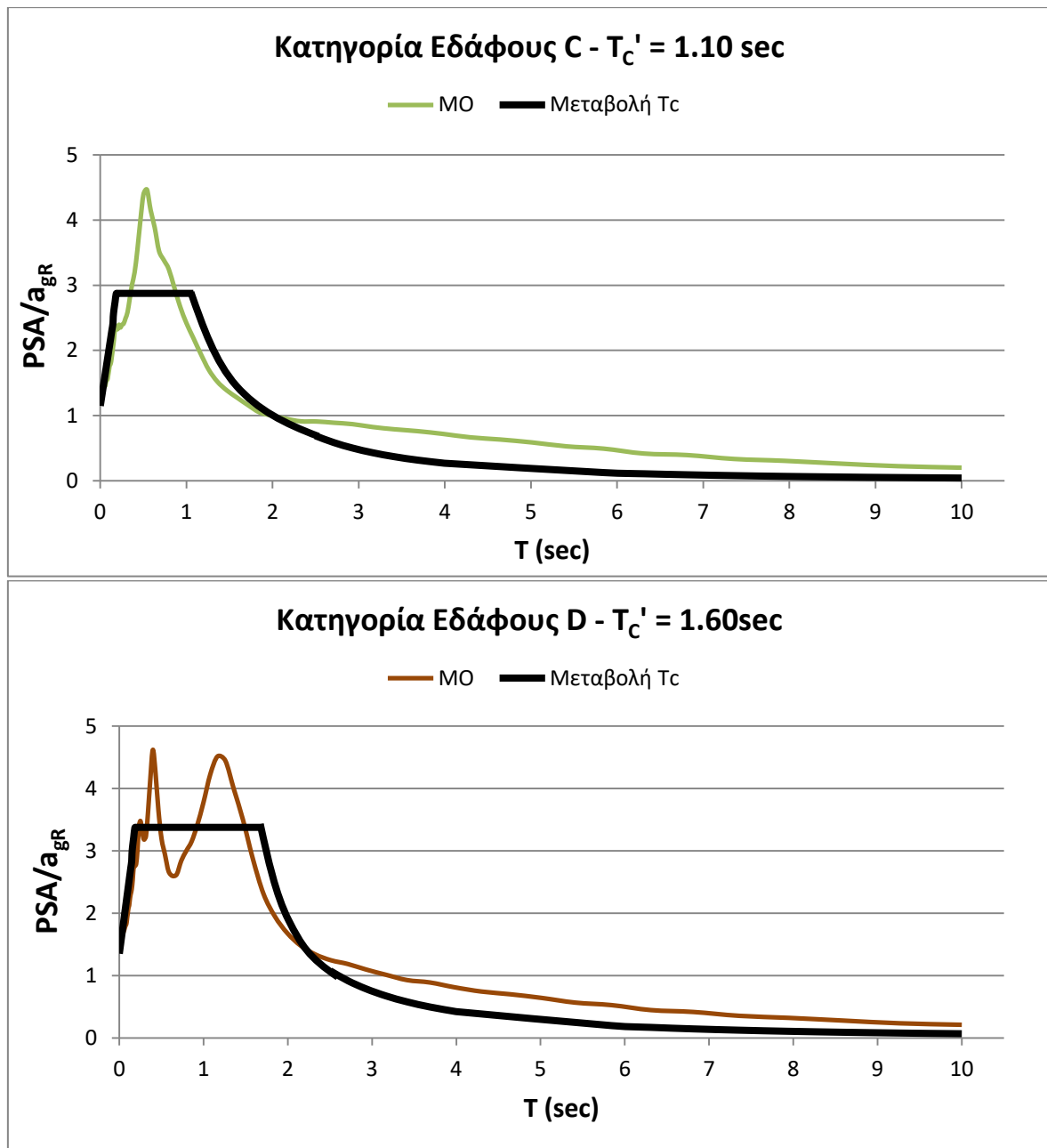


2. **Επαύξηση της χαρακτηριστικής περιόδου  $T_c$ :** οι προτεινόμενες τιμές επαύξησης της χαρακτηριστική περιόδου  $T_c$  επιλέχθηκαν με κριτήριο την επάρκεια του κανονισμού στις θέσεις του φθίνοντος κλάδου στην περιοχή των σταθερών φασματικών ταχυτήτων (ΣΦΤ). Σημειώνεται ότι, στην παρούσα ανάλυση, θεωρείται ότι μια τέτοια βελτιωτική κίνηση συνεπάγεται αλλαγή της καμπυλότητας του τμήματος ΣΦΤ ώστε να τίθεται υπό ασφάλεια το προσεγγιστικό γράφημα των πραγματικών καταγράφων. Μια άλλη εναλλακτική θα ήταν η εξ ολοκλήρου μετατόπιση του φάσματος προς τα δεξιά με απλή επέκταση του διαστήματος σταθερών φασματικών επιταχύνσεων και κατά συνέπεια μεταβολή και της χαρακτηριστικής περιόδου  $T_D$ . Μια τέτοια κίνηση αυτόματα θα παρείχε ασφάλεια και σε ανώτερες τιμές ιδιοπεριόδων οι οποίες όμως, όπως προαναφέρθηκε, δεν απασχολούν ιδιαίτερως. Εφαρμόζοντας, λοιπόν, μόνο την επαύξηση στην τιμή της χαρακτηριστικής φασματικής περιόδου  $T_c$  εξακολουθούν να εντοπίζονται ανασφαλείς περιοχές αφού οι αιχμές των φασμάτων των πραγματικών καταγραφών παραμένουν κατά πολύ εκτός του φάσματος του κανονισμού.

	$T_c$ κατά ΕΚ8	Προτεινόμενες επαυξημένες $T_c$
<b>B</b>	0.55	0.80
<b>C</b>	0.6	1.10
<b>D</b>	0.8	1.60

Π. 6.4: Τιμές της χαρακτηριστικής περιόδου  $T_c$  κατά ΕΚ8 και προτάσεις επαύξησης





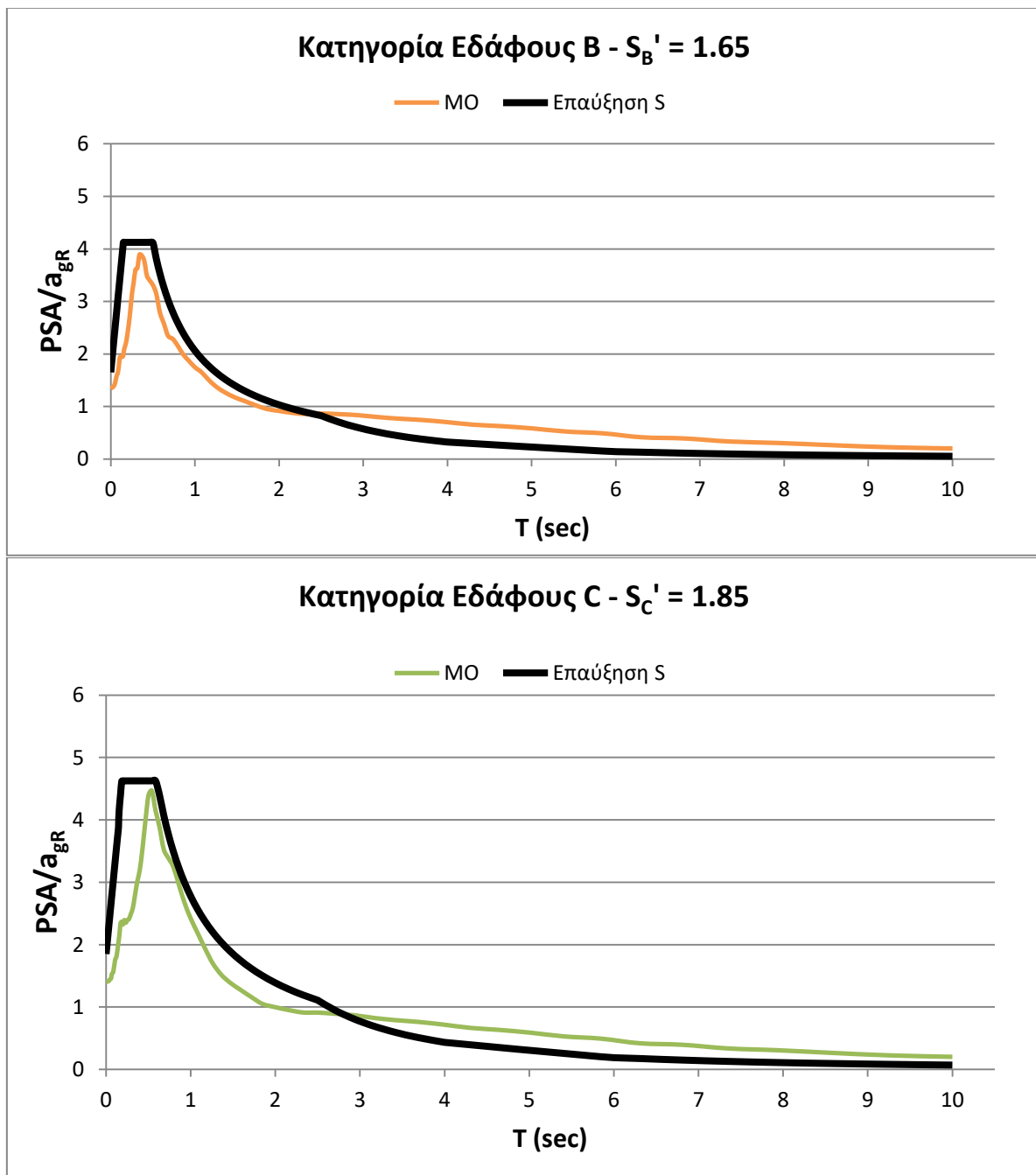
**Εικ. 6.22:** Αδιαστατοποιημένα φάσματα ως προς τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας εφαρμόζοντας τη βελτιωτική μέθοδο επαύξησης της χαρακτηριστικής περιόδου  $T_c$  του ΕΚ8

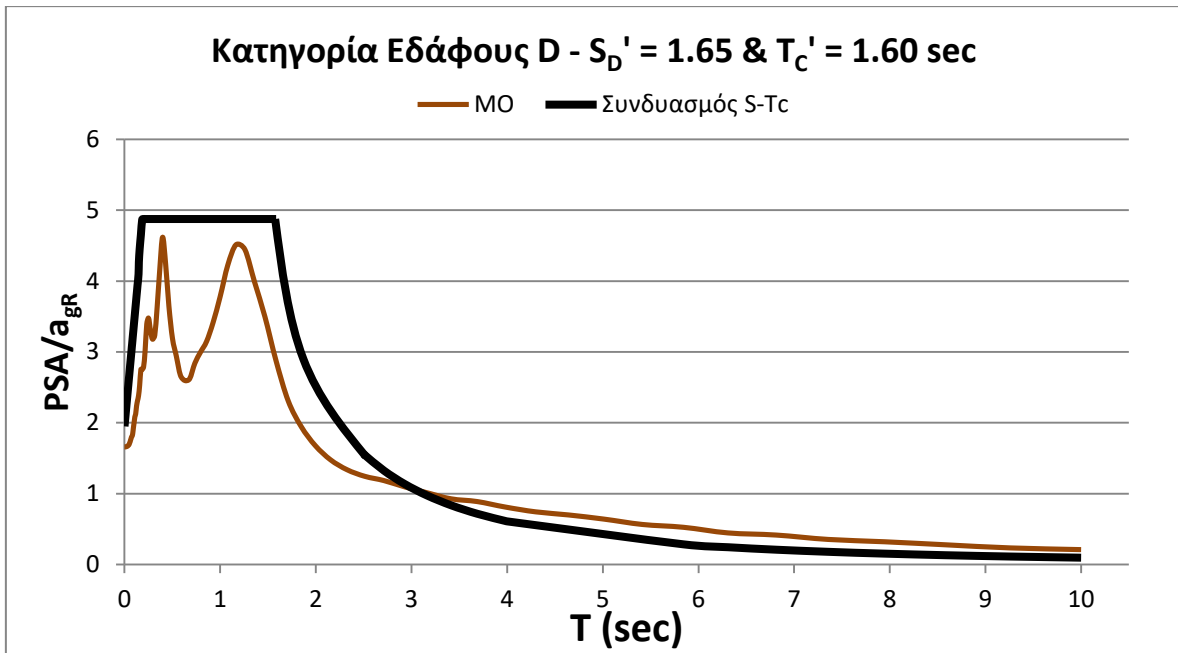
Λαμβάνοντας υπόψη τις ανωτέρω βελτιωτικές μεθόδους για την αύξηση επάρκειας των ελαστικών φασμάτων του Ευρωκώδικα 8, φαίνεται ότι σε περισσότερο σφιχρά εδάφη όπως εκείνα που ανήκουν στις εδαφικές κατηγορίες B και C αρκεί μόνο η επαύξηση του συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης  $S$ . Αντιθέτως, σε εδάφη περισσότερο μαλακά είναι απαραίτητος ο συνδυασμός επαυξήσεων του συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης  $S$  και της τιμής της χαρακτηριστικής περιόδου  $T_c$  για την επίδειξη βέλτιστων αποτελεσμάτων που καλύπτουν όλο το εύρος των φασματικών απαιτήσεων των καταγραφών. Ακολούθως παρατίθενται συγκεντρωτικά οι προτάσεις βελτίωσης που προτείνεται να εφαρμόζονται σε κάθε περίπτωση καθώς και τα γραφήματα που επιβεβαιώνουν ότι η εφαρμογή τους

παρέχει της απαιτούμενη ασφάλεια τουλάχιστον ως προς το μέσο όρο των πραγματικών καταγραφών.

	Μεταβολή S	Προτεινόμενη τιμή S	Μεταβολή Tc	Προτεινόμενη τιμή Tc
<b>B</b>	↑	1.65	-	0.5
<b>C</b>	↑	1.85	-	0.6
<b>D</b>	↑	1.95	↑	1.6

Π. 6.5: Συγκεντρωτικές προτάσεις βελτίωσης του φάσματος του ΕΚ8





**Εικ. 6.23:** Αδιαστατοποιημένα φάσματα ως προς τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας εφαρμόζοντας τις τελικές βελτιωτικές προτάσεις για το φάσμα του ΕΚ8

## **Κεφάλαιο 7**

### **Συμπεράσματα**



Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η επιρροή του εδάφους στα χαρακτηριστικά σεισμικών κινήσεων με παλμούς κατευθυντικότητας.

Από τη βάση δεδομένων των νέων μοντέλων απομείωσης της εδαφικής κίνησης (NGA database) χρησιμοποιήθηκαν 86 καταγραφές που είχαν χαρακτηριστεί από τον Baker (2011) ως παλμικές, δηλαδή παρουσιάζουν παλμό κατευθυντικότητας στη χρονοϊστορία ταχύτητας της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας. Με αξιοποίηση της μεθοδολογίας που είχε εισαχθεί από τους Mimoglou et al (2014) χρησιμοποιήθηκε ο υπολογιστικός κώδικας CROSS5NEW-5 για τον προσδιορισμό της περιόδου του παλμού,  $T_p$ , η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του φάσματος συνέλιξης για απόσβεση 5%. Με τον ίδιο αλγόριθμο προσδιορίστηκαν επίσης το πλάτος  $A$  και το πλήθος κύκλων  $\gamma$  του αναγνωριζόμενου από το πρόγραμμα “παλμού” καθώς και ο συντελεστής συσχέτισης  $cc$  του μοντέλου προσομοίωσης με την πραγματική καταγραφή. Η διαδικασία εφαρμόστηκε για τέσσερα διαφορετικά εδαφικά προφίλ που αντιπροσωπεύουν τις εδαφικές κατηγορίες του Ευρωκώδικα 8 A, B, C και D ενώ για το βραχύδες υπόβαθρο τα χαρακτηριστικά ελήφθησαν από τη προπτυχιακή εργασία των Κανάκη-Κουτσονίκα (2016). Με κριτήριο τον συντελεστή συσχέτισης  $cc$ , που αποτελεί δείκτη της παλμικότητας της εδαφικής κίνησης, φάνηκε ότι στην πλειοψηφία των καταγραφών, παρατηρείται ήπια εξασθένιση της παλμικότητας τους. Λιγότερο συχνή είναι η διατήρηση ή η ενίσχυση της παλμικότητας είναι περισσότερο κυρίως για περιόδους  $T_p$  κοντά στη μονάδα. Ο τύπος του εδάφους σχετίζεται με το μέγεθος της ενίσχυσης ή της εξασθένισης κάθε φορά. Έτσι, όσο αμβλύνεται η διαφοροποίηση μεταξύ των χαρακτηριστικών μητρικού βραχύδους πετρώματος και υπερκείμενης εδαφικής στρώσης, τόσο εντονότερες είναι οι αποκλίσεις του μεγέθους  $cc$  στις δύο εξεταζόμενες θέσεις. Ανάλογες μεταβολές αποτυπώνονται και στα μεγέθη της περιόδου, του πλήθους κύκλων και του πλάτους με πρώτο τείνει να μειωθεί στην πλειονότητα των περιπτώσεων ενώ τα δύο άλλα παρουσιάζουν κυρίως αύξηση.

Στο επόμενο στάδιο της μελέτης, εξετάστηκε η επιρροή των χαρακτηριστικών του εδάφους στα φάσματα ελαστικής επιτάχυνσης των παλμικών αυτών καταγραφών. Γενικά, ο παλμός κατευθυντικότητας αποτυπώνεται στο φάσμα της επιτάχυνσης ως μια κωδωνοειδής καμπύλη-ενίσχυση του φάσματος είτε στην περίοδο του παλμού είτε σε κάποια σημείο στην ευρύτερη “γειτονιά” του. Ως προς την επιρροή της κατηγορίας του εδάφους στα φάσματα επιτάχυνσης στην επιφάνεια φαίνεται ότι υπάρχει ενίσχυση όταν ο παλμός εντοπίζεται σε μικρές προς μέσες περιόδους, δηλαδή στις περιοχές σταθερής φασματικής επιτάχυνσης και σταθερής φασματικής ταχύτητας κατά τον ΕΚ8. Η ενίσχυση αυτή είναι μεγαλύτερη και επηρεάζει ευρύτερο πεδίο περιόδων όσο πιο μαλακή είναι η εδαφική ζώνη μεταξύ επιφάνειας και βραχύδους βάσης. Συνεπώς, εντοπίζεται διαφοροποίηση ολοένα και μεγαλύτερη καθώς εξετάζονται οι εδαφικές κατηγορίες του ΕΚ8 με πορεία από την A προς την D. Για μεγάλες περιόδους παλμού, δηλαδή στο πεδίο των σταθερών φασματικών μετακινήσεων, στο φάσμα της επιφάνειας είναι

περισσότερο συχνή η εξασθένηση της αρχικής εδαφικής επιτάχυνσης και μάλιστα μεγαλύτερη από την αντίστοιχη εξασθένηση στο φάσμα της βάσης. Ο ρόλος του εδάφους σχετίζεται και πάλι με τον βαθμό της αποενίσχυσης, δηλαδή όσο πιο μαλακή η εδαφική στρώση σε σύγκριση με το βραχώδες μητρικό πέτρωμα τόσο πιο έντονη είναι η εν λόγω εξασθένηση.

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία κρίθηκε απαραίτητος ο έλεγχος επάρκειας του Ευρωκώδικα 8 με στόχο την πρόταση βελτιωτικών μεθόδων που θα περιορίσουν τις αδυναμίες του. Αρχικά, η ανεπάρκεια του κανονισμού αναγνωρίστηκε με τον προσδιορισμό του πραγματικού συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης  $S$  των εξεταζόμενων καταγραφών και τη σύγκριση του με τις προτεινόμενες τιμές του ΕΚ8 για τις εδαφικές κατηγορίες B, C και D. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε επιπλέον σύγκριση των αδιαστατοποιημένων ως προς τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας φασμάτων του κανονισμού και των καταγραφών. Δόθηκε έτσι μια καλύτερη εποπτικά εικόνα των περιοχών που βρίσκονται εκτός ασφαλείας. Με γνώμονα την κάλυψη των ανασφαλειών που εκδηλώνονται κυρίως στις θέσεις αιχμών των φασμάτων και στις περιοχές του φθίνοντος κλάδου σταθερών φασματικών ταχυτήτων για την εκάστοτε εδαφική κατηγορία διατυπώθηκαν δύο βελτιωτικές προτάσεις. Οι προτάσεις αυτές αφορούσαν τις τιμές του συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης  $S$  και της χαρακτηριστικής φασματικής περιόδου  $T_C$ . Τέλος, έπειτα από σειρά εποπτικών ελέγχων που βασίζονταν στην εφαρμογή κάθε μεθόδου προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες τιμές για τις παραμέτρους  $S$  και  $T_C$  κάθε κατηγορίας ώστε να τίθενται υπό ασφάλεια ο μέσος όρος των πραγματικών καταγραφών στις επικίνδυνες περιοχές.



## Παράρτημα Α

**Παλμικές εδαφικές κινήσεις κατά Μέθοδο Baker- Βάση  
Δεδομένων NGA**



Παλμικές εδαφικές κινήσεις κατά Μέθοδο Baker- Βάση Δεδομένων NGA

#	Σεισμικό Γεγονός	Έτος	Σταθμός καταγραφής	Τp	PVG	Mw	Κοντινότερη απόσταση	Επικεντρική απόσταση
1	San Fernando	1971	Pacoima Dam (upper left abut)	1.6	116.5	6.6	1.8	11.9
2	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #6	1.2	51.5	5.7	3.1	4.4
3	Imperial Valley- 06	1979	Aeropuerto Mexicali	2.4	44.3	6.5	0.3	2.5
4	Imperial Valley- 06	1979	Agrarias	2.3	54.4	6.5	0.7	2.6
5	Imperial Valley- 06	1979	Brawley Airport	4	36.1	6.5	10.4	43.2
6	Imperial Valley- 06	1979	EC Country Center FF	4.5	54.5	6.5	7.3	29.1
7	Imperial Valley- 06	1979	EC Meloland Overpass FF	3.3	115	6.5	0.1	19.4
8	Imperial Valley- 06	1979	El Centro Array #10	4.5	46.9	6.5	6.2	26.3
9	Imperial Valley- 06	1979	El Centro Array #11	7.4	41.1	6.5	12.5	29.4
10	Imperial Valley- 06	1979	El Centro Array #3	5.2	41.1	6.5	12.9	28.7
11	Imperial Valley- 06	1979	El Centro Array #4	46	77.9	6.5	7.1	27.1
12	Imperial Valley- 06	1979	El Centro Array #5	4	91.5	6.5	4	27.8
13	Imperial Valley- 06	1979	El Centro Array #6	3.8	111.9	6.5	1.4	27.5
14	Imperial Valley- 06	1979	El Centro Array #7	4.2	108.8	6.5	0.6	27.6
15	Imperial Valley- 06	1979	El Centro Array #8	5.4	48.6	6.5	3.9	28.1
16	Imperial Valley- 06	1979	El Centro Differential Array	5.9	59.6	6.5	5.1	27.2
17	Imperial Valley- 06	1979	Holtville Post Office	4.8	55.1	6.5	7.7	19.8
18	Mammoth Lakes-06	1980	Long Valley Dam (Upr L Abut)	1.1	33.1	5.9		14
19	Irpinia. Italy- 01	1980	Sturno	3.1	41.5	6.9	10.8	30.4
20	Westmorland	1981	Parachute Test Site	3.6	35.8	5.9	16.7	20.5
21	Coalinga-05	1983	Oil City	0.7	41.2	5.8		4.6
22	Coalinga-05	1983	Transmitter Hill	0.9	46.1	5.8		6
23	Coalinga-07	1983	Coalinga - 14th & Elm (Old CHP)	0.4	36.1	5.2		9.6
24	Morgan Hill	1984	Coyote Lake Dam (SW Abut)	1	62.3	6.2	0.5	24.6
25	Morgan Hill	1984	Gilroy Array #6	1.2	35.4	6.2	9.9	36.3
26	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 C00	1.6	31.2	6.3		68.2
27	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 M07	1.6	36.1	6.3		67.2
28	N.Palm Springs	1986	North Palm Springs	1.4	73.6	6.1	4	10.6
29	San Salvador	1986	Geotech Investig Center	0.9	62.3	5.8	6.3	7.9
30	Whittier Narrows-01	1987	Downey - Co Maint Bldg	0.8	30.4	6	20.8	16
31	Whittier Narrows-01	1987	LB - Orange Ave	1	32.9	6	24.5	20.7
32	Superstition Hills-02	1987	Parachute Test Site	2.3	106.8	6.5	1	16
33	Loma Prieta	1989	Alameda Naval Air Stn Hanger	2	32.2	6.9	71	90.8
34	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #2	1.7	45.7	6.9	11.1	29.8
35	Loma Prieta	1989	Oakland - Outer Harbor Wharf	1.8	49.2	6.9	74.3	94

Παράρτημα Α

#	Σεισμικό Γεγονός	Έτος	Σταθμός καταγραφής	Τp	PVG	Mw	Κοντινότερη απόσταση	Επικεντρική απόσταση
36	Loma Prieta	1989	Saratoga - Aloha Ave	4.5	55.6	6.9	8.5	27.2
37	Erzican, Turkey	1992	Erzincan	2.7	95.4	6.7	4.4	9
38	Cape Mendocino	1992	Petrolia	3	82.1	7	8.2	4.5
39	Landers	1992	Barstow	8.9	30.4	7.3	34.9	94.8
40	Landers	1992	Lucerne	5.1	140	7.3	2.2	44
41	Landers	1992	Yerm Fire Station	7.5	53.2	7.3	23.6	86
42	Northbridge-01	1994	Jensen Filter Plant	3.5	67.4	6.7	5.4	13
43	Northbridge-01	1994	Jensen Filter Plant Generator	3.5	67.4	6.7	5.4	13
44	Northbridge-01	1994	LA - Wadsworth VA Hospital North	2.4	32.4	6.7	23.6	19.6
45	Northbridge-01	1994	LA Dam	1.7	77.1	6.7	5.9	11.8
46	Northbridge-01	1994	Newhall - W Pico Canyon Rd.	2.4	87.8	6.7	5.5	21.6
47	Northbridge-01	1994	Pacoima Dam (downstr)	0.5	50.4	6.7	7	20.4
48	Northbridge-01	1994	Pacoima Dam (upper left)	0.9	107	6.7	7	20.4
49	Northbridge-01	1994	Rinaldi Receiving Sta	1.2	167	6.7	6.5	10.9
50	Northbridge-01	1994	Sylmar- Converter Sta	3.5	130	6.7	5.4	13.1
51	Northbridge-01	1994	Sylmar- Converter Sta East	3.5	117	6.7	5.2	13.6
52	Northbridge-01	1994	Sylmar - Olive View Med FF	3.1	123	6.7	5.3	16.8
53	Kobe, Japan	1995	Takarazuka	1.4	72.6	6.9	0.3	38.6
54	Kobe, Japan	1995	Takatori	1.6	170	6.9	1.5	13.1
55	Kocaeli, Turkey	1999	Gebze	5.9	52	7.5	10.9	47
56	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY006	2.6	64.7		9.8	40.5
57	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY035	1.4	42		12.7	43.9
58	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY101	4.8	85.4		10	32
59	Chi-Chi, Taiwan	1999	TAP003	3.4	33		102.4	151.7
60	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU029	6.4	62.3	7.6	28.1	79.2
61	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU031	6.2	59.9	7.6	30.2	80.1
62	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU034	8.6	42.8	7.6	35.7	87.9
63	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU036	5.4	62.4	7.6	19.8	67.8
64	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU038	7	50.9	7.6	25.4	73.1
65	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU040	6.3	53	7.6	22.1	69
66	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU042	9.1	47.3	7.6	26.3	78.4
67	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU046	8.6	44	7.6	16.7	68.9
68	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU049	12	44.8	7.6	3.8	38.9
69	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU053	13	41.9	7.6	6	41.2
70	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU054	11	60.9	7.6	5.3	37.6
71	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU056	13	43.5	7.6	10.5	39.7
72	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU060	12	33.7	7.6	5.8	45.4

Παλμικές εδαφικές κινήσεις κατά Μέθοδο Baker- Βάση Δεδομένων NGA

#	Σεισμικό Γεγονός	Έτος	Σταθμός καταγραφής	Tr	PVG	Mw	Κοντινότερη απόσταση	Επικεντρική απόσταση
73	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU065	5.7	128	7.6	0.6	26.7
74	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU068	12.2	191	7.6	0.3	47.9
75	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU075	5.1	88.4	7.6	0.9	20.7
76	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU076	4	63.7	7.6	2.8	16
77	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU082	9.2	56.1	7.6	5.2	36.2
78	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU087	9	53.7	7.6	7	55.6
79	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU098	7.5	32.7	7.6	47.7	99.7
80	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU101	1	68.4	7.6	2.1	45.1
81	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU102	9.7	107	7.6	1.5	45.6
82	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU103	8.3	62.2	7.6	6.1	52.4
83	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU104	12	31.4	7.6	12.9	49.3
84	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU128	9	78.7	7.6	13.2	63.3
85	Chi-Chi, Taiwan	1999	TXU136	10.3	51.8	7.6	8.3	48.8
86	Northwest China-03	1997	Jianshi	1.3	37	6.1		19.1
87	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY024	3.2	33.1	6.2	19.7	25.5
88	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY080	1.4	69.9	6.2	22.4	29.5
89	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	TCU076	0.9	59.4	6.2	14.7	20.8
90	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY101	2.8	36.3	6.3	36	50
91	Yountville	2000	Napa Fire Station #3	0.7	43	5		9.9



## Παράρτημα Β

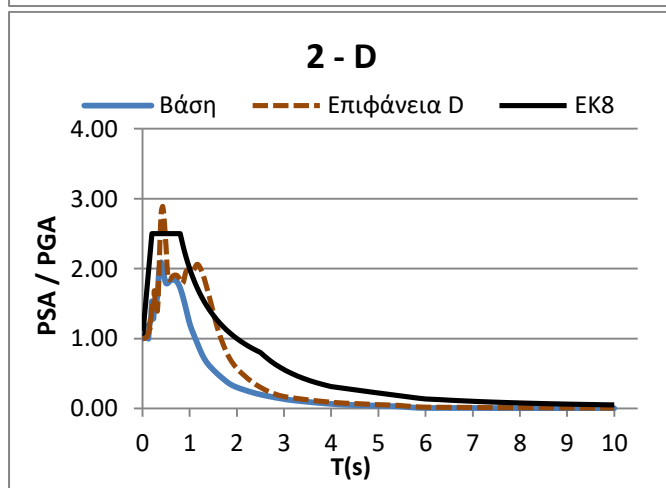
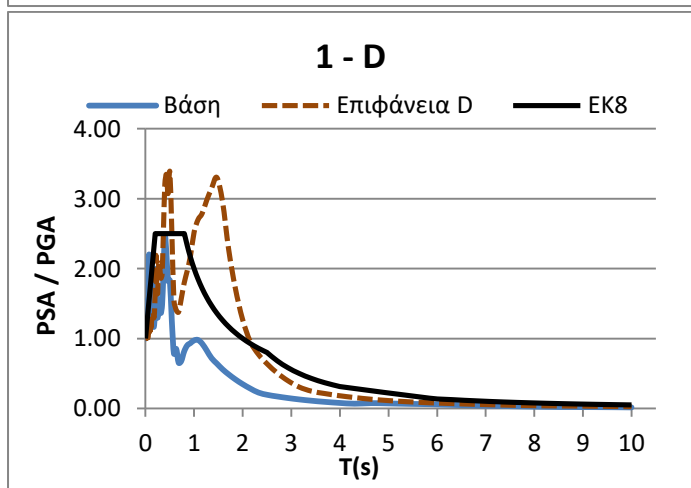
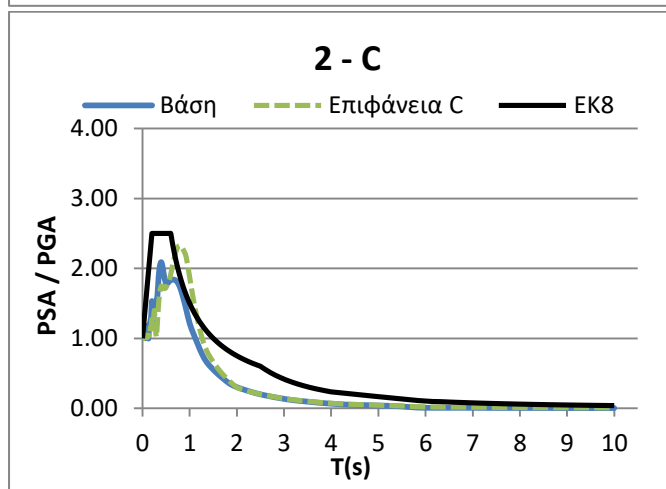
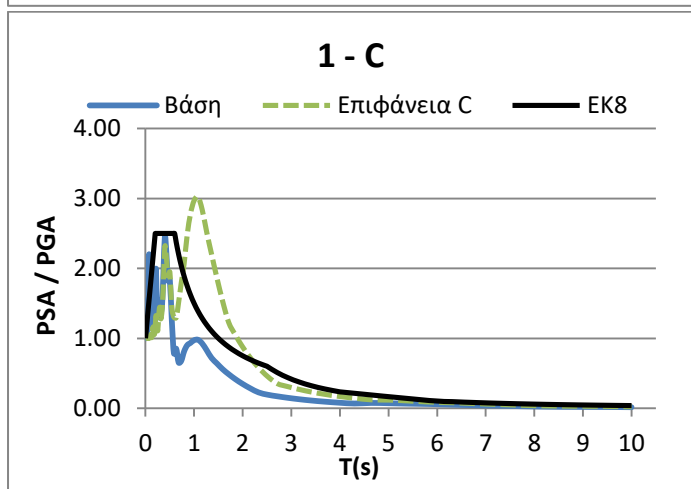
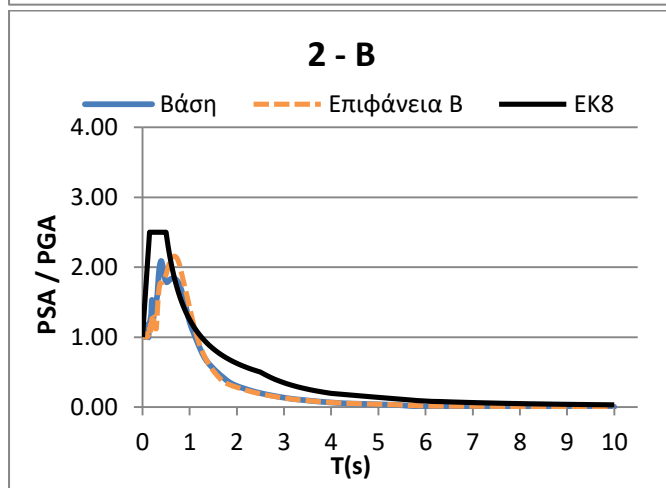
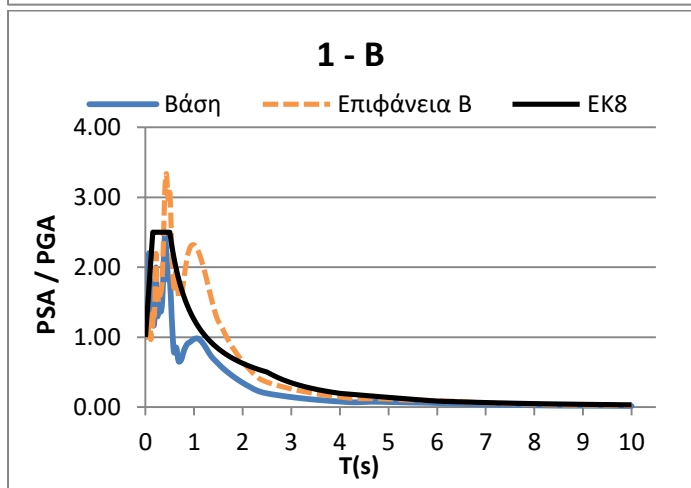
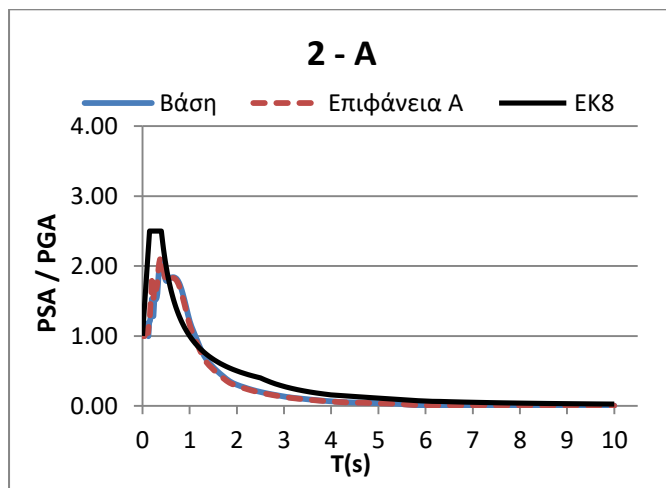
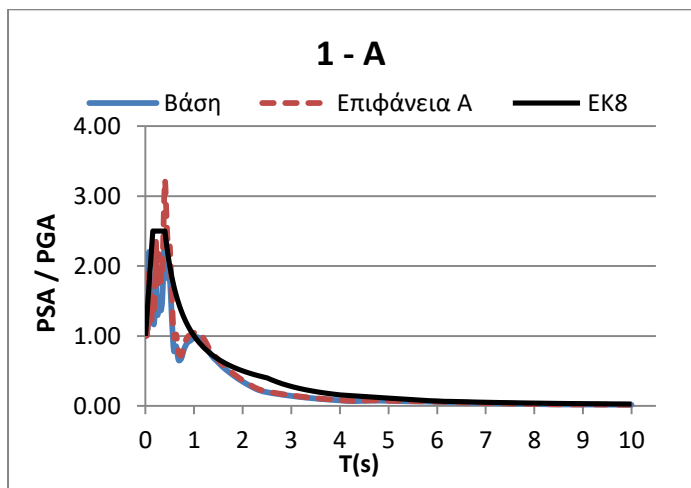
**Αδιαστατοποιημένα ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων**

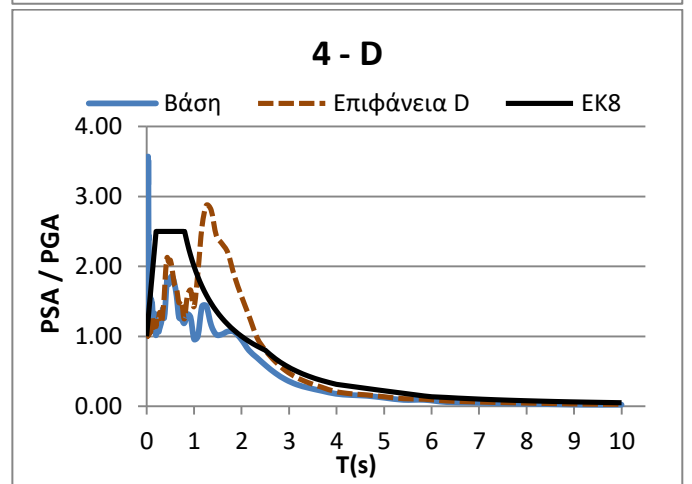
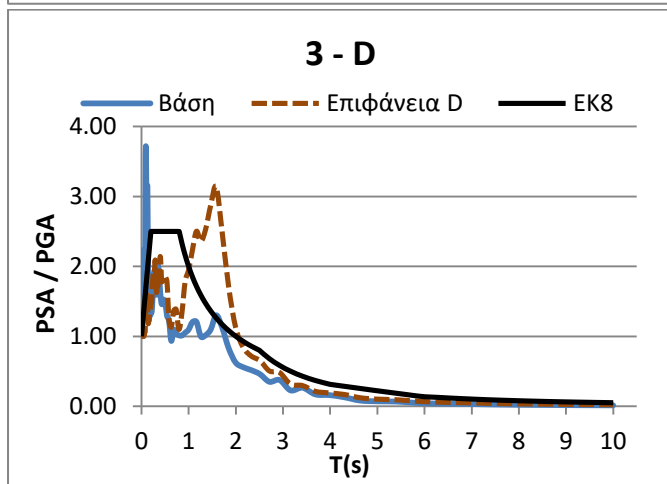
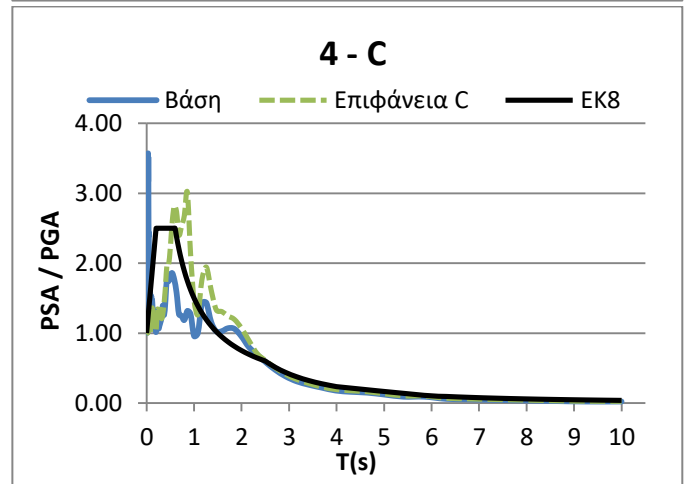
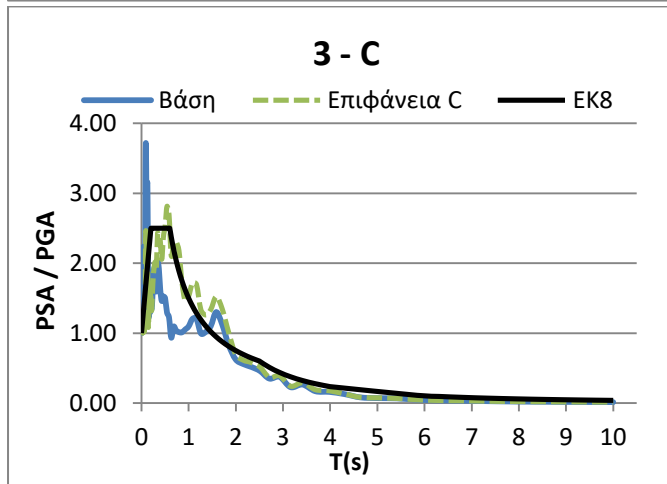
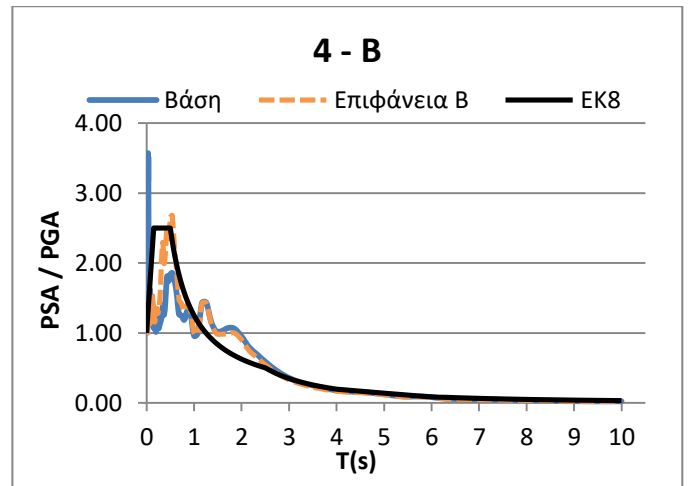
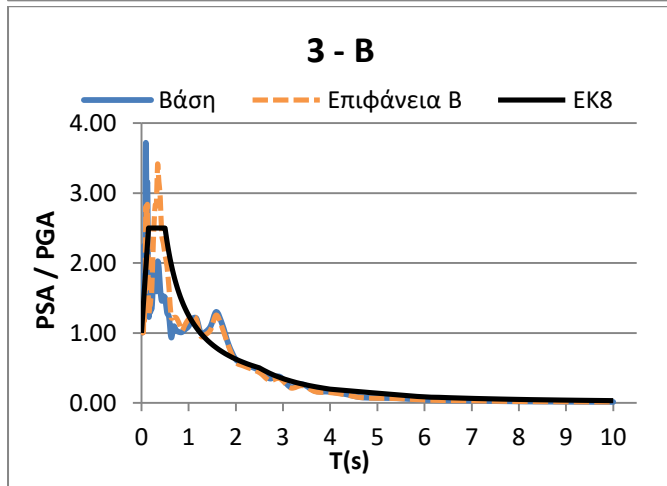
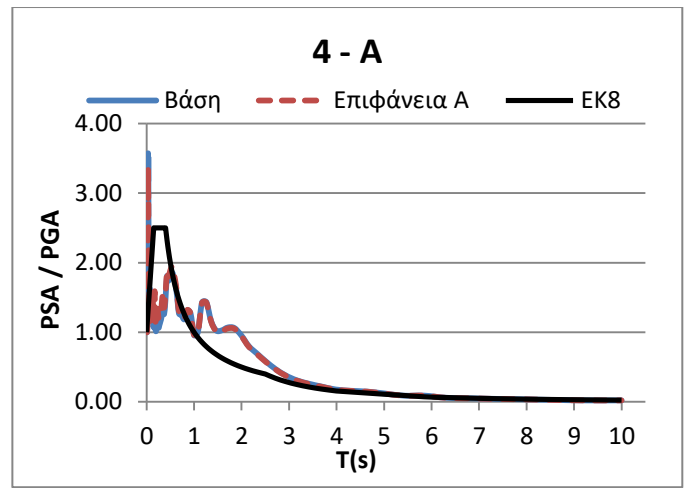
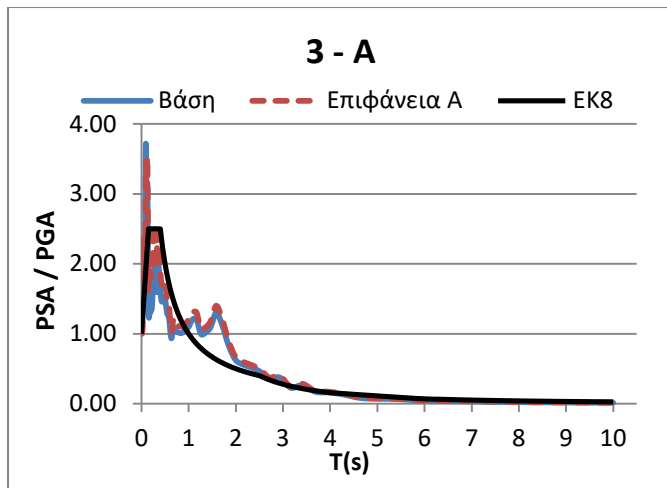


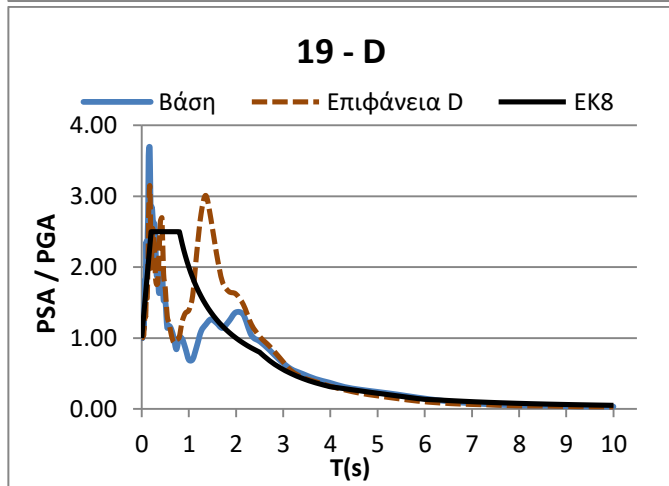
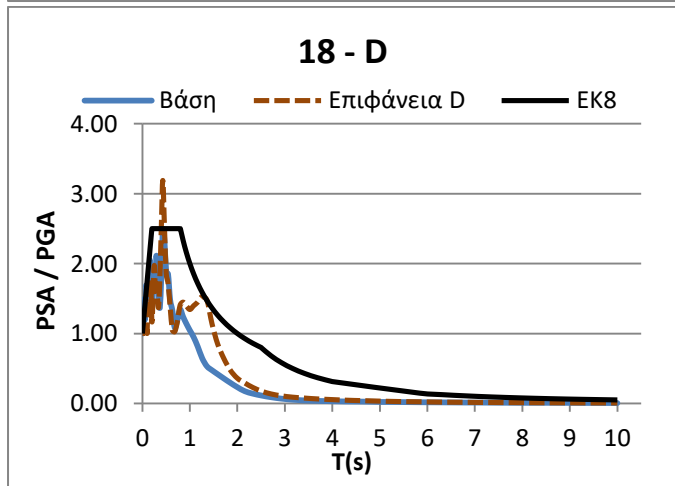
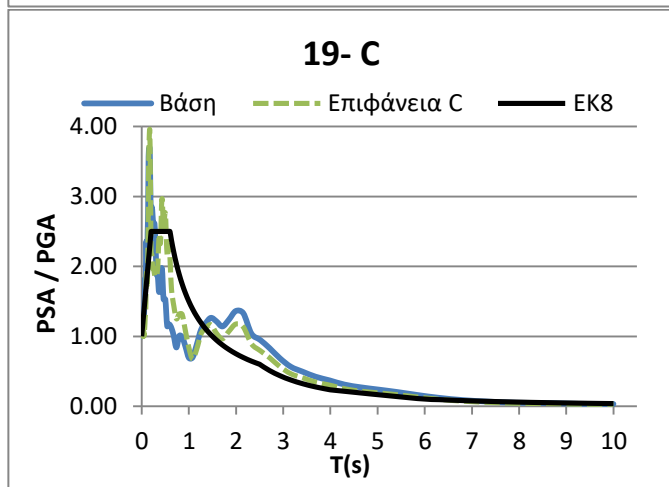
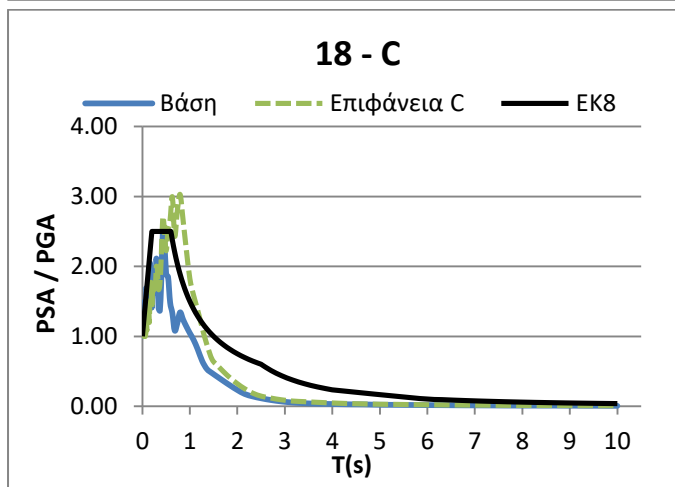
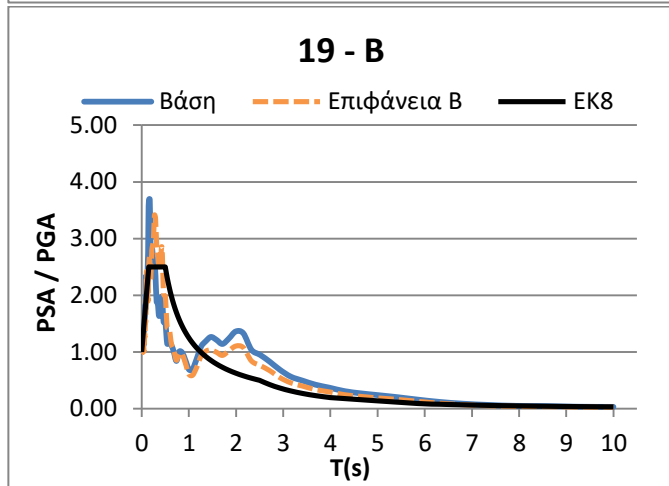
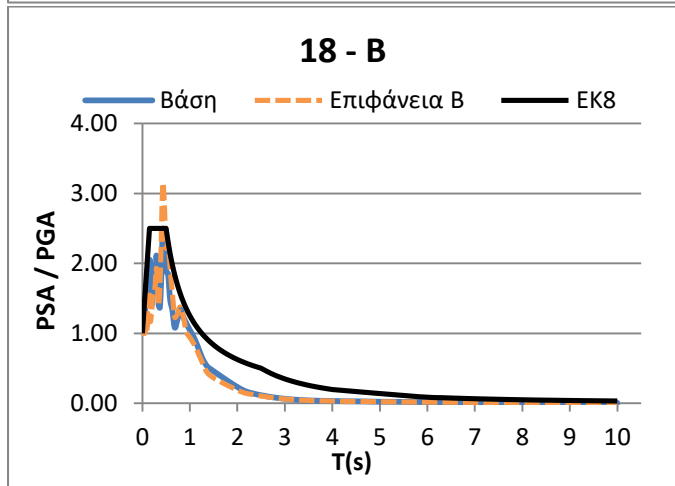
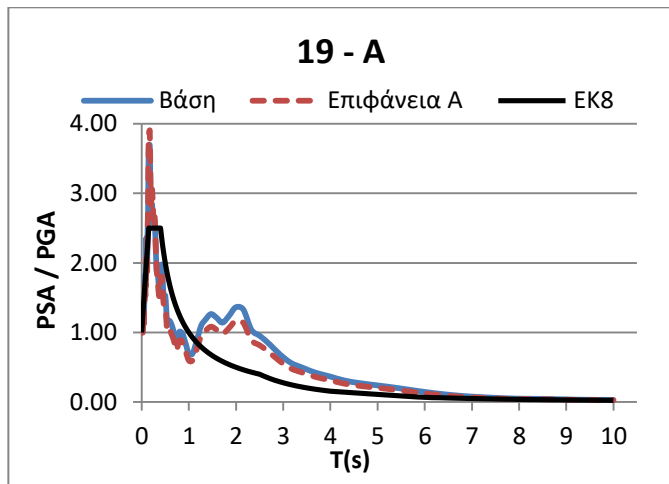
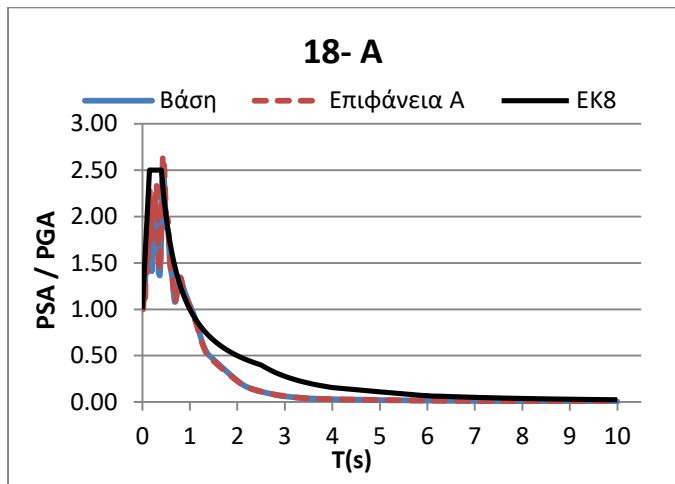


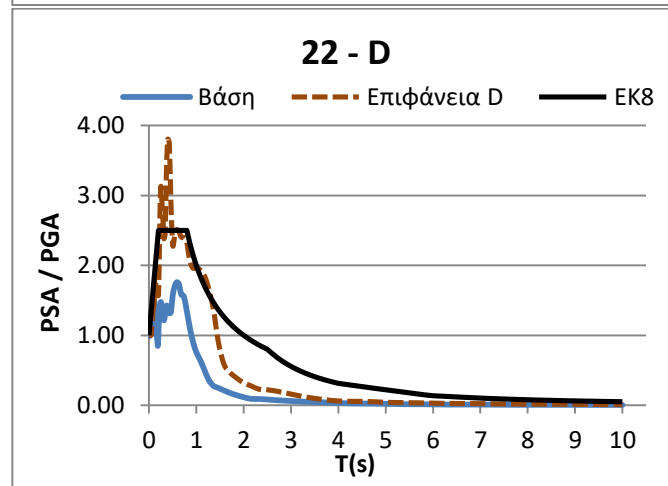
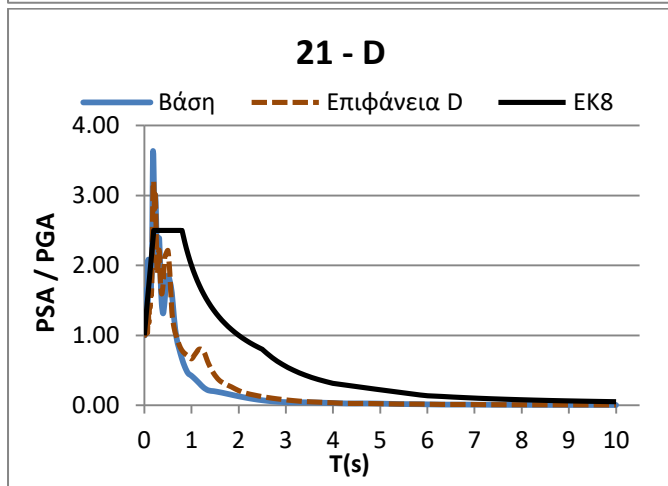
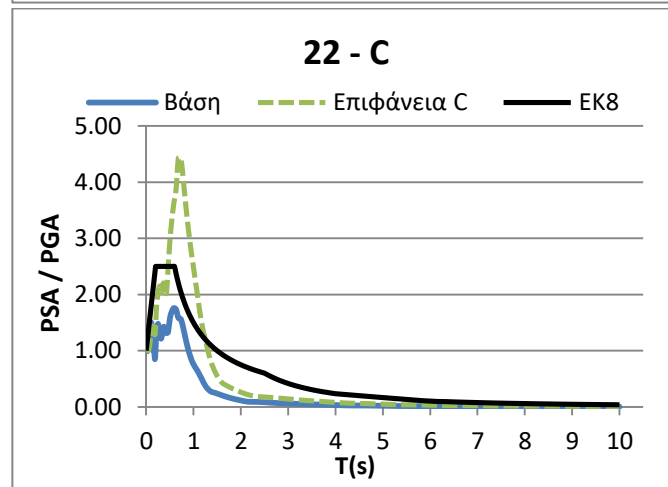
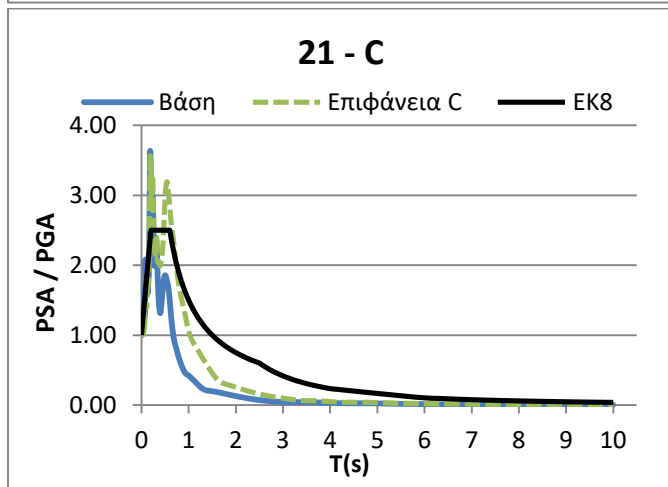
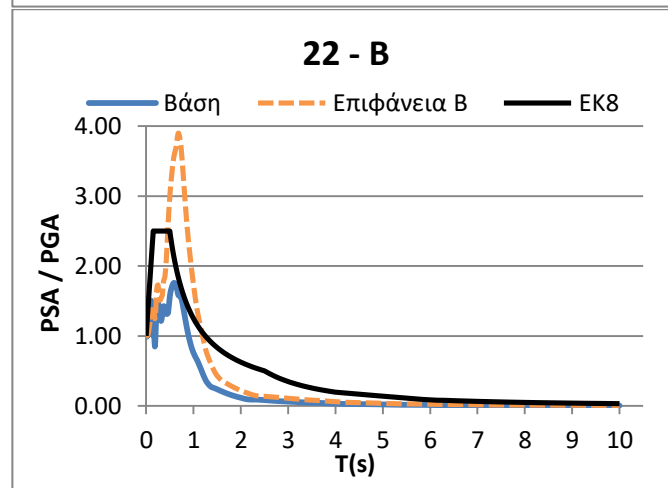
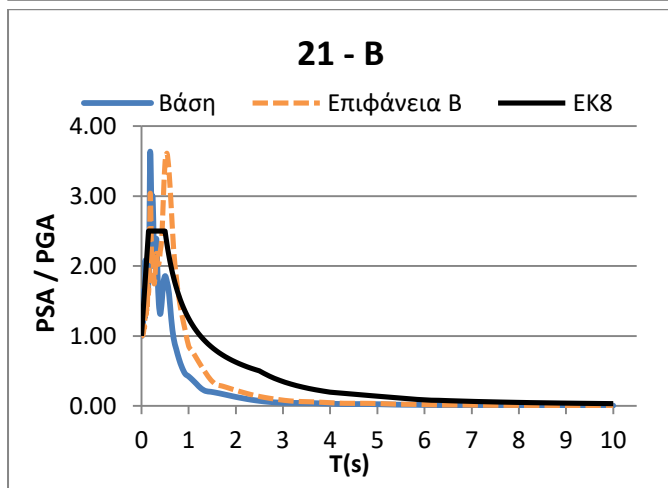
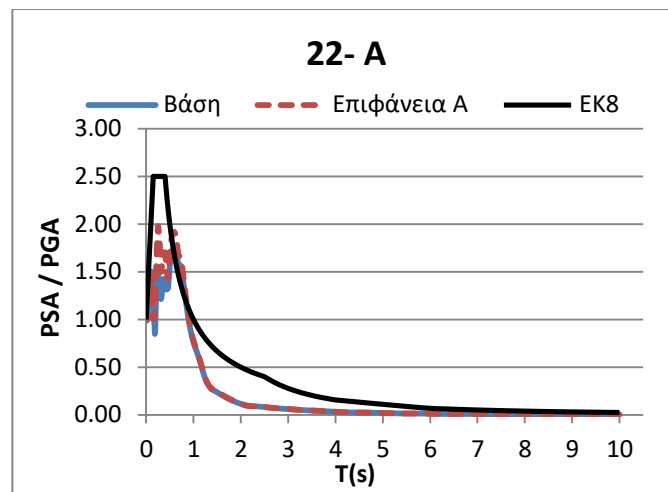
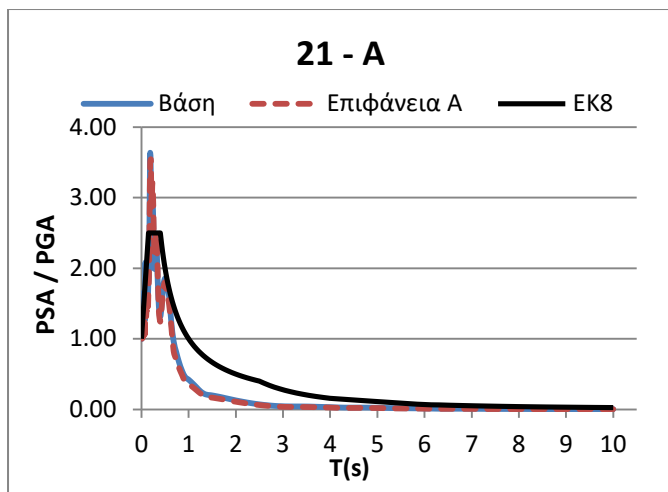
Παλμικές Κινήσεις με $T_p < 3$ sec			
#	Σεισμικό Γεγονός	Έτος	Περίοδος $T_p$ ( sec)
1	San Fernando	1971	1.40
2	Coyote Lake	1979	0.92
3	Imperial Valley -06	1979	1.63
4	Imperial Valley -06	1979	1.90
18	Mammoth Lakes-06	1980	1.13
19	Irpinia, Italy-01	1980	2.63
21	Coalinga-05	1983	0.55
22	Coalinga-05	1983	0.74
23	Coalinga-05	1983	0.38
24	Morgan Hill	1984	0.76
25	Morgan Hill	1984	1.16
26	Taiwan SMART1(40)	1986	1.49
27	Taiwan SMART1(40)	1986	1.39
28	N. Palm Springs	1986	1.42
29	San Salvador	1986	0.69
30	Whitter Narrows-01	1987	0.81
31	Whitter Narrows-01	1987	0.77
32	Superstiion Hills-02	1987	2.40
33	Loma Prieta	1989	2.30
35	Loma Prieta	1989	1.51
37	Erzican, Turkey	1992	2.42
38	Cape Mendocino	1992	2.68
42	Northridge-01	1994	2.93
43	Northridge-01	1994	2.93
44	Northridge-01	1994	2.34
45	Northridge-01	1994	2.16
46	Northridge-01	1994	2.38
48	Northridge-01	1994	0.91
49	Northridge-01	1994	1.10
50	Northridge-01	1994	2.95
52	Northridge-01	1994	2.62
53	Kobe, Japan	1995	1.23
54	Kobe, Japan	1995	2.08
86	Northwest China-03	1997	0.98
87	Chi-chi, Taiwan-03	1999	0.70
88	Chi-chi, Taiwan-03	1999	2.95
90	Chi-chi, Taiwan-06	1999	0.87
91	Yountville	2000	2.41

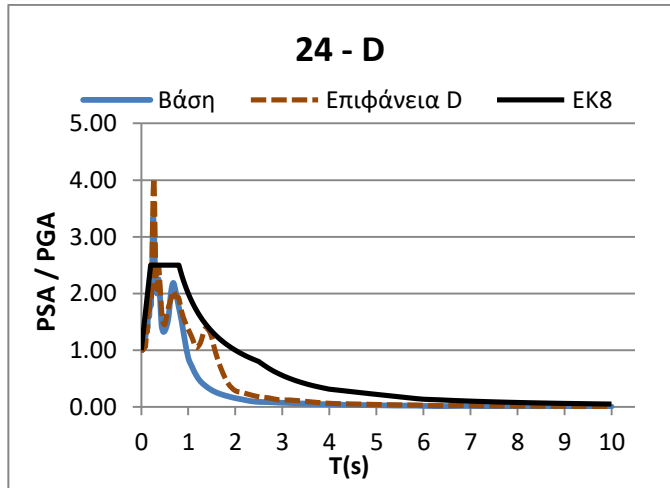
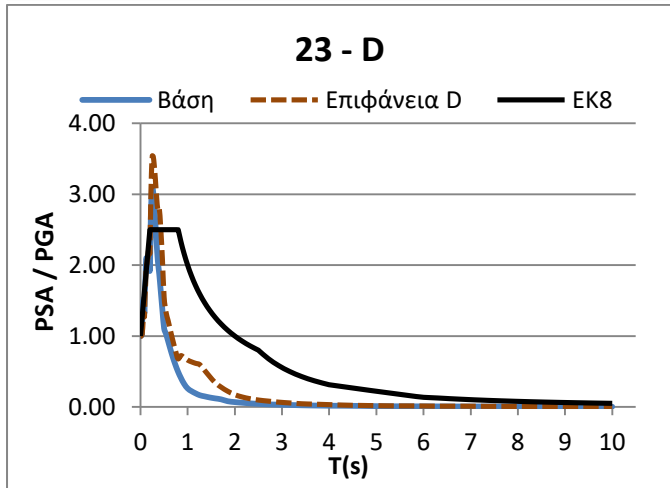
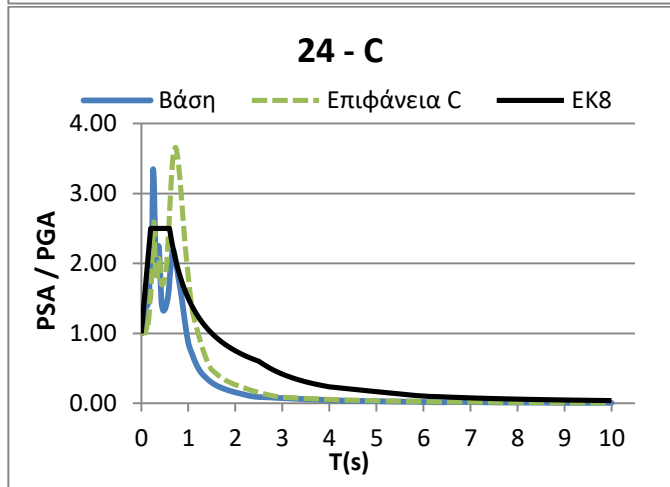
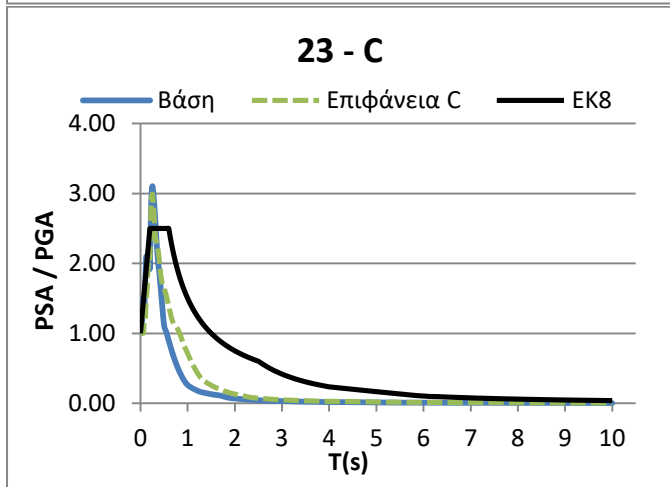
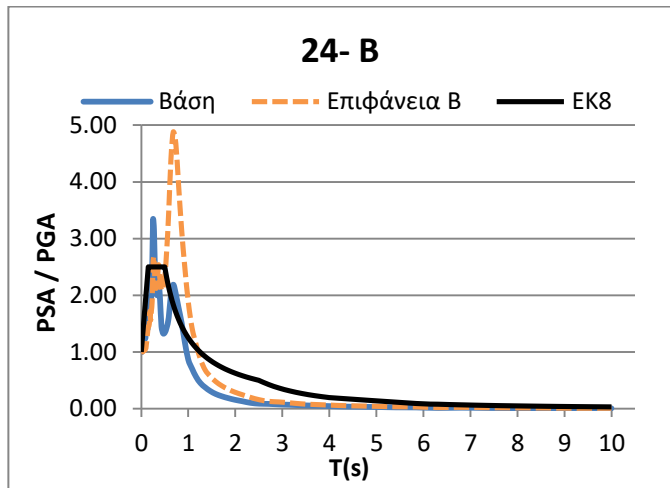
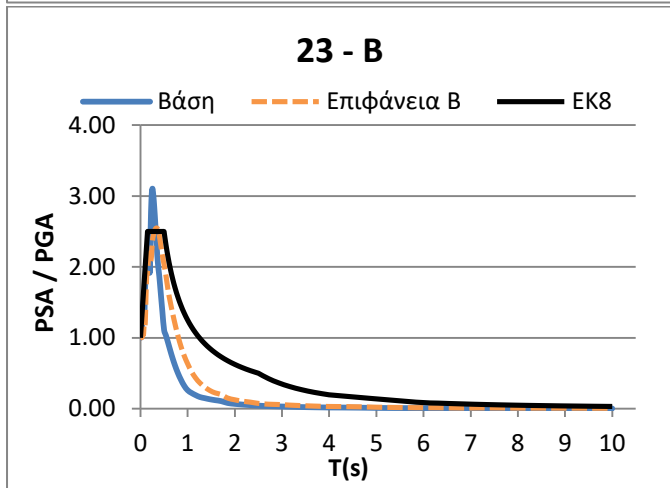
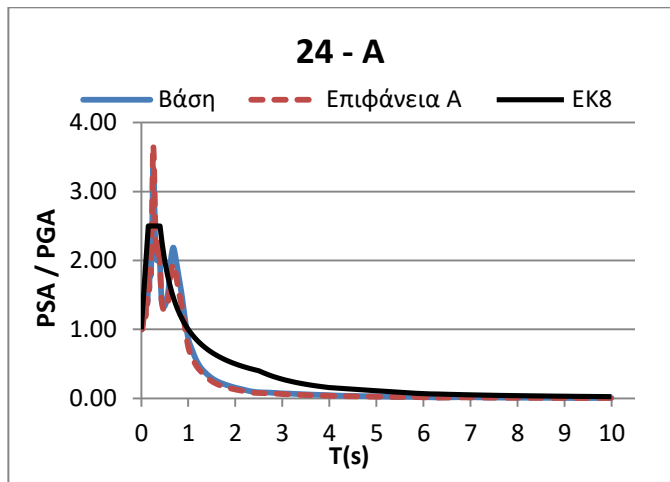
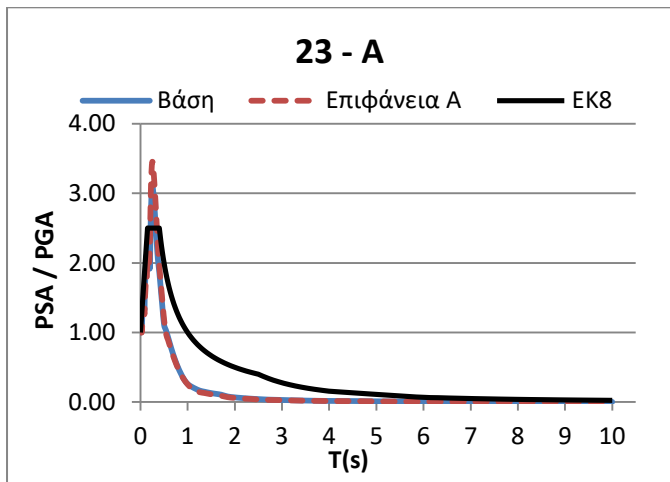


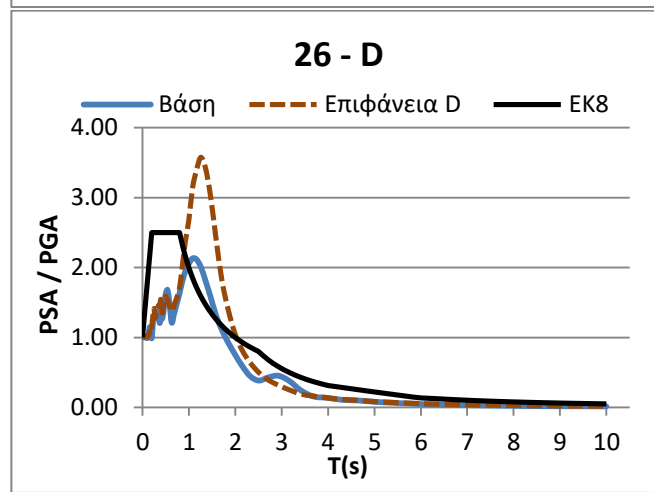
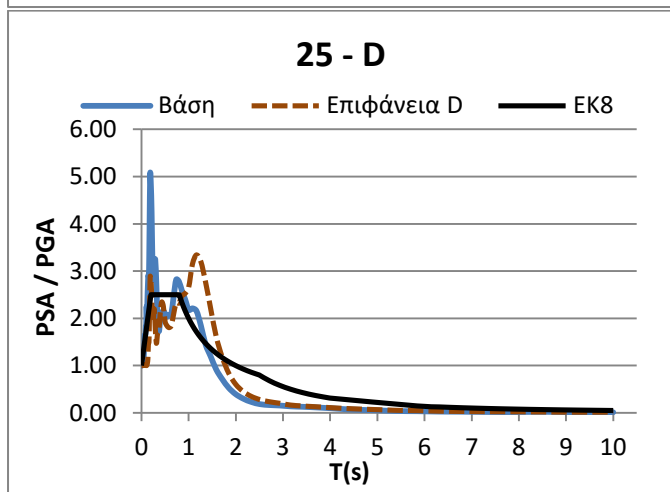
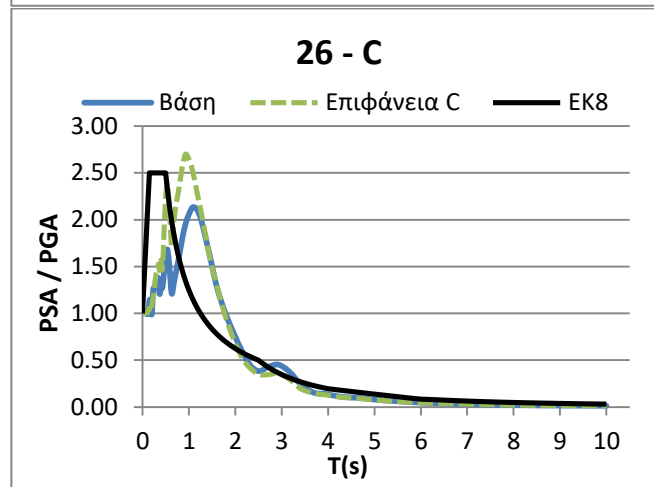
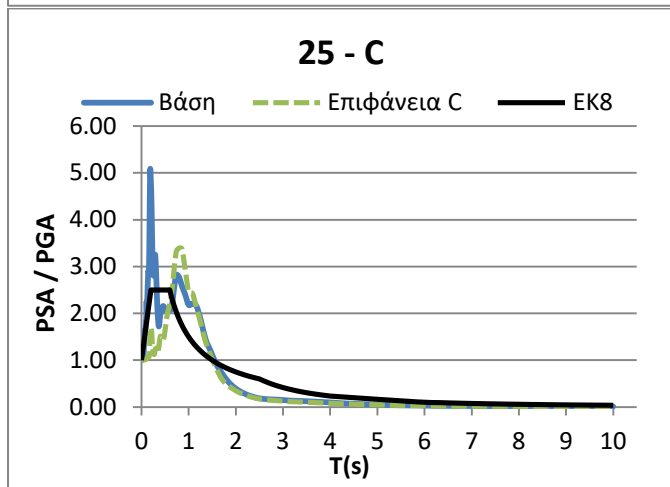
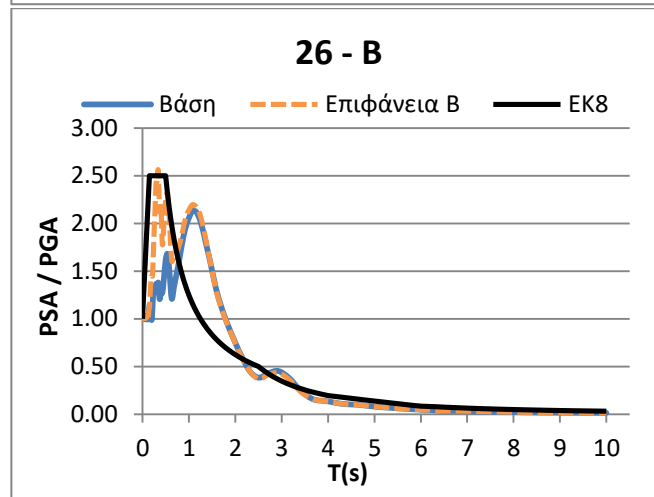
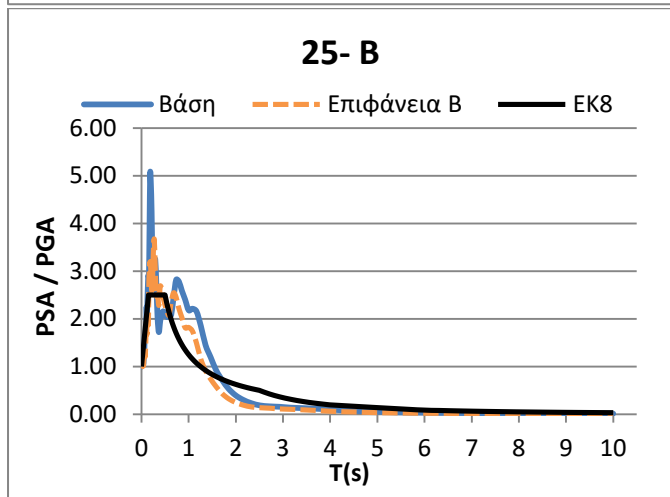
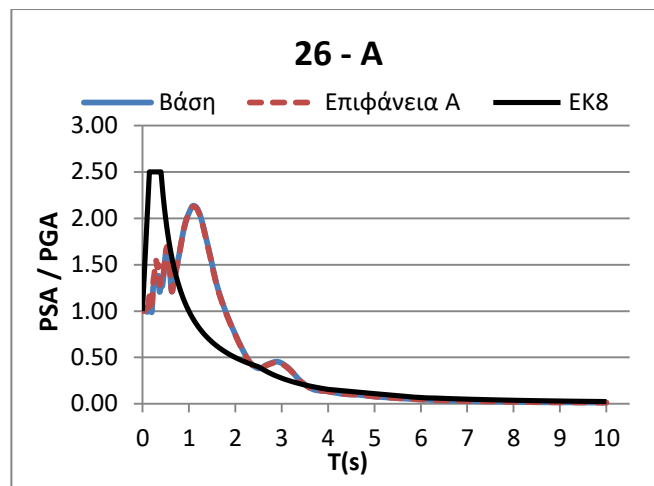
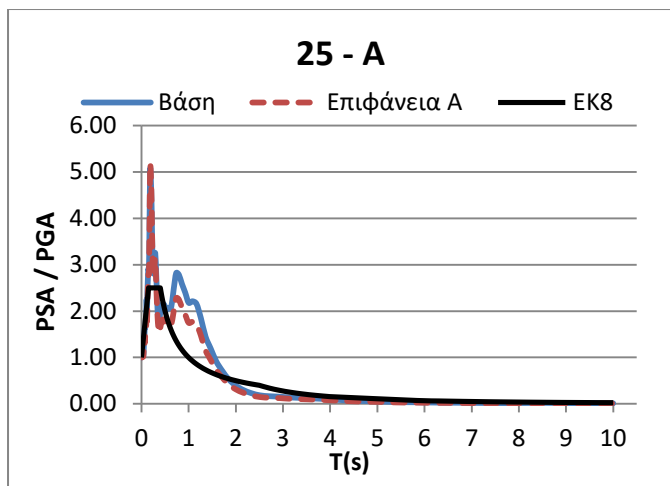




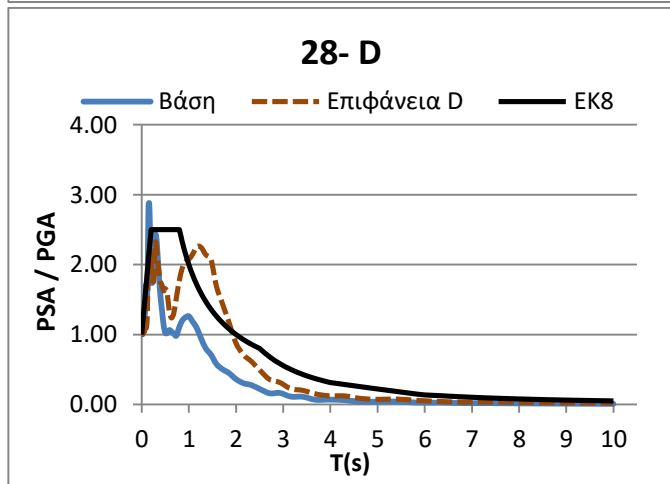
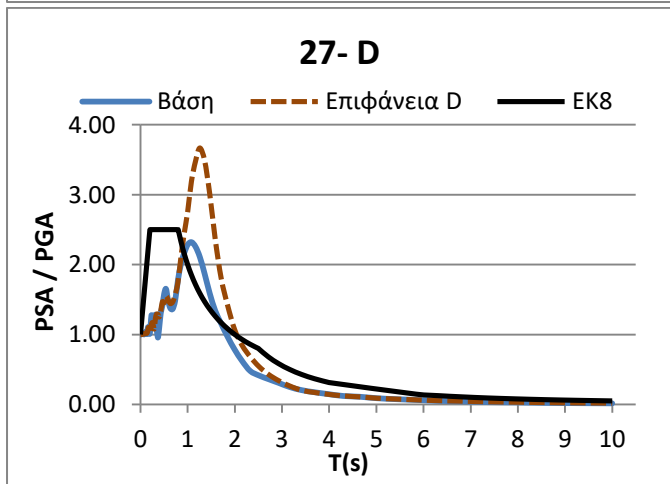
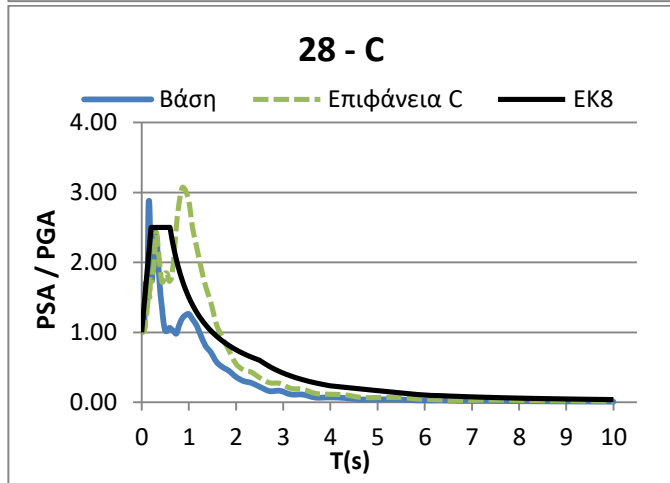
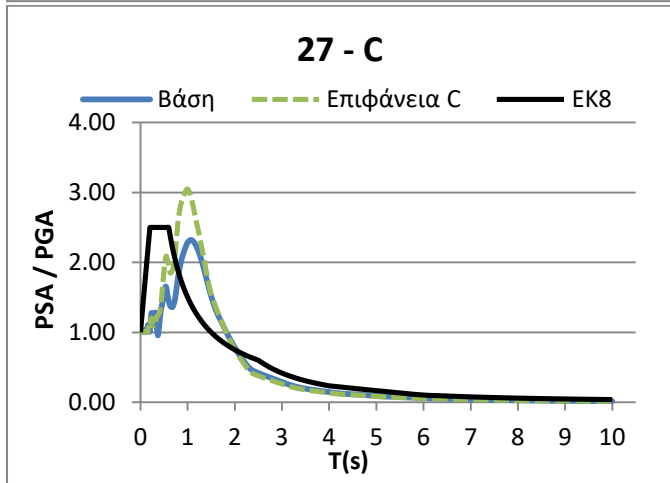
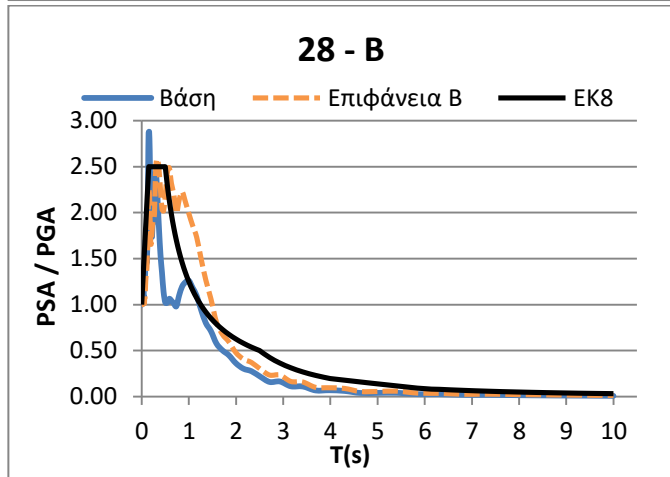
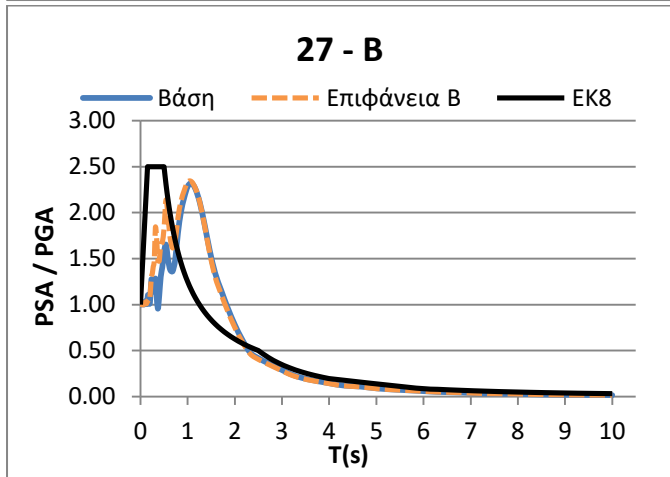
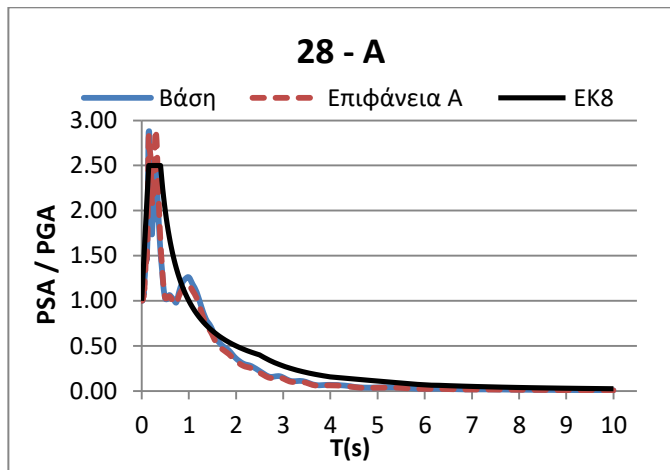
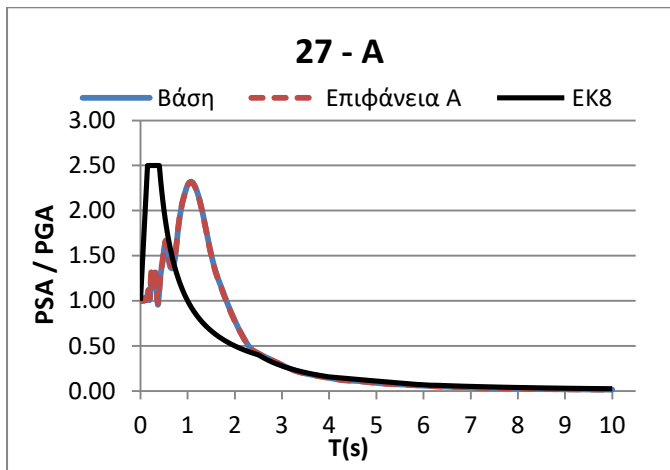


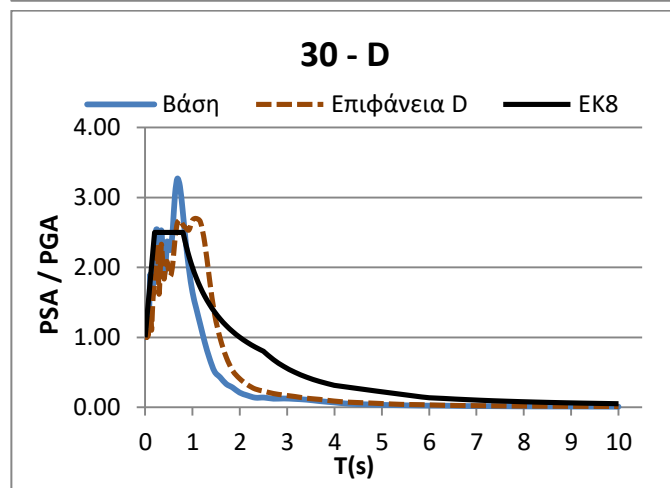
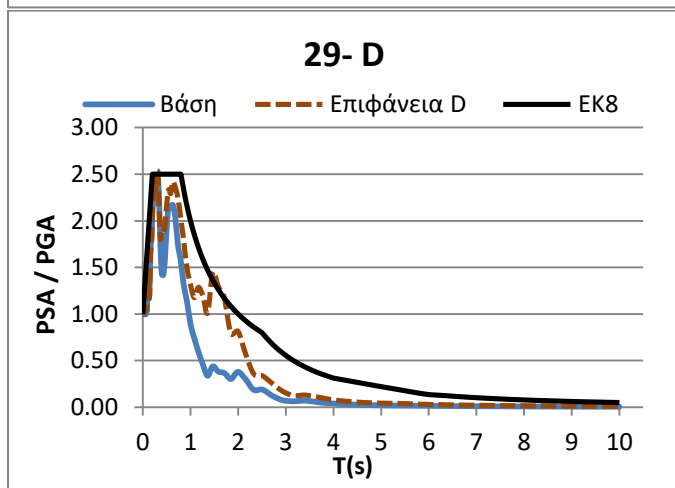
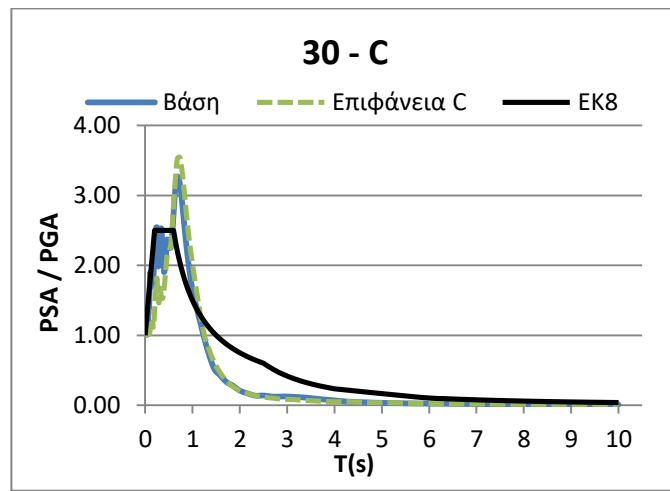
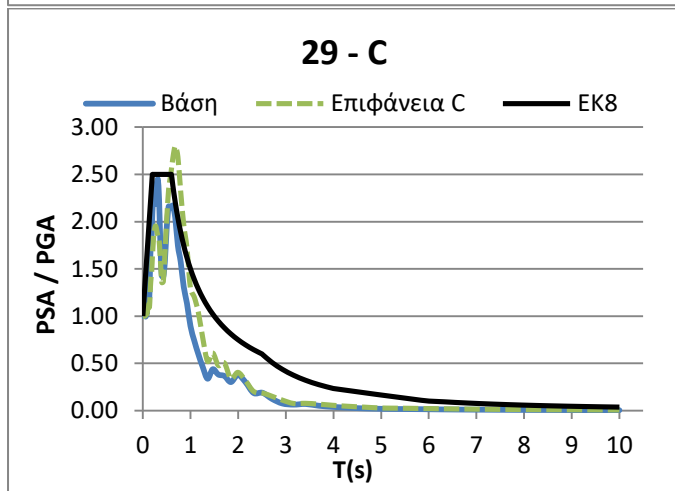
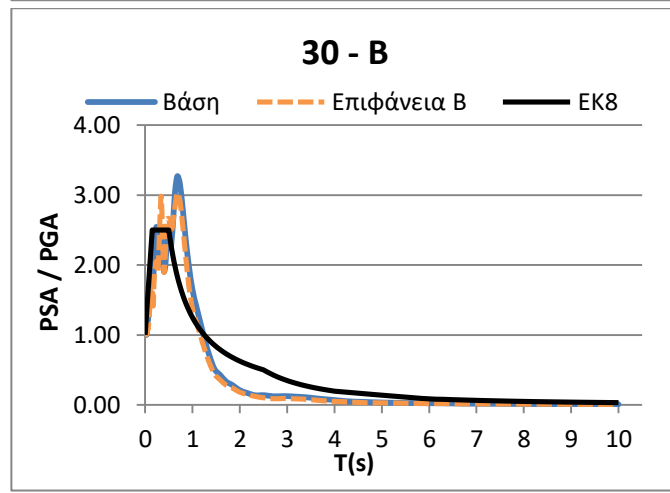
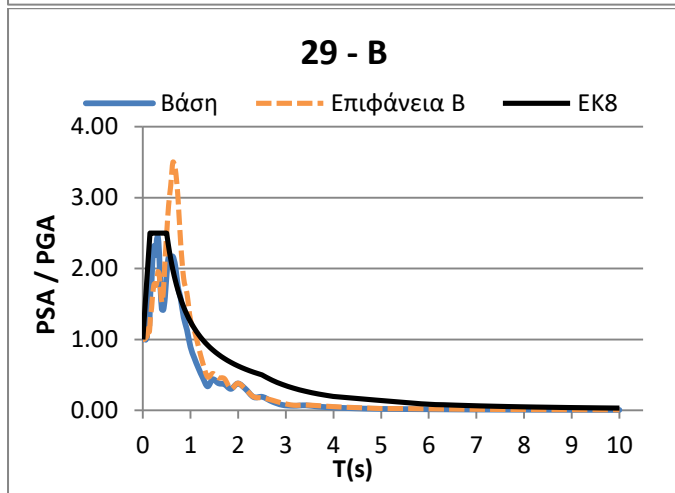
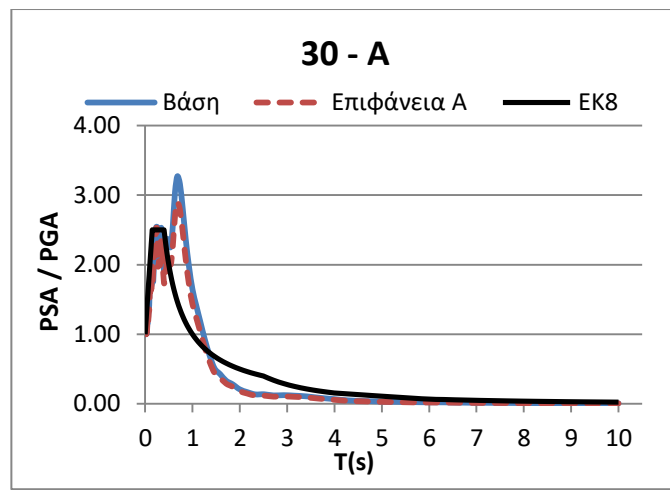
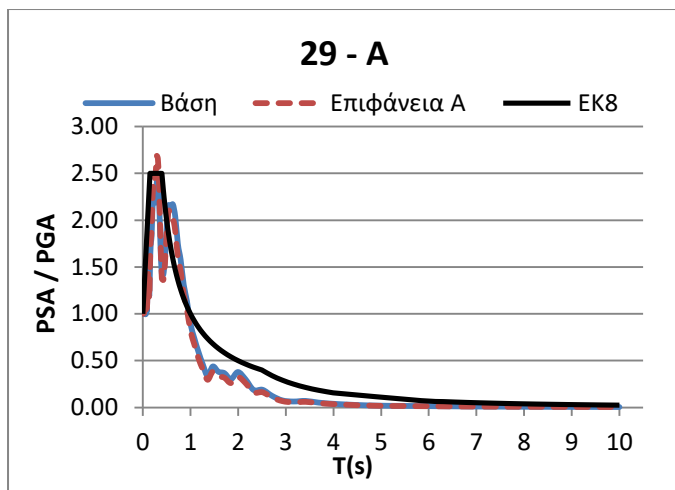


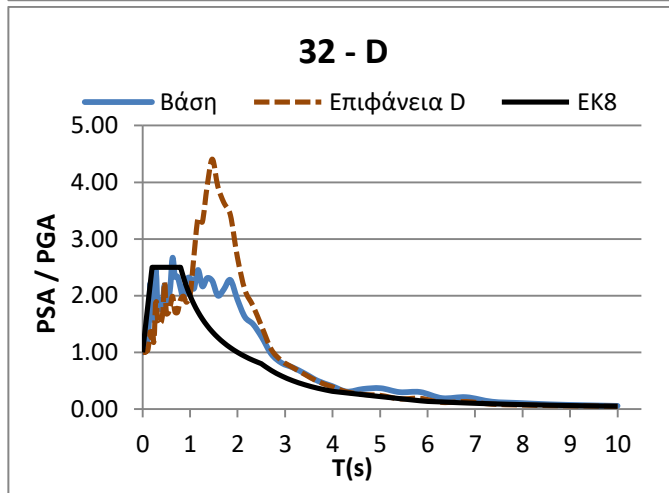
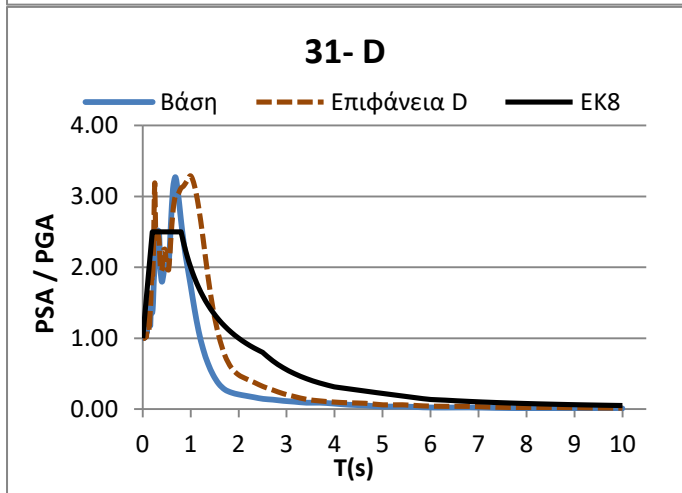
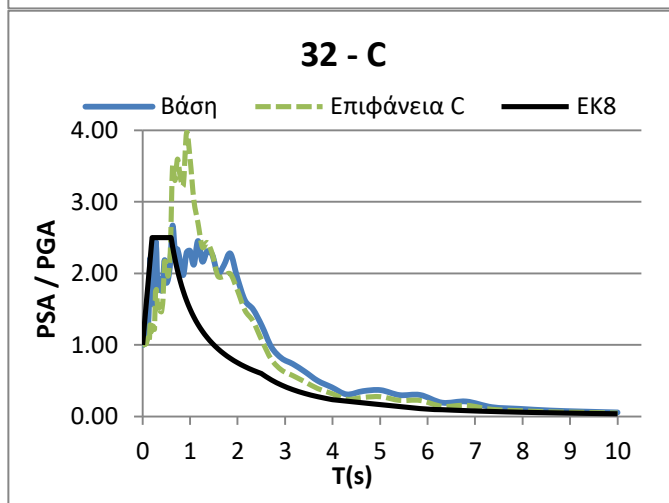
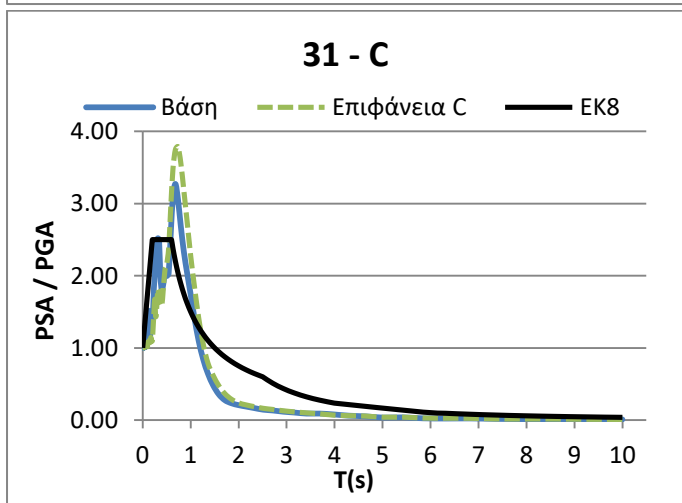
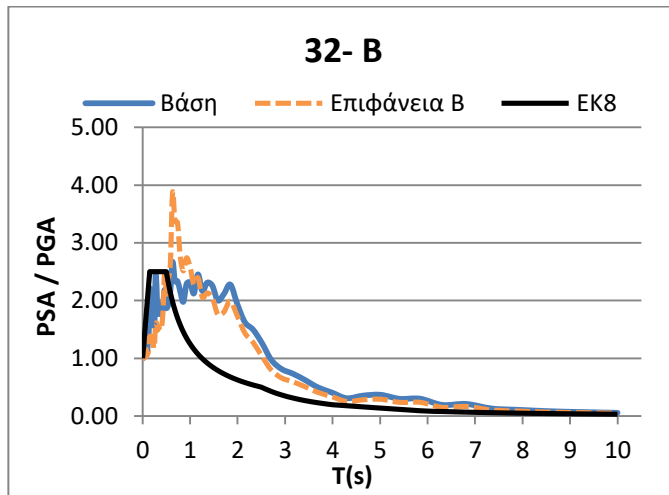
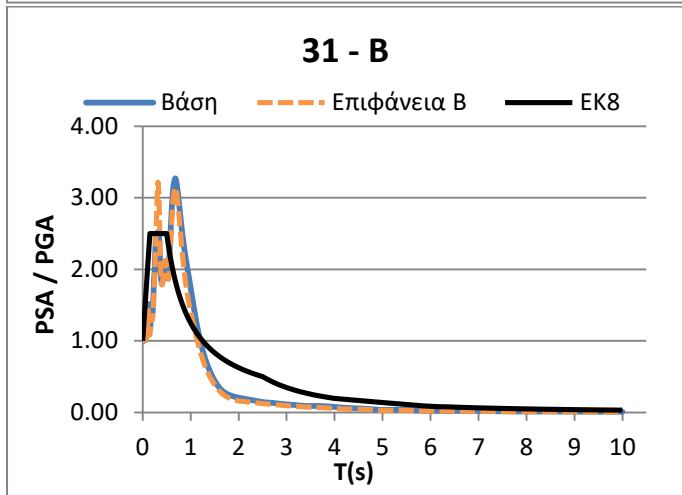
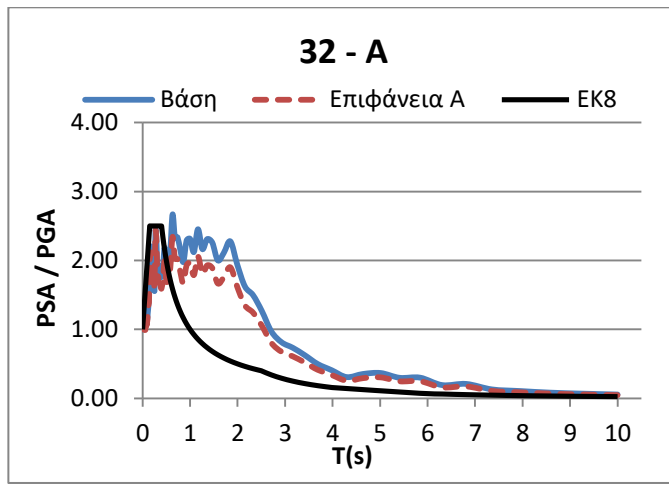
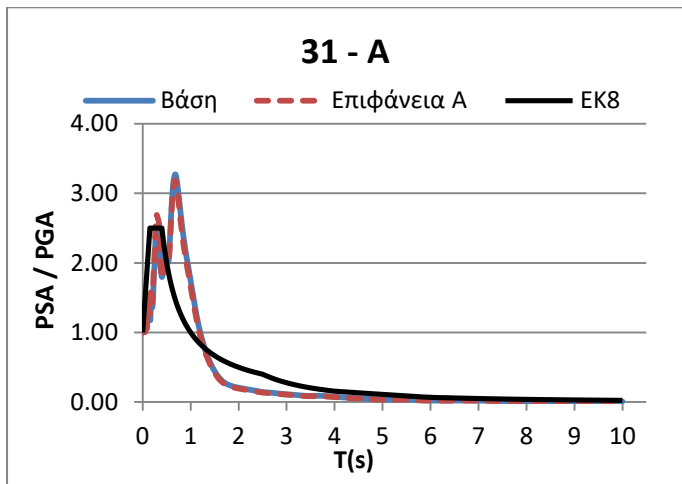


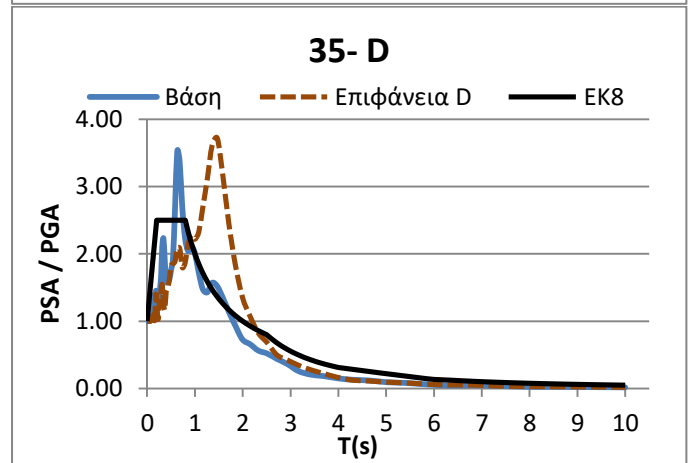
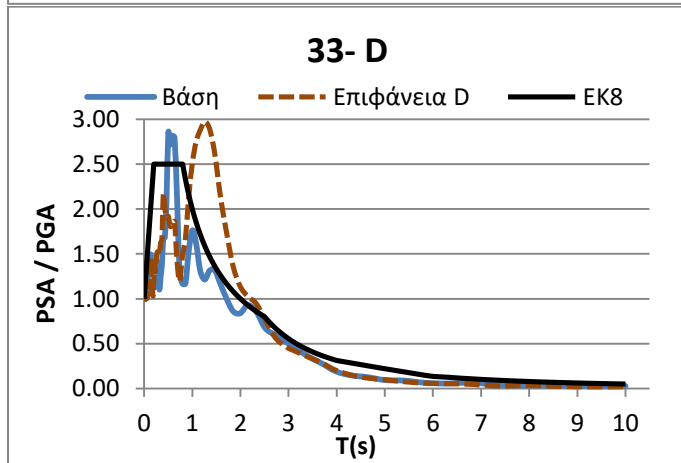
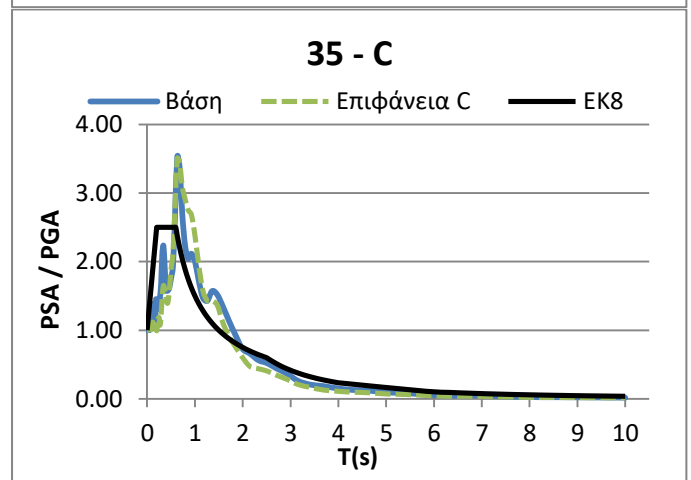
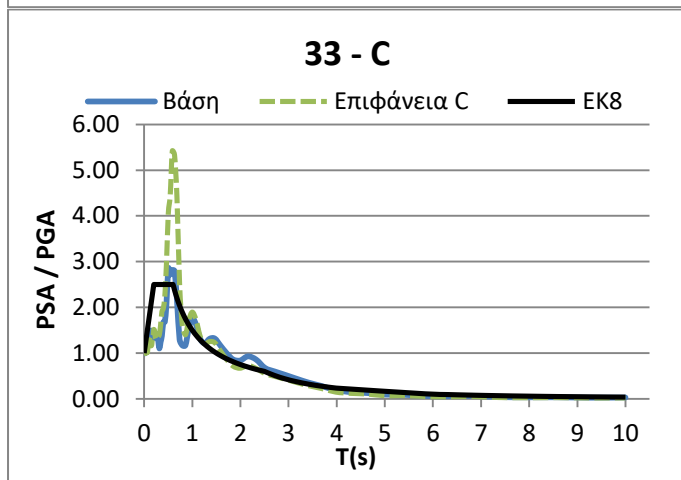
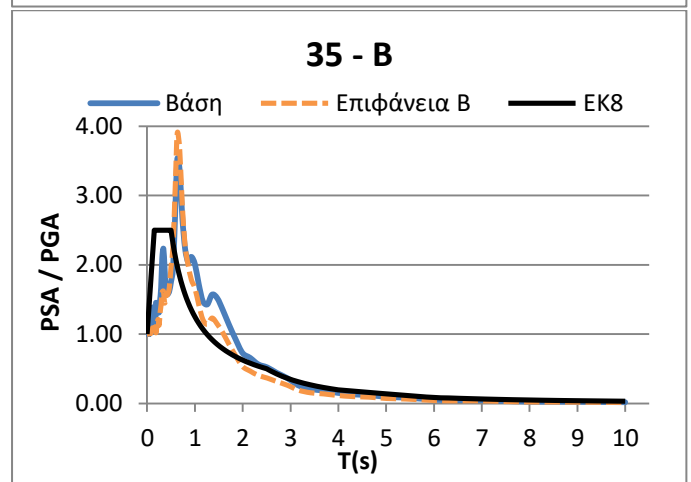
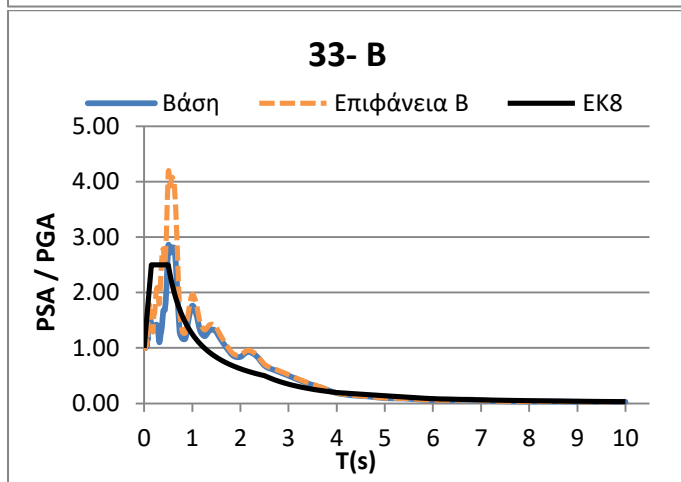
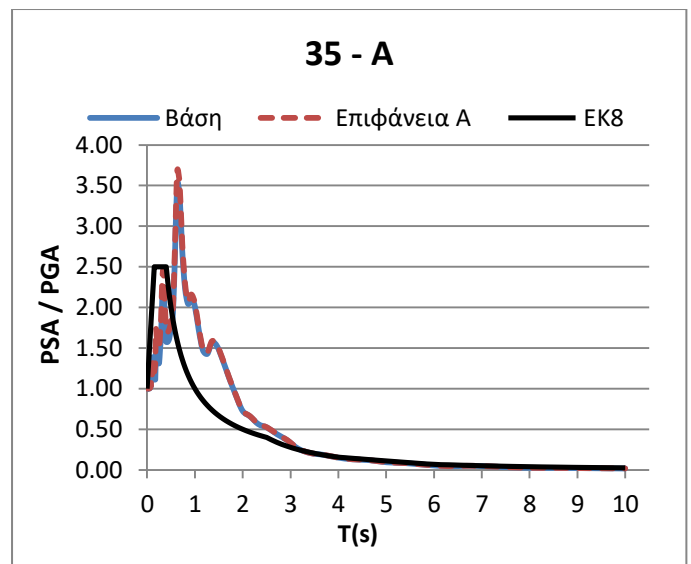
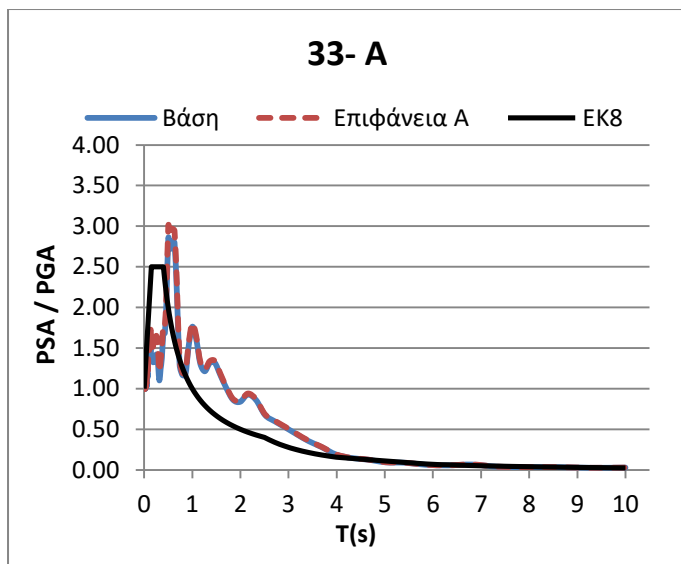


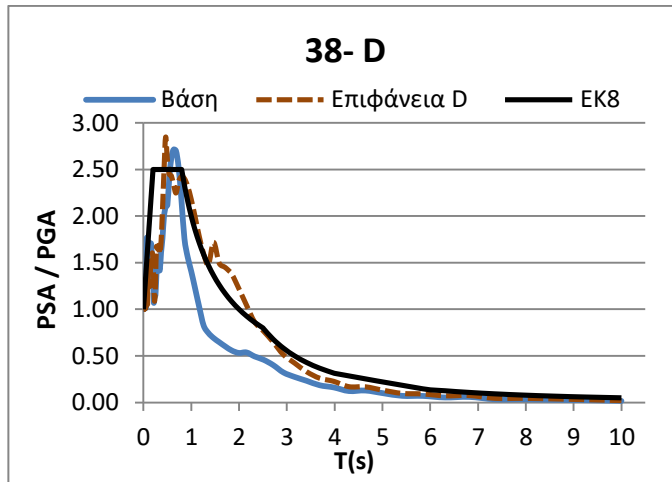
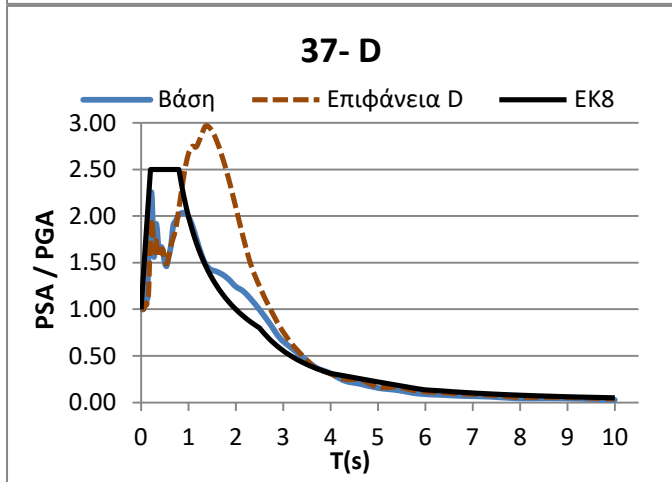
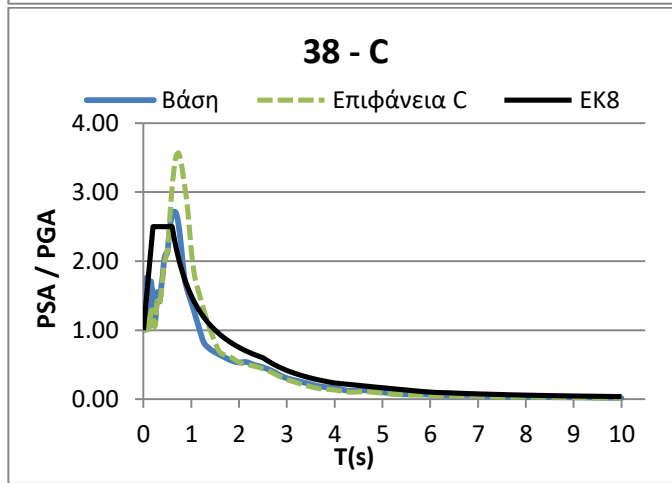
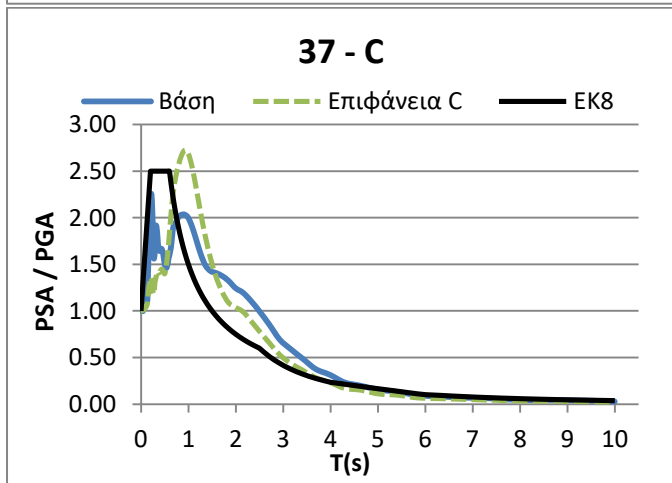
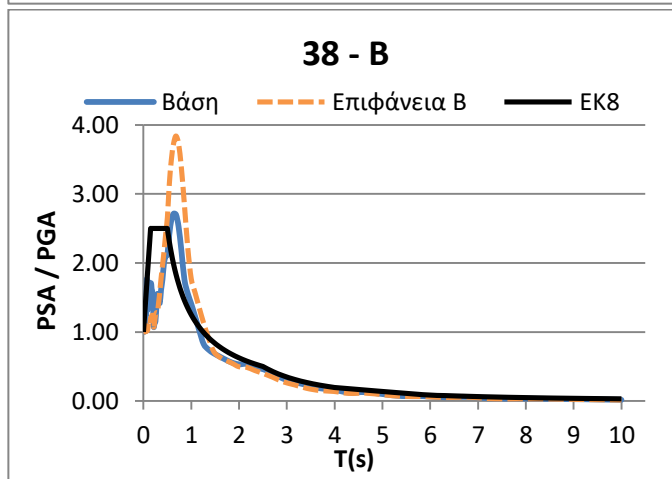
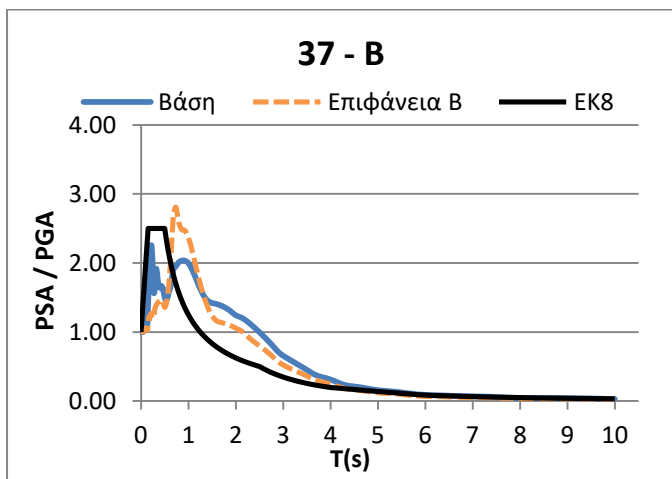
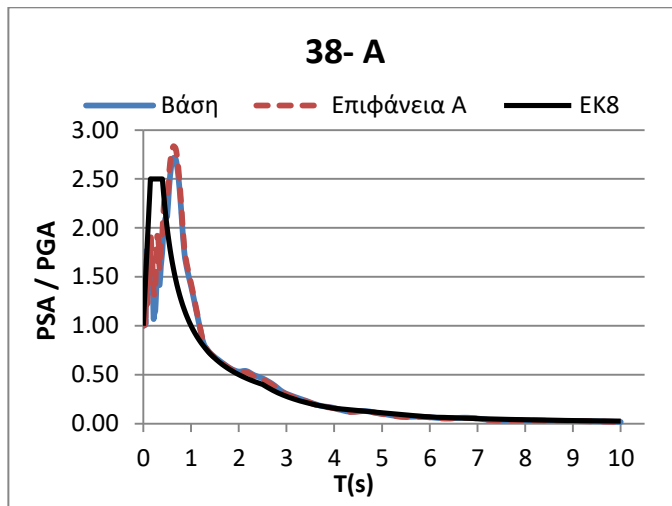
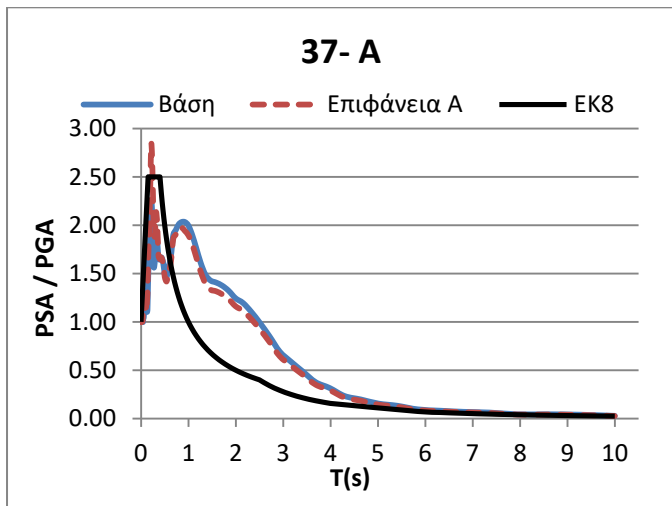


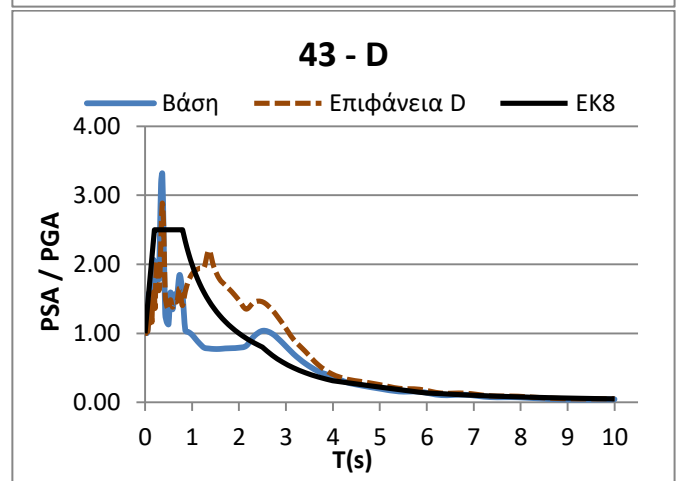
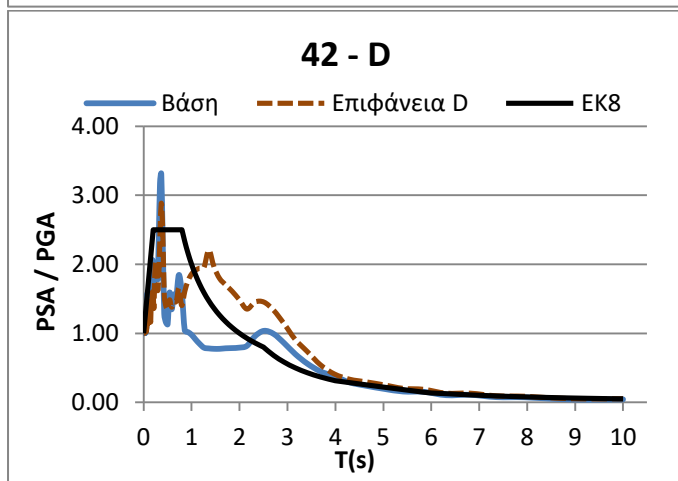
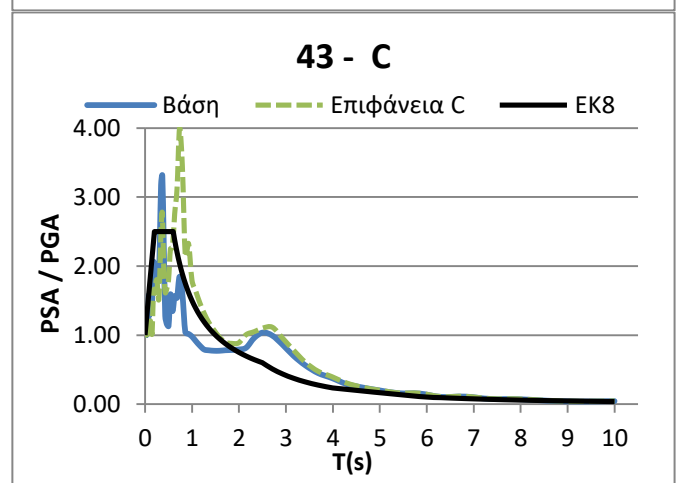
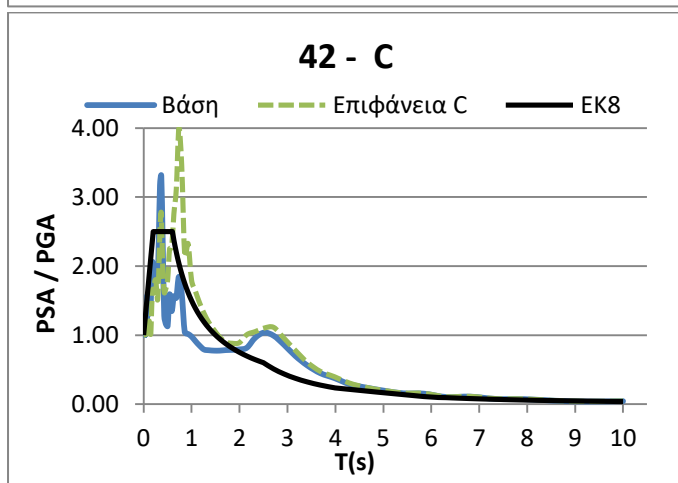
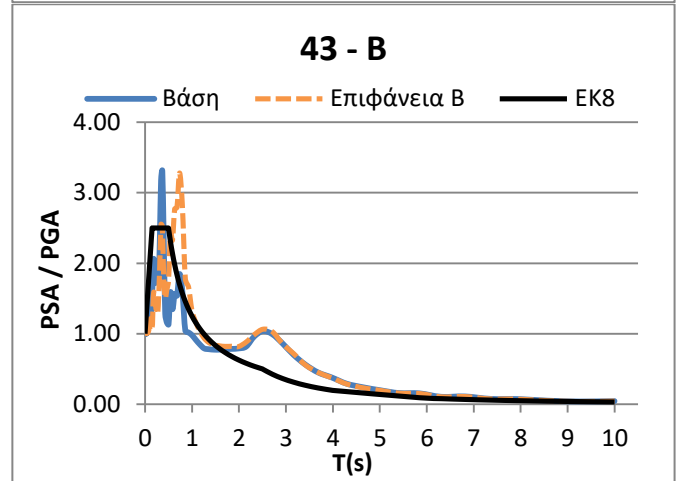
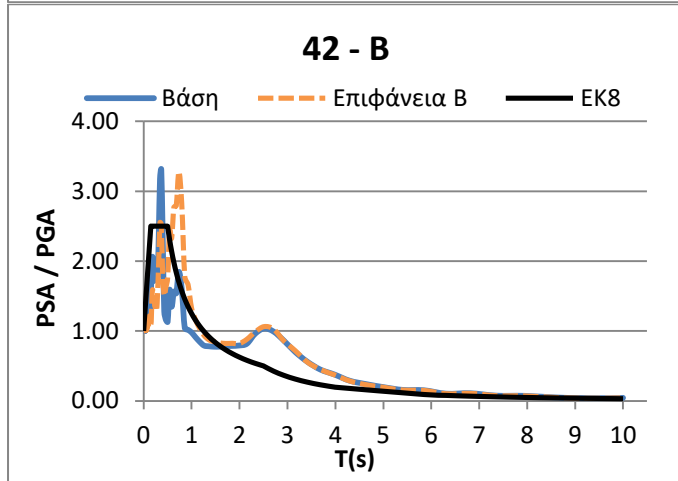
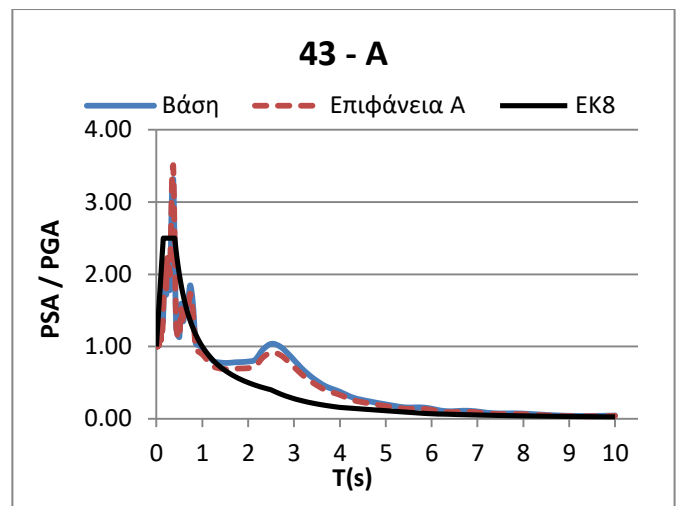
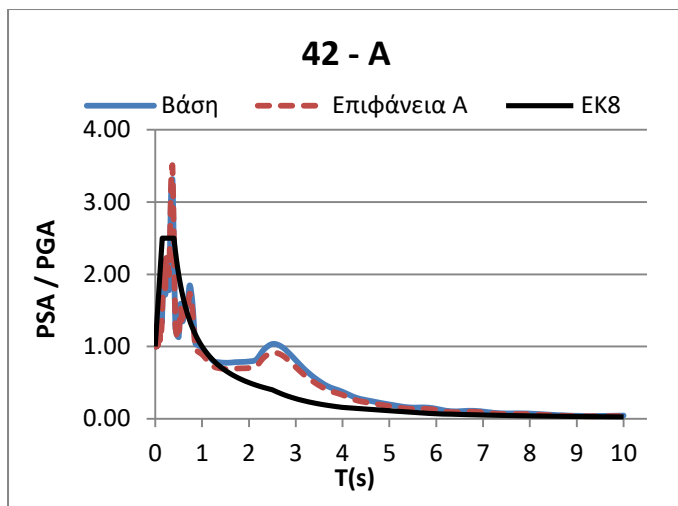


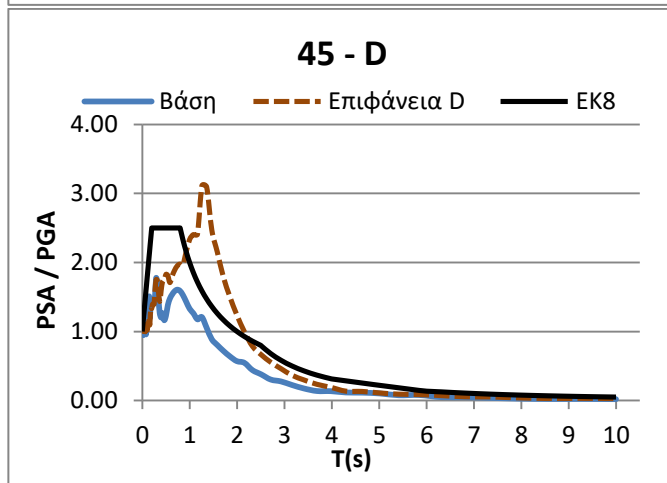
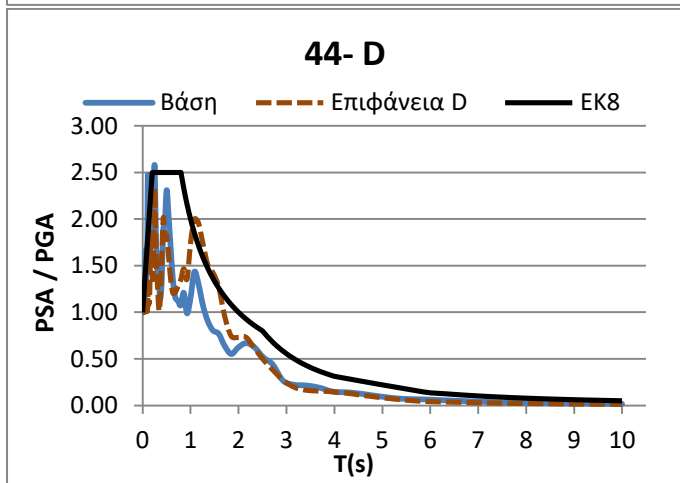
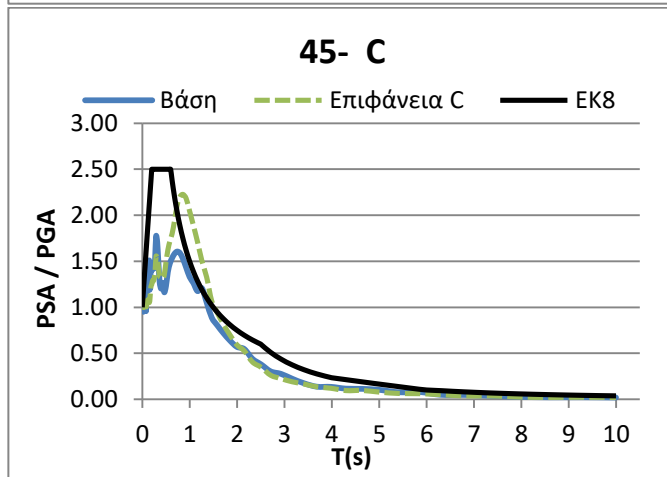
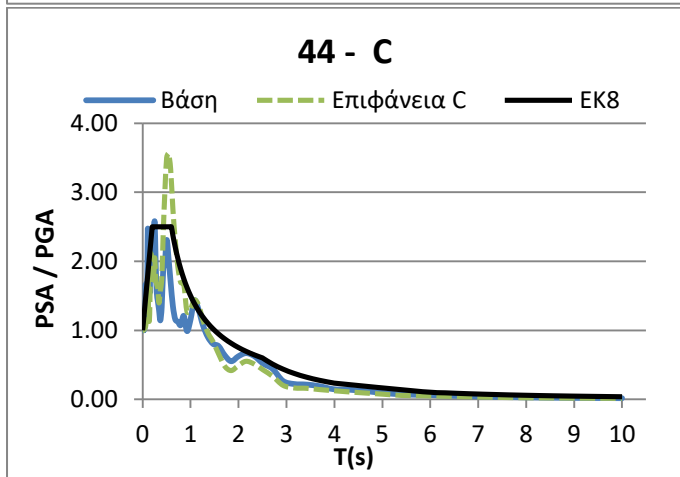
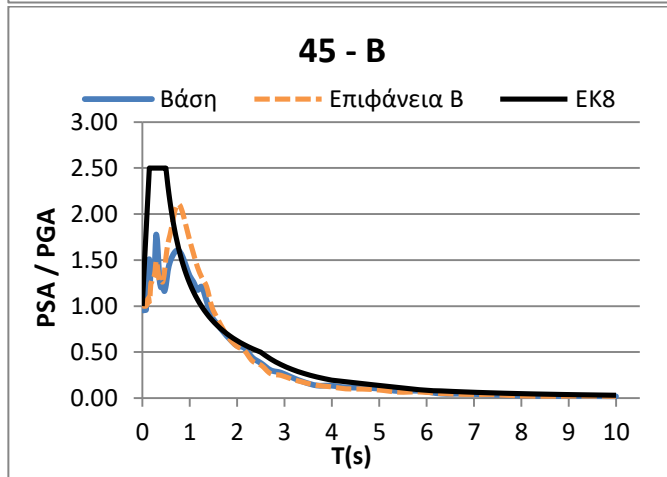
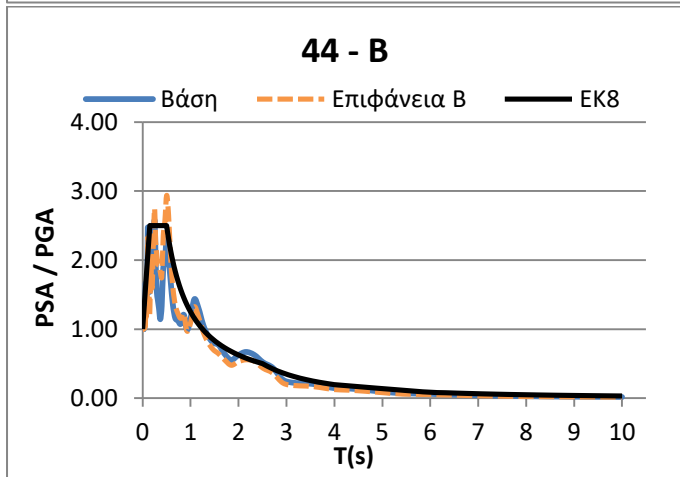
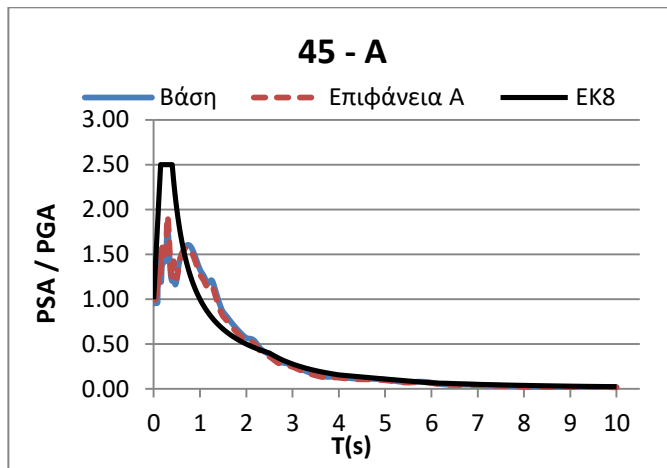
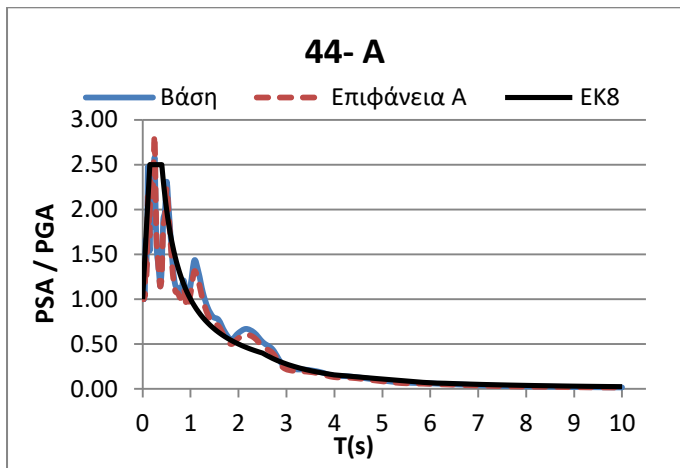


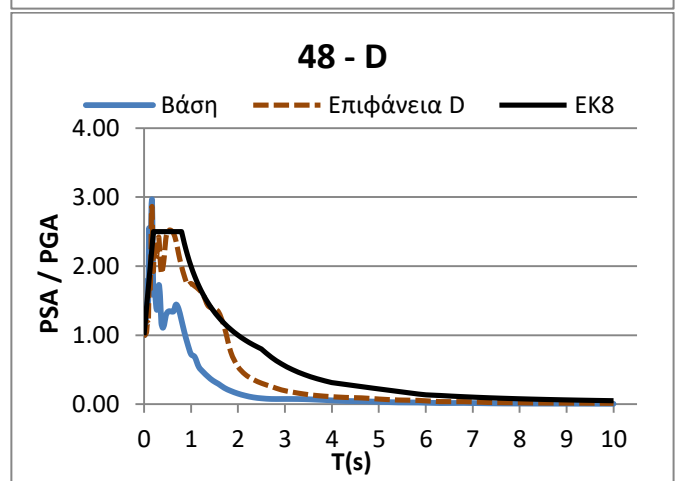
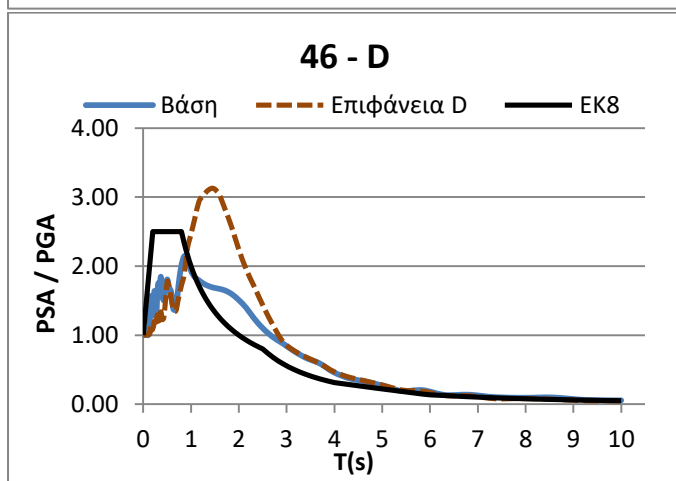
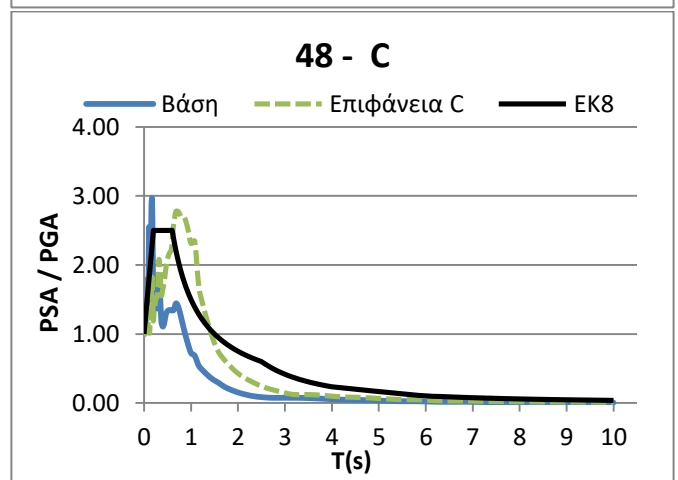
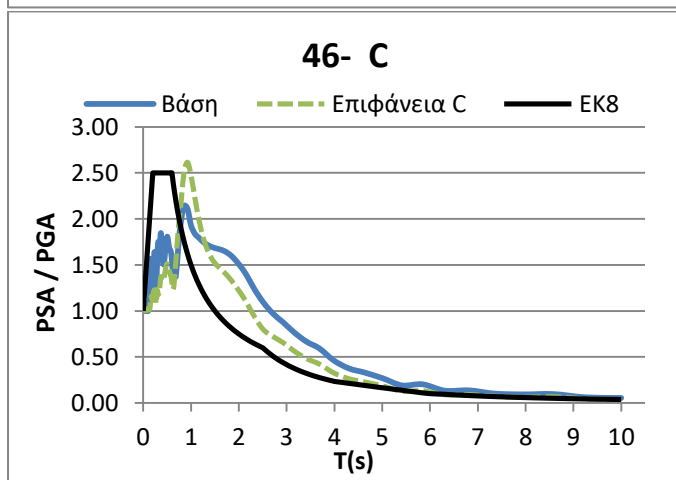
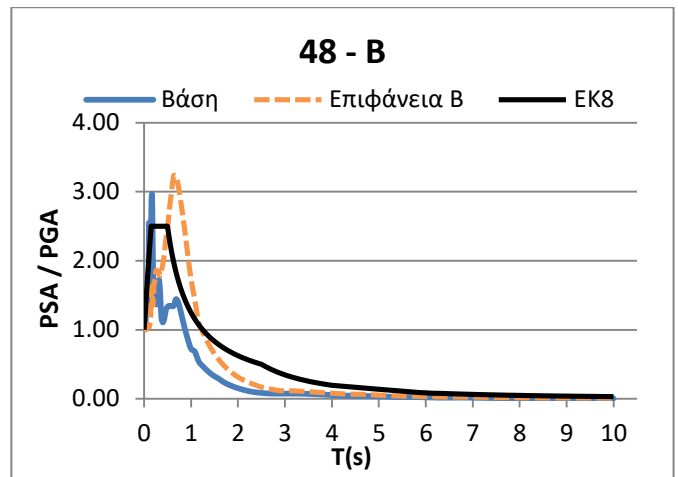
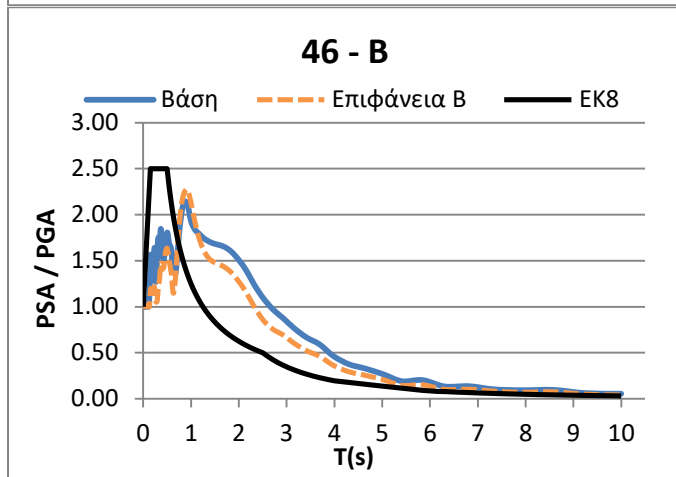
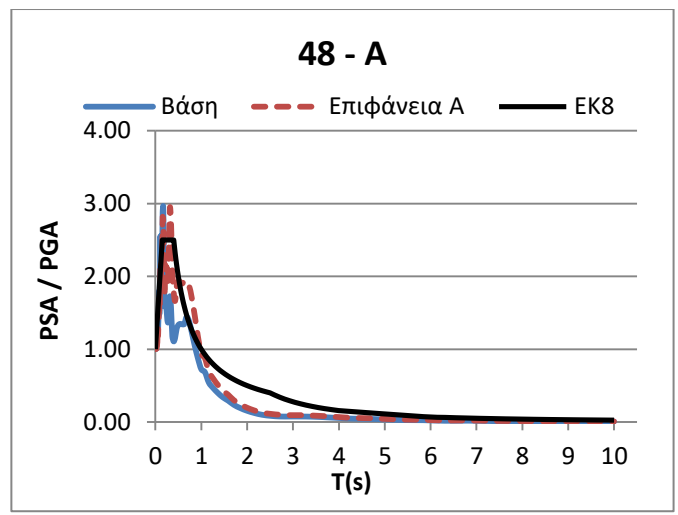
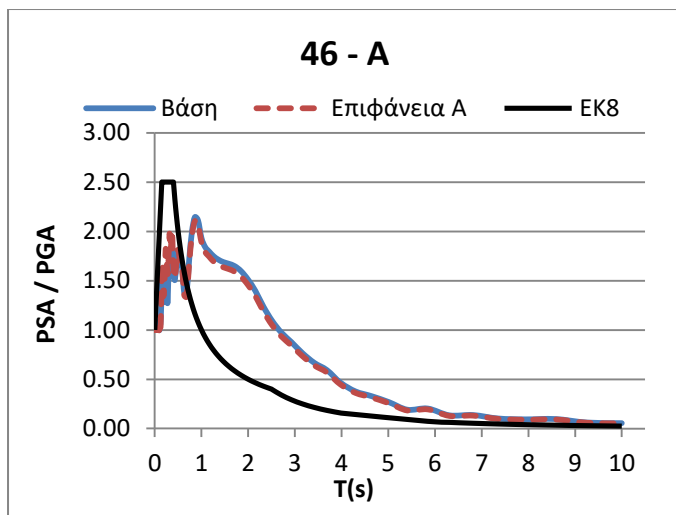




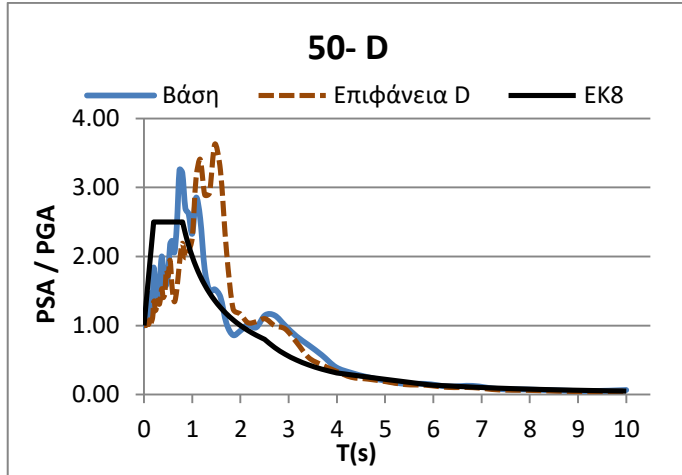
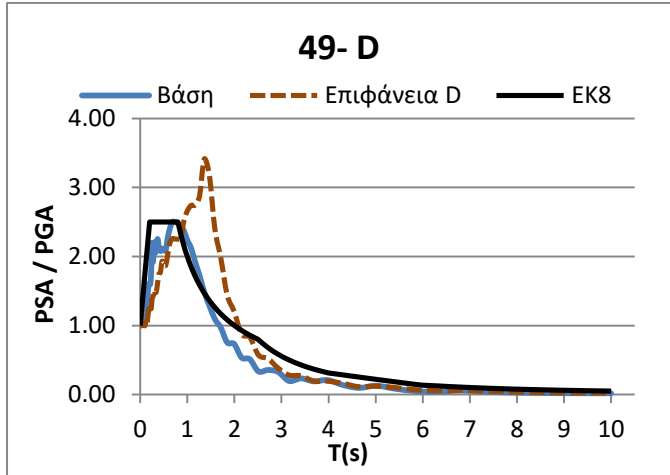
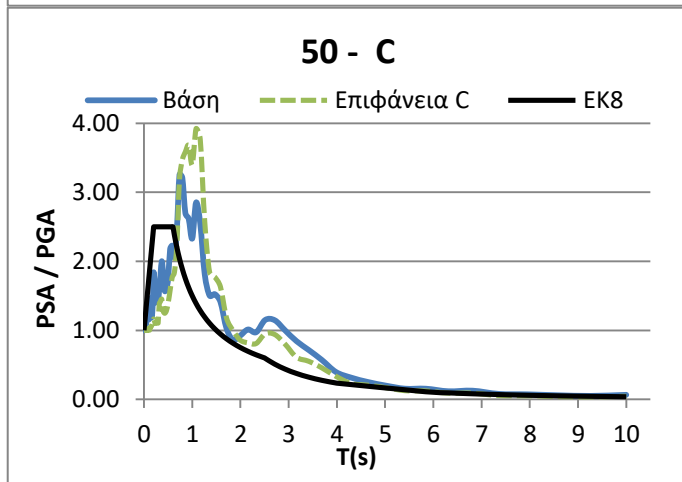
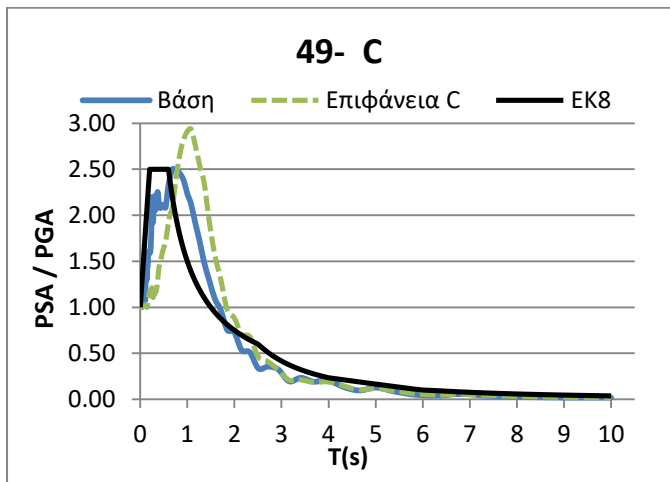
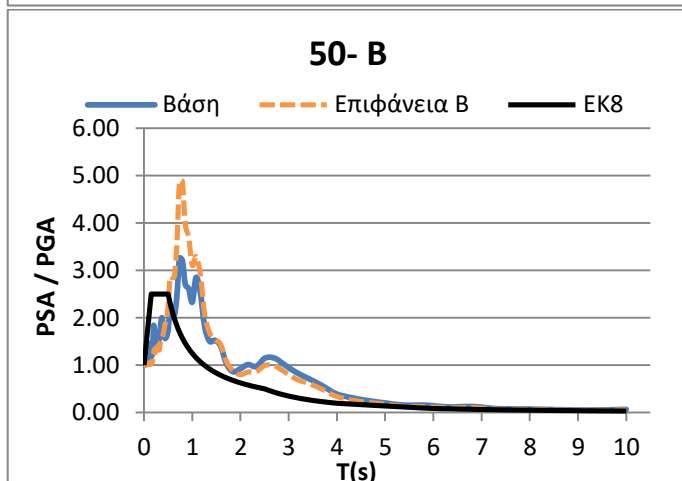
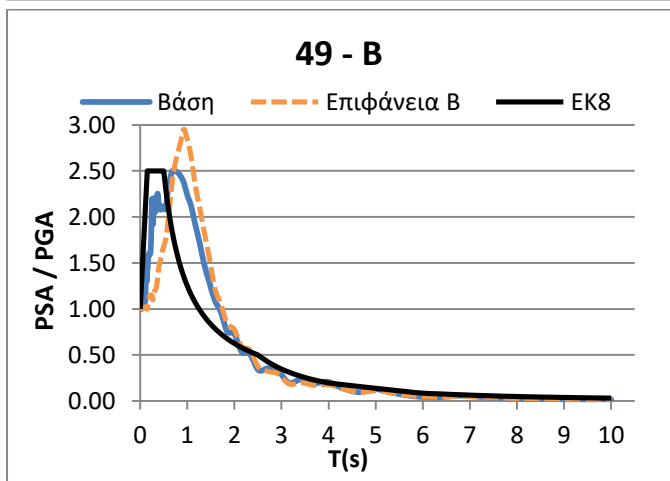
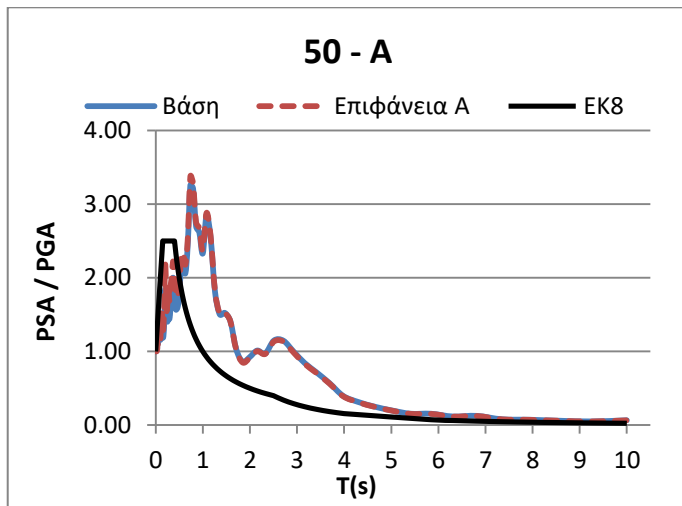
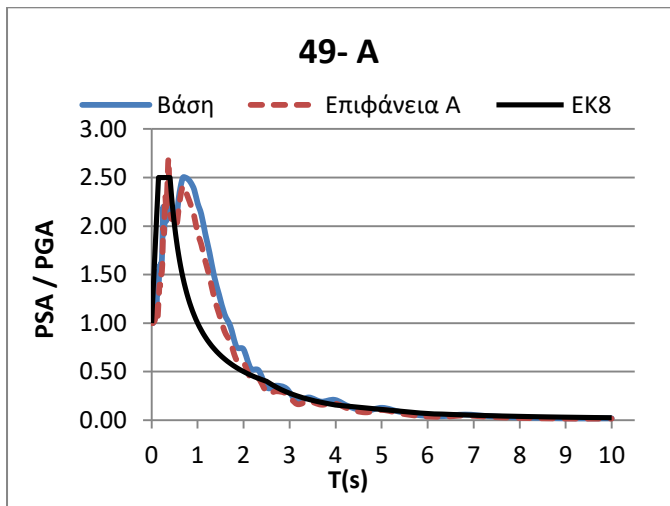


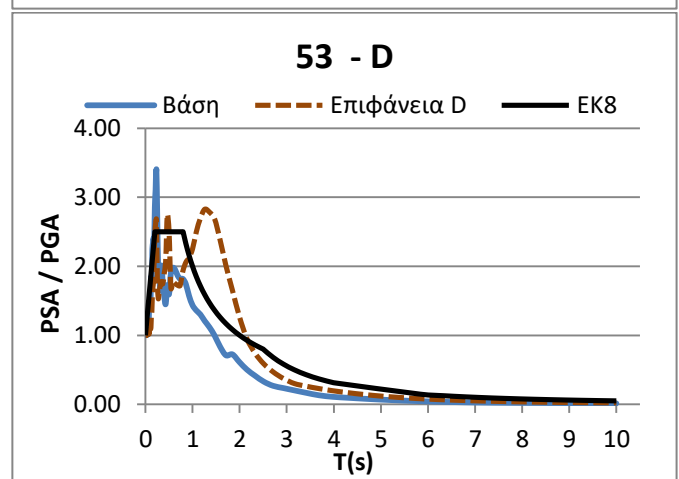
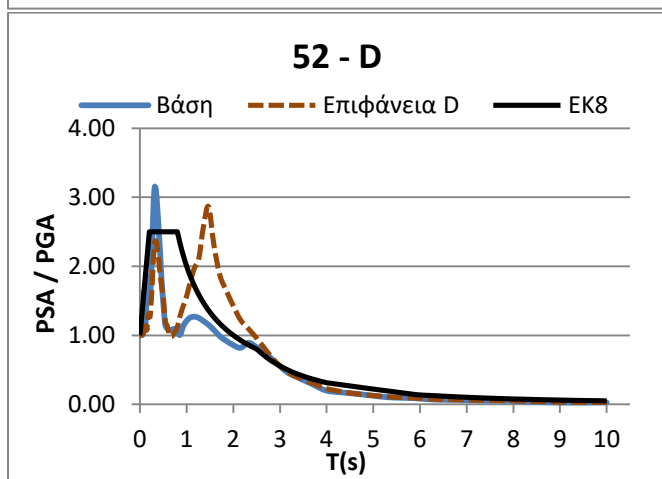
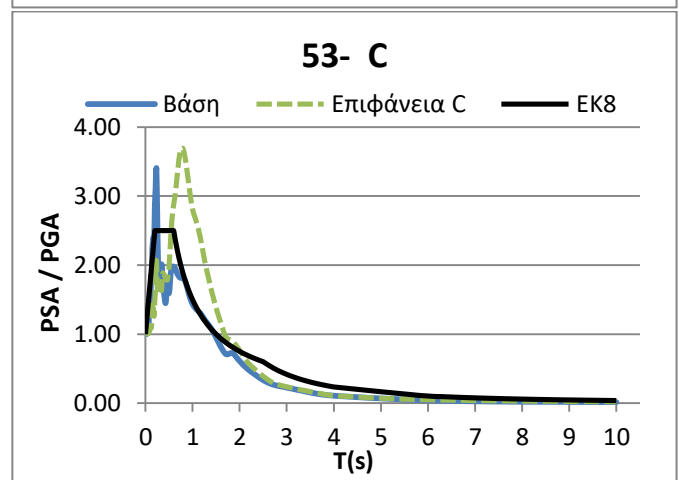
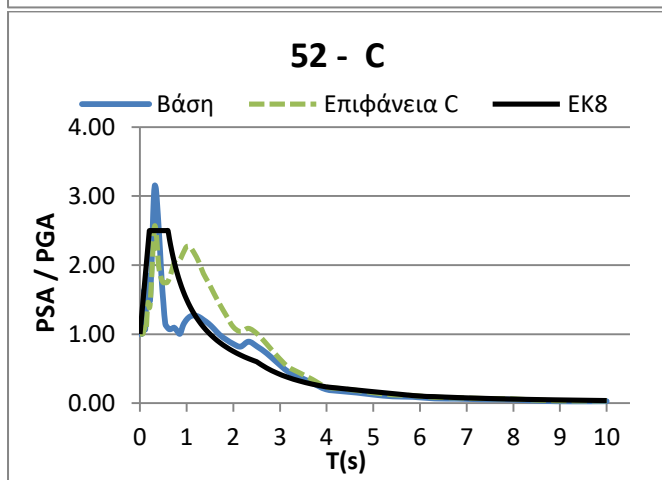
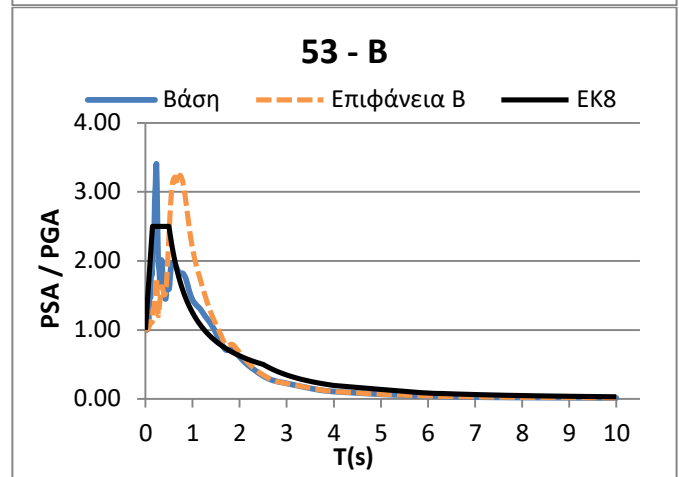
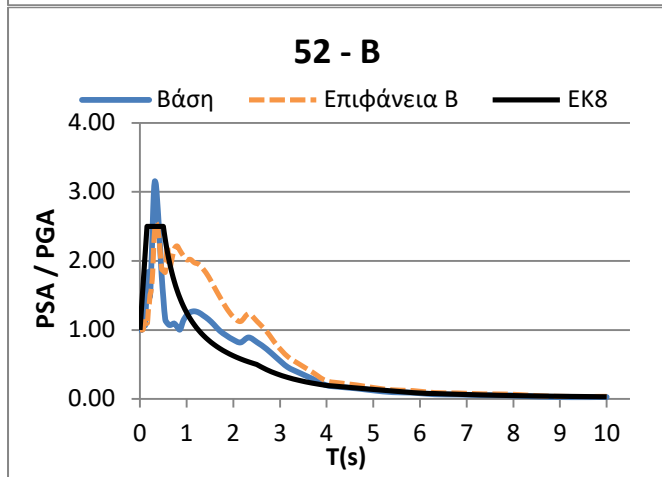
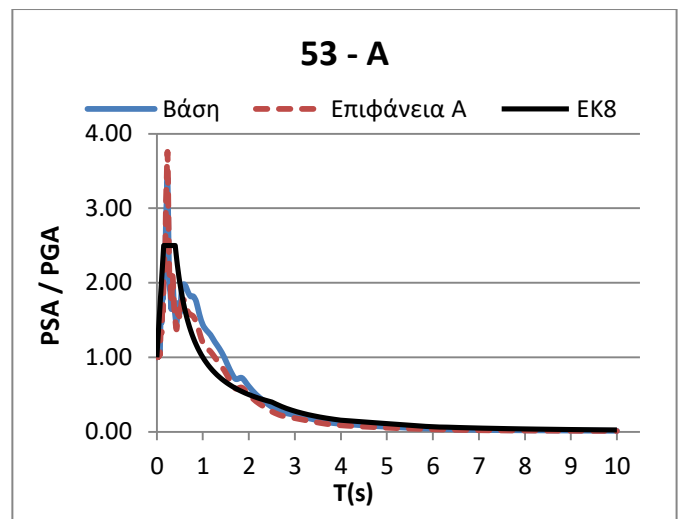
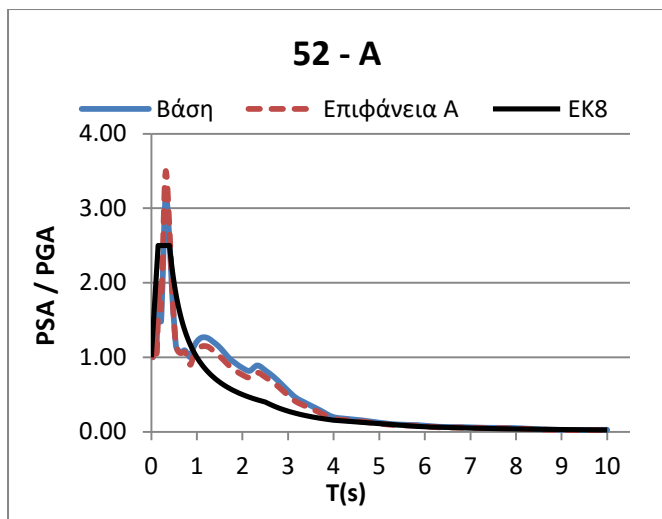


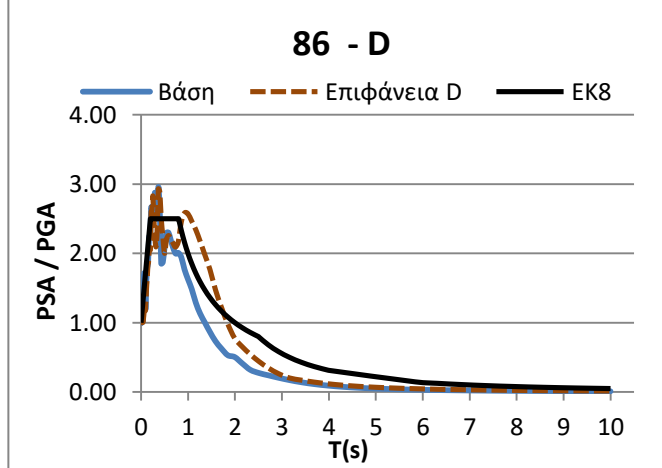
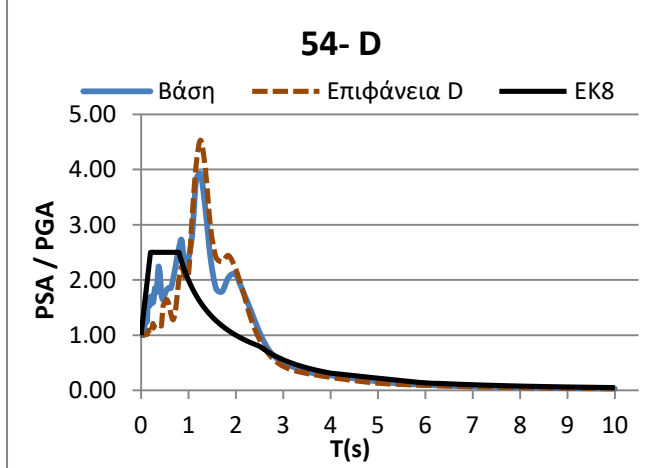
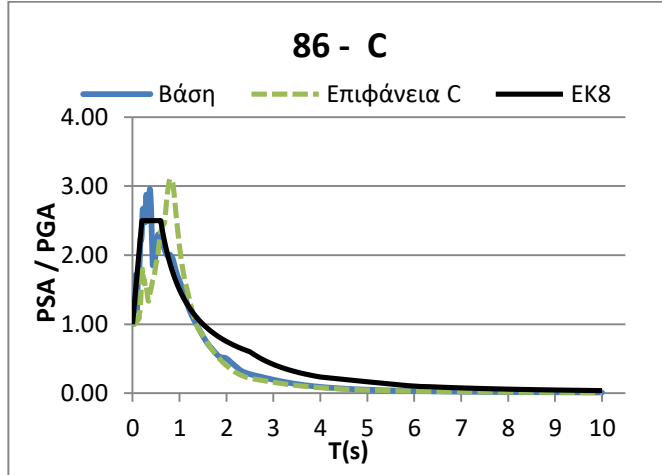
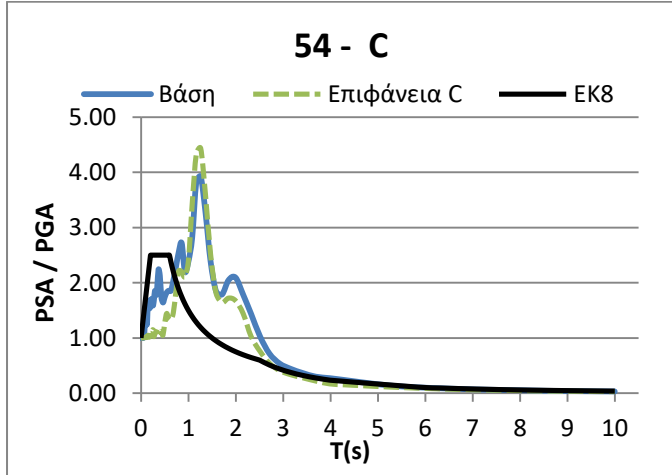
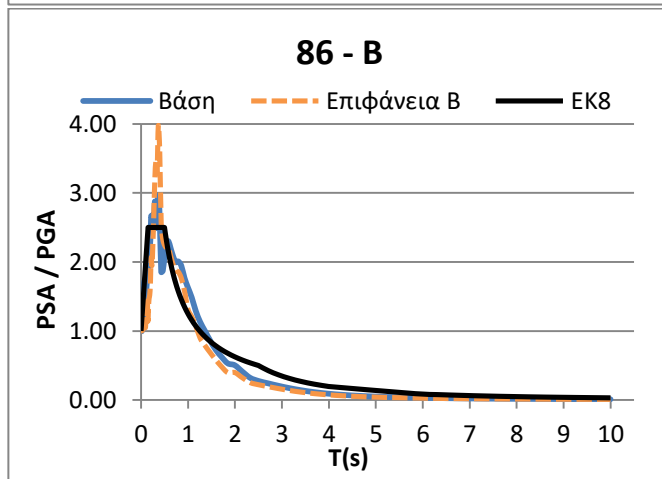
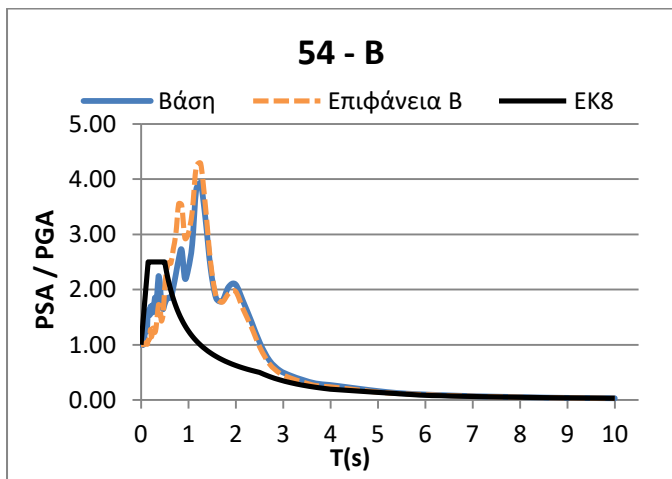
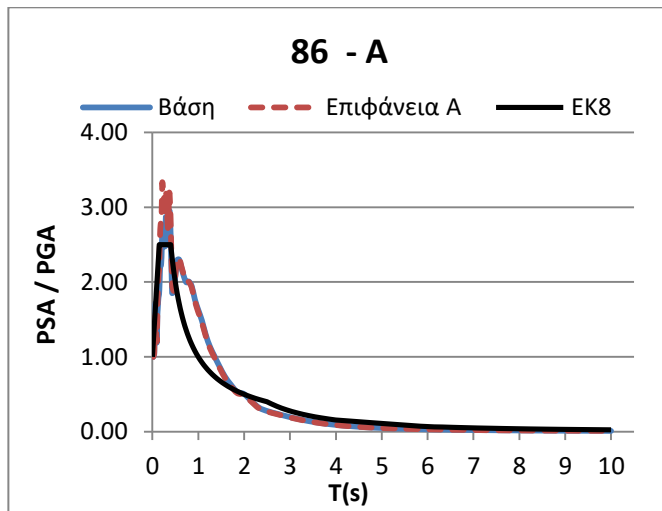
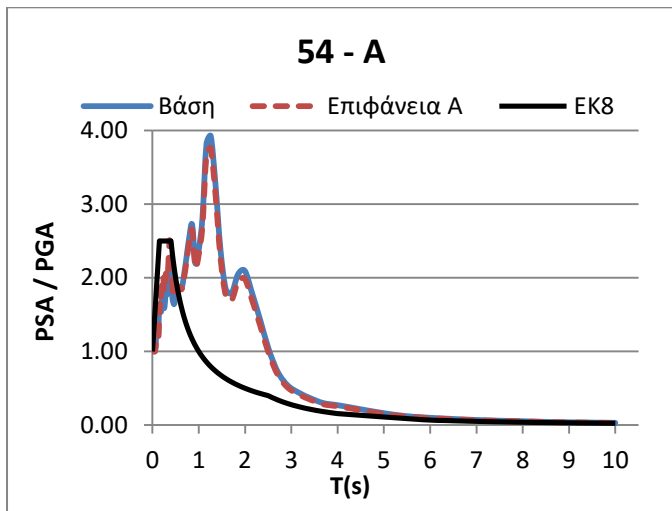


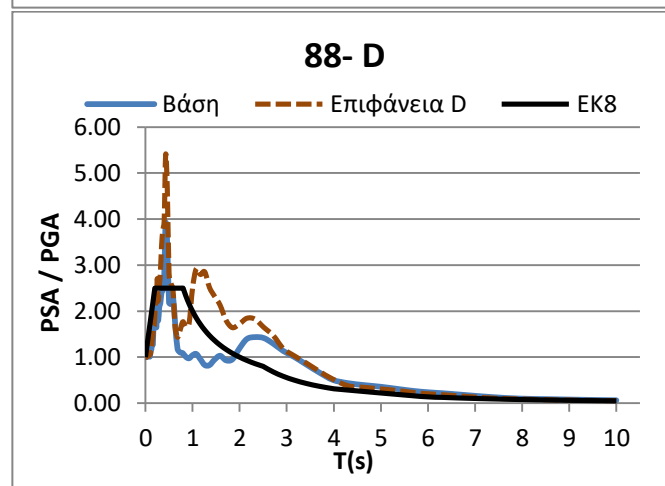
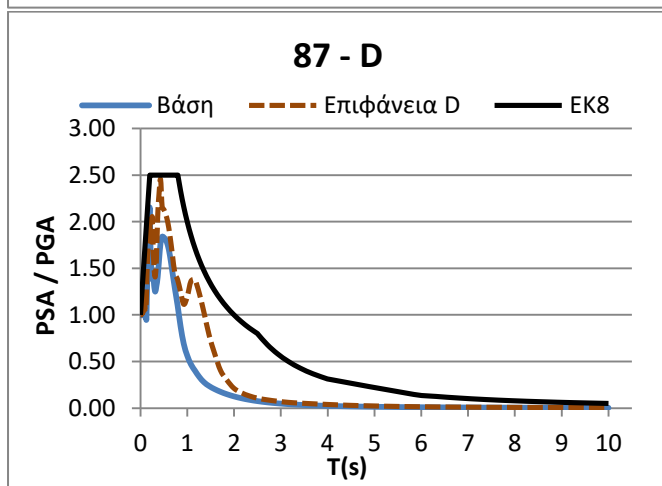
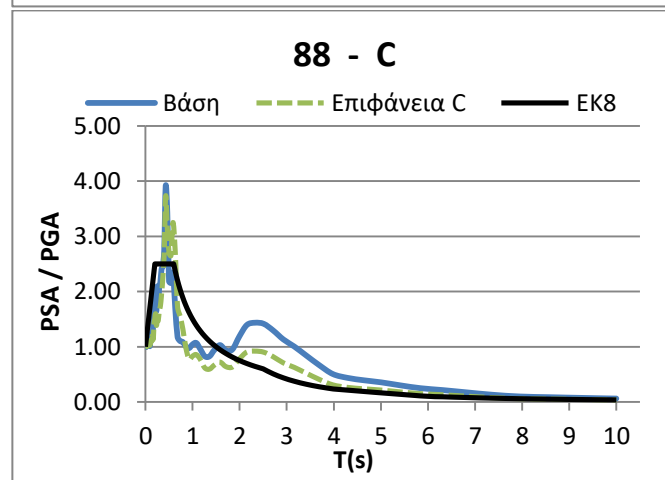
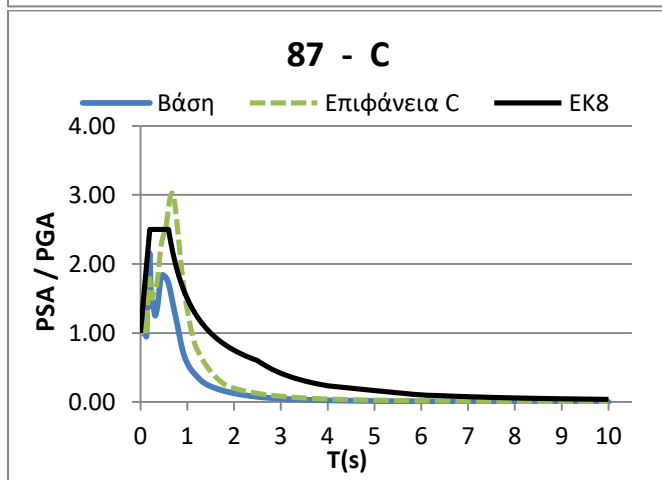
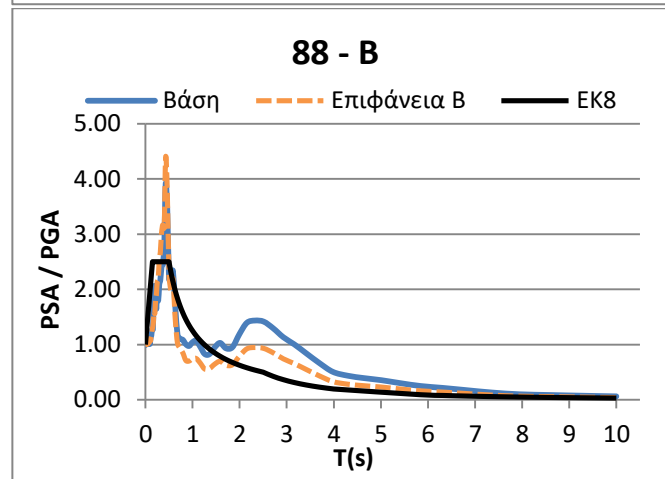
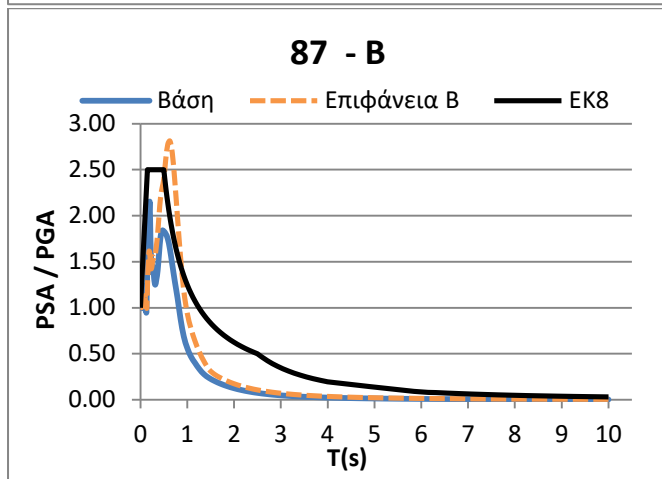
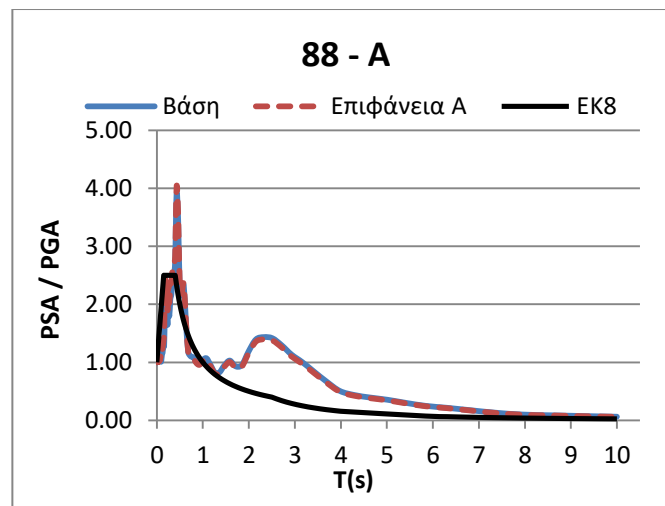
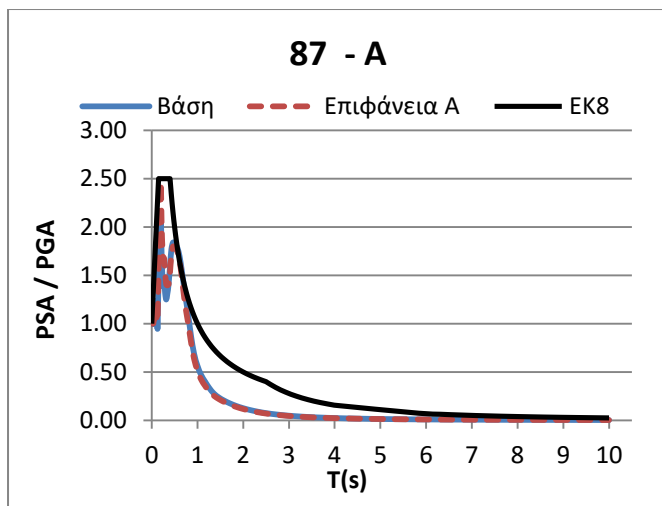


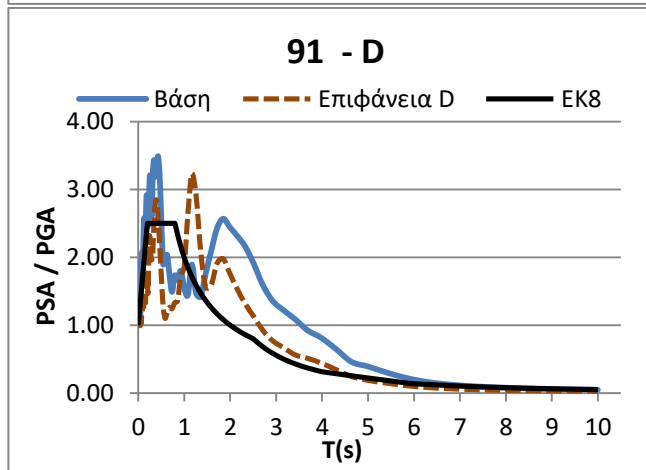
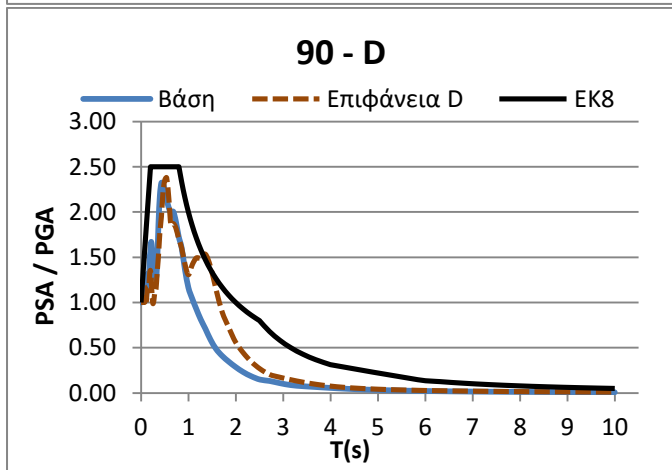
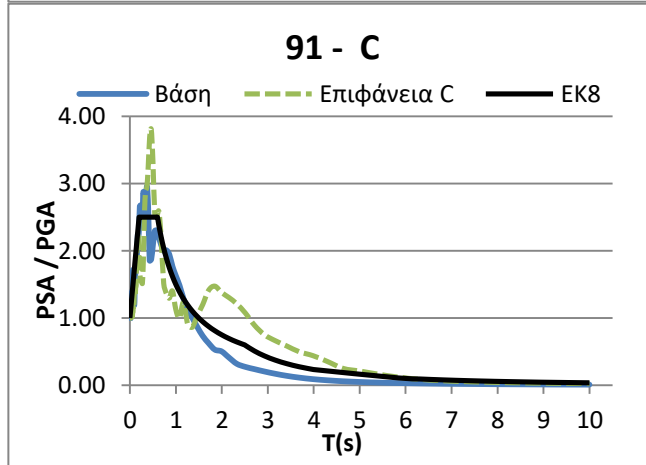
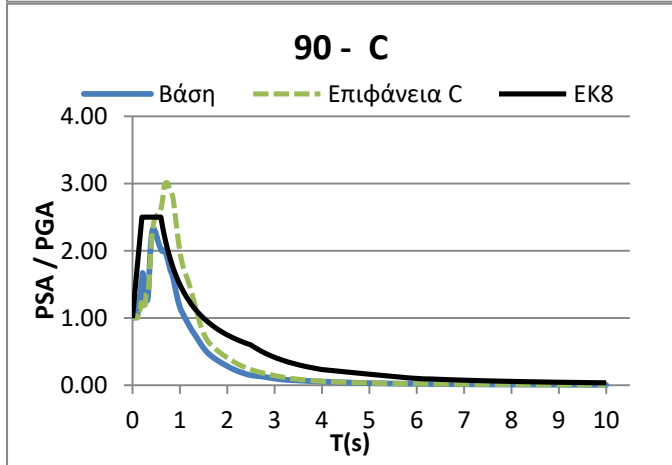
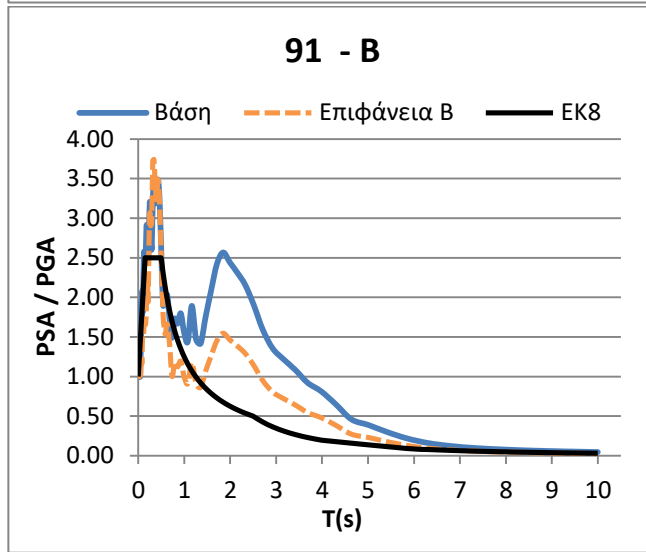
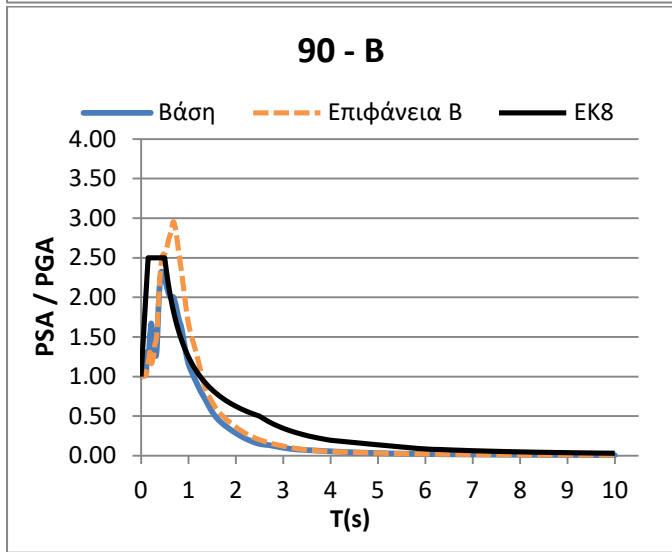
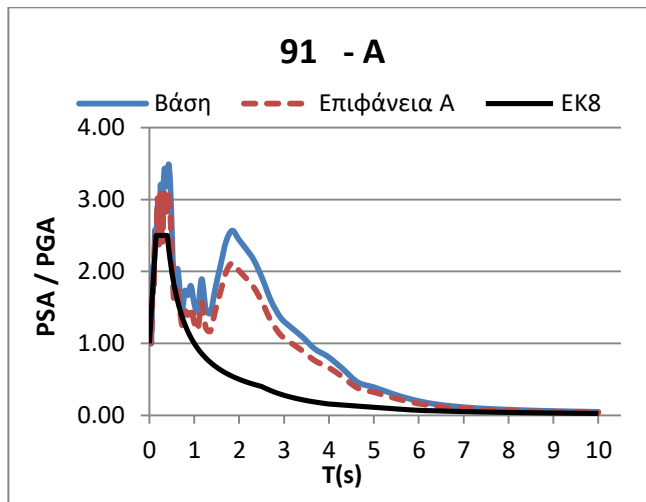
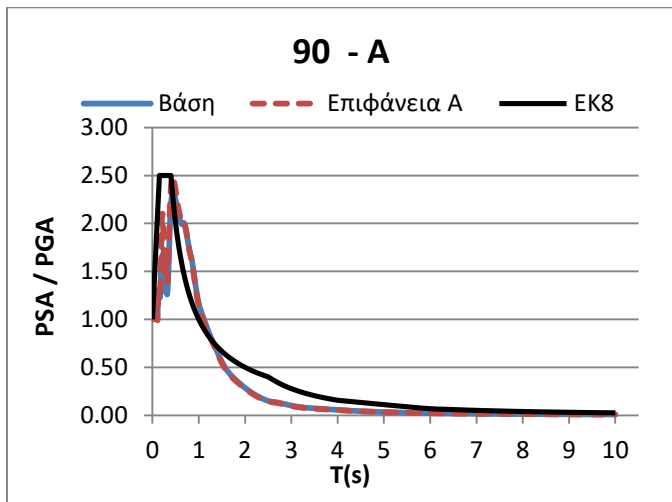










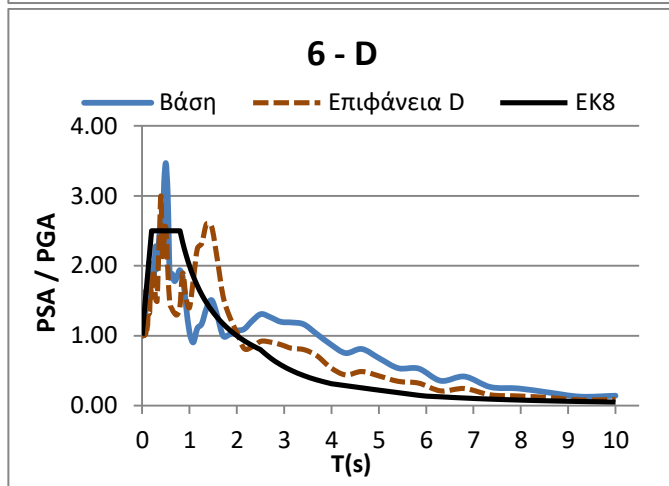
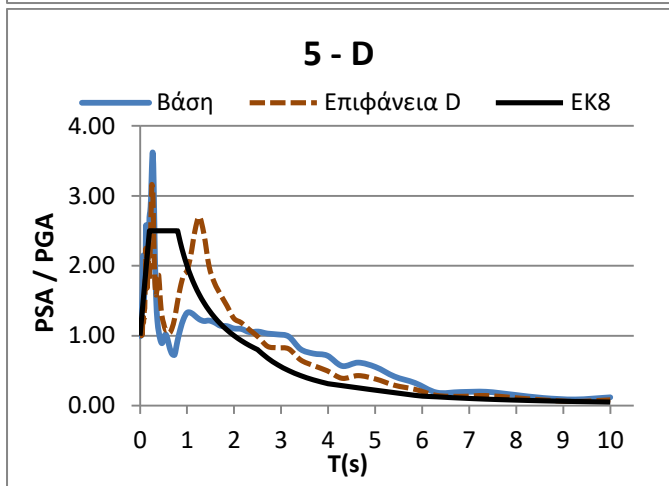
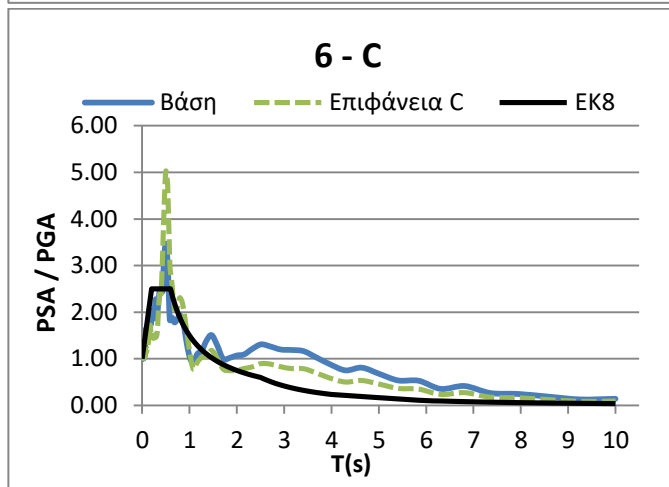
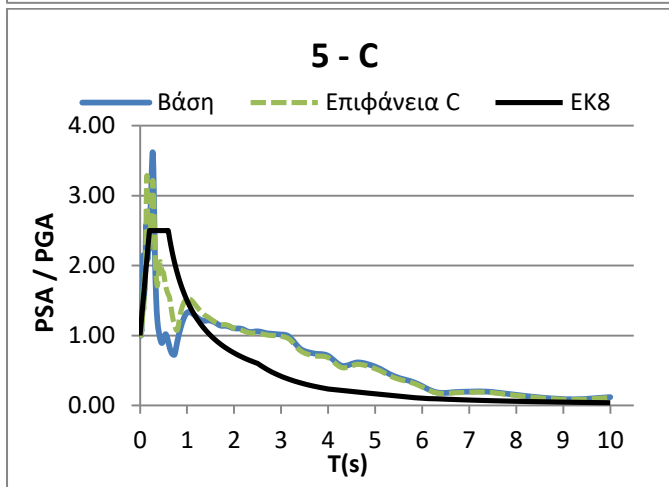
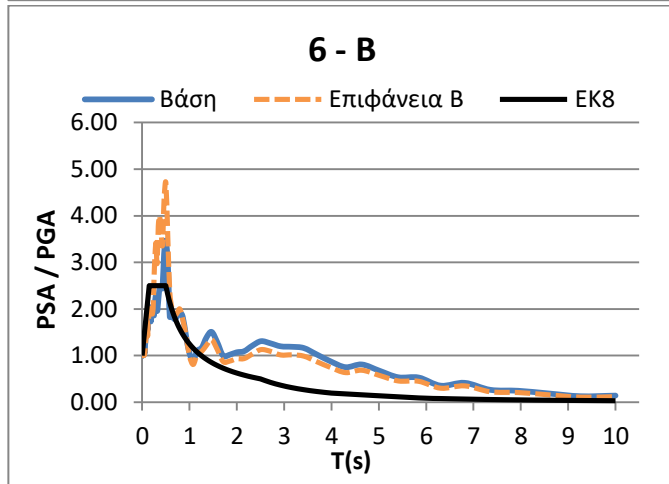
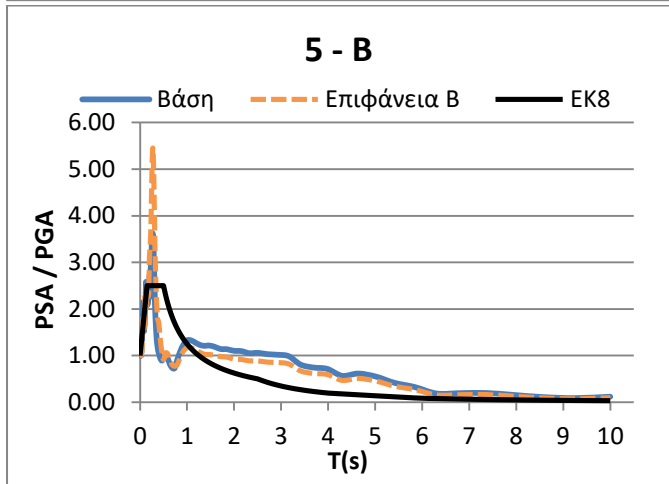
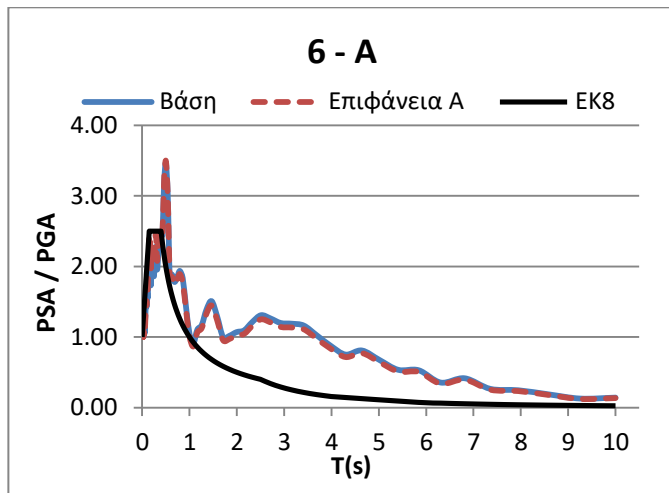
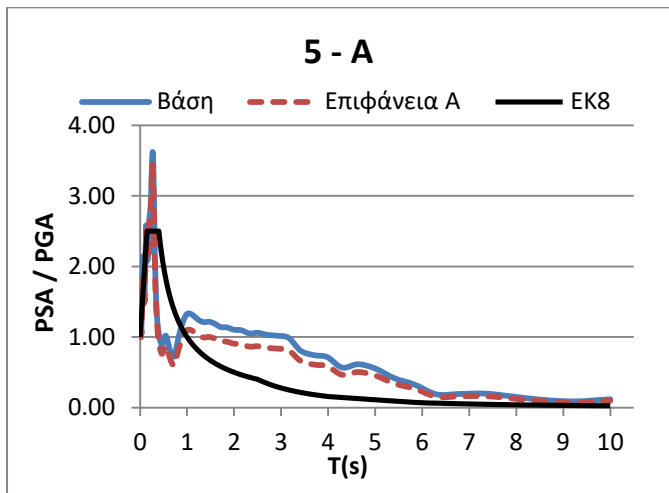


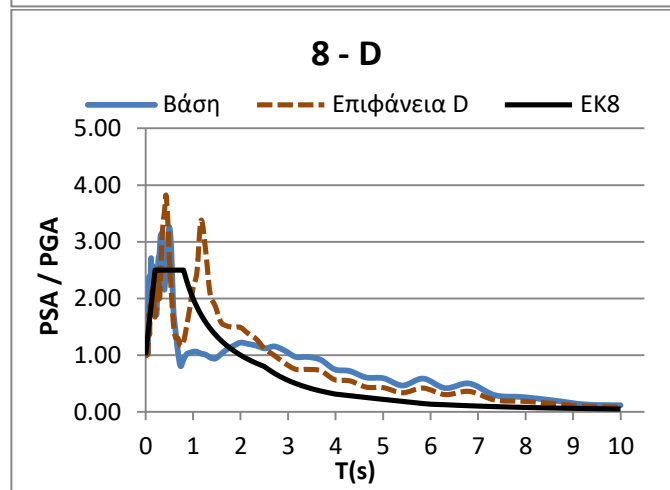
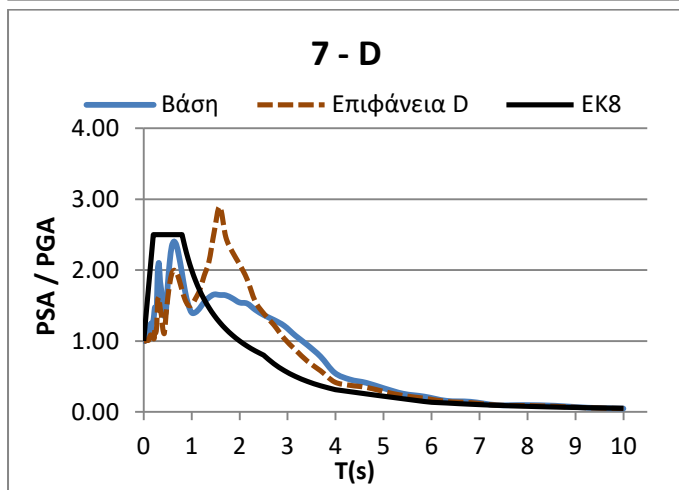
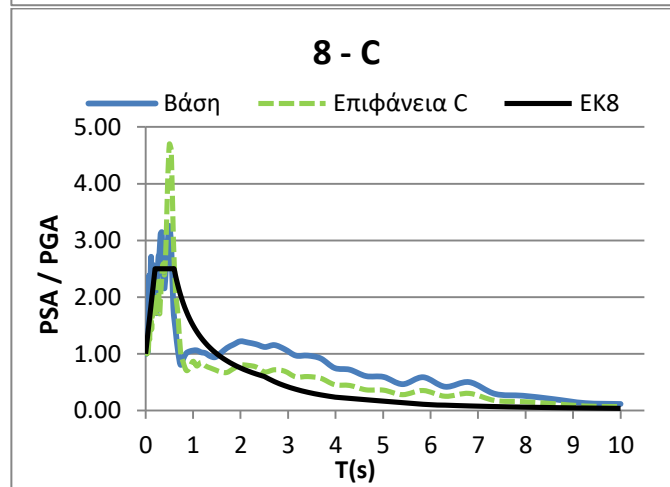
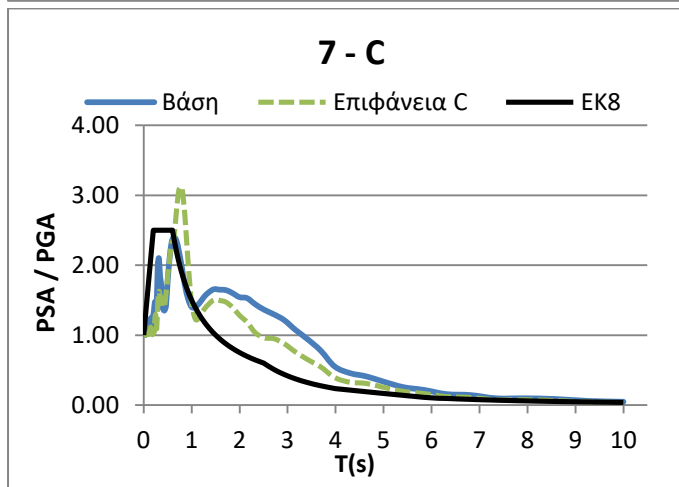
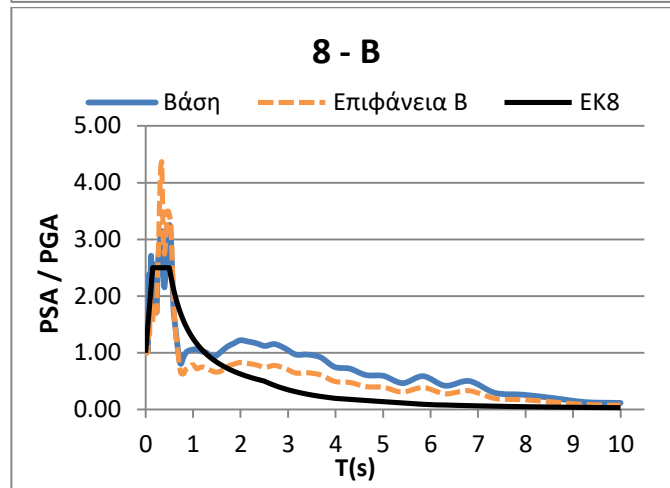
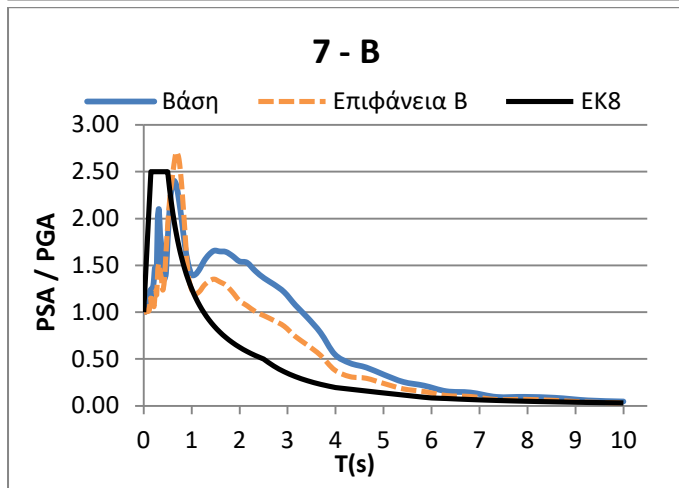
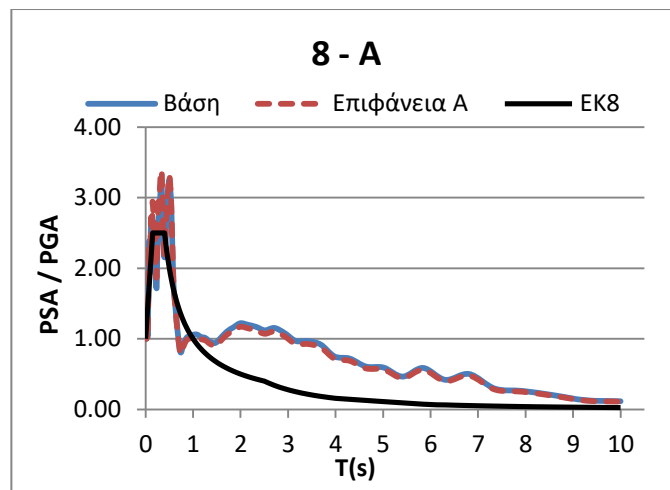
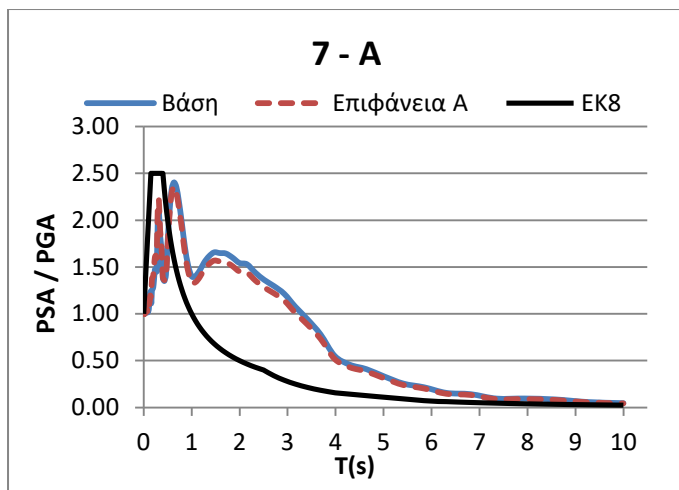


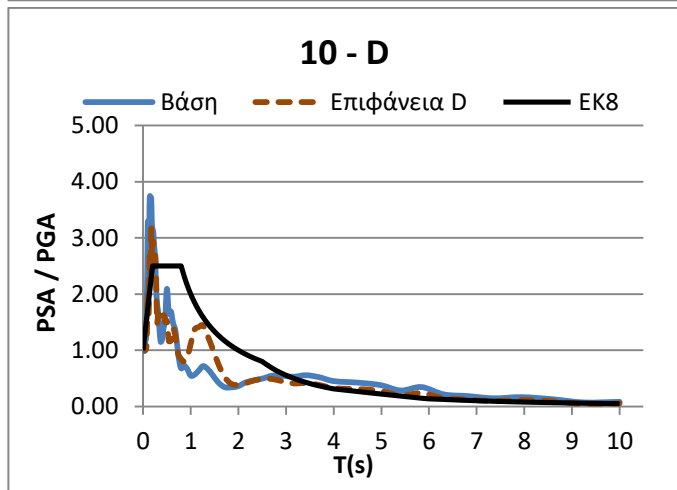
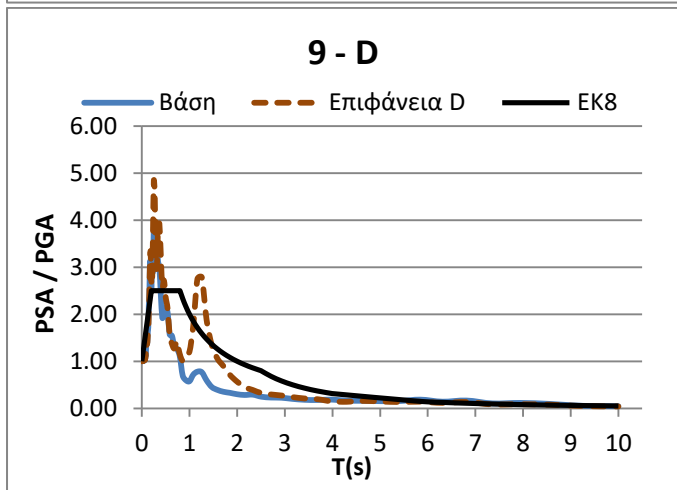
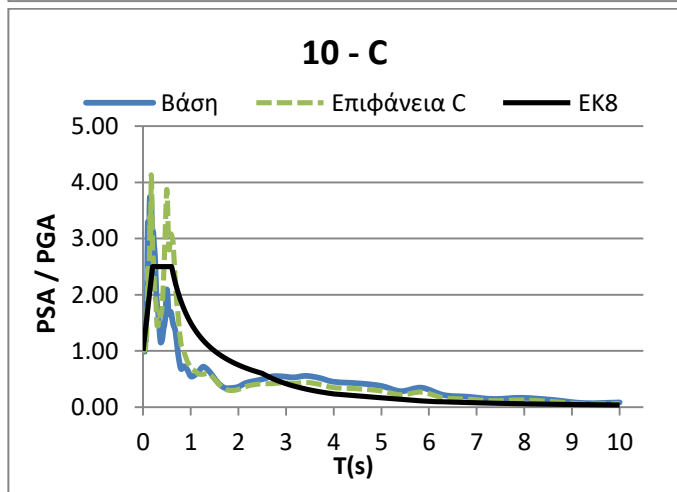
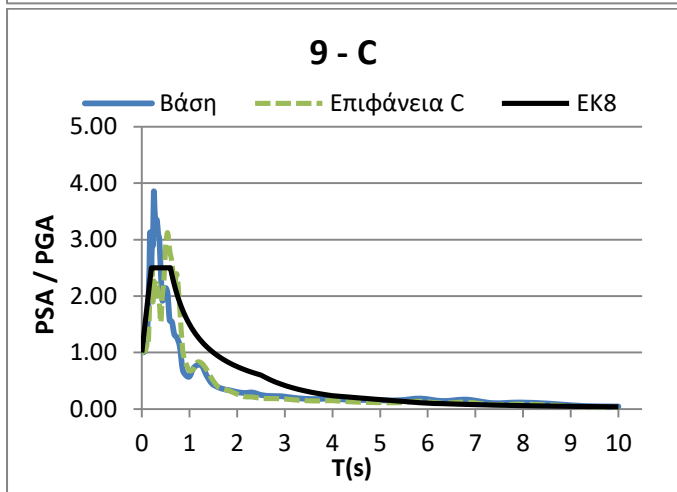
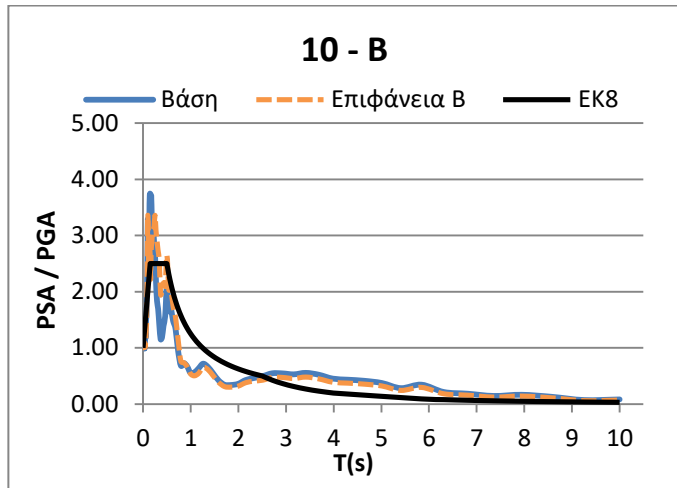
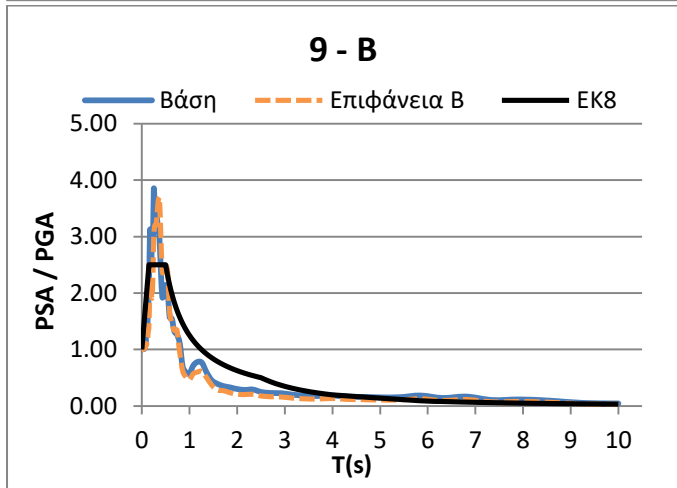
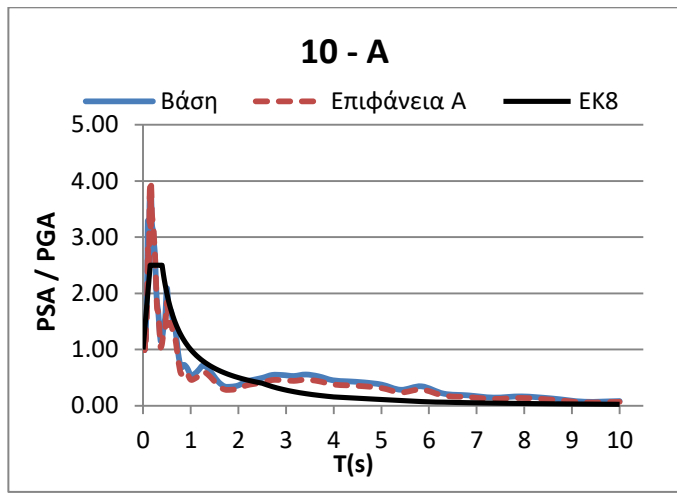
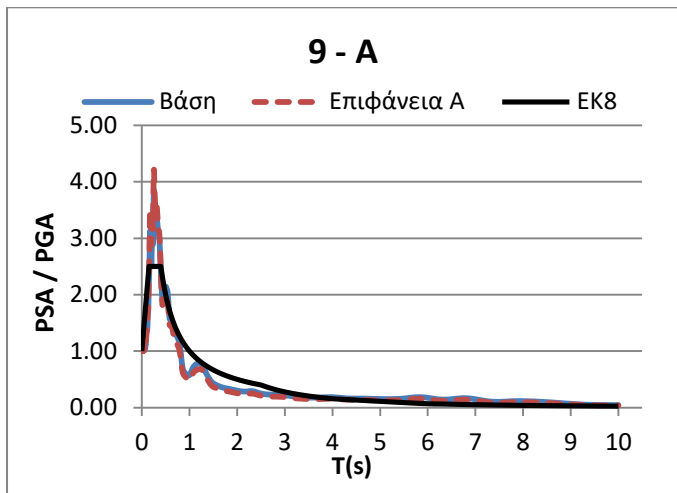
Παλμικές Κινήσεις με $T_p > 3 \text{ sec}$			
#	Σεισμικό Γεγονός	Έτος	Περίοδος $T_p$
5	Imperial Valley-06	1979	4.76
6	Imperial Valley-06	1979	4.78
7	Imperial Valley-06	1979	3.00
8	Imperial Valley-06	1979	6.23
9	Imperial Valley-06	1979	7.34
10	Imperial Valley-06	1979	5.55
11	Imperial Valley-06	1979	4.30
12	Imperial Valley-06	1979	3.76
13	Imperial Valley-06	1979	3.89
14	Imperial Valley-06	1979	3.49
15	Imperial Valley-06	1979	5.07
16	Imperial Valley-06	1979	5.90
17	Imperial Valley-06	1979	4.24
20	Westmorland	1980	3.00
36	Loma Prieta	1989	5.93
39	Landers	1992	7.58
40	Landers	1992	4.56
41	Landers	1992	7.33
47	Northridge-01	1994	8.35
51	Northridge-01	1994	3.06
55	Kocaeli, Turkey	1999	4.47
58	Chi-chi, Taiwan	1999	5.58
60	Chi-chi, Taiwan	1999	5.71
61	Chi-chi, Taiwan	1999	5.33
62	Chi-chi, Taiwan	1999	7.10
63	Chi-chi, Taiwan	1999	5.25
64	Chi-chi, Taiwan	1999	5.91
65	Chi-chi, Taiwan	1999	5.68
66	Chi-chi, Taiwan	1999	7.19
67	Chi-chi, Taiwan	1999	7.57
68	Chi-chi, Taiwan	1999	11.47
69	Chi-chi, Taiwan	1999	9.80
70	Chi-chi, Taiwan	1999	9.52
71	Chi-chi, Taiwan	1999	11.74
72	Chi-chi, Taiwan	1999	11.46
73	Chi-chi, Taiwan	1999	4.72
74	Chi-chi, Taiwan	1999	12.05
75	Chi-chi, Taiwan	1999	5.51
76	Chi-chi, Taiwan	1999	5.37
77	Chi-chi, Taiwan	1999	7.88
78	Chi-chi, Taiwan	1999	9.14
79	Chi-chi, Taiwan	1999	5.51
80	Chi-chi, Taiwan	1999	9.51
81	Chi-chi, Taiwan	1999	9.30
82	Chi-chi, Taiwan	1999	8.17
83	Chi-chi, Taiwan	1999	11.01
84	Chi-chi, Taiwan	1999	7.44
85	Chi-chi, Taiwan	1999	10.56

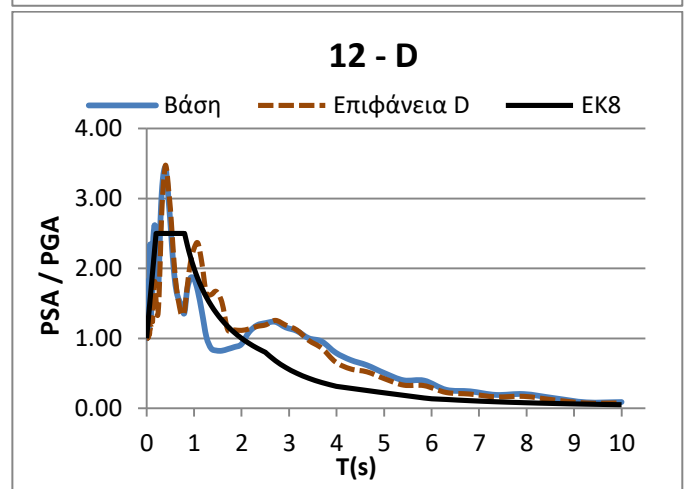
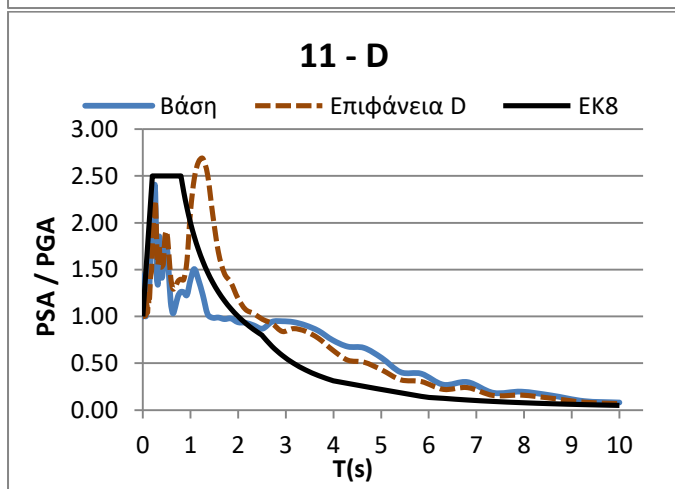
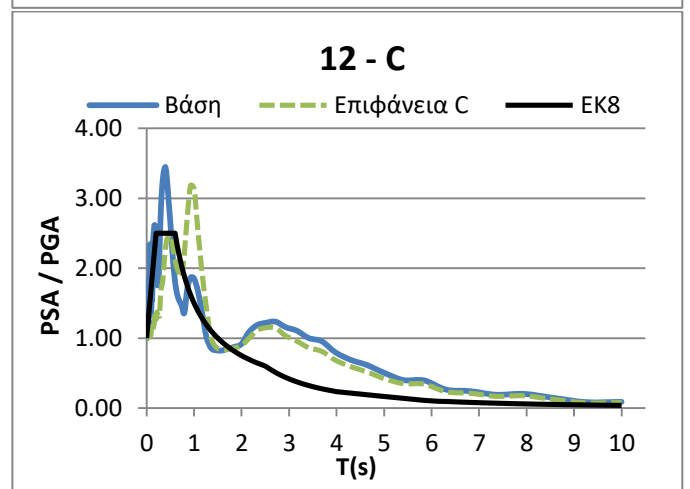
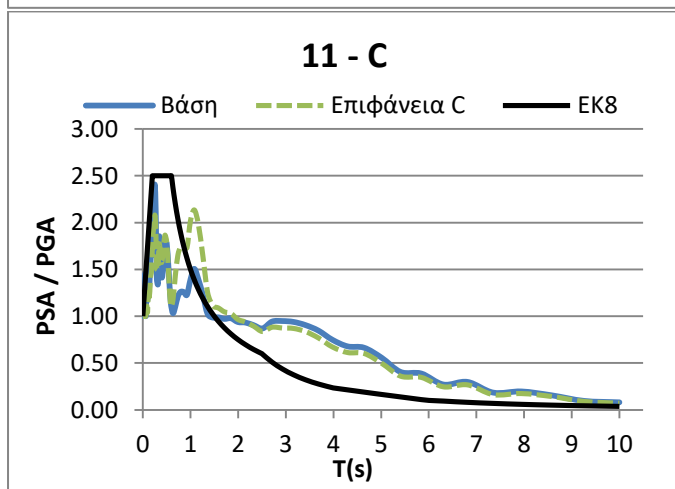
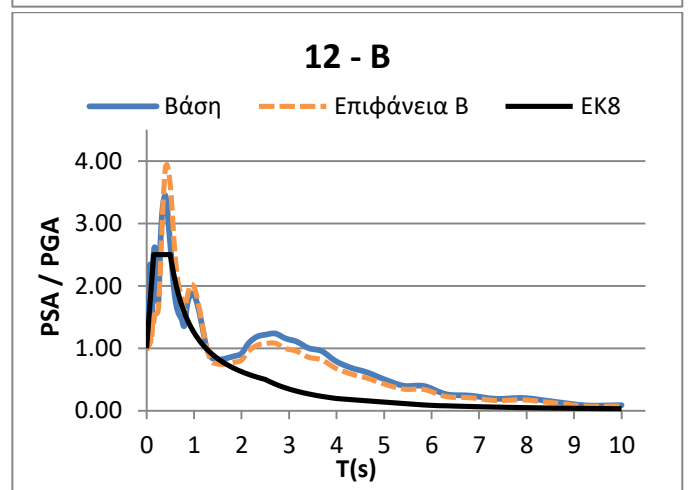
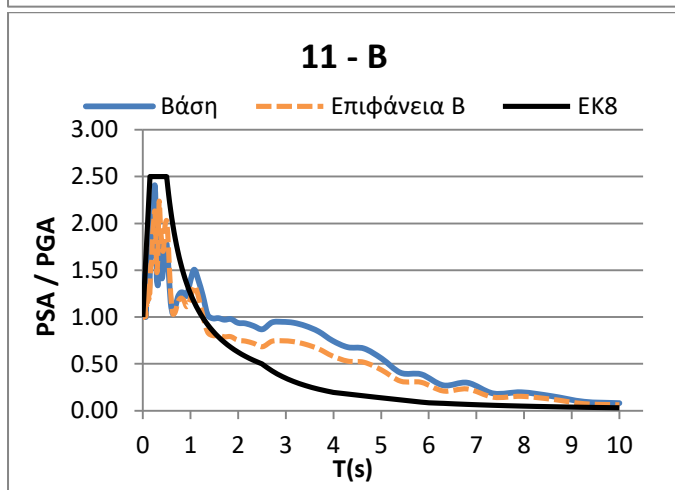
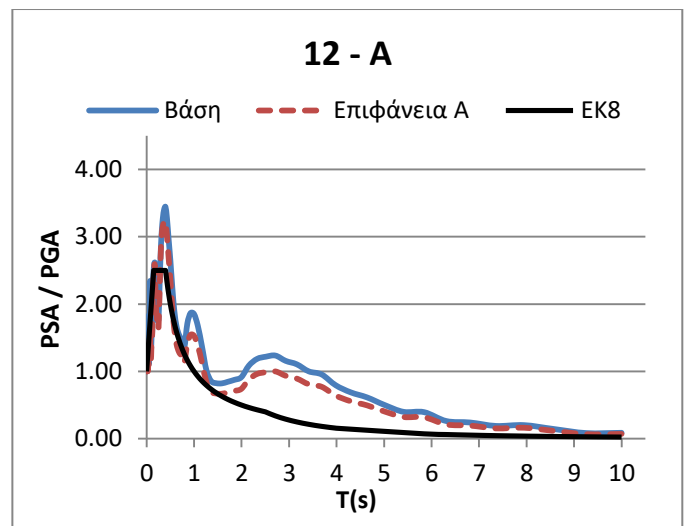
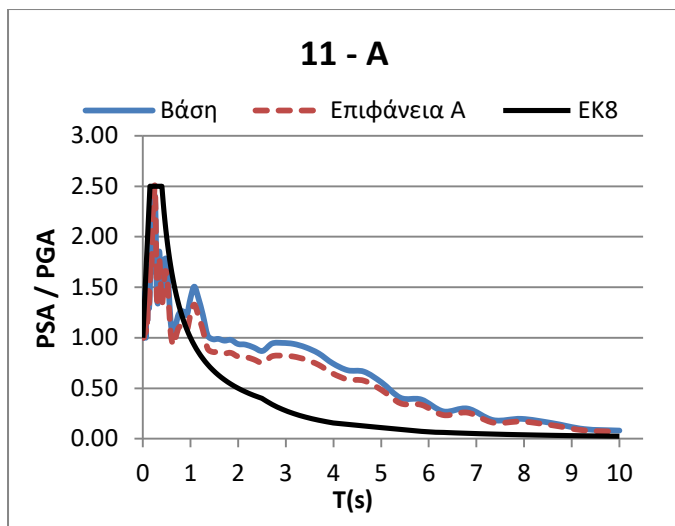


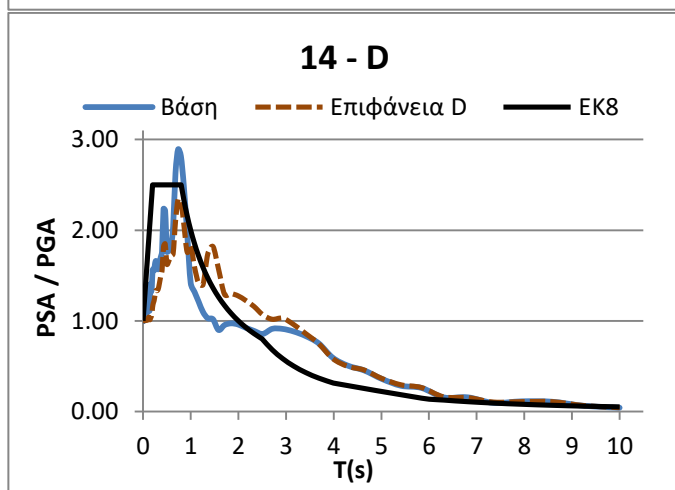
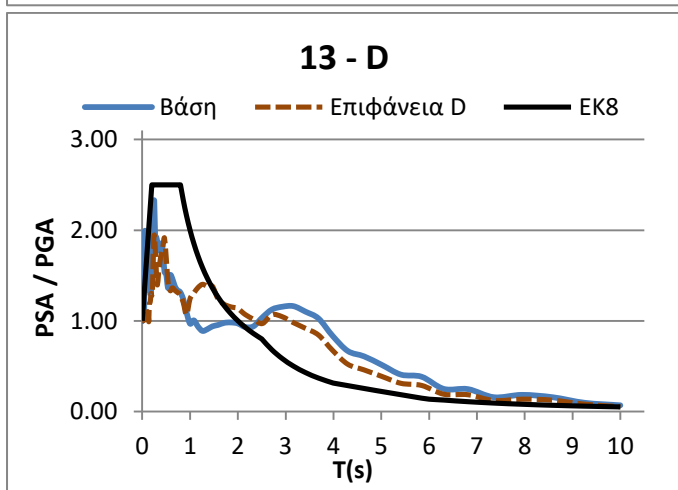
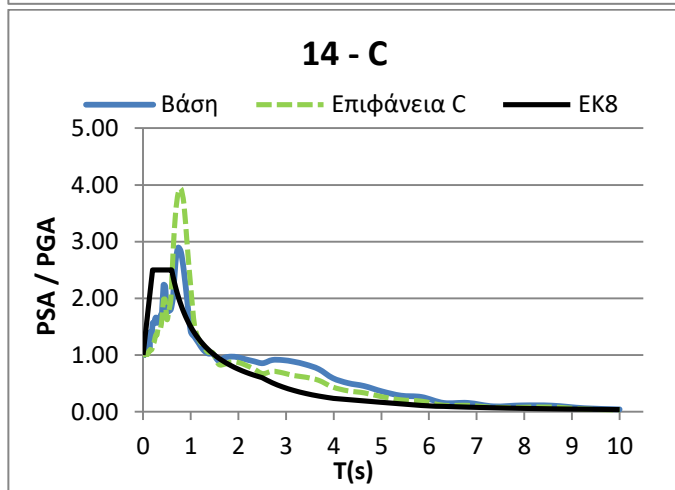
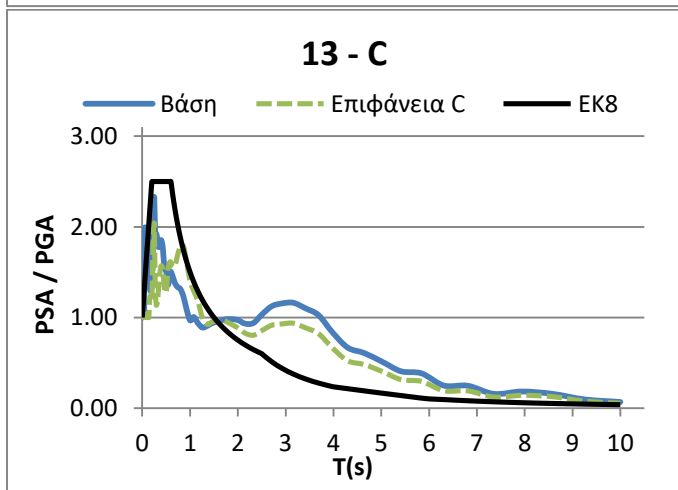
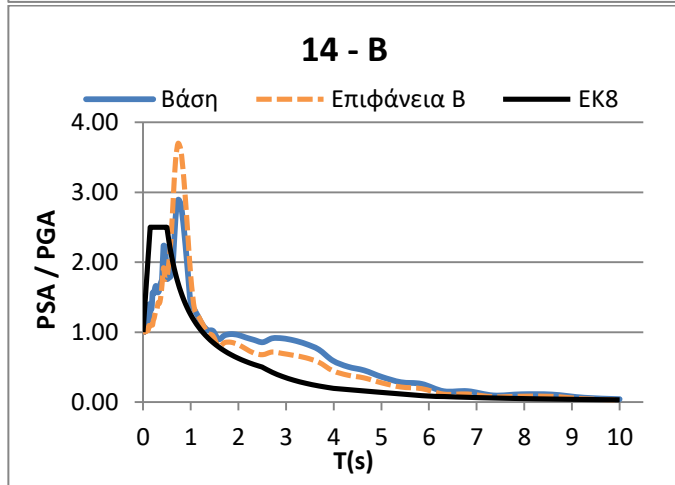
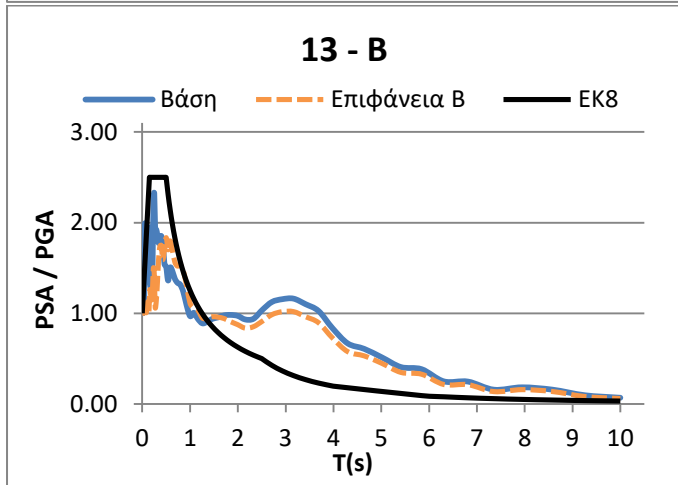
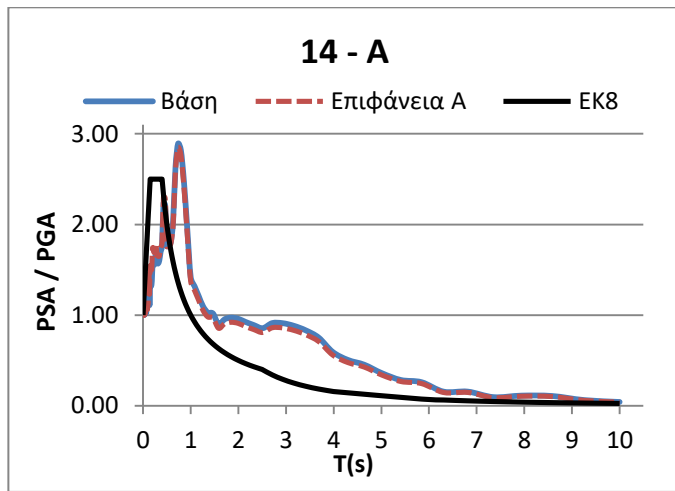
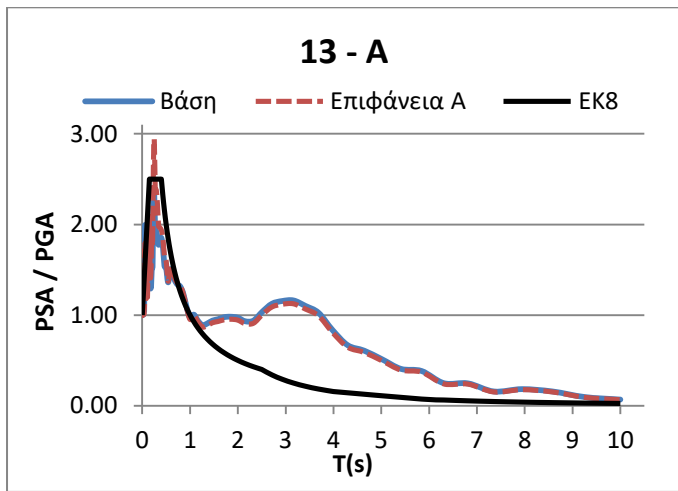


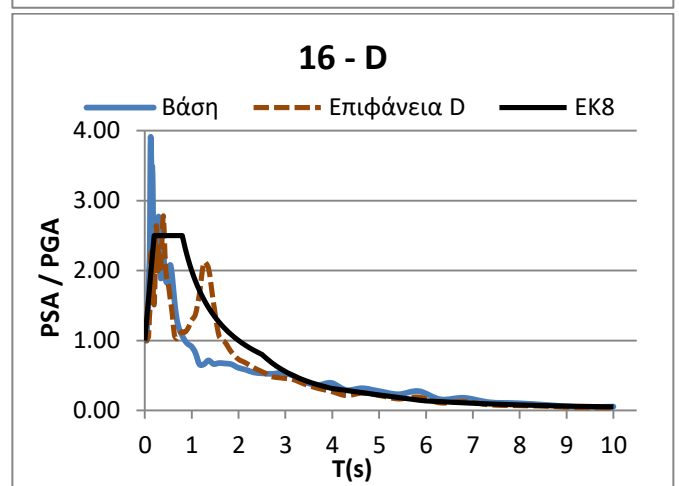
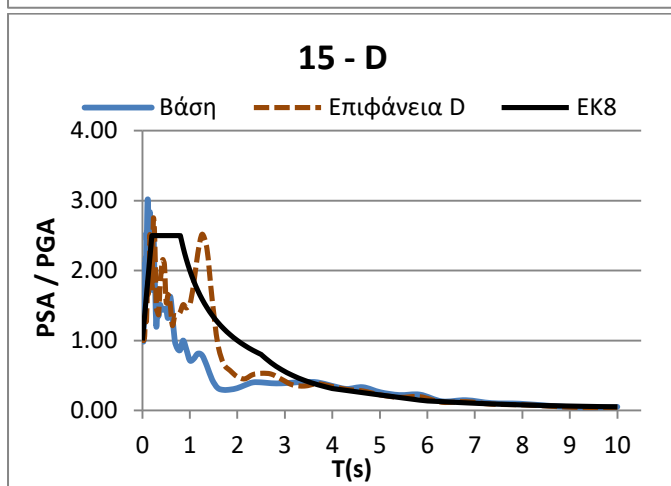
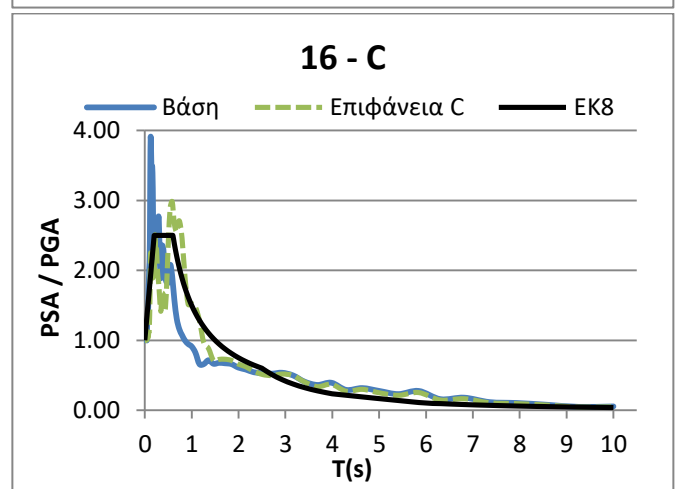
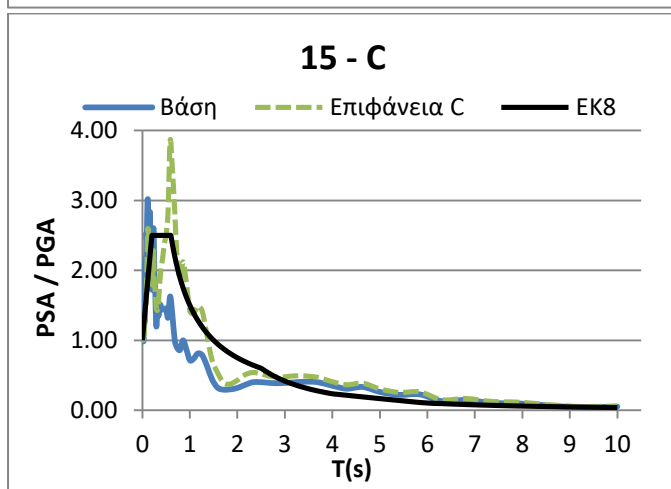
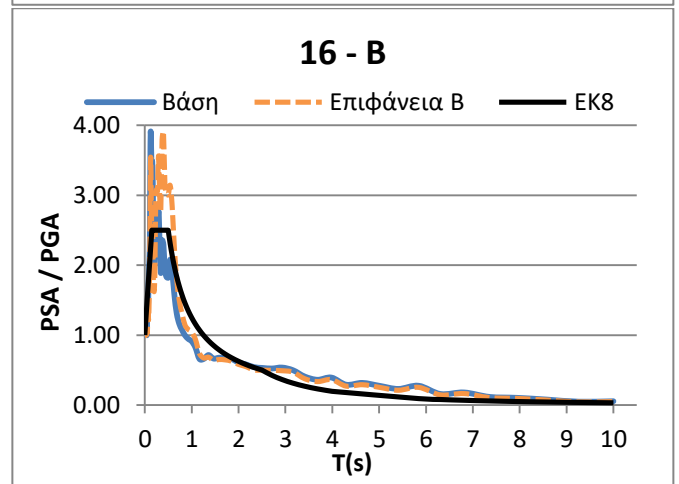
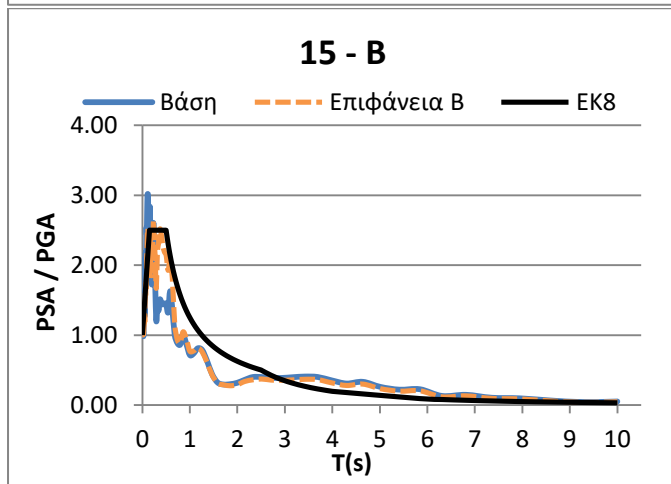
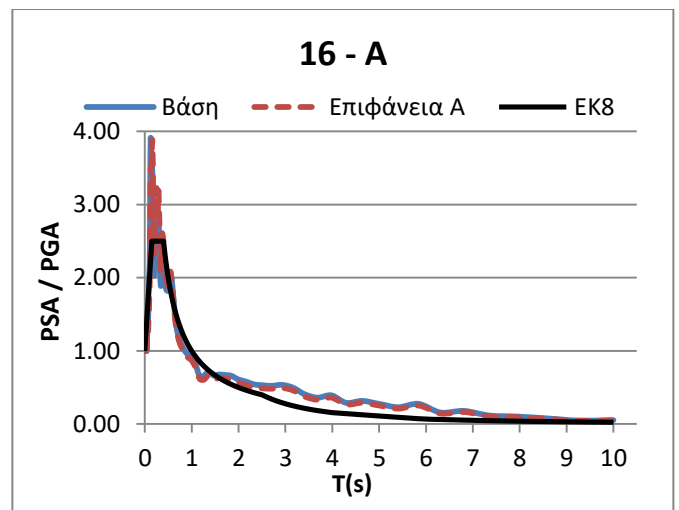
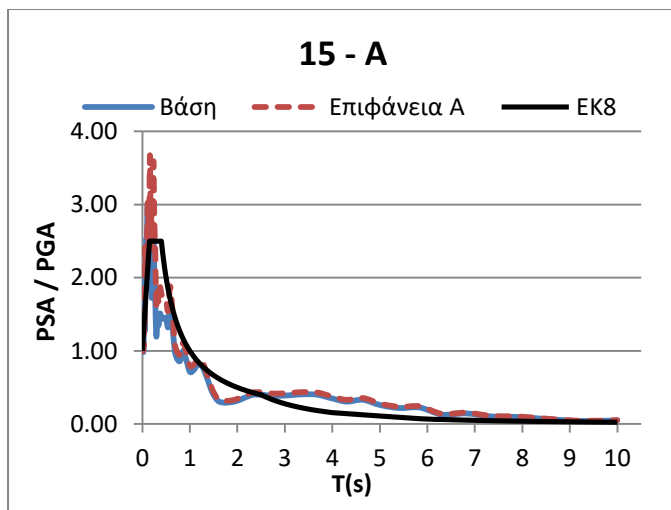


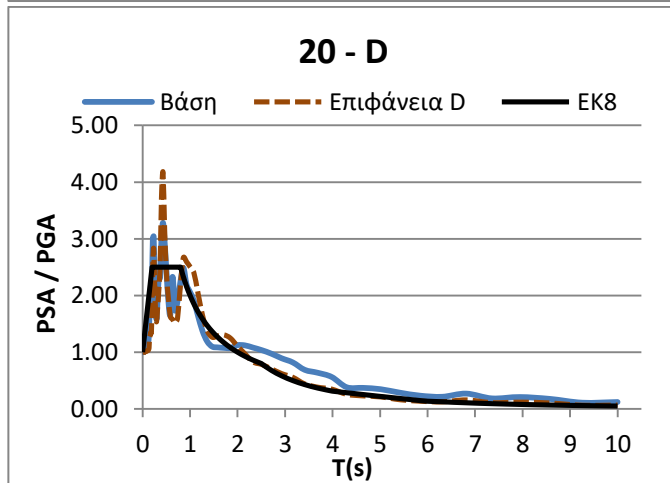
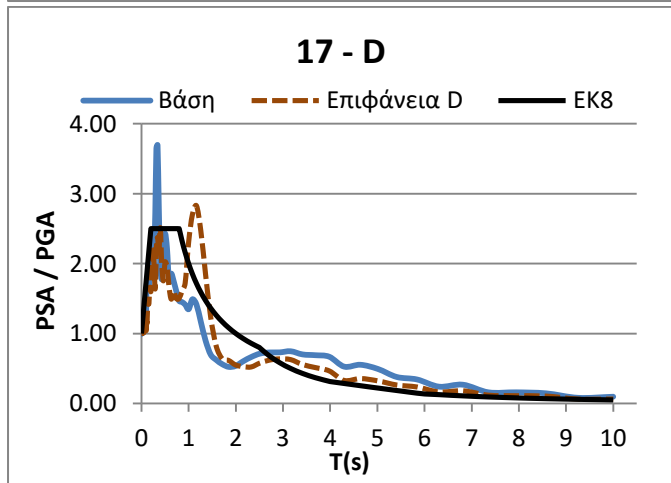
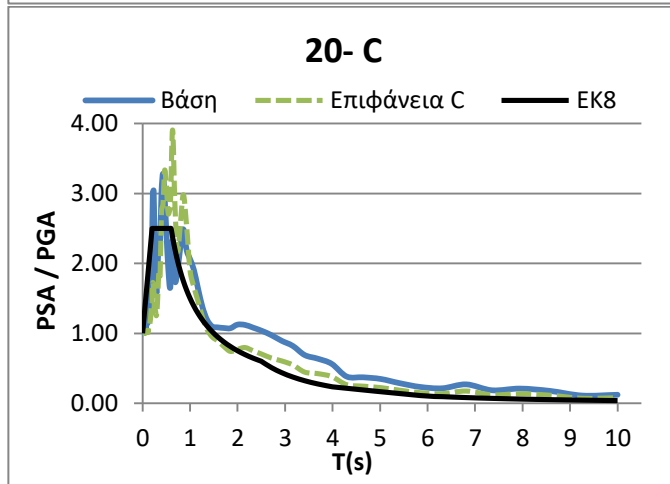
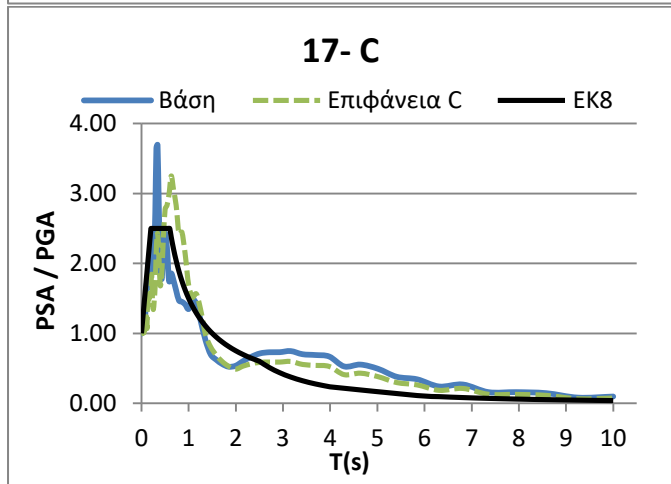
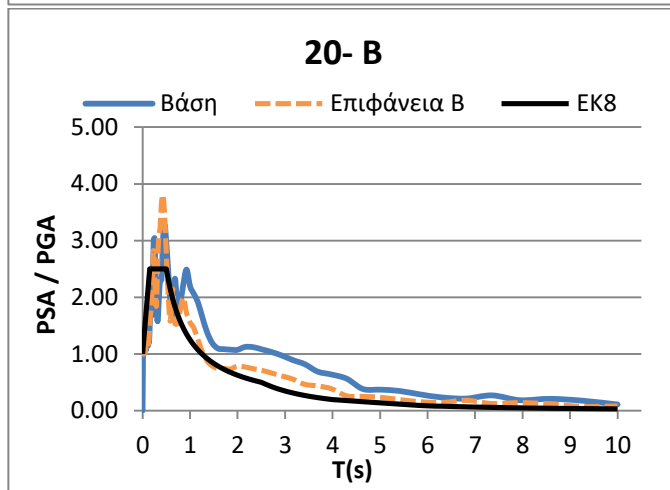
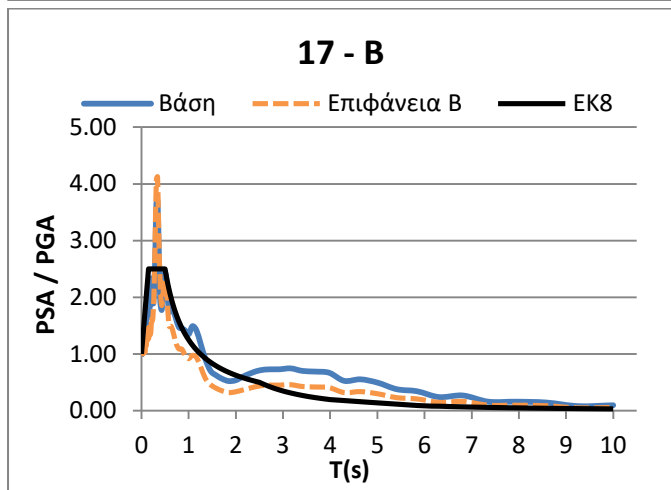
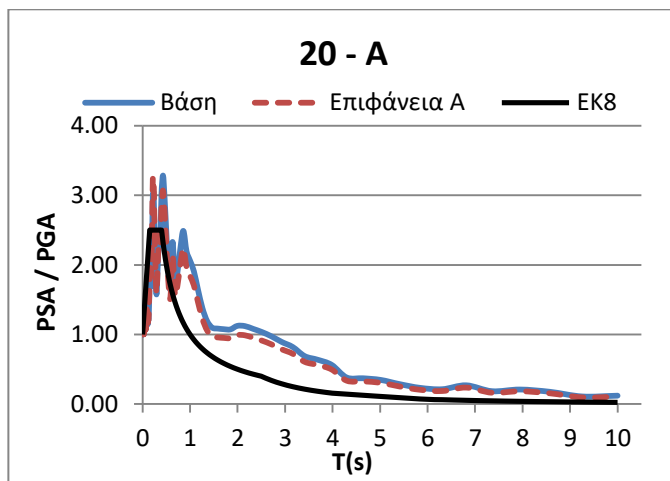
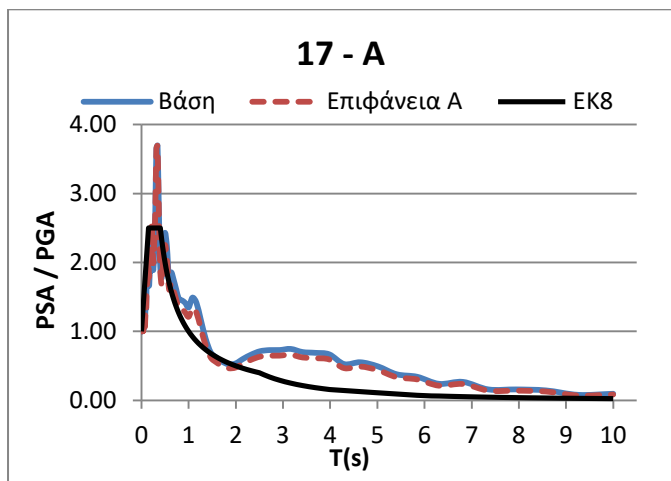


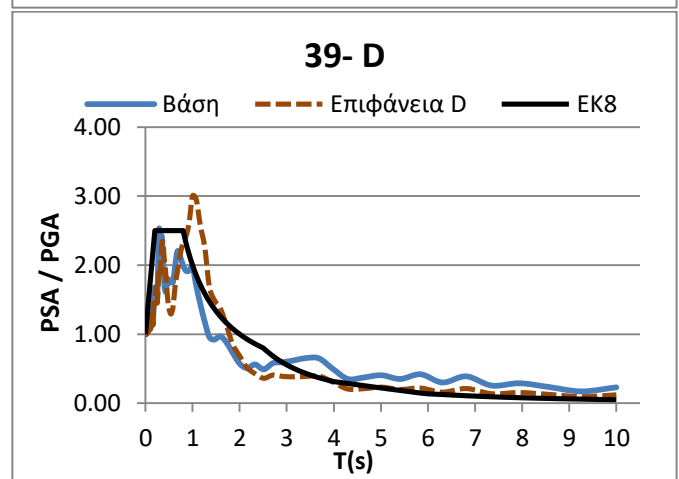
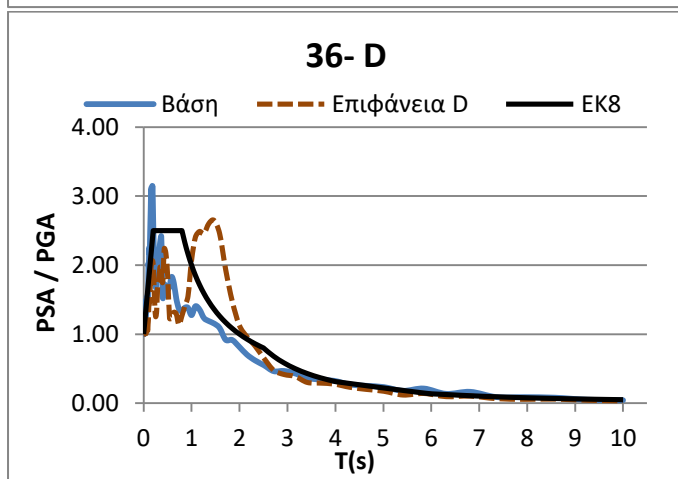
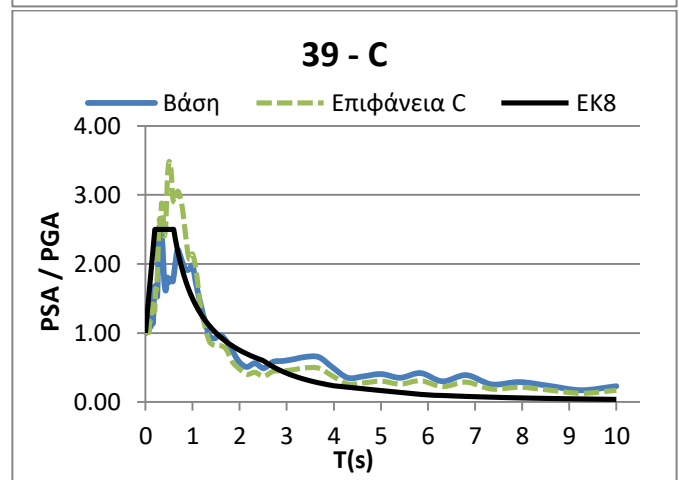
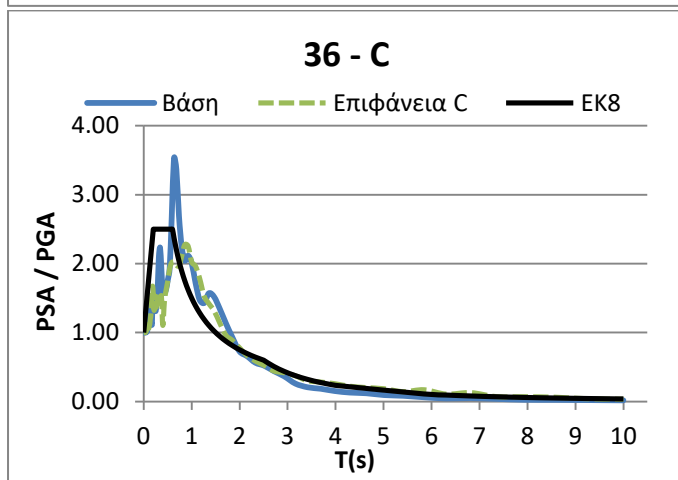
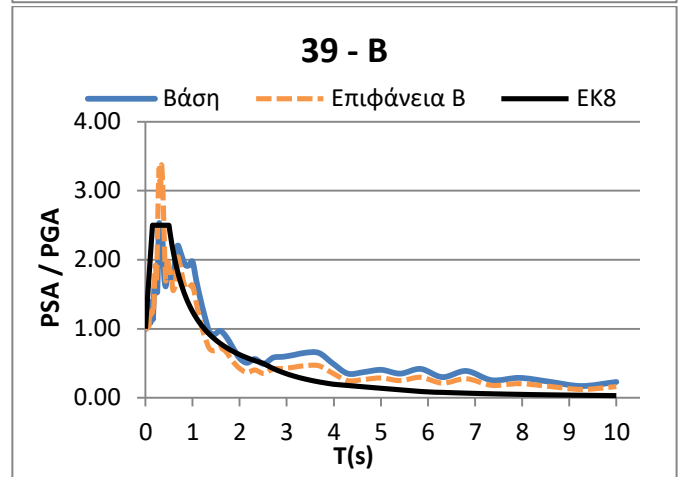
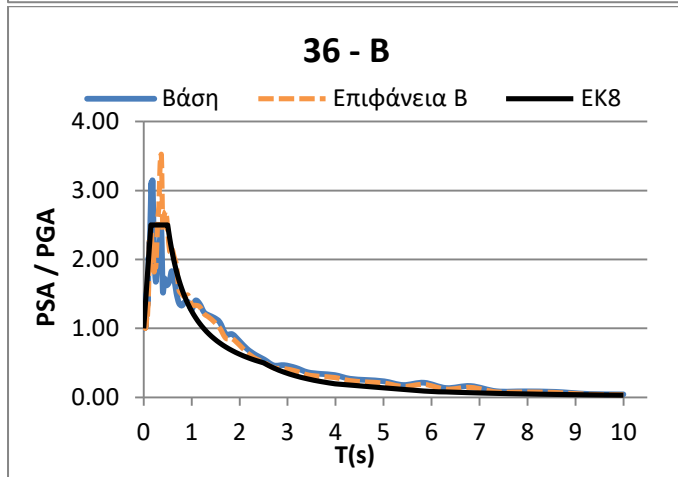
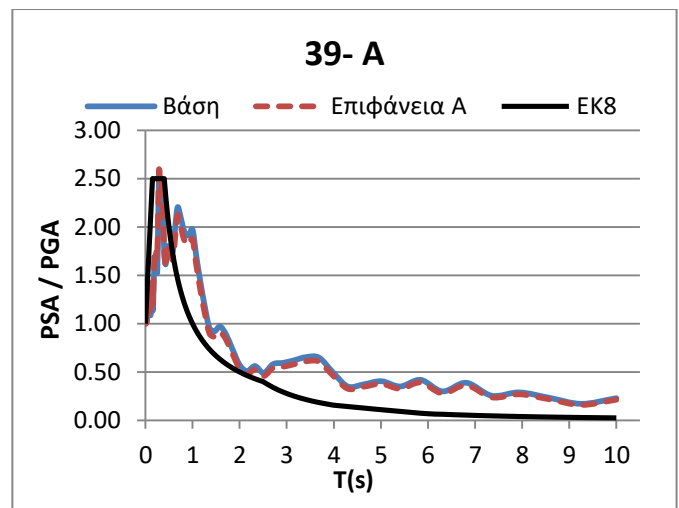
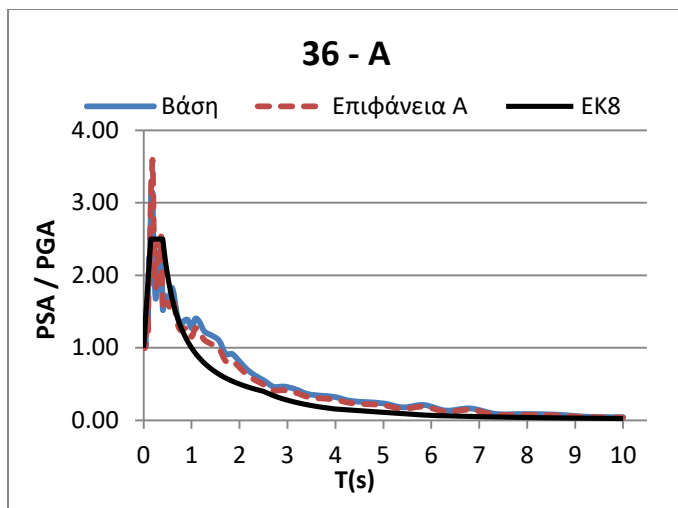




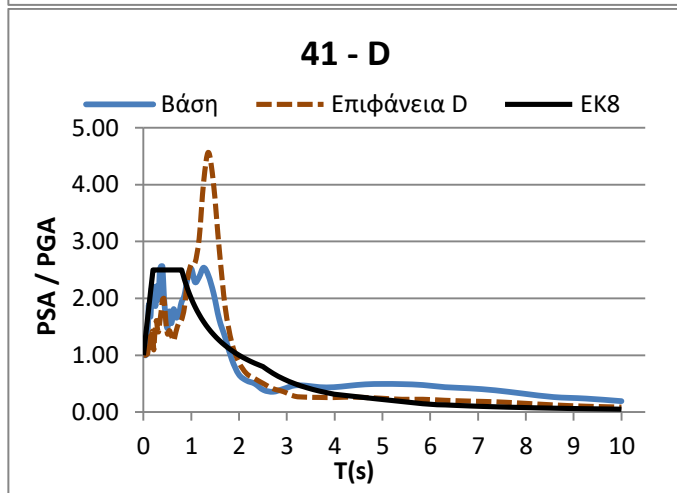
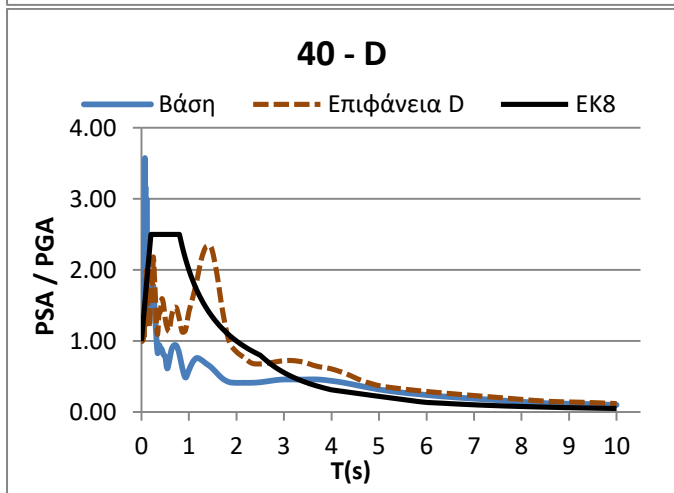
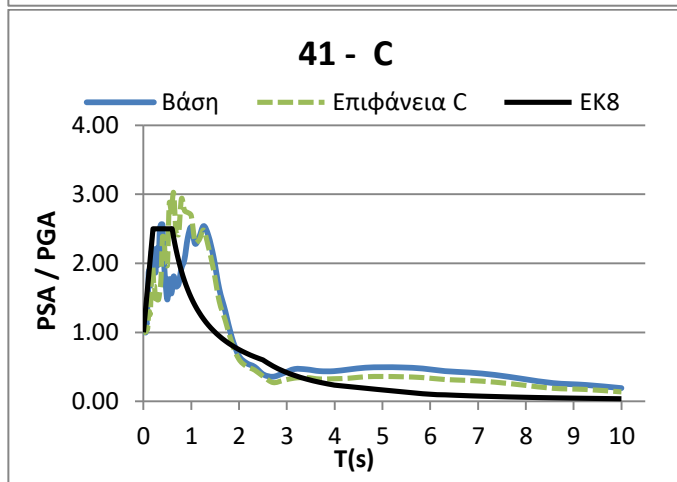
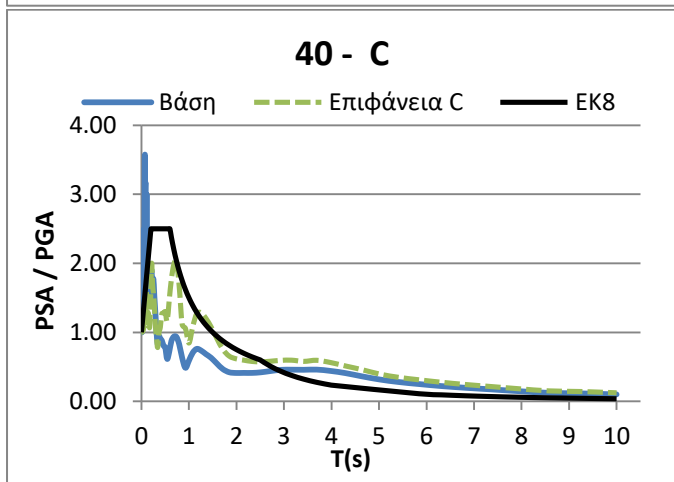
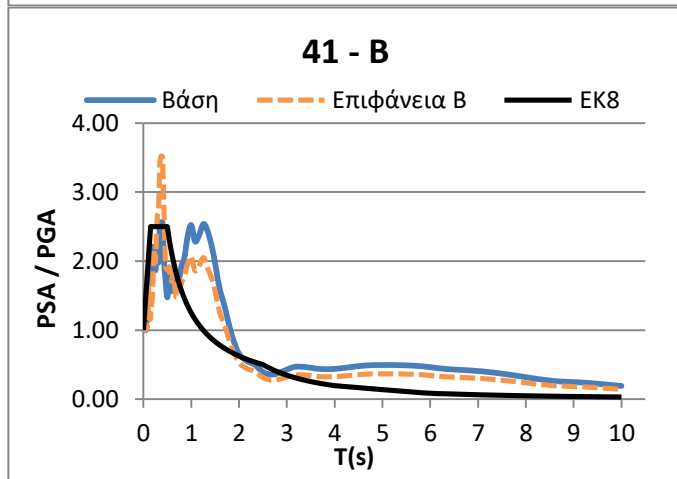
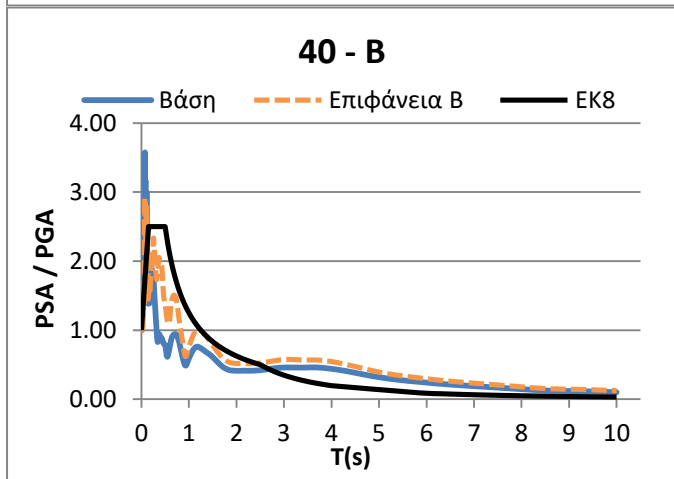
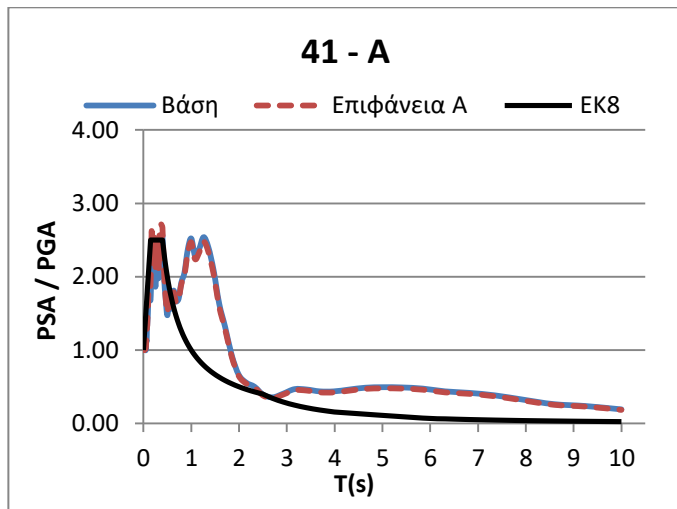
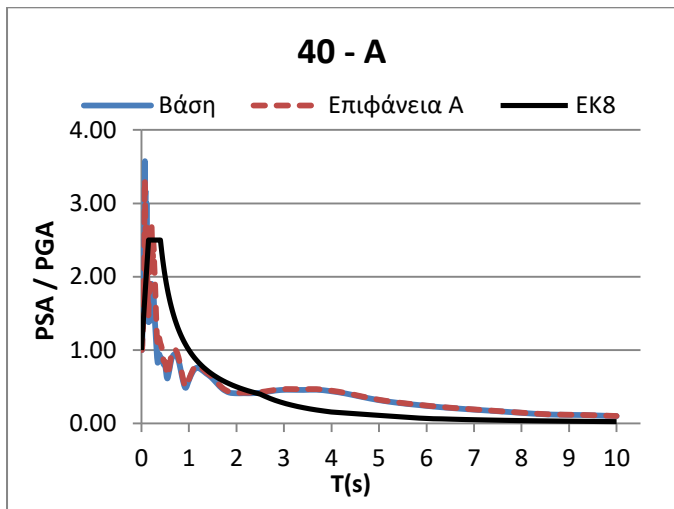


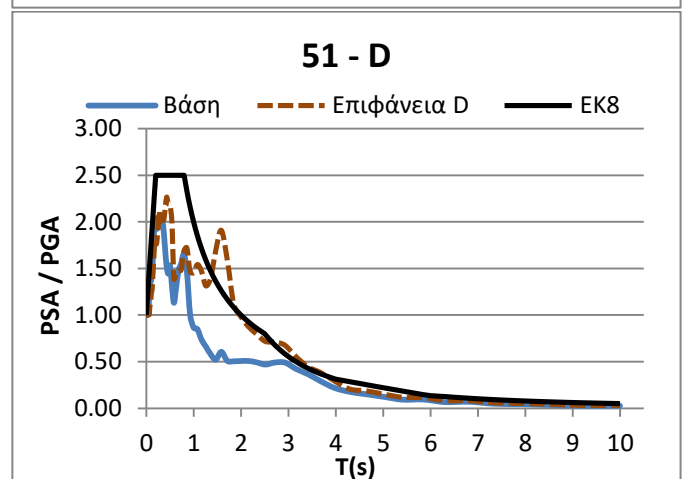
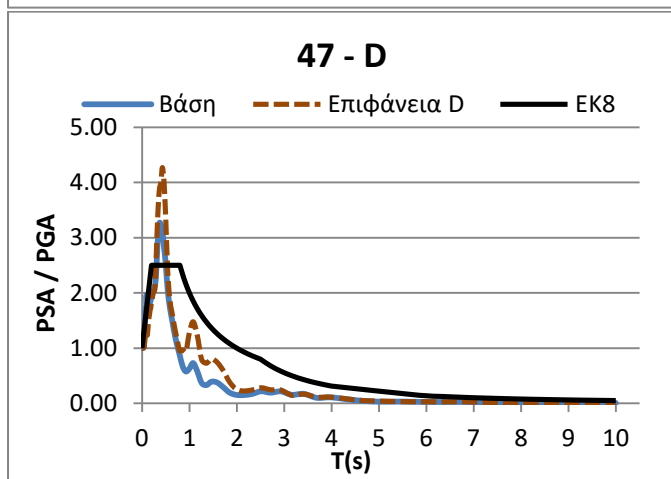
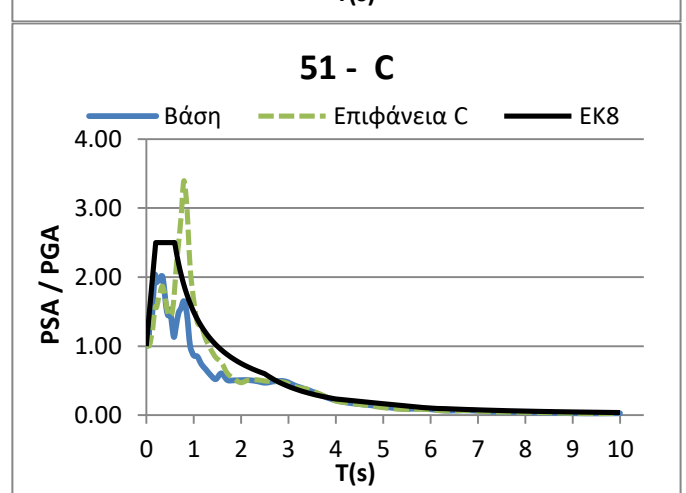
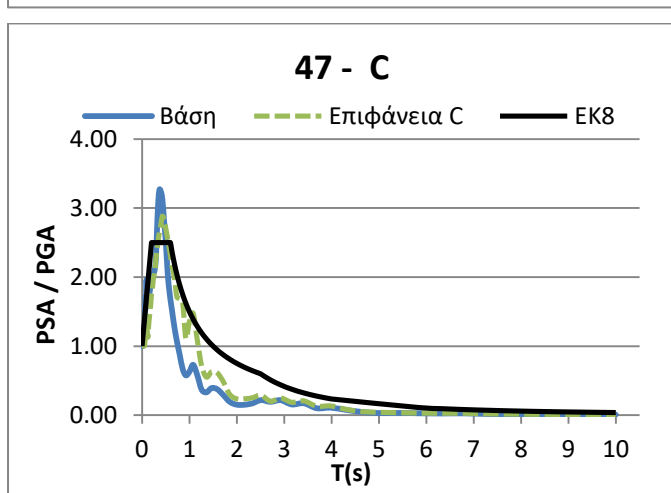
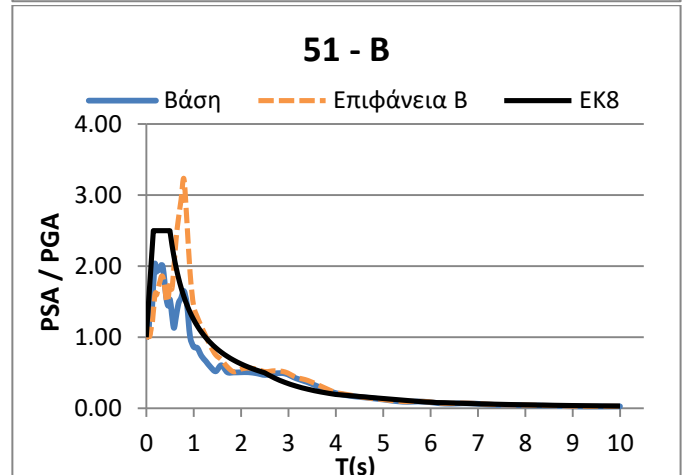
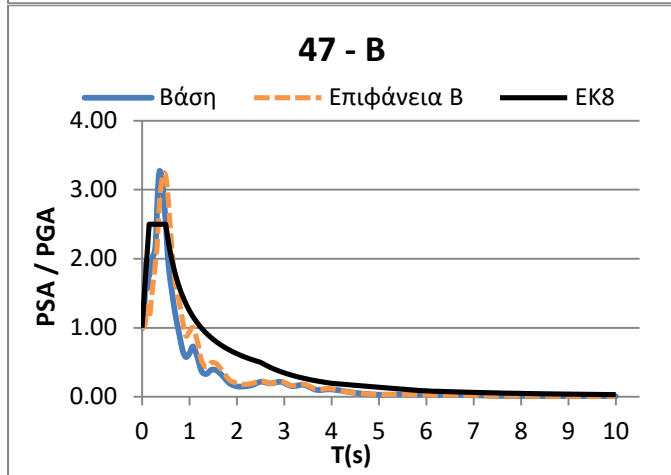
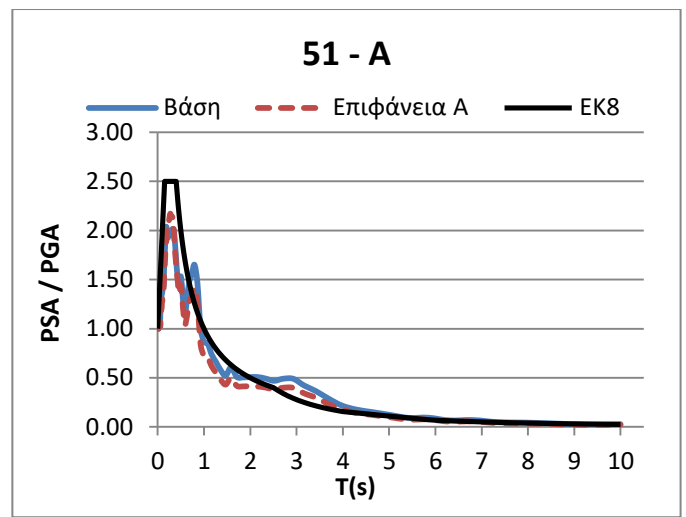
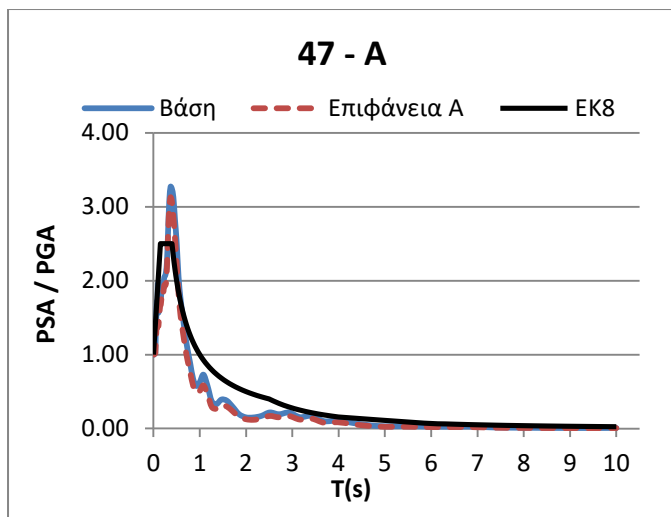


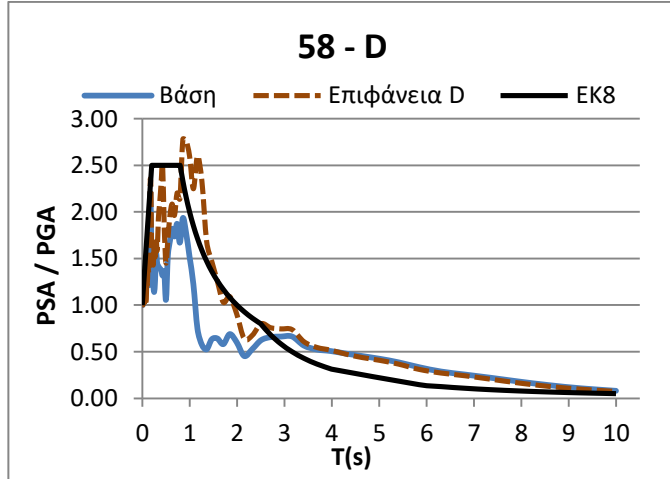
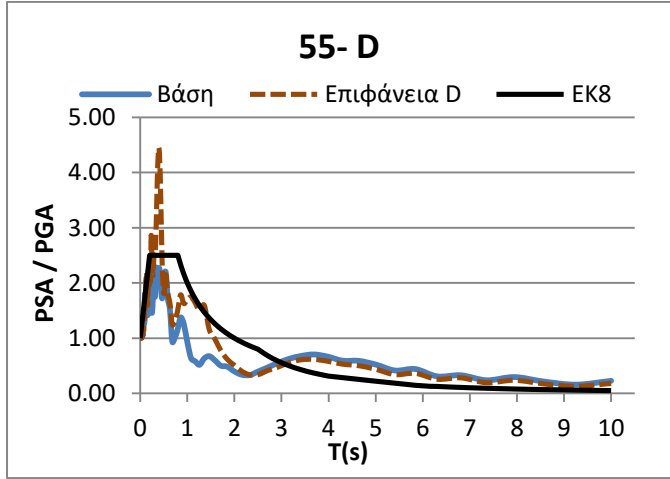
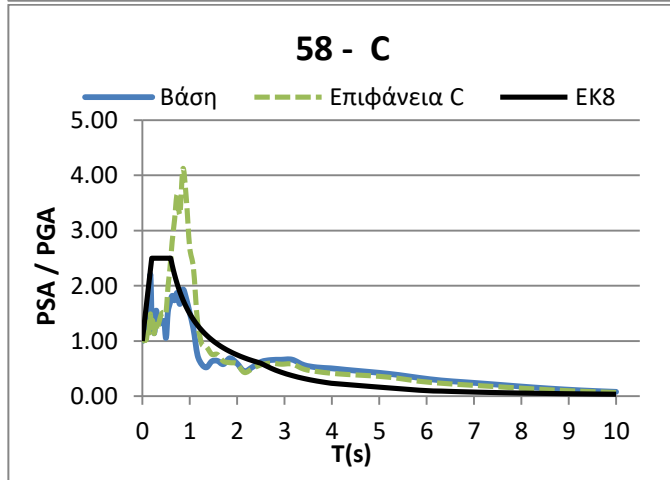
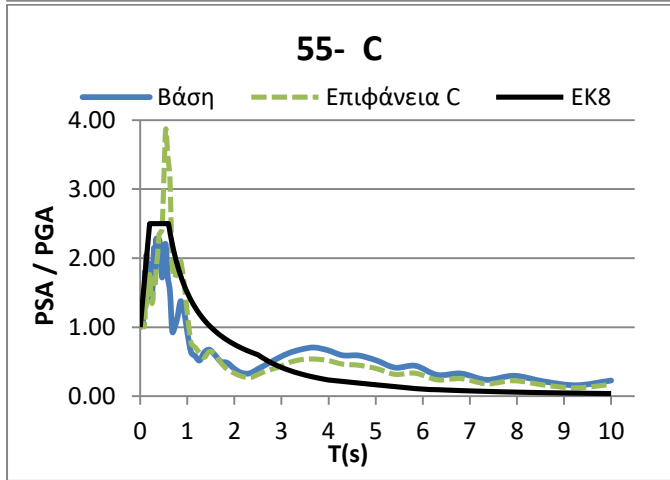
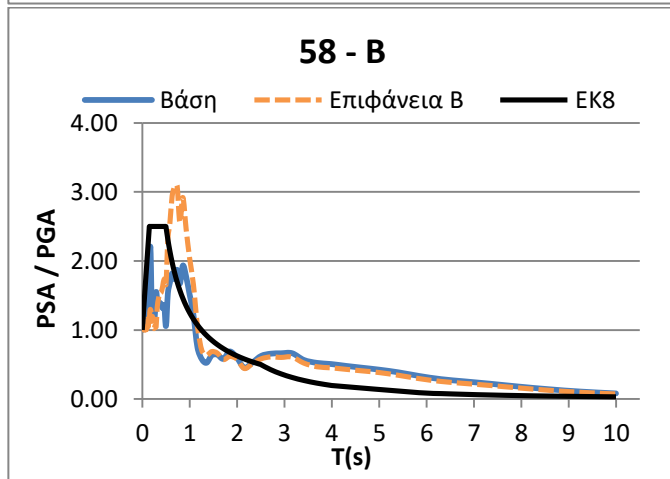
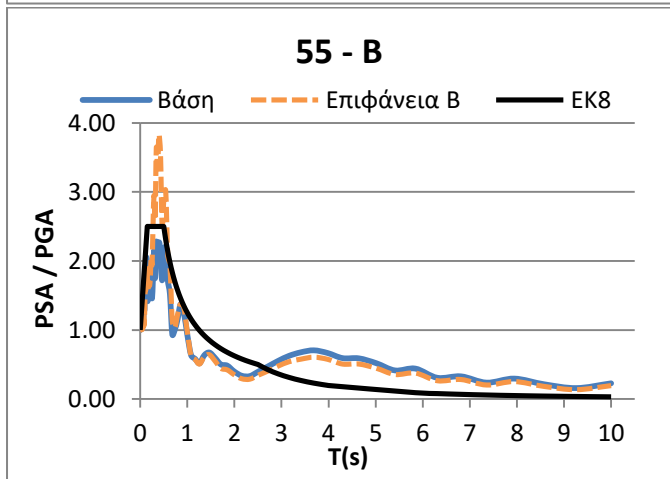
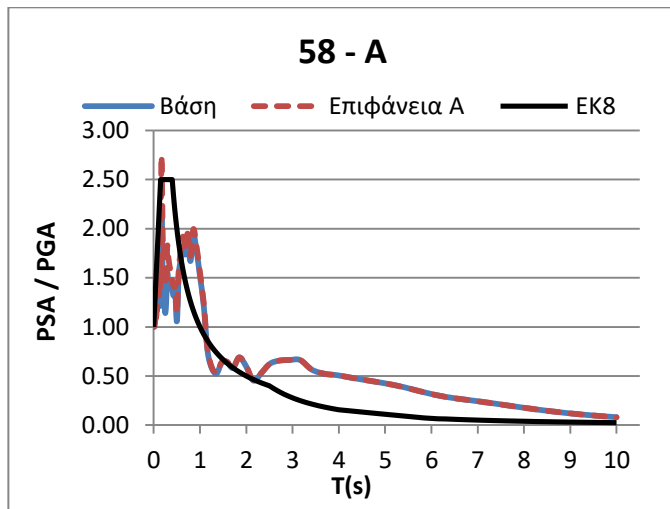
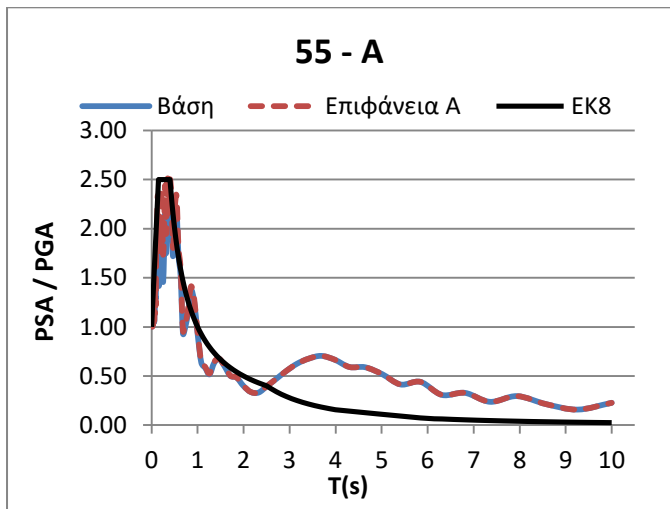


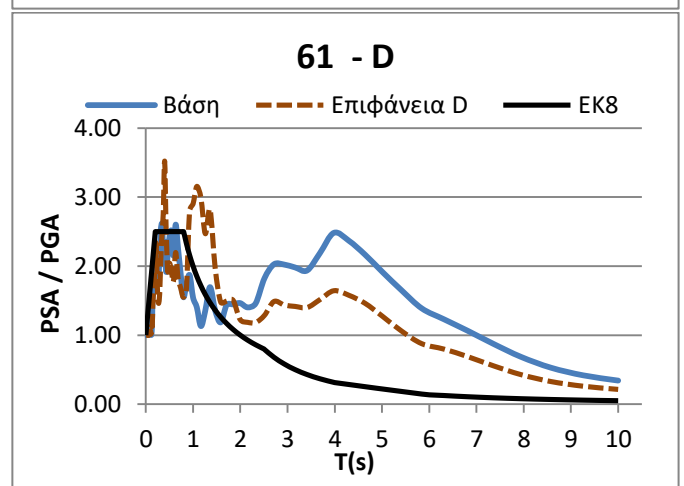
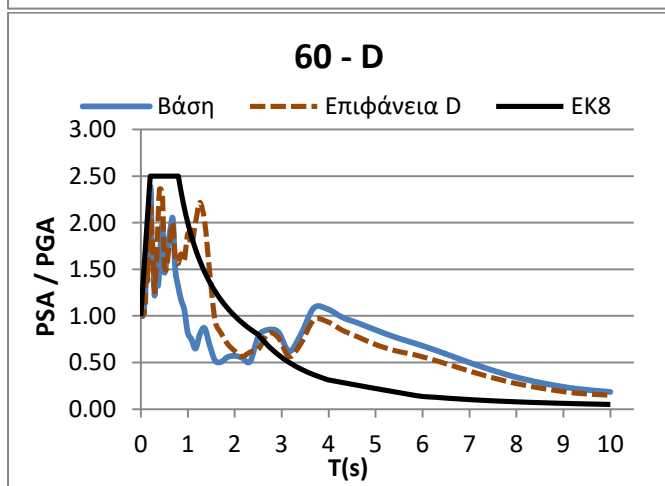
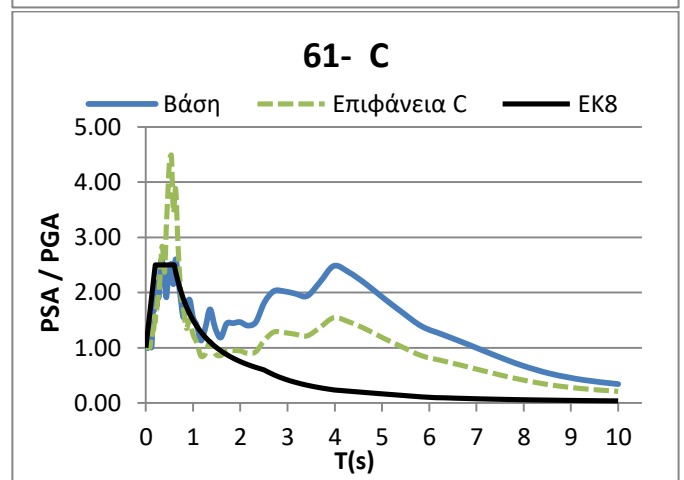
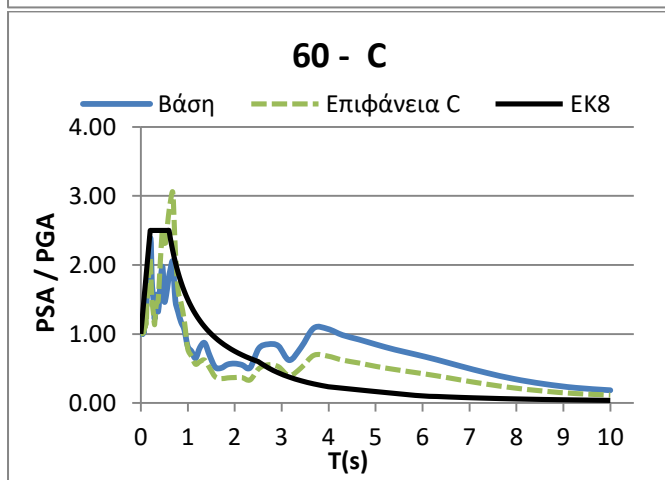
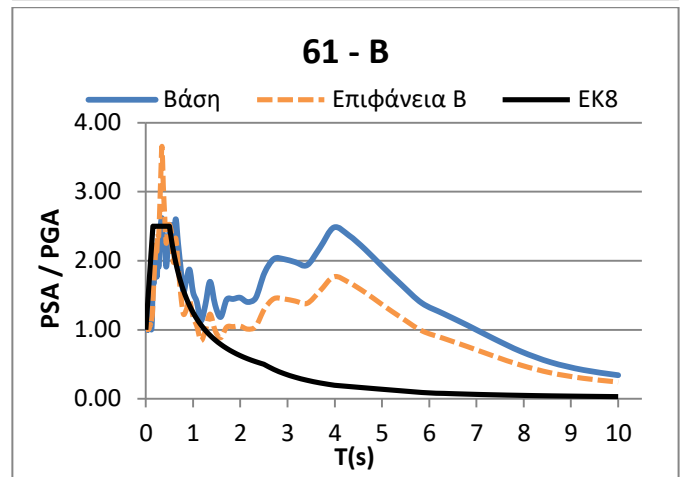
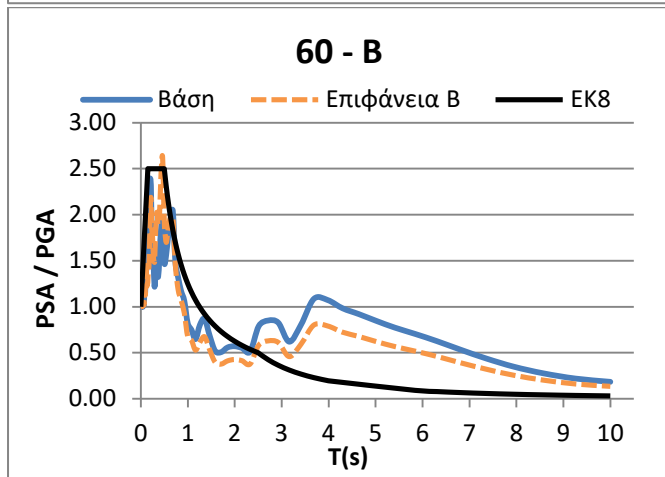
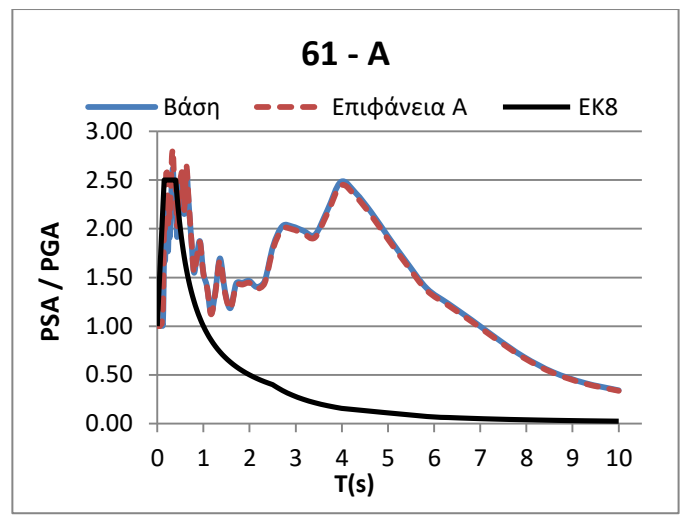
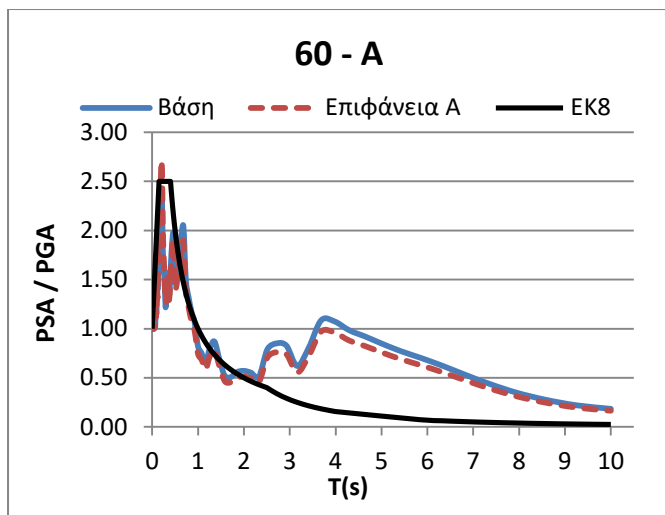


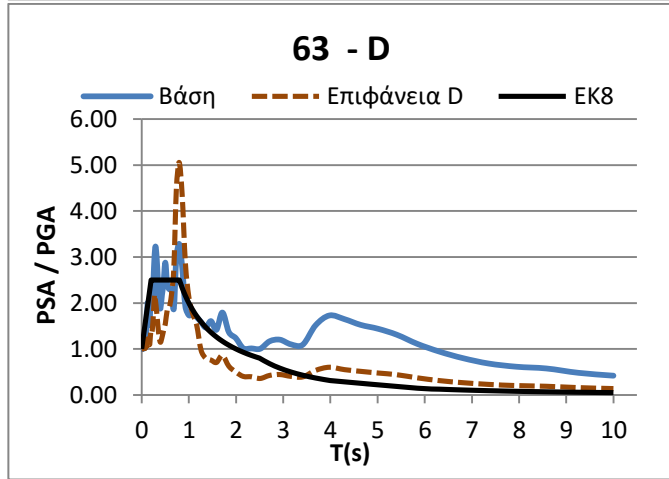
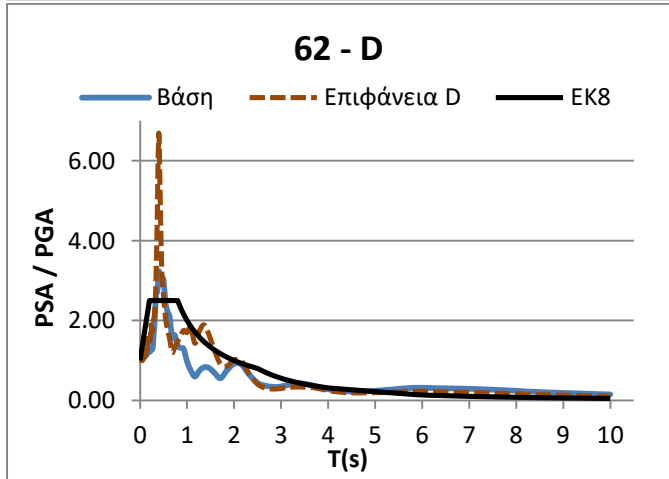
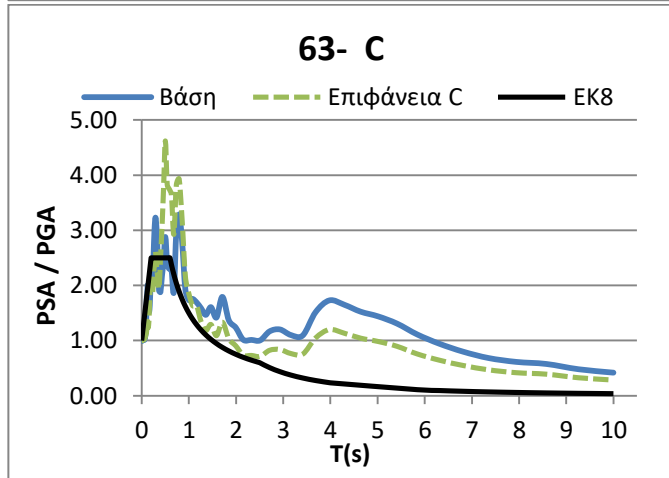
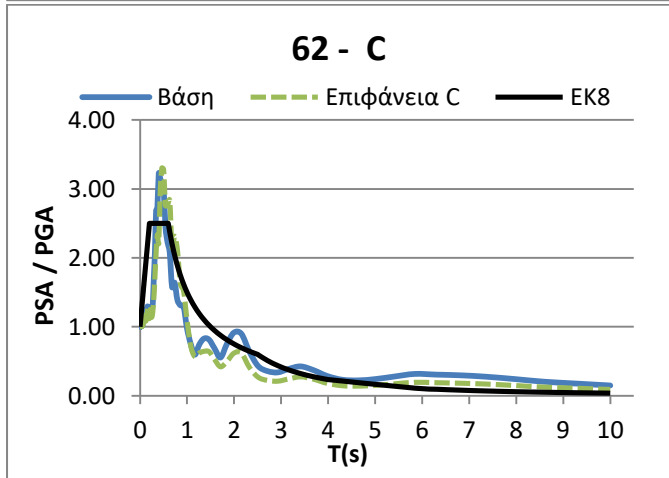
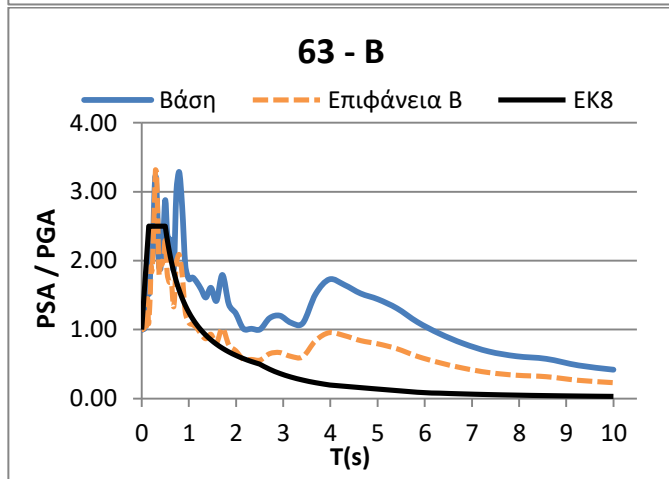
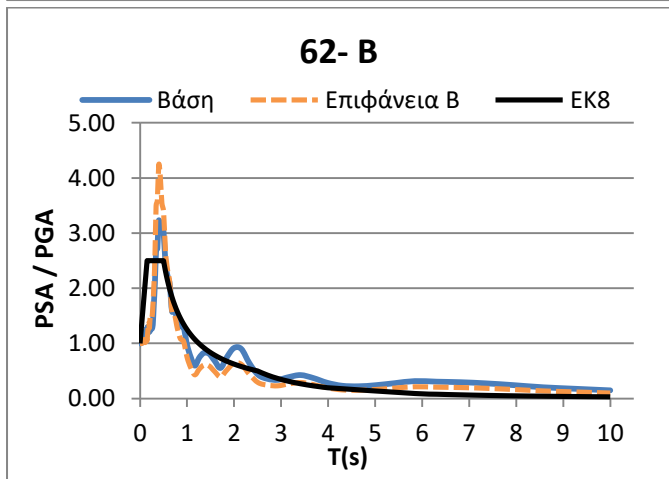
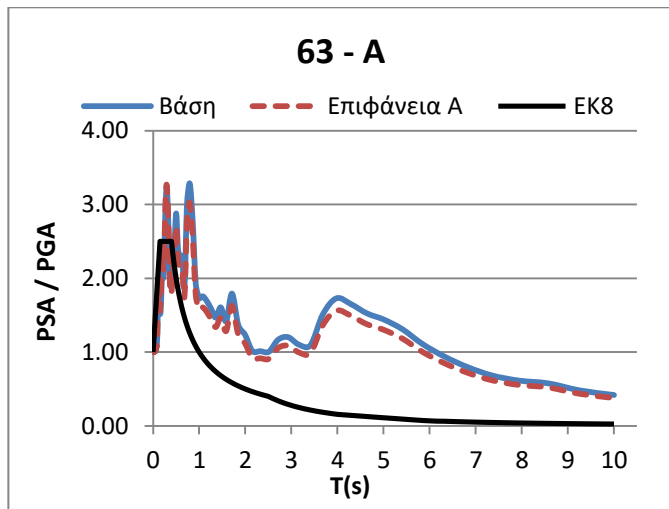
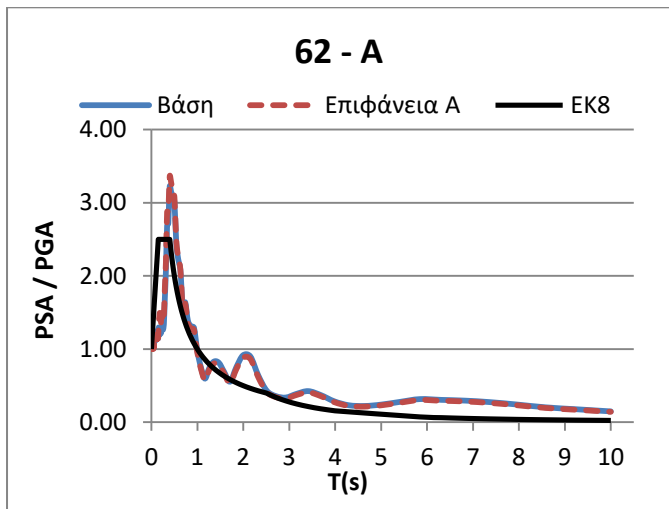


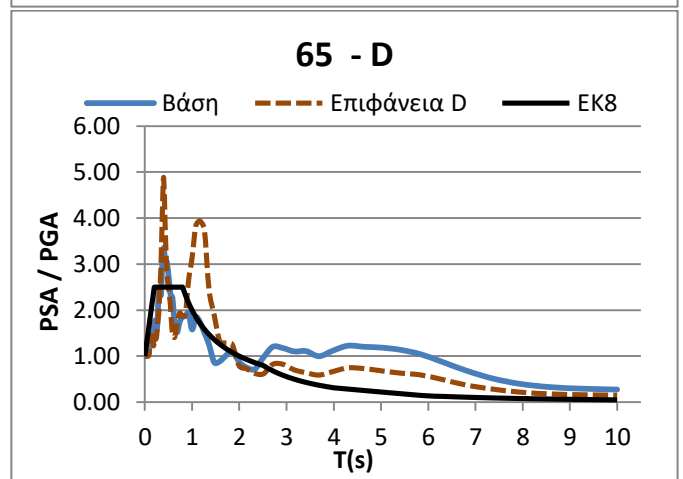
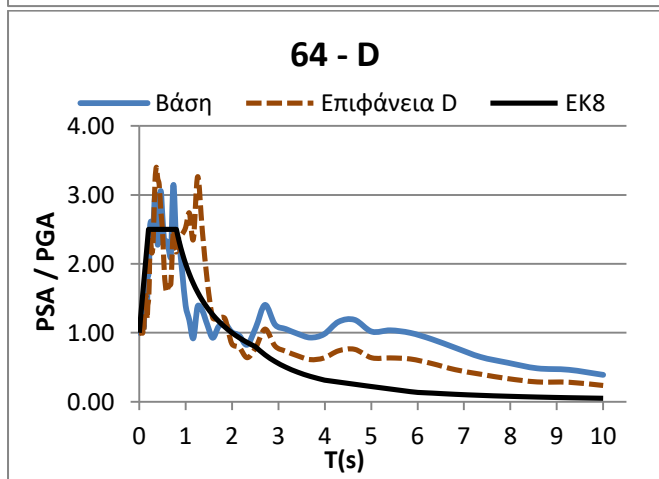
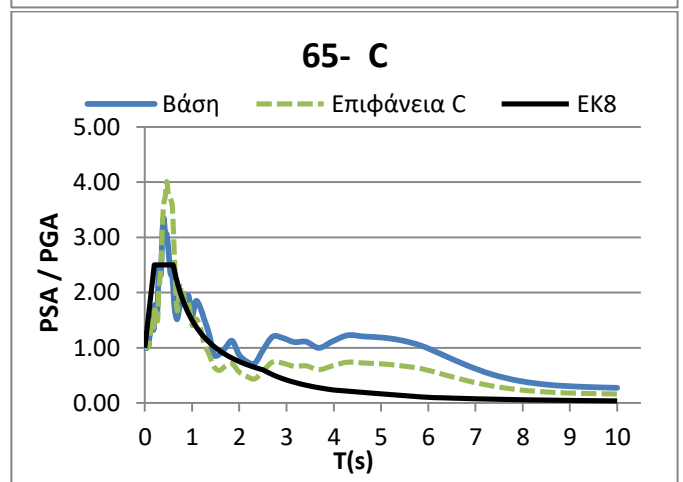
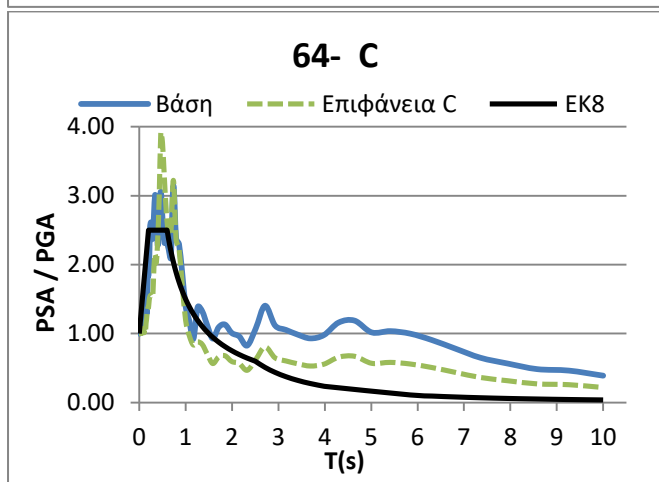
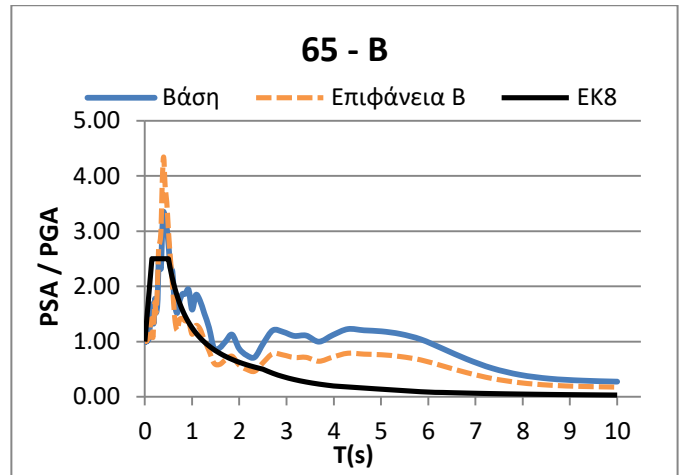
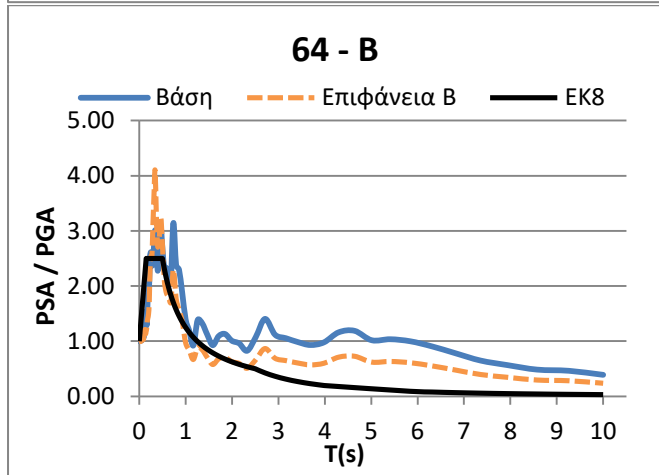
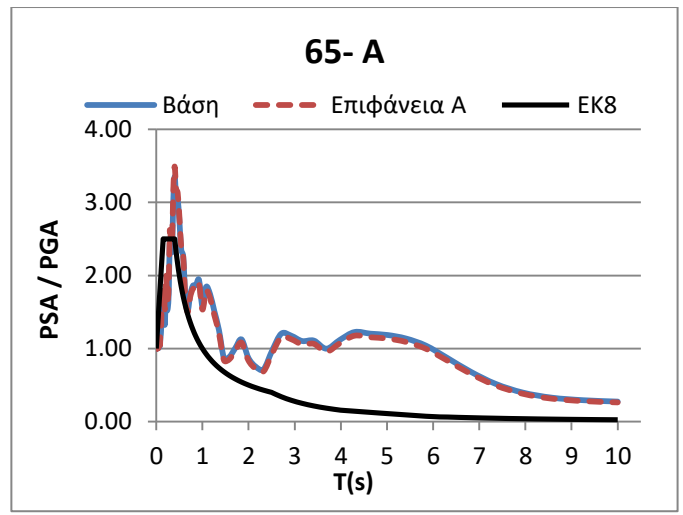
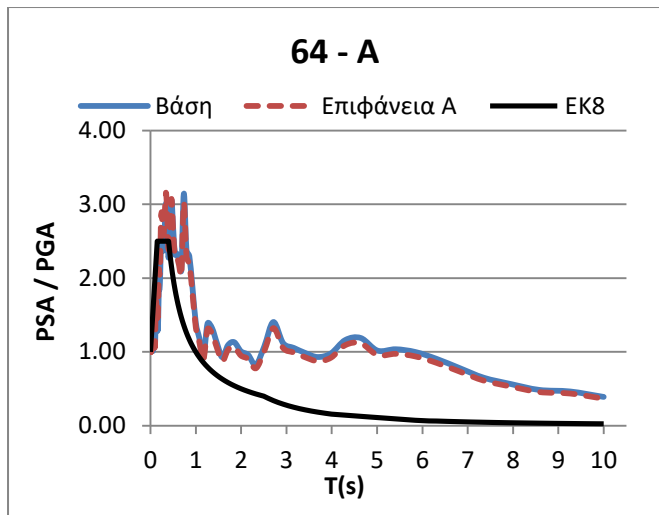


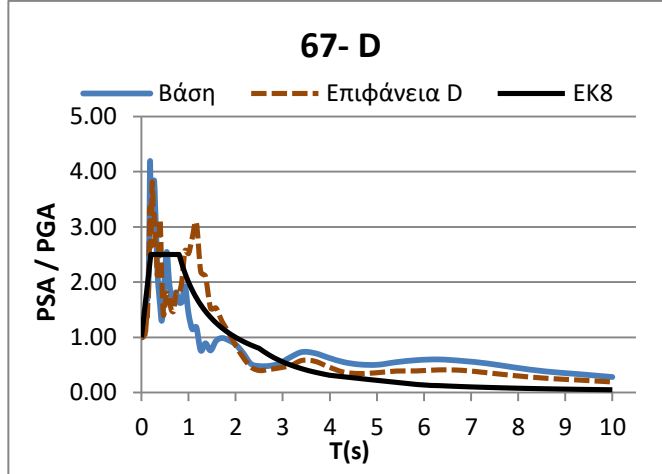
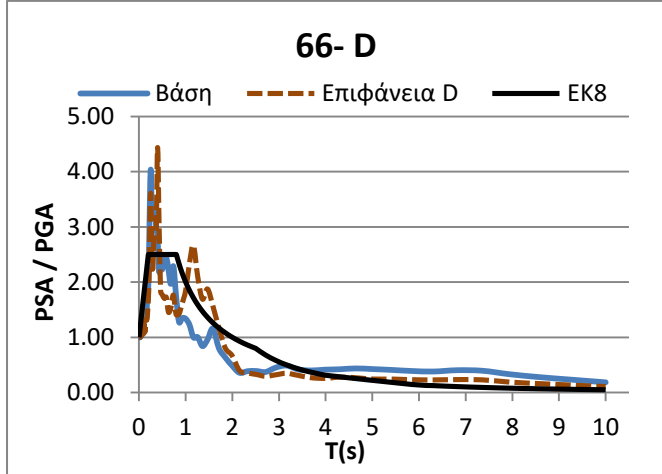
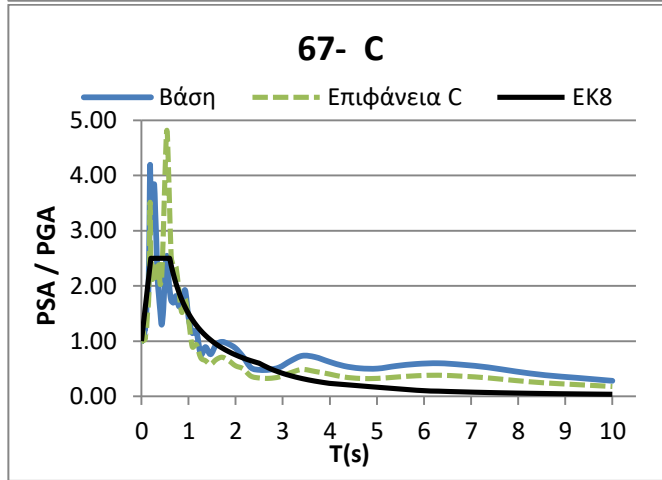
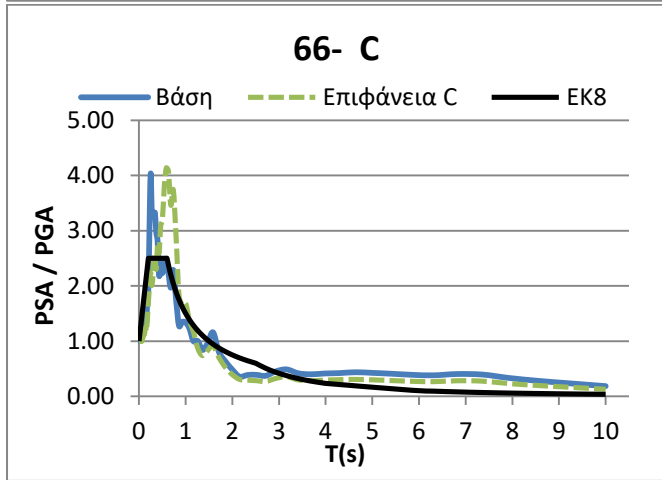
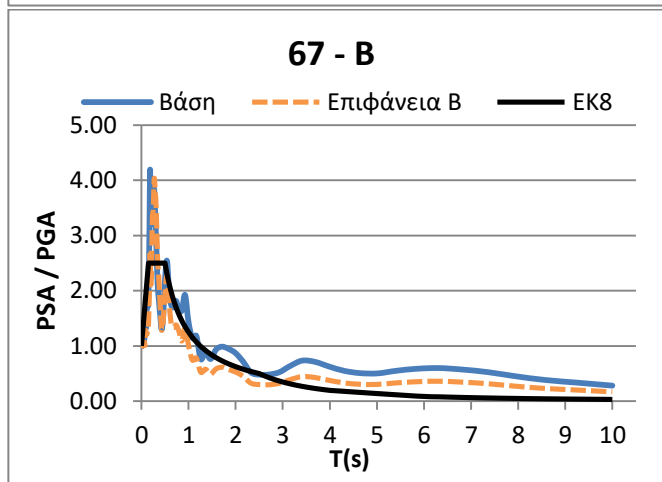
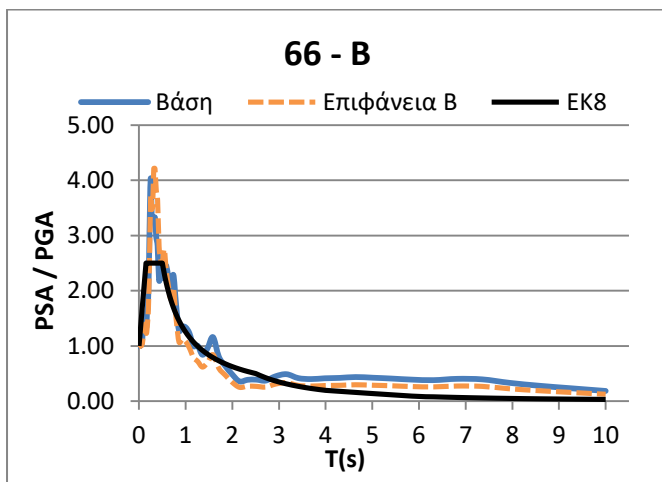
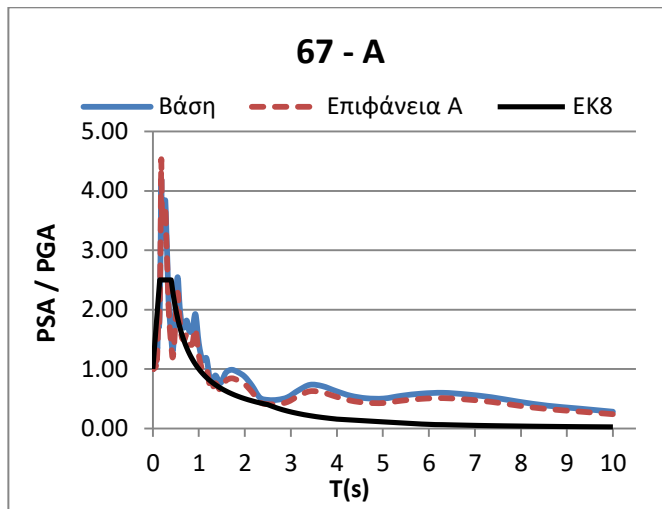
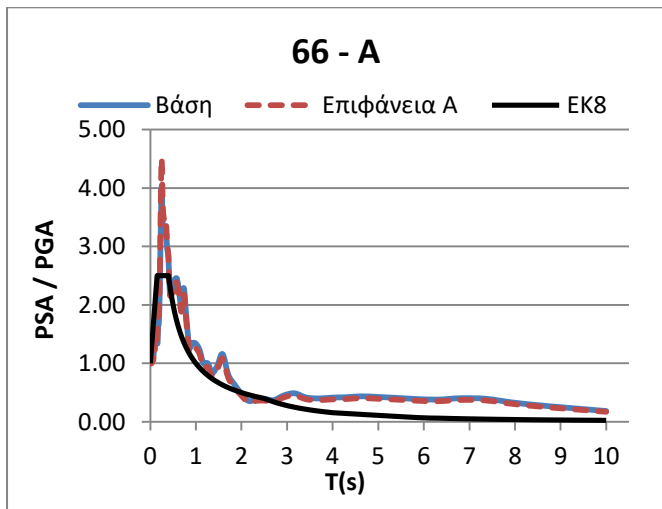


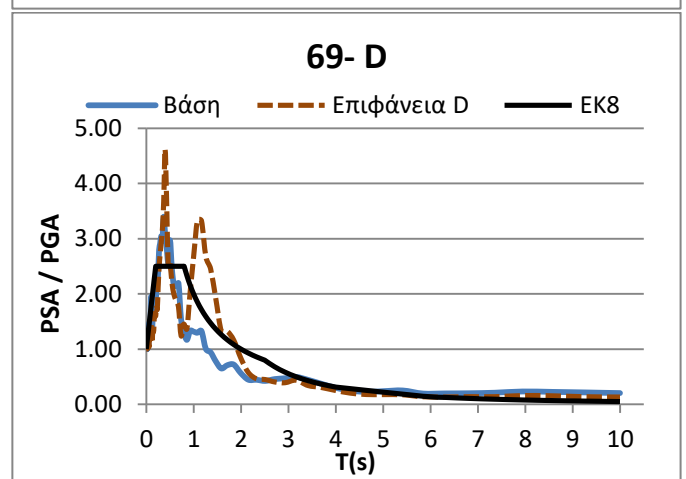
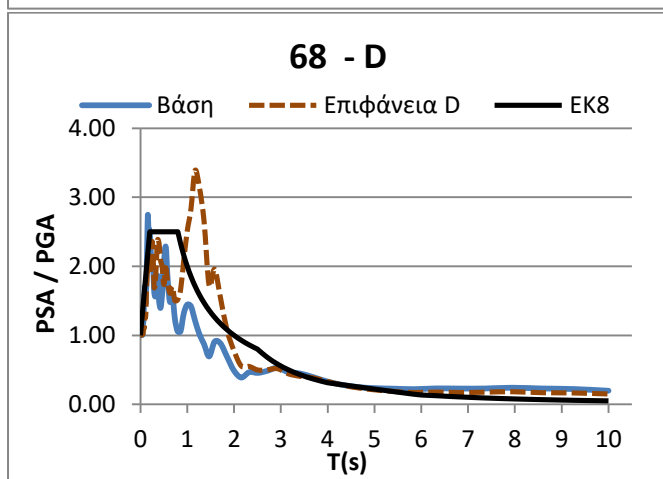
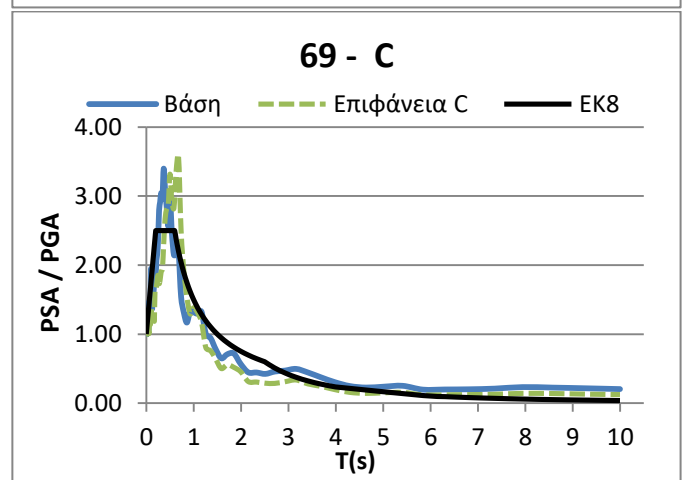
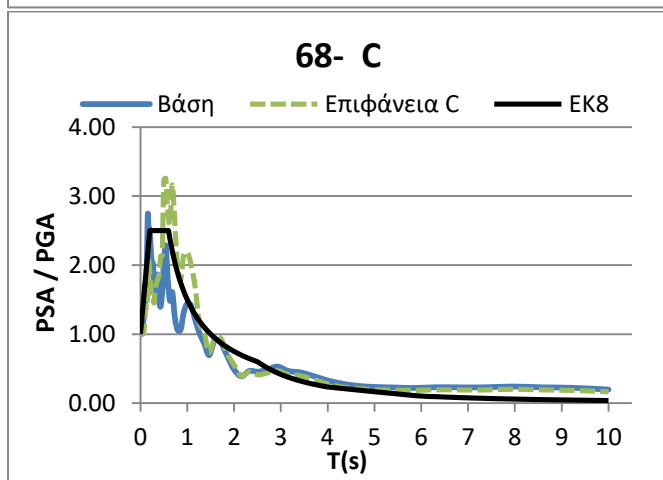
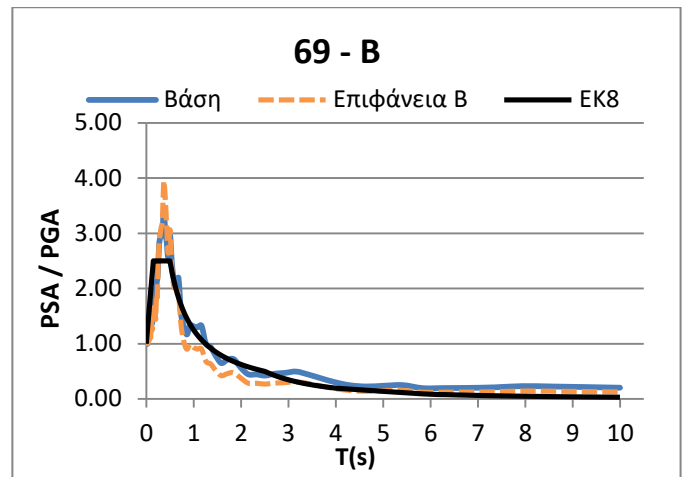
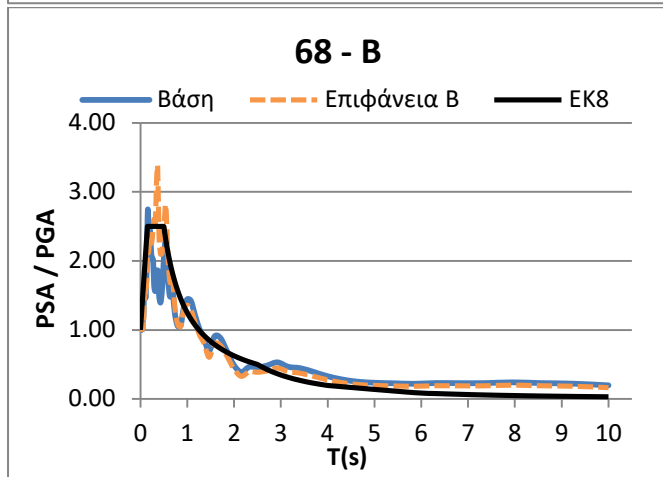
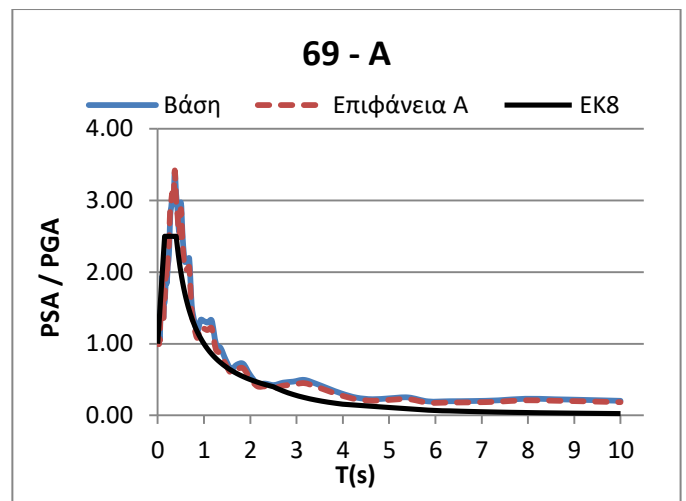
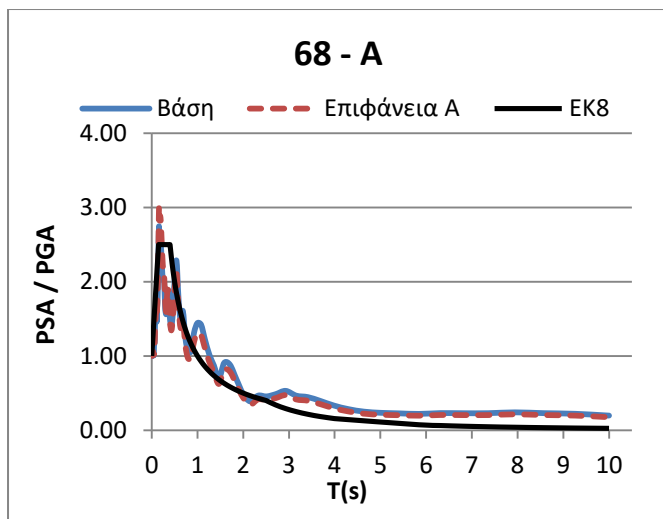




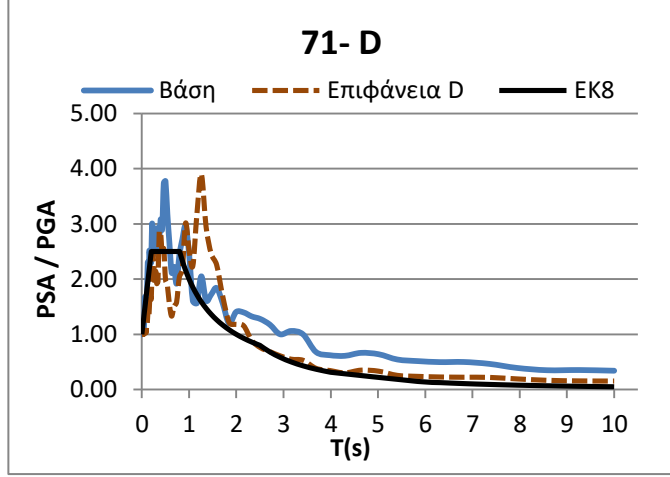
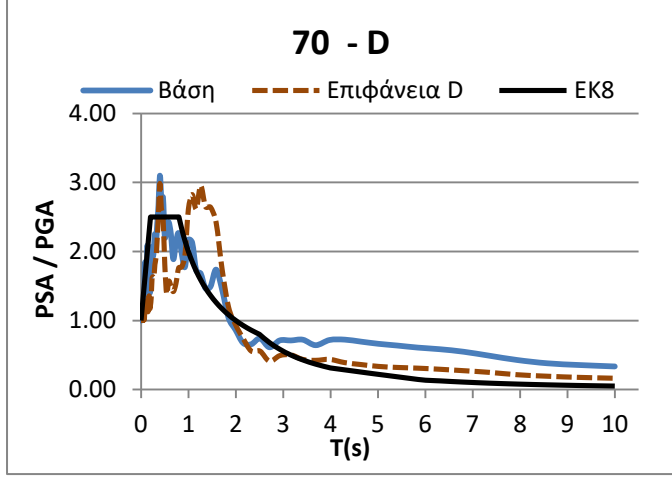
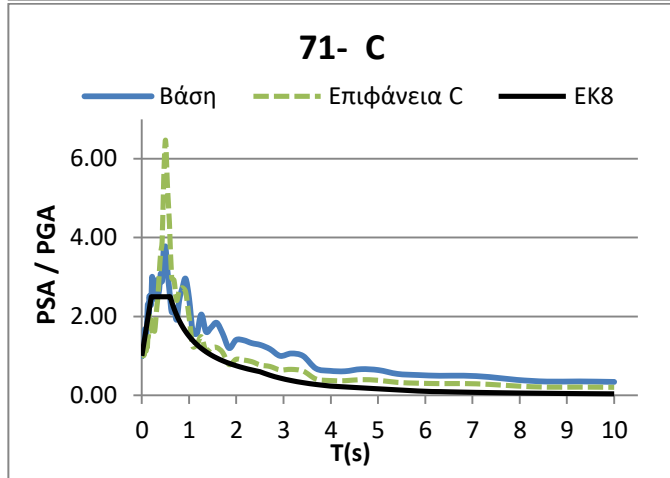
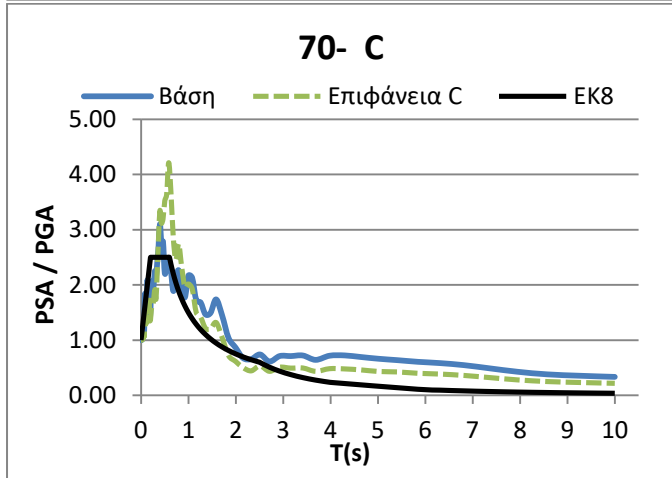
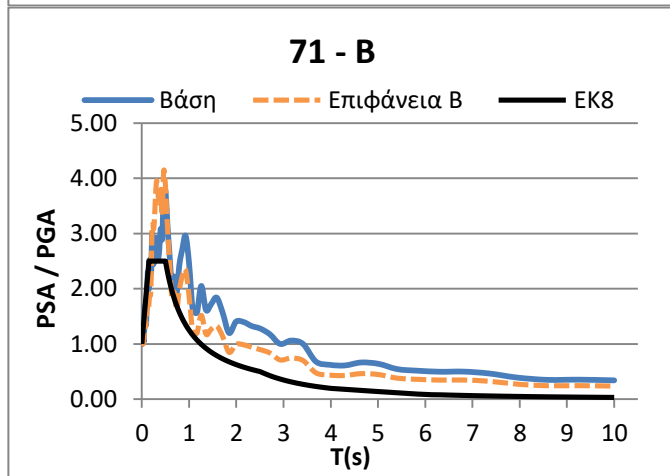
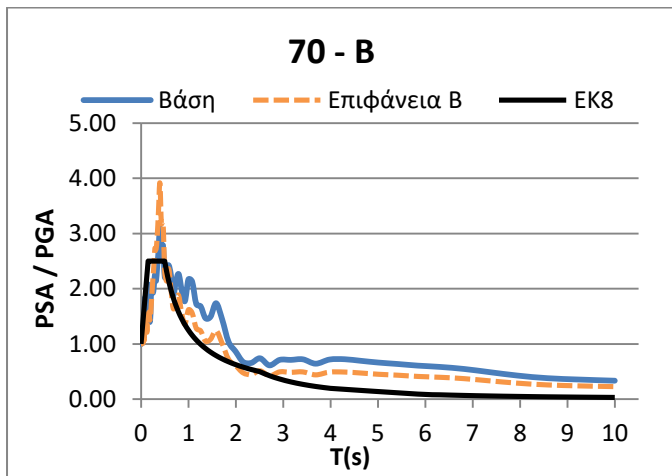
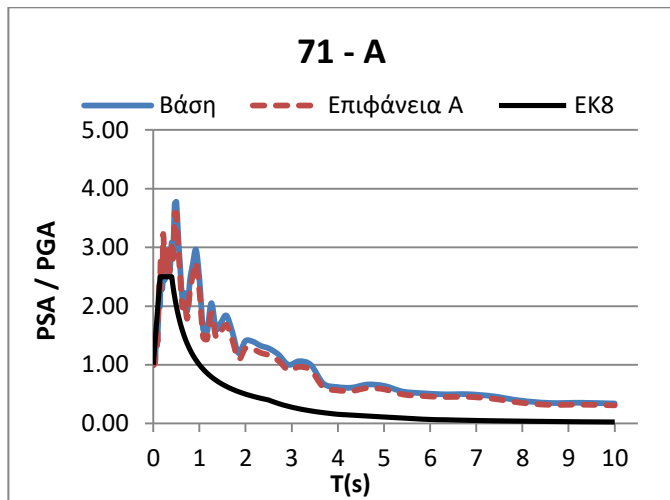
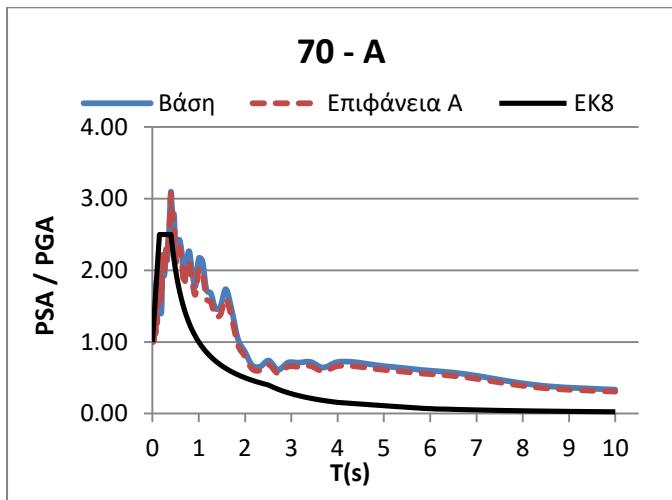


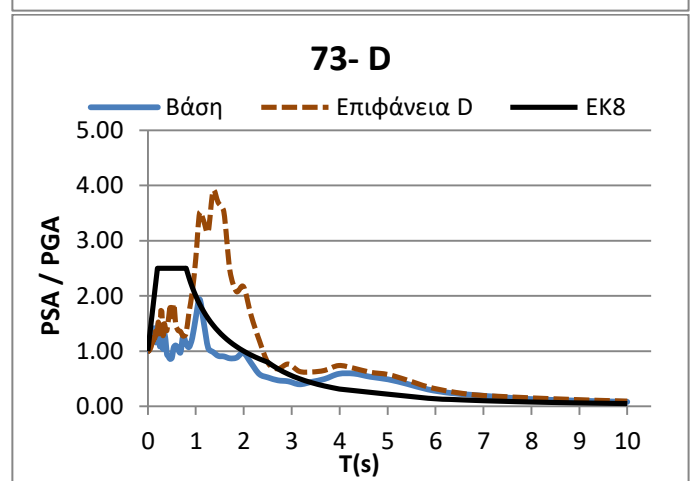
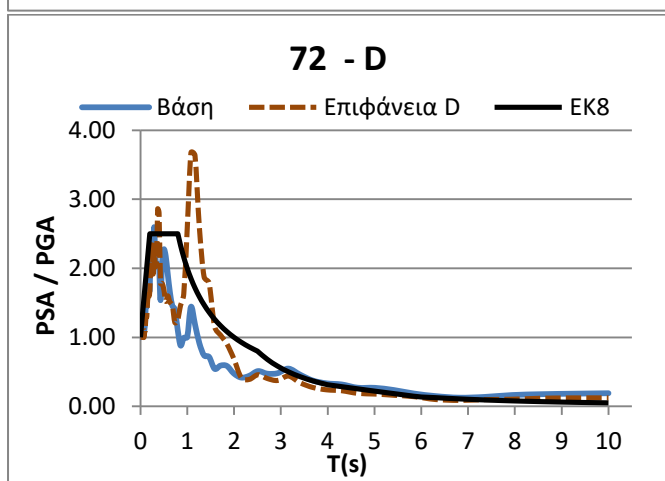
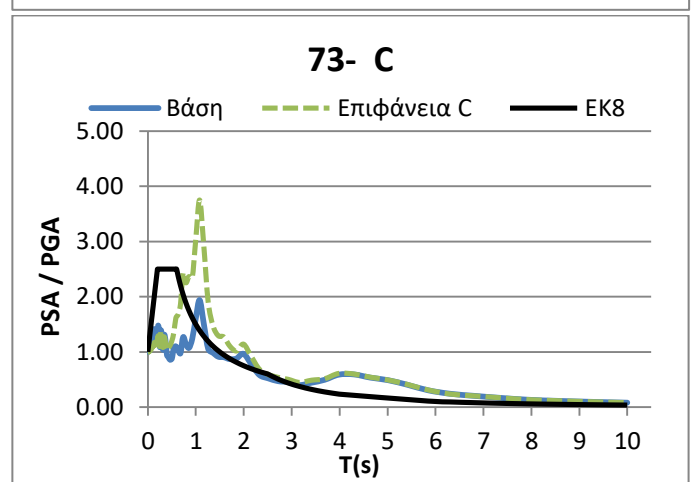
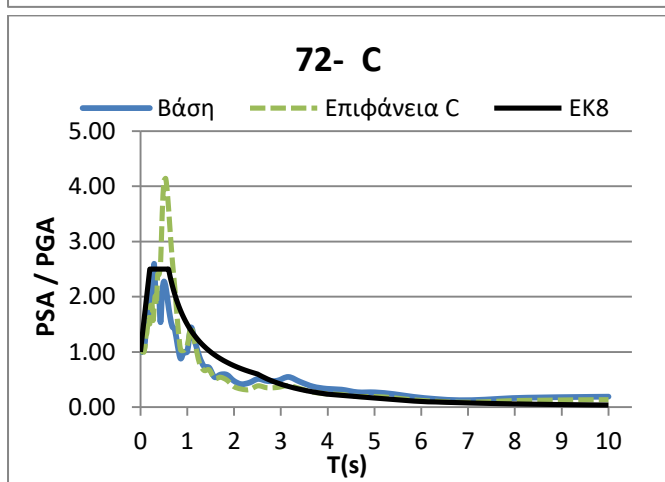
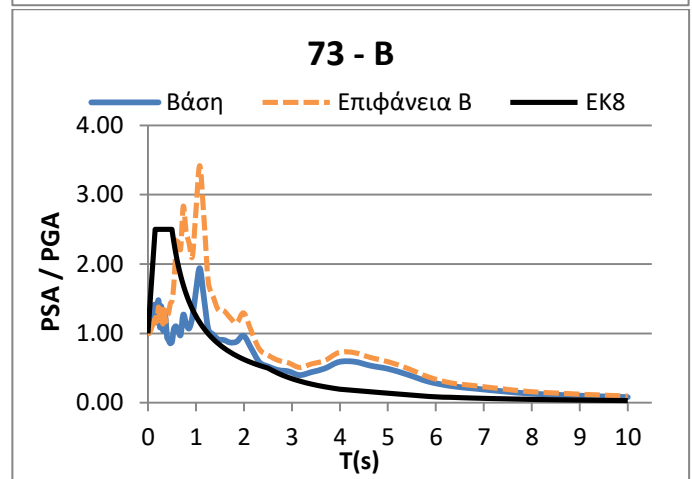
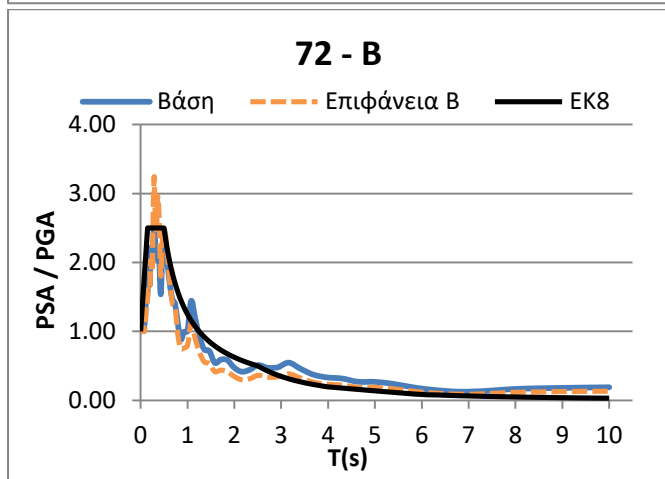
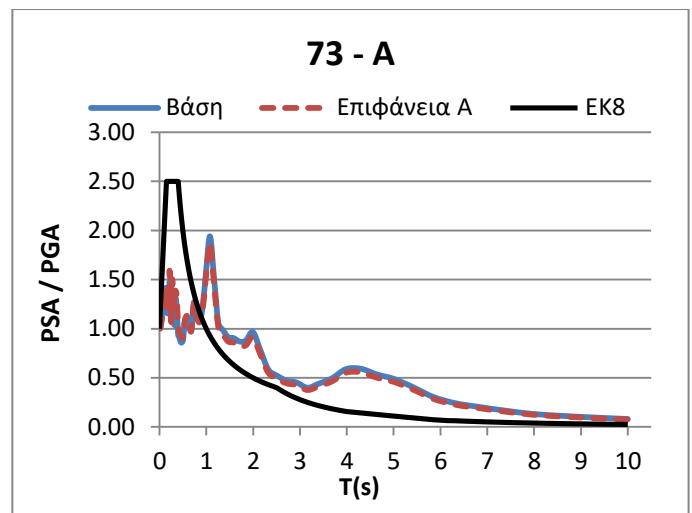
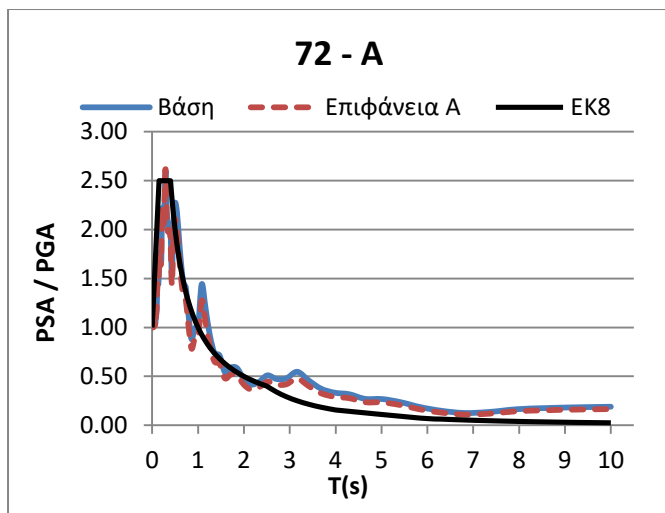


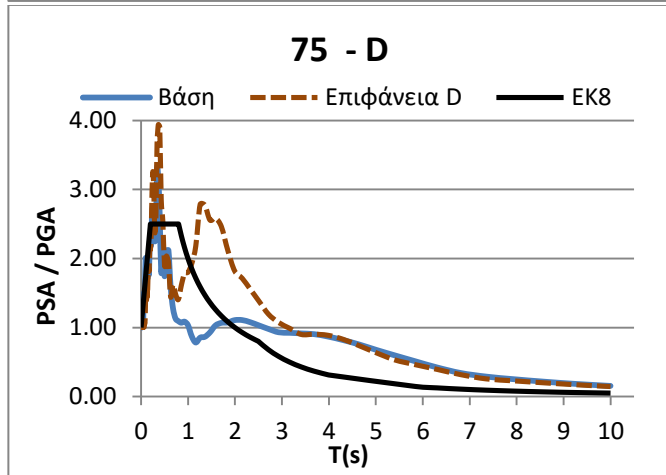
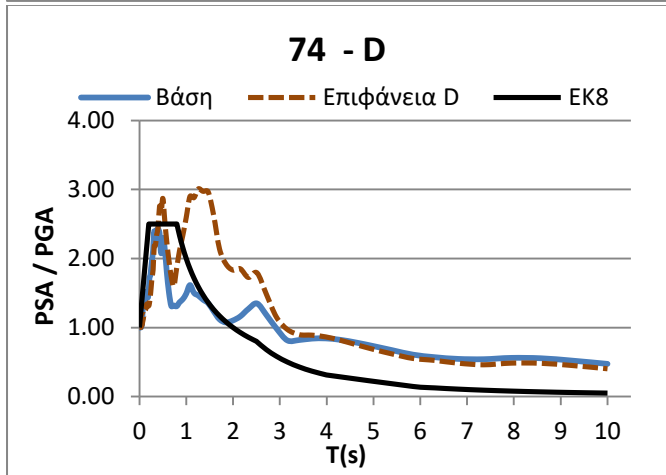
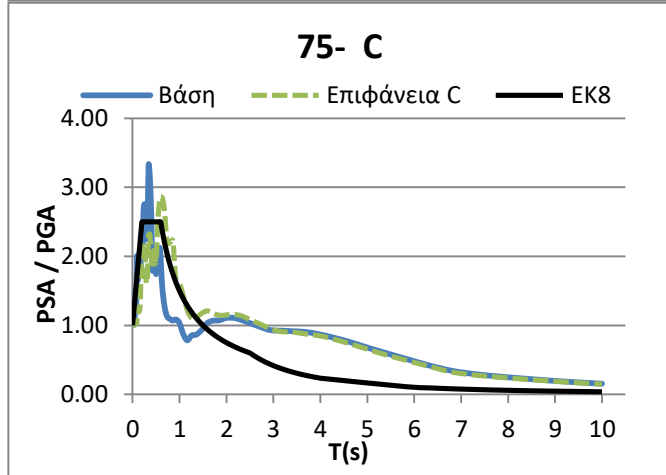
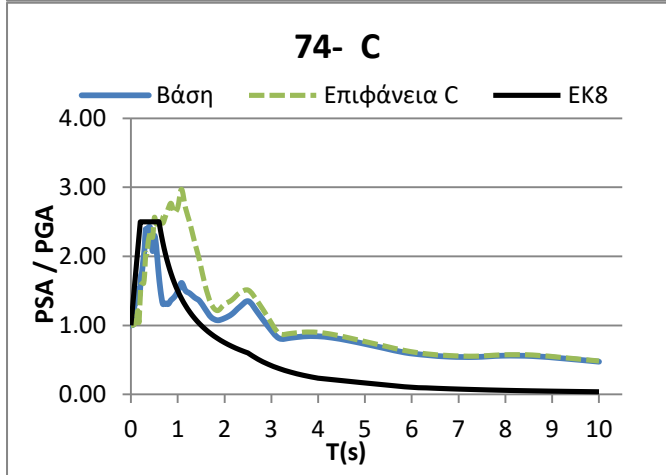
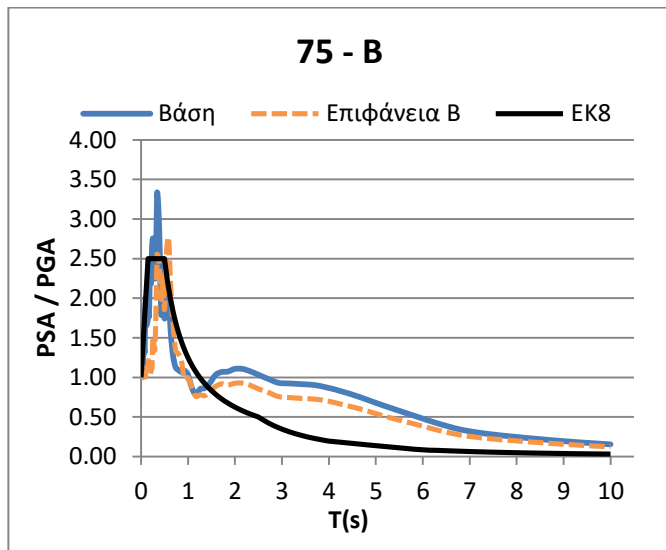
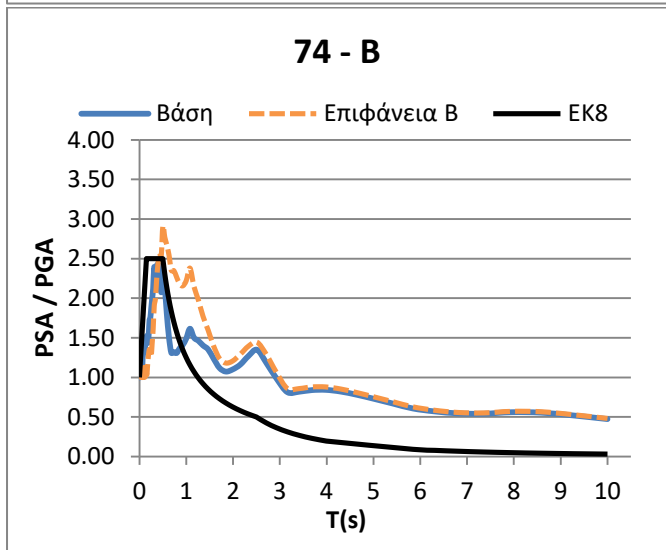
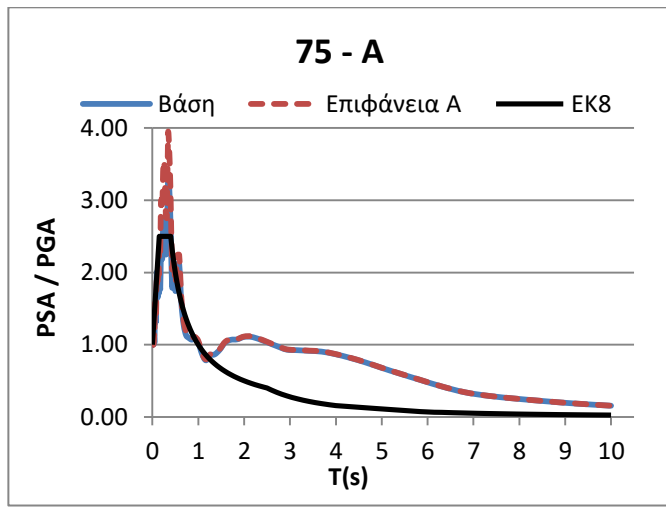
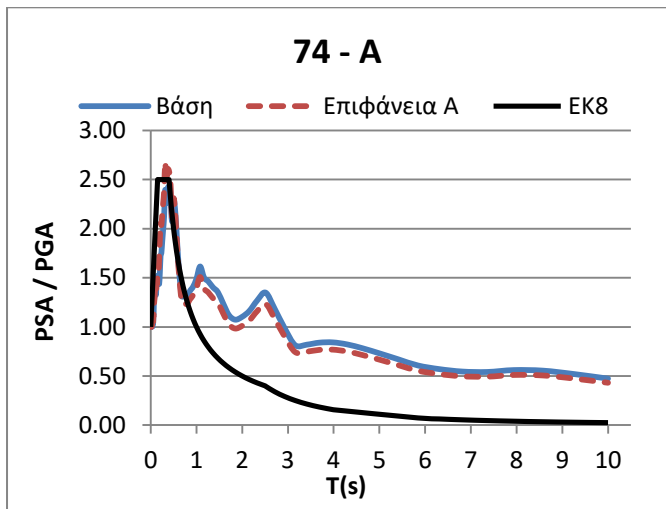


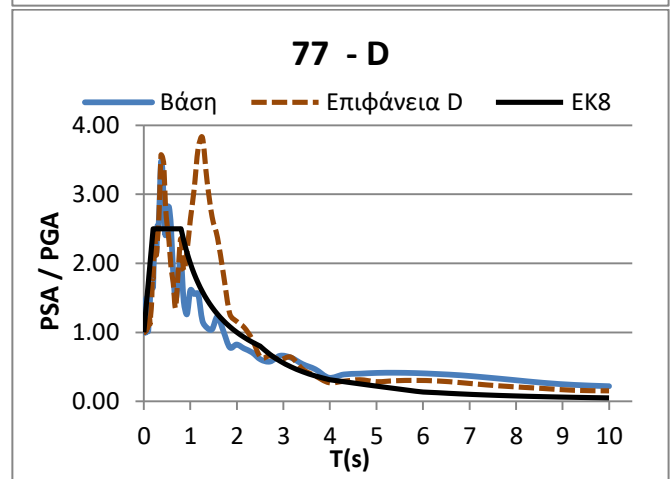
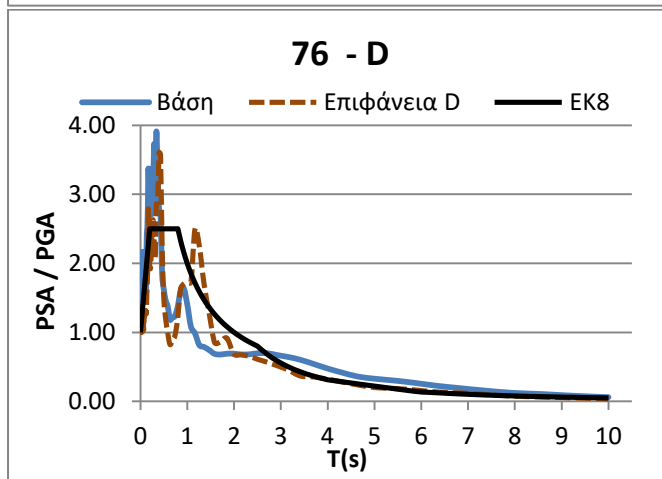
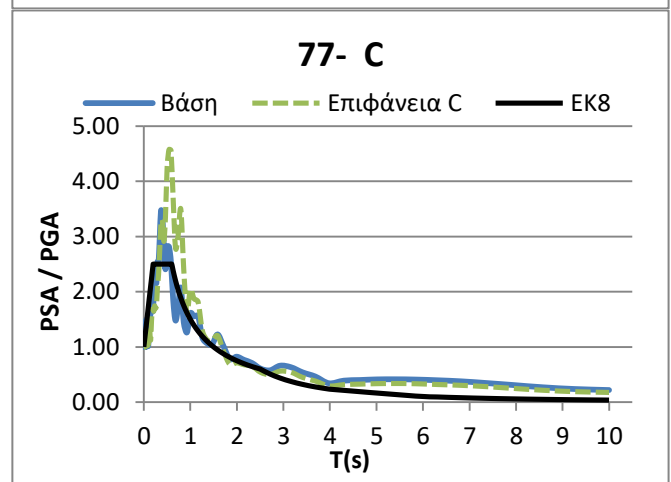
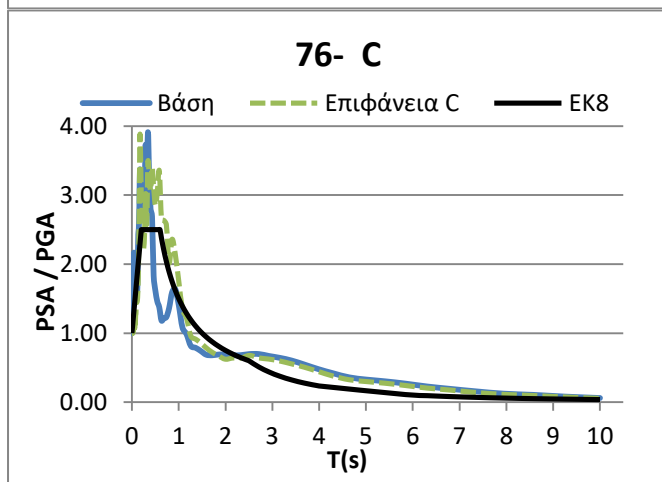
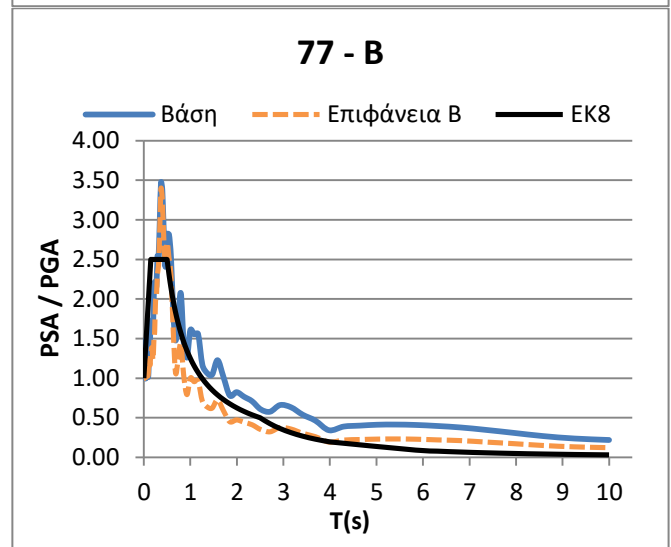
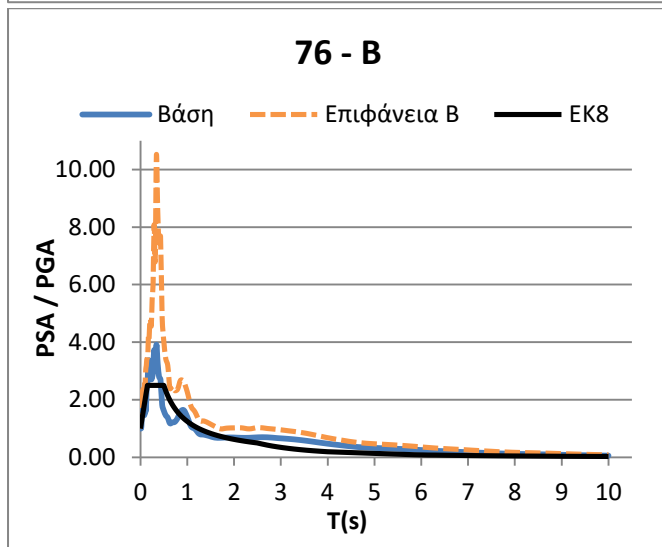
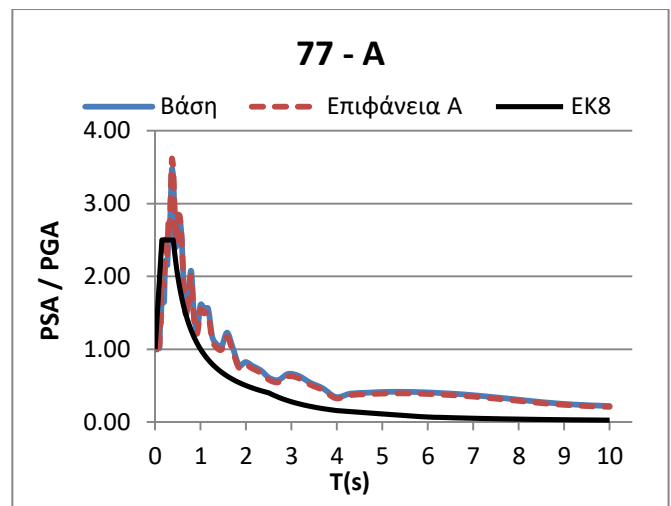
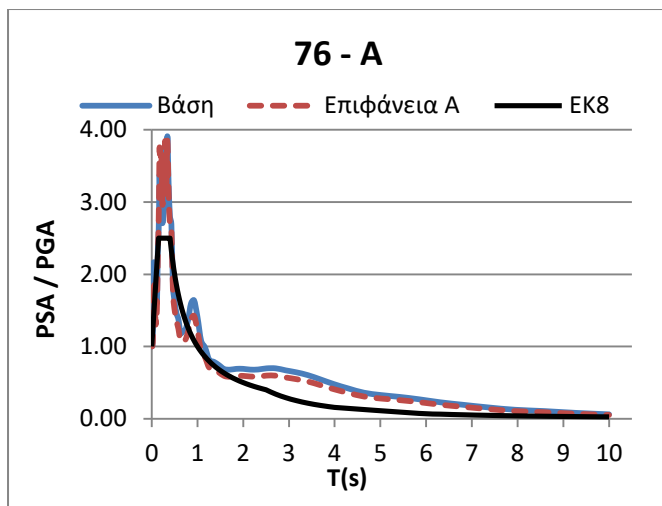


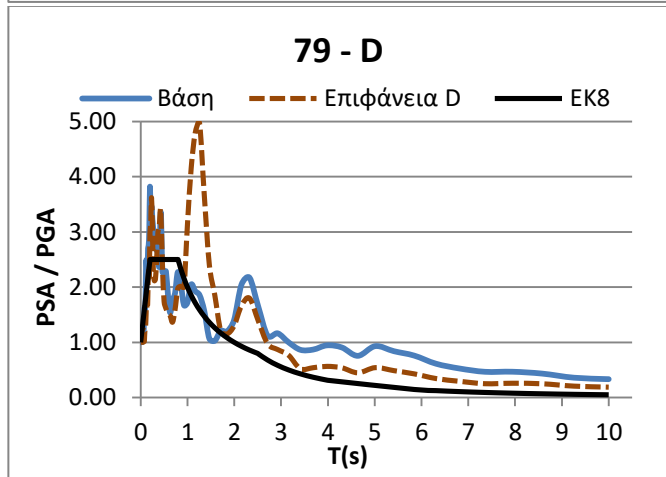
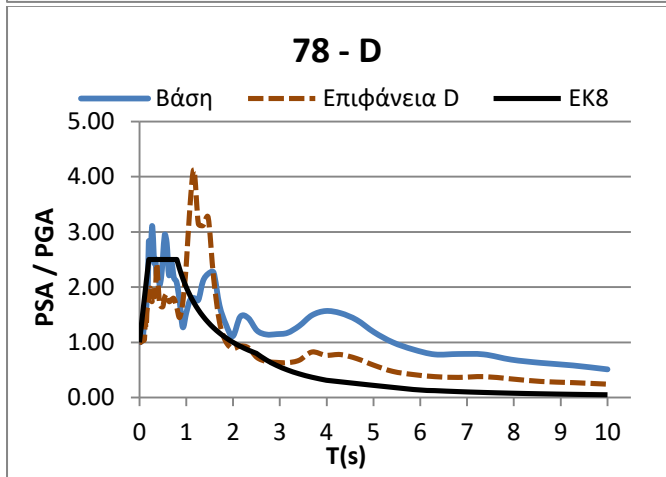
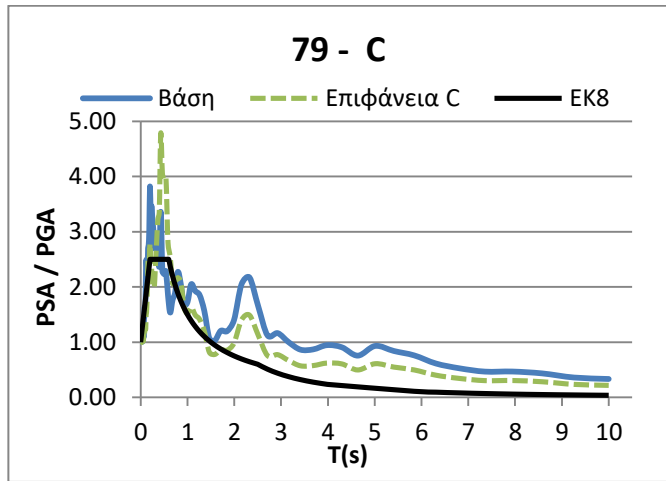
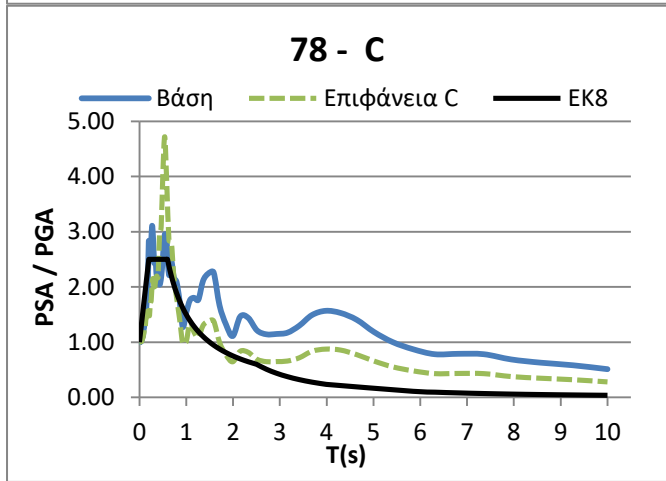
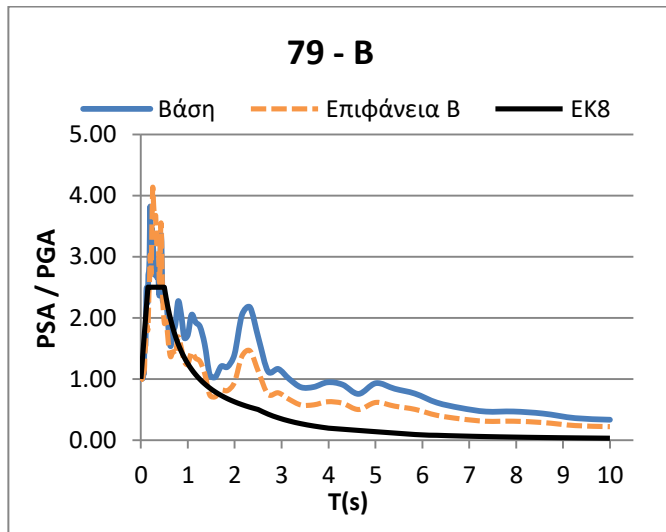
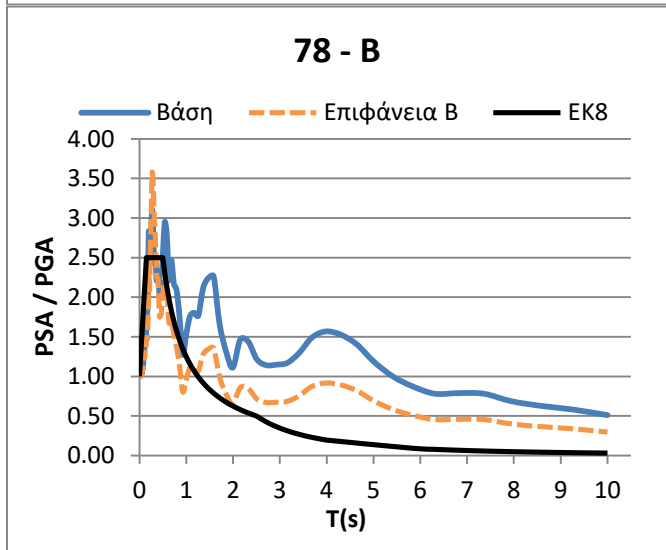
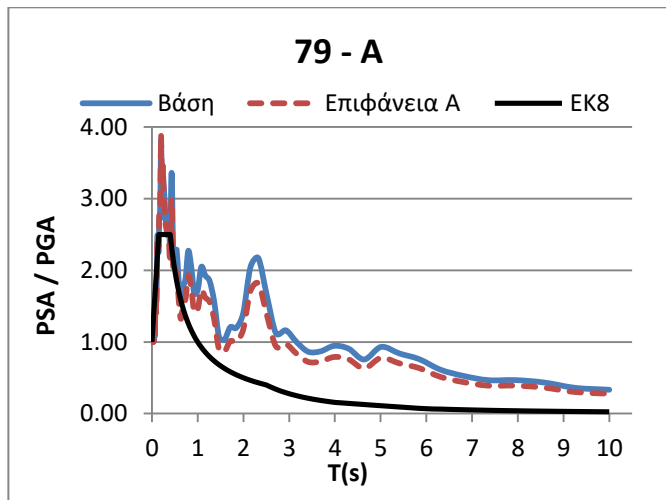
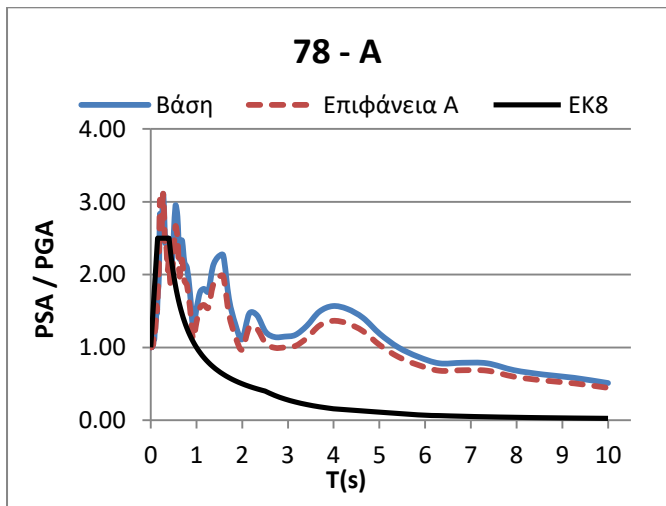


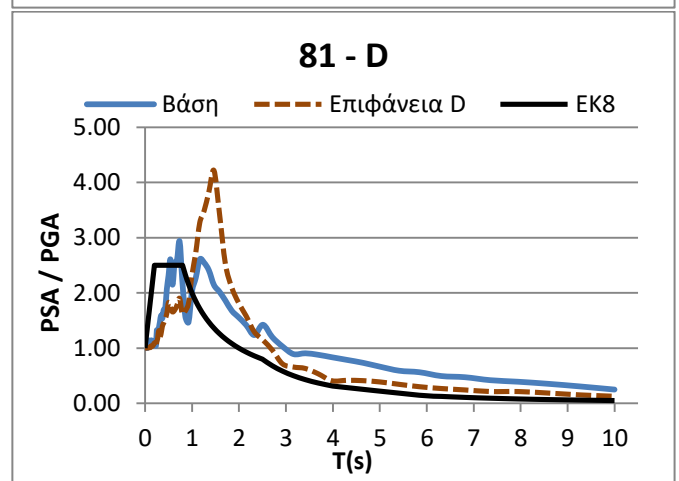
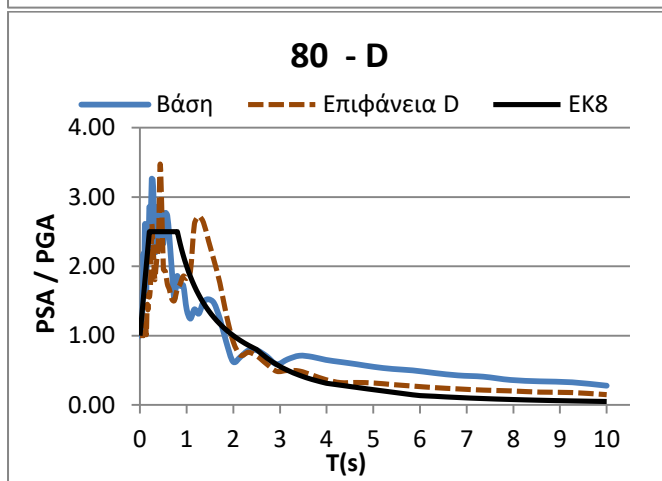
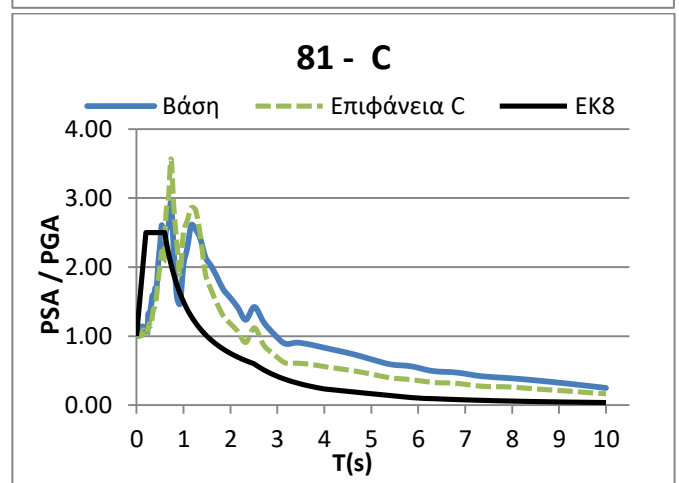
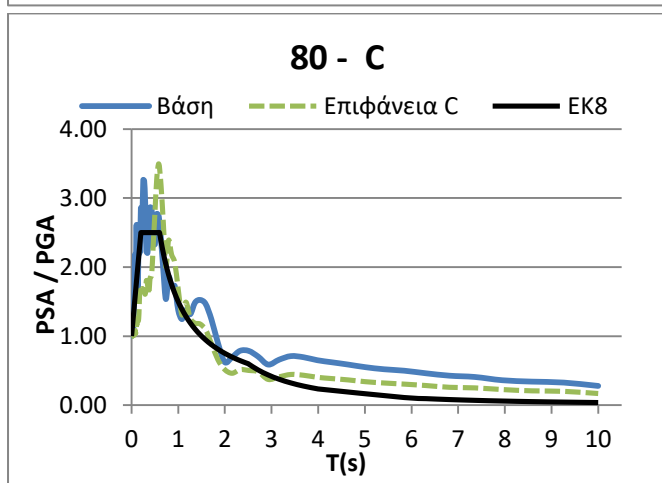
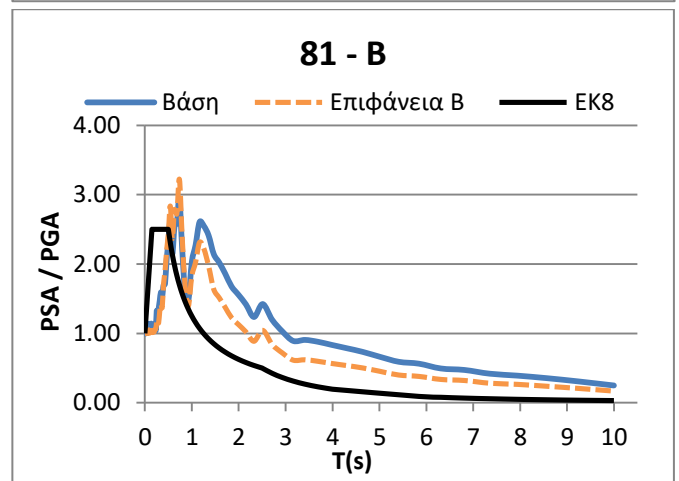
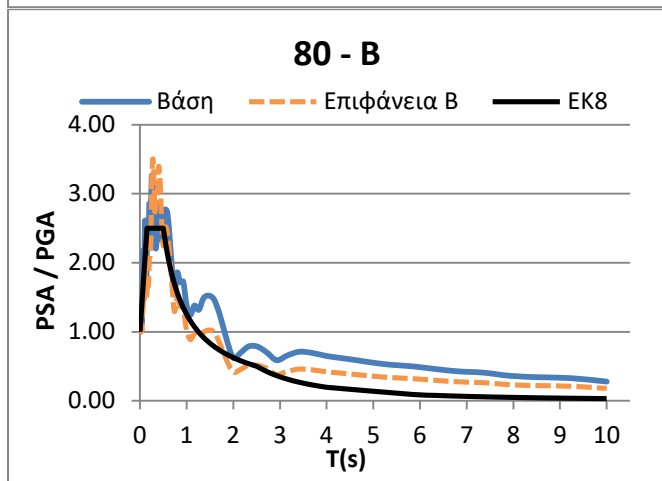
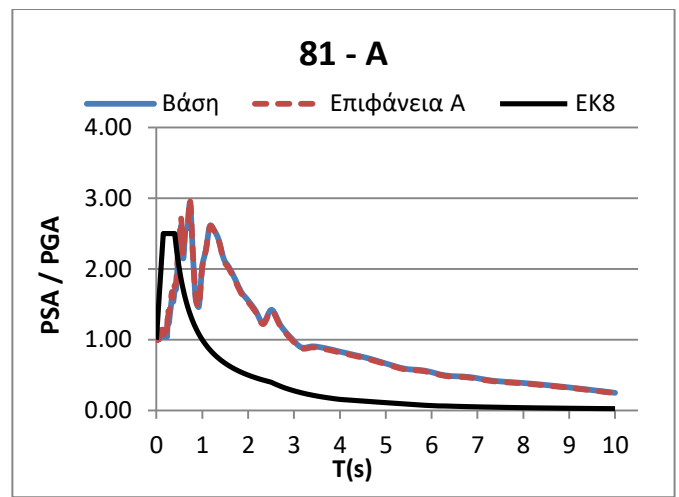
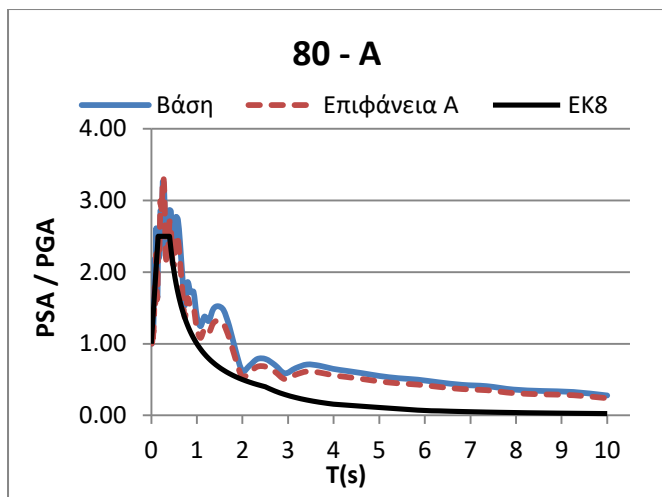


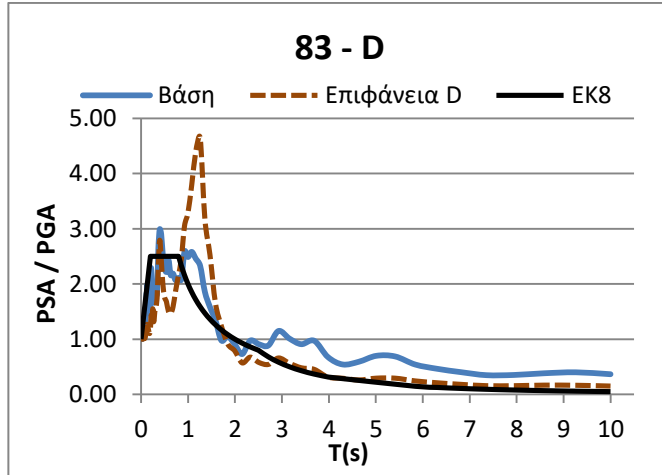
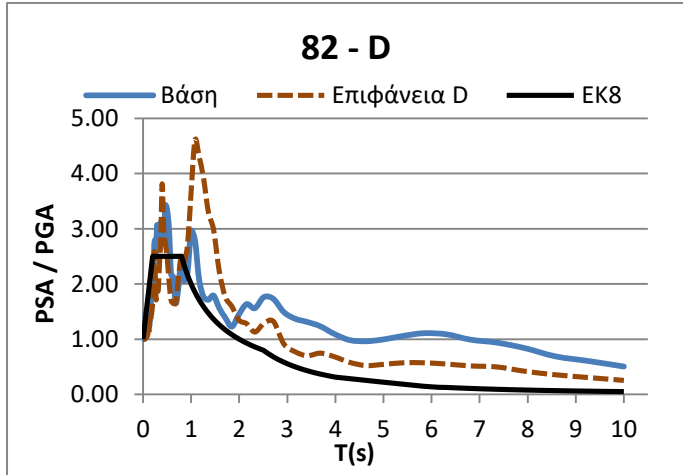
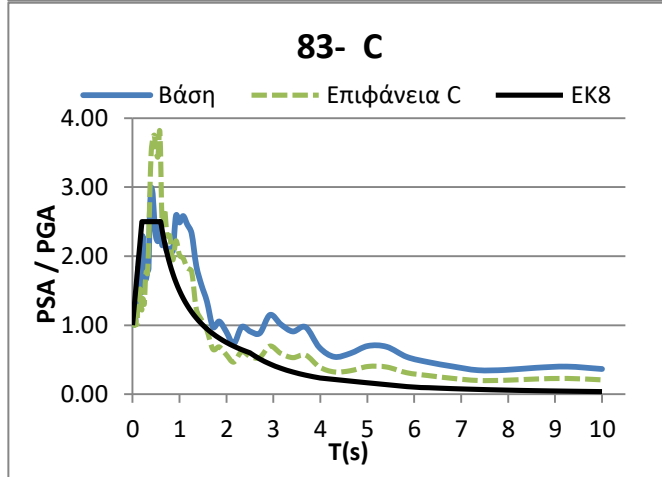
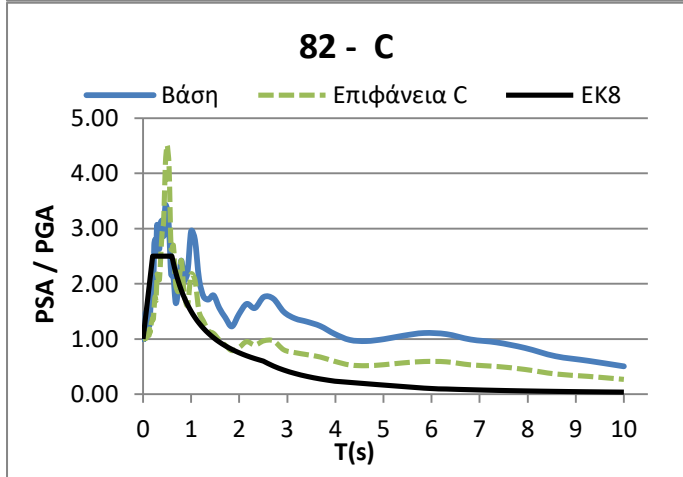
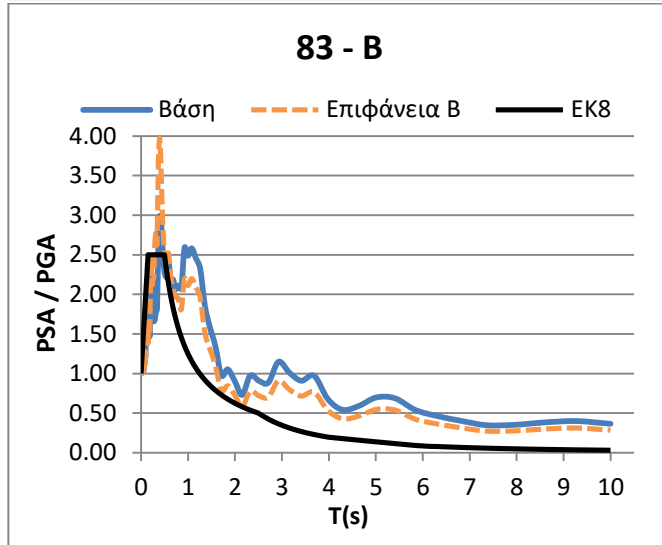
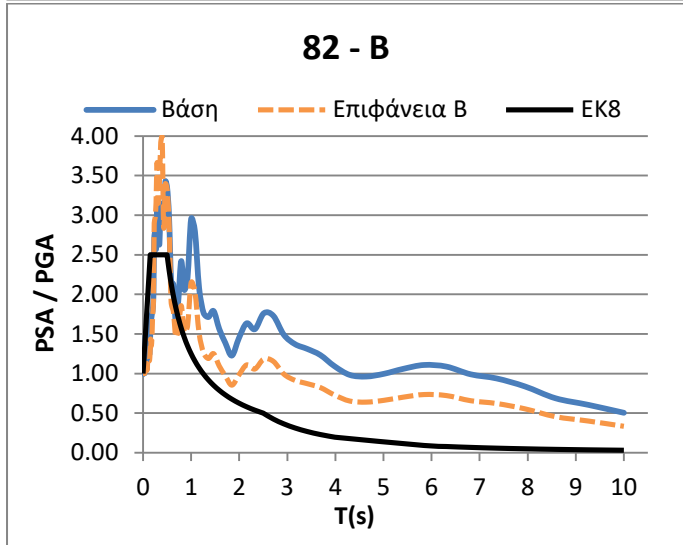
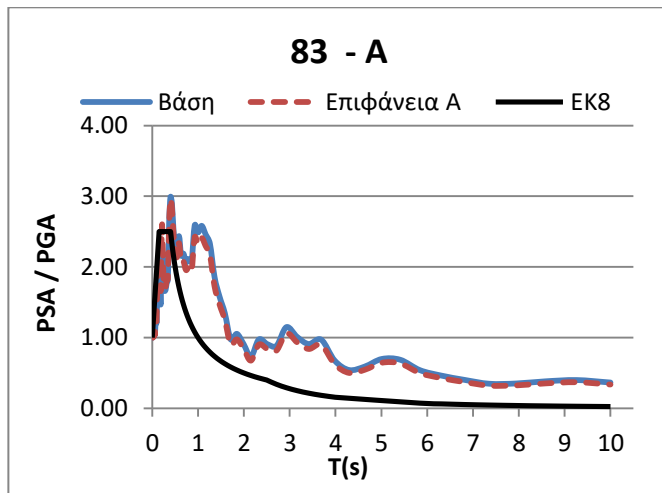
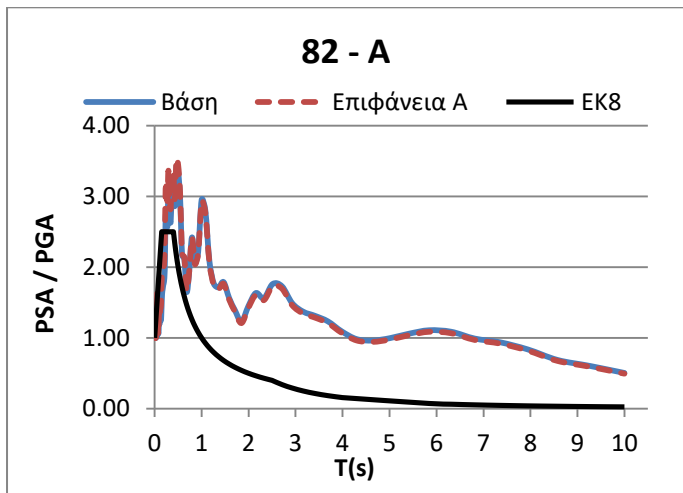


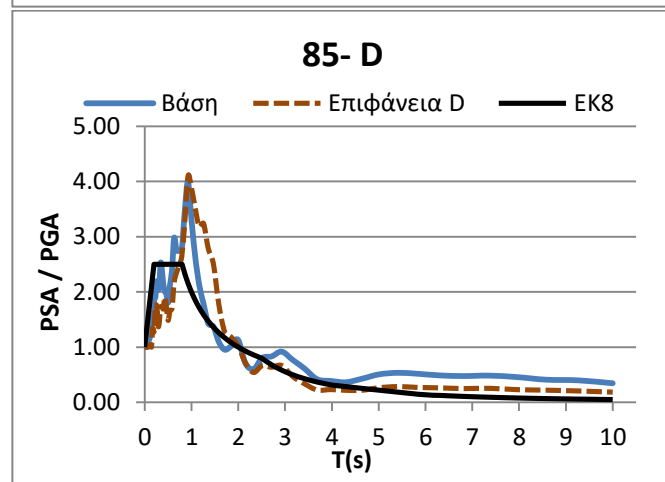
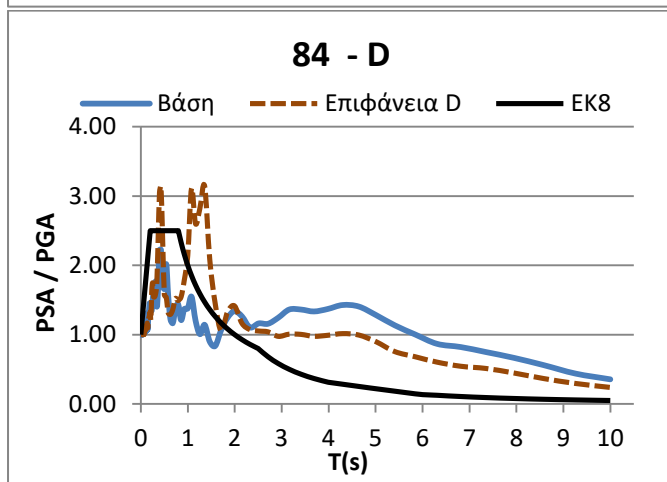
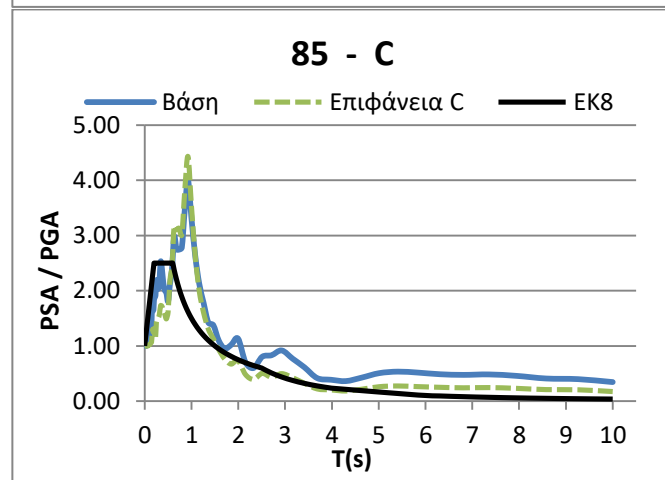
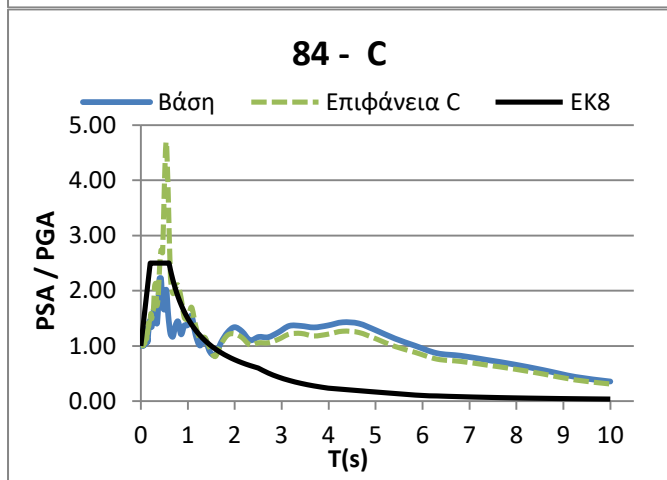
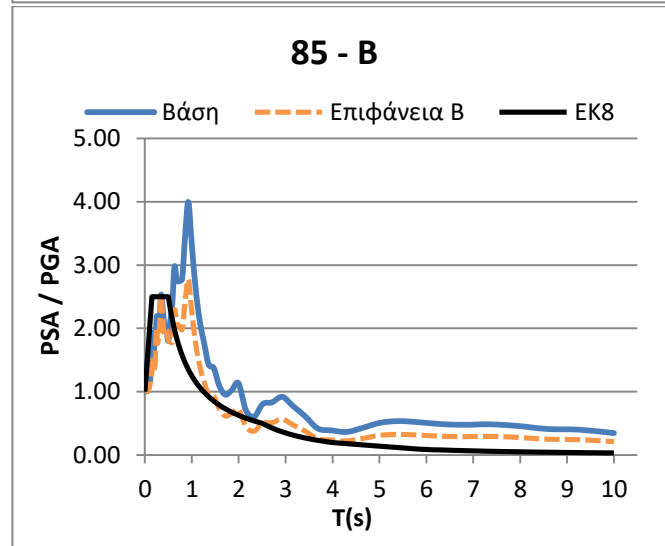
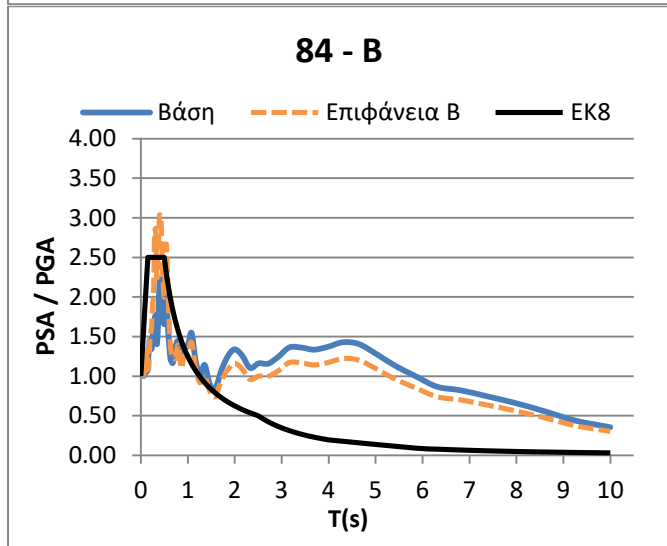
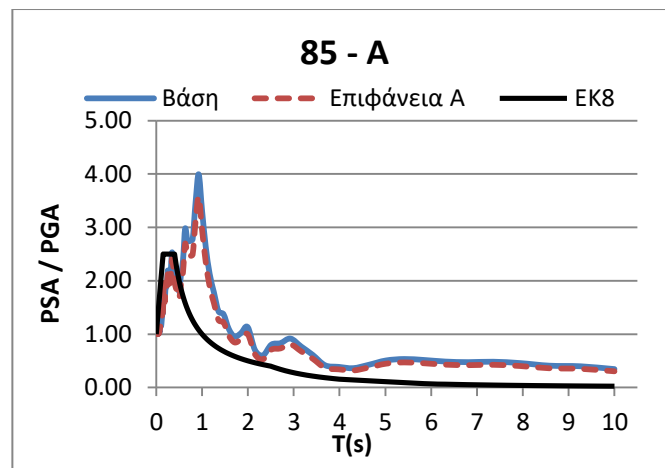
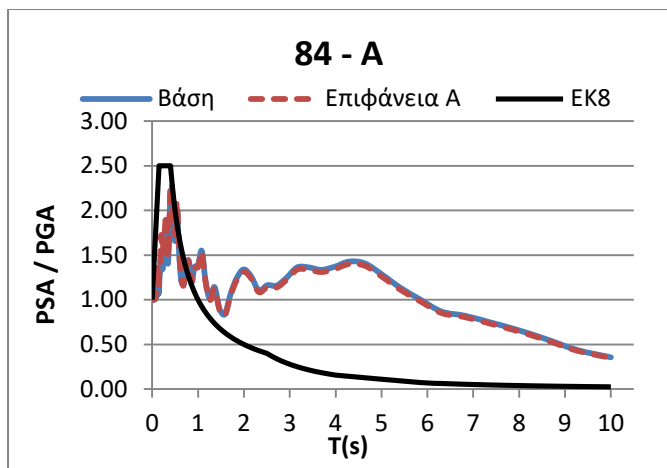














## Βιβλιογραφικές Αναφορές



### Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

1. Baker W. Jack, **Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis**, 2007.
2. Iervolino Iunio, Cornell C. Allin, **Probability of Occurrence of Velocity Pulses in Near-Source Ground Motions**, 2007
3. Mavroeidis P. George, Papageorgiou S. Apostolos, **A Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions**, 2003
4. Mimoglou Petros, Psycharis Ioannis, Taflampas Ioannis, **Design-oriented simulation of near fault ground motions by a limited number of velocity pulses**, 2014
5. Shahi K. Shrey, Baker W. Jack, **An Empirically Calibrated Framework for Including the Effects of Near-Fault Directivity in Probabilistic Seismic Hazard Analysis**, 2001
6. Somerville P.G., **Development of an improved representation of near-fault ground motions**, 1998

### Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αγγελιδάκης Φ. Βασίλειος, **Επιρροή της κατευθυντικότητας σεισμών κοντινού πεδίου στην ανελαστική απόκριση τυπικών πλαισίων από Ω.Σ.** , 2014
2. Καρύδης Π.Γ. , Ταφλαμπάς Ι.Μ., **Τεχνική Σεισμολογία, Παραδόσεις 2006-2007**, 2007
3. Κανάκη Σοφία, Κουτσονίκα Σοφία, **Διερεύνηση της επιρροής των παλμών κατευθυντικότητας σεισμών κοντινού πεδίου στην ανελαστική συμπεριφορά μονοβάθμιων συστημάτων**, 2016
4. Ψυχάρης Ν. Ιωάννης, **Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Τεύχος 2**, 2015

### Βιβλιογραφικές πηγές διαδικτύου

1. <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg537y/ch5.htm>
2. [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A1%CE%AE%CE%B3%CE%BC%CE%B1\\_\(%CE%B3%CE%B5%CF%89%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1\)](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A1%CE%AE%CE%B3%CE%BC%CE%B1_(%CE%B3%CE%B5%CF%89%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1))