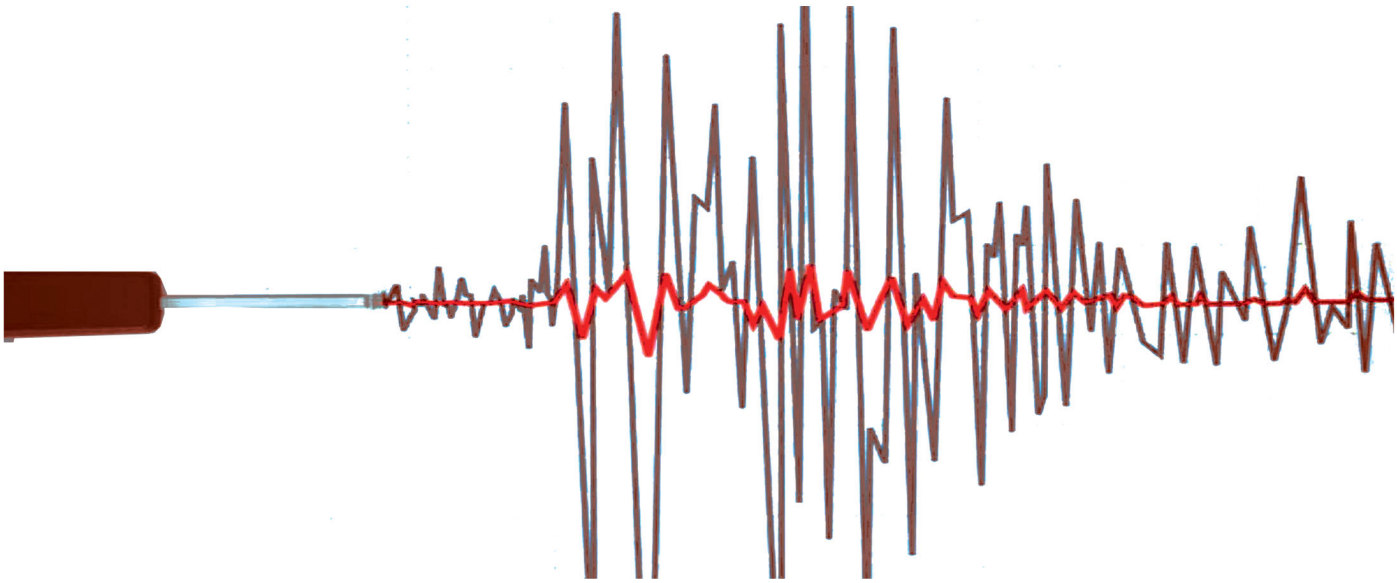
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας



Μεταπτυχιακή Εργασία

Επιταχυνσιογραφήματα με αφανές παλμικό περιεχόμενο - Επιπτώσεις στην απαιτούμενη πλαστιμότητα

ΕΜΜΑΝΟΥΕΛΑ Ι. ΠΕΔΙΑΔΙΤΗ

Επιβλέπων καθηγητής: Μ. Φραγκιαδάκης, Αναληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2021

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας

Μεταπτυχιακή εργασία

Επιταχυνσιογραφήματα με αφανές παλμικό περιεχόμενο – Επιπτώσεις στην απαιτουμένη πλαστιμότητα

ΕΜΜΑΝΟΥΕΛΑ Ι. ΠΕΔΙΑΔΙΤΗ

Επιβλέπων Καθηγητής: *Μ. Φραγκιαδάκης*
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2021

Αφιερωμένη στους γονείς μου Γιάννη και Μαρία

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, οι μεταπτυχιακές σπουδές μου στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου φθάνουν στο τέλος τους.

Οι μεταπτυχιακές μου σπουδές αποτέλεσαν για μένα μια πολύ μεγάλη πρόκληση και ταυτόχρονα ήταν μια διαδικασία μέσα από την οποία, κατάφερα τελικά μετά από πολύ και συστηματικό διάβασμα να φέρω εις πέρας τους στόχους μου.

Πολλές ήταν οι φορές που σκέφτηκα να εγκαταλείψω το στόχο απόκτησης του συγκεκριμένου Μεταπτυχιακού Διπλώματος, εξαιτίας των δυσκολιών και των πολλών απαιτήσεων του. Όμως, καθ' όλη την πορεία μου σε αυτό στάθηκα πολύ τυχερή, καθώς είχα πάντοτε δίπλα μου «δικούς» μου ανθρώπους, οι οποίοι με συμβούλευαν και με παρότρυναν να συνεχίσω και να φτάσω μέχρι το τέλος.

Μέσα από το τεύχος αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους τους ανθρώπους του «στενού φιλικού και οικογενειακού μου κύκλου», που στάθηκαν στο πλευρό μου καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών από την έναρξή τους έως και στο τέλος και καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μιχαήλ Φραγκιαδάκη, Αναπληρωτή καθηγητή Ε.Μ.Π., επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας για την άριστη συνεργασία που είχαμε, προκειμένου να ολοκληρωθεί η εργασία, μέχρι την παράδοσή της.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον κ. Ταφλαμπά Ιωάννη, για την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, για την συνεχή υποστήριξη και καθοδήγησή του σε κάθε στάδιο της εργασίας, καθώς κα για την ενθάρρυνση και γενικότερα την ψυχολογική υποστήριξη που μου παρείχε απλόχερα για αντιμετωπίσω τα διάφορα προβλήματα που κατά καιρούς προέκυπταν.

Θα ήταν μεγάλη παράλειψη αν δεν ευχαριστούσα την κ. Μαστροδήμου Κωνσταντίνα, Υποψήφια Διδάκτωρ, Ε.Μ.Π., για την καθοδήγησή της, τη βοήθεια που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και την συμπαράστασή της σε κάθε προβληματισμό που είχα, δίνοντάς μου λύσεις και βοηθώντας με να αντιμετωπίσω τυχόν προβλήματα που εμφανίζονταν.

Ένα ΤΕΡΑΣΤΙΟ ευχαριστώ το οφείλω στους φίλους μου και γενικότερα στους ανθρώπους του στενού μου κύκλου, με τους οποίους συναναστρέφομαι καθημερινά, αρχικά για την ανοχή που έδειξαν απέναντί μου καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου απ' την αρχή μέχρι το τέλος, αφού πολλές ήταν οι φορές που τους απασχολούσα με τους δικούς μου προβληματισμούς για τις δυσκολίες που αντιμετώπιζα. Μου συμπαραστέκονταν και ταυτόχρονα με παρότρυναν και ενεθάρρυναν να επιτύχω το στόχο μου.

Το μεγαλύτερο, όμως, ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένειά μου, στους γονείς μου Γιάννη και Μαρία, στην αδερφή μου Ηλιάνα και τον πολυαγαπημένο μου παππού Ηλία, που πάντα ήταν και είναι δίπλα μου διακριτικά και στηρίζουν στο έπακρο εμένα και τις επιλογές μου, με ενθαρρύνουν και με συμβουλεύουν με γνώμονα πάντα την ανιδιοτελή και απεριόριστη αγάπη τους προς εμένα, το παιδί τους, με σκοπό την

επίτευξη των δικών μου στόχων. Σας ευχαριστώ πολύ, για την αγάπη και τη στοργή που μου προσφέρετε καθημερινά και για όλα όσα μου έχετε προσφέρει μέχρι τώρα και όσα θα συνεχίσετε να μου προσφέρετε. Σας υπόσχομαι ότι θα προσπαθήσω να φανώ αντάξια των προσδοκιών σας!!!!!

Σας ευχαριστώ όλους!!!

Αθήνα, Φεβρουάριος 2021

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι καταγραφές κοντινού πεδίου καθίστανται πολύ σημαντικές για τις κατασκευές, καθώς η επίδρασή τους στην απόκριση της κατασκευής είναι πολύ σημαντική έως καταστροφική. Οι καταγραφές κοντινού πεδίου διακρίνονται σε δύο κατηγορίες α) παλμικές (pulse like records) και β) μη – παλμικές (non – pulse like records). Εκείνες που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι οι παλμικές καταγραφές, εξαιτίας των χαρακτηριστικών που τις διακρίνουν. Τα χαρακτηριστικά εκείνα είναι η κωδωνοειδής επαύξηση στο ελαστικό φάσμα της καταγραφής στη περιοχή των μεσαίων και μεγάλων περιόδων (T=1sec-3sec) και επίσης οι αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας στο ανελαστικό φάσμα, στο ήμισυ (περίπου) της περιόδου του παλμού $T_p/2$.

Εντούτοις, έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχουν πολλές καταγραφές, οι οποίες δεν χαρακτηρίζονται ως παλμικές σύμφωνα με τους κλασικούς δείκτες παλμικότητας που έχουν προταθεί από Baker (2007) και Καρδούτσου (2017), παρόλα αυτά όμως παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά των παλμικών καταγραφών, εξαιτίας της ύπαρξης «κρυφών παλμών» σε αυτές τις καταγραφές. Με βάση τα παραπάνω, γίνεται εμφανής η ανάγκη για τη μελέτη και τη διερεύνηση των παλμικών καταγραφών, αλλά και των καταγραφών που περιέχουν «κρυφούς παλμούς».

Προς αυτή την κατεύθυνση, στο θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας εργασίας γίνεται αναφορά στις καταγραφές κοντινού πεδίου και στις βασικές έννοιες που τις συνοδεύουν. Επίσης, παρατίθενται τα διάφορα μοντέλα - μεθοδολογίες που έχουν προταθεί κατά καιρούς. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στις μεθοδολογίες προσδιορισμού παλμικών καταγραφών, με έμφαση σε εκείνες που προτάθηκαν τους Baker (2007), Μαυροειδή και Παπαγεωργίου (2003), Μίμογλου (2014), Καρδούτσου (2017). Κυρίως, γίνεται αναφορά στον τρόπο με τον οποίο μια καταγραφή χαρακτηρίζεται ως παλμική ή μη παλμική, με την εκάστοτε μεθοδολογία. Κοινό σημείο όλων των παραπάνω μεθοδολογιών είναι ότι εξετάζουν την χρονοϊστορία της ταχύτητας της αρχικής καταγραφής και υπολογίζουν ένα δείκτη παλμικότητας (PI = Pulse Index) για την κατάταξη των καταγραφών ως παλμικές ή ως μη – παλμικές, ανάλογα με την τιμή του δείκτη αυτού. Η διαφορά τους είναι στο εύρος των τιμών αυτού του δείκτη σε κάθε μια μεθοδολογία.

Κατόπιν, προχωρήσαμε στην ανάλυση ενός πλήθους καταγραφών από τη βάση δεδομένων του NGA (Next Generation Attenuation), με τιμές εδαφικής επιτάχυνσης PGA > 0.15g και οι οποίες ενώ με βάση τον Baker (2007), αλλά και την Καρδούτσου (2017), παρουσίαζαν πολύ χαμηλό δείκτη παλμικότητας, εντούτοις προκαλούσαν επιπτώσεις και απαιτήσεις πλαστιμότητας αντίστοιχες με εκείνες των παλμικών καταγραφών. Στην εν λόγω εργασία, η ανάλυση διευκολύνθηκε από αλγόριθμο που αναπτύχθηκε με τη συμβολή του κ. Ιωάννη Ταφλαμπά. Ο αλγόριθμος αυτός εξάγει 6 παλμούς από την αρχική χρονοϊστορία κάθε καταγραφής που μελετήθηκε, με βάση την μέθοδο του Μαυροειδή και Παπαγεωργίου (2003) και του Μίμογλου (2014). Έτσι, στη συνέχεια υπολογίστηκαν για κάθε καταγραφή και οι δείκτες παλμικότητας με βάση τον Baker (2007) και την Καρδούτσου (2017), προκειμένου να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων. Με βάση τις αναλύσεις αυτές, διερευνήθηκε η επίδραση του κάθε εξαγόμενου παλμού από τους έξι, στις απαιτήσεις πλαστιμότητας. Ως κρίσιμη τιμή της πλαστιμότητας λήφθηκε μ=6 σύμφωνα με τον Μιράντα (2007) και υπολογίστηκαν οι

λόγοι απομειωμένης προς την αρχική απαίτηση πλαστιμότητας. Συνεπώς, ένας εξαγόμενος κρυφός παλμός θεωρήθηκε σημαντικός για την καταγραφή, εάν σύμφωνα με το λόγο αυτό προέκυπτε σημαντική απομείωση της απαιτούμενης πλαστιμότητας. Τέλος, έγινε σύγκριση του ελαστικού φάσματος της αρχικής καταγραφής και της απομειωμένης καταγραφής, μετά την αφαίρεση του σημαντικού παλμού αυτής, ώστε να βρεθούν οι παλμοί που ευθύνονται για τις κωδωνοειδείς επαυξήσεις στο ελαστικό φάσμα απόκρισης.

Με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο, και κυρίως με εφαρμογή των διαφόρων μεθοδολογιών σε συνδυασμό με τις πραγματοποιούμενες αναλύσεις επιβεβαιώθηκε τελικά το γεγονός ότι αρκετές είναι οι καταγραφές εκείνες που ενώ δεν χαρακτηρίζονται ως παλμικές λόγω του χαμηλού δείκτη παλμικότητας, εντούτοις παρουσιάζουν σημαντικούς κρυφούς παλμούς, που ευθύνονται για τα χαρακτηριστικά παλμικών καταγραφών που παρουσιάζουν οι καταγραφές εκείνες.

ABSTRACT

Near field records are very important for structures, due to the fact that their effect on the response of the building, is very large and can sometimes become catastrophic. Near field records can be classified into two categories: a) pulse-like records and b) non pulse-like records. The fist category of pulse-like records exhibits a special interest for engineers, because of their features. These features are a) the bell–shaped amplification, which can be observed in the elastic response spectrum at the range of period between T=1sec and T=3sec (i.e. at medium and long periods). and b) the improved plasticity requirements, which can be observed in the inelastic response spectrum, approximately at half the pulse period ($T_p/2$).

It has been observed that there is a large number of ground motion records, which are not defined as pulse-like records, according to the Pulse Index (PI), proposed by Baker (2007) and Kardoutsou (2017), but these records have pulse–like features, due to their "latent pulses". Based on the above, the need for studying the pulse records as well as the pulse-like records is obvious.

In this direction, at the theoretical part of this thesis, there is a reference to near field records in general and to their basic meanings. Also, exists a reference to various models, which were proposed a long time ago and which are related to near field records. In particular , the following thesis focuses on the method proposed by Baker (2007), Mavroeidis and Papageorgiou (2003), Mimoglou (2014) and Kardoutsou (2017). Mainly, at this thesis the procedure of identifying and characterizing a near filed record as pulse–like or as non pulse-like record is described. A common point of these methods is the fact that they all examine the velocity time history of the original record of the ground motion and then calculate a Pulse Index (PI), in order to classify a record as pulse–like, non pulse–like or as ambiguous record, which depends on the number of this PI. The difference between the PI according these methods, is that every method proposed a different range of the values of PI, in order to characterize a record as pulse–like, non pulse–like or ambiguous.

After this, we proceed to the analysis of a number of near field records from the database of the Next Generation Attenuation (NGA). We have chosen records, which had a PGA > 0.15g and according to Baker (2007) and Kardoutsou (2017), these records had a very low value of Pulse Index, and consequently they can't be characterised as pulse–like records. In disagreement with the above PI, the effect of these records on t a structure and plasticity demands is almost the same as that of pulse–like records. In order to facilitate this procedure of the analysis, we used an algorithm, developed by Ioannis Taflampas and based on the method proposed by Mavroeidis and Papageorgiou (2003) and Mimoglou (2014). Afterwards, for reasons of comparison, we calculated the PI according to Baker (2007) and Kardoutsou (2017) for every record of ground motion, which is analyzed. According to the previous procedure, we examined the effect of each of six extracted pulses on the plasticity demands. A critical value for plasticity according to Miranda (2007) is the value of μ=6 and having this value in mind we calculate the ratio of the residual plasticity to the original plasticity demand. An extracted pulse can be important pulse

for a record, when according to the above ratio, we conclude to a large reduction of the plasticity demand. Finally, at this thesis we present a comparison between the elastic response spectrum of the original record and the reduced record after the subtraction of the important pulse of the record, in order to identify pulses, which account for the bell–shaped amplifications at the elastic response spectrum.

From the theoretical part and from the implementation of the aforementioned methods to the analysis of the chosen records, we conclude to the confirmation of the fact that there are many records of ground motion, which are not characterized as pulse–like records, because of their low value of the PI, but these records exhibit 'latent pulses', responsible for their features, which are the same with those of pulse–like records.

Πίνακας περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ v

ΠΕΡΙΛΗΨΗ vii

ABSTRACT ix

Πίνακας περιεχομένων xi

Πίνακας Σχημάτων: xiii

1 Εισαγωγή 1
1.1 Γενικά 1
1.2 Κοντινό Πεδίο 1
1.2.1 Κατευθυντικότητα 1
1.2.1 Μόνιμη στατική μετακίνηση 3
1.2.2 Παραμετροποίηση κινήσεων κοντινού πεδίου 4
1.3 Μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης των εδαφικών κινήσεων 5
1.3.1 Σύγκριση των διαφορετικών προσεγγίσεων 9
1.3.2 Εκτίμηση συχνοτικού περιεχομένου των παλμών 12

2 Κατάταξη καταγραφών ως παλμικές 17
2.1 Μέθοδος του Baker (2007) 17
2.2 Διαδικασία ταξινόμησης παλμών 18
2.3 Εξαγωγή του παλμού ταχύτητας 20
2.4 Προσδιορισμός του εξαγόμενου παλμού 22
2.5 Περίοδος του παλμού 24
2.6 Μελέτη της εδαφικής κίνησης σε άνω της μιας διάστασης 26

3 Αναλυτικό μοντέλο Μαυροειδή - Παπαγεωργίου 27
3.1 Μελέτη των Μαυροειδή και Παπαγεωργίου 27
3.2 Περιγραφή αναλυτικού μοντέλου 27
3.3 Φασματικές ιδιότητες του αναλυτικού μοντέλου 33
3.4 Συνοριακό μοντέλο 35

4 Μεθοδολογία Μίμογλου (2014) 39
4.1 Γενικά στοιχεία 39
4.2 Ορισμός της CAD 39
4.3 Ορισμός παλμικών παραμέτρων 41
4.3.1 Περίοδος του παλμού 41
4.3.2 Εύρος, διάρκεια, μετατόπιση φάσης και χρόνος έναρξης παλμού 43
4.4 Εφαρμογή του κύματος Μίμογλου σε πραγματικές καταγραφές 45

5 Δείκτης παλμικότητας Καρδούτσου (2017) 47
5.1 Εισαγωγικά στοιχεία 47
5.2 Δείκτες παλμικότητας - Βιβλιογραφική αναφορά 48
5.2.1 Παλμικός δείκτης - Baker (2007) 48
5.2.2 Παλμικός δείκτης - Zhai et al. (2013) 48
5.2.3 Παλμικός δείκτης - Chang et al. (2016), ... 49
5.3 Μεθοδολογία Καρδούτσου (2017) 49

5.4 Αξιολόγηση μεθοδολογίας 50

6 Σχέσεις R-μ 55
6.1 Γενικά στοιχεία 55
6.2 Παράθεση μαθηματικών σχέσεων 56
6.3 Στατιστικές παράμετροι 60
6.3.1 Κεντρική τάση του C_R 60
6.3.2 Μεταβλητότητα του CR 61
6.3.3 Απλοποιημένες εξισώσεις 62
6.4 Επιρροή του σεισμικού μεγέθους και της απόστασης στο C_R 64
6.5 Στατιστική συσχέτιση των C_R και S_d 67
6.6 Κατανομή πιθανότητας του CR 68
6.7 Αξιολόγηση μεθοδολογίας 69
6.8 Καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας μέγιστης ανελαστικής μετατόπισης 71

7 Εφαρμογή Μεθοδολογιών-Αναλύσεις καταγραφών με κρυφούς παλμούς 79

8 Βιβλιογραφία 95

9 Παράρτημα Διαγραμμάτων 97

Πίνακας Σχημάτων:

Σχήμα 1-1: Φαινόμενο κατευθυντικότητας (Kramer, 1996). 2
*Σχήμα 1-2: Καταγραφές πρόσω και οπίσω κατευθυντικότητας (Somerville et al, 1997).*2
Σχήμα 1-3: Φαινόμενο κατευθυντικότητας και μόνιμης μετακίνησης στην περίπτωση οριζόντιου ρήγματος (αριστερά) και ρήγματος βύθισης (δεξιά) (Stewart et al, 2001). 3
Σχήμα 1-4: Φαινόμενο κατευθυντικότητας και μόνιμης μετακίνησης στην περίπτωση οριζόντιου ρήγματος (επάνω) και ρήγματος βύθισης (κάτω). 3
Σχήμα 1-5: Οι εκτιμήσεις της σχέσης των Somerville et al (1997) για διάφορες συνθήκες κατευθυντικότητας 5
Σχήμα 1-6: Απλοποιημένα σχήματα έκφρασης των παλμών κατευθυντικότητας......6
Σχήμα 1-7: Κυματομορφή Mavroeidis and Papageorgiou (2003). 7
Σχήμα 1-8: Απλοποιημένοι παλμοί των Makris and Black (2004). 8
Σχήμα 1-9: : Προσδιορισμός περιόδου με βάση τον Mavroeidis et al [2004]......9
Σχήμα 1-10:Καθορισμός περιόδου παλμού από το φάσμα ταχυτήτων (Rodriguez-Marek, 2000)......9
Σχήμα 1-11:Συνοριακό Μοντέλο Papageorgiou και Mavroeidis (2003). 10
Σχήμα 1-12:Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για ορισμό των απλοποιημένων ημιτονοειδών κινήσεων του εδάφους. 11
Σχήμα 1-13: Σύγκριση αποτελεσμάτων από ανάλυση παλινδρόμησης για PHV με σχέσεις που προτείνονται από άλλους ερευνητές για καταγραφές κοντινού πεδίου πρόσω-κατευθυντικότητας (Rodriguez-Marek 2000)......13
Σχήμα 1-14:Σύγκριση αποτελεσμάτων από ανάλυση παλινδρόμησης για PHV με σχέσεις που προτείνονται από άλλους ερευνητές για καταγραφές κοντινού πεδίου πρόσω-κατευθυντικότητας Σύγκριση του μοντέλου Rodriguez-Marek (2000) με εκείνα που προτάθηκαν από το Somerville (1998) για την περίοδο παλμού (Tv) και από τον Alavi και τον Krawinkler (2000) για την περίοδο της μέγιστης φασματικής απόκρισης ψευδο-ταχύτητας (Tv-p) (Rodriguez-Marek 2000). 15
Σχήμα 1-15: Πρόβλεψη μοντέλου Rodriguez-Marek (2000) για την περίοδο παλμού (T_v) για βραχώδες και μαλακό έδαφος. Για τους δύο τύπους εδαφών η γραμμή με έντονο χρωματισμό αποτελεί τη μέση τιμή και οι γραμμές εκατέρωθεν αυτής αποτελούν την προσθαφαίρεση της τυπικής απόκλισης......15
Σχήμα 2-1: Κοινές μητρικές συναρτήσεις κυμάτων για χρήση στην ανάλυση κύματος (Baker 2007)......18
Σχήμα 2-2: α) Η χρονοϊστορία της ταχύτητας για μια εδαφική κίνηση, b) Διακριτός μετασχηματισμός και c) Συνεχής μετασχηματισμός(Baker 2007). 19
Σχήμα 2-3: Το κυματίδιο του Daubechie $4^{ης}$ τάξεως. 20
Σχήμα 2-4:Επεξήγηση της διαδικασίας αποσύνθεσης που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του τμήματος παλμού μιας κίνησης εδάφους (της fault-normal συνιστώσας από την καταγραφή του Northridge, Rinaldi, 1979). 21
Σχήμα 2-5:Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης και αντίστοιχοι εξαγόμενοι παλμοί 22
Σχήμα 2-6:Γράφημα του "PGV ratio" ως προς the "Energy ratio''. 23
Σχήμα 2-7:Κύμα του Daubechies και ένα ημιτονοειδές κύμα με περίοδο ίση με το μέγιστο εύρος του κύματος στην ανάλυση Fourier. 24
Σχήμα 2-8:Τ από το μέγιστο στο φάσμα της ταχύτητας ως προς το T_p της ψευδο-περιόδου του κύματος.....25

Σχήμα 2-9: Παράδειγμα προσδιορισμού της περιόδου του παλμού (για την εδαφική κίνηση στο Landers, του Yermo Fire Station,1992). 25
Σχήμα 2-10:Δείκτες παλμών για την εδαφική κίνηση στο Chi-Chi, Taiwan, Tsaotun (TCU075), ως συνάρτηση του προσανατολισμού της συνιστώσας κάθετης στο ρήγμα. Το ακτινικό μέγεθος δείχνει την τιμή του παλμικού δείκτη για τον προσανατολισμό αυτό ...26
Σχήμα 3-1: Συνηθέστερα κύματα που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση κυμάτων......28
Σχήμα 3-2: Σύγκριση της κυματομορφής σύμφωνα με τους Mavroeidis and Papageorgiou (2003) και του κυματιδίου Garbor......30
Σχήμα 3-3:: Διακύμανση της μέγιστης ταχύτητας εδάφους (PGV-Peak Ground Velocity) σε σχέση με το μέγεθος της σεισμικής ροπής Mw και την απόσταση R του σταθμού καταγραφής από το ρήγμα......33
Σχήμα 3-4:Παράδειγμα συνοριακού μοντέλου Mavroeidis- Papageorgiou & Aki (1983a) 37
Σχήμα:4-1: Για μια δεδομένη καταγραφή:.....42
Σχήμα 4-2:Για δύο διαφορετικές καταγραφές γίνεται προσδιορισμός της περιόδου παλμού ταχύτητας Tp από την κορυφή του φάσματος Sd × Sv για απόσβεση 5% (οι αντίστοιχες καμπύλες για μηδενική απόσβεση παρουσιάζονται για σύγκριση), ενώ στο κάτω σχήμα γίνεται σύγκριση.....43
*Σχήμα 5-1:Σύγκριση των δεικτών παλμικότητας Καρδούτσου (2017) και Baker (2007)*51
Σχήμα 5-2:Ο λόγος της ανελαστικής προς την ελαστική μετατόπιση din/del ως προς τον προτεινόμενο δείκτη Καρδούτσου (2017).....52
Σχήμα 6-1:Γεωμετρικός μέσος του CR για διάφορες κατηγορίες εδαφών. 60
Σχήμα 6-2:Η λογαριθμική κατανομή της τυπικής απόκλισης της ανελαστικής μετατόπισης για διάφορες κατηγορίες εδαφών. 61
Σχήμα 6-3:Τιμές παραμέτρων θ_1 και θ_2 και το 95% διάστημα εμπιστοσύνης 63
Σχήμα 6-4:Λόγος ανελαστικών μετακινήσεων για διάφορα σεισμική μεγέθη και για διάφορες τιμές R (επάνω σχήμα) και συσχέτιση μεταξύ του CR και της σεισμικής ροπής (κάτω σχήμα). 65
Σχήμα 6-5: Λόγος ανελαστικών μετακινήσεων για διάφορες αποστάσεις από την διάρρηξη και για διάφορες τιμές του R.....67
Σχήμα 6-6:Συσχέτιση μεταξύ του CR και της απόστασης από το ρήγμα. 67
Σχήμα 6-7:: Συσχέτιση μεταξύ CR και Sd.....68
Σχήμα 6-8:Εμπειρική κατανομή του CR. 70
Σχήμα 6-9:Σύγκριση του CR με χρήση της λογαριθμο-κανονικής κατανομής......71
Σχήμα 6-10:: Καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας 72
Σχήμα 6-11:Καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας......72
Σχήμα 6-12:Ομοιόμορφο φάσμα σεισμικής επικινδυνότητας......73
Σχήμα 6-13:: Τιμές μεταβλητών a και b. 74
Σχήμα 6-14:Τιμές παραμέτρων c1, c2, cR και cT.....76
Σχήμα 6-15:Τιμές τυπικής απόκλισης. 77
Σχήμα 6-16:Τιμές παραμέτρων bT1, aT2, bT2, aq1, bq1, aq2, bq2. 78
Σχήμα 7-1: Φάσματα EC8 μαζί με τον κάθε εξαγόμενο παλμό i= 1 έως 6 και Φάσμα της επιτάχυνσης της αρχικής καταγραφής 1116-1 με το φάσμα του EC8. 82
Σχήμα 7-2:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της καταγραφής 1116-1 μαζί με τον κάθε εξαγόμενο παλμό.....83
Σχήμα 7-3:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της καταγραφής 1116-1 μαζί με το σύνολο των εξαγόμενων παλμών.....83
Σχήμα 7-4:Επιτάχυνση αρχικής καταγραφής 1116-1 και επιτάχυνση αρχικής καταγραφής μείον την επιτάχυνση του σημαντικού παλμού αυτής......84

Σχήμα 7-5:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της αρχικής καταγραφής1116-1 και χρονοϊστορία της ταχύτητας για τον σημαντικό παλμό. 84
Σχήμα 7-6:Ελαστικό Φάσμα της καταγραφής 1116-1 84
Σχήμα 7-7:Ανελαστικό Φάσμα της καταγραφής 1116-1 84
Σχήμα 7-8:Φάσματα EC8 μαζί με τον κάθε εξαγόμενο παλμό i= 1 έως 6 και Φάσμα της επιτάχυνσης της αρχικής καταγραφής 2752-1 με το φάσμα του EC8. 85
Σχήμα 7-9: Χρονοϊστορία της ταχύτητας της καταγραφής 2752-1 μαζί με τον κάθε εξαγόμενο παλμό 86
Σχήμα 7-10:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της καταγραφής 2752-1 μαζί με το σύνολο των εξαγόμενων παλμών 86
Σχήμα 7-11:Επιτάχυνση αρχικής καταγραφής 2752-1 και επιτάχυνση της καταγραφής μείον την επιτάχυνση του σημαντικού παλμού αυτής. 87
Σχήμα 7-12:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της αρχικής καταγραφής 2752-1 και χρονοϊστορία της ταχύτητας για τον σημαντικό παλμό. 87
Σχήμα 7-13:Ελαστικό Φάσμα της καταγραφής 2752-1 87
Σχήμα 7-14:Ανελαστικό Φάσμα της καταγραφής 2752-1 87
Σχήμα 7-15:Φάσματα EC8 μαζί με τον κάθε εξαγόμενο παλμό i= 1 έως 6 και Φάσμα της επιτάχυνσης της αρχικής καταγραφής 4457-2 με το φάσμα του EC8. 88
Σχήμα 7-16:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της καταγραφής 4457-2 μαζί με τον κάθε εξαγόμενο παλμό 89
Σχήμα 7-17:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της καταγραφής 4457-2 μαζί με σύνολο των εξαγόμενων παλμών 89
Σχήμα 7-18:Επιτάχυνση αρχικής καταγραφής 4457-2 και επιτάχυνση της αρχικής καταγραφής μείον την επιτάχυνση του σημαντικού παλμού αυτής. 90
Σχήμα 7-19:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της αρχικής καταγραφής 4457-2 και χρονοϊστορία της ταχύτητας για τον σημαντικό παλμό. 90
Σχήμα 7-20:Ελαστικό Φάσμα της καταγραφής 4457-2 90
Σχήμα 7-21:Ανελαστικό Φάσμα της καταγραφής 4457-2 90
Σχήμα 7-22:Φάσματα EC8 μαζί με τον κάθε εξαγόμενο παλμό i= 1 έως 6 και Φάσμα της επιτάχυνσης της αρχικής καταγραφής 8134-2 με το φάσμα του EC8. 91
Σχήμα 7-23:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της καταγραφής 8134-2 μαζί με τον κάθε εξαγόμενο παλμό 92
Σχήμα 7-24:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της καταγραφής 8134-2 μαζί με το σύνολο των εξαγόμενων παλμών 92
Σχήμα 7-25:Επιτάχυνση αρχικής καταγραφής 8134-2 και επιτάχυνση της αρχικής καταγραφής μείον την επιτάχυνση του σημαντικού παλμού αυτής. 93
Σχήμα 7-26:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της αρχικής καταγραφής 8134-2 και χρονοϊστορία της ταχύτητας για τον σημαντικό παλμό. 93
Σχήμα 7-27:Ελαστικό Φάσμα της καταγραφής 8134-2 93
Σχήμα 7-28:Ανελαστικό Φάσμα της καταγραφής 8134-2 93
Σχήμα 7-29:Διάγραμμα μ-T 94
Σχήμα 7-30:Διάγραμμα T-T_p 94

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Οι καταγραφές κοντινού πεδίου παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και κεντρίζουν την προσοχή της επιστημονικής κοινότητας εξαιτίας της σημαντικής επίδρασης τους στα τεχνικά έργα. Οι κινήσεις του εδάφους κοντά στο ρήγμα παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις συγκριτικά με εδαφικές κινήσεις που σημειώνονται σε μεγαλύτερη απόσταση από το ρήγμα. Ακόμη, εμφανής είναι η επιρροή των καταγραφών αυτών στην μορφή των ελαστικών και ανελαστικών φασμάτων απόκρισης καθώς και στο μέγεθος των σεισμικών φορτίσεων. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαίο να αναλυθεί εκτενώς το ζήτημα αυτό και να παρατεθούν βασικές έννοιες.

1.2 Κοντινό Πεδίο

Η 'Ζώνη Κοντινού Πεδίου' (Near fault zone ή Near field zone) τυπικά θεωρείται ότι βρίσκεται εντός μιας απόστασης περίπου 20-60 Km, από την σεισμογενή διάρρηξη. Το μέγεθός της είναι ανάλογο με το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος και είναι γενικώς εξαρτημένη από την επιφάνεια ρηγμάτωσης που βρίσκεται στο επίπεδο του ρήγματος. Εντός της ζώνης εκείνης εμφανίζεται η μεγαλύτερη συγκέντρωση βλαβών και η εδαφική κίνηση συνδέεται άμεσα με:

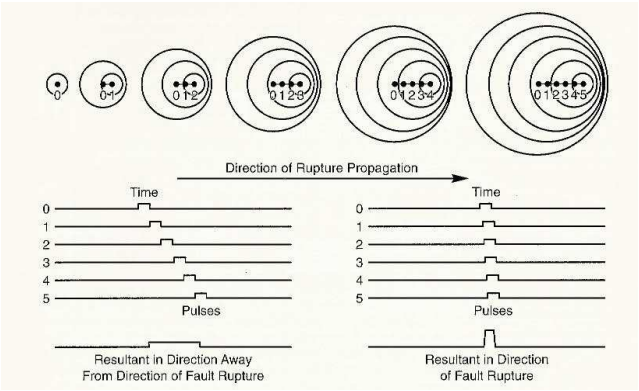
- *τον μηχανισμό διάρρηξης,*
- *την διεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης του ρήγματος σε σχέση με την θέση καταγραφής του σεισμικού γεγονότος,*
- *τις πιθανές παραμένουσες μετακινήσεις που δύνανται να προκληθούν εξαιτίας της ολίσθησης του ρήγματος.*

Οι προαναφερθέντες λόγοι επίδρασης της εδαφικής κίνησης αποτελούν την αιτία εμφάνισης δύο σημαντικών φαινομένων, του 'Φαινομένου της Κατευθυντικότητας' (Directivity Effect) και της 'Μόνιμης Στατικής Παραμόρφωσης' (Fling Step).

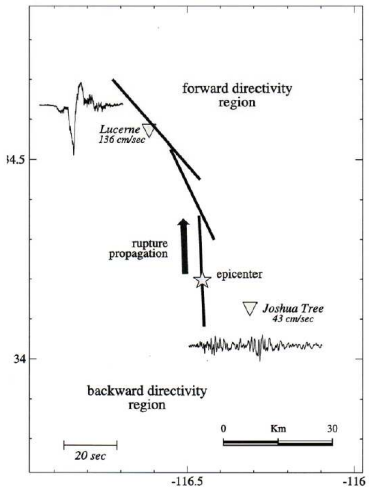
1.2.1 Κατευθυντικότητα

Στην επιφάνεια του ρήγματος και πιο συγκεκριμένα σε ένα σημείο αυτής που ονομάζεται εστία (hypocenter), γεννάται ένα σεισμικό γεγονός από την διάρρηξη του εδάφους και σημειώνεται ολίσθηση μεταξύ των δύο εδαφικών τεμαχίων που προκύπτουν. Η διάρρηξη αυτή δεν υλοποιείται μόνο σε ένα σημείο αλλά διαδίδεται σταδιακά και συνοδεύεται από την θραύση των κλείθρων (asperities). Με τον όρο αυτό περιγράφονται τα φυσικά εξογκώματα που εντοπίζονται στην επιφάνεια του ρήγματος και διαθέτουν μεγάλη τραχύτητα και κατ' επέκταση αντίσταση κατά την θραύση τους με αποτέλεσμα οι διαρρήξεις στα σημεία αυτά να υλοποιούνται εντονότερα σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία του ρήγματος. Κατά την διάρκεια μιας τέτοιας διάρρηξης παράγεται ένας παλμός ταχύτητας όπου διαδίδεται ως κύμα S και η ταχύτητα διάδοσης του είναι

ανάλογη της ταχύτητας διάρρηξης. Επομένως με την διάδοση της ρηγμάτωσης από την εστία του ρήγματος προς μια θέση προκαλείται ένα φαινόμενο αντίστοιχο με το φαινόμενο Doppler. Λόγω εγγύτητας των τιμών των ταχυτήτων διάρρηξης και διάδοσης των κυμάτων, όταν η ρηγμάτωση πλησιάζει προς μια θέση, στην θέση αυτή θα υπάρξει άθροιση των παλμών ταχύτητας των επιμέρους διαρρήξεων με αποτέλεσμα να προκύπτει παλμός ταχύτητας μεγάλου εύρους, μικρής διάρκειας και μεσαίας προς μεγάλης δεσπόζουσας περιόδου (πρόσω κατευθυντικότητα – forward directivity). Η παλμική αυτή κίνηση είναι ιδιαίτερα έντονη στην συνιστώσα της εδαφικής κίνησης που είναι κάθετη στο ίχνος του ρήγματος, λόγω της πόλωσης των διατμητικών κυμάτων. Ωστόσο, στην αντίθετη κατεύθυνση, απομακρυνόμενοι δηλαδή από την κατεύθυνση διάρρηξης, οι παλμοί ταχύτητας ακολουθούν ο ένας τον άλλον οπότε προκύπτει παλμός ταχύτητας μικρού εύρους και μεγάλης διάρκειας (οπίσω κατευθυντικότητα – backward directivity). Πέραν όμως την πρόσω κι όπισθεν κατευθυντικότητας, εντοπίζεται και η περίπτωση της ουδέτερης κατευθυντικότητας (neutral directivity) όπου σε σημεία συνήθως εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος δεν εμφανίζεται έντονη διάδοση της διάρρηξης.

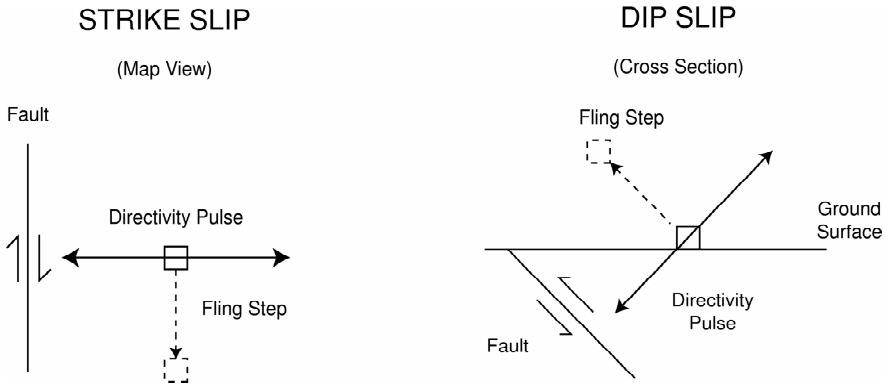


Σχήμα 1-1: Φαινόμενο κατευθυντικότητας (Kramer, 1996).

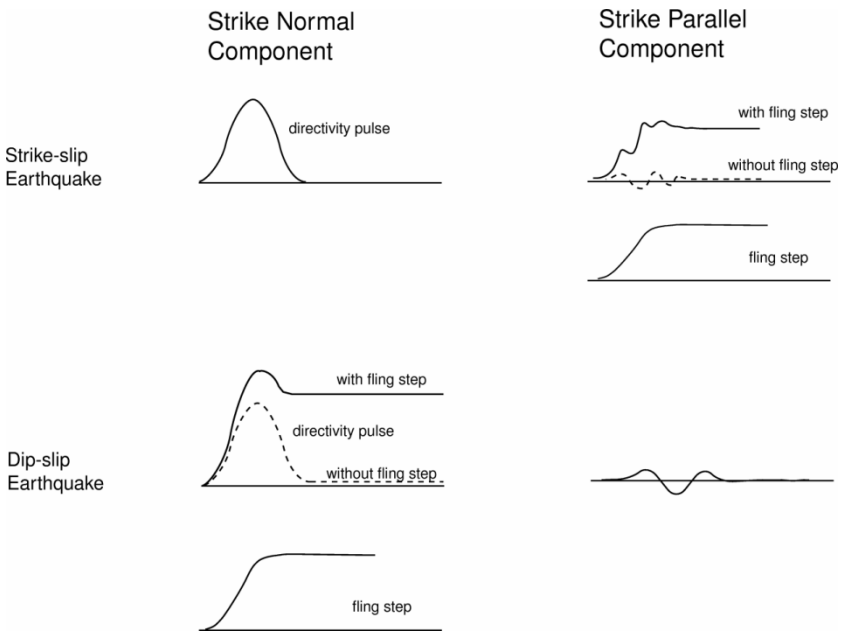


Σχήμα 1-2: Καταγραφές πρόσω και οπίσω κατευθυντικότητας (Somerville et al, 1997)

Φαινόμενα κατευθυντικότητας παρατηρούνται σε ρήγματα όλων των ειδών, είτε εκείνα είναι οριζόντια (strike slip), κανονικά (normal) ή ανάστροφα (reverse). Στην περίπτωση των οριζοντίων ρηγμάτων, η εδαφική κίνηση κάθετα στο ίχνος του ρήγματος, λόγω της πόλωσης, εμφανίζει ισχυρούς παλμούς κατευθυντικότητας. Στην περίπτωση των κανονικών ή ανάστροφων ρηγμάτων, κάθετα στο ίχνος του ρήγματος, καταγράφεται μια εδαφική κίνηση που αποτελεί σύνθεση του παλμού της κατευθυντικότητας και της ολίσθησης του ρήγματος. Στην περίπτωση ρηγμάτων βύθισης (dip slip), οι συνθήκες για πρόσω κατευθυντικότητα πληρούνται σε περιοχές που βρίσκονται κοντά στην οριζόντια προβολή του επιπέδου διάρρηξης (hanging wall).



Σχήμα 1-3: Φαινόμενο κατευθυντικότητας και μόνιμης μετακίνησης στην περίπτωση οριζόντιου ρήγματος (αριστερά) και ρήγματος βύθισης (δεξιά) (Stewart et al, 2001).



Σχήμα 1-4: Φαινόμενο κατευθυντικότητας και μόνιμης μετακίνησης στην περίπτωση οριζόντιου ρήγματος (επάνω) και ρήγματος βύθισης (κάτω).

1.2.1 Μόνιμη στατική μετακίνηση

Η μελέτη ψηφιακών καταγραφών που ελήφθησαν από σεισμογενής διαρρήξεις στο κοντινό πεδίο, ανέδειξε την ύπαρξη μόνιμων μετακινήσεων. Οι μόνιμες στατικές

εδαφικές μετακινήσεις αναπτύσσονται κατά την διάρκεια της ολίσθησης και προς την κατεύθυνση αυτή σε ένα διακριτό χρονικό διάστημα. Μια ενδεικτική περίπτωση του φαινομένου αυτού σημειώνεται σε οριζόντια ρήγματα όπου η κατευθυντικότητα του παλμού πραγματοποιείται στη συνιστώσα που είναι κάθετη στο ίχνος του ρήγματος , ενώ μόνιμη μετακίνηση εντοπίζεται στη συνιστώσα που είναι παράλληλη στο ίχνος . Ωστόσο, σε ρήγματα βύθισης, η μόνιμη μετακίνηση και η κατευθυντικότητα του παλμού συντίθενται στην κάθετη στο ίχνος συνιστώσα.

1.2.2 Παραμετροποίηση κινήσεων κοντινού πεδίου

1.2.2.1 Μοντέλο Somerville et al.

Οι συνθήκες που οδηγούν σε εμφάνιση πρόσω και οπίσω κατευθυντικότητας παραμετροποιήθηκαν σε μορφή μαθηματικού μοντέλου από τους Somerville et al. (1997) Η χωρική διακύμανση των φαινομένων κατευθυντικότητας εξαρτάται από:

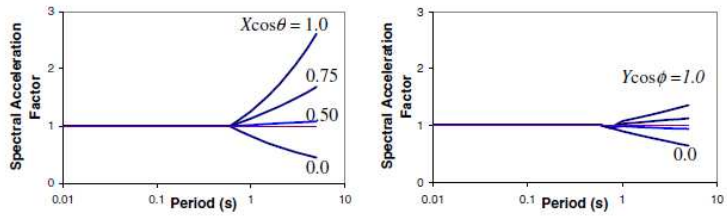
- *τη γωνία μεταξύ της διεύθυνσης της διάρρηξης και του αζιμούθιου των κυμάτων που κατευθύνονται από το επίκεντρο στην εξεταζόμενη θέση (η γωνία αυτή συμβολίζεται με θ για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και φ για ρήγματα κεκλιμένης ολίσθησης)*
- *το ποσοστό της διαρρηγμένης επιφάνειας που βρίσκεται ανάμεσα στο υπόκεντρο και στην εξεταζόμενη θέση (X για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και Y ρήγματα κεκλιμένης ολίσθησης).*

Η πρόσω κατευθυντικότητα προκύπτει κυρίως για μικρότερες γωνίες θ και φ και για μεγαλύτερα ποσοστά X και Y.

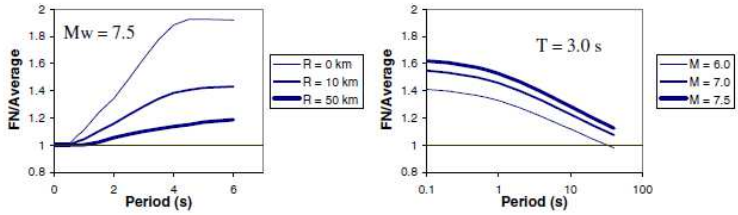
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις παρόλο που πληρούνται οι συνθήκες για την εκδήλωση κατευθυντικότητας, εντέλει υπάρχει πιθανότητα να μην πραγματοποιηθεί το φαινόμενο αυτό. Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου ενδεχομένου μπορεί να αποτελέσει ένας σταθμός καταγραφής σεισμικών δονήσεων που βρίσκεται στο άκρο του ρήγματος, η διάρρηξη κατευθύνεται προς το σταθμό, αλλά η ολίσθηση είναι συγκεντρωμένη κοντά στο άκρο του ρήγματος, όπου βρίσκεται τοποθετημένος ο σταθμός.

Συνεπώς, προκειμένου να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα της κατευθυντικότητας, οι Somerville et al. (1997a) συσχέτισαν τα κατάλοιπα των φασματικών συντεταγμένων απόκρισης για απόσβεση 5%, με τις προαναφερθείσες γεωμετρικές παραμέτρους.

Ακόμη, πέραν των προβλέψεων του Somervile (1997) για την εκδήλωση της κατευθυντικότητας, έρευνες έχουν καταλήξει ότι όσον αφορά την αναπαράσταση των εδαφικών κινήσεων σε περιοχές πλησίον του ρήγματος, είναι προτιμητέα η χρήση της χρονοϊστορίας των κινήσεων αυτών σε σχέση με την χρήση του φάσματος απόκρισης. Με αυτό τον τρόπο καθίσταται ευκολότερη η εκτίμηση της απόκρισης των κατασκευών έναντι τέτοιου είδους εδαφικών κινήσεων και ο χαρακτηρισμός της κυρίαρχης συχνότητας της κίνησης του εδάφους συνεπάγεται στοχαστική διαδικασία έχοντας σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή της ενέργειας διαμέσου της διάρκειας της κίνησης. Όταν η ενέργεια συγκεντρώνεται σε λίγους παλμούς της κίνησης, τότε το φαινόμενο συντονισμού που το φάσμα έχει σχεδιαστεί για να αναπαραστήσει μπορεί να έχει μη επαρκή χρόνο για να αναπτυχθεί (Somerville, 1998).



(a) Average response spectra ratio, showing dependence on period and on directivity parameters



(b) Strike-normal to average horizontal response spectral ratio for maximum forward-directivity conditions ($X\cos\theta = 1$)

Σχήμα 1-5: Οι εκτιμήσεις της σχέσης των Somerville et al (1997) για διάφορες συνθήκες κατευθυντικότητας

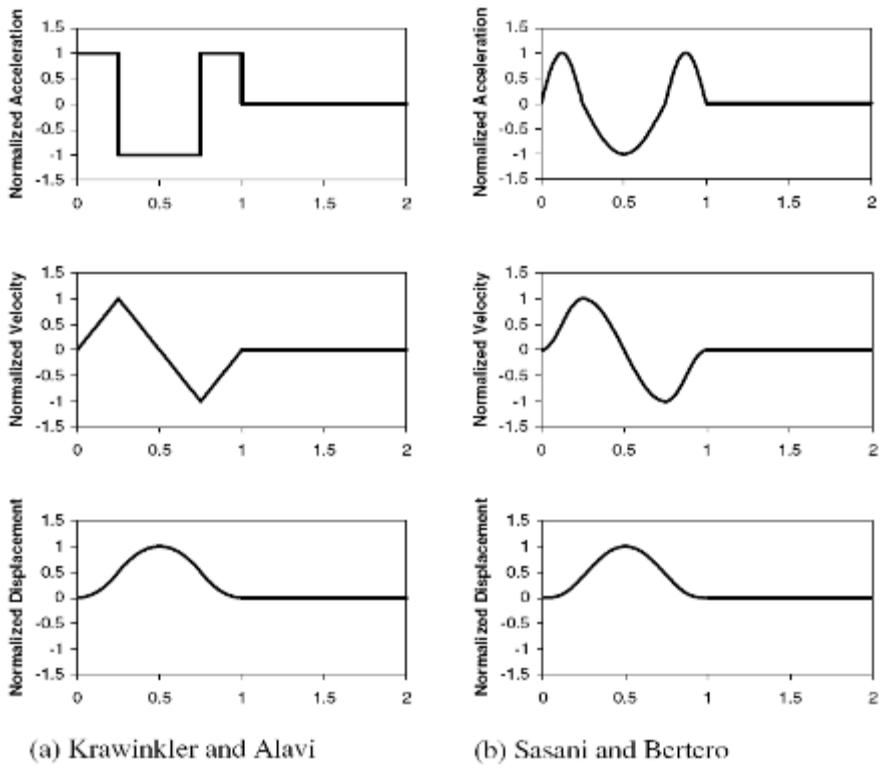
1.3 Μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης των εδαφικών κινήσεων

Σύμφωνα, με τους Krawinkler και Alavi (1998), Sasani και Bertero (2000), η απόκριση των κατασκευών σε εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου μπορεί να προσεγγισθεί εύκολα με απλοποιημένες μορφές των παλμών της εδαφικής ταχύτητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6. Δηλαδή, έχει διαπιστωθεί ότι απλοποιημένες αναπαραστάσεις του παλμού της ταχύτητας μπορεί να εντοπίσουν τα εμφανή χαρακτηριστικά της απόκρισης μιας κατασκευής που υπόκειται σε εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Για την αναπαράσταση των εδαφικών κινήσεων σε δύο διευθύνσεις, είναι αναγκαία μια ημιτονικού παλμού αναπαράσταση της συνιστώσας που είναι παράλληλη στο ρήγμα καθώς και το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην αρχή των συνιστωσών κάθετα και παράλληλα στο ρήγμα.

Οι απλοποιημένες χρονοϊστορίες των παλμών κατευθυντικότητας καθορίζονται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- *τον αριθμό των ημίκυκλων (half cycles) που ισοδυναμούν με τους παλμούς της εδαφικής κίνησης*
- *την δεσπόζουσα περίοδο που αντιστοιχεί στη διάρκεια κάθε ημίκυκλου*
- *το εύρος*

Ο προσδιορισμός της εδαφικής κίνησης απαιτεί εκτίμηση της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας (PGV), της δεσπόζουσας περιόδου του παλμού (T_p) και του αριθμού των σημαντικών ημίκυκλων της κίνησης του εδάφους.

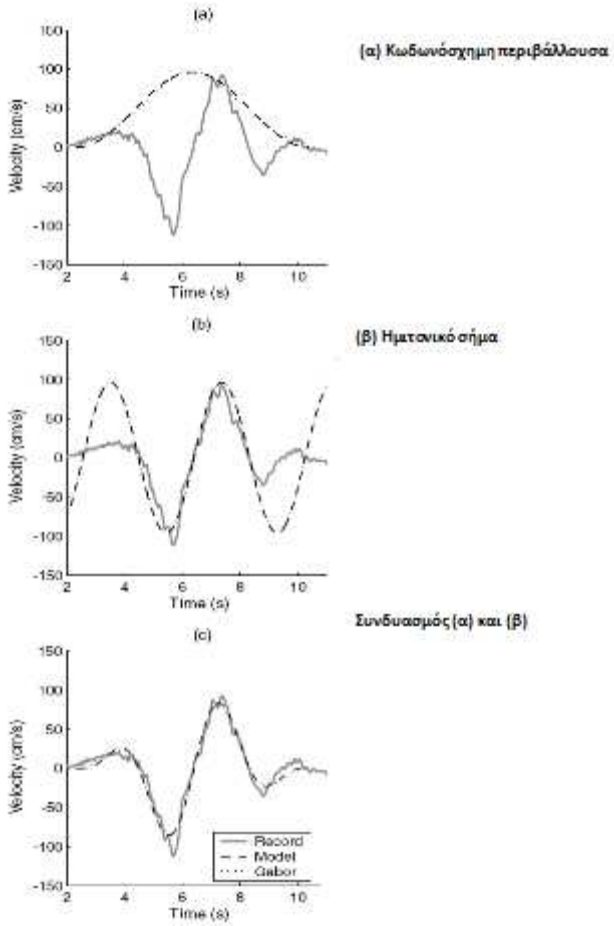


Σχήμα 1-6: Απλοποιημένα σχήματα έκφρασης των παλμών κατευθυντικότητας.

Έτσι, οι Krawinkler and Alavi (1998), προσδιόρισαν τον παλμό της ταχύτητας μέσω ενός ξεκάθαρου και καθολικού μεγίστου στο φάσμα απόκρισης της ταχύτητας. Έτσι, η εκτίμηση της περιόδου του ισοδύναμου παλμού (Tv-p) είναι σχετικά ξεκάθαρη. Για τις κινήσεις με ένα παλμό, αυτοί οι διαφορετικοί ορισμοί της περιόδου του παλμού, παρέχουν σχεδόν ισοδύναμα αποτελέσματα, αλλά για πιο πολύπλοκες καταγραφές, τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν σημαντικά. Συνολικά, η αναλογία μεταξύ Tv και Tv-p είναι 0.84 με μια τυπική απόκλιση 0.28 (Rodriguez-Marek 2000). Η σύμπτωση των Tv και Tv-p για μια σεισμική κίνηση του εδάφους δείχνει ότι ο παλμός της ταχύτητας περιέχει ενέργεια σε μια ζώνη στενής περιόδου.

Οι μελέτες της απόκρισης των κατασκευών για καταγραφές κοντινού πεδίου, έχουν εστιάσει σε φαινόμενα στην μεγαλύτερη συνιστώσα που εντοπίζεται κάθετα στην διεύθυνση του ρήγματος (Alavi and Krawinkler (2000). Παρόλα αυτά, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες η κίνηση σε διεύθυνση παράλληλη με το ρήγμα μπορεί να καταστεί εξίσου σημαντική.

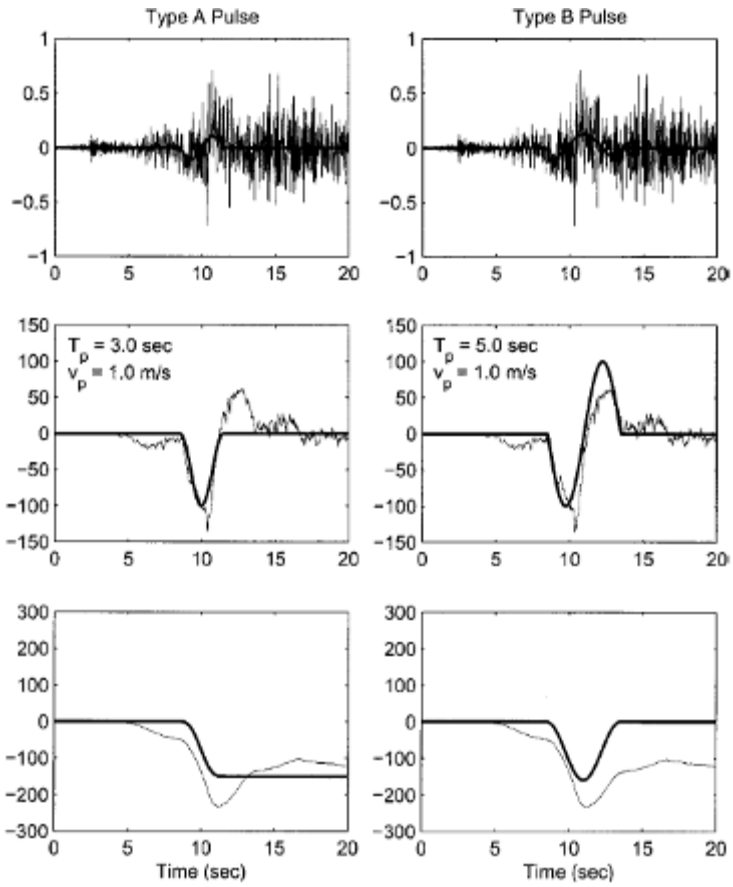
Άλλη προσπάθεια προσομοίωσης των εδαφικών κινήσεων με παλμό κατευθυντικότητας, έγινε από τους Μαυροειδή και Παπαγεωργίου [2003], με χρήση κυματομορφών (wavelets). Πιο συγκεκριμένα, η χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας προσομοιάζεται με ένα ημιτονικό σήμα, που πολλαπλασιάζεται με μια κωδωνόσχημη περιβάλλουσα, η οποία προκύπτει από ένα μετατεθειμένο κύκλο συνημιτόνου.



Σχήμα 1-7: Κυματομορφή Mavroeidis and Papageorgiou (2003).

Η περίοδος του ημιτονικού σήματος πρέπει να είναι μικρότερη από αυτήν της κωδωνόσχημης περιβάλλουσας προκειμένου η προκύπτουσα εδαφική κίνηση να έχει φυσική σημασία.

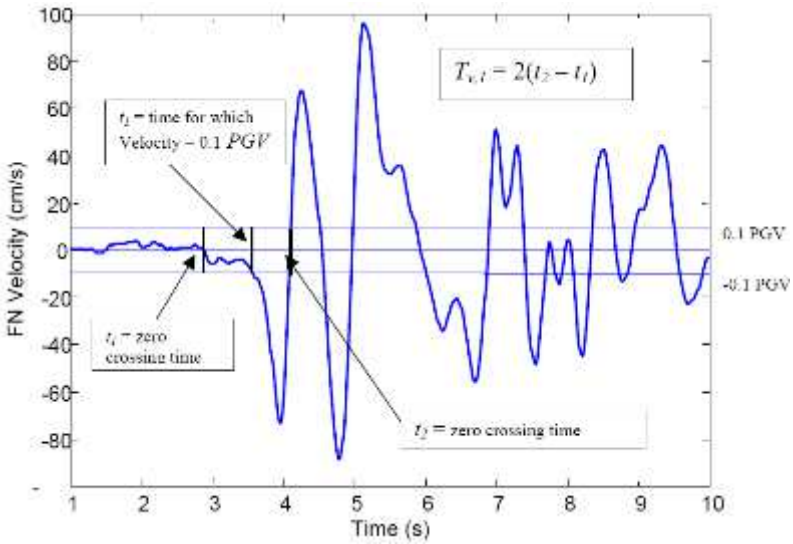
Σύμφωνα με τους Makris and Black [2004], οι καταγραφές κοντινού πεδίου ταξινομούνται σε τρείς κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι εκείνη, όπου η ταχύτητα της εδαφικής κίνησης περιέχει ένα καθαρό παλμό και ορίζεται σαν τύπος παλμού A. Στη δεύτερη κατηγορία, ανήκει μια εδαφική κίνηση, της οποίας η ταχύτητα χαρακτηρίζεται από δύο παλμούς, και τότε η καταγραφή χαρακτηρίζεται σαν τύπος B. Τέλος, στην τρίτη κατηγορία ανήκουν οι εδαφικές κινήσεις, των οποίων η ταχύτητα διακρίνεται από τρείς ή περισσότερους παλμούς, και τότε η καταγραφή χαρακτηρίζεται σαν τύπος C, και οι χρονοϊστορίες ορίζονται με ανάλογο τρόπο, όπως οι άλλες δύο κατηγορίες.



Σχήμα 1-8: Απλοποιημένοι παλμοί των Makris and Black (2004).

Με βάση τα παραπάνω, σύμφωνα με τους Makris and Black (2004), το σημαντικότερο χαρακτηριστικό των εδαφικών καταγραφών είναι ο περιορισμένος αριθμός των παλμών που φαίνονται με ευκρίνεια στη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας, των οποίων η άφιξη συμπίπτει με την άφιξη των διατμητικών κυμάτων, στην αρχή της καταγραφής.

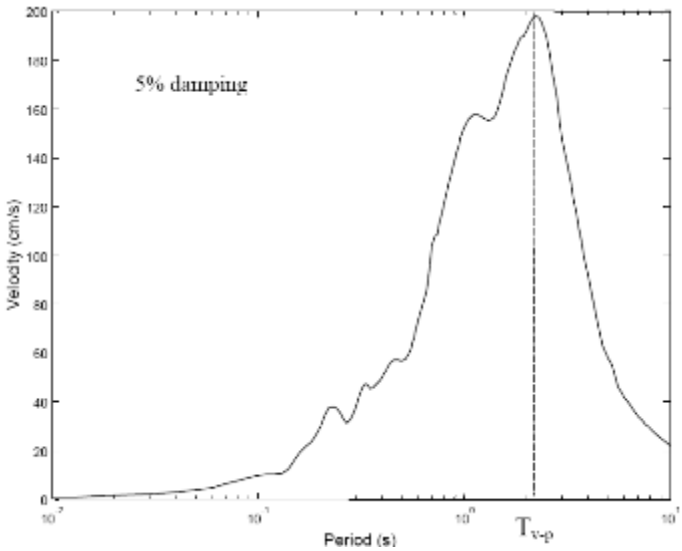
Αντίθετα, σύμφωνα με τον Mavroeidis et al [2004], η κρίσιμη παράμετρος της εδαφικής κίνησης σε περίπτωση φαινομένων κατευθυντικότητας, θεωρείται ότι είναι η περίοδος των παλμών κατευθυντικότητας της εδαφικής κίνησης. Ο καθορισμός αυτής της περιόδου, δηλαδή της δεσπόζουσας περιόδου, γίνεται μέσω του προσδιορισμού της διάρκειας του παλμού με βάση τα σημεία όπου ο παλμός διέρχεται από τον μηδενικό άξονα ή των σημείων στα οποία το εύρος της ταχύτητας αποκτά τιμή ίση με το 10% της μέγιστης τιμής της ταχύτητας του παλμού. Αυτή η δεύτερη προσέγγιση γίνεται με σκοπό να αποφευχθεί το πιθανό σφάλμα στην περίπτωση που υπάρχει κατακόρυφη μετάθεση (drift), στην καταγραφή, η οποία θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με καλύτερη διόρθωση της γραμμής βάσης.



Σχήμα 1-9: : Προσδιορισμός περιόδου με βάση τον Mavroeidis et al [2004].

1.3.1 Σύγκριση των διαφορετικών προσεγγίσεων

Ο παλμός που επιλέγεται συνήθως για τον προσδιορισμό της περιόδου Tp, είναι εκείνος που αντιστοιχεί στη μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV. Σε αντίθεση με την άποψη αυτή βρίσκεται η επιλογή του παλμού της κατευθυντικότητας με βάση τους Makris and Black [2004b], οι οποίοι επιλέγουν το μέγιστο παλμό της εδαφικής επιτάχυνσης. Άλλοι, όπως ο Rodriguez-Marek [2000], επιλέγουν τον παλμό που αντιστοιχεί στη μέγιστη εδαφική ταχύτητα. Σύμφωνα, με τον ίδιο μελετητή, η δεσπόζουσα περίοδος που προκύπτει από τη μέγιστη τιμή του φάσματος ψευδοταχυτήτων, με απόσβεση 5%, ορίζεται ως $T_{p\text{-}v}$ και συσχετίζεται με την περίοδο του παλμού T_v.



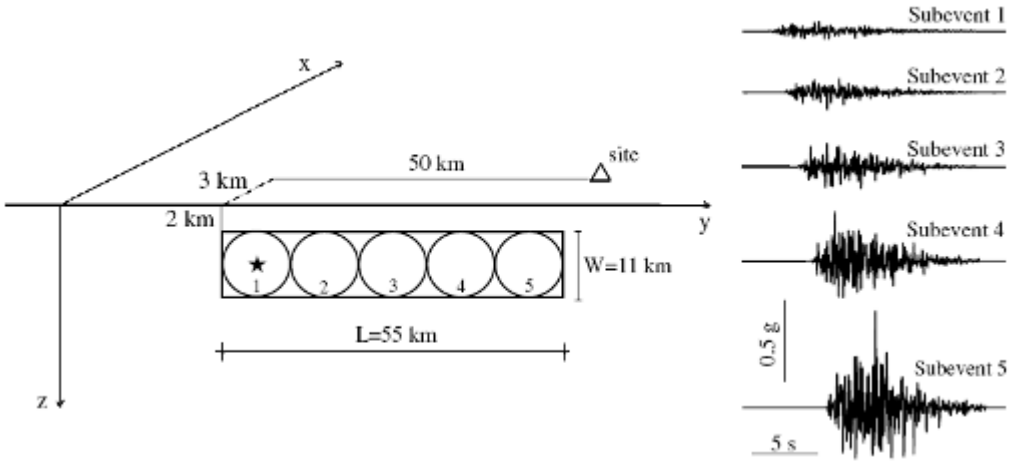
Σχήμα 1-10:Καθορισμός περιόδου παλμού από το φάσμα ταχυτήτων (Rodriguez-Marek, 2000).

Μια τελευταία προσέγγιση για προσδιορισμό των παραμέτρων της απλοποιημένης εδαφικής κίνησης με παλμό κατευθυντικότητας, είναι με βάση τον αριθμό N των ημίκυκλων, η οποία υιοθετήθηκε από τους Stewart et al (2001). Ημίκυκλοι ορίζονται οι

παλμοί που έχουν εύρος ίσο με τουλάχιστον το 50% της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας και το εύρος του παλμού λαμβάνεται συνήθως ίσο με την μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV).

1.3.1.1 Mavroeidis και Papageorgiou [2003]

Η κρίσιμη παράμετρος για να προσδιοριστεί η εδαφική κίνηση κοντινού πεδίου είναι η περίοδος T_p, που σχετίζεται με τη διάρκεια του παλμού κατευθυντικότητας. Η περίοδος εξαρτάται άμεσα από τη διαδικασία διάρρηξης του ρήγματος και πιο συγκεκριμένα από την διάρκεια της διάρρηξης τ (rise time). Η διάρκεια της διάρρηξης εξαρτάται από τα επιμέρους γεγονότα που αποτελούν το κύριο σεισμικό γεγονός. Οι Papageorgiou and Aki (1983), πρότειναν ένα συνοριακό μοντέλο, το οποίο θεωρεί ότι τα επιμέρους σεισμικά γεγονότα προκαλούνται από προσεγγιστικά ισομεγέθεις κυκλικές επιφάνειες διάρρηξης, που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στην επιφάνεια ενός ρήγματος. Οι επιφάνειες αυτές έχουν μια μέση διάμετρο ($2\rho_o$) που σχετίζεται με το μέγεθος της σεισμικής ροπής (M_w) του σεισμικού γεγονότος.



Σχήμα 1-11:Συνοριακό Μοντέλο Papageorgiou και Mavroeidis (2003).

Συμπερασματικά, σύμφωνα με τους Alawi και Krawinkler προκύπτουν μικρότερες τιμές για την περίοδο T_{p-v} από αυτές που προκύπτουν σύμφωνα με τον Somerville και η απόκλιση των δύο τιμών αυξάνει με το μέγεθος της σεισμικής ροπής (M_w). Παρά τις σημαντικές αποκλίσεις που υπάρχουν ανάμεσα στα δύο αποτελέσματα, οι δύο περίοδοι θεωρούνται ίσες κατά παραδοχή.

Λόγω της θεωρούμενης συσχέτισης μεταξύ της περιόδου του παλμού T_p και της περιόδου που αντιστοιχεί στην μέγιστη φασματική ταχύτητα T_{v-p} προτείνονται, όπως ήδη αναφέρθηκε, από διάφορους ερευνητές, σχέσεις που αφορούν το ένα ή το άλλο μέγεθος.

1.3.1.2 Rodriguez - Marek (2000)

Ο Rodriguez - Marek (2000) προκειμένου να εκτιμήσει την περίοδο του παλμού της ταχύτητας, ανέπτυξε μία σειρά από σχέσεις ανάλογες με αυτές των Somerville (1998) και Alawi, Krawinkler (2000) στηριζόμενος σε μία σειρά από σεισμικά γεγονότα, που το καθένα περιγράφεται, στο εξεταζόμενο δείγμα, από διαφορετικό αριθμό καταγραφών που μπορεί να κυμαίνονται από μία έως δεκατρείς. Προκειμένου να αποφευχθεί η

εξάρτηση των αποτελεσμάτων από τα σεισμικά γεγονότα που περιγράφονται από μεγάλο αριθμό καταγραφών, το τυπικό σφάλμα που σχετίζεται με κάθε σημείο του δείγματος διαχωρίζεται σε δύο όρους, σε έναν όρο που αφορά την διασπορά μεταξύ διαφορετικών γεγονότων και σε έναν όρο που αφορά την διασπορά μεταξύ των καταγραφών του ιδίου γεγονότος.

Χαρακτηριστικό στοιχείο για την ορθότητα επιλογής της περιόδου του παλμού κατευθυντικότητας είναι ότι οι σχέσεις εκτίμησης της δεσπόζουσας περιόδου του φάσματος ταχυτήτων $T_{p\text{-}v}$, δίνουν σαφώς χαμηλότερες τιμές από τις σχέσεις υπολογισμού της περιόδου του παλμού T_p. Η διαφοροποίηση αυτή αυξάνεται όσο μεγαλώνουν τα αντίστοιχα σεισμικά μεγέθη. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του Rodriguez - Marek (2000) για την περίοδο T_p με εκείνα που προτείνει ο Somerville (1998) δίνει παρεμφερή αποτελέσματα, με την διαφορά ότι για μικρές περιόδους ο πρώτος παρουσιάζει μικρότερες εκτιμώμενες τιμές περιόδου.

Επιπλέον, δημιουργήθηκε μοντέλο από τον Rodriguez-Marek για την εκτίμηση της περιόδου $T_{v\text{-}p}$, που αντιστοιχεί στην περίοδο της μέγιστης φασματικής ταχύτητας και από τη σύγκριση με την ανάλογη σχέση των Alawi and Krawinkler (2000), διαπιστώθηκε ότι υπάρχει σύγκλιση με τα αποτελέσματα του Rodriguez-Marek (2000), με μικρότερες τιμές περιόδων σε περιοχή με μικρά μεγέθη σεισμών. Έτσι, οι μικρές περίοδοι που προκύπτουν για τα μικρότερα σεισμικά μεγέθη, καταδεικνύουν ότι για συνήθεις κατασκευές μεγάλης ακαμψίας, σεισμικά γεγονότα μεσαίου μεγέθους είναι δυνατόν να έχουν πιο καταστρεπτικά αποτελέσματα από μεγάλους σεισμούς, με παλμούς εδαφικής ταχύτητας που αντιστοιχούν σε μεγάλες περιόδους.

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

Σχήμα 1-12:Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για ορισμό των απλοποιημένων ημιτονοειδών κινήσεων του εδάφους.

Ακόμη, σημαντική διαφοροποίηση στις τιμές των περιόδων του παλμού προκύπτει ανάλογα με το γεωλογικό υπόβαθρο της εκάστοτε εξεταζόμενης θέσης. Πιο συγκεκριμένα διαπιστώνεται ότι για μεγάλα μεγέθη σεισμών, η διαφοροποίηση στην εκτίμηση της περιόδου του παλμού μεταξύ καταγραφών που βρίσκονται σε βράχο και καταγραφών που βρίσκονται σε μαλακό έδαφος, δεν είναι σημαντική και είναι μικρότερη της τυπικής απόκλισης που προτείνεται. Αντιθέτως, η διαφορά στις τιμές των

περιόδων είναι σημαντική για μικρά μεγέθη σεισμών και συγκρίσιμη με την τιμή της τυπικής απόκλισης.

1.3.2 Εκτίμηση συχνοτικού περιεχομένου των παλμών

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω, υπάρχουν δύο τρόποι επιλογής της περιόδου του παλμού. Ο πρώτος σχετίζεται με την επιλογή της περιόδου που αντιστοιχεί στην δεσπόζουσα περίοδο του ψευδοφάσματος ταχυτήτων T_{p-v}, βάσει της παραδοχής ότι αυτή ταυτίζεται με την περίοδο του παλμού κατευθυντικότητας. Ο δεύτερος τρόπος στηρίζεται σε μεθόδους προσαρμογής στην χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας ενός κυματιδίου (wavelet) με στόχο την προσομοίωση της με ένα απλοποιημένο σήμα. Στην περίπτωση αυτή η περίοδος του παλμού ταυτίζεται με την δεσπόζουσα περίοδο του κυματιδίου που προσαρμόζεται καλύτερα στην χρονοϊστορία. Οι μέθοδοι αυτές θα αναλυθούν στην συνέχεια εκτενώς. Επιπρόσθετα, στους τρόπους εκτίμησης του συχνοτικού περιεχομένου των παλμών κατευθυντικότητας, μπορεί να συμπεριληφθεί και η στατιστική εκτίμηση των χαρακτηριστικών παλμών κατευθυντικότητας, που υιοθετήθηκε από τον Rodriguez-Marek (2000).

Συγκεντρωτικά, για την εκτίμηση των παραμέτρων των παλμών κατευθυντικότητας έχουμε διαθέσιμα τα ακόλουθα μοντέλα:

1. *Φασματική Επιτάχυνση:*

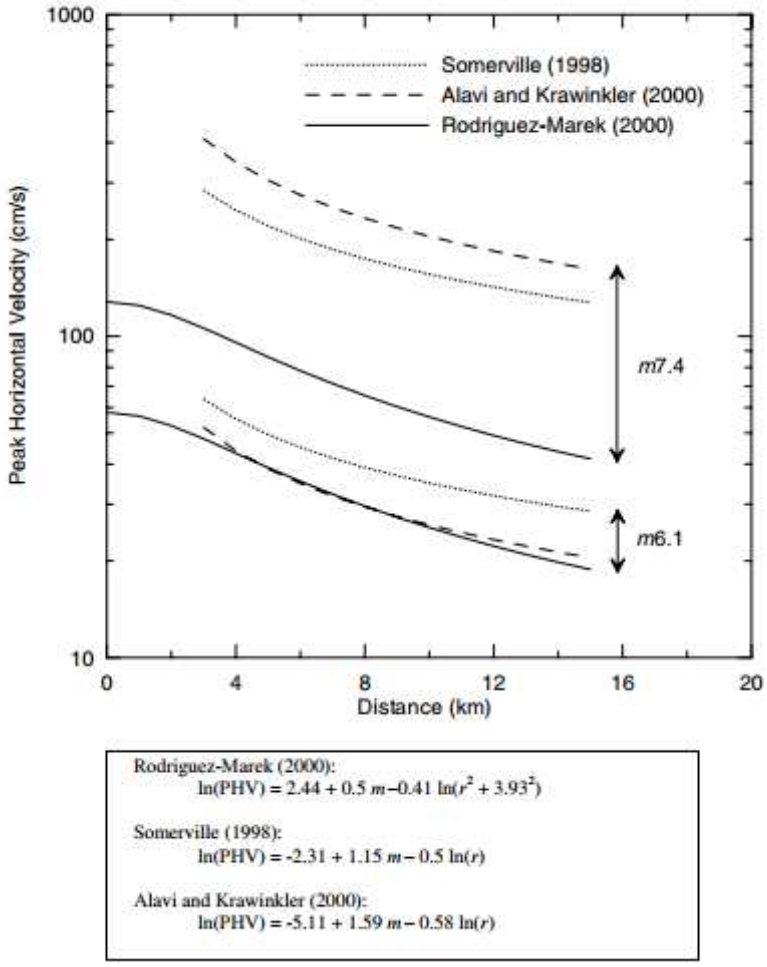
Οι Somerville et al. (1997a) και Abrahamson (2000) παρουσίασαν μοντέλα για την τροποποίηση των συντεταγμένων του φάσματος απόκρισης με 5% απόσβεση με βάση τα δεδομένα από τους Abrahamson και Silva (1997). Τα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί με παλινδρόμηση των παραμενουσών, από αυτή τη σχέση συσχέτισης, με τις γεωμετρικές παραμέτρους κοντά στο ρήγμα.

2. *Διάρκεια και αριθμός ισοδύναμων κύκλων φόρτισης:*

Οι Somerville et al. (1997a) παρουσίασαν το μοντέλο για την τροποποίηση κατά 5-75% της καθοριστικής διάρκειας από τη σχέση συσχέτισης των Abrahamson και Silva (1996). Το μοντέλο έχει αναπτυχθεί μέσω παλινδρόμησης των παραμενουσών αυτής της σχέσης συσχέτισης με τις γεωμετρικές παραμέτρους κοντά στο ρήγμα και εφαρμόζει τη διάρκεια του γεωμετρικού μέσου και των δύο οριζόντιων συνιστωσών. Ένα παρόμοιο μοντέλο έχει αναπτυχθεί από τους Liu et al. (2001) παρέχοντας τον ισοδύναμο αριθμό των ομοιόμορφων κύκλων φόρτισης (uniform stress cycles).

3. *Μέγιστη Οριζόντια Ταχύτητα (Peak Horizontal Velocity-PHV):*

Η Μέγιστη Οριζόντια Ταχύτητα επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος, την απόσταση και από τις χωρικές συνθήκες. Ο Somerville (1998) πρότεινε τη χρήση μιας διγραμμικής σχέσης μεταξύ του λογαρίθμου της PHV, του μεγέθους και του λογαρίθμου της απόστασης. Ακόμη, παρουσίασε μια ανάλυση παλινδρόμησης, χρησιμοποιώντας δεδομένα από 15 καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες ενισχυμένες από 121 προσομοιωμένες χρονοϊστορίες. Οι καταγραφές ανταποκρίνονται σε σεισμικό μέγεθος από 6.2 έως 7.5 και μια απόσταση από το ρήγμα ως την εξεταζόμενη θέση από 0 έως 10Km. Για την αποφυγή μη ρεαλιστικών προβλέψεων της PHV σε μικρές αποστάσεις, ο Somerville (1998) χρησιμοποίησε μια απόσταση αποκοπής 3km. Μια παρόμοια μελέτη που συσχετίζει την PHV με το μέγεθος και την απόσταση από την ζώνη ρηγμάτωσης, έχει παρουσιαστεί από τους Alavi και Krawinkler (2000) και βασίζεται στην ίδια βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν από τον Somerville (1998).



Σχήμα 1-13: Σύγκριση αποτελεσμάτων από ανάλυση παλινδρόμησης για PHV με σχέσεις που προτείνονται από άλλους ερευνητές για καταγραφές κοντινού πεδίου πρόσω-κατευθυντικότητας (Rodriguez-Marek 2000).

Το παραπάνω σχήμα, συγκρίνει τη σχέση που προτάθηκε από τον Rodriguez-Marek (2000) με εκείνες που αναπτύχθηκαν από τους Somerville (1998), Alavi και Krawinkler (2000) για διάφορες τιμές αποστάσεων. Οι σχέσεις αυτές διαφέρουν βασικά στον όρο κλιμάκωσης του σεισμικού μεγέθους. Οι Somerville (1998), Alavi και Krawinkler (2000) πρότειναν ένα πιο ισχυρό μοντέλο για τις διακυμάνσεις της PHV σε σχέση με το σεισμικό μέγεθος.

4. *Διάρκεια Παλμού:*

Η σχέση του Somerville (1998) για τη διάρκεια της περιόδου του παλμού, είναι η ακόλουθη:

$$log10Tv = -2.5 + 0.425\,m \qquad (1.1)$$

όπου το Tv είναι η περίοδος του μεγαλύτερου κύκλου κίνησης και m είναι το μέγεθος της σεισμικής ροπής. Σε μια μεγαλύτερη μελέτη της κατανομής της ολίσθησης χρησιμοποιώντας μοντέλα 15 σεισμών, ο Somerville et al. (1999) παρέχει παραδείγματα για τη χρήση σχεδόν όμοιων σχέσεων κλιμάκωσης για να περιορίσει τις παραμέτρους του μοντέλου. Σε ένα σχεδόν όμοιο σύστημα, τα σεισμικά γεγονότα διαφορετικού μεγέθους δε μπορούν να διαχωριστούν με άλλη παράμετρο πέραν του συντελεστή κλιμάκωσης. Χρησιμοποιώντας ένα σχεδόν όμοιο μοντέλο κλιμάκωσης, το μέγεθος της κλιμάκωσης στην παραπάνω σχέση είναι 0.5 και η προκύπτουσα σχέση είναι:

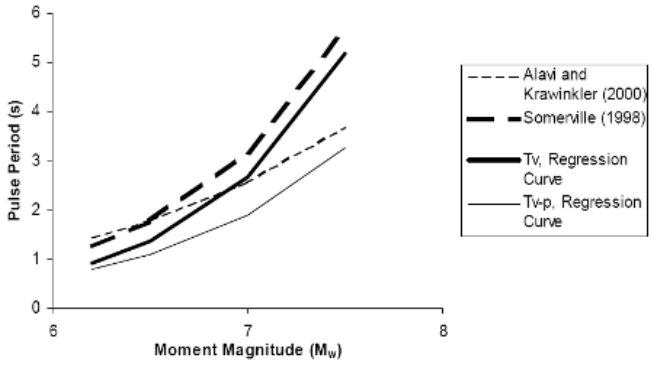
$$\log_{10} T_v = -3.0 + 0.5m \qquad (1.2)$$

Η περίοδος του παλμού της ταχύτητας σχετίζεται με το χρόνο ανόδου της ολίσθησης στο ρήγμα (T_R), που εκφράζει τη διάρκεια της ολίσθησης σε ένα σημείο του ρήγματος. Η σχέση μεταξύ παλμού και περιόδου ανόδου είναι η εξής (Somerville 1998):

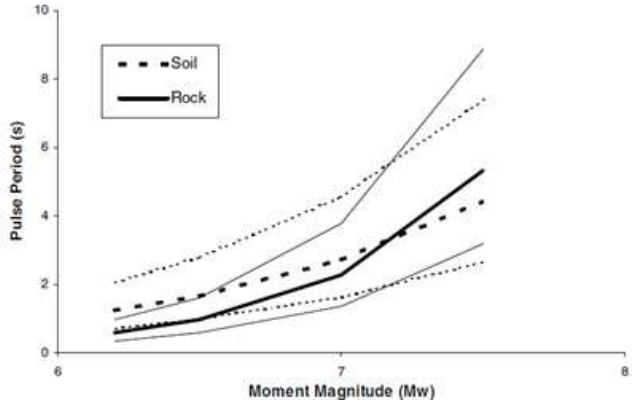
$$T_v = 2.2 * t_r \qquad (1.3)$$

Η σχέση μεταξύ διάρκειας παλμού και χρόνου ανόδου μπορεί να προκύψει και από τη φύση του φαινομένου διάρρηξης του ρήγματος. Εάν ένα ρήγμα έχει μοντελοποιηθεί ως ένα σημείο και τα αποτελέσματα της διάρρηξής του αγνοούνται, τότε η διάρκεια της κίνησης μπορεί να είναι ίση με το χρόνο ανόδου (Somerville 1998). Τα αποτελέσματα του πέρατος και της διάδοσης του ρήγματος συμβάλλουν στη διεύρυνση του παλμού. Τότε, ο χρόνος ανόδου, στην ουσία, είναι ένα κατώτερο όριο για την περίοδο του παλμού.

Οι Alavi και Krawinkler (2000), όρισαν την περίοδο του παλμού ως την κυρίαρχη περίοδο σε ένα φάσμα απόκρισης της ταχύτητας ($T_{v\text{-}p}$), ενώ διαφορετική σχέση, για τον υπολογισμό της περιόδου του παλμού, χρησιμοποιήθηκε και από τον Rodriguez-Marek (2000).



Σχήμα 1-14:Σύγκριση αποτελεσμάτων από ανάλυση παλινδρόμησης για PHV με σχέσεις που προτείνονται από άλλους ερευνητές για καταγραφές κοντινού πεδίου πρόσω-κατευθυντικότητας Σύγκριση του μοντέλου Rodriguez-Marek (2000) με εκείνα που προτάθηκαν από το Somerville (1998) για την περίοδο παλμού (Tv) και από τον Alavi και τον Krawinkler (2000) για την περίοδο της μέγιστης φασματικής απόκρισης ψευδο-ταχύτητας (Tv-p) (Rodriguez-Marek 2000).



Σχήμα 1-15: Πρόβλεψη μοντέλου Rodriguez-Marek (2000) για την περίοδο παλμού (T_v) για βραχώδες και μαλακό έδαφος. Για τους δύο τύπους εδαφών η γραμμή με έντονο χρωματισμό αποτελεί τη μέση τιμή και οι γραμμές εκατέρωθεν αυτής αποτελούν την προσθαφαίρεση της τυπικής απόκλισης.

Στο ανωτέρω σχήμα παρουσιάζονται, η μέση τιμή και η μέση τιμή συν και πλην μια τυπική απόκλιση για την περίοδο του παλμού, ως συνάρτηση της σεισμικής ροπής, για συνθήκες βράχου και για συνθήκες εδάφους. Η διαφορά μεταξύ τιμών των περιόδων των παλμών για βραχώδες και μαλακό έδαφος είναι δυσδιάκριτη για μεγάλου μεγέθους σεισμικά γεγονότα (m > 7), αλλά η περίοδος παλμού είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε μαλακό έδαφος σε σχέση με βραχώδες έδαφος για γεγονότα μικρότερου σεισμικού μεγέθους.

5. *Αριθμός σημαντικών κύκλων*

Ο αριθμός των μισών κύκλων της κίνησης (αναφερόμενος ως αριθμός των καθοριστικών παλμών N_v) ορίζεται ως ο αριθμός των μισών κύκλων παλμών ταχύτητας, οι οποίοι έχουν πλάτος το λιγότερο 50% της μέγιστης ταχύτητας κίνησης του εδάφους. Για αξιολόγηση του αριθμού των σημαντικών παλμών της ταχύτητας, λαμβάνεται υπόψη μόνο η συνιστώσα κάθετη στο ρήγμα. Οι περισσότερες καταγραφές περιέχουν δύο σημαντικούς παλμούς (δηλαδή ένα πλήρη κύκλο). Ο Somerville (1998) προτείνει ότι ο αριθμός των ημίτονων παλμών στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μπορεί

να σχετίζεται με τον αριθμό των κλείθρων σε ένα ρήγμα, το οποίο με τη σειρά του σχετίζεται με την κατανομή της ολίσθησης του ρήγματος. Αυτό είναι προφανώς ένα δύσκολο φαινόμενο για να εκτιμηθεί εκ των προτέρων. Δεν υπάρχουν μοντέλα ακόμα διαθέσιμα για πρόβλεψη του αριθμού των σημαντικών παλμών σε μια χρονοϊστορία της ταχύτητας. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο αριθμός N_v, μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 1 και 3, με το N_v ίσο με 2 να είναι μια καλή γενική τιμή για να χρησιμοποιηθεί σε σεισμικές εκτιμήσεις

.

2 Κατάταξη καταγραφών ως παλμικές

2.1 Μέθοδος του Baker (2007)

Ο Baker (2007) πρότεινε μια ποσοτική μέθοδο για τον προσδιορισμό εδαφικών κινήσεων που περιέχουν ισχυρούς παλμούς ταχύτητας και τον χαρακτηρισμό τους ως παλμικές. Παράδειγμα τέτοιων κινήσεων είναι οι εδαφικές κινήσεις που προκαλούνται από το φαινόμενο της κατευθυντικότητας στο πεδίο πλησίον του ρήγματος. Σύμφωνα με την προσέγγιση που αναφέρεται στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας, γίνεται εξαγωγή του παλμού μέγιστης ταχύτητας από μια δεδομένη κίνηση εδάφους με χρήση της ανάλυσης κυμάτων ή γνωστή ως wavelet analysis. Με βάση την παρούσα μέθοδο ταξινόμησης, χρησιμοποιείται ένα κριτήριο, το οποίο χρησιμοποιεί δεδομένα από δοκιμές από μη αυτόματα ταξινομούμενες εδαφικές κινήσεις και με βάση το οποίο μια εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται ως παλμική ή μη.

Για να προσδιοριστούν οι επιμέρους εδαφικές κινήσεις που είναι παλμικές σε μια καταγραφή, ο Baker, χρησιμοποίησε δύο ακόμα κριτήρια, Το πρώτο απαιτεί ο παλμός να φθάνει νωρίς στην εδαφική κίνηση, ενώ το δεύτερο απαιτεί το απόλυτο εύρος του παλμού της ταχύτητας να είναι μεγάλο.

Ο προσδιορισμός των εδαφικών κινήσεων που περιέχονται σε καταγραφές και είναι παλμικές, είναι σημαντικός, καθώς οι κινήσεις αυτές έχει διαπιστωθεί ότι προκαλούν υπερβολικές απαιτήσεις σε κατασκευές, οι οποίες δεν έχουν κατασκευαστεί σύμφωνα με απαιτήσεις πλαστιμότητας τέτοιου μεγέθους. Η ταξινόμηση των εδαφικών κινήσεων απαιτεί προσοχή καθώς μπορεί να μην είναι προφανής, όπως επίσης προσοχή απαιτούν και οι εδαφικές κινήσεις που δεν είναι παλμικές.

Μια πολύ σημαντική αιτία δημιουργίας των παλμών της ταχύτητας είναι τα φαινόμενα πρόσω κατευθυντικότητας στην περιοχή κοντινού πεδίου. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η πρόσω κατευθυντικότητα δημιουργείται, όταν η διάρρηξη προχωρά με κατεύθυνση προς την εξεταζόμενη θέση με ταχύτητα διάρρηξης όμοια με την ταχύτητα εξάπλωσης των διατμητικών κυμάτων και με κατεύθυνση κλίσης του ρήγματος ευθυγραμμισμένη με το χώρο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το κύμα να φτάνει μπροστά ως ένας και μόνος μεγάλος παλμός. Τα φαινόμενα κατευθυντικότητας δημιουργούν μεγάλη ανησυχία στους επιστήμονες που μελετούν παλμούς ταχύτητας, καθώς πολλοί από τους παλμούς ταχύτητας που αναφέρονται παρακάτω μπορεί να προκληθούν από φαινόμενα κατευθυντικότητας και μπορούν να καταφέρουν μεγάλες βλάβες στα τεχνικά έργα. Οι παλμοί ταχύτητας μπορούν να προκληθούν από πλήθος άλλων φαινομένων πλην της κατευθυντικότητας, όπου χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η επαύξηση της εδαφικής λεκάνης σε περίπτωση εισόδου του σεισμικού κύματος στο άκρο μιας γεωλογικής λεκάνης.

Παρακάτω περιγράφεται μια προσέγγιση για την ανίχνευση παλμών σε εδαφικές κινήσεις. Η διαδικασία που ακολουθείται χρησιμοποιεί ένα σήμα βασιζόμενο σε κύμα, το οποίο επεξεργάζεται, ώστε τελικά να προσδιορίσει και να εξάγει τον μέγιστο παλμό ταχύτητας από μια εδαφική κίνηση. Εάν ο εξαγόμενος παλμός είναι μεγάλος σε σύγκριση με τα παραμένοντα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης τότε η κίνηση του εδάφους χαρακτηρίζεται ως παλμική.

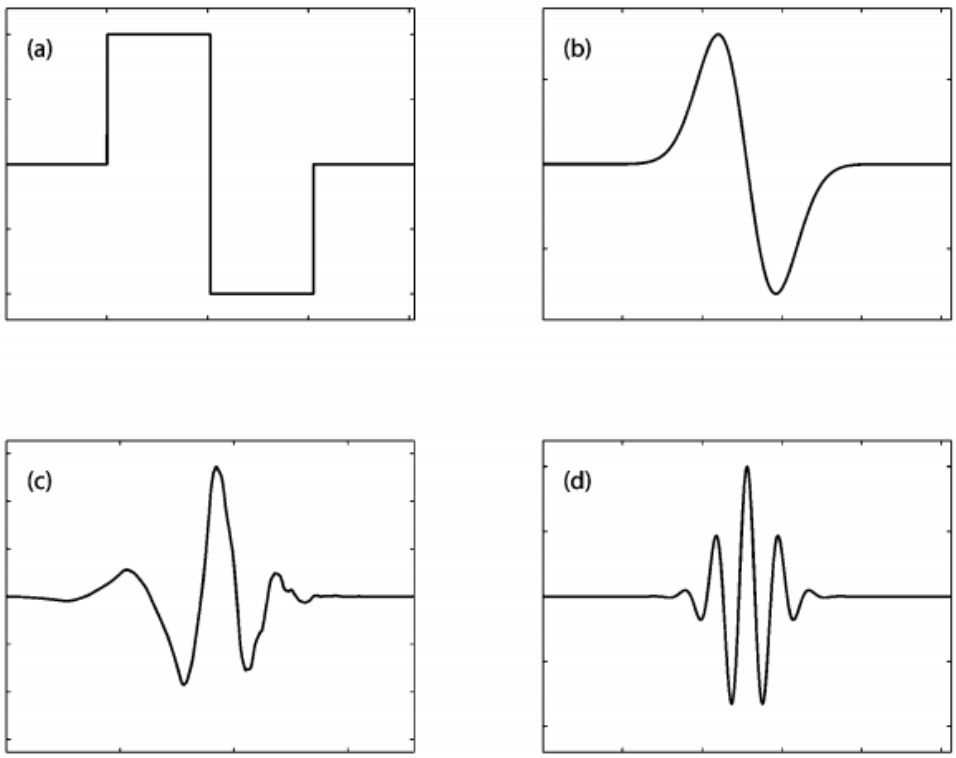
2.2 Διαδικασία ταξινόμησης παλμών

Μεταξύ διαφόρων διαδικασιών που έχουν προταθεί στην επιστημονική κοινότητα για την ταξινόμηση των εδαφικών κινήσεων ως παλμικών ή μη, στην ενότητα αυτή θα περιγραφή η διαδικασία ανάλυσης κυματιδίων (wavelet analysis), η οποία αποδίδει σε σημαντικό βαθμό σε περιπτώσεις προσδιορισμού καταγραφών.

Η ανάλυση κυμάτων χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο, ο οποίος μπορεί να κατανοηθεί αρκετά μέσω μιας σύγκρισης με την ανάλυση Fourier. Η ανάλυση Fourier αντιπροσωπεύει ένα σήμα με χρήση γραμμικού συνδυασμού ημιτονοειδών κυμάτων, κάθε ένα από τα οποία αντιπροσωπεύει ένα σήμα άπειρου μήκους και μιας μόνο συχνότητας. Αντίθετα, μέσω της ανάλυσης κυμάτων, ένα σήμα αποσυντίθεται σε κυματίδια, που τοποθετούνται στο χρόνο και τα οποία αντιπροσωπεύονται από μια στενή περιοχή συχνοτήτων.

Τα κύματα είναι οι βασικές συναρτήσεις οι οποίες ικανοποιούν ένα σύνολο από μαθηματικές απαιτήσεις. Πολλά πρωτότυπα κύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποσυνθέσουν ένα σήμα. Η πρωτότυπη συνάρτηση αναφέρεται ως μια μητρική συνάρτηση κύματος, και η συνάρτηση αυτή κλιμακώνεται και μεταφέρεται στο χρόνο για να σχηματίσει ένα σύνολο από βασικές συναρτήσεις.

Πλήθος θεωρητικών μελετών έχουν αναπτυχθεί αναφορά με την επιλογή της κατάλληλης μητρικής συνάρτησης κύματος, χρησιμοποιώντας διάφορα κριτήρια που περιλαμβάνουν ζητήματα ορθογωνικότητας, συμβατότητας, συμμετρίας καθώς και έναν αριθμό παράγωγων. Τα κύματα που παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα, χρησιμοποιούνται ευρέως ως μητρικά κυματίδια και είναι κατάλληλα να εφαρμοστούν στα πλαίσια της διαδικασίας ταξινόμησης.



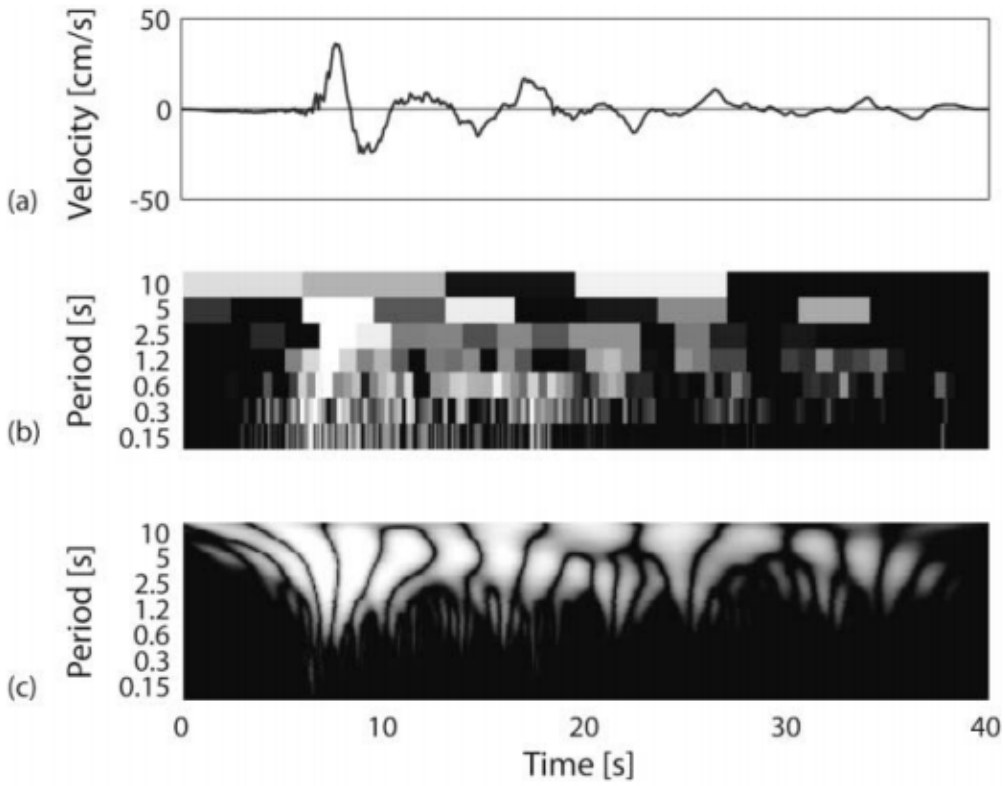
Σχήμα 2-1: Κοινές μητρικές συναρτήσεις κυμάτων για χρήση στην ανάλυση κύματος (Baker 2007).

Η σχέση που ορίζει τη συνάρτηση βάσης του κύματος στο χρόνο t, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

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

Στην παραπάνω σχέση, η παράμετρος $\Phi_{s.l\,(t)}$ είναι η μητρική συνάρτηση κύματος, s είναι ο συντελεστής κλιμάκωσης που προκαλεί διαστολή στο κύμα και l είναι η παράμετρος του χώρου, που μεταθέτει το κύμα στο χρόνο. Κάθε σήμα με συνάρτηση f(t) μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένας γραμμικός συνδυασμός της συνάρτησης βάσης και οι συντελεστές για το γραμμικό αυτό συνδυασμό ορίζονται από το ακόλουθο ολοκλήρωμα, το οποίο είναι το ίδιο σαν έννοια με εκείνο του μετασχηματισμού του Fourier. Έτσι, ο συντελεστής που σχετίζεται με το κύμα, με κλίμακα s και θέση l, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

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



Σχήμα 2-2: α) Η χρονοϊστορία της ταχύτητας για μια εδαφική κίνηση, b) Διακριτός μετασχηματισμός και c) Συνεχής μετασχηματισμός(Baker 2007).

Υπάρχουν δύο τύποι μετασχηματισμού κυμάτων που χρησιμοποιούνται για να αναλύσουν ένα σήμα και εξαρτώνται από τον αριθμό κλίμακας και τόπου για τον οποίο οι συντελεστές υπολογίζονται.

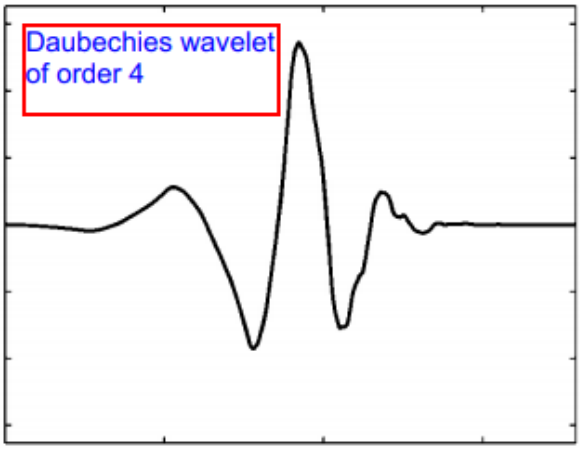
α) Ο συνεχής μετασχηματισμός κυμάτων υπολογίζει τους συντελεστές που σχετίζονται με την κάθε ακέραια τιμή της κλιμάκωσης και τις παραμέτρους της τοποθεσίας. Αυτό παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά του χρόνου-συχνότητας του σήματος. Αλλά ένα ψηφιακό σήμα μήκους n, μπορεί να περιγραφεί πλήρως χρησιμοποιώντας ένα μειωμένο αριθμό από συντελεστές. Εάν τα κύματα είναι ορθογωνικά, τότε μόνο n κύματα απαιτούνται για να περιγραφεί πλήρως κάθε διακριτή τιμή του χρόνου του σήματος μήκους n.

β) Ο διακριτός μετασχηματισμός κυμάτων παρέχει n συντελεστές που περιγράφουν το εύρος των n κυμάτων σε διάφορες κλίμακες και τοποθεσίες. Εάν n είναι μια δύναμη του 2, τότε υπάρχει ένας πολύ αποτελεσματικός αλγόριθμος που να εκτελεί τους υπολογισμούς (ανάλογος του γρήγορου μετασχηματισμού του Fourier).

Κι οι δύο τύποι μετασχηματισμών, ο συνεχής και ο διακριτός, έχουν χαρακτηριστικά που τους καθιστούν κατάλληλους για εφαρμογή. Σε ότι αφορά στον συνεχή μετασχηματισμό, έχει πολύ μεγαλύτερο κόστος υπολογισμών και παράγει πολύ περισσότερους συντελεστές απ' ότι χρειάζεται για να περιγράψουν το σήμα και η υψηλότερη ανάλυσή του είναι χρήσιμη για τον ακριβή προσδιορισμό του μέγιστου συντελεστή, ο οποίος θα δείχνει την περίοδο και την τοποθεσία του παλμού κοντινού πεδίου. Επίσης, ανόμοια με τον διακριτό μετασχηματισμό των κυμάτων, οι συντελεστές που λαμβάνονται από τον συνεχή μετασχηματισμό δεν αλλάζουν εάν η αρχή και το τέλος του σήματος έχουν επιπρόσθετα μηδενικά. Για τους λόγους αυτούς, συνήθως χρησιμοποιείται ο συνεχής μετασχηματισμός για την κατηγοριοποίηση των εδαφικών κινήσεων.

2.3 Εξαγωγή του παλμού ταχύτητας

Για κάθε, υπό εξέταση, κίνηση εδάφους, ο μέγιστος παλμός ταχύτητας έχει εξαχθεί με χρήση της ανάλυσης κυμάτων, όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Το κυματίδιο του Daubechie της τάξης του 4, χρησιμοποιήθηκε ως μητρική συνάρτηση κύματος, επειδή προσεγγίζει το σχήμα πολλών παλμών ταχύτητας και φαίνεται να έχει καλή απόδοση σε σχέση με τις άλλες υποψήφιες μητρικές συναρτήσεις κυμάτων.



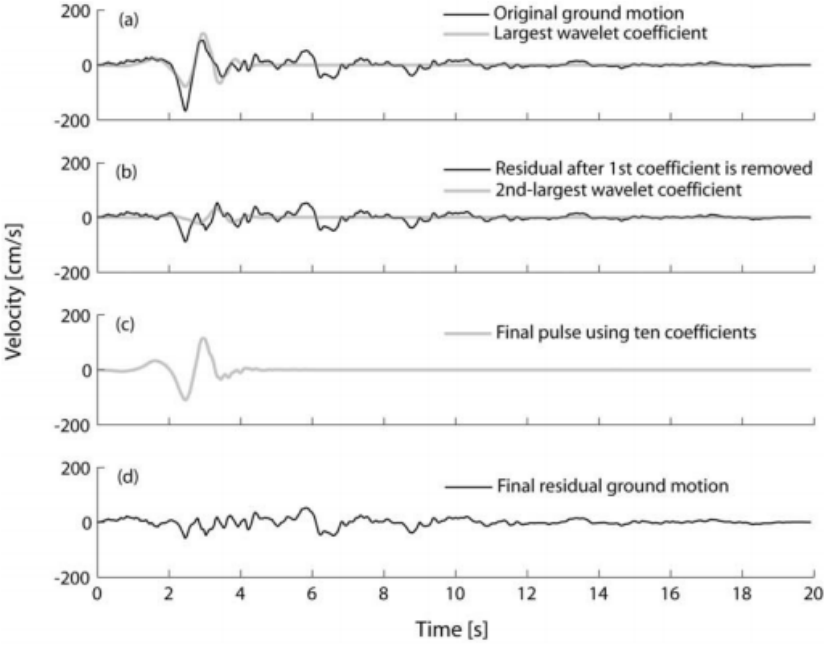
Σχήμα 2-3: Το κυματίδιο του Daubechie 4ης τάξεως.

Αρχικά υπολογίζεται ο συνεχής μετασχηματισμός κυμάτων της χρονοϊστορίας της ταχύτητας και προσδιορίζεται ο συντελεστής με την μέγιστη απόλυτη τιμή. Το κύμα που σχετίζεται με αυτό το συντελεστή, καθορίζει την περίοδο και την τοποθεσία του παλμού, όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω.

Ένας συντελεστής κύματος είναι όμοιος με την ενέργεια του σχετικού κύματος, και έτσι ο επιλεγμένος παλμός είναι εκείνος με την μέγιστη ενέργεια. Αυτό το κύμα αφαιρείται από την κίνηση του εδάφους και ο συνεχής μετασχηματισμός υπολογίζεται για την παραμένουσα κίνηση. Επειδή η τοποθεσία και η περίοδος του παλμού έχουν προσδιοριστεί, μόνο τα κύματα που έχουν την ίδια περίοδο, τοποθετούνται σε κοντινές χρονικές στιγμές (εντός +- ενός και μισού πλάτους του αρχικού κύματος του σήματος, s). Προσδιορίζεται το μέγιστο από αυτούς τους συντελεστές, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4 - b.

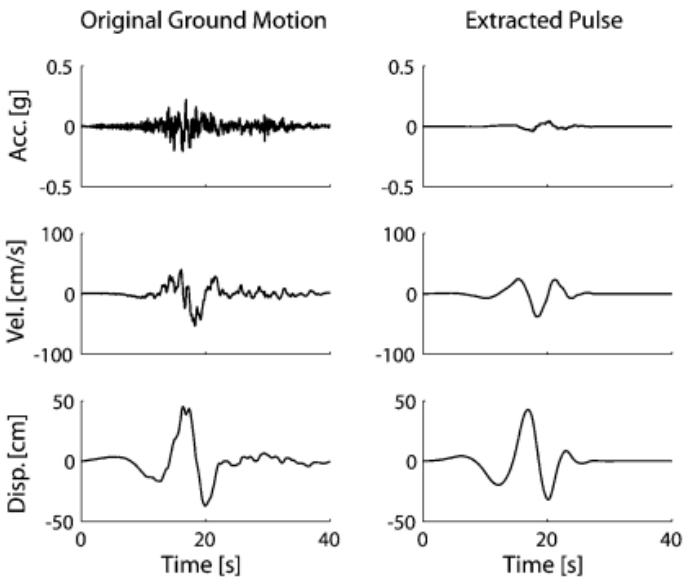
Συχνά μόνο ένας ή δύο συντελεστές απαιτούνται για να περιγράψουν τον παλμό, αλλά ένα σύνολο από δέκα συντελεστές στην προσδιοριζόμενη περίοδο και στο πλαίσιο της τοποθεσίας εξάγονται από τον αλγόριθμο για να βεβαιώσουν ότι ο παλμός αναπαρίσταται με ένα λεπτομερή τρόπο.

Ένας παλμός που έχει εξαχθεί χρησιμοποιώντας 10 συντελεστές φαίνεται στο σχήμα 2.4 - c, και η παραμένουσα κίνηση εδάφους, αφού έχει αφαιρεθεί ο παλμός, φαίνεται στο σχήμα 2.4 - d.



Σχήμα 2-4:Επεξήγηση της διαδικασίας αποσύνθεσης που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του τμήματος παλμού μιας κίνησης εδάφους (της fault-normal συνιστώσας από την καταγραφή του Northridge, Rinaldi, 1979).

Ένα παράδειγμα από χρονοϊστορίες ταχύτητας, επιτάχυνσης και μετατόπισης που σχετίζονται με έναν εξαγόμενο παλμό φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα Ο παλμός που εξάγεται εμφανώς ομοιάζει με τους παλμούς ταχύτητας και μετατόπισης, αγνοώντας την κίνηση υψηλής συχνότητας που επικρατεί στη χρονοϊστορία της επιτάχυνσης της αρχικής κίνησης του εδάφους.



Σχήμα 2-5:Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης και αντίστοιχοι εξαγόμενοι παλμοί

Χρησιμοποιώντας αυτή τη διαδικασία, ένας παλμός μπορεί να εξαχθεί από οποιαδήποτε κίνηση εδάφους, εάν ο σημαντικός παλμός κατευθυντικότητας υπάρχει. Για μη παλμικές καταγραφές, ωστόσο, ο παλμός που εξάγεται είναι συνήθως ένα μικρό χαρακτηριστικό της κίνησης του εδάφους και η παραμένουσα κίνηση του εδάφους είναι σχεδόν ταυτόσημη με την αρχική. Για να κατηγοριοποιηθούν οι καταγραφές, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν οι ιδιότητες των εξαγόμενων παλμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτοματοποιημένη ταξινόμηση.

2.4 Προσδιορισμός του εξαγόμενου παλμού

Η αρχική κίνηση του εδάφους και η παραμένουσα, αφού γίνει η εξαγωγή παλμών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν εάν η δεδομένη κίνηση του εδάφους είναι παλμική. Για να γίνει η ταξινόμηση αυτή, μια ποικιλία από πιθανές μεταβλητές πρόβλεψης υπολογίζονται και αξιολογούνται για να προσδιορίσουν ένα αποτελούν χρήσιμες ενδείξεις για την ύπαρξη ενός παλμού.

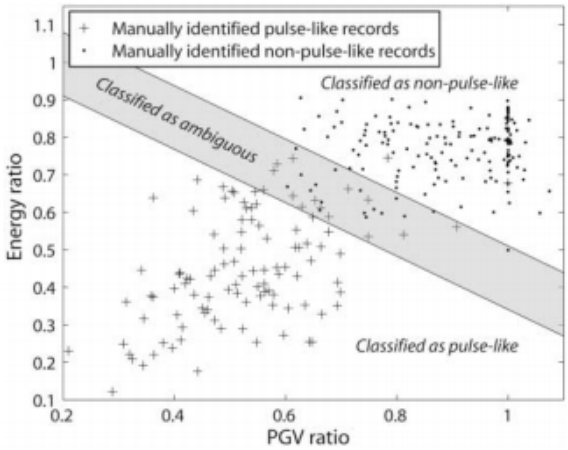
Ο Baker (2007) αρχικά χρησιμοποίησε μια προσέγγιση για να κατηγοριοποιήσει μη αυτόματα ένα σύνολο από καταγραφές και στη συνέχεια να χτίσει ένα στατιστικό μοντέλο πρόβλεψης το οποίο είναι ικανό να αναπαράγει τις κατηγοριοποιήσεις αυτών των δεδομένων. Για να δημιουργηθεί ένα μοντέλο δοκιμών για ταξινόμηση, επιλέχθηκαν όλες οι κινήσεις εδάφους κανονικές ως προς το ρήγμα της βάσης δεδομένων του προγράμματος Next Generation Attenuation (NGA), με σεισμικά μεγέθη μεγαλύτερα από 5.5, που είναι καταγεγραμμένα σε μια απόσταση εντός 30 Km από ένα το ενεργοποιημένο ρήγμα.

Οι 398 επιλεγμένες καταγραφές, ταξινομήθηκαν έπειτα μη αυτόματα, με βάση οπτικές επιθεωρήσεις για να προσδιοριστούν οι παλμοί στις χρονοϊστορίες ταχύτητάς τους. Δεν χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον σεισμολογικές πληροφορίες και δεν έγινε καμία προσπάθεια σε αυτό το στάδιο να εκμηδενιστούν οι παλμοί που φτάνουν αργά ή απλές, χαμηλού εύρους, κινήσεις εδάφους που μοιάζουν παλμικές.Αυτή η μη αυτόματη

ταξινόμηση παρήγαγε 124 πιθανές παλμικές κινήσεις εδάφους. Έτσι, προέκυψαν 190 μη παλμικές κινήσεις εδάφους και 84 κινήσεις εδάφους που είναι διφορούμενες.Όταν καθορίστηκαν οι μη αυτόματες ταξινομήσεις αυτών των κινήσεων, χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία στατιστικής πρόβλεψης για να αναπαράγουν τις μη αυτόματες ταξινομήσεις, βασιζόμενοι σε αυτόματες προβλέψεις χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από την ανάλυση κυμάτων.

Στη συνέχεια, ο Baker (2007), εφάρμοσε την ανάλυση Γραμμικής Διακριτοποίησης για να αξιολογηθεί η ικανότητα πιθανών παραγόντων πρόβλεψης να διαχωρίσουν παλμικές κινήσεις που εμπεριέχουν μεγάλους παλμούς από κινήσεις που δεν είναι παλμικές. Μια πληθώρα από μεταβλητές πρόβλεψης που μελετήθηκαν περιελάμβαναν το μέγεθος των συντελεστών που ελήφθησαν από την αποσύνθεση του κύματος, τις τιμές φασματικής απόκρισης, τις μέγιστες ταχύτητες εδάφους και τις τιμές που βασίζονται στην ενέργεια. Σύνολο ενός , δύο ή τριών παραγόντων πρόβλεψης χρησιμοποιήθηκαν ταυτόχρονα για να αναπαράγουν την μη αυτόματη ταξινόμηση των καταγραφών.

Τελικώς, οι μεταβλητές πρόβλεψης προσδιορίστηκαν, οι οποίες είναι εύκολο να υπολογιστούν, είναι διαισθητικές και παρέχουν καλή ικανότητα πρόβλεψης. Οι μεταβλητές αυτές είναι η μέγιστη εδαφική ταχύτητα των παραμενουσών καταγραφών διαιρεμένη με την μέγιστη εδαφική ταχύτητα της αρχικής καταγραφής, η ενέργεια της παραμένουσας καταγραφής διαιρεμένη με την ενέργεια της αρχικής καταγραφής (όπου η ενέργεια μπορεί να υπολογιστεί ως η αθροιστική τετραγωνική ταχύτητα του σήματος, ή ισοδύναμα, ως το άθροισμα των τετραγώνων των διακριτών συντελεστών του κύματος). Αυτές είναι οι μεταβλητές που αναφέρονται ως "PGV ratio" and the "Energy ratio".



Σχήμα 2-6:Γράφημα του "PGV ratio" ως προς the "Energy ratio''.

Ο δείκτης παλμικότητας είναι ένας δείκτης για τον χαρακτηρισμό μιας καταγραφής ως παλμική, λαμβάνει τιμές από 0 έως 1, με τις υψηλές τιμές του δείκτη να δείχνουν ότι η εδαφική κίνηση είναι παλμική. Έτσι, για τιμές πάνω από 0.85 οι εδαφικές κινήσεις χαρακτηρίζονται ως παλμικές, ενώ για τιμές του δείκτη κάτω από 0.15 οι κινήσεις χαρακτηρίζονται ως μη-παλμικές. Όσες καταγραφές έχουν παλμικό δείκτη μεταξύ των δύο τιμών 0.15 και 0.85, χαρακτηρίζονται ως αμφιλεγόμενες.

Ο δείκτης υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

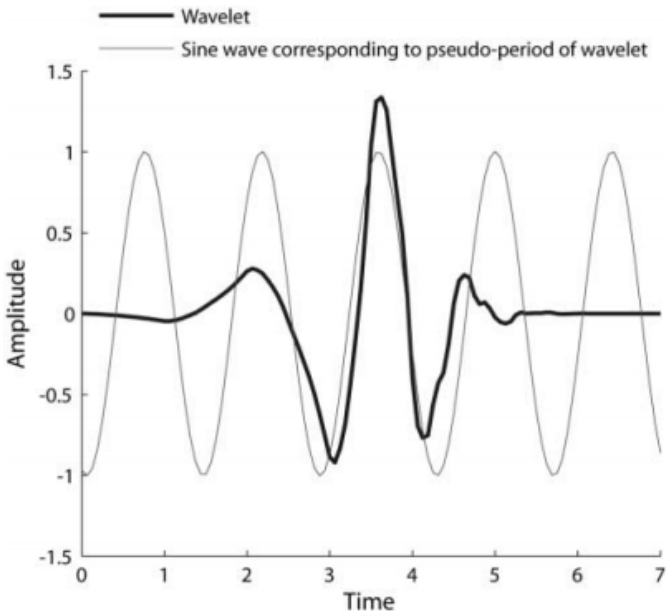
$$PI = \frac{1}{1+e^{-2.3+14.6(PGVratio)+20.5(Energyratio)}} \qquad (2.3)$$

2.5 Περίοδος του παλμού

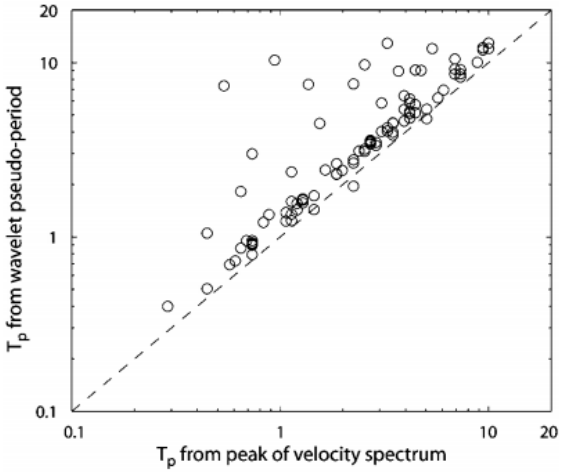
Η περίοδος του παλμού της ταχύτητας είναι μια σημαντική παράμετρος, καθώς ο λόγος της περιόδου του παλμού προς την θεμελιώδη περίοδο της κατασκευής μπορεί να επηρεάσει πολύ την απόκριση της κατασκευής. Δεν υπάρχει συγκεκριμένο καλά ορισμένο σκεπτικό για τις περιόδους κυμάτων, όπως υπάρχει για τα ημιτονοειδή κύματα της ανάλυσης Fourier, αλλά η περίοδος που σχετίζεται με το μέγιστο εύρος του διαγράμματος Fourier για ένα κύμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να οριστεί η ψευδοπερίοδος.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα κύματος και ένα ημιτονοειδές κύμα με περίοδο ίση με το μέγιστο εύρος του μέγιστου κύματος Fourier. Η ψευδοπερίοδος του μέγιστου συντελεστή του κύματος χρησιμοποιήθηκε εδώ ως περίοδος του παλμού για την κίνηση του εδάφους.

Η κύρια, πλήρως αυτοματοποιημένη εναλλακτική λύση, για τον προσδιορισμό μιας περιόδου παλμού είναι να επιλέξει κανείς την περίοδο που σχετίζεται με το μέγιστο σ του φάσματος απόκρισης της ταχύτητας. Οι περίοδοι λήφθηκαν χρησιμοποιώντας δύο προσεγγίσεις που είναι παρόμοιες, με την προσέγγιση βασιζόμενη σε κύματα να καταλήγει σε T_p ελαφρώς μεγαλύτερη σε σχέση με την προσέγγιση που βασίζεται στη φασματική ταχύτητα.



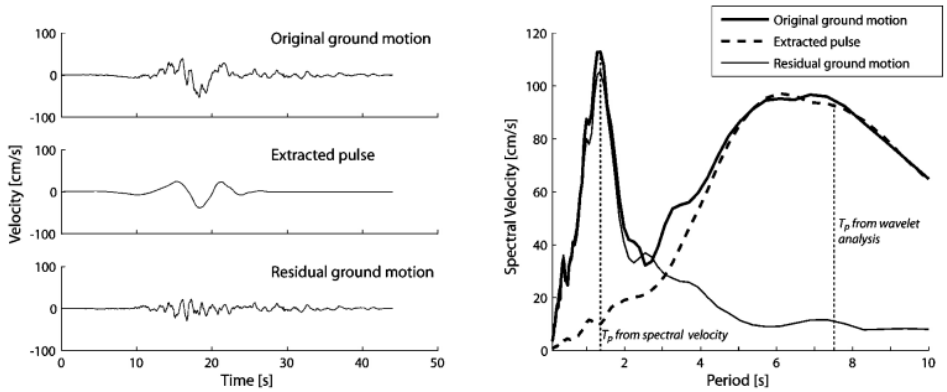
Σχήμα 2-7:Κύμα του Daubechies και ένα ημιτονοειδές κύμα με περίοδο ίση με το μέγιστο εύρος του κύματος στην ανάλυση Fourier.



Σχήμα 2-8:T από το μέγιστο στο φάσμα της ταχύτητας ως προς το T_p της ψευδο-περιόδου του κύματος

$$PI = \frac{1}{1 + e^{-2.3+14.6(PGVratio)+20.5(Energyratio)}} \qquad (2.4)$$

Σε περιπτώσεις όπου οι περίοδοι, οι οποίες ελήφθησαν από τα κύματα και από τις μεθόδους του φάσματος της ταχύτητας, διαφέρουν σημαντικά, η περίοδος του κύματος φαίνεται να είναι το πιο σημαντικό μέτρο για την περίοδο του παλμού. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η περίοδος που ελήφθη από την μέγιστη φασματική ταχύτητα, γενικά, σχετίζεται με ένα τμήμα της κίνησης του εδάφους, που έχει υψηλής συχνότητας ταλάντωση, ενώ η περίοδος παλμού του κύματος σχετίζεται με την ταχύτητα του παλμού που προσδιορίζεται οπτικά, όπως στο παράδειγμα που παρουσιάζεται στην συνέχεια. Στην περίπτωση αυτή, οι αρχικές μηδενικές διασταυρώσεις, που σχετίζονται με τον παλμό βρίσκονται σε απόσταση 7.3 δευτερολέπτων. Η μέγιστη φασματική ταχύτητα αυτής της καταγραφής συμβαίνει σε περίοδο 1.4 δευτερολέπτων, ενώ η ψευδοπερίοδος του κύματος των 7.5 δευτερολέπτων, ταιριάζει με την περίοδο του παλμού που προσδιορίζεται οπτικά.



Σχήμα 2-9: Παράδειγμα προσδιορισμού της περιόδου του παλμού (για την εδαφική κίνηση στο Landers, του Yermo Fire Station,1992).

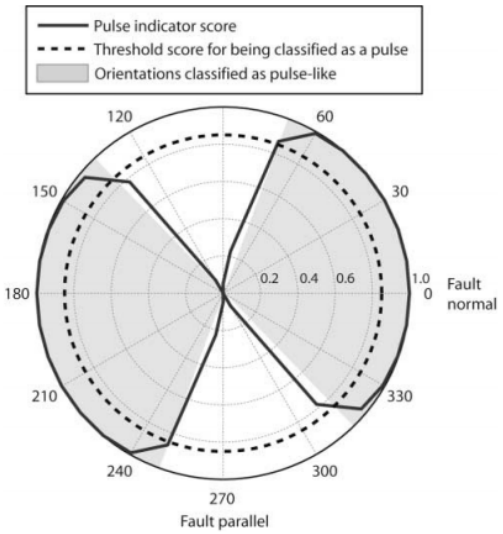
Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι επειδή η ψευδο-περίοδος του κύματος προσδιορίζεται αυτόματα χωρίς την ανάγκη κρίσης από την πλευρά του χρήστη, και επειδή η μέθοδος

αυτή παρέχει ένα πιο συνεπή προσδιορισμό της περιόδου του παλμού σε σχέση με την εναλλακτική μέθοδο που βασίζεται στην περίοδο με την μέγιστη φασματική ταχύτητα, αυτή η προσέγγιση φαίνεται να είναι μια ιδανική μέθοδος για να προσδιορίζεται η περίοδος των παλμών ταχύτητας στις κινήσεις εδάφους.

2.6 Μελέτη της εδαφικής κίνησης σε άνω της μιας διάστασης

Αρχικά, η μεθοδολογία που προτείνεται στο κεφάλαιο αυτό εφαρμόζεται στη συνιστώσα της εδαφική κίνησης, την κάθετη στο ρήγμα, όμως μπορεί να επεκταθεί και σε εδαφικές κινήσεις δυο συνιστωσών, δηλαδή τις συνιστώσες παράλληλα και κάθετα στο ρήγμα. Για κάθε μια συνιστώσα, βρίσκεται ο παλμικός δείκτης της και έτσι κάθε συνιστώσα χαρακτηρίζεται ως παλμική ή μη-παλμική.Με περιστροφή των δύο-συνιστωσών, κάποιος μπορεί να υπολογίσει τις τιμές των παλμικών δεικτών σε αυθαίρετους προσανατολισμούς.

Έτσι, οι παλμοί κοντινού πεδίου μπορούν να επηρεάσουν σε ένα πλήθος διευθύνσεων. Αυτό συμβαίνει γιατί ο παλμός της ταχύτητας, αν και παρατηρούμενος σε μια γωνία διαφορετική από την αρχική του διεύθυνση, μπορεί ακόμα να είναι μεγάλος σχετικά με τις μικρότερες κινήσεις που εντοπίζονται στο μη παλμικό τμήμα της καταγραφής.Επιπλέον, άλλες κινήσεις εδάφους δείχνουν ότι ο παλμός ταχύτητας κάποιες φορές συμβαίνει σε ένα προσανατολισμό που διαφέρει πολύ από την συνιστώσα κάθετη στο ρήγμα.



Σχήμα 2-10:Δείκτες παλμών για την εδαφική κίνηση στο Chi-Chi, Taiwan, Tsaotun (TCU075), ως συνάρτηση του προσανατολισμού της συνιστώσας κάθετης στο ρήγμα. Το ακτινικό μέγεθος δείχνει την τιμή του παλμικού δείκτη για τον προσανατολισμό αυτό

3 Αναλυτικό μοντέλο Μαυροειδή - Παπαγεωργίου

3.1 Μελέτη των Μαυροειδή και Παπαγεωργίου

Οι Μαυροειδής και Παπαγεωργίου (2003), παρουσίασαν μια μελέτη σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν τις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Χρησιμοποίησαν έναν μεγάλο αριθμό καταγραφών εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, με σκοπό να εξετάσουν τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης κοντά στο ρήγμα, τα οποία σχετίζονται με τη διαδικασία διάρρηξης. Εκτός από τα φαινόμενα πρόσω κατευθυντικότητας και μόνιμης μετάθεσης, παρατηρήθηκαν σημαντικοί παλμοί σε περιοχές πλησίον του ρήγματος, οι οποίοι μπορεί να οφείλονται και σε άλλες αιτίες, όπως η ύπαρξη διατμητικών διαταραχών, ενώ θα πρέπει να εξετάζεται και ο τύπος των ρωγμών του ρήγματος.

Τα φαινόμενα κοντινού πεδίου ξεκίνησαν να μελετώνται ύστερα από διαπίστωση ότι προκαλούν σοβαρές επιπτώσεις στην απόκριση των κατασκευών σε μεγάλες τιμές περιόδων, λόγω των ισχυρών παλμών που περιέχουν. Έτσι, προέκυψε η ανάγκη για δημιουργία απλών, αξιόπιστων αλλά και αναλυτικών μοντέλων, ικανών να συλλαμβάνουν όλα τα χαρακτηριστικά των εδαφικών κινήσεων που έχουν καταγραφεί κοντά στην πηγή. Υπήρξε, επομένως ανάγκη για ποιοτικά αλλά και για ποσοτικά μοντέλα. Οι παράμετροι που εισάγονται στα μοντέλα θα πρέπει να σχετίζονται, σε μεγάλο βαθμό, με τις φυσικές παραμέτρους του ρήγματος και τις διαδικασίες δημιουργίας και διάδοσης του κύματος, και ταυτόχρονα να είναι σαφώς ορισμένες.

Έτσι, παρακάτω στο παρόν κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί ένα απλό μαθηματικό μοντέλο, το οποίο προτάθηκε από τους Μαυροειδή και Παπαγεωργίου, προκειμένου να μελετηθούν τα παραπάνω φαινόμενα και οι παλμοί που δημιουργούνται και έχουν σοβαρό αντίκτυπο στην απόκριση των κατασκευών.

Το εν λόγω μοντέλο βαθμονομήθηκε χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο αριθμό πραγματικών καταγραφών κοντινού πεδίου, και προσομοιάζει επιτυχώς τις διαθέσιμες χρονοϊστορίες μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης σε ορισμένες περιπτώσεις. Στο μοντέλο υπάρχουν κάποιες παράμετροι εισόδου, με βάση τις οποίες παρέχεται και μια αντικειμενική ερμηνεία της διάρκειας των παλμών. Στη συνέχεια γίνεται ολοκλήρωση των παραμέτρων εισόδου και προκύπτει ο μετασχηματισμός του Fourier, και στην συνέχεια εντοπίζονται οι παράμετροι με την σημαντικότερη επιρροή στα φασματικά χαρακτηριστικά του μοντέλου.

3.2 Περιγραφή αναλυτικού μοντέλου

Τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής των παλμών της ταχύτητας για παλμούς κοντινού πεδίου, καθορίζονται από ορισμένες παραμέτρους, όπως είναι: η διάρκεια του παλμού (ή αλλιώς η περίοδος του παλμού), ο αριθμός και η φάση μισών κύκλων. Σύμφωνα με τα παραπάνω, θα αρκούσε ένα αναλυτικό μοντέλο με τέσσερις παραμέτρους για να περιγράφει το σύνολο των παλμών της ταχύτητας που παράγονται λόγω της πρόσω κατευθυντικότητας ή λόγω φαινομένων μόνιμης μετάθεσης.

Γενικότερα, στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολλά και διαφορετικά κύματα προκειμένου να ενταχθούν σε αναλυτικά μοντέλα, ορισμένα εκ των οποίων χρησιμοποιούνται ευρέως. Στο σχήμα που ακολουθεί παρατίθενται ορισμένα εξ' αυτών.

Wavelet	Analytical Expression	Parameters	References
Gabor	$f(t) = Ae^{-(2\pi f_p t/\gamma)^2 t^2} \cos[2\pi f_p t + v]$	A: amplitude f_p: prevailing frequency v: phase angle γ: oscillatory character	Gabor (1946) Morlet *et al.* (1982)
Berlage	$f(t) = AH(t)t^n e^{-(2\pi f_p t/\gamma)t} \cos[2\pi f_p t + v]$	A: amplitude f_p: prevailing frequency v: phase angle γ: oscillatory character n: asymmetry of envelope function Note: $H(t)$ is the Heaviside unit step function	Berlage (1932) Kulhánek and Klíma (1970) Farnbach (1975) Aldridge (1990)
Generalized Rayleigh	$f(t) = A\,(-1)^k \dfrac{e^{iv+\pi/2)}}{\left(i + \dfrac{2\pi f_p t}{k}\right)^{k+1}}$ Use: $f_R(t) = \mathrm{Re}\{f(t)\}$ or $f_I(t) = -\mathrm{Im}\{f(t)\}$	A: amplitude f_p: prevailing frequency v: phase angle k: controls the number of "lobes"	Hudson, 1980 Hubral and Tygel (1989)
Küpper	$f(t) = A\left[\sin\left(m\dfrac{\pi t}{T}\right) - \dfrac{m}{m+2}\sin\left((m+2)\dfrac{\pi t}{T}\right)\right]$ for $0 < t < T$	A: amplitude T: duration m: controls the number of half-cycles	Küpper (1958) Müller (1970) Fuchs and Müller (1971)
Ricker	Three-loop: (symmetric) $f(t) = A(1-2\pi^2 f_p^2 t^2)e^{-(\pi f_p t)^2 t^2}$ Two-loop: (antisymmetric) $f(t) = A\,t\,e^{-(\sqrt{2}\pi f_p)^2 t^2}$	A: amplitude f_p: prevailing frequency A: amplitude f_p: prevailing frequency	Ricker (1943) Ricker (1944) Ricker (1945) Ricker (1953a) Ricker (1953b) Dietrich and Bouchon (1985) Hosken (1988)

Σχήμα 3-1: Συνηθέστερα κύματα που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση κυμάτων.

Το αναλυτικό μοντέλο, που τελικά επιλέχθηκε στα πλαίσια της μελέτης αυτής, θα έπρεπε να πληροί κάποιες βασικές προϋποθέσεις και να διακρίνεται από τις ακόλουθες ιδιότητες:

1) Τα συνθετικά κύματα θα πρέπει να έχουν εκφραστεί παραμετρικά, μέσω μαθηματικής έκφρασης, μαζί με ένα ελάχιστο αριθμό παραμέτρων εισαγωγής με σαφή ερμηνεία, ώστε να επιτυγχάνεται η ακριβής εκπροσώπηση των κοντινών στην πηγή παλμών.

2) Το συνθετικό κύμα θα πρέπει να είναι ικανό να προσομοιάζει όσο το δυνατόν περισσότερες από τις καταγραφές κοντινού πεδίου.

3) Η μαθηματική έκφραση του κύματος θα πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να διευκολύνει την παραγωγή εκφράσεων κλειστής μορφής από τα χαρακτηριστικά του φάσματός της καταγραφής, με τη μορφή του μετασχηματισμού Fourier και του φάσματος απόκρισης. Τέτοιες εκφράσεις κλειστής μορφής κάνουν σημαντικά πιο εύκολη την παραμετρική μελέτη της απόκρισης των κατασκευών σε παλμούς κοντινών πηγών.

Από τα κύματα που περιγράφονται στο Σχήμα 3.1, το κύμα που ικανοποιεί τις περισσότερες από τις προαναφερθείσες συνθήκες και έχει τη δυνατότητα, εάν τροποποιηθεί ελάχιστα, να πληροί το σύνολο των προϋποθέσεων που θέλουμε, είναι το κύμα Gabor.

Το κύμα Gabor, είναι προϊόν αρμονικής ταλάντωσης και κωδονοειδούς συνάρτησης, ορίζεται από τέσσερις παραμέτρους που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά

της κυματομορφής των παλμών της ταχύτητας κοντά στην πηγή, δηλαδή A: πλάτος, fp: δεσπόζουσα συχνότητα, ν:φάση, και c: ο ταλαντωτικός χαρακτήρας του σήματος.

Επίσης, το κύμα Berlage, είναι παρόμοιο με το Gabor επειδή και τα δύο αποτελούνται από αρμονική ταλάντωση διαμόρφωσης του πλάτους του κύματος και οι κοινές παράμετροι εισόδου στα δύο σήματα έχουν την ίδια φυσική σημασία. Ωστόσο, το κύμα Berlage, χαρακτηρίζεται από μια επιπλέον ελεύθερη παράμετρο – n, που ελέγχει την ασυμμετρία της λειτουργίας του. Αυτός ο επιπλέον βαθμός ελευθερίας, παρόλο που θεωρητικά είναι χρήσιμος, πρακτικά δεν έχει μεγάλη σημασία.

Το κύμα Garbor, είναι εκείνο που εξυπηρετεί καλύτερα από όλα όσα προτείνονται στο παραπάνω σχήμα τις ανάγκες του μοντέλου των Μαυροειδή και Παπαγεωργίου (2003), ωστόσο, δεν προκύπτει λύση κλειστής μορφής από την απόκριση ενός μονοβάθμιου (SDOF system) όταν έχουμε σύνθετες εδαφικές κινήσεις που παράγονται από το σήμα του Garbor. Μια έκφραση κλειστής μορφής θα διευκόλυνε κατά πολύ την παραμετρική ανάλυση, γεγονός που έχει μεγάλη σημασία για τους σεισμολόγους μηχανικούς. Οι δυσκολίες οφείλονται στην εκθετική συνάρτηση που περιλαμβάνεται στην μαθηματική έκφραση του κύματος του Garbor. Για υπέρβαση αυτής της δυσκολίας, προτείνεται ένα αναλυτικό μοντέλο, το οποίο διατηρεί τα πλεονεκτήματα του κύματος Garbor, ενώ ταυτόχρονα μέσω ενός μοντέλου, παράγει μια κλειστή μορφή εκφράσεων για την απόκριση ενός μονοβάθμιου συστήματος, το οποίο υπόκειται σε σύνθετες εδαφικές κινήσεις. Έτσι, χρησιμοποιείται το κύμα του Garbor από μια άλλη συμμετρική κωδωνοειδή συνάρτηση, που θέτει μια απλούστερη αναλυτική έκφραση. Συνεπώς, χρησιμοποιείται μια ημιτονοειδής συνάρτηση, ενώ το τμήμα της αρμονικής ταλάντωσης παραμένει το ίδιο.

Συγκεκριμένα, η χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας προσομοιάζεται με ένα ημιτονικό σήμα, πολλαπλασιασμένο με μία κωδωνόσχημη περιβάλλουσα που προκύπτει από ένα μετατεθειμένο κύκλο συνημίτονου. Η εξίσωση του αναλυτικού σήματος που προτείνεται δίνεται από τη σχέση:

$$f(t) = A\frac{1}{2}\left[1 + COS\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}t\right)\right]\cos\left(2\pi f_p t + v\right) \qquad (3.1)$$

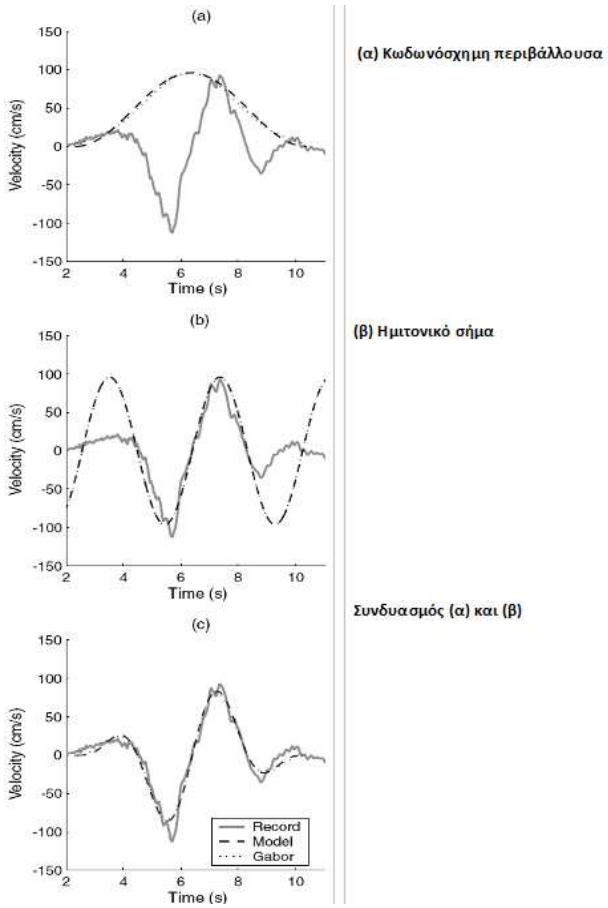
Η παράμετρος A ελέγχει το εύρος του σήματος, f_p είναι η δεσπόζουσα συχνότητα του σήματος, ν είναι η φάση, γ είναι μια παράμετρος που ορίζει τον ταλαντωτικό χαρακτήρα του σήματος (δηλαδή για μικρό γ το κύμα προσεγγίζει ένα παλμό μορφής δέλτα, ενώ καθώς το γ αυξάνεται ο αριθμός διασταυρώσεων με τη μηδενική γραμμή αυξάνεται) και t_o είναι η χρονική στιγμή του μέγιστου.

Η εξίσωση που χρησιμοποιείται από το εν λόγω αναλυτικό μοντέλο για τους παλμούς ταχύτητας των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, παρουσιάζεται στη συνέχεια:

$$v(t)=\begin{cases} A\dfrac{1}{2}\left[1+\cos\left(\dfrac{2\pi f_p}{\gamma}\left(t-t_0\right)\right)\right]\cos\left[2\pi f_p\left(t-t_o\right)+v\right], \\ 0 \end{cases} \qquad (3.2)$$

$$t_0-\frac{\gamma}{2f_p}\le t\le t_0+\frac{\gamma}{2f_p},\ \mu\varepsilon\ \gamma>1$$

Όπου η παράμετρος A δηλώνει το εύρος του σήματος, f_p είναι η δεσπόζουσα συχνότητα του σήματος, v είναι η φάση του σήματος (v=0 και v=+ ή – π/2 ορίζουν συμμετρικά και αντισυμμετρικά σήματα αντίστοιχα), γ είναι μια παράμετρος που ορίζει τον ταλαντωτικό χαρακτήρα του σήματος (δηλαδή πόσες φορές διέρχεται από τον μηδενικό άξονα) και t_o δείχνει τη χρονική στιγμή που συμβαίνει το μέγιστο στην ταλάντωση.



Σχήμα 3-2: Σύγκριση της κυματομορφής σύμφωνα με τους Mavroeidis and Papageorgiou (2003) και του κυματιδίου Garbor.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του προτεινόμενου αναλυτικού μοντέλου είναι ο αντικειμενικός ορισμός της διάρκειας παλμού με βάση τις παραμέτρους εισαγωγής του μοντέλου. Στη βιβλιογραφία, δεν υπάρχει μια και μοναδική μέθοδος για να καθορίσει τη διάρκεια ή την περίοδο του παλμού ταχύτητας, παρόλο που αυτή η παράμετρος χρησιμοποιείται εκτενώς. Πολλοί ερευνητές καθορίζουν τη διάρκεια του παλμού χρησιμοποιώντας τις διασταυρώσεις της παλμικής κυματομορφής με τον μηδενικό

άξονα. Άλλοι προτιμούν τη χρήση της μέγιστης τιμής του φάσματος απόκρισης ταχύτητας για τον έμμεσο καθορισμό της περιόδου παλμού. Σε πολλές άλλες περιπτώσεις, δεν παρέχεται καμία εξήγηση σχετικά με την εκτίμηση αυτής της παραμέτρου. Στο συγκεκριμένο μοντέλο που αναφέρθηκε, προτείνεται ένας αντικειμενικός ορισμός της διάρκειας παλμού (T_P) συμβατός με τις φυσικές πτυχές του προβλήματος ως το αντίστροφο της επικρατούσας συχνότητας (f_P) του σήματος.

Έτσι, η περίοδος του παλμού δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$T_p = \frac{1}{f_p} \tag{3.3}$$

Ενώ οι σχέσεις για την εδαφική επιτάχυνση και μετατόπιση, που είναι σύμφωνες και συμβατές με την παραπάνω έκφραση για την ταχύτητα του παλμού, είναι οι ακόλουθες:

$$\alpha(t) = \begin{cases} -\frac{A\pi f_p}{\gamma}\left[\sin\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_o)\cos\left[2\pi f_p(t-t_o)+v\right]+\gamma\sin\left[2\pi f_p(t-t_o)+v\right]\left[1+\cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_o)\right)\right]\right)\right] \\ 0 \end{cases}, t_o-\frac{\gamma}{2f_p} \le t \le t_o+\frac{\gamma}{2f_p}, \gamma > 1 \tag{3.4}$$

$$d(t) = \begin{cases} \frac{A}{4\pi f_p}\left[\sin\left[2\pi f_p(t-t_o)+v\right]+\frac{1}{2}\frac{\gamma}{\gamma-1}\sin\left[\frac{2\pi f_p(\gamma-1)}{\gamma}(t-t_{o)}+v\right]+\frac{1}{2}\frac{\gamma}{\gamma+1}\sin\left[\frac{2\pi f_p(\gamma+1)}{\gamma}(t-t_o)+v\right]\right]+C, t_o-\frac{\gamma}{2f_p} \le t \le t_o+\frac{\gamma}{2f_p} \\ \frac{A}{4\pi f_p}\frac{1}{(1-\gamma\,\hat{}\,\mathbf{2})}\sin(v-\pi\gamma)+C, t < t_o-\frac{\gamma}{2f_p} \\ \frac{A}{4\pi f_p}\frac{1}{(1-\gamma\,\hat{}\,\mathbf{2})}\sin(v+\pi\gamma)+C, t > t_o+\frac{\gamma}{2f_p} \end{cases}, \gamma > 1$$

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να κανονικοποιηθούν με χρήση της κανονικοποιημένης χρονικής στιγμής:

$$\overline{t} = 2\pi f_p(t-t_0) \tag{3.5}$$

Και με χρήση της εξίσωσης αυτής, οι αναλυτικές κανονικοποιημένες εκφράσεις για την εδαφική επιτάχυνση, ταχύτητα και μετατόπιση, δίνονται ως παρακάτω:

$$\tilde{\alpha}(t)=\frac{\alpha(t)}{\mathrm{A}f_p}=\begin{cases}-\frac{\pi}{\gamma}\left[\sin\left(\frac{t}{\gamma}\right)\cos\left(\tilde{t}+\nu\right)+\gamma\sin\left(\tilde{t}+\nu\right)\left(1+\cos\left(\frac{\tilde{t}}{\gamma}\right)\right)\right],-\pi\gamma\le\tilde{t}\le\pi\gamma,\gamma>1\\ 0,otherwise\end{cases}$$

$$\tilde{v}(\tilde{t})=\frac{v(\tilde{t})}{A}=\begin{cases}\frac{1}{2}\left[1+\cos\left(\frac{\tilde{t}}{\gamma}\right)\right]\cos\left(\tilde{t}+\nu\right),-\pi\gamma\le\tilde{t}\le\pi\gamma,\gamma>1\\ 0,otherwise\end{cases}$$

$$\tilde{d}(t)=\frac{d(t)}{(A/f_P)}=\begin{cases}\frac{1}{4\pi}\left[\sin\left(\tilde{t}+\nu\right)+\frac{1}{2}\frac{\gamma}{\gamma-1}\sin\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\tilde{t}+v\right)+\frac{1}{2}\frac{\gamma}{\gamma+1}\sin\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\tilde{t}+v\right)\right],-\pi\gamma\le\tilde{t}\le\pi\gamma\\ \frac{1}{4\pi}\left(\frac{1}{(1-\gamma^2)}\right)\sin\left(\nu-\pi\gamma\right),\tilde{t}<-\pi\gamma,\gamma>1\\ \frac{1}{4\pi}\left(\frac{1}{(1-\gamma^2)}\right)\sin\left(\nu+\pi\gamma\right),\tilde{t}>\pi\gamma\end{cases} \quad (3.6)$$

Η περίοδος T_p προσδιορίζεται, έτσι ώστε το φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας των σύνθετων και των καταγεγραμμένων κινήσεων του εδάφους κοντινού πεδίου να εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές τους περίπου στην ίδια φυσική περίοδο. Αυτό δε σημαίνει απαραίτητα ότι το T_p, συμπίπτει με την περίοδο που αντιστοιχεί στην κορυφή του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας μιας πραγματικής καταγραφής κοντινού πεδίου, παρόλο που κάτι τέτοιο μπορεί να ισχύει σε πολλές περιπτώσεις.

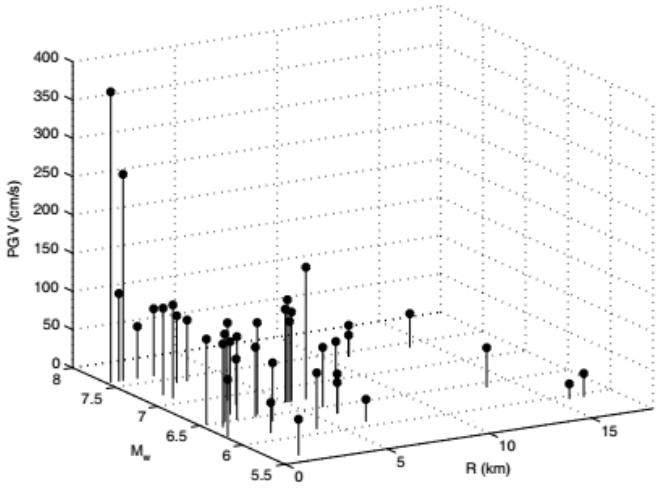
Η παράμετρος A καθορίζεται έτσι ώστε το πλάτος του σύνθετου παλμού ταχύτητας και η μέγιστη ψευδο-φασματική του ταχύτητα, να συμφωνούν με τις αντίστοιχες ποσότητες της πραγματικής καταγραφής. Τέλος, οι παράμετροι ν και γ, προσαρμόζονται έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η εφαρμογή τους σε καταγραφές συνθετικής ταχύτητας και μετατόπισης.

Είναι εμφανές ότι το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο προσομοιάζει με επιτυχία το σύνολο των καταγεγραμμένων χρονοϊστοριών μετατοπίσεων, ταχυτήτων και σε ορισμένες περιπτώσεις επιταχύνσεων, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Το μοντέλο έχει στόχο να αναπαράγει με ακρίβεια τα, μεσαίας και μακράς περιόδου, χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης. Κατά συνέπεια, οι εδαφικές κινήσεις υψηλής συχνότητας, οι οποίες είναι στοχαστικές από τη φύση τους και σαφώς εμφανείς στα επιταχυνσιογραφήματα, δεν μπορούν προσομοιωθούν με τη χρήση του προτεινόμενου αναλυτικού μοντέλου.

Τα συνθετικά ελαστικά φάσματα απόκρισης είναι επίσης σε συμφωνία με τα φάσματα ελαστικής απόκρισης των καταγεγραμμένων κινήσεων του εδάφους κοντά στην επικρατούσα συχνότητα του παλμού, f_p.

Για μέτριους σεισμούς, οι παλμοί της ταχύτητας χαρακτηρίζονται από μικρή σχετικά διάρκεια και υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ των σύνθετων και των καταγεγραμμένων φασμάτων της ελαστικής απόκρισης, σε ολόκληρο το εύρος των συχνοτήτων. Ωστόσο, για μεγάλους σεισμούς, οι παλμοί ταχύτητας έχουν μεγάλη διάρκεια και η εφαρμογή των φασμάτων είναι ικανοποιητική μόνο στην περιοχή της μακράς περιόδου. Στην πραγματικότητα οι καταγραφές ταχύτητας κοντινού πεδίου, μπορεί να αποτελούνται από περισσότερους από ένα παλμό ταχύτητας, που παράγεται από ξεχωριστά τμήματα στο επίπεδο του ρήγματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια σειρά από συνθετικούς παλμούς, για να εφαρμοστούν ακριβώς στις καταγεγραμμένες κινήσεις του εδάφους.

Προκειμένου να παραχθούν αξιόπιστες χρονοϊστορίες σύνθετων εδαφικών κινήσεων κοντά στο ρήγμα, θα πρέπει να καθιερωθούν νόμοι κλιμάκωσης για τις παραμέτρους του μοντέλου, δηλαδή θα πρέπει να διαπιστωθεί πως οι παράμετροι κλιμακώνονται ανάλογα με το μέγεθος του σεισμού. Τέτοιο νόμοι κλιμάκωσης μπορεί να προκύπτουν κυρίως μέσω της ανάλυσης παλινδρόμησης των υπαρχόντων δεδομένων και σταδιακά να ενημερώνονται με πρόσθετες διαθέσιμες καταγραφές κινήσεων κοντινού πεδίου. Οι παράμετροι T_p και A είναι άμεσα συνδεδεμένες αντίστοιχα με το χρονικό διάστημα και με την ταχύτητα ολίσθησης του ρήγματος και έτσι αναμένεται να κλιμακώνονται ανάλογα. Αντιθέτως, οι τιμές που παίρνει η παράμετρος γ δεν έχουν καμία σχέση με το μέγεθος του σεισμού και την πλησιέστερη απόσταση από το ρήγμα. Η επικρατούσα συχνότητα, f_P (ή ισοδύναμα, η περίοδος, T_P), των καταγεγραμμένων παλμών ταχύτητας, που υπολογίζονται από την προαναφερθείσα διαδικασία βαθμονόμησης, συσχετίζονται έντονα με το μέγεθος της σεισμικής ροπής (M_w).



Σχήμα 3-3:: Διακύμανση της μέγιστης ταχύτητας εδάφους (PGV-Peak Ground Velocity) σε σχέση με το μέγεθος της σεισμικής ροπής Mw και την απόσταση R του σταθμού καταγραφής από το ρήγμα.

3.3 Φασματικές ιδιότητες του αναλυτικού μοντέλου

Προκειμένου να ληφθούν υπόψη εμπειρικές παρατηρήσεις και να γίνει φυσική ερμηνεία αυτών, οι οποίες βασίζονται σε πραγματικές καταγραφές ισχυρών εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, χρησιμοποιήθηκε ο μετασχηματισμός Fourier του αναλυτικού μοντέλου που περιγράφηκε πιο πάνω. Ο μετασχηματισμός Fourier του μοντέλου της ταχύτητας του παλμού, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V(\omega) = \int^{+\infty} v(t)e^{-i\omega t}dt = R_v(\omega) + iI_v(\omega) \qquad (3.7)$$

Στην παραπάνω σχέση οι επιμέρους παράμετροι υπολογίζονται ως εξής:

$$I_v(\omega) = -\frac{A\omega_p{}^2}{2\Phi}\left\{\begin{array}{l}\gamma^2\sin(\pi\gamma)\left[\sin\theta_3+\sin\theta_1\right]\omega^3\\ +3\gamma^2\omega_p\cos(\pi\gamma)\left[\cos\theta_3-\cos\theta_1\right]\omega^2\\ +\left(3\gamma^2\omega p^2\sin(\pi\gamma)\left[\sin\vartheta_3+\sin\theta 1\right]\omega\right)\\ +\left(\gamma^2-1\right)\omega_p{}^3\cos(\pi\gamma)\left[\cos\vartheta_3-\cos\theta_1\right]\end{array}\right\} \tag{3.8}$$

$$\Phi = \left(\omega_p-\omega\right)\left(\omega_p+\omega\right)\left(-\gamma\omega+\gamma\omega_p+\omega_p\right)\left(\gamma\omega+\gamma\omega_p-\omega p\right)\left(\gamma\omega+\gamma\omega_p+\omega_p\right)\left(-\gamma\omega+\gamma\omega_p-\omega_p\right) \tag{3.9}$$

$$\theta_1 = \frac{-\omega\pi\gamma+\nu\omega_p}{\omega_p} \tag{3.10}$$

$$\theta 3 = \frac{\omega\pi\gamma+\nu\omega_p}{\omega_p} \tag{3.11}$$

$$\omega_p = 2\pi f_p \tag{3.12}$$

Έχοντας μια παραμετρική μελέτη σε όρους ν και γ, τότε ο κανονικοποιημένος μετασχηματισμός Fourier, του παλμού της ταχύτητας ως προς ω_p και A, εκφράζεται με βάση τις παραπάνω εξισώσεις. Η κανονικοποιημένη γωνιακή συχνότητα ορίζεται ως:

$$\tilde{\omega} = \frac{\omega}{\omega_p} \tag{3.13}$$

Η κανονικοποιημένη έκφραση του μετασχηματισμού Fourier του μοντέλου του παλμού της ταχύτητας, δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\tilde{V}(\tilde{\omega}) = \tilde{R}_v(\tilde{\omega}) + iI_v(\tilde{\omega}) \tag{3.14}$$

$$\tilde{R}_V(\tilde{\omega}) = \frac{R_v(\omega)\omega_p}{A} = \frac{1}{2\Phi}\begin{Bmatrix} \gamma^2\cos(\pi\gamma)[\sin\theta_3 - \sin\theta_1]\tilde{\omega}^3 - \\ -3\gamma^2\sin(\pi\gamma)[\cos\theta_3 + \cos\theta_1]\tilde{\omega}^2 + \\ (3\gamma^2 - 1)\cos(\pi\gamma)[\sin\theta_3 - \sin\theta_1]\tilde{\omega} - \\ -(\gamma^2 - 1)\sin(\pi\gamma)[\cos\theta_3 + \cos\theta_1] \end{Bmatrix}$$

Όπου: *(3.15)*

$$\tilde{I}_v = \frac{I_v(\omega)\omega_p}{A} = -\frac{1}{2\Phi}\begin{Bmatrix} \gamma^2\sin(\pi\gamma)[\sin\theta_3 + \sin\theta 1]\tilde{\omega}^3 + \\ +3\gamma^2\cos(\pi\gamma)[\cos\theta_3 - \cos\vartheta_1]\tilde{\omega}^2 + \\ +(3\gamma^2 - 1)\sin(\pi\gamma)[\sin\theta_3 + \sin\theta_1]\tilde{\omega} + \\ +(\gamma^2 - 1)\cos(\pi\gamma)[\cos\theta_3 - \cos\theta_1] \end{Bmatrix}$$

$$\tilde{\Phi} = (1-\tilde{\omega})(1+\tilde{\omega})(-\gamma\omega + \gamma + 1)(\gamma\tilde{\omega} + \gamma - 1)(\gamma\tilde{\omega} + \gamma + 1)(-\gamma\tilde{\omega} + \gamma - 1)$$

$$\theta_1 = -\tilde{\omega}\pi\gamma + v$$

$$\theta_3 = \tilde{\omega}\pi\gamma + v$$

Με βάση την αναπαράσταση του προτεινόμενου αναλυτικού μοντέλου, προέκυψαν οι ακόλουθες παρατηρήσεις. Αρχικά, η παράμετρος της φάσης v, επηρεάζει το διάγραμμα εύρους Fourier μόνο όταν το γ πλησιάζει τη μονάδα και μόνο για περιόδους μεγαλύτερες από T_p. Επίσης, επιβεβαιώθηκε ότι τα φάσματα απόκρισης επιτάχυνσης κοντά στην πηγή για σεισμούς μέτριου έως μεγάλου μεγέθους είναι ισχυρότερα από αυτά μεγάλων σεισμών στο εύρος υψηλής συχνότητας, όπου αυτή η τάση αντιστρέφεται σε μεγαλύτερες περιόδους. Επιπλέον, είχε εμπειρικά παρατηρηθεί ότι οι μέγιστες τιμές φασματικής επιτάχυνσης από σεισμούς μέτριου έως μεγάλου μεγέθους είναι συνήθως μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές πολύ ισχυρών σεισμών. Το απλό αναλυτικό μοντέλο που προτάθηκε από τους Μαυροειδή και Παπαγεωργίου (2003), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξηγήσει την εμπειρική παρατήρηση που αναφέρθηκε παραπάνω.

3.4 Συνοριακό μοντέλο

Τα συνοριακά μοντέλα προτάθηκαν ως μια πολύ απλοποιημένη μεθοδολογία για να παράγονται σύνθετες εδαφικές κινήσεις, που εξυπηρετούν τις αναλύσεις μηχανικού και χρησιμοποιούνται α) για να περιγραφεί το συνεκτικό συστατικό της κίνησης και β) τη στοχαστική (ή μηχανική) προσέγγιση, ώστε να συντεθεί η ασυνάρτητη-υψηλής συχνότητας σεισμική ακτινοβολία.

Ωστόσο, η περιγραφή της στοχαστικής προσέγγισης της σεισμικής ακτινοβολίας, λόγω του γεγονότος ότι το σημείο παρατήρησης είναι πολύ κοντά στην πηγή της σεισμικής κίνησης, απαιτεί την χρήση ενός μοντέλου πηγής, το οποίο να παρέχει οδηγίες σχετικά με τον τρόπο διανομής-κατανομής των σεισμικών ροπών του σεισμικού γεγονότος που προσομοιώνεται από το επίπεδο διάρρηξης. Ένα τέτοιο μοντέλο πηγής είναι το συνοριακό μοντέλο των Μαυροειδή και Παπαγεωργίου (2003).

Στο μοντέλο αυτό ένας σεισμός απεικονίζεται ως μια ακολουθία ισοδύναμου μεγέθους ομοιόμορφα κατανεμημένου σε ορθογώνιο επίπεδο διάρρηξης. Τα υπο-γεγονότα αναπαριστώνται από κυκλικές ρωγμές, οι οποίες εκπέμπουν σεισμική ακτινοβολία, καθώς η διάρρηξη προχωρά προς το επίπεδο της διάρρηξης.

Σύμφωνα με το συνοριακό μοντέλο, η διάρκεια διάρρηξης προσδιορίζεται από την διάμετρο των επιφανειών $2\rho_0$ και την ταχύτητα διάρρηξης V_r, καθώς και από το σημείο εκκίνησης της, και δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\rho_0}{V_r} \le \tau \le \frac{2\rho_0}{V_r}$$

Υποθέτοντας ότι η διάρκεια του παλμού είναι ανεξάρτητη από την απόσταση σταθμού και πηγής, για σταθμούς που βρίσκονται εντός 10Km από το ρήγμα που τους προκαλεί, η περίοδος παλμού και το μέγεθος της ροπής σχετίζονται μέσω της παρακάτω εμπειρικής σχέσης που προέρχεται από την ανάλυση των ελαχίστων τετραγώνων:

$$\log T_p = 2.2 + 0.4M_w \qquad (3.16)$$

Επιπλέον, απαιτείται η εμπειρική σχέση να ικανοποιεί και την κατάσταση ομοιότητας (the self-similarity condition) (Aki et al., 1977; Papageorgiou and Aki, 1983b; Aki, 1992; Somerville et al., 1999), τότε λαμβάνεται η ακόλουθη σχέση:

$$\log T_p = -2.9 + 0.5M_w \qquad (3.17)$$

Σύμφωνα με την τελευταία σχέση, ισχύει η παραδοχή κοντινού πεδίου δηλαδή ότι η περίοδος είναι ανεξάρτητη από την απόσταση της θέσης καταγραφής από το ρήγμα. Με χρήση της πρώτης και της τελευταίας εξίσωσης, προέκυψε η ακόλουθη σχέση με τις παραμέτρους ρ_0 και T_P να είναι εκφρασμένες σε km και sec αντίστοιχα:

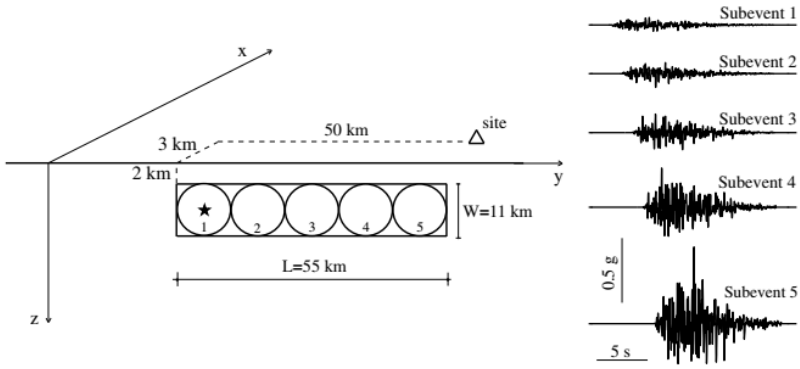
$$\log\left(\frac{2\rho_0}{T_p}\right) \approx 0.3 \Rightarrow \rho_0 \approx T_P \qquad (3.18)$$

Με την παραδοχή ότι η ταχύτητα διάρρηξης του ρήγματος είναι περίπου 2.8 Km/sec, η διάρκεια διάρρηξης δίνεται από την σχέση:

$$0.35T_p \le \tau \le 0.70T_p$$

και κατ' επέκταση:

$$\tau \approx 0.5T_P$$



Σχήμα 3-4:Παράδειγμα συνοριακού μοντέλου Mavroeidis- Papageorgiou & Aki (1983a)

4 Μεθοδολογία Μίμογλου (2014)

4.1 Γενικά στοιχεία

Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστεί μια νέα μεθοδολογία με βάση την οποία καθορίζονται οι παράμετροι του παλμού που περιέχονταται σε καταγραφές που είναι παλμικές. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, το κύμα των Μαυροειδή και Παπαγεωργίου (M&P) (2003), χρησιμοποιήθηκε για την μαθηματική αναπαράσταση του παλμού, όμως με τη μεθοδολογία που προτάθηκε από τον Μίμογλου (2014), η μεθοδολογία των Μαυροειδή και Παπαγεωργίου (M&P) (2003), τροποποιείται κατάλληλα, ώστε να εφαρμοστεί και για άλλους τύπους κυμάτων. Η νέα μεθοδολογία εισάγει ένα νέο μέγεθος, το γινόμενο των φασμάτων απόκρισης της ταχύτητας και της μετατόπισης, (S_d x S_v). Η περίοδος του παλμού καθορίζεται από το μέγιστο του προαναφερθέντος φάσματος. Ταυτόχρονα, εφαρμόζεται μια νέα σχέση μεταξύ της αθροιστικής απόλυτης μετατόπισης (cumulative absolute displacement- CAD) του κύματος και του μέγιστου φασματικού εύρους αυτού.

4.2 Ορισμός της CAD

Αρχικά, ξεκινάμε με τον υπολογισμό του εύρους του κύματος A, το οποίο υπολογίζεται, ώστε η μετατόπιση στο φάσμα απόκρισης για τον παλμό, να προσεγγίζει καλύτερα με το αντίστοιχο φάσμα της καταγραφής. Στην διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται η αθροιστική απόλυτη μετατόπιση της εδαφικής κίνησης και συσχετίζεται με την φασματική μετατόπιση. Η σχέση για την αθροιστική φασματική μετατόπιση, έχει προταθεί από Taflampas et al (2014). Ο δείκτης απόλυτης αθροιστικής μετατόπισης ορίζεται ως το ολοκλήρωμα της απόλυτης ταχύτητας του εδάφους στο χρόνο, όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

$$CAD = \int_0^{t_{tot}} |v_g| \, dt \qquad (4.1)$$

Ας υποθέσουμε μια αρμονική εδαφική κίνηση με εύρος $d_{g,max}$, εφαρμόζεται στη βάση ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή, χωρίς απόσβεση. Όταν συμβεί συντονισμός, το εύρος της απόκρισης του ταλαντωτή αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με τον αριθμό των κύκλων της φόρτισης, και για υπόθεση γ κύκλων φόρτισης, η μέγιστη απόκριση (φασματική μετατόπιση-spectral displacement), είναι:

$$S_{d,o}\left(T_{res}\right) = \pi \gamma d_{g,\max} \qquad (4.2)$$

Όπου, $S_{d,0\ (Tres)}$ είναι η φασματική μετατόπιση σε συντονισμό για μηδενική απόσβεση. Παράλληλα, η CAD στο τέλος του γ κύκλου φόρτισης για μια αρμονική ταλάντωση, είναι:

$$CAD = 4\gamma d_{g,\max} \tag{4.3}$$

Όπου, $d_{g,max}$ είναι η μέγιστη μετατόπιση εδάφους.

Με βάση τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι για γ κύκλους φόρτισης, υπάρχει μια σταθερή σχέση μεταξύ της φασματικής μετατόπισης και CAD, για μηδενική απόσβεση κατά το συντονισμό, η οποία εκφράζεται ως:

$$\frac{S_{d,\xi}\left(T_{res}\right)}{CAD} = \frac{\pi}{4} \tag{4.4}$$

Ο παραπάνω λόγος τείνει στην τιμή π/4 για παλμούς με μεγάλη διάρκεια (δηλαδή για μεγάλες τιμές του γ). Η μέγιστη απόκλιση συμβαίνει για γ=1.5 και ν=30° , αλλά και πάλι το σφάλμα παραμένει μικρότερο από 6%.

Για τιμές απόσβεσης διάφορες το μηδενός, έστω απόσβεση ίση με ξ για ένα μονοβάθμιο ταλαντωτή και για απλή αρμονική ταλάντωση, η μετατόπιση κατά το συντονισμό $S_{d,\xi}(Tres)$, θα είναι:

$$S_{d,\xi}\left(T_{res}\right) = \frac{1-e^{-2\pi\gamma\xi}}{2\xi} d_{g,\max} \tag{4.5}$$

η οποία με χρήση της εξίσωσης:

$$CAD = 4\gamma d_{g,\max} \tag{4.6}$$

Γίνεται:

$$\frac{S_{d,\xi}\left(T_{res}\right)}{CAD} = \frac{1-e^{-2\pi\gamma\xi}}{8\gamma\xi} \tag{4.7}$$

*Από παραμετρική μελέτη προέκυψε ότι είναι απαραίτητη η χρήση ενός διορθωτικού συντελεστή, για μεγάλες τιμές του γ, ο οποίος θα είναι ίσος με 1+(γ-1)*ξ.*

Επομένως, για κύματα M&P , η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\frac{S_{d,\xi,\max}}{CAD} = \frac{1-e^{-2\pi\gamma\xi}}{8\gamma\xi}\left[1+(\gamma-1)\xi\right] \qquad (4.8)$$

και η ακρίβειά της είναι πολύ καλή για όλες τις περιπτώσεις.

Στη συνέχεια, προτείνονται οι σχέσεις ανάμεσα σε PS_v (Pseudovelocity Spectral Velocity) και CAD, για τα κύματα M&P:

Είναι γνωστή η σχέση για την φασματική ψευδο-ταχύτητα:

$$PS_v = \frac{2\pi}{T} S_d \qquad (4.9)$$

Επομένως, ισχύουν τα εξής:

Για μηδενική απόσβεση ξ=0:

$$\frac{PS_{v,0,\max}}{CAD} = \frac{\pi^2}{2T_P} \qquad (4.10)$$

Για απόσβεση ξ≠0

$$\frac{PS_{v,\xi,\max}}{CAD} = \frac{\pi\left(1-e^{-2\pi\gamma\xi}\right)\left[1+(\gamma-1)\xi\right]}{4\gamma\xi T_p} \qquad (4.11)$$

Όπου $PS_{v,o}$ και $PS_{v,\xi}$ είναι οι ψευδο-φασματικές ταχύτητες για μηδενική απόσβεση και για απόσβεση ίση με ξ, αντίστοιχα.

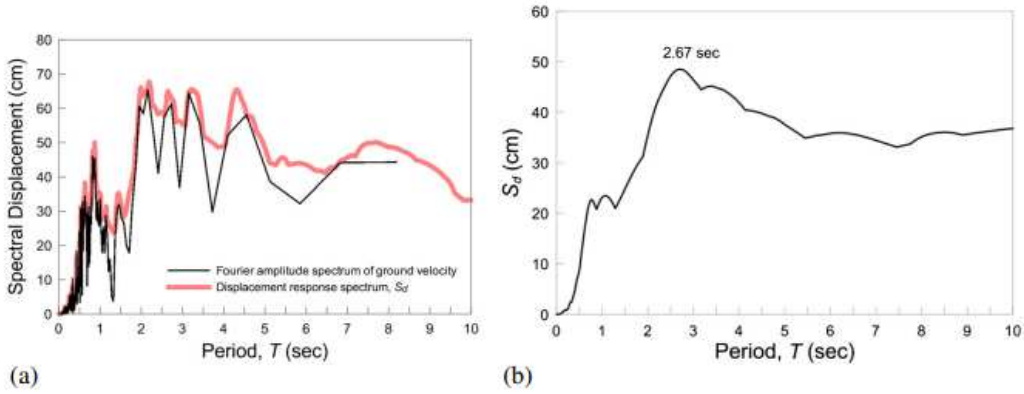
4.3 Ορισμός παλμικών παραμέτρων

4.3.1 Περίοδος του παλμού

Μια κοινή πρακτική είναι να θεωρείται η περίοδος T_p του παλμού της ταχύτητας, ότι είναι ίση με τη μέγιστη τιμή της ψευδο-ταχύτητας στο φάσμα απόκρισης για απόσβεση ίση με 5%. Σύμφωνα με διάφορες εφαρμογές, έχει βρεθεί ότι η υπόθεση αυτή για την περίοδο του παλμού οδηγεί σε σφάλματα. Δηλαδή, η περίοδος του παλμού σύμφωνα με τους M&P, αντιπροσωπεύει καλύτερα τον παλμό που εμπεριέχεται στην εδαφική κίνηση, ενώ η περίοδος του κύματος που προτείνεται από την εν λόγω μεθοδολογία μέσω του μεγίστου στο φάσμα της ψευδο-ταχύτητας, αντιστοιχεί σε μια, υψηλής-συχνότητας, συνιστώσα της κίνησης και όχι στον κύριο παλμό της ταχύτητας.

Μια εναλλακτική είναι να υπολογισθεί η T_p, με βάση το φάσμα απόκρισης της μετατόπισης, υπό κάποιες προϋποθέσεις. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο παλμός ταχύτητας είναι εμφανής στη χρονοϊστορία της ταχύτητας του εδάφους, θα μπορούσε κανείς να θεωρήσει εύλογο τον καθορισμό της περιόδου T_p από τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης μετατόπισης για απόσβεση 5%, αντί για το φάσμα της ψευδο-ταχύτητας. Πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι μπορεί η χρήση του φάσματος απόκρισης

μετατόπισης να είναι προβληματική. Ένα σημαντικό ζήτημα είναι ότι η κορυφή του φάσματος απόκρισης μετατόπισης, μπορεί να επηρεαστεί από την παρουσία σφαλμάτων μεγάλης διάρκειας στην καταγραφή της εδαφικής επιτάχυνσης. Επιπλέον, η κορυφή του φάσματος απόκρισης μετατόπισης μπορεί να αντιστοιχεί σε έναν παλμό ταχύτητας με μεγάλη περιοχή αλλά μικρό εύρος, ο οποίος μπορεί να μην είναι ο κυρίαρχος παλμός. Επιπλέον, αυτός ο εναλλακτικός ορισμός του T_p μέσω της κυρίαρχης περιόδου στο φάσμα απόκρισης της μετατόπισης δεν μπορεί επίσης να γενικευτεί, καθώς υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες δεν είναι έγκυρος.



Σχήμα:4-1: Για μια δεδομένη καταγραφή:
a) σύγκριση του φάσματος εύρους Fourier της ταχύτητας εδάφους με το φάσμα απόκρισης μετατόπισης για μηδενική απόσβεση και
b) φάσμα απόκρισης μετατόπισης για 5% απόσβεση

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ούτε το φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας ούτε το φάσμα απόκρισης μετατόπισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν γενικά για τον προσδιορισμό της περιόδου του παλμού ταχύτητας, επειδή υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες οι δύο προσεγγίσεις οδηγούν σε σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει διότι πολλές παλμικές κινήσεις εδάφους επηρεάζονται από περισσότερους από έναν παλμούς διαφορετικών περιόδων.

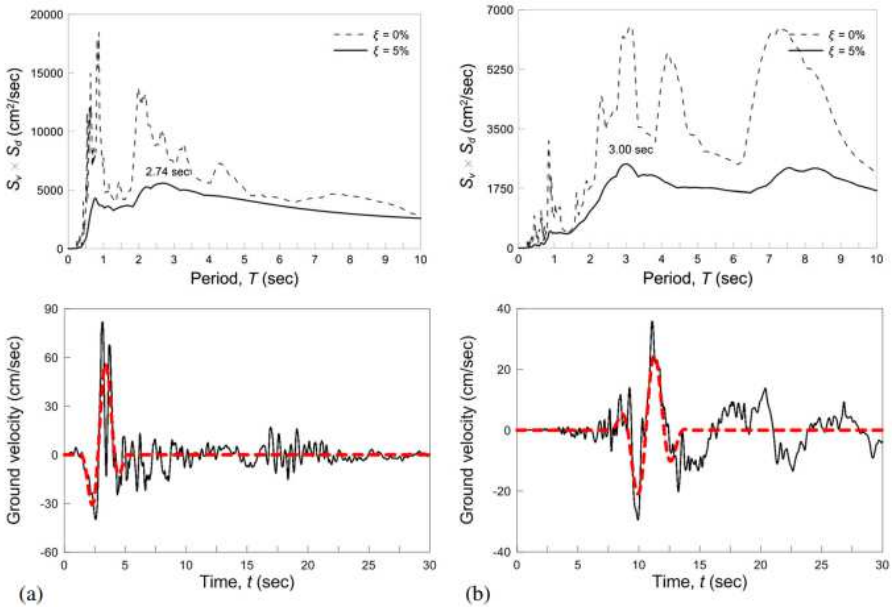
Έτσι, προτείνεται μια νέα μεθοδολογία που επιτρέπει τον προσδιορισμό του κυρίαρχου παλμού μέσω ενός συνδυασμού των φασμάτων απόκρισης της ταχύτητας και μετατόπισης. Η νέα προσέγγιση βασίζεται στην παρατήρηση ότι, επειδή ο παλμός που περιέχεται σε μια κίνηση του εδάφους επηρεάζει και την εδαφική επιτάχυνση και την ταχύτητα, σε διαφορετικό βαθμό όμως, θα πρέπει να επικρατήσει η περίοδος παλμού T_p στην ολοκλήρωση αυτών των δύο χρονοϊστοριών. Επιπλέον, τα στοιχεία υπερβολικά υψηλής συχνότητας ή χαμηλής συχνότητας που περιέχονται στην επιτάχυνση του εδάφους και την ταχύτητα του εδάφους εξασθενούν. Κατά συνέπεια, η κορυφή του φάσματος εύρους Fourier της σύνθεσης επιτάχυνσης-ταχύτητας, πρέπει να αντιστοιχεί στην περίοδο του κυρίαρχου παλμού που περιέχεται στην κίνηση του εδάφους.

Είναι γνωστό ότι το εύρος του φάσματος Fourier στην ολοκλήρωση είναι ίσο με το γινόμενο του εύρους του φάσματος του Fourier των δύο σημάτων που συντίθενται. Αντίθετα, το χωρίς απόσβεση φάσμα ταχύτητας $S_{v,0}$ περιέχει το εύρος του φάσματος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης και το χωρίς απόσβεση φάσμα της επιτάχυνσης $S_{d,0}$, περιέχει το εύρος του φάσματος Fourier της εδαφικής ταχύτητας. Έτσι, με χρήση των ιδιοτήτων αυτών, το εύρος του φάσματος Fourier κατά την ολοκλήρωση προσεγγίζεται από το γινόμενο $S_{d,0}*S_{v,0}$, το οποίο θα αναφέρεται παρακάτω ως γινόμενο φάσματος για

*μηδενική απόσβεση, S_d*S_v. Συνεπώς, η περίοδος του παλμού της ταχύτητας μπορεί να προσδιοριστεί από την κορυφή του φάσματος S_d*S_v.*

*Παρά τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, προτείνεται η περίοδος του παλμού να ορίζεται από το γινόμενο των φασμάτων S_d*S_v για απόσβεση 5%, το οποίο ορίζεται ως το γινόμενο $S_{d,5}$*$S_{v,5}$, όπου $S_{d,5}$ και $S_{v,5}$ είναι τα φάσματα απόκρισης για την μετατόπιση και για την ταχύτητα για απόσβεση 5%. Η απόσβεση προτείνεται εδώ, επειδή οι περίοδοι ταιριάζουν καλύτερα με αυτές που προέρχονται από τον Baker, που χρησιμοποιούνται ως αποτελέσματα αναφοράς. Επιπλέον, τα φάσματα απόκρισης για απόσβεση 5% της κίνησης του εδάφους, τα οποία είναι πιο σημαντικά από αυτά για μηδενική απόσβεση για τυπικό σεισμό, ταιριάζουν καλύτερα με τα αντίστοιχα φάσματα του εξαγόμενου παλμού ταχύτητας.*

*Από εφαρμογές της παραπάνω προταθείσας μεθοδολογίας, προκύπτει ότι η χρήση του φάσματος S_d*S_v για απόσβεση 5% οδηγεί σε αποτελέσματα που συμφωνούν κατά πολύ με όσα προτάθηκαν από τον Baker. Οι υπολογισμένες περίοδοι παλμού ταιριάζουν καλά με τους παλμούς ταχύτητας που είναι ενσωματωμένοι στις αρχικές καταγραφές κινήσεων εδάφους.*



Σχήμα 4-2:Για δύο διαφορετικές καταγραφές γίνεται προσδιορισμός της περιόδου παλμού ταχύτητας Tp από την κορυφή του φάσματος Sd × Sv για απόσβεση 5% (οι αντίστοιχες καμπύλες για μηδενική απόσβεση παρουσιάζονται για σύγκριση), ενώ στο κάτω σχήμα γίνεται σύγκριση

4.3.2 Εύρος, διάρκεια, μετατόπιση φάσης και χρόνος έναρξης παλμού

Αφού προσδιοριστεί η περίοδος παλμού το T_p από την κορυφή του φάσματος S_d × S_v, υπολογίζονται οι υπόλοιπες παράμετροι του κύματος M&P, δηλαδή το πλάτος A, η διάρκεια γ και η μετατόπιση φάσης ν, υπολογίζονται, έτσι ώστε το φάσμα απόκρισης μετατόπισης του παλμού για απόσβεση 5% να ταιριάζει καλύτερα στο αντίστοιχο φάσμα της καταγραφής. Ωστόσο, επειδή το φάσμα απόκρισης ψευδο-ταχύτητας σχετίζεται άμεσα με το φάσμα μετατόπισης μέσω της σχέσης $PS_v = \omega S_d$, το κύμα ταιριάζει, επίσης και στο φάσμα απόκρισης ψευδο-ταχύτητας. Ο προσδιορισμός των τριών παραμέτρων του κύματος A, γ και ν, επιτυγχάνεται με χρήση της παραμέτρου κίνησης εδάφους CAD, όπως εκείνη ορίστηκε πιο πάνω.

Για τα κύματα M&P, η τιμή της CAD, δίνεται από τη σχέση:

$$CAD = \frac{\gamma A T_P}{\pi} \qquad (4.12)$$

Με αφαίρεση της παραπάνω σχέσης από την σχέση:

Για απόσβεση ξ≠0

$$\frac{PS_{v,\xi,\max}}{CAD} = \frac{\pi\left(1-e^{-2\pi\gamma\xi}\right)\left[1+\left(\gamma-1\right)\xi\right]}{4\gamma\xi\mathrm{T}_p} \qquad (4.13)$$

Και με αντικατάσταση $PS_{v,\xi,max}$ με $PS_{v,\xi(Tp)}$, που είναι η τιμή του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για περίοδο Tp και για απόσβεση ίση με ξ, παίρνουμε:

$$\mathrm{A} = \frac{4\xi PS_{v,\xi}\left(T_p\right)}{(1-e^{-2\pi\gamma\xi})\left[1+(\gamma-1)\xi\right]} \qquad (4.14)$$

Η τελευταία σχέση εφαρμόζεται συχνά για ξ ίσο με 0.05. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι το φάσμα απόκρισης της μετατόπισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί για το αντίστοιχο φάσμα της ψευδο-ταχύτητας, καθώς ισχύει η σχέση:

$$PS_v\left(T_p\right) = \left(\frac{2\pi}{T_P}\right) S_d\left(T_P\right) \qquad (4.15)$$

Όμως, σύμφωνα με τη σχέση για το εύρος, μπορεί να υπολογισθεί σε περίπτωση που είναι γνωστή η παράμετρος γ. Επειδή η παράμετρος αυτή είναι άγνωστη, εξετάστηκαν όλες οι τιμές της παραμέτρου σε ένα επιλεγμένο εύρος. Από το σύνολο ζευγαριών (A,γ) που εξετάσθηκαν, απορρίπτονται εκείνα που οδηγούν σε πλάτη φάσματος επιτάχυνσης, ταχύτητας ή μετατόπισης μεγαλύτερα από τις αντίστοιχες τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας (PGV) και της μέγιστης εδαφικής μετατόπισης (PGD). Για τα εναπομείναντα αποδεκτά ζεύγη (A,γ) και για όλες τις τιμές της φάσης ν από 0° έως 360°, υπολογίζονται τα αντίστοιχα κύματα. Για κάθε ένα από τα κύματα αυτά, εξετάζονται μερικές τιμές για το χρόνο καθυστέρησης t_d της έναρξης του παλμού. Έτσι, καθορίζεται ένα σύνολο από υποψήφια κύματα, κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί σε ένα διαφορετικό σύνολο παραμέτρων A, γ, ν και t_d. Από τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες του παλμού v_p (A, γ, ν, t_d, t), επιλέγεται το κύμα που συσχετίζεται καλύτερα με τη χρονοϊστορία της ταχύτητας εδάφους $v_g(t)$.

Για το σκοπό αυτό, ο συντελεστής συσχέτισης r (cross-correlation factor), υπολογίζεται για κάθε ζεύγος χρονοϊστοριών (v_p, v_g) και τελικά επιλέγεται ο παλμός με το μεγαλύτερο r. Με αυτόν τον τρόπο, η συνάρτηση αλληλοσυσχέτισης χρησιμοποιείται για την αναγνώριση όχι μόνο του παλμού που ταιριάζει καλύτερα στη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας, αλλά χρησιμοποιείται και για τον προσδιορισμό και της ώρας έναρξης, t_d. Έχει αναφερθεί ότι αντί της χρονικής καθυστέρησης t_d, για τον ορισμό του παλμού γίνεται χρήση του t_o, που είναι ο χρόνος κατά τον οποίο πραγματοποιείται η μέγιστη τιμή του κύματος. Αυτή η τιμή μπορεί να υπολογιστεί από t_d, γ και T_p, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$t_0 = t_d + \gamma * T_p / 2 \tag{4.16}$$

4.4 Εφαρμογή του κύματος Μίμογλου σε πραγματικές καταγραφές

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε ένα σύνολο από πραγματικές καταγραφές τόσο κοντινού όσο και μακρινού πεδίου, οι οποίες ελήφθησαν από την βάση δεδομένων NGA. Για κάθε καταγραφή έγινε εξαγωγή των 6 πρώτων παλμών και για κάθε παλμό που εξαγόταν, γινόταν υπολογισμός του συντελεστή συσχέτισης με την αρχική καταγραφή, δηλαδή κατά πόσο ο κάθε παλμός που εξάγεται από μια καταγραφή επηρεάζει την αρχική καταγραφή και αν η καταγραφή αυτή ταξινομείται ως παλμική ή μη. Ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίζεται με χρήση του κύματος κατά Μίμογλου (2014) για απόσβεσης 5%. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των καταγραφών, θα αναφερθούν αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο. Αφού έγινε εξαγωγή των παλμών για κάθε καταγραφή και υπολογισμός του συντελεστή συσχέτισης για κάθε παλμό. Η κατάταξη της καταγραφής όσον αφορά την παλμικότητα της γίνεται με βάση τις τιμές για τον συντελεστή συσχέτισης, οι οποίες προτείνονται από την Βασιλική Καρδούτσου (2017), η μεθοδολογία αυτή αναφέρεται εκτενώς στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο.

5 *Δείκτης παλμικότητας Καρδούτσου (2017)*

5.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Οι παλμικές σεισμικές καταγραφές αποτελούν μια ειδική κατηγορία εδαφικών κινήσεων, επειδή είναι ικανές να προκαλέσουν σημαντική ζημιά σε πλήθος κατασκευών. Η Β.Καρδούτσου (2017), πρότεινε ένα νέο παλμικό δείκτη για τον χαρακτηρισμό των σεισμικών κινήσεων ως παλμικές ή μη. Ο δείκτης αυτός ισούται με τον συντελεστή συσχέτισης του σημαντικού παλμού και της αρχικής καταγραφής. Σύμφωνα με την Καρδούτσου, για όσες καταγραφές οι δείκτες PI είναι μεγαλύτεροι από 0.65, τότε οι καταγραφές χαρακτηρίζονται ως παλμικές, ενώ καταγραφές με δείκτη PI μικρότερο από 0.55 χαρακτηρίζονται ως μη-παλμικές. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε για ένα πλήθος από καταγραφές, οι οποίες έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές, μη παλμικές ή αμφιλεγόμενες και έγινε μια σύγκριση του προτεινόμενου νέου παλμικού δείκτη PI , με προηγούμενους δείκτες που έχουν προταθεί. Με βάση την εφαρμογή αυτή έγινε φανερό ότι ο προτεινόμενος PI, σχετίζεται με την ανελαστική απόκριση των κατασκευών, επειδή οι καταγραφές που χαρακτηρίζονται ως παλμικές, παράγουν, γενικά, ανελαστικές μετακινήσεις, οι οποίες είναι μεγαλύτερες από τις ελαστικές.

Η ταξινόμηση των καταγραφών ως παλμικές ή μη, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τους μηχανικούς, λόγω της επίδρασης των παλμών κατευθυντικότητας στο ελαστικό και το ανελαστικό φάσμα απόκρισης. Σύμφωνα με την ελαστική απόκριση, οι παλμοί κατευθυντικότητας παράγουν μια κωδωνόσχημη επαύξηση στο φάσμα απόκρισης γύρω από την περίοδο του παλμού T_p. Για την ανελαστική απόκριση, οι παλμοί κατευθυντικότητας παράγουν μεγάλες απαιτήσεις πλαστιμότητας μ για κατασκευές με δεσπόζουσα περίοδο κοντά στο μισό της περιόδου του παλμού $T_p/2$, μεγαλύτερες από την τιμή του αντίστοιχου μειωτικού συντελεστή R, ο οποίος θα ήταν αναμενόμενος σύμφωνα με τον κανόνα ίσων μετακινήσεων. Ωστόσο, για κατασκευές με περίοδο ίση ή μεγαλύτερη από την περίοδο του παλμού, ο λόγος μ/R είναι γενικά κοντά στη μονάδα και ισχύει ο κανόνας των ίσων μετατοπίσεων.

Οι παλμοί της ταχύτητας που εμπεριέχονται στις καταγραφές εδαφικής κίνησης είναι συνήθως ορατοί στη χρονοϊστορία της ταχύτητας. Πολλοί ερευνητές παρουσίασαν ποικίλες μεθόδους για προσομοίωση αυτών, κυρίως χρησιμοποιώντας την ανάλυση κυμάτων.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ένας νέος δείκτης παλμικότητας PI, και υλοποιείται συσχέτιση του δεσπόζοντος παλμού και της αρχικής πραγματικής καταγραφής. Για την μαθηματική αναπαράσταση του δεσπόζοντος παλμού, εφαρμόστηκε το κύμα των Μαυροειδή και Παπαγεωργίου. Ο νέος παλμικός δείκτης, συγκρίνεται με την ταξινόμηση κατά Baker τις καταγραφές με μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV)>30 cm/s. Σε πολλές περιπτώσεις ο νέος δείκτης έρχεται σε αντίθεση με την ταξινόμηση κατά Baker.

5.2 Δείκτες παλμικότητας - Βιβλιογραφική αναφορά

5.2.1 Παλμικός δείκτης - Baker (2007)

Η έως τώρα ταξινόμηση των εδαφικών κινήσεων ως παλμικές ή μη-παλμικές, βασιζόταν στην υπόθεση ότι η ενέργεια μιας παλμικής εδαφικής κίνησης συγκεντρώνεται περισσότερο στην διάρκεια του παλμού (Baker 2007). Αυτό υπονοεί ότι η εισαγόμενη παραμόρφωση της κατασκευής αποσβήνει ενέργεια σε ένα ή σε μερικούς πλαστικούς κύκλους.

Έχουν προταθεί ποικίλα κριτήρια από διαφορετικούς ερευνητές με βάση αυτή την ταξινόμηση. Ο Baker (2007) πρότεινε ένα παλμικό δείκτη PI, ο οποίος λαμβάνει υπόψη το λόγο της μέγιστης ταχύτητας εδάφους (PGV), της παραμένουσας κίνησης, που είναι η χρονοϊστορία που υπολογίζεται από την εξαγωγή του παλμού της ταχύτητας από την αρχική εδαφική κίνηση, προς το PGV της αρχικής καταγραφής, καθώς και το λόγο των ενεργειών των παραμενουσών προς τις αρχικές καταγραφές. Εκείνες οι μεταβλητές αναφέρονται ως PGV ratio και ως Energy ratio, αντίστοιχα. Η ενέργεια υπολογίζεται από την ολοκλήρωση του τετραγώνου της ταχύτητας του εδάφους.

Όπως έχει αναφερθεί ήδη σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο δείκτης PI κατά Baker, δίνεται από τη σχέση:

$$PI = \frac{1}{1 + e^{-2.3+14.6(PGVratio)+20.5(Energyratio)}} \tag{5.1}$$

και λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Έτσι, εάν PI > 0.85, η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως παλμική και εάν PI < 0.15, η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως μη-παλμική. Για ενδιάμεσες τιμές, η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως αμφιλεγόμενη.

5.2.2 Παλμικός δείκτης - Zhai et al. (2013)

Ένας, παρόμοιος δείκτης προτάθηκε και από τους Zhai et al. (2013) και βασίζεται στο λόγο της ενέργειας που περιέχεται στον παλμό της ταχύτητας και στη συνολική ενέργεια της καταγραφής. Ο παλμός υπολογίζεται σύμφωνα με το μοντέλο που προτείνεται από τον Dickinson and Gavin (2011), σύμφωνα με το οποίο υπολογίζεται η αθροιστική ενέργεια $E_{(t)}$ μιας εδαφικής κίνησης στη χρονική στιγμή t, σύμφωνα με τη σχέση:

$$E(t) = \frac{\int_0^t u^2(t)dt}{\int_0^\infty u^2(t)dt} \tag{5.2}$$

Όπου u(t) αντιπροσωπεύει τις χρονοϊστορίες της ταχύτητας. Επίσης, η ενέργεια που περιέχεται σε ένα παλμό ταχύτητας, συμβολίζεται με E_p και ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_p = E(t_e) - E(t_s) \tag{5.3}$$

στην οποία t_s, t_e συμβολίζουν το χρόνο έναρξης και το χρόνο λήξης του παλμού, αντίστοιχα. Έτσι, η σχετική ενέργεια του παλμού E_p, χρησιμοποιείται ως δείκτης παλμικότητας. Εάν Ep > 0.3, τότε η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως παλμική.

5.2.3 Παλμικός δείκτης - Chang et al. (2016),

Μια άλλη μέθοδος που, επίσης βασίζεται στο περιεχόμενο ενέργειας της καταγραφής, προτάθηκε από τον Chang et al. (2016), και αποτελεί βελτίωση της μεθόδου του Zhai et al. (2013). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το εύρος του παλμού και η θέση του στη χρονοϊστορία της καταγραφής προσδιορίζονται από το εύρος του παλμού μισού κύκλου που έχει τη μέγιστη σεισμική ενέργεια. Ο προτεινόμενος παλμικός δείκτης PI ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που περιέχεται στον κυρίαρχο παλμό της συνολικής σεισμικής ενέργειας. Εάν ο PI > 0.34, τότε η καταγραφή θεωρείται παλμική. Η μαθηματική αναπαράσταση του παλμού της ταχύτητας και ο τρόπος της ενέργειας υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως στη μέθοδο του Zhai et al. (2013).

5.3 Μεθοδολογία Καρδούτσου (2017)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στη μέθοδο κατά Μίμογλου et al. (2014), ο δεσπόζων παλμός επιλέγεται από ένα σύνολο επιλέξιμων παλμών με βάση το κριτήριο της μεγαλύτερης συσχέτισης με την αρχική καταγραφή. Αυτό το σκεπτικό επεκτείνεται, έτσι ώστε να οριστεί ένας νέος δείκτης PI, για το χαρακτηρισμό της καταγραφής ως παλμική ή μη, με βάση τον συντελεστή συσχέτισης r, και επομένως, τίθεται PI = r.

Η συνάρτηση συσχέτισης ανάμεσα σε δύο συναρτήσεις f, g με μια χρονική καθυστέρηση, ορίζεται ως:

$$(f * g)(t_d) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t) g(t + t_d) dt \qquad (5.4)$$

Έτσι, ο συντελεστής συσχέτισης r, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$r = \frac{\sum_i (f(t_i) - \tilde{f})(g(t_i - t_d) - \tilde{g})}{\sqrt{\left[[\sum_i (f\left(t_i\right) - \tilde{f}\right)^2][\sum_i (g(t_i - t_d) - \tilde{g})^2 \right]}} \qquad (5.5)$$

όπου με $\tilde{f}, \tilde{g}$ συμβολίζονται οι μέσες τιμές των συναρτήσεων f,g

Στην περίπτωσή μας, ο συντελεστής συσχέτισης r, υπολογίζεται για τη χρονοϊστορία της ταχύτητας της αρχικής καταγραφής $u_g(t)$ και την χρονοϊστορία της ταχύτητας του παλμού $u_p(t)$ και για χρονική καθυστέρηση t_d ίση με εκείνη το χρονική στιγμή που ξεκινά ο παλμός. Ως συντελεστής συσχέτισης λαμβάνεται το μέγιστο μεταξύ της χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας και των προσομοιωμένων παλμών για όλα τα πιθανά χρονικά περιθώρια.

Η διαδικασία αποτελείται από μετατόπιση του παλμού κατά μήκος της χρονοϊστορίας της εδαφικής ταχύτητας, από την αρχή μέχρι το τέλος της διάρκειάς της, και το σημείο όπου η συσχέτιση του παλμού και της εδαφικής ταχύτητας παρουσιάζουν

τη μέγιστη τιμή τους, αποτελεί τη θέση του παλμού στη χρονοϊστορία της εδαφικής κίνησης.

Θέτοντας $PI = r$, πρέπει να οριστούν δύο ακραίες τιμές, οι $PI_{cr,max}$, $PI_{cr,min}$, τέτοιες ώστε εάν το $PI > PI_{cr,max}$, η καταγραφή θεωρείται παλμική, ενώ εάν $PI < P_{icr,min}$ τότε η καταγραφή θεωρείται μη παλμική. Ύστερα από μια βαθμονόμηση του μοντέλου, η οποία βασίστηκε στο χαρακτηρισμό του Baker (2007), προτείνονται οι παρακάτω τιμές, $PI_{cr,max} = 0.65$ και $PI_{cr,min} = 0.55$. Στο εξής, εάν $PI > 0.65$, οι καταγραφές θεωρούνται παλμικές, ενώ αν $PI < 0.55$, οι καταγραφές θεωρούνται ως μη-παλμικές. Η μέθοδος που προτείνεται, έχει και εκείνη σχέση με την ανελαστική απόκριση των μονοβάθμιων κατασκευών.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, παρόλο που η πλειονότητα των παλμικών καταγραφών αποδίδεται στα φαινόμενα κοντινού πεδίου (παλμοί κατευθυντικότητας), σημαντικοί παλμοί μπορεί να προκληθούν κι από άλλα αίτια, όπως είναι φαινόμενα βάσης, συνθήκες εδάφους, βαθιά διάρρηξη, παραμένουσα μετακίνηση και πολλά ακόμη. Υπό την έννοια αυτή, ο Baker (2007), θεώρησε ότι καταγραφές με σημαντικά παλμικά χαρακτηριστικά, τα οποία πιθανώς προέρχονται από φαινόμενα διαφορετικά από την κατευθυντικότητα, θα πρέπει να μην θεωρηθούν παλμικές. Για το λόγο αυτό, οι καταγραφές με παλμούς που φθάνουν αργά, ταξινομούνται ως μη παλμικές, ακόμα και αν έχουν μεγάλο δείκτη παλμικότητας. Στη μέθοδο των Καρδούτσου (2017), δόθηκε έμφαση στην άποψη ότι τα αποτελέσματα των ισχυρών παλμών που περιέχονται στην εδαφική κίνηση στο ελαστικό και στο ανελαστικό φάσμα απόκρισης είναι ανεξάρτητα από την αιτία δημιουργίας των παλμών. Για το λόγο αυτό, υιοθετήθηκε το κριτήριο του Baker για τους παλμούς που φθάνουν αργά, και όλες οι καταγραφές με $PI > PI_{cr,max}$, θεωρήθηκαν ως παλμικές.

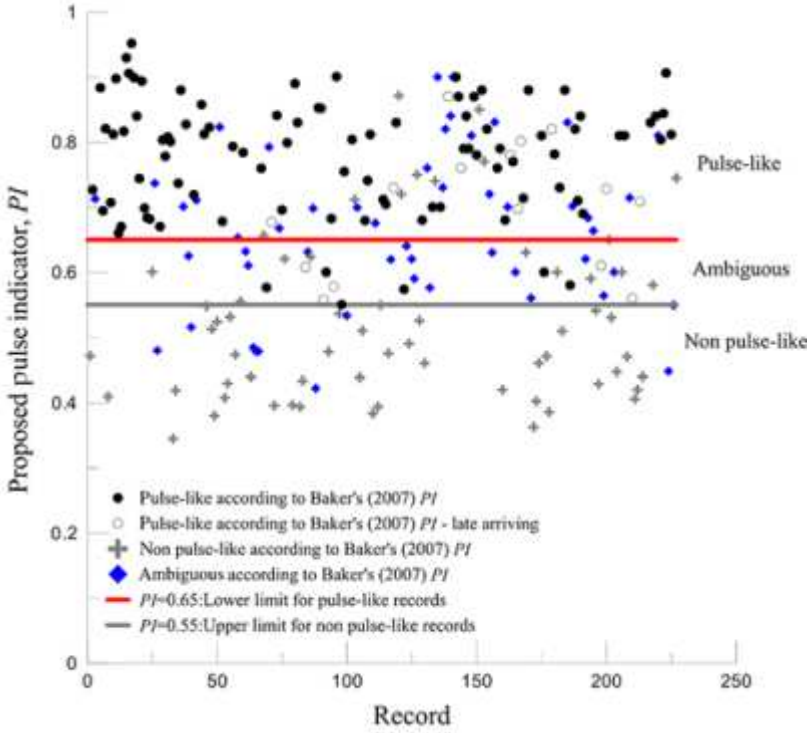
Ο προτεινόμενος παλμικός δείκτης μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε καταγραφή με γνωστή τη μαθηματική έκφραση του κυρίαρχου παλμού της. Ταυτόχρονα, οποιαδήποτε μορφή κύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μαθηματική έκφραση του κυρίαρχου παλμού. Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με την Καρδούτσου (2017), χρησιμοποιήθηκε το κύμα σύμφωνα με τους M&P (2003), όπως ορίστηκε από την εφαρμογή της μεθόδου που προτάθηκε από τον Μίμογλου et al (2014). Η μέθοδος αυτή παράγει ένα κυρίαρχο παλμό για κάθε καταγραφή, ανεξάρτητα από το αν είναι παλμική ή όχι.

5.4 Αξιολόγηση μεθοδολογίας

Η προτεινόμενη μέθοδος, εφαρμόστηκε, αρχικά, για την εκτίμηση του παλμικού δείκτη στις επιλεγμένες καταγραφές όπου εφαρμόστηκε κι η αντίστοιχη μέθοδος του Baker (2007), για τις ίδιες κατευθύνσεις της εδαφικής κίνησης. Τα αποτελέσματα, συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από τη μέθοδο του Baker (2007), και παρουσιάζονται συνολικά στο παρακάτω διάγραμμα, για 221 καταγραφές.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, οι 108 καταγραφές διαθέτουν $PI_{Baker} > 0.85$. Αυτές οι καταγραφές θα πρέπει να χαρακτηρίζονται ως παλμικές σύμφωνα με το κριτήριο του Baker. Ωστόσο, μόνο 91 από αυτές (που υποδηλώνονται με συμπαγείς μαύρους κύκλους) θεωρούνται τελικά ως παλμικές κατά Baker (2007), ενώ οι υπόλοιπες 17 (συμβολίζονται με ανοιχτούς κύκλους) αποκλείστηκαν, καθώς περιείχαν όσους παλμούς έφτασαν αργά στην καταγραφή. Οι μη-παλμικές καταγραφές, με $PI_{Baker} < 0.15$, σημειώνονται με γκρι σταυρούς και οι διφορούμενες, για τις οποίες $0.15 < PI_{Baker} < 0.85$, συμβολίζονται με μπλε χρώμα. Οι καταγραφές με παλμούς που φτάνουν αργά δεν αποκλείονται, επομένως όλα τα σημεία συμβολίζονται είτε με

συμπαγείς είτε με ανοικτούς κύκλους. Οι κύκλοι θεωρούνται παλμικοί με βάση την μεθοδολογία του Baker (2007).

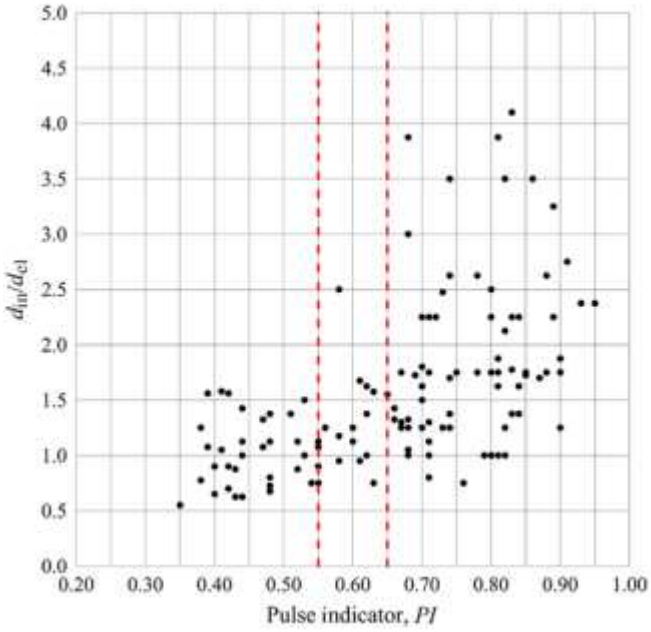


Σχήμα 5-1:Σύγκριση των δεικτών παλμικότητας Καρδούτσου (2017) και Baker (2007)

Από το σχήμα φαίνεται ότι, για την πλειονότητα των καταγραφών, σύμφωνα με το νέο δείκτη PI, παρατηρείται παρόμοια ταξινόμηση των καταγραφών με τον δείκτη του Baker (2007). Συγκεκριμένα, η πλειονότητα των καταγραφών που ταξινομούνται ως παλμικές με βάση τον δείκτη Baker PI (που υποδηλώνεται από συμπαγείς και ανοιχτούς κύκλους) εμφανίζονται με τιμή του νέου δείκτη PI μεγαλύτερο από το όριο του $PI_{cr,max}$= 0.65, έτσι ταξινομούνται επίσης ως παλμικές από τη νέα προσέγγιση. Ομοίως, η πλειονότητα των καταγραφών που ταξινομούνται ως μη παλμικές βάσει του Baker (που υποδηλώνεται με γκρι σταυρούς) έχουν μια τιμή του νέου PI μικρότερη από το όριο του $PI_{cr,min}$= 0.55, επομένως ταξινομούνται επίσης ως μη παλμικές από την προτεινόμενη ταξινόμηση. ***Ενδιαφέρον στοιχείο είναι ο περιορισμός της ζώνης των καταγραφών που θεωρούνται διφορούμενες σύμφωνα με τη νέα προσέγγιση, σε σχέση με το εύρος της αντίστοιχης ζώνης κατά τον Baker.***

Τα αποτελέσματα σύγκρισης της ταξινόμησης κατά Καρδούτσου (2017) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα κατά Baker (2007), δείχνουν ότι για την πλειοψηφία των καταγραφών είναι σε συμφωνία οι δύο μέθοδοι ταξινόμησης. Σε περιπτώσεις όπου διαφέρουν οι δύο μέθοδοι, τότε η προτεινόμενη στο κεφάλαιο αυτό μέθοδος οδηγεί σε πολύ πιο λογικά αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης κατά Καρδούτσου (2017), ελέγχθηκαν επίσης και ως προς την ανελαστική απόκριση των μονοβάθμιων κατασκευών. Σύμφωνα με τους Iervolino και Cornell (2008), σχετικά με την ανελαστική απόκριση, οι εδαφικές κινήσεις που περιέχουν ισχυρό παλμό μπορεί να επηρεάσουν κατασκευές, με κυρίαρχη περίοδο κοντά στο ήμισυ της περιόδου παλμού, έχοντας απαίτηση πλαστιμότητας μ μεγαλύτερη από την τιμή του αντίστοιχου μειωτικού συντελεστή R, ο οποίος δεν θα αναμενόταν σύμφωνα με τον κανόνα ίσων μετατοπίσεων (μ=R).



Σχήμα 5-2:Ο λόγος της ανελαστικής προς την ελαστική μετατόπιση din/del ως προς τον προτεινόμενο δείκτη Καρδούτσου (2017)

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$din / del = \mu / R \qquad (5.6)$$

$$din / del = 1.0 \text{ (κανόνας ίσων μετατοπίσεων)} \qquad (5.7)$$

Στο παραπάνω σχήμα είναι εμφανές ότι οι καταγραφές με τιμές PI > 0.65, που θεωρήθηκαν παλμικές σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο, παράγουν ανελαστικές μετατοπίσεις, που είναι κατά μέσο όρο μεγαλύτερες από 1.5 φορά τις αντίστοιχες ελαστικές και η τιμή αυτή αυξάνεται με την αύξηση του παλμικού δείκτη. Ως εκ τούτου, οι παλμικές καταγραφές παράγουν, γενικά, μεγαλύτερες απαιτήσεις πλαστιμότητας και ο προτεινόμενος δείκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα μέτρο αυτής της απαίτησης. Αντίθετα, οι καταγραφές με δείκτη PI < 0.55, που θεωρήθηκαν ως μη-παλμικές, παρουσιάζουν λόγο ανελαστικών προς ελαστικές μετατοπίσεις, χαμηλότερο από 1.5 με μια μέση τιμή κοντά στη μονάδα, και έτσι ο κανόνας ίσων μετατοπίσεων ισχύει για τις καταγραφές εκείνες εν γένει.

Υπάρχουν λίγες περιπτώσεις στις οποίες η προτεινόμενη μέθοδος δεν συμφωνεί με τα αποτελέσματα του Baker (2007). Σε αυτές τις περιπτώσεις, η νέα μέθοδος δείχνει ότι οι καταγραφές που θεωρούνται παλμικές, σύμφωνα με τον Baker (2007) θεωρούνται ως μη παλμικές. Με ανάλυση των καταγραφών αυτών, από τη γραφική τους παράσταση γίνεται φανερό ότι οι καταγραφές περιέχουν ένα σημαντικό, κυρίαρχο παλμό και επομένως, σωστά θεωρήθηκαν σύμφωνα με τη νέα μέθοδο ως παλμικές.

Συμπεραίνουμε επομένως, ότι ο δείκτης PI Καρδούτσου (2017) σχετίζεται με την ανελαστική απόκριση των κατασκευών. Αναλύσεις σε μονοβάθμιους ταλαντωτές, οι οποίοι έχουν περίοδο ίση με το μισό της περιόδου του παλμού, δείχνουν ότι οι καταγραφές που χαρακτηρίζονται ως παλμικές, εν γένει οδηγούν σε ανελαστικές μετατοπίσεις μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες ελαστικές μετατοπίσεις. Η τιμή των

ανελαστικών μετατοπίσεων αυξάνεται με την αύξηση του δείκτη PI. Αντίθετα, ο κανόνας των ίσων μετατοπίσεων ισχύει γενικά για καταγραφές που χαρακτηρίζονται ως μη-παλμικές.

Κλείνοντας, στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι προφανώς, η τελική τιμή για τον δείκτη PI εξαρτάται από το κύμα που έχουμε υποθέσει για την μαθηματική αναπαράσταση του κυρίαρχου παλμού της εδαφικής κίνησης. Ωστόσο, η εξάρτηση αυτή δεν είναι σημαντική, ώστε να αλλάξει την κατηγοριοποίηση της καταγραφής, με εξαίρεση τις περιπτώσεις όπου έχουμε καταγραφές με δείκτη κοντά στις οριακές τιμές που ορίζονται από την μέθοδο. Από διάφορες εφαρμογές και συγκρίσεις ανάμεσα στους δείκτες που προκύπτουν, δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο κύμα που να οδηγεί σε μεγαλύτερο παλμικό δείκτη PI, και έτσι να οδηγεί σε καλύτερη συσχέτιση με την αρχική καταγραφή. Στις περισσότερες περιπτώσεις η τιμή του PI που προκύπτει από τη χρήση του κύματος M&P είναι μεγαλύτερη από εκείνη που προκύπτει με χρήση του κυματιδίου Daubechies 4^{ης} τάξης. Έτσι, επειδή το κύμα των M&P παρουσιάζει καλύτερη συσχέτιση με την αρχική καταγραφή στις περισσότερες περιπτώσεις, για το λόγο αυτό μπορούμε να πούμε ότι γενικά το κύμα M&P αποτελεί μια καλύτερη προσέγγιση του παλμού κατευθυντικότητας από την αντίστοιχη του κυματιδίου Daubechies.

6 Σχέσεις R-μ

6.1 Γενικά στοιχεία

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια απλοποιημένη πιθανοτική προσέγγιση για εκτίμηση των μεγίστων απαιτήσεων ανελαστικής μετατόπισης για συστήματα με έναν βαθμό ελευθερίας. Η προτεινόμενη προσέγγιση επιτρέπει τον υπολογισμό των καμπυλών επικινδυνότητας που αντιστοιχούν στις μέγιστες απαιτήσεις ανελαστικής μετατόπισης, χρησιμοποιώντας διαθέσιμες πληροφορίες για την σεισμική επικινδυνότητα μιας συγκεκριμένης τοποθεσία. Η προσέγγιση που προτείνεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ομοιόμορφου φάσματος επικινδυνότητας για τις μέγιστες απαιτήσεις ανελαστικής μετατόπισης που αντιστοιχούν σε διαφορετικές περιόδους επαναφοράς.

Η προτεινόμενη απλοποιημένη προσέγγιση χρησιμοποιεί σταθερούς λόγους αντοχής ανελαστικών μετατοπίσεων C_R, γεγονός που επιτρέπει την εκτίμηση της μέγιστης απαίτησης ανελαστικής μετατόπισης Δ_i, από τη μέγιστη απαίτηση ελαστικής μετατόπισης S_d. Από αυτή τη μελέτη, προέκυψε ότι η εμπειρική πιθανότητα κατανομής του C_R μπορεί να προσεγγιστεί επαρκώς με χρήση μιας παραμετρικής λογαριμθο-κανονικής κατανομής για τον υπολογισμό της πιθανότητας του C_R να υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο επίπεδο, δεδομένης της θεμελιώδους περιόδου και της σχετικής πλευρικής αντοχής του μονοβάθμιου συστήματος. Προέκυψε ότι μέσω χρήσης απλών εξισώσεων οι καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας και το ομοιόμορφο φάσμα επικινδυνότητας για τις μέγιστες ανελαστικές μετατοπίσεις μπορούν να υπολογιστούν εύκολα με χρήση των ήδη διαθέσιμων ελαστικών καμπυλών σεισμικής επικινδυνότητας.

Είναι γνωστό ότι μια από τις μεγαλύτερες πηγές αβεβαιότητας στην εκτίμηση των αποτελεσμάτων των σεισμών σε ανθρώπινες κατασκευές, οφείλεται στην εκτίμηση των χαρακτηριστικών των μελλοντικών σεισμικών εδαφικών κινήσεων που μπορούν να συμβούν σε μια δεδομένη τοποθεσία. Μια πιθανοτική ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας (probabilistic seismic hazard analysis - PSHA) αναπαριστά μια λογική και ποσοτικοποιημένη διαδικασία με στόχο την εκτίμηση της επικινδυνότητας σεισμικών κινήσεων σε μια τοποθεσία. Με χρήση της γεωμετρίας και της θέσης όλων των πιθανών σεισμικών πηγών, της πιθανότητας κατανομής των σεισμικών μεγεθών σε κάθε πηγή και των σχέσεων εξασθένισης, η πιθανοτική ανάλυση της σεισμικής επικινδυνότητας επιτρέπει τις εκτιμήσεις της μέσης ετήσιας συχνότητας (Mean Annual Frequency – MAF) για υπέρβαση μιας συγκεκριμένης παραμέτρου μέγιστης κίνησης εδάφους (για παράδειγμα μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης) ή ελαστικής φασματικής απόκρισης (δηλαδή της ψευδο-επιτάχυνσης Sa) μέσω ολοκλήρωσης όλων των πιθανών πηγών, μεγεθών, σεισμών και αποστάσεων.

Ωστόσο, η ανάλυση αυτή παρέχει πιθανοτικές εκτιμήσεις μόνο για απαιτήσεις σε γραμμικά ελαστικά συστήματα, ενώ οι περισσότερες κατασκευές πιθανό να υποστούν σημαντικές ανελαστικές παραμορφώσεις όταν συμβεί κάποιος ισχυρός ή μέτριος σεισμός. Επομένως, είναι ύψιστης σημασίας η ανάπτυξη λογικών μεθόδων για την εκτίμηση των απαιτήσεων πλευρικών μετατοπίσεων σε ανελαστικά συστήματα.

Παρόλο που οι περισσότερες κατασκευές δεν συμπεριφέρονται ως μονοβάθμια συστήματα (SDOF), πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι τα ανελαστικά μονοβάθμια συστήματα, ίσως, παρέχουν τη βάση για την εκτίμηση των απαιτήσεων στις

μετατοπίσεις των κατασκευών. Βασιζόμενες σε αυτή την παρατήρηση, οι μη-γραμμικές στατικές διαδικασίες έχουν εισαχθεί σε πρόσφατες σεισμικές προτάσεις για το σχεδιασμό νέων κατασκευών, αλλά και για την αξιολόγηση και αποκατάσταση υφιστάμενων κατασκευών, στις οποίες οι μετατοπίσεις οροφής, εκτιμώνται από τις μέγιστες μετατοπίσεις ανελαστικών συστημάτων που έχουν ένα βαθμό ελευθερίας. Στο σχεδιασμό αυτό, η εκτίμηση των μέγιστων ανελαστικών μετατοπίσεων του μονοβαθμίου, πραγματοποιείται διαμέσου απλοποιημένων διαδικασιών που είναι είτε μέσω εφαρμογής των συντελεστών τροποποίησης των μέγιστων απαιτήσεων σε ελαστικές μετατοπίσεις για μονοβάθμιο, είτε λαμβάνοντας υπόψη ισοδύναμα μονοβάθμια συστήματα με επιμήκυνση της θεμελιώδους περιόδου και με αυξημένο τον λόγο απόσβεσης.

Η μεθοδολογία αυτή αποσκοπεί στην ανάπτυξη μιας απλοποιημένης προσέγγισης για την εκτίμηση σε συγκεκριμένη περιοχή εξέτασης, την μέση ετήσια πιθανότητα υπέρβασης των καμπυλών επικινδυνότητας και των απαιτήσεων για τις μέγιστες ανελαστικές μετατοπίσεις των μονοβάθμιων συστημάτων με χρήση άμεσα διαθέσιμων πληροφοριών από τις ελαστικές καμπύλες επικινδυνότητας. Συγκεκριμένα, η μεθοδολογία αυτή παρουσιάζει μια διαδικασία απόκτησης σεισμικών καμπυλών επικινδυνότητας για την μέγιστη ανελαστική μετατόπιση και για ομοιόμορφο φάσμα κινδύνου, ώστε να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού νέων δομών ή κατά τη διάρκεια σεισμικής αποτίμησης και στη φάση της αποκατάστασης υφιστάμενων κατασκευών. Στατιστικά αποτελέσματα των λόγων ανελαστικών μετατοπίσεων που έχουν υπολογιστεί από την δυναμική απόκριση των μονοβάθμιων συστημάτων για μια ευρεία περιοχή περιόδων και πλευρικής αντοχής όταν υπόκεινται σε σχετικά μεγάλες σεισμικές κινήσεις, ελήφθησαν υπόψη κατά την διαμόρφωση της μεθοδολογίας αυτής. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται παίρνοντας πιθανοτικές εκτιμήσεις των μέγιστων πλευρικών απαιτήσεων μετατόπισης των ανελαστικών μονοβάθμιων συστημάτων έχοντας ελαστοπλαστική υστερική συμπεριφορά όταν υπόκεινται σε σεισμικές κινήσεις που έχουν καταγραφεί σε βραχώδες έδαφος ή σε συνθήκες σταθερού εδάφους.

6.2 Παράθεση μαθηματικών σχέσεων

Ως $\lambda_{(\delta i)}$ συμβολίζεται ο μέσος ετήσιος βαθμός, κατά τον οποίο η μέγιστη απαίτηση ανελαστικών μετατοπίσεων Δ_i υπερβαίνει μια δεδομένη πλευρική μετατόπιση δ_i και υπολογίζεται με χρήση πιθανοτήτων, χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$\lambda\left(\delta_i\right) \simeq \int_0^{\infty} P\left[\Delta_i > \delta_i \mid S_d = s_d; T, C_y\right] d\lambda\left(s_d\right) \qquad (6.1)$$

όπου $\lambda_{(sd)}$ είναι η μέση ετήσια πιθανότητα υπέρβασης της ελαστικής φασματικής μετατόπισης S_d, για μια συγκεκριμένη εξεταζόμενη περιοχή και εξισώνεται με την s_d.

Η πιθανότητα το Δ_i να υπερβαίνει το δ_i, δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$P\left[\Delta_i > \delta_i \mid S_d = s_d; T, C_y\right] \qquad (6.2)$$

και εξαρτάται από την θεμελιώδη περίοδο του συστήματος T, τον δείκτη C_y που είναι ο συντελεστής αντοχής διαρροής, ορίζεται ως η πλευρική αντοχή διαρροής του

συστήματος, την δύναμη F_y, η οποία είναι κανονικοποιημένη ως προς το βάρος της και την μέγιστη απαίτηση φασματικής ελαστικής μετατόπισης, S_d.

Ο μέσος ετήσιος βαθμός υπέρβασης (ή μέση συχνότητα) υπολογίζεται για μια ευρεία περιοχή φασματικών μετατοπίσεων (ή ψευδο-επιταχύνσεων), γνωστή ως καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας και η οποία είναι το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από την πιθανοτική ανάλυση PSHA.

Για να γίνει αριθμητική ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης, ξαναγράφεται ως:

$$\lambda(\delta_i) \simeq \int_0^\infty P\left[\Delta_i > \delta_i \mid S_d = s_d; T, C_y\right] \left| \frac{d\lambda(s_d)}{dS_d} \right| ds_d \qquad (6.3)$$

όπου ο όρος μέσα στο απόλυτο είναι η παράγωγος της ελαστικής καμπύλης σεισμικής επικινδυνότητας προς την φασματική μετατόπιση και πολλαπλασιασμένη με την μετατόπιση s_d.

Οι καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας για βραχώδη εδάφη με μέση ταχύτητα διατμητικών κυμάτων μεταξύ 760 και 1500 m/s (δηλαδή για τοποθεσίες που μπορούν να καταταχθούν στην κατηγορία B), είναι διαθέσιμες για κάθε γεωγραφική περιοχή των Ηνωμένων Πολιτειών από την γεωλογική έρευνα που έγινε εκεί.

Για άλλες περιοχές, μπορεί να εφαρμοστεί η ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας για συγκεκριμένη τοποθεσία ή εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάποιοι συντελεστές τροποποίησης εξαρτώμενοι από τη συχνότητα για να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα της τοποθεσίας.

Η επιπρόσθετη πληροφορία που απαιτείται για την εκτίμησης της μέσης ετήσιας συχνότητας MAF για ανελαστικές μετατοπίσεις υλοποιείται μέσω της τελευταίας εξίσωσης, που καταδεικνύει ότι η μέγιστη ανελαστική μετατόπιση μπορεί να είναι μεγαλύτερη από το δ_i για δεδομένες ιδιότητες του συστήματος και της συνιστώσας της ελαστικής μετατόπισης (ή ψευδο-επιτάχυνσης).

$$P\left[\Delta_i > \delta_i \mid S_d = s_d; T, C_y\right] \qquad (6.4)$$

Οι Ruiz- Garcia και Miranda (2007) πρότειναν την κάτωθι σχέση για την εκτίμηση της μέγιστης ανελαστικής μετατόπισης ως:

$$\mathbf{\Delta_i = C_R * S_d} \qquad (6.5)$$

όπου C_R είναι η σταθερή αναλογία αντοχής του λόγου ανελαστικής μετατόπισης και δίνεται από τη σχέση:

$$C_R = \frac{\Delta_i}{S_d} \qquad (6.6)$$

Στην εξίσωση αυτή οι απαιτήσεις μέγιστης ανελαστικής μετατόπισης για μονοβάθμια συστήματα με σταθερό συντελεστή αντοχής διαρροής C_y και εδαφικές

κινήσεις, είναι κλιμακούμενες ως προς την ίδια απαίτηση ελαστικής μετατόπισης ή εναλλακτικά, τα μονοβάθμια συστήματα έχουν σταθερή αντοχή διαρροής σχετική με την αντοχή που απαιτείται για να διατηρηθεί το σύστημα ελαστικό (δηλαδή έχουν σταθερή σχετική αντοχή) χρησιμοποιώντας μη κλιμακωμένες σεισμικές καταγραφές.Επιπλέον, η μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει του συντελεστή C_R οπότε οι άνωθι σχέσεις τροποποιούνται ως εξής:

$$P\left[C_R > c_R \mid S_d = s_d; T, C_y\right] \tag{6.7}$$

όπου C_R ορίζεται ως :

$$c_R = \delta_i / s_d \tag{6.8}$$

Επομένως, η αρχική σχέση γίνεται:

$$\lambda\left(\delta_i\right) \simeq \int_0^\infty P\left[C_R > c_R \mid S_d = s_d; T, C_y\right] \left| \frac{d\lambda\left(s_d\right)}{dS_d} \right| ds_d \tag{6.9}$$

Έτσι, η εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί η μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης των μέγιστων ανελαστικών μετατοπίσεων για τα μονοβάθμια συστήματα με ένα σταθερό συντελεστή αντοχής διαρροής C_y ή με μια σταθερή μετατόπιση διαρροής Δ_y.

*Και στις δύο προσεγγίσεις, η σχετική πλευρική αντοχή μετριέται μέσω **του λόγου πλευρικής αντοχής R,** που ορίζεται ως ακολούθως:*

$$R = \frac{S_a}{C_y g} \tag{6.10}$$

όπου Sa είναι η φασματική ψευδο-επιτάχυνση και g είναι η επιτάχυνση λόγω βαρύτητας.

Στις παραπάνω σχέσεις υποθέτουμε ότι η τιμή του Δ_i μπορεί να προκύψει ως το γινόμενο του C_R επί S_d, το οποίο υπονοεί ότι τα C_R και S_d είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές και ότι δεν συσχετίζονται.

Πρέπει να σημειωθεί ότι παρόλο που εδώ ως R αναφέρεται ο λόγος πλευρικής αντοχής, στην πραγματικότητα είναι απλώς ένα μέτρο της έντασης της εδαφικής κίνησης σε σχέση με την αντοχή έως τη διαρροή του συστήματος. Αυτή η σχετική ένταση της εδαφικής κίνησης μπορεί να εκφραστεί, εναλλακτικά ως ο λόγος της ελαστικής φασματικής μετατόπισης ως προς την μετατόπιση διαρροής του συστήματος Δ_y, ως ακολούθως:

$$R = \frac{S_d}{\Delta y} \tag{6.11}$$

Πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι το Δ_i εξαρτάται και από τις δομικές ιδιότητες του συστήματος και από το επίπεδο έντασης της εδαφικής κίνησης που έχει μετρηθεί μέσω του S_d, αλλά αυτό δεν επηρεάζεται σημαντικά από άλλες παραμέτρους της εδαφικής κίνησης, όπως είναι το μέγεθος του σεισμού ή η απόσταση από την πηγή του σεισμού. Αυτό σημαίνει ότι στην πιθανότητα Δ_i να υπερβαίνει το δ_i, έγινε υπόθεση ότι αυτή είναι υπό συνθήκες ανεξάρτητη από το μέγεθος του σεισμού και της απόστασης από την πηγή, τα οποία είναι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την φασματική μετατόπιση. Η υπόθεση αυτή μας επιτρέπει να αποσυνθέτουμε την πιθανοτική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας για μια δεδομένη τοποθεσία για ελαστικά συστήματα (δηλαδή το δεξί μέρος στις εξισώσεις πιθανοτήτων) από την πιθανότητα υπέρβασης του Δ_i, που εξαρτάται από την ελαστική μετατόπιση.

Στη συνέχεια, τα δύο μέλη των εξισώσεων συνδυάζονται χρησιμοποιώντας το θεώρημα ολικής πιθανότητας. Ως εκ τούτου, η τελευταία εξίσωση για το $\lambda_{(\delta i)}$ μπορεί να θεωρηθεί ως μια επέκταση του πιθανοτικής ανάλυσης PSHA. Πρέπει να αναφερθεί ότι αυτή η απλοποιητική υπόθεση έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στο παρελθόν. Επιπλέον, πρόσφατες στατιστικές μελέτες παρέχουν τα θεμέλια για ην παραπάνω υπόθεση.

*Για παράδειγμα, **οι Ruiz-Garcıa and Miranda (2007)** μελέτησαν την επίδραση του μεγέθους του σεισμού και της απόστασης, στον συντελεστή C_R, χρησιμοποιώντας μια βάση δεδομένων της εδαφικής κίνησης που περιέχει 216 καταγραφές από 12 ιστορικούς σεισμούς στην Καλιφόρνια με μέγεθος σεισμικών κυμάτων από 5.8 έως 7.7 και απόσταση από την οριζόντια προβολή του ρήγματος (αυτό που λέγεται απόσταση του Joyner and Boore) από 1.0 έως 117.6 Km.*

Ανάμεσα στα συμπεράσματά τους, παρατήρησαν ότι η απόσταση από το ρήγμα έχει μια αμελητέα επίδραση στο C_R για συστήματα με περιόδους σεισμού μεγαλύτερες από 1 sec, όπως επίσης και το μέγεθος του σεισμού. Όμως, σε εκείνα τα συστήματα με περιόδους μικρότερες από 1 sec, παρατηρήθηκαν μερικές επιδράσεις του σεισμικού μεγέθους. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι αυτές οι επιδράσεις αυξάνονται καθώς αυξάνεται ο λόγος πλευρικής αντοχής (δηλαδή καθώς το σύστημα γίνεται ασθενέστερο σε σχέση με την ένταση της εδαφικής κίνησης).

Πιο πρόσφατα, οι Chopra and Chintanapakdee, καθώς και οι Medina and Krawinkler κατέληξαν επίσης στο ότι κανένα μέγεθος σεισμού και καμία απόσταση από την πηγή δεν έχει σημαντική επίδραση για ενδιάμεσες τιμές του C_R, με εξαίρεση τα συστήματα με περιόδους μικρότερες από 0.3sec. Εκείνοι εφάρμοσαν τις ίδιες βάσεις δεδομένων εδαφικών κινήσεων στις στατιστικές μελέτες τους, οι οποίες περιέχουν καταγραφές από γεγονότα που έχουν μέγεθος σεισμικής ροπής ίσο με 5.8 έως 7.0 και απόσταση από την πηγή μεταξύ 13 και 60 Km.

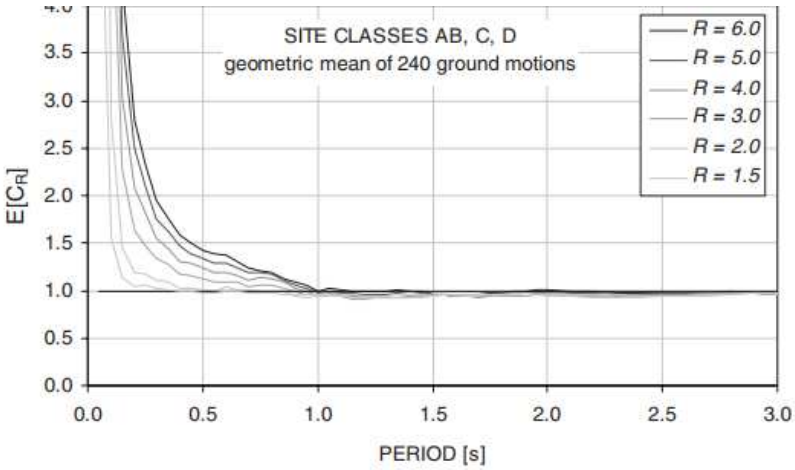
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για μικρούς μέσους ετήσιους βαθμούς υπέρβασης (μικρότερους από 0.01) η ετήσια πιθανότητα υπέρβασης του Δ_i είναι αριθμητικά πολύ κοντά στην μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης του Δ_i.
Ως εκ τούτου η αρχική εξίσωση

$$\lambda(\delta_i) \simeq \int_0^\infty P\left[\Delta_i > \delta_i \mid S_d = s_d; T, C_y\right] \left| \frac{d\lambda(s_d)}{dS_d} \right| ds_d \qquad (6.12)$$

παρέχει πολύ καλή προσέγγιση της ετήσιας πιθανότητας υπέρβασης της μέγιστης απαίτησης ανελαστικής μετατόπισης.

6.3 Στατιστικές παράμετροι

6.3.1 Κεντρική τάση του C_R



Geometric mean of inelastic displacement ratios for 240 ground motions recorded in NEHRP site classes AB, C and D.

Σχήμα 6-1:Γεωμετρικός μέσος του CR για διάφορες κατηγορίες εδαφών.

Ποικίλες τιμές για την κεντρική τάση μπορούν να προκύψουν από στατιστικές μελέτες του C_R , όπως είναι ο μέσος όρος δείγματος, ο υπολογισμένος μέσος και ο γεωμετρικός μέσος (δηλαδή ο μέσος του φυσικού λογαρίθμου των δεδομένων). Για παράδειγμα, το Σχήμα 6.1 δείχνει το γεωμετρικό μέσο του C_R που αντιστοιχεί σε 240 χρονοϊστορίες σεισμικής επιτάχυνσης. Από το σχήμα αυτό μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι συντελεστές C_R είναι μεγαλύτεροι από τη μονάδα (δηλαδή οι μέγιστες ανελαστικές μετατοπίσεις είναι μεγαλύτερες από τις μέγιστες ελαστικές μετατοπίσεις) σε μικρές περιόδους φασματικής περιοχής και σχετικά κοντά στη μονάδα (δηλαδή οι μέγιστες ανελαστικές μετατοπίσεις είναι προσεγγιστικά ίσες με τη μέγιστη ελαστική μετατόπιση) για μεσαίες και για μεγάλες περιόδους των συστημάτων. Για περιόδους μικρότερες του 1.0 sec, οι λόγοι των ανελαστικών μετατοπίσεων είναι ισχυρά εξαρτώμενοι από την περίοδο και από το λόγο πλευρικής αντοχής.

Γενικά, σε αυτή τη φασματική περιοχή , οι μέγιστες ανελαστικές μετατοπίσεις γίνονται πολύ μεγαλύτερες από τις μέγιστες ελαστικές μετατοπίσεις, καθώς αυξάνεται ο λόγος της πλευρικής αντοχής (δηλαδή η πλευρική αντοχή μειώνεται σε σχέση με την πλευρική αντοχή που απαιτείται για να διατηρηθεί το σύστημα ελαστικό) και καθώς η περίοδος του σεισμού μειώνεται. Επιπλέον, οι ανελαστικές μετατοπίσεις τείνουν στο άπειρο καθώς η περίοδος του συστήματος τείνει στο μηδέν, το οποίο σημαίνει ότι οι υψιστάμενες κατασκευές με πολύ μικρές περιόδους μπορεί να υποστούν μεγάλες απαιτήσεις ανελαστικών μετατοπίσεων σχετικά με τα ελαστικά τους μέρη, αν οι κατασκευές σε αυτή την φασματική περιοχή έχουν σχεδιαστεί για να παραμένουν ελαστικές ή σχεδόν ελαστικές. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτή την περιοχή περιόδων η χρήση του κανόνα ίσων μετατοπίσεων (δηλαδή η απαίτηση μέγιστης ανελαστικής μετατόπισης ισούται με την απαίτηση μέγιστης ελαστικής μετατόπισης) μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές υποεκτιμήσεις της μέγιστης απαίτησης ανελαστικής μετατόπισης.

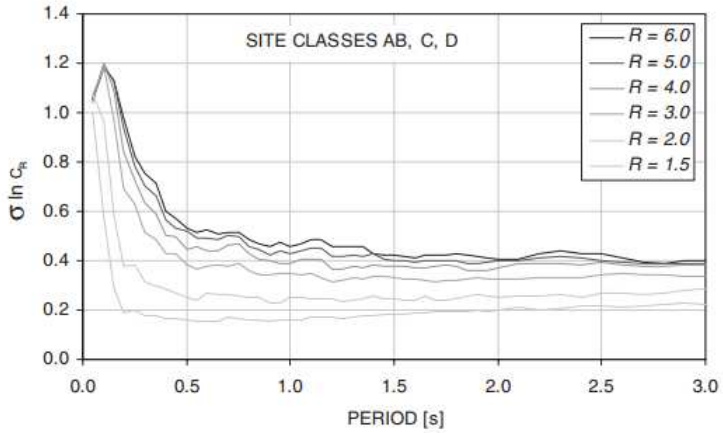
Επίσης, η οριακή περίοδος διαιρεί τις φασματικές περιοχές, σε εκείνες όπου ο κανόνας ίσων μετατοπίσεων είναι εφαρμόσιμος και σε εκείνες όπου ο κανόνας δεν

είναι μονό μη εφαρμόσιμος αλλά και μη συντηρητικός (δηλαδή οδηγεί σε υποεκτίμηση της μέγιστης απαίτησης ανελαστικής μετατόπισης) και εξαρτάται κυρίως από το λόγο της πλευρικής αντοχής. Γενικά, αυτή η οριακή περίοδος αυξάνεται , καθώς ο λόγος πλευρικής αντοχής αυξάνεται.

6.3.2 Μεταβλητότητα του CR

Μια πολύ σημαντική παράμετρος για την κεντρική τάση του C_R , είναι η διασπορά του, η οποία είναι γνωστή ως μεταβλητότητα από καταγραφή σε καταγραφή. Ένας αποτελεσματικός τρόπος ποσοτικοποίησης της διασποράς, είναι μέσω της τυπικής απόκλισης του φυσικού λογαρίθμου του C_R, (σ_{lnCR}). Η παράμετρος αυτή είναι εν μέρει αποτελεσματική στο χαρακτηρισμό της μεταβλητότητας μιας τυχαίας μεταβλητής εάν αυτή είναι λογαριθμο-κανονικά κατανεμημένη.

Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται το σ_{lnCR} σε σχέση με όλες τις εδαφικές κινήσεις που έχουν καταγραφεί σε κλάσεις A,B,C,D. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η διασπορά αυξάνεται, καθώς αυξάνεται το επίπεδο του λόγου πλευρικής αντοχής R. Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, η διασπορά είναι σχετικά υψηλή για συστήματα με μικρή περίοδο δόνησης (T < 0.5 sec), ανεξάρτητα από το λόγο πλευρικής αντοχής. Με εξαίρεση πολύ μικρές περιόδους (μικρότερες από 0.15 sec) για ένα δεδομένο επίπεδο του λόγου πλευρικής αντοχής, το σ_{lnCR} τείνει να μειωθεί με την αύξηση της περιόδου έως περιόδους περίπου 1.5 sec.



Logarithmic standard deviation of inelastic displacement ratios for 240 ground motions recorded in NEHRP site classes AB, C and D.

Σχήμα 6-2:Η λογαριθμική κατανομή της τυπικής απόκλισης της ανελαστικής μετατόπισης για διάφορες κατηγορίες εδαφών.

Πέρα από τα 1.5 sec, με εξαίρεση των συστημάτων με πλευρική αντοχή R=1.5, η διασπορά γίνεται προσεγγιστικά εξαρτώμενη από την περίοδο μέχρι την μέγιστη περίοδο που λαμβάνεται υπόψη. Από τα παραπάνω, είναι εμφανές ότι η διασπορά του C_R είναι πολύ σημαντική και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν αξιολογούνται οι απαιτήσεις μέγιστης ανελαστικής μετατόπισης για την αξιολόγηση με βάση την απόδοση υφιστάμενων κατασκευών ή για τον σχεδιασμό με βάση την απόδοση για νέες κατασκευές. Πρέπει να σημειωθεί ότι για πολύ μεγάλες περιόδους, η μέγιστη σχετική μετατόπιση του συστήματος μπορεί να τείνει προς την μέγιστη εδαφική μετατόπιση, ανεξάρτητα από το λόγο της σχετικής πλευρικής αντοχής του συστήματος και ως εκ

τούτου αναμένεται μια μείωση στη διασπορά του C_R των συστημάτων με πολύ μεγάλες περιόδους. Ωστόσο, στις περισσότερες κατασκευές, οι περίοδοι είναι πολύ χαμηλότερες από τις περιόδους όπου συμβαίνει αυτή η μείωση στη διασπορά.

6.3.3 Απλοποιημένες εξισώσεις

Στην υποενότητα αυτή θα παρατεθούν απλοποιημένες, μη γραμμικές εξισώσεις για την εκτίμηση της κεντρικής τάσης και της διασποράς των λόγων ανελαστικών μετατοπίσεων ως μια συνάρτηση της περιόδου της εδαφικής κίνησης T και του λόγου πλευρικής αντοχής R. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι εξισώσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εφαρμοστούν για μέτρηση της κεντρικής τάσης ή της διασποράς διαμέσου ανάλυσης μη γραμμικής παλινδρόμησης.

Για την εκτίμηση της κεντρικής τάσης του C_R δίνεται η ακόλουθη εξίσωση:

$$\tilde{C}_R = \begin{cases} 1, R \le 1 \\ 1 + \left[\dfrac{1}{\theta_1 T^{\theta_2}} \right] * (R-1), R > 1 \end{cases} \qquad (6.13)$$

όπου θ_1, θ_2 είναι παράμετροι των οποίων εκτιμήσεις προκύπτουν από μη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης.

Επιπλέον, η ακόλουθη απλοποιημένη μη γραμμική εξίσωση προτείνεται για να εκτιμήσει τη διασπορά του C_R:

$$\tilde{\sigma}_{C_R} = \begin{cases} 0, R \le 1 \\ \left[\dfrac{1}{\beta_1} + \dfrac{1}{\beta_2 (T + 0.1)} \right] * a, R > 1 \end{cases} \qquad (6.14)$$

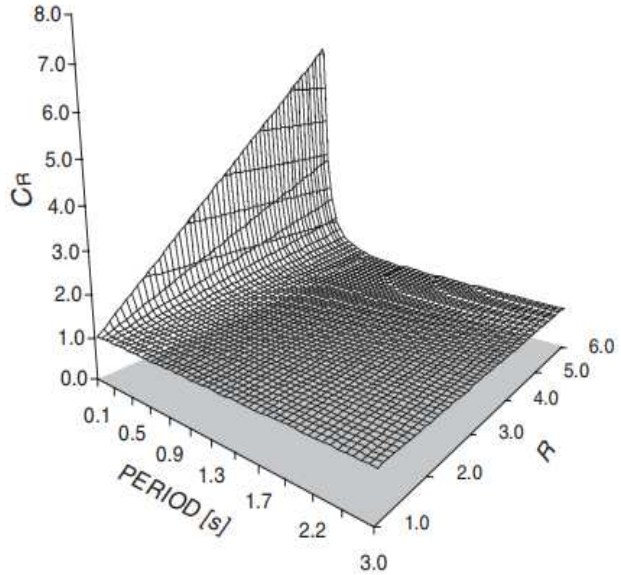
$$a = \beta_3 \left[1 - \exp(-\beta_4 \left(R - 1 \right)) \right] \qquad (6.15)$$

όπου β_1, β_2, β_3, β_4 είναι οι παράμετροι που μπορούν να προκύψουν όμοια με ανάλυση μη γραμμικής παλινδρόμησης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μορφή των εξισώσεων, έχει την τάση που παρατηρείται για το σ_{lnCR}, όπως φαίνεται κα στο σχήμα 6.2.

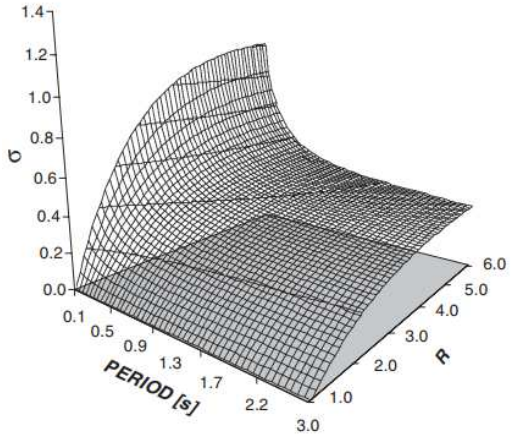
Έγινε μη γραμμική παλινδρόμηση ελάχιστων τετραγώνων, η οποία ελαχιστοποιεί τη διαφορά μεταξύ των θεωρηθέντων τιμών και της εκτιμώμενης απόκρισης με χρήση των παραπάνω εξισώσεων και έγινε χρήση της μεθόδου Levenberg-Marquardt. Έτσι, η παράμετρος που εκτιμά τα θ_1 και θ_2 και το 95% διάστημα εμπιστοσύνης, προκύπτει από τα τρία μέτρα της κεντρικής τάσης του C_R (δηλαδή μέσος δείγματος, μετρημένη μέση τιμή και γεωμετρική μέση τιμή), και παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.

Table I. Parameter estimates and 95% confidence intervals for Equation (7) corresponding to three different measures of central tendency computed from 240 ground motions.

Central tendency	$\hat{\theta}_1$	$\hat{\theta}_2$	c.i. ($\hat{\theta}_1$)	c.i. ($\hat{\theta}_2$)
Sample mean	35.79	2.12	32.40, 38.19	2.07, 2.17
Counted median	79.12	1.98	65.60, 91.68	1.89, 2.07
Geometric mean	49.03	1.87	44.73, 53.33	1.82, 1.92



Central tendency of inelastic displacement ratios for elastoplastic systems computed with Equation (7) and fitted parameters for geometric mean given in Table I.



Dispersion (logarithmic standard deviation) of inelastic displacement ratios computed with Equation

Σχήμα 6-3:Τιμές παραμέτρων θ_1 και θ_2 και το 95% διάστημα εμπιστοσύνης

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, έχουν γίνει συνολικά 3 απλοποιητικές παραδοχές στην εξίσωση. Η πρώτη είναι ότι το C_R είναι υπό συνθήκες εξαρτώμενο από το μέγεθος του σεισμού M, και την απόσταση από το ρήγμα (D).

Η δεύτερη υπόθεση απλοποίησης είναι ότι δεν υπάρχει συσχετισμός μεταξύ C_R και S_d (δηλαδή τα C_R και S_d είναι στατιστικά ανεξάρτητα) και αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές. Επιπλέον, η προτεινόμενη διαδικασία υποθέτει ότι η εμπειρική αθροιστική πιθανότητα κατανομής του C_R μπορεί επαρκώς να προσεγγισθεί μέσω μιας συνάρτησης παραμετρικής αθροιστικής κατανομής (CDF).

Έτσι, είναι αναγκαίο να διασφαλιστεί η εγκυρότητα των απλοποιητικών αυτών υποθέσεων και να προκύψουν πιθανά όρια της προτεινόμενης απλοποιημένης προσέγγισης. Για το σκοπό αυτό εξετάζονται οι απλοποιητικές παραδοχές με χρήση στατιστικών αποτελεσμάτων του C_R που υπολογίστηκε για ελαστοπλαστικά συστήματα, τα οποία υπόκεινται σε εδαφικές κινήσεις που καταγράφηκαν σε βράχο ή σε συνθήκες σταθερού εδάφους.

6.4 Επιρροή του σεισμικού μεγέθους και της απόστασης στο C_R

Για να αξιολογηθεί η επιρροή του μεγέθους του σεισμού στο C_R, η στατιστική σημασία της πρόσθεσης του μεγέθους του σεισμού, ως μια επιπλέον επεξηγηματική μεταβλητή για το C_R (δηλαδή μεταβλητή απόκρισης) προκύπτει από την απεικόνιση των παραμενουσών που υπολογίζονται από την θεμελιώδη περίοδο της κίνησης και το λόγο της πλευρικής αντοχής, ως μια βάση πρόβλεψης των μεταβλητών ως προς το μέγεθος του σεισμού και στη συνέχεια γίνεται συμβατική γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης στην επεξηγηματική μεταβλητή.

Οι παραμένουσες τιμές υπολογίζονται ως

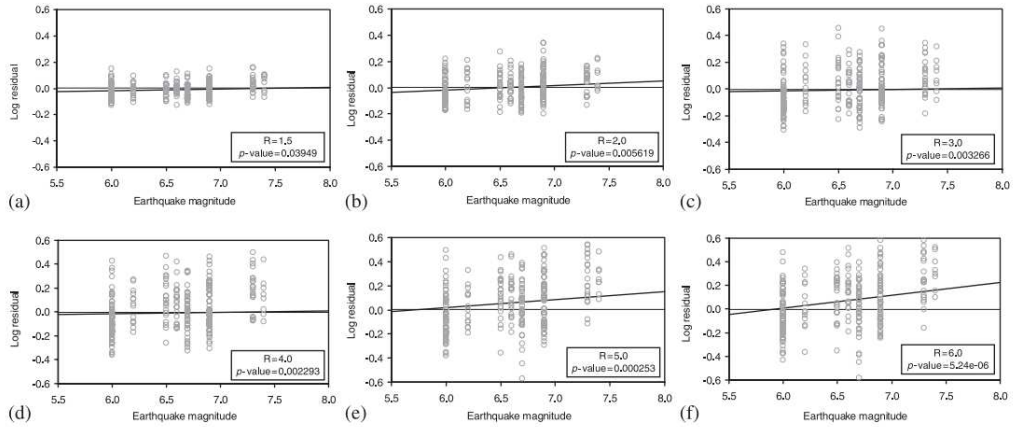
$$\hat{e}_i = C_{R,i} - \tilde{C}_R \qquad (6.16)$$

όπου $C_{R,i}$ είναι ο υπολογισμένος λόγος ανελαστικής μετατόπισης για την i εδαφική κίνηση και $\tilde{C}_R$ είναι η εκτίμηση που προέκυψε από την παραπάνω εξίσωση. Για ευκολία, οι παραμένουσες τιμές υπολογίζονται από μια λογαριθμική βάση. Έτσι, γίνεται ένας έλεγχος των υποθέσεων με χρήση της κλίσης της γραμμής τάσης και λαμβάνοντας υπόψη την απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης για μια τιμή μικρότερη ή ίση με το 5% επίπεδο σημαντικότητας. Γενικά έχει βρεθεί ότι το μέγεθος του σεισμού μπορεί να είναι στατιστικά σημαντικό για λόγους του C_R για συστήματα στις περιοχές σύντομων περιόδων ($T < 0.5sec$), αλλά οι επιδράσεις του μπορεί να αγνοηθούν για συστήματα με περιόδους μεγαλύτερους από 0.5 sec και λόγους πλευρικής αντοχής μικρότερους ή ίσους με 4. Για παράδειγμα, στο σχήμα 6.4 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του C_R με τις παραμένουσες και το μέγεθος του σεισμού, οι οποίες προέκυψαν από ένα σύστημα που έχει περίοδο T= 0.6 sec και αντιστοιχεί σε 6 επίπεδα σχετικής πλευρικής αντοχής.

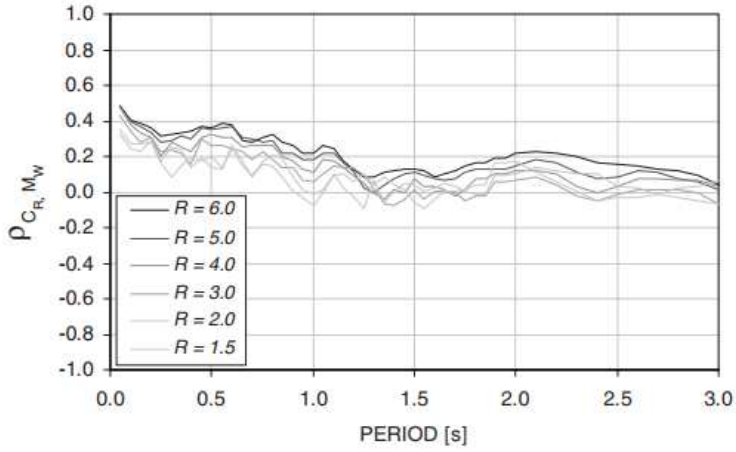
Ένας άλλος τρόπος για περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης του μεγέθους του σεισμού στους λόγους ανελαστικής μετατόπισης, είναι διαμέσου του συντελεστή συσχέτισης του Pearson, ρ.

Το ακόλουθο σχήμα, παρουσιάζει τη συσχέτιση μεταξύ του λόγους ανελαστικής μετατόπισης και το μεγέθους του σεισμού για διάφορες περιοχές περιόδων, λόγους πλευρικής αντοχής και για τις περιοχές μεγεθών σεισμού. Είναι φανερό ότι γενικά μπορεί επίσης το C_R έχει μια θετική συσχέτιση με το μέγεθος του σεισμού ανεξάρτητα από την περίοδο του σεισμού. Επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η συσχέτιση αυξάνεται με το μέγεθος του σεισμού καθώς η πλευρική αντοχή αυξάνεται (για

παράδειγμα το C_R είναι περισσότερο συσχετισμένο με το μέγεθος του σεισμού για ασθενείς κατασκευές περισσότερο από ότι για ισχυρές κατασκευές), αλλά το επίπεδο συσχετισμού είναι πολύ μικρό (μικρότερο από 0.2 sec) για περιόδους μεγαλύτερες από 0.6 sec για R=2 και για περιόδους μεγαλύτερες από 1.2 sec για R=6. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω παρατηρήσεις εφαρμόζονται μόνο στην περιοχή των μεγεθών του σεισμού ($6 \le M_w \le 7.7$), που λαμβάνονται υπόψη στην βάση δεδομένων για την εδαφική κίνηση.



Inelastic displacement ratio fitted residuals *versus* earthquake magnitude for $T = 0.6$ s and six levels of relative lateral strength: (a) $R = 1.5$; (b) $R = 2.0$; (c) $R = 3.0$; (d) $R = 4.0$; (e) $R = 5.0$; and (f) $R = 6.0$.



Correlation between C_R and earthquake magnitude (M_w) from 240 ground motions recorded in rock and firm sites.

Σχήμα 6-4:Λόγος ανελαστικών μετακινήσεων για διάφορα σεισμική μεγέθη και για διάφορες τιμές R (επάνω σχήμα) και συσχέτιση μεταξύ του CR και της σεισμικής ροπής (κάτω σχήμα).

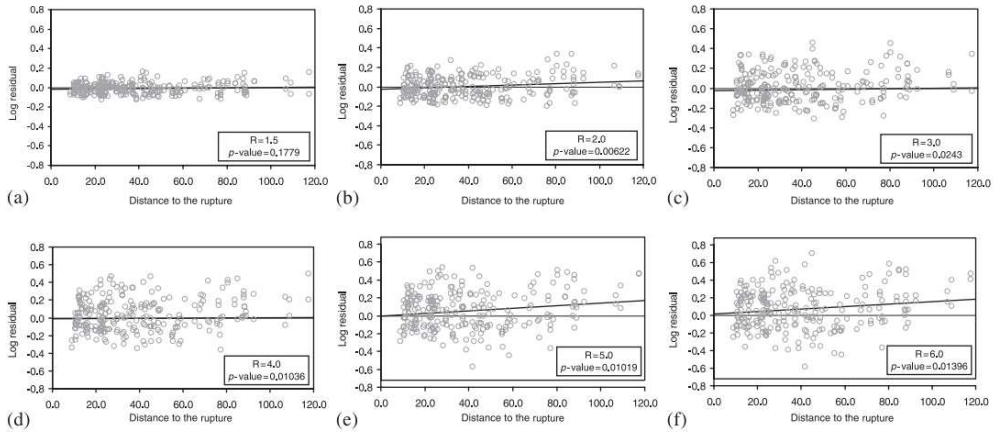
Ακολουθώντας την ίδια προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε στο παραπάνω τμήμα, έχει βρεθεί ότι η απόσταση από το ρήγμα D, έχει επίσης στατιστική σημαντικότητα στο C_R για μικρές περιόδους και ασθενή συστήματα αλλά γενικά είναι μικρότερη, και μπορεί να θεωρηθεί ως αμελητέα για μια ευρεία περιοχή συστημάτων. Για παράδειγμα, οι λογαριθμικές παραμένουσες του λόγου ανελαστικών μετατοπίσεων ως προς την απόσταση D, φαίνονται στο σχήμα 6.5. Επιπλέον, στο σχήμα παρακάτω φαίνεται ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson μεταξύ του C_R και D ως μια συνάρτηση της περιόδου της δόνησης και του λόγου της πλευρικής αντοχής.

Μπορεί να γίνει φανερό ότι γενικά ο λόγος ανελαστικής μετατόπισης είναι θετικά συσχετισμένος με το D για όλες τις περιόδους και ότι το επίπεδο της συσχέτισης αυξάνεται ελαφρώς, καθώς ο λόγος πλευρικής αντοχής αυξάνεται. Αυτό το χαρακτηριστικό θα επεξηγηθεί, καθώς το S_d μειώνεται καθώς η απόσταση από το ρήγμα αυξάνεται και για μια δεδομένη απόσταση από το ρήγμα οι μέγιστες απαιτήσεις ανελαστικών μετατοπίσεων αυξάνονται για ασθενή συστήματα από ότι εκείνη η απαίτηση για ισχυρά συστήματα. Επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί ότι ο συσχετισμός μεταξύ των C_R και D είναι γενικά μικρότερος από το συσχετισμό μεταξύ του C_R και του μεγέθους του σεισμού και ότι το επίπεδο της συσχέτισης είναι πολύ κοντά στο μηδέν για περιόδους μεγαλύτερες από 0.7sec. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω αναφερθείσες παρατηρήσεις εφαρμόζονται μόνο για αποστάσεις από το ρήγμα μεταξύ 9.0 και 117.7Km, οι οποίες μελετώνται στη βάση δεδομένων της εδαφικής κίνησης.

Στη μόρφωση της εξίσωσης:

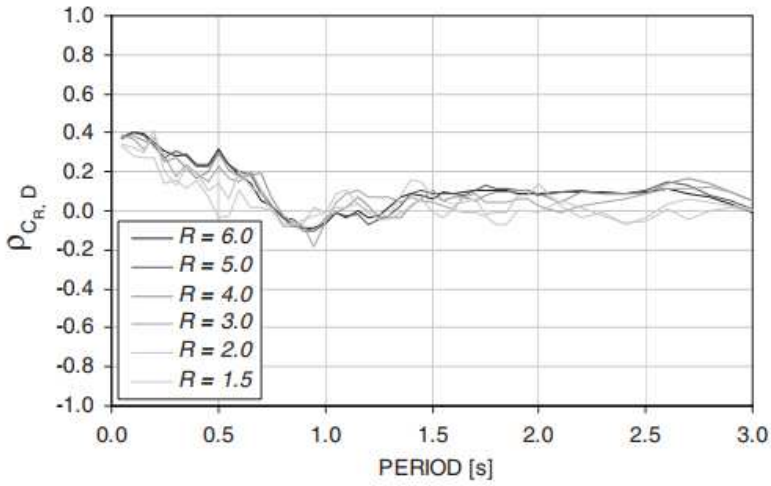
$$\lambda(\delta_i) \simeq \int_0^\infty P\left[C_R > c_R \mid S_d = s_d; T, C_y\right] \left| \frac{d\lambda(s_d)}{dS_d} \right| ds_d \qquad (6.17)$$

έχει γίνει υπόθεση ότι υπάρχει αμελητέα στατιστική συσχέτιση μεταξύ του C_R και S_d και έτσι αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, για να υπολογιστεί ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson μεταξύ του C_R και S_d, P_{cr}, s_d, να θεωρούμε ότι οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης που περιέχονται στην εδαφική κίνηση συνολικά, που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διερεύνηση, είναι αντιπροσωπευτικές του περιβάλλοντος της σεισμικής επικινδυνότητας (δηλαδή περιοχή μεγέθους σεισμού, περιοχή των αποστάσεων από το ρήγμα, και εδαφικές συνθήκες) και λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό $\lambda_{(sd)}$. Επιπλέον, το $P_{cr,sd}$ υπολογίστηκε για όλες τις 240 καταγραφές σε σταθερές τοποθεσίες που φαίνονται στο σχήμα 6.6. Από το διάγραμμα μπορεί να παρατηρηθεί ότι το $P_{cr,sd}$ δεν είναι σταθερό και επιπλέον τα C_R, S_d είναι αρνητικά συσχετισμένα (δηλαδή όταν το C_R μειώνεται, το S_d αυξάνεται) σε όλη την περιοχή περιόδων. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το επίπεδο συσχέτισης δεν επηρεάζεται σημαντικά από το επίπεδο του λόγου της πλευρικής αντοχής για περιόδους μικρότερες από 1 sec. Ωστόσο, μικρή επίδραση έχει ο λόγος πλευρικής αντοχής στο Pcr ,sd για περιόδους μεγαλύτερες από 1sec, καθώς το $P_{cr,\ sd}$ αυξάνεται με την αύξηση του λόγου της πλευρικής αντοχής. Γενικά, για περιόδους μεγαλύτερες από 0.5sec, η συσχέτιση μεταξύ του C_R και του S_d είναι μικρότερη από 25%, το οποίο σημαίνει ότι τα C_R και S_d είναι ασθενώς συσχετισμένα και αυτά ίσως μπορούν να θεωρηθούν ως ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές.



Inelastic displacement ratio fitted residuals *versus* distance to the rupture for $T = 0.6$ s and six levels of relative lateral strength: (a) $R = 1.5$; (b) $R = 2.0$; (c) $R = 3.0$; (d) $R = 4.0$; (e) $R = 5.0$; and (f) $R = 6.0$.

Σχήμα 6-5: Λόγος ανελαστικών μετακινήσεων για διάφορες αποστάσεις από την διάρρηξη και για διάφορες τιμές του R



Correlation between C_R and distance to the rupture, D (km), from 240 ground motions recorded in rock and firm sites.

Σχήμα 6-6:Συσχέτιση μεταξύ του CR και της απόστασης από το ρήγμα.

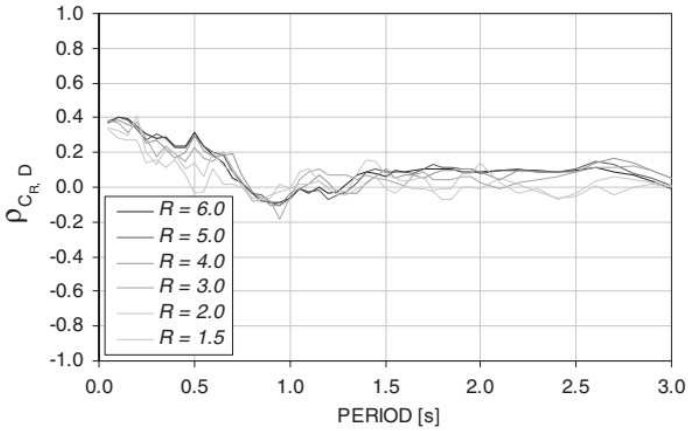
6.5 Στατιστική συσχέτιση των C_R και S_d

Στη μόρφωση της εξίσωσης:

$$\lambda(\delta_i) \simeq \int_0^{\infty} P\left[C_R > c_R \mid S_d = s_d; T, C_y\right] \left|\frac{d\lambda(s_d)}{dS_d}\right| ds_d \qquad (6.18)$$

έχει γίνει υπόθεση ότι υπάρχει αμελητέα στατιστική συσχέτιση μεταξύ του C_R kai S_d και έτσι αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές. Επιπλέον, το

$P_{cr,sd}$ υπολογίστηκε για όλες τις 240 καταγραφές σε σταθερές τοποθεσίες που φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Correlation between C_R and distance to the rupture, D (km), from 240 ground motions recorded in rock and firm sites.

Σχήμα 6-7:: Συσχέτιση μεταξύ CR και Sd

6.6 Κατανομή πιθανότητας του CR

Μια ακριβής μελέτη της αβεβαιότητας που εμπλέκεται στην εκτίμηση των ανελαστικών απαιτήσεων για κατασκευές που υπόκεινται σε σεισμικές κινήσεις εδάφους υλοποιείται διαμέσου ενός πιθανοτικού πλαισίου που απαιτεί το χαρακτηρισμό της υπό συνθήκες πιθανότητας υπέρβασης ενός επιπέδου σεισμικών απαιτήσεων που μας ενδιαφέρει. Για παράδειγμα, ο Μιράντα (2007), μελέτησε την εμπειρική πιθανότητα κατανομής των ανελαστικών απαιτήσεων αντοχής που προέκυψε από στατιστικά αποτελέσματα μη γραμμικών μονοβάθμιων συστημάτων που υπέστησαν σταθερές απαιτήσεις ολκιμότητας όταν υπόκεινται σε ένα σύνολο από 124 σεισμικές εδαφικές κινήσεις. Βρέθηκε ότι οι παραμετρικές πιθανοτικές κατανομές όπως οι λογαριθμοκανονική, η γάμμα, η Gumbel τύπου I κι η Weibull είναι επαρκείς για να αναπαραστήσουν την εμπειρική αθροιστική πιθανότητα κατανομής των απαιτήσεων ανελαστικής αντοχής.

Σε αυτή τη μελέτη, η εμπειρική αθροιστική πιθανότητα κατανομής του C_R προέκυψε μελετώντας τα αποτελέσματα του C_R για μια δεδομένη περίοδο και λόγο πλευρικής αντοχής, από όλους τους 240 σεισμούς, ως ένα τυχαίο δείγμα από τον πληθυσμό και μέσω της υπόθεσης κάθε τιμής του C_R ως ένα ανεξάρτητο συμπέρασμα. Στη συνέχεια, όλες οι 240 παρατηρήσεις του C_R ταξινομήθηκαν σε αύξουσα σειρά και η κάθε παρατήρηση i έχει πιθανότητα ίση με i/ (n+1) όπου το n αντιστοιχεί στις 240 παρατηρήσεις. Παρατηρήθηκε ότι η εμπειρική αθροιστική κατανομή του C_R ακολουθεί λοξή κατανομή (ασύμμετρη) με τα μακρύτερα άκρα να κινούνται προς τις ανώτερες τιμές. Καθώς η λογαριθμική συνάρτηση κατανομής έχει εφαρμοστεί εκτεταμένα για τον χαρακτηρισμό της αθροιστικής κατανομής των σεισμικών απαιτήσεων, αυτή η παραμετρική συνάρτηση κατανομής έχει αξιολογηθεί σε αυτή την μελέτη για να καθορίσει εάν μπορεί να χαρακτηρίσει την εμπειρική κατανομή του C_R. Για να εξασφαλίσουμε ότι η υποψήφια συνάρτηση κατανομής είναι επαρκής , χρησιμοποιείται ο έλεγχος των Kolmogorov–Smirnov (K–S).

Γενικά έχει βρεθεί ότι η λογαριθμική πιθανότητα κατανομής ταιριάζει επαρκώς με την εμπειρική κατανομή. Για παράδειγμα, μια σύγκριση με την εμπειρική κατανομή του

C_R με βάση τη λογαριθμική συνάρτηση (χρησιμοποιώντας την υπολογισμένη μέση τιμή και τη λογαριθμική τυπική απόκλιση του C_R ως στατιστικές παραμέτρους) που αντιστοιχεί σε ένα σύστημα ισχυρό με μικρή περίοδο (T= 0.5sec , R=2.0) και ένα ασθενές σύστημα με μεγάλη περίοδο (T=2sec και R=6.0) φαίνονται στο σχήμα 6.8. Ως εκ τούτου, έχει αποφασιστεί να χρησιμοποιείται η λογαριθμική πιθανότητα κατανομής για το χαρακτηρισμό της εμπειρικής αθροιστικής κατανομής του C_R, ω εξής;

$$P\left[C_R > c_R \,|\, T, C_y\right] = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(c_R) - \mu_{\ln c_R}}{\sigma_{\ln c_R}}\right) \qquad (6.19)$$

Όπου Φ είναι η τυπική κανονική συνάρτηση κατανομής, $\mu_{\ln c_R}$ είναι η μέση τιμή του φυσικού λογαρίθμου του C_R και $\sigma_{\ln c_R}$ είναι η τυπική απόκλιση του φυσικού λογαρίθμου του C_R.

6.7 Αξιολόγηση μεθοδολογίας

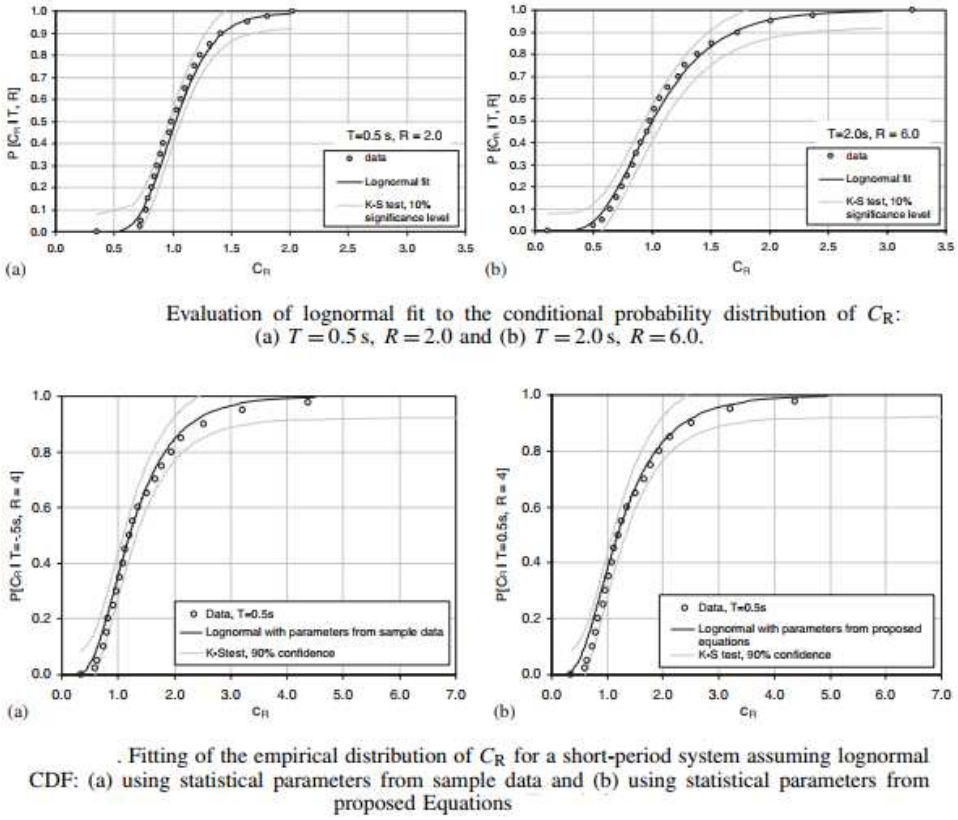
Καθώς ο σκοπός είναι να υπολογίσουμε τη συνεχή καμπύλη επικινδυνότητας για τη μέγιστη ανελαστική μετατόπιση για μια ευρεία περιοχή περιόδων δόνησης και επιπέδων σχετικής πλευρικής αντοχής, μας ενδιαφέρει η διασφάλιση των προτεινόμενων απλοποιημένων εξισώσεων που εισάγονται πιο πάνω στην εκτίμηση της κεντρικής τάσης και τη διασπορά του C_R.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει την εμπειρική πιθανότητα κατανομής του C_R, καθώς και την λογαριθμική γραμμή τάσης που έχει υπολογιστεί από παραμέτρους του δείγματος για σύστημα με μικρή περίοδο (T=0.5s) και R=4.0. Μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι η λογαριθμική συνάρτηση κατανομής ακολουθεί επαρκώς την εμπειρική κατανομή για αυτή την περίοδο της δόνησης και το επίπεδο του λόγου πλευρικής αντοχής. Επιπλέον, στο σχήμα παρουσιάζεται μια σύγκριση με την ίδια εμπειρική κατανομή του C_R και της αντίστοιχης λογαριθμικής γραμμής τάσης που έχει υπολογιστεί με στατιστικές παραμέτρους που εκτιμώνται από τις παραπάνω εξισώσεις και με χρήση των παραμέτρων εκτίμησης που προκύπτουν από τους υπολογισμένους μέσους και την τυπική λογαριθμική απόκλιση του δείγματος. Από το διάγραμμα μπορεί να παρατηρηθεί ότι η χρήση των προτεινόμενων εξισώσεων για εκτίμηση των στατιστικών παραμέτρων της λογαριθμικής κατανομής, επίσης οδηγεί σε συμφωνία με βάση την εμπειρική κατανομή του C_R.

Η γραφική παράσταση του ελέγχου των Kolmogorov-Smirnov που αντιστοιχεί σε επίπεδο εμπιστοσύνης 90% φαίνεται και στα δύο σχήματα. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η επάρκεια στη χρήση των εξισώσεων για προσέγγιση της εμπειρικής αθροιστικής κατανομής του C_R έχει επίσης εξασφαλιστεί για άλλες περιόδους δόνησης και για λόγους πλευρικής αντοχής. Ως εκ τούτου, εκτιμάται ότι οι μορφές των συναρτήσεων στις εξισώσεις, με επαρκείς εκτιμήσεις των παραμέτρων παρέχουν ένα καλό τρόπο για εκτίμηση της κεντρικής τάσης και των παραμέτρων της διασποράς της κατανομής του C_R.

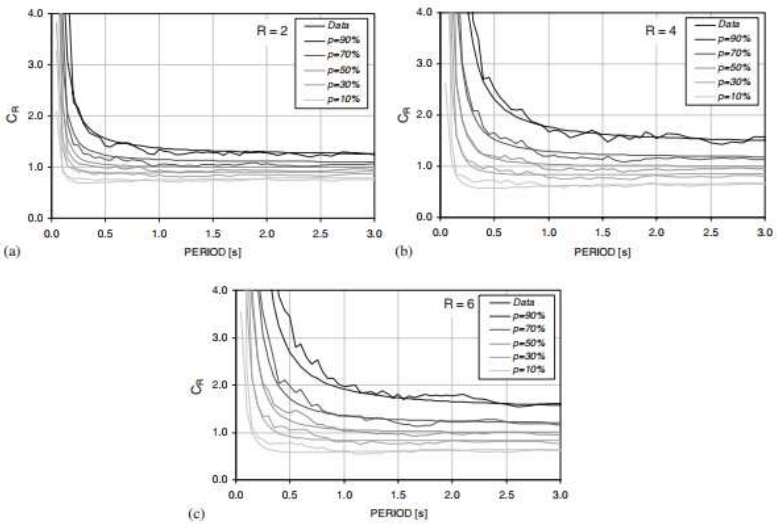
Ένας τρόπος για να λαμβάνεται υπόψη η διασπορά του C_R, είναι ο υπολογισμός των λόγων ανελαστικής μετατόπισης που αντιστοιχούν σε διαφορετικά εκατοστημόρια. Για παράδειγμα, οι τιμές του C_R που σχετίζονται με τα διαφορετικά υπολογισμένα εκατοστημόρια, υπολογίστηκαν από στατιστικά αποτελέσματα. Σε αυτή την έρευνα, τα

εκατοστημόρια του C_R, υπολογίστηκαν μέσω υπόθεσης μιας λογαριθμικής κατανομής με κεντρική τάση και παραμέτρους διασποράς που εκτιμώνται από τις εξισώσεις, που παρουσιάστηκαν παραπάνω.



Σχήμα 6-8:Εμπειρική κατανομή του CR.

Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται μια σύγκριση του φάσματος C_R που προκύπτει για πέντε διαφορετικά εκατοστημόρια που υπολογίζονται από τα στατιστικά του C_R και για εκείνα που υπολογίζονται από την λογαριθμική κατανομή (συνεχής κατανομή). Από το διάγραμμα προκύπτει ότι μια πολύ καλή εκτίμηση είναι μέσω υπόθεσης ότι το C_R είναι λογαριθμο-κανονικά κατανεμημένο.



Comparison of counted percentiles and percentiles of C_R assuming lognormal CDF using statistical parameters estimated from Equations (7) and (8) for: (a) $R = 2$; (b) $R = 4$; and (c) $R = 6$.

Σχήμα 6-9:Σύγκριση του CR με χρήση της λογαριθμο-κανονικής κατανομής.

6.8 Καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας μέγιστης ανελαστικής μετατόπισης

Το Πανεπιστήμιο του Στάνφορντ που εδράζεται στην βόρεια Καλιφόρνια, περιτριγυρίζεται από πολλά ενεργά ρήγματα συμπεριλαμβανομένου του ρήγματος του San Andreas και του Hayward, έχει αναπαραστήσει την προτεινόμενη μεθοδολογία. Έτσι, οι ελαστικές καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας για τις συντεταγμένες φασματικής ψευδο-επιτάχυνσης λ(Sa) που αντιστοιχούν σε πέντε περιόδους δόνησης (T=0.2sec, 0.3sec,0.5sec, 1.0sec, 2.0sec) προέκυψαν από τους Frankel and Leyendecker. Ωστόσο, η αναφορά που παρατίθεται παρέχει μόνο διακριτές τιμές του λ(Sa), καθώς η ολοκλήρωση στην εξίσωση

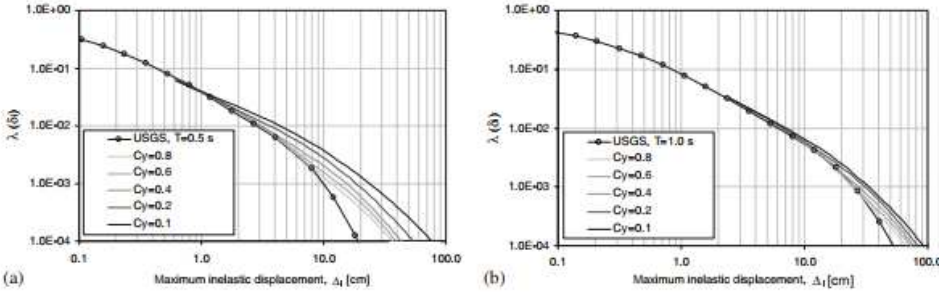
$$\lambda(\delta_i) \simeq \int_0^{\infty} P\left[C_R > c_R \mid S_d = s_d; T, C_y\right] \left|\frac{d\lambda(s_d)}{dS_d}\right| ds_d \qquad (6.20)$$

απαιτεί μια συνεχή καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας και έτσι είναι επιθυμητή μια συνεχής συνάρτηση. Έτσι, μια συνεχής συνάρτηση της καμπύλης σεισμικής επικινδυνότητας για την φασματική ψευδο-επιτάχυνση προέρχεται από την εφαρμογή του 4^{ου} βαθμού πολυωνυμικού μοντέλου με την ακόλουθη μορφή:

$$\ln \lambda(s_a) = a_0 + a_1 \ln s_a + a_2 (\ln s_a)^2 + a_3 (\ln s_a)^3 + a_4 (\ln s_a)^4 \qquad (6.21)$$

Η συμβατική ανάλυση παλινδρόμησης εφαρμόστηκε για να προκύψει ένα σύνολο εκτιμούμενων παραμέτρων οι οποίες παρέχουν την καλύτερη αντιστοιχία με την κάθε μια καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας που αντιστοιχεί σε κάθε περίοδο δόνησης. Στη συνέχεια, λήφθηκε η μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης μιας απαίτησης σταθερής ελαστικής μετατόπισης $\lambda_{(Sd)}$, για κάθε μια από τις προαναφερθείσες περιόδους δόνησης. Ως εκ τούτου, μέσω της εξίσωσης υπολογίστηκαν με αριθμητική ολοκλήρωση ένα

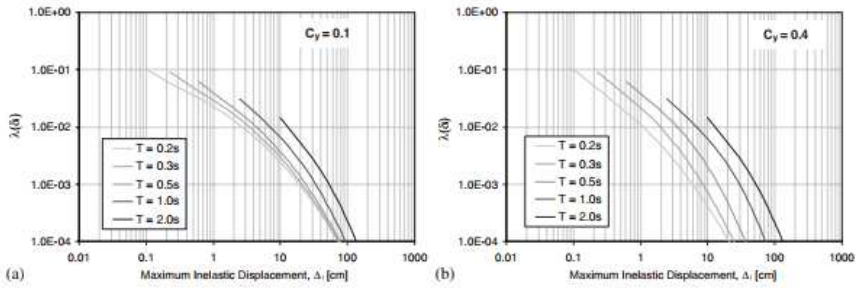
σύνολο από 25 καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας της μέγιστης απαίτησης ανελαστικής μετατόπισης, $\lambda_{(\delta i)}$ που αντιστοιχεί στις πέντε περιόδους δόνησης (T= 0.2sec, 0.3sec, 0.5sec, 1.0sec, 2,0sec) και πέντε συντελεστές αντοχής διαρροής (C_y= 0.1, 0.2 ,0.4, 0.6, 0.8). Οι μέγιστες ανελαστικές καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας επιτρέπουν την εκτίμηση της μέσης ετήσιας συχνότητας υπέρβασης ενός ορίου απαίτησης μετατόπισης. Για σκοπούς απεικόνισης, στο σχήμα που παρατίθεται παρακάτω, παρουσιάζονται 2 μέγιστες καμπύλες επικινδυνότητας της απαίτησης ανελαστικής μετατόπισης και οι γραμμικές τους καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας των ελαστικών φασματικών μετατοπίσεων που αντιστοιχούν σε δύο περιόδους δόνησης (T= 0.5sec και 1.0sec) .



Maximum inelastic displacement demand seismic hazard curves computed using the proposed approach corresponding to five levels of lateral strength for two periods of vibration: (a) $T = 0.5$ s and (b) $T = 1.0$ s.

Σχήμα 6-10:: Καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας

Ένα άλλο παράδειγμα καμπύλων επικινδυνότητας μέγιστης ανελαστικής ζήτησης, ως συνάρτηση της περιόδου της δόνησης, για δύο επίπεδα του C_y που αναπτύχθηκαν σε αυτή τη μελέτη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρείται ότι το $\lambda_{(\delta i)}$ εξαρτάται από την πλευρική αντοχή και από την περίοδο της δόνησης των συστημάτων.



Maximum inelastic displacement seismic hazard curves computed using the proposed approach for five different periods of vibration and two levels of lateral strength: (a) $C_y = 0.1$ and (b) $C_y = 0.4$.

Σχήμα 6-11:Καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας.

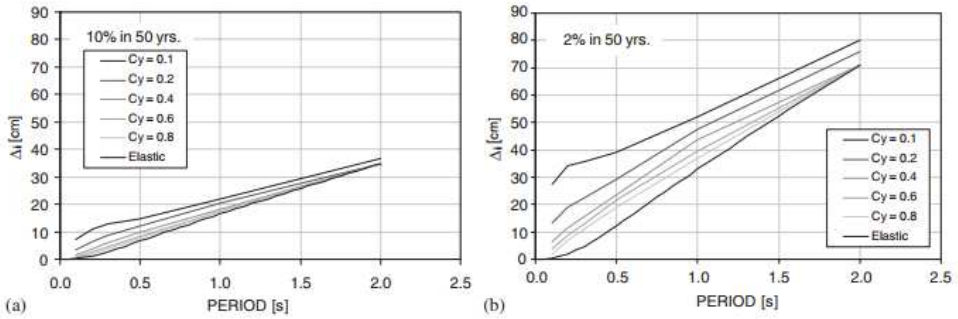
Οι καμπύλες επικινδυνότητας για τη μέγιστη απαίτηση ανελαστικής μετατόπισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργηθεί το φάσμα επικινδυνότητας για τη μέγιστη ανελαστική μετατόπιση (MID-UHS). Το MID-UHS αντιπροσωπεύει τις διατάξεις μέγιστης απαίτησης ανελαστικής μετατόπισης που αντιστοιχούν στην ίδια

πιθανότητα υπέρβασης, με εκείνα μιας συνάρτησης περιόδου δόνησης και της πλευρικής αντοχής του συστήματος.

Για παράδειγμα, το MID-UHS φάσμα που αντιστοιχεί σε πέντε συντελεστές αντοχής διαρροής και για 10% και 2% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 χρόνια (με περίοδο επαναφοράς 475 και 2475 αντίστοιχα) φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Όπως μπορεί να είναι αναμενόμενο, τα ασθενέστερα συστήματα (χαμηλός συντελεστής αντοχής διαρροής) είναι πιο επιρρεπή στο να υποστούν μεγαλύτερες απαιτήσεις μέγιστων ανελαστικών μετατοπίσεων από εκείνες των ισχυρότερων συστημάτων (υψηλός συντελεστή αντοχής διαρροής)

Για παράδειγμα, για μια πιθανότητα υπέρβασης 10% σε 50 χρόνια, ένα σύστημα με περίοδο T=0.5sec και C_y= 0.1 μπορεί να υποστεί απαιτήσεις μέγιστης ανελαστικής μετατόπισης δύο φορές από τις απαιτήσεις για ένα σύστημα με ίδια περίοδο αλλά με C_y=0.8.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το MID-UHS είναι πολύ χρήσιμο για την σεισμική αξιολόγηση των υφιστάμενων κατασκευών. Επιπλέον, αυτός ο τύπος φάσματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρουσιαστούν οι οριακές καταστάσεις που βασίζονται στις μέγιστες απαιτήσεις ανελαστικών μετατοπίσεων.



Maximum inelastic displacement uniform hazard spectra computed using the proposed approach corresponding to two return periods: (a) 10% in 50 years and (b) 2% in 50 years.

Σχήμα 6-12:Ομοιόμορφο φάσμα σεισμικής επικινδυνότητας.

6.9 Υπολογισμός του μειωτικού συντελεστή δύναμης

Ο μειωτικός συντελεστής δύναμης Rμ ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ελαστικής δύναμης προς την δύναμη διαρροής που απαιτείται για τη οριακή μέγιστη ανελαστική απόκριση σε μια συγκεκριμένη ολκιμότητα μ. Σε αυτή τη μελέτη, το Rμ παραμετροποιήθηκε ως μια συνάρτηση του μ. Έχει παρατηρηθεί ότι στην περιοχή μακράς περιόδου, τα ελαστικά και τα όλκιμα συστήματα με την ίδια αρχική δυσκαμψία φτάνουν σχεδόν στην ίδια μετατόπιση. Ως συνέπεια, ο μειωτικός συντελεστής δύναμης (ή συμπεριφοράς) μπορεί να θεωρηθεί ίσος με την ολκιμότητα μετατόπισης. Αυτό αναφέρεται ως 'περιοχή ίσων μετατοπίσεων'.

Για κατασκευές με σύντομη περίοδο, η ολκιμότητα είναι υψηλότερη από το συντελεστή συμπεριφοράς και η προσέγγιση 'ίδιας ενέργειας' μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η μείωση της δύναμης. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στην παρατήρηση ότι η ενέργεια που σχετίζεται με την δύναμη που αντιστοιχεί στη μέγιστη

μετατόπιση από τα ανελαστικά και τα ελαστικά συστήματα είναι η ίδια. Οι προτεινόμενες σχέσεις για τον συντελεστή συμπεριφοράς είναι:

$$R_\mu = 1, T < 0.05s$$
$$R_\mu = \sqrt{2\mu - 1}, 0.12s < T < 0.5s \qquad (6.22)$$
$$R_\mu = \mu, T > 1.0s$$

Για τις ενδιάμεσες περιόδους προτείνεται η γραμμική παλινδρόμηση. Τα παραπάνω είναι η πρώτη και πιο απλή μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην πράξη Newmark and Hall (1982).

Οι Krawinkler and Nassar (1992) ανέπτυξαν μια σχέση για το μειωτικό συντελεστή δύναμης που προκύπτει από τη στατιστική ανάλυση 15 εδαφικών κινήσεων από τη δυτική Αμερική με μεγέθη από 5.7 έως 7.7. Οι καταγραφές προέκυψαν για λασπώδες και για βραχώδες έδαφος, αλλά η επίδραση των συνθηκών του εδάφους δεν έχει μελετηθεί ακριβώς. Η επιρροή των παραμέτρων συμπεριφοράς, καθώς και του επιπέδου διαρροής και του συντελεστή σκλήρυνσης (hardening) α, έχει ληφθεί υπόψη. Έγινε υπόθεση απόσβεσης ίσης με 5%, και η εξίσωση που προέκυψε είναι η ακόλουθη:

$$R_\mu = [c(\mu - 1) + 1]^{1/c} \qquad (6.23)$$

$$c(T, a) = \frac{T^a}{1 + T^a} + \frac{b}{T} \qquad (6.24)$$

όπου α είναι μια παράμετρος τάσης-σκλήρυνσης του υστερικού μοντέλου και a, b είναι σταθερές παλινδρόμησης. Οι τιμές των σταθερών που προτείνονται για τρεις τιμές του α παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα:

Hardening value	Model parameters	
α (%)	a	b
0	1.00	0.42
2	1.01	0.37
10	0.80	0.29

Σχήμα 6-13:: Τιμές μεταβλητών α και b.

Η εξίσωση με βάση τους ***Miranda and Bertero (1994)*** *προέκυψε από την μελέτη 124 εδαφικών κινήσεων που καταγράφηκαν σε μια ευρεία περιοχή εδαφικών συνθηκών. Οι συνθήκες εδάφους ταξινομήθηκαν ως βράχος, λάσπη και πολύ μαλακά εδάφη χαρακτηρίστηκαν από τη χαμηλή ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων. Έγινε υπόθεση 5% ως κρίσιμη απόσβεση. Οι εκφράσεις για τους συντελεστές μείωσης της δύναμης που εξαρτώνται από την περίοδο R_μ δίνονται από τις σχέσεις:*

$$R\mu = \frac{\mu - 1}{\Phi} - 1 \qquad (6.25)$$

όπου Φ υπολογίζεται με διαφορετικές σχέσεις για βραχώδες, λασπώδες και για μαλακά εδάφη όπως παρακάτω:

$$\Phi = 1 + \frac{1}{10T - \mu T} - \frac{1}{2T}\exp\left[-1.5(\ln T - 0.6)^2\right], rock - site$$
$$\Phi = 1 + \frac{1}{12T - \mu T} - \frac{2}{5T}\exp\left[-2(\ln T - 0.2)^2\right], alluvium - site \qquad (6.26)$$
$$\Phi = 1 + \frac{T_i}{3T} - \frac{3T_i}{4T}\exp\left[-3(\ln(\frac{T}{T_i}) - 0.25)^2\right], soft - site$$

όπου T_i είναι η κυρίαρχη περίοδος της εδαφικής κίνηση. Το τελευταίο αντιστοιχεί σε περίοδο κατά την οποία η σχετική ταχύτητα του γραμμικού συστήματος με απόσβεση 5% είναι μέγιστη εντός της περιοχής της συνολικής περιόδου.

Οι μειωτικοί συντελεστές R_μ που υπολογίστηκαν από τον Vidic et al. (1994) προσεγγίστηκαν με μια διγραμμική καμπύλη. Στην περιοχή σύντομων περιόδων, ο μειωτικός συντελεστής αυξάνεται γραμμικά με την περίοδο από το 1.0 έως μια τιμή που είναι σχεδόν ίση με τον συντελεστή ολκιμότητας. Στο απομένον τμήμα της περιόδου, ο μειωτικός συντελεστής είναι σταθερός. Για να υπολογιστεί ο μειωτικός συντελεστής, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο διγραμμικής απόκρισης και ένα μοντέλο Q, μειούμενης δυσκαμψίας. Έγινε υπόθεση απόσβεσης ανάλογης με την μάζα και κατά περίπτωση η απόσβεση ανάλογη με τη δυσκαμψία. Σε αυτή τη μελέτη επιλέχθηκαν συγκεκριμένες καταγραφές από την California και το Montenegro 1979, καθώς θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικές για συγκεκριμένη εδαφική κίνηση, δηλαδή συγκεκριμένη εδαφική κίνηση σε μια ενδιάμεση απόσταση από το επίκεντρο, με μια διάρκεια από 10 έως 30 sec και με κυρίαρχη περίοδο μεταξύ 0.3 και 0.8 sec. Η προτεινόμενη σχέση για υπολογισμό του μειωτικού συντελεστή, βασίζεται σε μικρό μέγεθος δείγματος, αλλά επαυξημένο με μια ανάλυση ευαισθησίας για ειδικά χαρακτηριστικά ισχυρών κινήσεων, είναι η ακόλουθη:

$$R_\mu = c_1(\mu - 1)^{c_R}\frac{T}{T_0} + 1, T < T_0$$
$$R_\mu = c_1(\mu - 1)^{c_R} + 1, T \geq T_0 \qquad (6.27)$$

όπου T_o είναι η περίοδος που διαιρεί την περιοχή των περιόδων σε δύο τμήματα. Εκείνη σχετίζεται με την κυρίαρχη περίοδο της εδαφικής κίνησης T_1, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathrm{T}_o = c_2 * \mu_c * T * T_1 \qquad (6.28)$$

Οι συντελεστές c_1, c_2, c_R και c_T στις παραπάνω εξισώσεις εξαρτώνται από την υστερική συμπεριφορά είτε διγραμμικών ή με μειούμενη ακαμψία και απόσβεση, για παράδειγμα εξαρτώμενη από το χρόνο ή όχι. Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:

Model	Damping	c_1	c_2	c_R	c_T
Bilinear	Mass-proportional	1.35	0.75	0.95	0.20
Bilinear	Instantaneous stiffness proportional	1.10	0.75	0.95	0.20
Q-model	Mass-proportional	1.00	0.65	1.00	0.30
Q-model	Instantaneous stiffness proportional	0.75	0.65	1.00	0.30

Σχήμα 6-14:Τιμές παραμέτρων c1, c2, cR και cT

Οι τιμές των παραπάνω σταθερών είναι υπολογισμένοι με απόσβεση 5%. Επιπλέον, και στα δύο μοντέλα, δηλαδή στο διγραμμικό και στο μοντέλο με μειούμενη ακαμψία, έχει γίνει υπόθεση ότι έχουν 10% σκλήρυνση, αφού γίνει διαρροή.

Στην μελέτη των Borzi and Elnashai (2000) έγινε χρήση δεδομένων από ισχυρές κινήσεις για να προκύψουν οι συντελεστές τροποποίησης της απόκρισης (απαίτηση) λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω τρία σημεία. Δύο δομικά μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για την αναλυτική μελέτη, ένα ελαστικό πλήρως πλαστικό (EPP) και ένα υστεριτικό (HHS) μοντέλο. Στη συνέχεια, έγιναν αναλύσεις παλινδρόμησης για την αξιολόγηση της αναλογίας μεταξύ του φάσματος ελαστικής και ανελαστικής επιτάχυνσης. Η επίδραση της ολκιμότητας και των παραμέτρων εισόδου, ειδικά του μεγέθους, της απόστασης και των συνθηκών του εδάφους, στους συντελεστές μείωσης της δύναμης, μελετήθηκαν χρησιμοποιώντας μοντέλο EPP. Παρατηρήθηκε ότι η επιρροή των παραμέτρων εισόδου στο ελαστικό και στο ανελαστικό φάσμα της επιτάχυνσης είναι όμοια και σημαντική. Η ολκιμότητα είναι η πιο σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τον συντελεστή τροποποίησης της απόκρισης. Συνεπώς έγιναν αναλύσεις για να προσδιοριστούν οι συναρτήσεις των συντελεστών συμπεριφοράς, που είναι εξαρτώμενοι από την περίοδο για όλα τα επίπεδα ολκιμότητας και για όλα τα δομικά μοντέλα. Οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις υπολογίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη πολλούς συνδυασμούς παραμέτρων εισόδου. Οι συναρτήσεις των συντελεστών που είναι εξαρτώμενοι από την περίοδο υπολογίστηκαν περαιτέρω στο προσεγγιστικό τριγραμμικό σχήμα. Ο συντελεστής R είναι ίσος με 1.0 σε μηδενική περίοδο και αυξάνεται γραμμικά έως μια περίοδο T_1, η οποία ορίζεται ως η περίοδος κατά την οποία ο συντελεστής μείωσης της δύναμης φτάνει μια τιμή q_1. Έγινε υπόθεση ενός δεύτερου κλάδου γραμμικού μεταξύ T_1 και T_2. Η τιμή του μειωτικού συντελεστή που αντιστοιχεί στην περίοδο T_2, σημειώνεται κατά q_2. Για περιόδους μεγαλύτερες από T_2, ο συντελεστής συμπεριφοράς παραμένει σε μια σταθερή τιμή ίση με q_2.

$$q = (q_1 - 1)\frac{T}{T_i} + 1, T \le T_1$$
$$q = q_1 + (q_2 - q_1)\frac{T - T_1}{T_2 - T_1} + 1, T_1 \le T \le T_2 \qquad (6.29)$$
$$q = q_2, T > T_2$$

Οι τιμές q_1, q_2, T_1, T_2, που ορίζουν το προσεγγιστικό φάσμα για όλα τα επίπεδα ολκιμότητας και υστεριτικών παραμέτρων συνοψίζονται στον πίνακα παρακάτω, όπως εκείνες προέκυψαν από γραμμική παλινδρόμηση κατά τμήματα για τα μοντέλα του δείγματος EPP και HHS.

Για να αποδειχθεί η αιτιολογημένη συμφωνία της τριγραμμικής αναπαράστασης με το φάσμα των μειωτικών συντελεστών της παλινδρόμησης, μελετάται η τυπική απόκλιση σ του λόγου γ μεταξύ των προσεγγίσεων και των πραγματικών τιμών. Η τυπική απόκλιση υπολογίστηκε για όλους τους κλάδους του προσεγγιστικού φάσματος και κατά μήκος όλης της περιοχής της περιόδου.

Ο ι τιμές αυτές παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.

	$\mu = 2$				$\mu = 3$				$\mu = 4$				$\mu = 6$			
	σ_1	σ_2	σ_3	σ	σ_1	σ_2	σ_3	σ	σ_1	σ_2	σ_3	σ	σ_1	σ_2	σ_3	σ
EPP	2.1	1.9	2.0	2.0	3.4	2.1	2.8	2.8	4.7	2.5	3.5	3.6	7.0	2.8	4.2	5.0
$K_3 = 0$	3.1	1.6	2.7	2.6	4.5	3.6	3.3	3.9	6.2	3.8	3.9	4.8	8.5	3.0	6.2	6.4
$K_3 = 10\%\ K_y$	3.8	1.6	2.8	2.9	6.4	3.4	3.5	4.7	9.0	3.4	3.4	6.1	2.8	1.7	2.5	2.6
$K_3 = -20\%\ K_y$	3.6	4.7	—	4.4	2.6	3.2	3.7	3.2	2.9	3.1	4.3	3.4	—	—	—	—
$K_3 = -30\%\ K_y$	3.7	4.9	—	4.6	2.9	3.1	4.1	3.3	—	—	—	—	—	—	—	—

Key: EPP = elastic-perfectly plastic model; μ = ductility

K_y and K_3 are the secant and post-yield stiffness of the primary curve of the hysteretic hardening-softening model

Σχήμα 6-15: Τιμές τυπικής απόκλισης.

Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η διασπορά του γ είναι κοντά στην καθολική τυπική απόκλιση. Τέλος, οι συντεταγμένες των σημείων, τα οποία επιτρέπουν την ορισμό του προσεγγιστικού φάσματος, εκφράζονται ως μια συνάρτηση της ολκιμότητας ως:

$$T_1 = b_{T1}$$
$$T_2 = a_{T2}\mu + b_{T2} \qquad (6.30)$$

$$q_1 = a_{q1}\mu + b_{q1}$$
$$q_2 = a_{q2}\mu + b_{q2} \qquad (6.31)$$

όπου τα b_{T1}, a_{T2}, b_{T2}, a_{q1}, b_{q1}, a_{q2}, b_{q2} είναι σταθερές.

Έχει παρατηρηθεί ότι οι περίοδοι ελέγχου της μορφής του προσεγγιστικού φάσματος δεν εξαρτώνται από την υστερική συμπεριφορά και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ένα σύνολο τροποποίησης της απόκρισης. Από την άλλη πλευρά, έχει βρεθεί ότι διαφορετικές τιμές των a_{q1},b_{q1},a_{q2},b_{q2} αντιστοιχούν σε διαφορετικά μοτίβα υστερικής συμπεριφοράς και έτσι απαιτούν πιο πολύπλοκες συναρτήσεις, όπως παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα:

	b_{T1}	a_{T2}	b_{T2}	a_{q1}	b_{q1}	a_{q2}	b_{q2}
EPP	0.25	0.163	0.60	0.69	0.90	1.01	0.24
$K_3 = 0$				0.55	1.37	1.33	0
$K_3 = 10\%\ K_y$				0.32	1.69	0.96	0.51
$K_3 = -20\%\ K_y$				0.38	1.67	1.24	0
$K_3 = -30\%\ K_y$				0.29	1.83	1.21	0

Key: EPP = elastic-perfectly plastic model

K_y and K_3 are the secant and post-yield stiffness of the primary curve of the hysteretic hardening-softening model

Σχήμα 6-16:Τιμές παραμέτρων bT1, aT2, bT2, aq1, bq1, aq2, bq2.

Η επίδραση αυτής της απλοποίησης στο συσχετισμό μεταξύ των παραμετροποιημένων και των πραγματικών συντελεστών τροποποίησης της απόκρισης, είναι μικρή. Η παραπάνω σχέση προέκυψε χρησιμοποιώντας ένα πολύ πιο μεγάλο σύνολο δεδομένων με συνεπείς κατανομές στο μέγεθος, απόσταση και συνθήκες εδάφους από ότι τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στις προηγούμενες μελέτες. Το σύνολο δεδομένων περιέχει περίπου 400 καταγραφές. Επιπλέον, η εξιδανίκευση που παρουσιάζεται παραπάνω οδηγεί σε συντελεστές ομοιόμορφης επικινδυνότητας ή αξιοπιστίας της δύναμης. Ως εκ τούτου, αυτά είναι σύμφωνα με το ομοιόμορφο φάσμα απόκρισης επικινδυνότητας, το οποίο χρησιμοποιείται στους σεισμικούς κώδικες σχεδιασμού.

Έχει παρατηρηθεί ότι οι διαφοροποιήσεις είναι σημαντικές για δομικά συστήματα με χαμηλές περιόδους, όπως για παράδειγμα με περιόδους μικρότερες από 0.5 sec. Για συστήματα με μεγάλες περιόδους, όπως για παράδειγμα περιόδους μεγαλύτερες από 1.0 sec όλες οι σχέσεις οδηγούν σε μια σταθερή τιμή. Η σχέση των Miranda and Bertero (1994), παρέχει αποτελέσματα για την μη συντηρητική πλευρά των άλλων μοντέλων, καθώς οι Newmark and Hall (1982), έδωσαν μια σχέση που φαίνεται να είναι ένα ασφαλές κάτω όριο. Τα άλλα μοντέλα δίνουν ενδιάμεσα αποτελέσματα για τις ενδιάμεσες και τις μεγάλες περιόδους.

7 Εφαρμογή Μεθοδολογιών-Αναλύσεις καταγραφών με κρυφούς παλμούς

Οι καταγραφές κοντινού πεδίου παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της καταστροφικής τους επίδρασης, ειδικά για κατασκευές με μεσαίες έως μεγάλες περιόδους. Τα χαρακτηριστικά των παλμών που εμπεριέχονται σε αυτές τις καταγραφές, εντοπίζονται μέσω της ανάλυσης κυματιδίου, σύμφωνα με τον Baker (2007), κυρίως με την χρήση του κυματιδίου Daubechies 4^{ης} τάξης.

Σε αυτή την κατεύθυνση και οι Μαυροειδής και Παπαγεωργίου (2004) πρότειναν ένα κυματίδιο που βασίζεται στο συνδυασμό ενός περιοδικού ημιτονοειδούς σήματος με κωδωνοειδή επαύξηση. Οι παράμετροι του κύματος αυτού, δηλαδή η περίοδος του παλμού και το εύρος, προσδιορίζονται μέσω αλγορίθμου σύμφωνα με τον Μίμογλου (2014). Επιτρέπεται μια αξιολόγηση του παλμού, μέσω ενός συντελεστή συσχέτισης μεταξύ της χρονοϊστορία της ταχύτητας και του εξαγόμενου παλμού, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένας δείκτης παλμικότητας.

Επίσης, σύμφωνα με την Καρδούτσου (2017), μια καταγραφή είναι παλμική αν ο δείκτης παλμικότητας είναι μεγαλύτερος από 0.65 ενώ για τιμές μικρότερες από 0.55 η καταγραφή είναι μη παλμική. Μεταξύ των τιμών αυτών, οι καταγραφές είναι αμφισβητούμενες. Το ελαστικό φάσμα των παλμικών καταγραφών, παρουσιάζει μια κωδωνοειδή επαύξηση κοντά στην περίοδο του παλμού και εμφανίζονται μεγάλες απαιτήσεις πλαστιμότητας στην περιοχή κοντά στο ήμισυ της περιόδου του παλμού. Η ενίσχυση του ελαστικού φάσματος, σε περίπτωση ύπαρξης παλμού, έρχεται σε αντίθεση με την συνήθη υπόθεση της εκθετικής μείωσης του φάσματος του εύρους της φασματικής επιτάχυνσης σε μεσαίες έως μεγάλες περιόδους.

Επιπλέον, οι ανελαστικές μετατοπίσεις είναι λίγο μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες ελαστικές σε μια περίοδο κοντά στο μισό της περιόδου του παλμού που μελετάται. Αυτή η παρατήρηση περιορίζει το σκεπτικό της θεώρησης των ίσων ελαστικών και ανελαστικών μετατοπίσεων στην περιοχή των μεσαίων-μεγάλων περιόδων για τις περιπτώσεις των μη παλμικών περιπτώσεων. Οι απαιτήσεις πλαστιμότητας των καταγραφών αυτών είναι αυξημένες στην περιοχή από 1sec εως 3 sec.

Στην παρούσα εργασία, ακολουθήθηκε η παρακάτω μεθοδολογία για τον εντοπισμό κρυφών παλμών σε μια καταγραφή, οι οποίοι δεν είναι εμφανείς στην χρονοϊστορία της ταχύτητας αλλά η ύπαρξή τους καθίσταται έκδηλη στο ελαστικό κι ανελαστικό φάσμα της καταγραφής. Αρχικά, από τη βάση δεδομένων του NGA έγινε επιλογή 919 καταγραφών που σύμφωνα με τους δείκτες Baker ή/και Καρδούτσου, χαρακτηρίζονται ως μη παλμικές ή αμφισβητούμενες καταγραφές. Οι καταγραφές που εξετάστηκαν είχαν εδαφική επιτάχυνση μεγαλύτερη από 0.15g. Προκειμένου να εξεταστεί το παλμικό περιεχόμενο των καταγραφών αυτών, έγινε εξαγωγή 6 παλμών από τη χρονοϊστορία της κάθε καταγραφής. Ο συνδυασμός των 6 παλμών αυτών προσεγγίζει πολύ καλά τη χρονοϊστορία της ταχύτητας της αρχικής σεισμικής καταγραφής. Στη συνέχεια, εξετάστηκε η επίδραση του κάθε επιμέρους παλμού που εξήχθη, στο ελαστικό και στο ανελαστικό φάσμα απόκρισης της καταγραφής. Έτσι, αφαιρέσαμε τον κάθε παλμό από την αρχική καταγραφή και προέκυψε μια παραμένουσα χρονοϊστορία και δημιουργήθηκε το απομειωμένο ελαστικό φάσμα αυτής.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε το ανελαστικό φάσμα μετατοπίσεων για συντελεστή συμπεριφοράς q ίσο με 4 για την αρχική καταγραφή αλλά και για το σεισμικό σήμα που

παραμένει από την αφαίρεση των έξι παλμών και υπολογίστηκαν οι λόγοι της τελικής προς την αρχική πλαστιμότητα. Ως κρίσιμη τιμής της πλαστιμότητας θεωρήθηκε πλαστιμότητα ίση με 6 σύμφωνα με τον Miranda (2007) και όλες οι επιλεχθείσες καταγραφές παρουσίαζαν μέγιστη τιμή απαιτούμενης πλαστιμότητας ίση ή μεγαλύτερη της τιμής αυτής. Εάν ο λόγος επιδείκνυε σημαντική μείωση της αρχικής απαιτούμενης πλαστιμότητας, που παρατηρούνταν στην περιοχή μεσαίων και μεγάλων περιόδων της αρχικής καταγραφής, τότε ο εξαγόμενος παλμός θεωρούνταν ως σημαντικός «κρυφός παλμός», ο οποίος προκαλούσε μεγάλες ανελαστικές μετατοπίσεις. Επιπροσθέτως, έγινε σύγκριση του ελαστικού φάσματος επιτάχυνσης για την αρχική καταγραφή και για την απομειωμένη καταγραφή (αφαίρεση σημαντικού παλμού), προκειμένου να προσδιοριστούν οι παλμοί εκείνοι που προκαλούν τις κωδωνοειδείς επαυξήσεις στην αρχική καταγραφή (στο αρχικό φάσμα). Όπως ήταν αναμενόμενο, η αφαίρεση του κάθε παλμού προκαλούσε και μείωση της σχετικής επαύξησης στο αρχικό φάσμα.

Στην εν λόγω εργασία, η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω διευκολύνθηκε με τη χρήση κώδικα σε γλώσσα Fortran, ο οποίος αναπτύχθηκε με τη συμβολή του καθηγητή Ιωάννη Ταφλαμπά. Ο κώδικας αυτός χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των παραπάνω αναφερθέντων έξι κύριων παλμών της καταγραφής, βασίστηκε στις μεθοδολογίες που προτάθηκαν από τους Μαυροειδή και Παπαγεωργίου και του Μίμογλου. Ταυτόχρονα, για λόγους σύγκρισης υπολογίστηκε για κάθε καταγραφή που αναλύθηκε και ο δείκτης παλμικότητας σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Baker (2007), αλλά και ο δείκτης παλμικότητας σύμφωνα με τη μεθοδολογία Καρδούτσου (2017).

Από την ανάλυση που έγινε προέκυψαν 530 καταγραφές με κρυφούς παλμούς. Στο παράρτημα της εργασίας αυτής παρατίθενται τα ελαστικά φάσματα της αρχικής κι απομειωμένης καταγραφής καθώς και οι χρονοϊστορίες ταχύτητας και ο εκάστοτε σημαντικός παλμός για 110 καταγραφές οι οποίες εμφάνιζαν τις μεγαλύτερες απαιτήσεις πλαστιμότητας.

Στην συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα για 4 χαρακτηριστικές καταγραφές προκειμένου να καταστούν έκδηλα τα όσα περιγράφηκαν ανωτέρω. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την μελέτη αυτή είναι πως υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος καταγραφών, που ενώ δεν περιέχουν κυρίαρχους παλμούς, εντούτοις παρουσιάζουν «κρυφούς παλμούς», των οποίων το παλμικό περιεχόμενο προκαλεί επαυξήσεις στο ελαστικό φάσμα στην περιοχή μεσαίων και μεγάλων περιόδων και οι οποίοι σχετίζονται και με τις μεγάλες απαιτήσεις πλαστιμότητας, προκαλώντας αποτελέσματα όμοια με εκείνα που προσδιορίστηκαν από τον Baker (2007), για την περίπτωση που έχουμε παλμικές καταγραφές. Ουσιαστικά σε αυτές τις καταγραφές, υπάρχει κάποιος παλμός (ο οποίος μπορεί να είναι οποιοσδήποτε από τους 6 παλμούς), ο οποίος καθορίζει τις μεγάλες απαιτήσεις πλαστιμότητας.

Υπάρχουν δύο περιπτώσεις για τον παλμό αυτό:

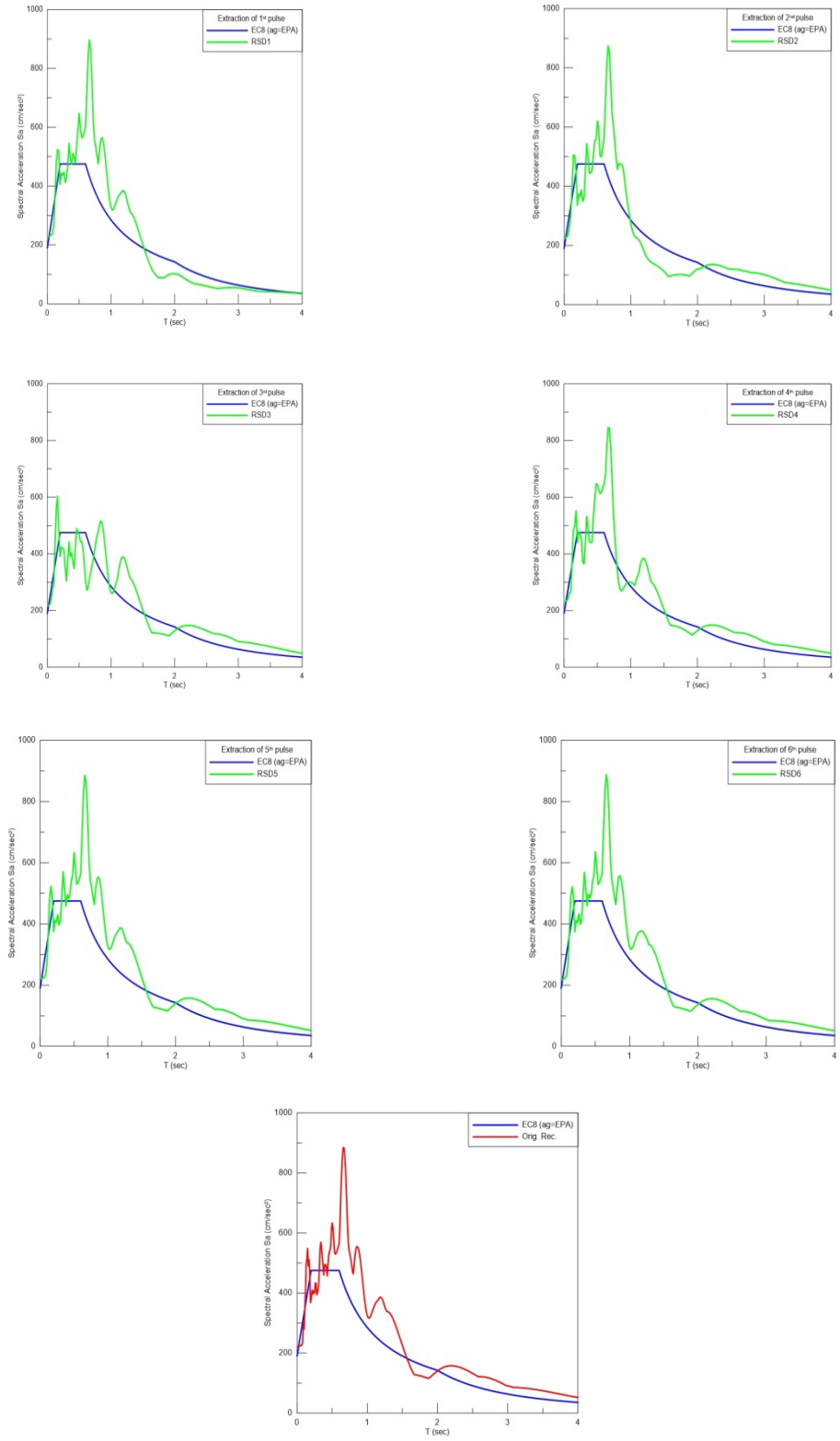
α) Η καταγραφή να περιέχει πολλούς παλμούς και ένας από αυτούς (σύντομης διάρκειας) να προκαλεί τις μεγάλες απαιτήσεις σε πλαστιμότητα ή β) να υπάρχει μέσα στην καταγραφή ένας παλμός με μεγάλη διάρκεια και το εύρος αυτού να είναι μικρότερο από το συνολικό εύρος της καταγραφής (ο παλμός αυτός δεν αντιστοιχεί στο μέγιστο εύρος της καταγραφής αλλά αφήνει τις κορυφές απ' έξω). Στην περίπτωση αυτή την τελευταία, ενώ δεν έχουμε καθαρό και εμφανή παλμό στη χρονοϊστορία, έχουμε όμως γνώση ότι υπάρχει μέσα σε αυτή ένα παλμικό στοιχείο το οποίο επηρεάζει σημαντικά την πλαστιμότητα, καθώς αυτό γίνεται εμφανές στο συχνοτικό περιεχόμενο της καταγραφής, δηλαδή στο φάσμα της καταγραφής. Το στοιχείο που μας δείχνει την ύπαρξη παλμικού στοιχείου εντός της καταγραφής είναι η κωδωνοειδής επαύξηση ή οι κωδωνοειδής επαυξήσεις του φάσματος της καταγραφής. Έτσι, η παλμική συμπεριφορά προκύπτει από το φάσμα της καταγραφής, το οποίο μειώνεται εκθετικά, όπως και το

φάσμα του Ευρωκώδικα, όμως παρουσιάζει και μια κωδωνοειδή επαύξηση, περίπου στο ήμισυ της περιόδου του παλμού. Η μεγάλη απαίτηση πλαστιμότητας σε αυτές τις καταγραφές παρατηρείται στις περιοχές λίγο πριν την κωδωνοειδή επαύξηση στο φάσμα, λόγω του γεγονότος ότι η περίοδος επιμηκύνεται εξαιτίας της ανελαστικής συμπεριφοράς. Έτσι, η υπόθεση ίσων ελαστικών και ανελαστικών μετατοπίσεων στην περιοχή της επαύξησης που εξετάζεται, δεν είναι βέβαιο ότι ισχύει.

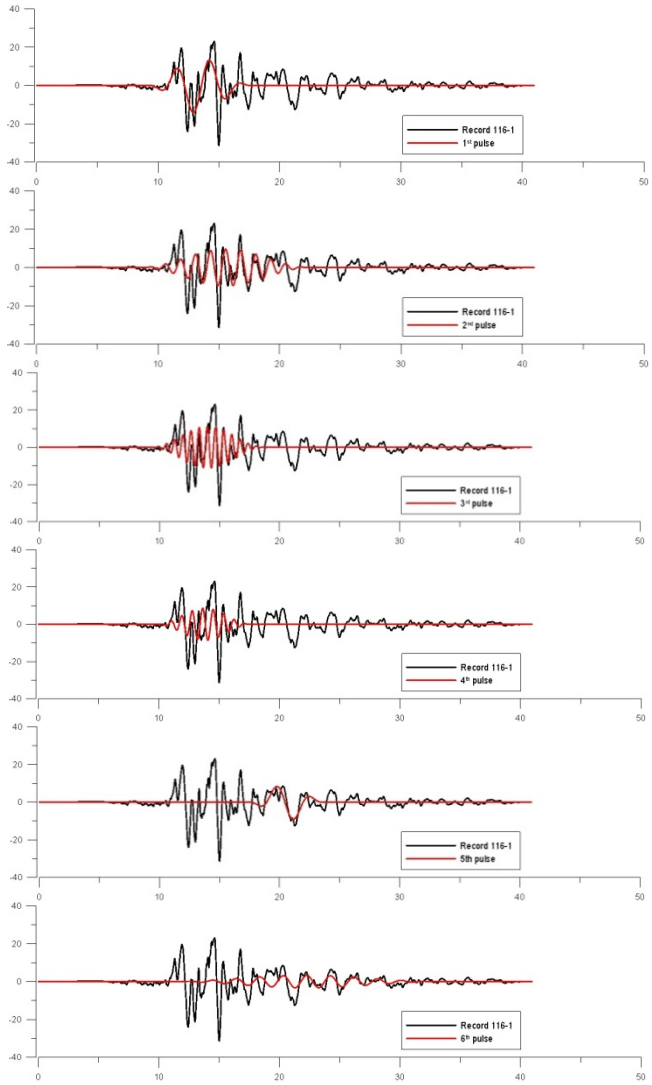
Στη συνέχεια, παραθέτουμε για 4 καταγραφές που παρουσίασαν κρυφούς σημαντικούς παλμούς τα εξής:

a) Διάγραμμα EC8 – Residual Pulse $_{(i)}$ (cm/sec^2) σε συνάρτηση με την Period (sec):Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται το φάσμα EC8, που είναι το φάσμα του Ευρωκώδικα και η επιτάχυνση του Residual Pulse $_{(i)}$, δηλαδή επιτάχυνση της αρχικής καταγραφής αφού αφαιρεθεί ο εκάστοτε i παλμός.
b) Διάγραμμα Velocity Time History (cm/sec) – Time (s) : Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται η αρχική καταγραφή και η χρονοϊστορία της ταχύτητας για κάθε εξαγόμενο παλμό.
c) Διάγραμμα Sa (cm/sec^2) – Period (sec): Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται η αρχική καταγραφή και η επιτάχυνση της αρχικής καταγραφής μείον τον σημαντικό παλμό.
d) Διάγραμμα Velocity Time History (cm/sec) – Time (s) : Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται η αρχική καταγραφή και η χρονοϊστορία της ταχύτητας για τον σημαντικό παλμό.
e) Ελαστικό Φάσμα της καταγραφής
f) Ανελαστικό φάσμα της καταγραφής

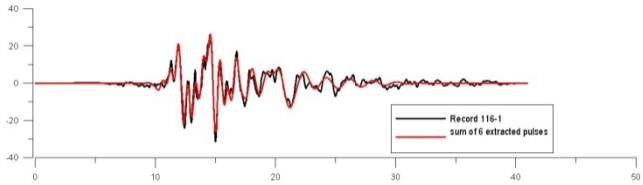
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1116-1:



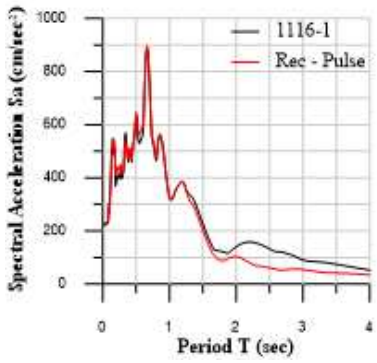
Σχήμα 7-1: Φάσματα EC8 μαζί με τον κάθε εξαγόμενο παλμό i= 1 έως 6 και Φάσμα της επιτάχυνσης της αρχικής καταγραφής 1116-1 με το φάσμα του EC8.



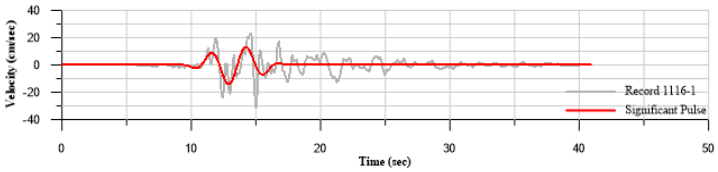
Σχήμα 7-2:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της καταγραφής 1116-1 μαζί με τον κάθε εξαγόμενο παλμό



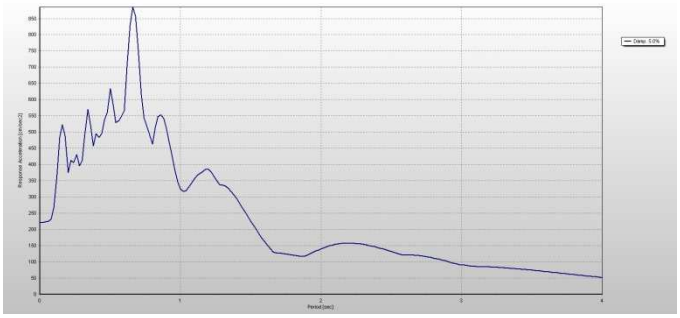
Σχήμα 7-3:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της καταγραφής 1116-1 μαζί με το σύνολο των εξαγόμενων παλμών



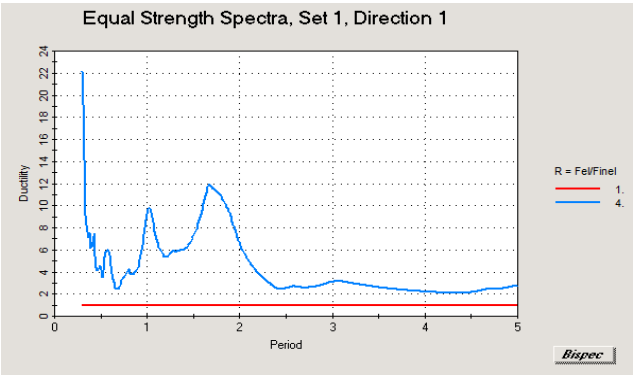
Σχήμα 7-4:Επιτάχυνση αρχικής καταγραφής 1116-1 και επιτάχυνση αρχικής καταγραφής μείον την επιτάχυνση του σημαντικού παλμού αυτής.



Σχήμα 7-5:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της αρχικής καταγραφής1116-1 και χρονοϊστορία της ταχύτητας για τον σημαντικό παλμό.

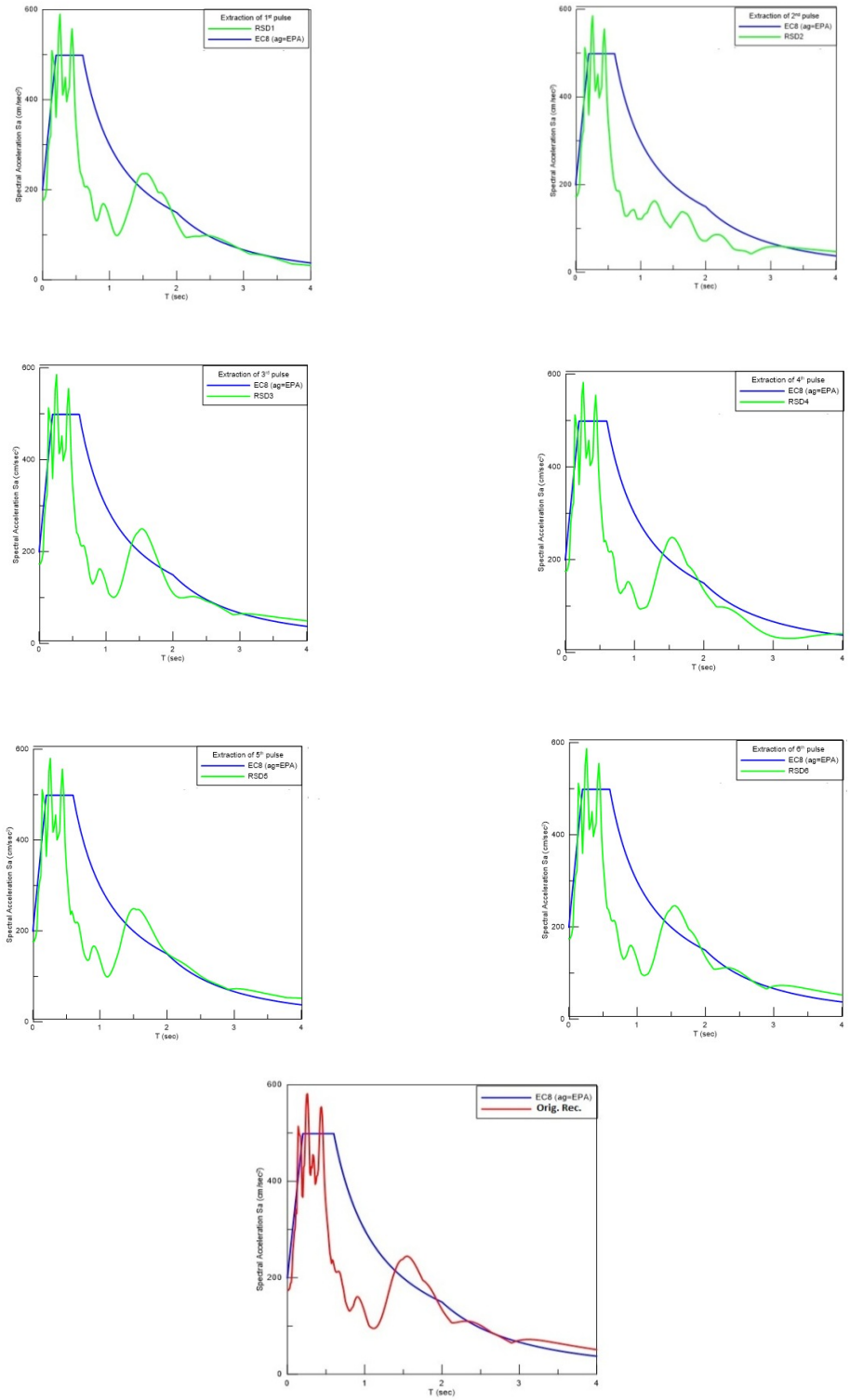


Σχήμα 7-6:Ελαστικό Φάσμα της καταγραφής 1116-1

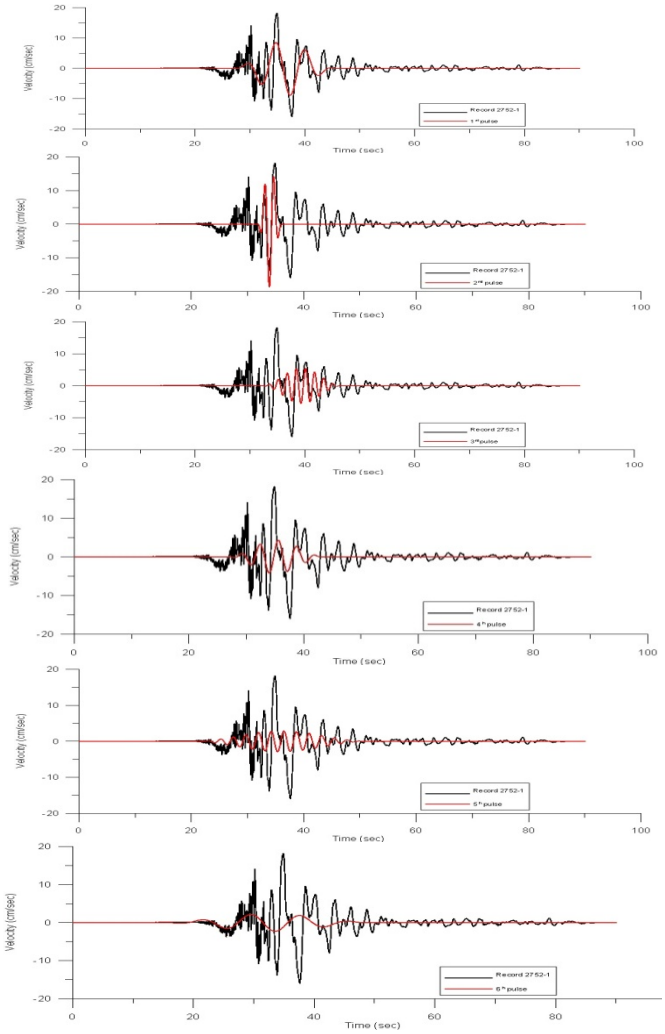


Σχήμα 7-7:Ανελαστικό Φάσμα της καταγραφής 1116-1

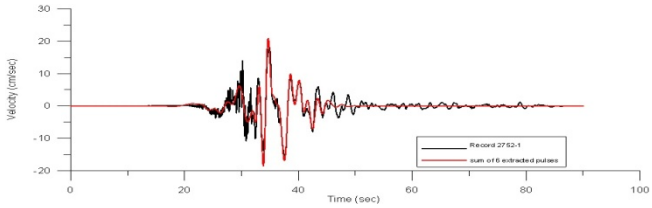
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 2752-1:



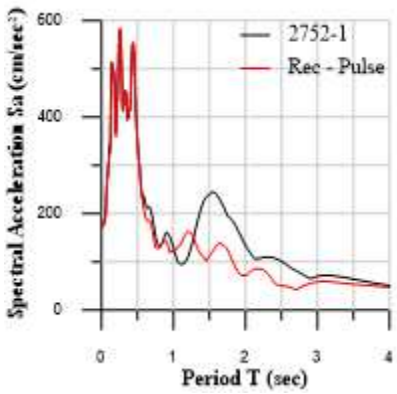
Σχήμα 7-8:Φάσματα EC8 μαζί με τον κάθε εξαγόμενο παλμό i= 1 έως 6 και Φάσμα της επιτάχυνσης της αρχικής καταγραφής 2752-1 με το φάσμα του EC8.



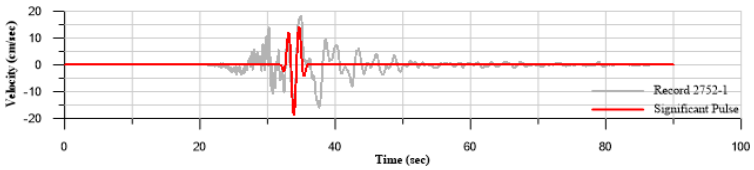
Σχήμα 7-9: Χρονοϊστορία της ταχύτητας της καταγραφής 2752-1 μαζί με τον κάθε εξαγόμενο παλμό



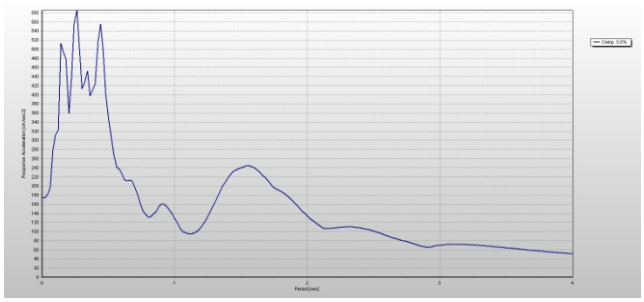
Σχήμα 7-10:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της καταγραφής 2752-1 μαζί με το σύνολο των εξαγόμενων παλμών



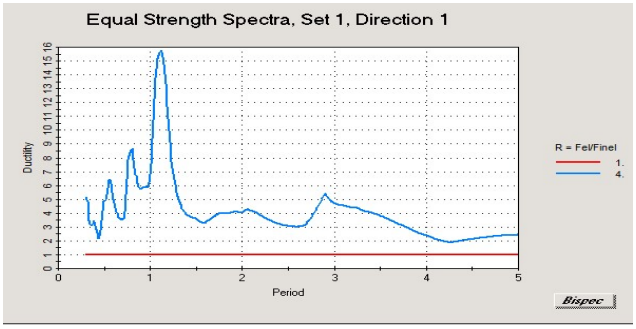
Σχήμα 7-11:Επιτάχυνση αρχικής καταγραφής 2752-1 και επιτάχυνση της καταγραφής μείον την επιτάχυνση του σημαντικού παλμού αυτής.



Σχήμα 7-12:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της αρχικής καταγραφής 2752-1 και χρονοϊστορία της ταχύτητας για τον σημαντικό παλμό

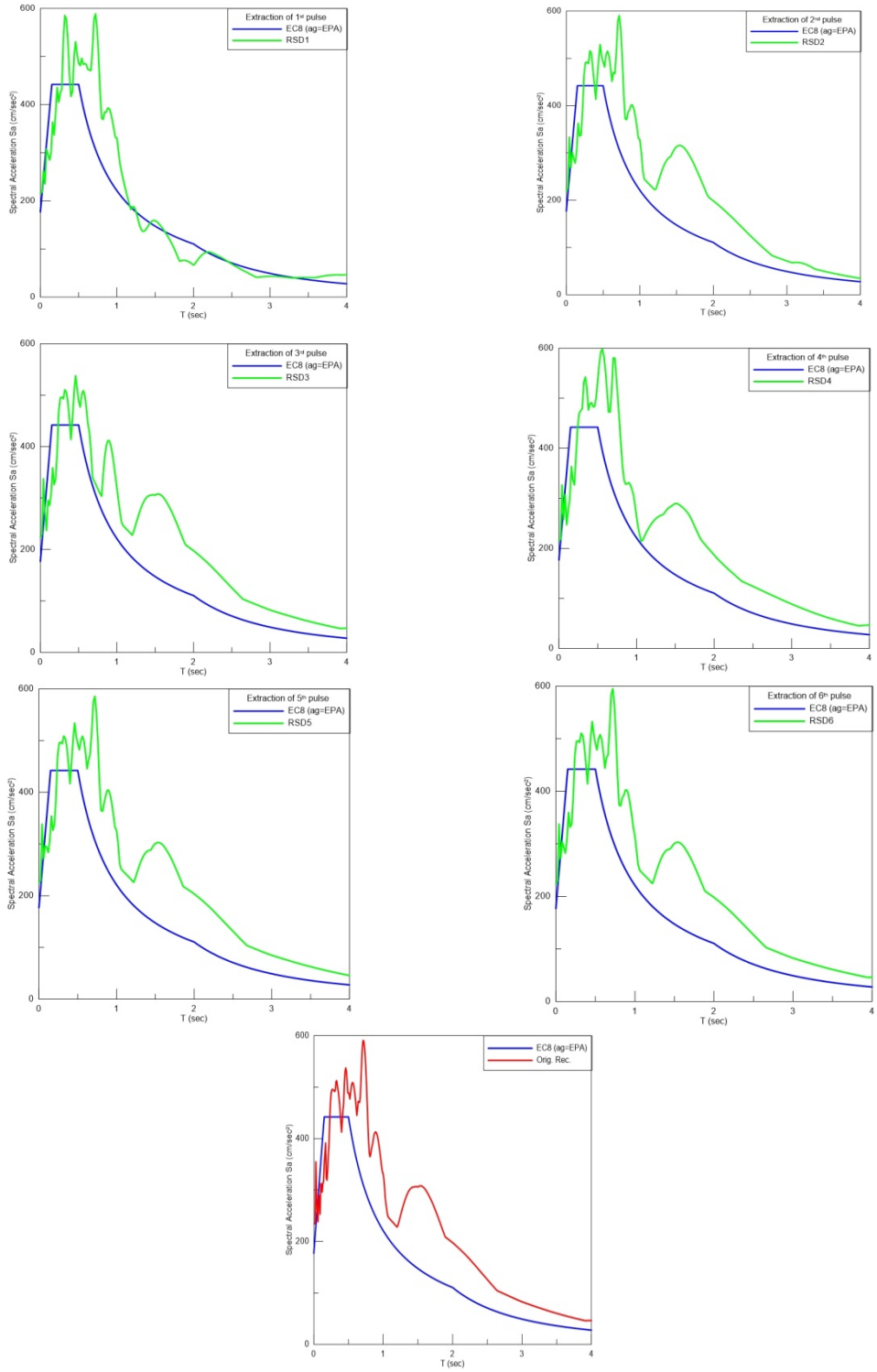


Σχήμα 7-13:Ελαστικό Φάσμα της καταγραφής 2752-1

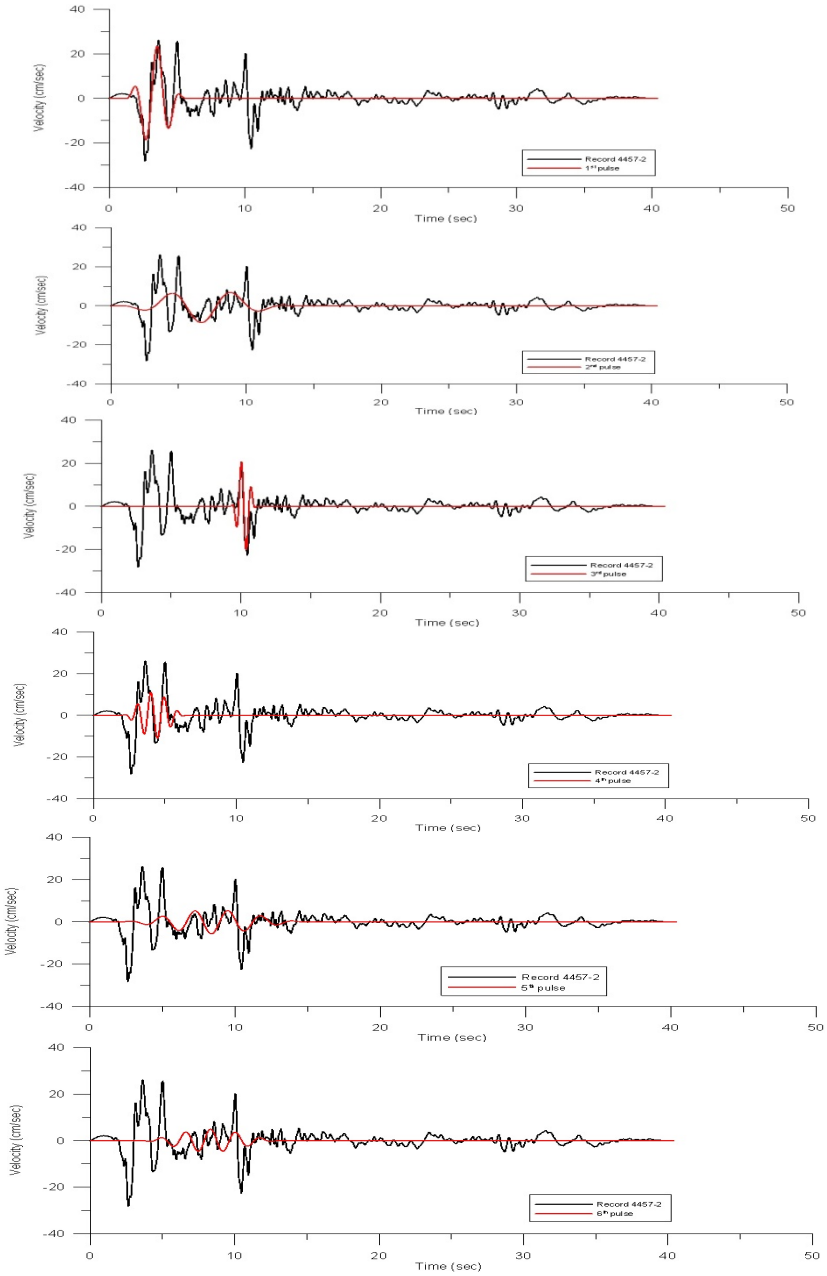


Σχήμα 7-14:Ανελαστικό Φάσμα της καταγραφής 2752-1

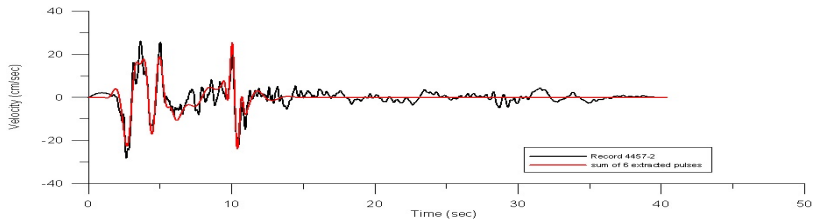
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 4457-2:



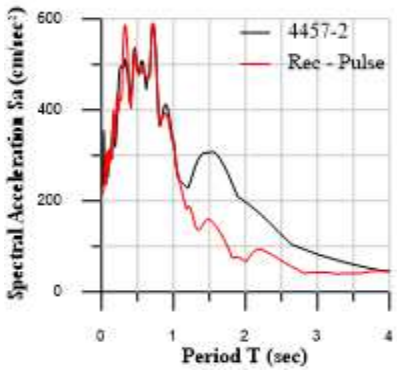
Σχήμα 7-15:Φάσματα EC8 μαζί με τον κάθε εξαγόμενο παλμό i= 1 έως 6 και Φάσμα της επιτάχυνσης της αρχικής καταγραφής 4457-2 με το φάσμα του EC8.



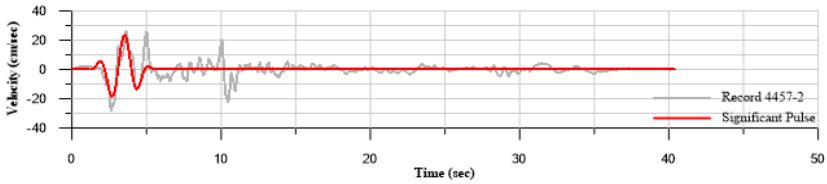
Σχήμα 7-16:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της καταγραφής 4457-2 μαζί με τον κάθε εξαγόμενο παλμό



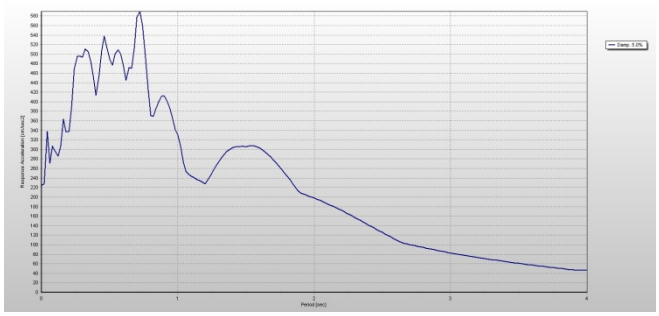
Σχήμα 7-17:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της καταγραφής 4457-2 μαζί με σύνολο των εξαγόμενων παλμών



Σχήμα 7-18:Επιτάχυνση αρχικής καταγραφής 4457-2 και επιτάχυνση της αρχικής καταγραφής μείον την επιτάχυνση του σημαντικού παλμού αυτής.



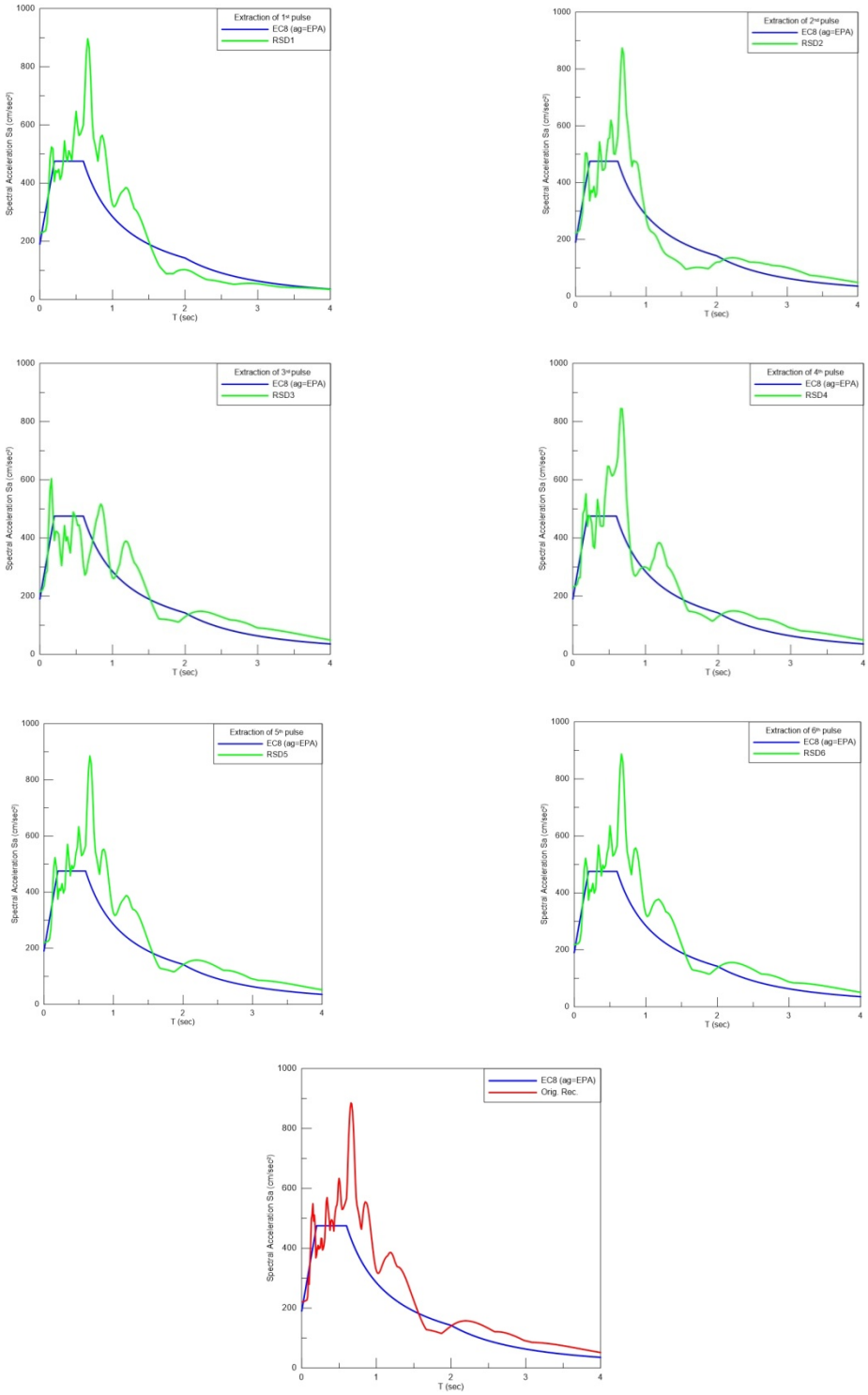
Σχήμα 7-19:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της αρχικής καταγραφής 4457-2 και χρονοϊστορία της ταχύτητας για τον σημαντικό παλμό.



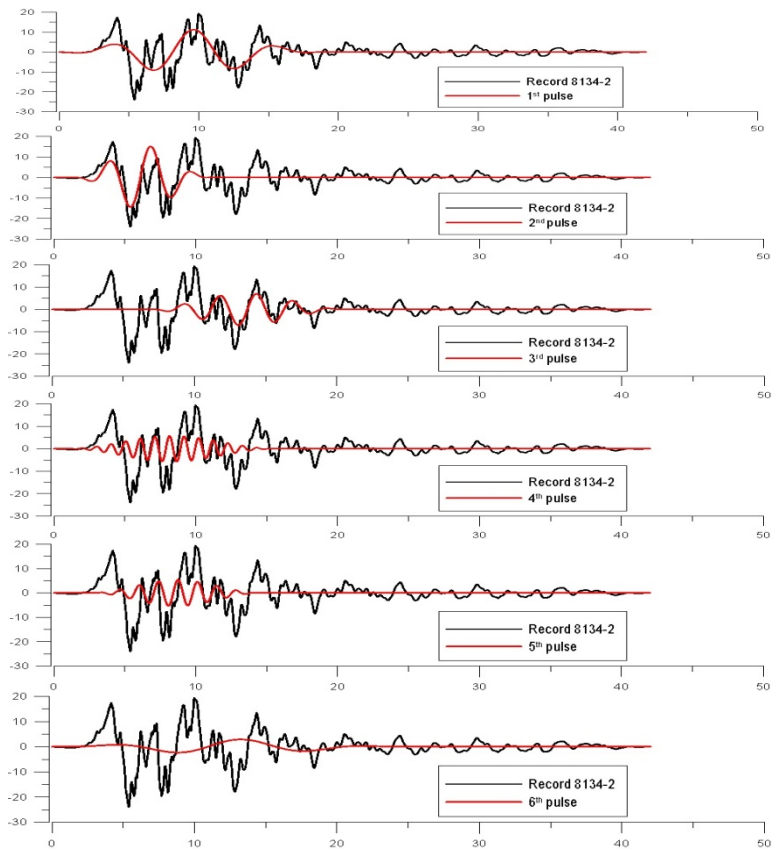
Σχήμα 7-20:Ελαστικό Φάσμα της καταγραφής 4457-2

Σχήμα 7-21:Ανελαστικό Φάσμα της καταγραφής 4457-2

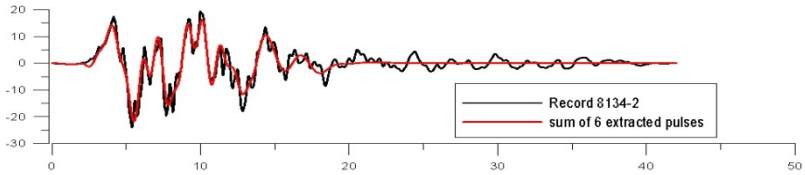
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 8134-2:



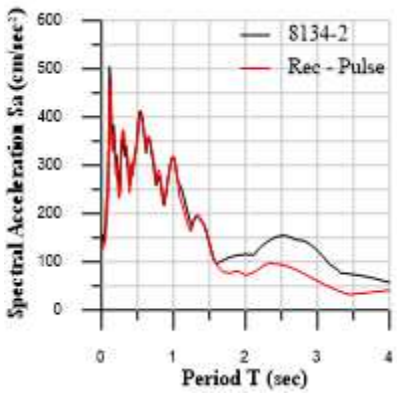
Σχήμα 7-22:Φάσματα EC8 μαζί με τον κάθε εξαγόμενο παλμό i= 1 έως 6 και Φάσμα της επιτάχυνσης της αρχικής καταγραφής 8134-2 με το φάσμα του EC8.



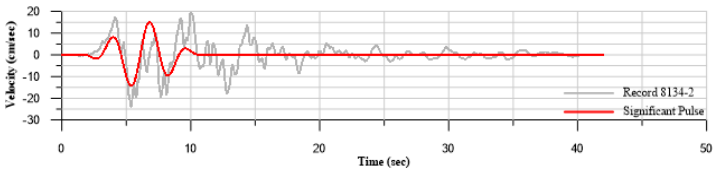
Σχήμα 7-23:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της καταγραφής 8134-2 μαζί με τον κάθε εξαγόμενο παλμό



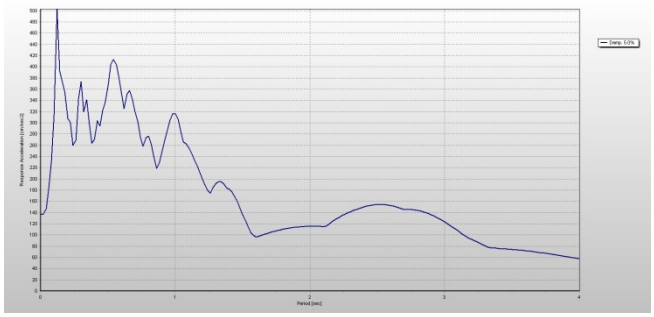
Σχήμα 7-24:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της καταγραφής 8134-2 μαζί με το σύνολο των εξαγόμενων παλμών



Σχήμα 7-25:Επιτάχυνση αρχικής καταγραφής 8134-2 και επιτάχυνση της αρχικής καταγραφής μείον την επιτάχυνση του σημαντικού παλμού αυτής.



Σχήμα 7-26:Χρονοϊστορία της ταχύτητας της αρχικής καταγραφής 8134-2 και χρονοϊστορία της ταχύτητας για τον σημαντικό παλμό.

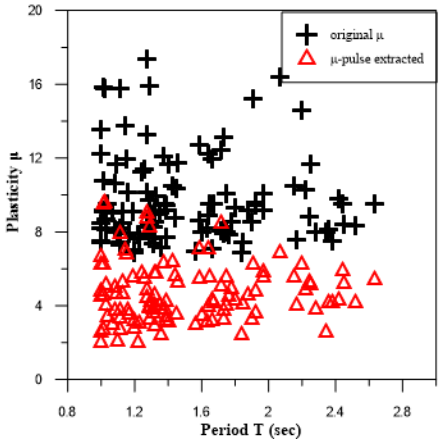


Σχήμα 7-27:Ελαστικό Φάσμα της καταγραφής 8134-2

Σχήμα 7-28:Ανελαστικό Φάσμα της καταγραφής 8134-2

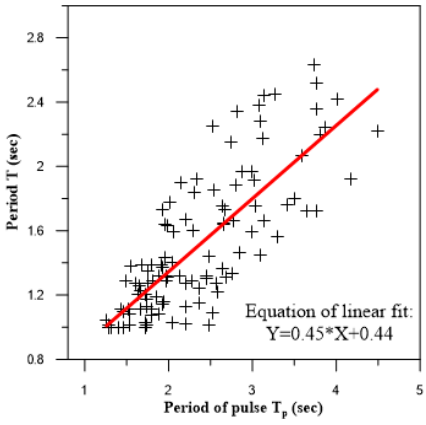
Κλείνοντας, παρακάτω παρατίθενται δύο διαγράμματα μ-Τ και Τ-T_p , προκειμένου να γίνει αντιληπτή η σχέση συσχέτισης των μεγεθών της πλαστιμότητας μ, της περιόδου Τ και της περιόδου T_p των παλμών.

Από το διάγραμμα για την πλαστιμότητα μ που ακολουθεί, παρατηρούμε σημαντική απομείωση των πλαστιμοτήτων, αφού αφαιρεθεί ο σημαντικός παλμός, δηλαδή ο παλμός είναι καθοριστικός για την πλαστιμότητα.



Σχήμα 7-29:Διάγραμμα μ-Τ

Ενώ από το διάγραμμα για τις περιόδους που ακολουθεί συμπεραίνουμε ότι υπάρχει συσχέτιση περιόδου Τ της καταγραφής με την περίοδο του παλμού T_p και επίσης Ο παλμός επηρεάζει περιόδους μικρότερες από T_p (~0.5 T_p).



Σχήμα 7-30:Διάγραμμα Τ-T_p

8 Βιβλιογραφία

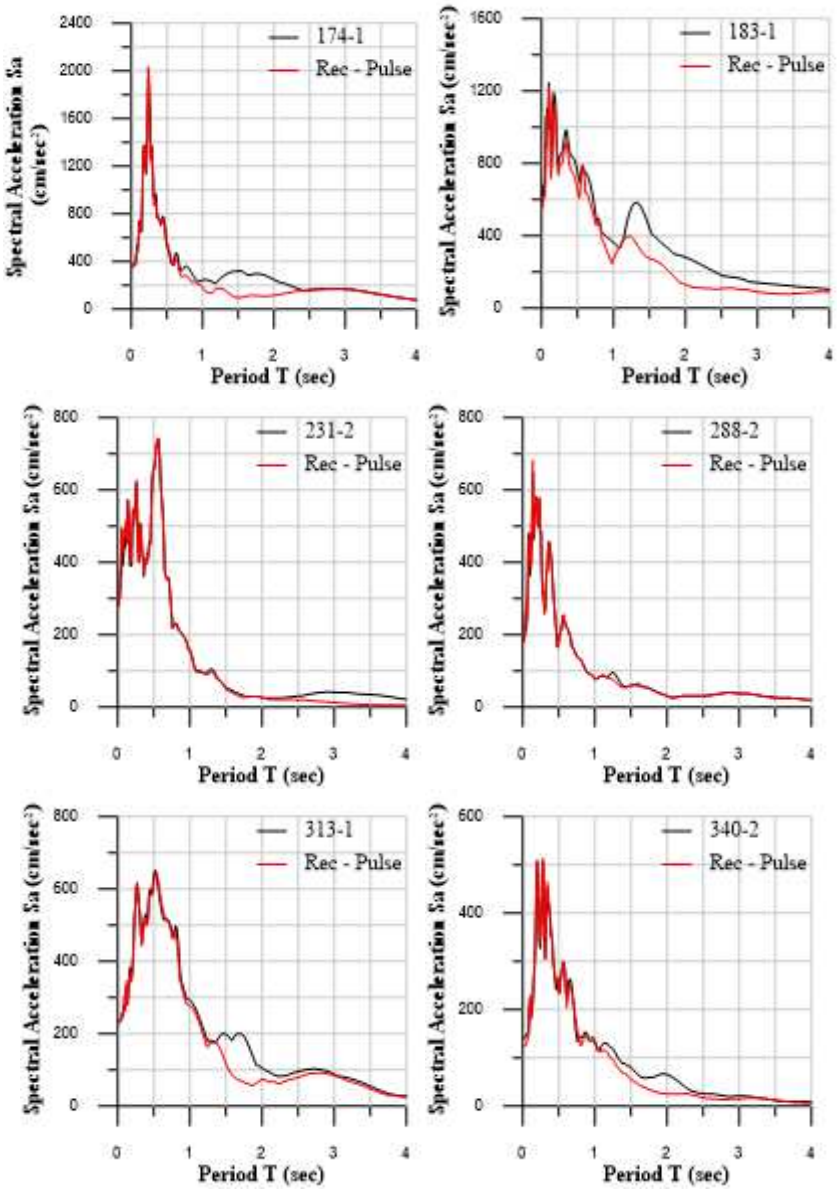
1. *Shrey K.Shahi, Jack W. Baker (2011). " An Empirically Calibrated Framework for Including the Effects of Near-Fault Directivity in Probabilistic Seismic Hazard Analysis", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, No. 2, pp. 742–755, April 2011, doi: 10.1785/0120100090.*
2. *Jack W. Baker (2007). "Plots of identified velocity pulses", Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA*
3. *Iunio Iervolino, C.Allin Cornell (2008). "Probability of Occurrence of Velocity Pulses in Near-Source Ground Motions", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 98, No. 5, pp. 2262–2277, October 2008, doi: 10.1785/0120080033.*
4. *LI Shuang, XIE Li-li (2007). "Progress and trend on near-field problems in civil engineering", Vol.20 No.1 (105~114) ACTA SEISMOLOGICA SINICA Jan., 2007, Article ID: 1000-9116(2007)01-0105-10, doi:10.1007/s11589-007-0105-0.*
5. *Mimoglou P., Psycharis I., Taflampas I. (2014) "Explicit determination of the pulse inherent in pulse-like ground motions", School of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Athens, Greece.*
6. *Mavroeidis P. George, Papageorgiou S. Apostolos (2003). "A Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No. 3, pp. 1099–1131, June 2003.*
7. *Yuan Lu, Panagiotou Marios (2014). "Characterization and Representation of Near-Fault Ground Motions Using Cumulative Pulse Extraction with Wavelet Analysis", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 104, No. 1, pp. 410–426, February 2014, doi: 10.1785/0120130031.*
8. *Jack W. Baker (2007). "Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions*
   Using Wavelet Analysis", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, No. 5, pp. 1486–1501, October 2007, doi: 10.1785/0120060255.
9. *Helmut Krawinkler, Babak Alavi and Farzin Zareian (2005). "**IMPACT OF NEAR-FAULT PULSES ONENGINEERING DESIGN**" P. G lkan and J.G. Anderson (eds.), Directions in Strong Motion Instrumentation, 83–106, © 2005 Springer. Printed in the Netherlands.*
10. *Kardoutsou V., Taflampas I. And Psycharis I. (2017). "A New Pulse Indicator for the Classification of Ground Motions", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 107, No. 3, pp. –, June 2017, doi: 10.1785/0120160301.*
11. *Maiatakis Ch. , Taflapas I. And Spryrakos C. (2008). "IDENTIFICATION OF NEAR-FAULT EARTHQUAKE RECORD CHARACTERISTICS", The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.*
12. *Amr S. Elnnashai, Luigi Di Sarno (2008). "FUNDAMENTALS OF EARTHQUAKE ENGINEERING", Εκδόσεις WILEY, A john Wiley & Sons, Ltd, Publication.*
13. *M. Zamora & R.Riddel (2011)."**Elastic and Inelastic Response Spectra Considering Near-Fault Effects**", Journal of Earthquake Engineering, 15:5, 775-808, DOI:10.1080/13632469.2011.555058.*

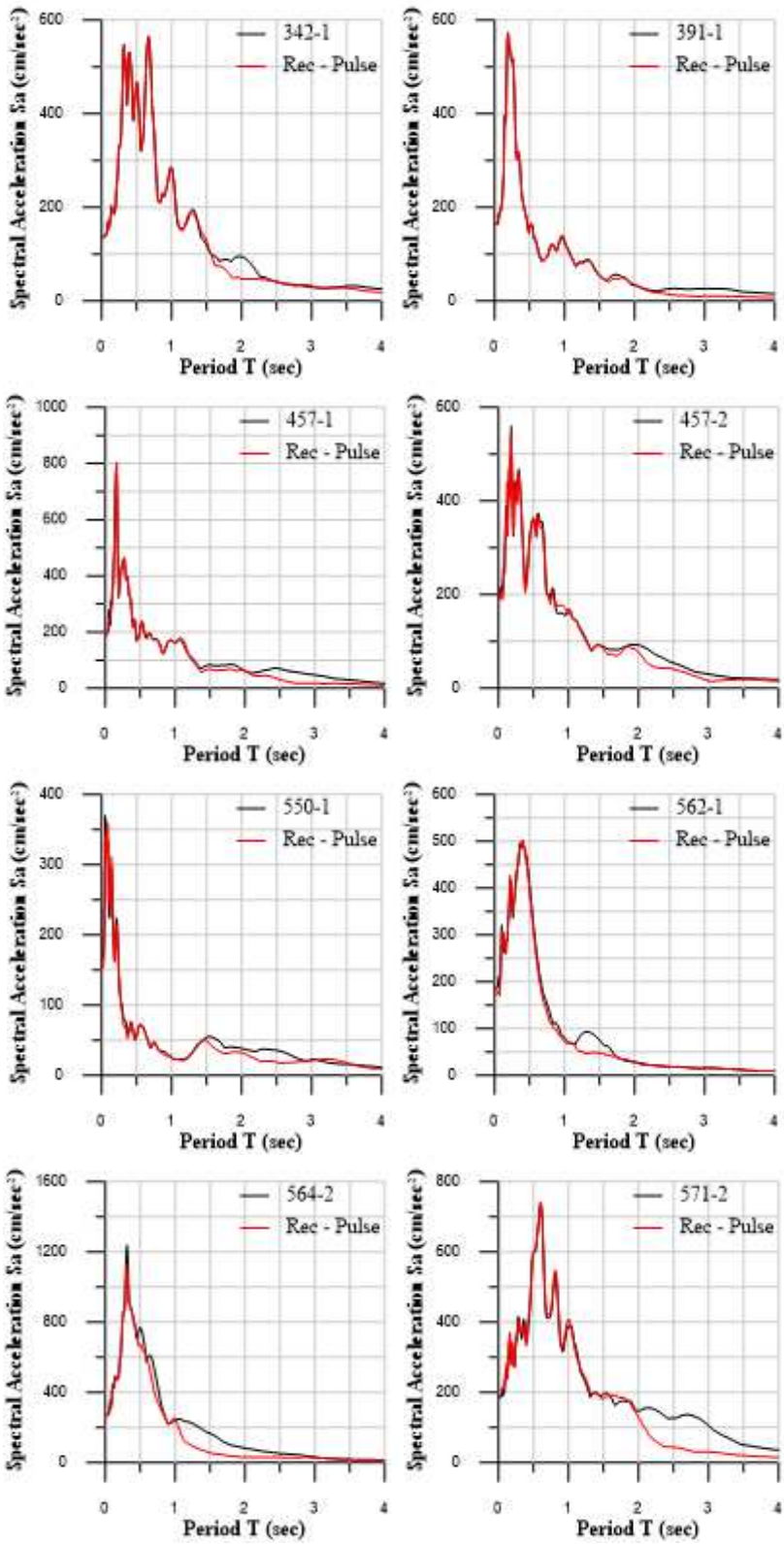
14. *Jonathan D. Bray and Andrian Rodriguez-Marek (2004). " Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24*
15. *Jorge Ruiz-Garcıa, Eduardo Miranda (2007). "Probabilistic estimation of maximum inelastic displacement demands for performance-based design", EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS Earthquake Engng Struct. Dyn. 2007;* ***36****:1235–1254 Published online 6 March 2007 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/eqe.680.*

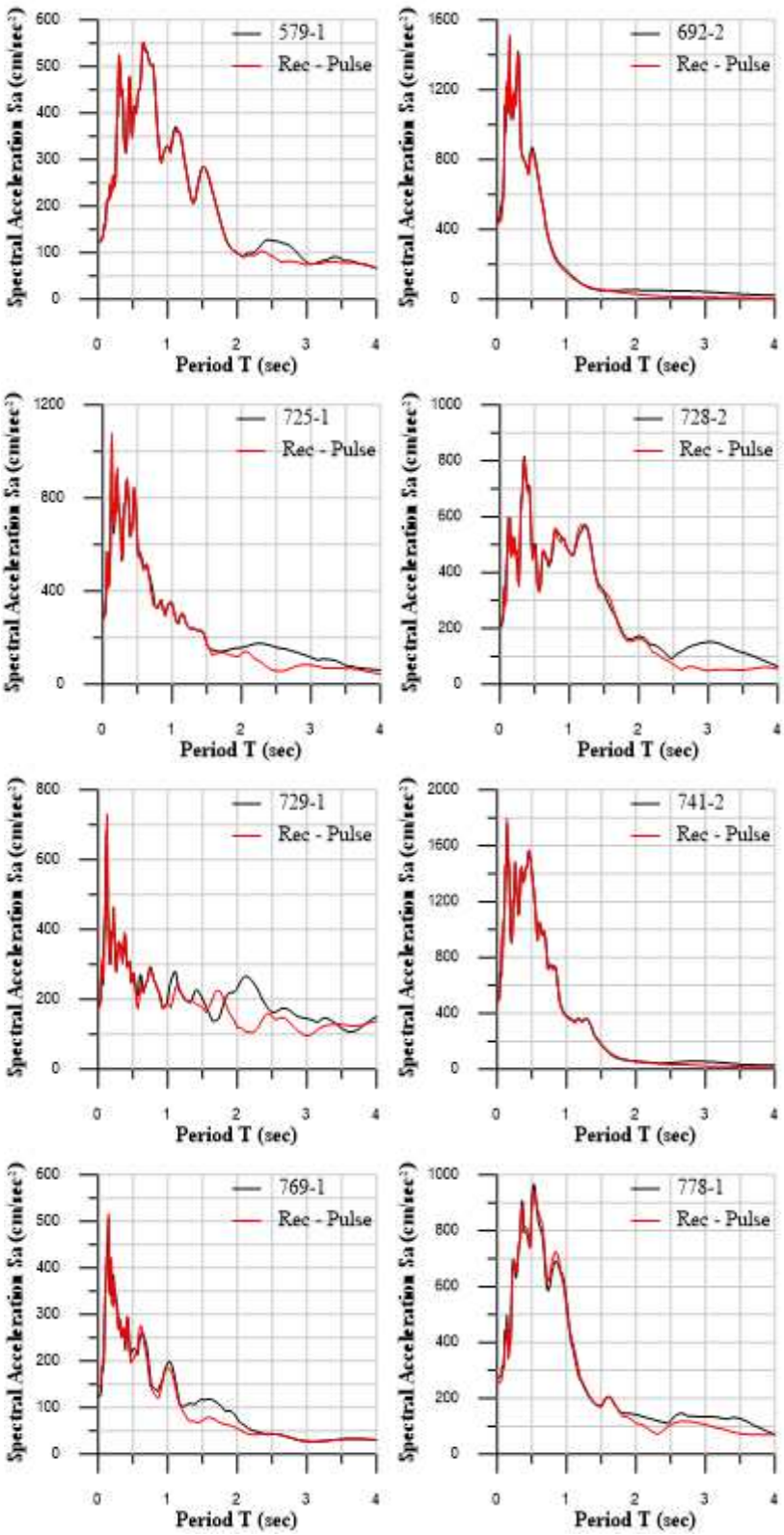
9 Παράρτημα Διαγραμμάτων

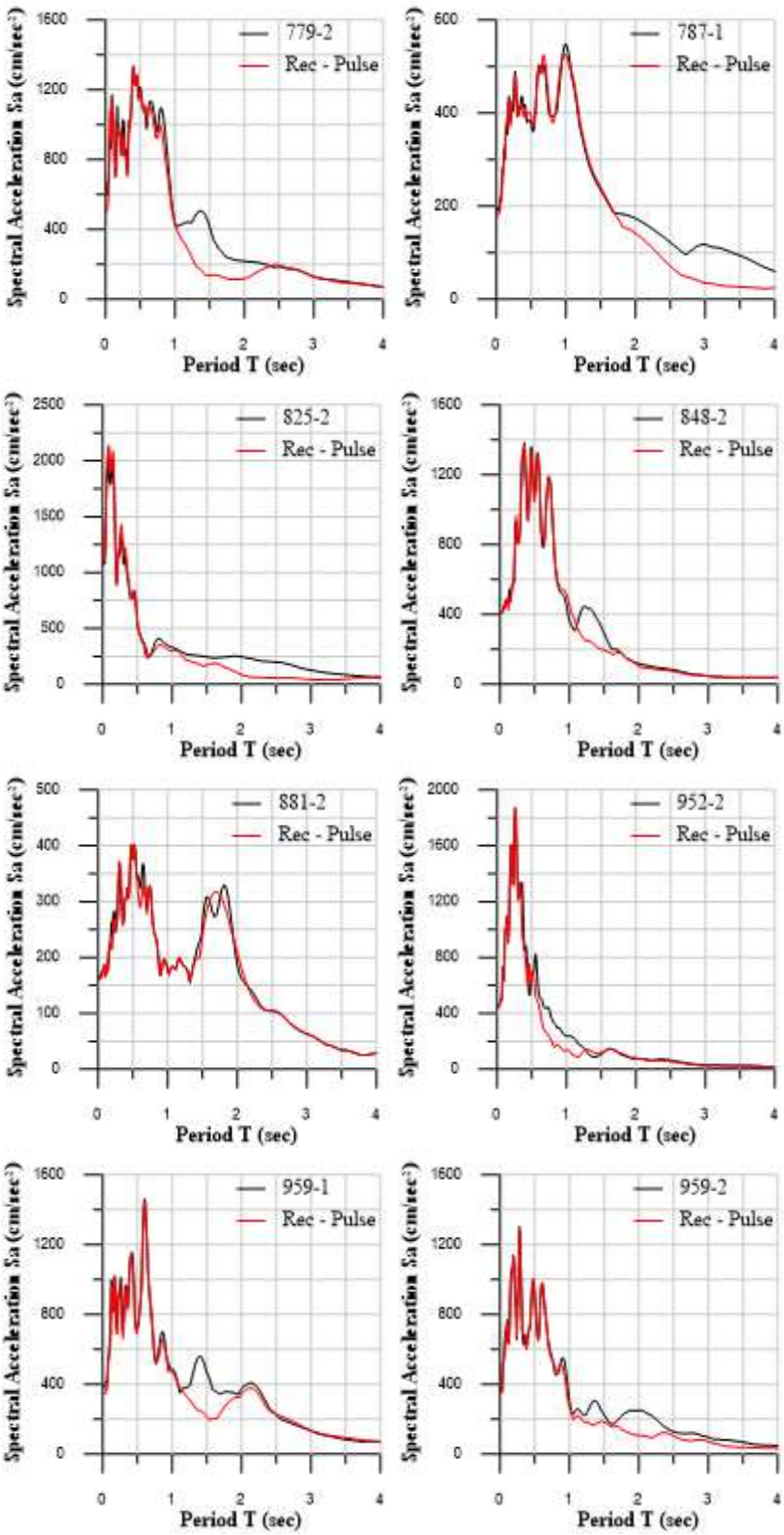
Στην συνέχεια παραθέτουμε τους πίνακες που εμπεριέχουν το σύνολο των 110 επιλεχθέντων καταγραφών, η περίοδος που εμφανίζεται η μέγιστη απαιτούμενη πλαστιμότητα κι η τιμή αυτή, ο σημαντικότερος παλμός, η περίοδος, το εύρος αυτού, ο λόγος τελικής προς αρχικής πλαστιμότητας έπειτα από την αφαίρεση του σημαντικού καθώς και οι δείκτες παλμικότητας σύμφωνα με τους Kardoutsou (2017) και Baker (2007) και τα γραφήματα για 110 καταγραφές με αυτά τα χαρακτηριστικά, που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ακόμη παρατίθενται, α) τα διαγράμματα του ελαστικού φάσματος της αρχικής καταγραφής και της απομειωμένης καταγραφής, μετά την αφαίρεση του σημαντικού παλμού, β) η χρονοϊστορία της αρχικής καταγραφής και του σημαντικού παλμού αυτής γ) τα διαγράμματα του φάσματος του EC8 και της επιτάχυνσης κάθε εξαγόμενου παλμού και δ) το ελαστικό και το ανελαστικό φάσμα για ορισμένες από τις καταγραφές που αναλύθηκαν.

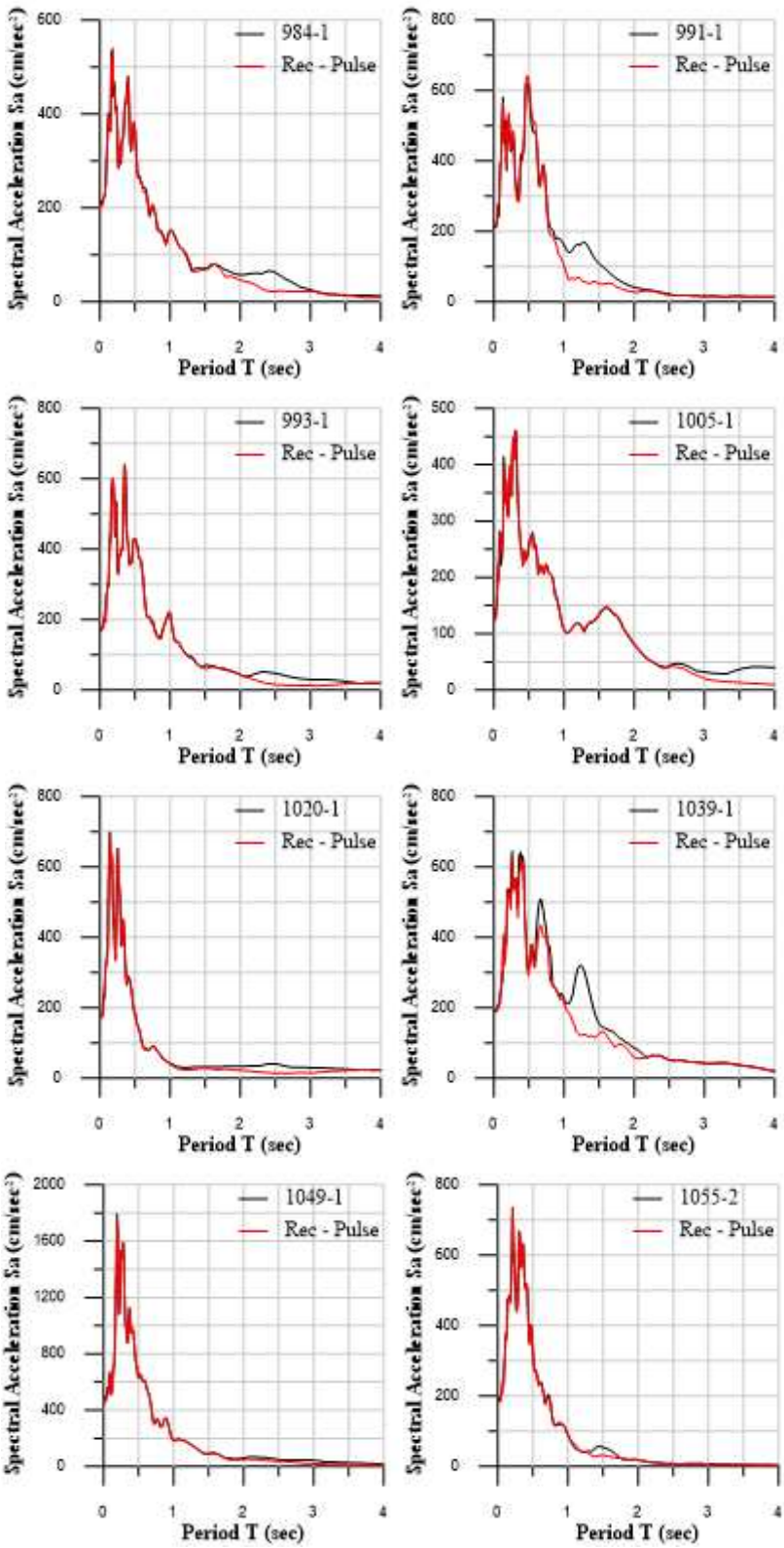
Επιτάχυνση αρχικής καταγραφής και επιτάχυνση αρχικής μείον επιτάχυνση σημαντικού παλμού

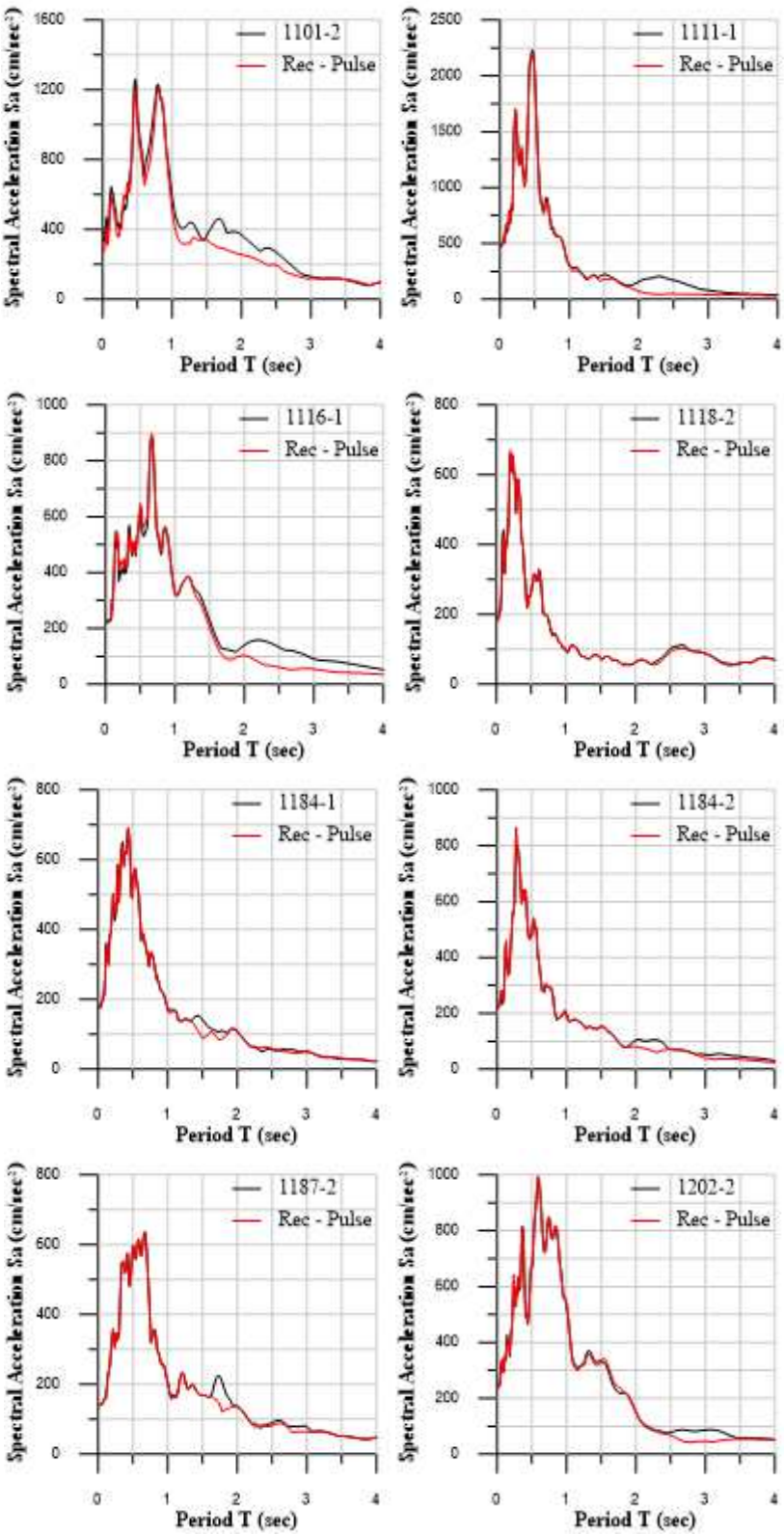


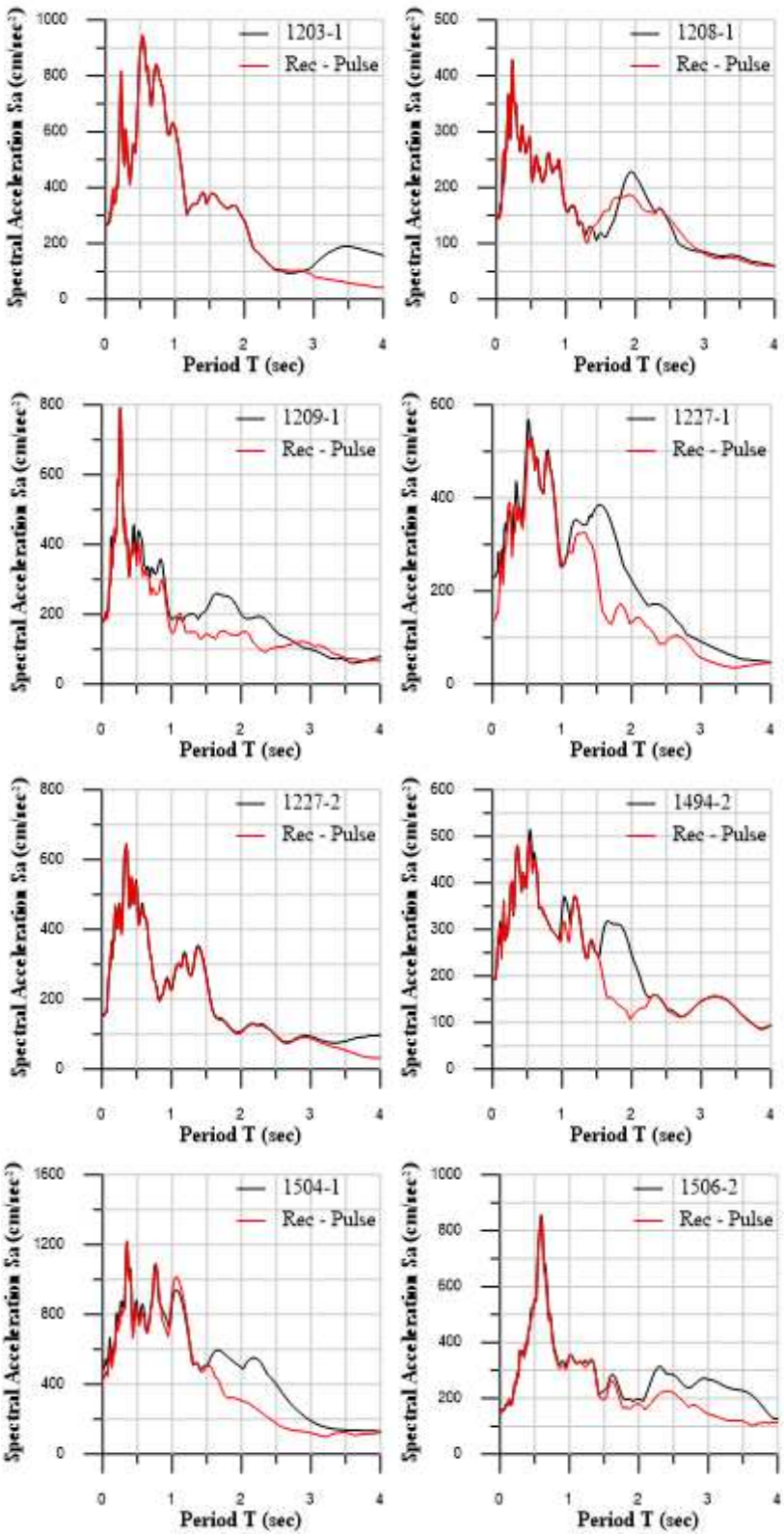

342-1
Rec - Pulse
391-1
Rec - Pulse
457-1
Rec - Pulse
457-2
Rec - Pulse
550-1
Rec - Pulse
562-1
Rec - Pulse
564-2
Rec - Pulse
571-2
Rec - Pulse
Spectral Acceleration Sa (cm/sec²)
Period T (sec)

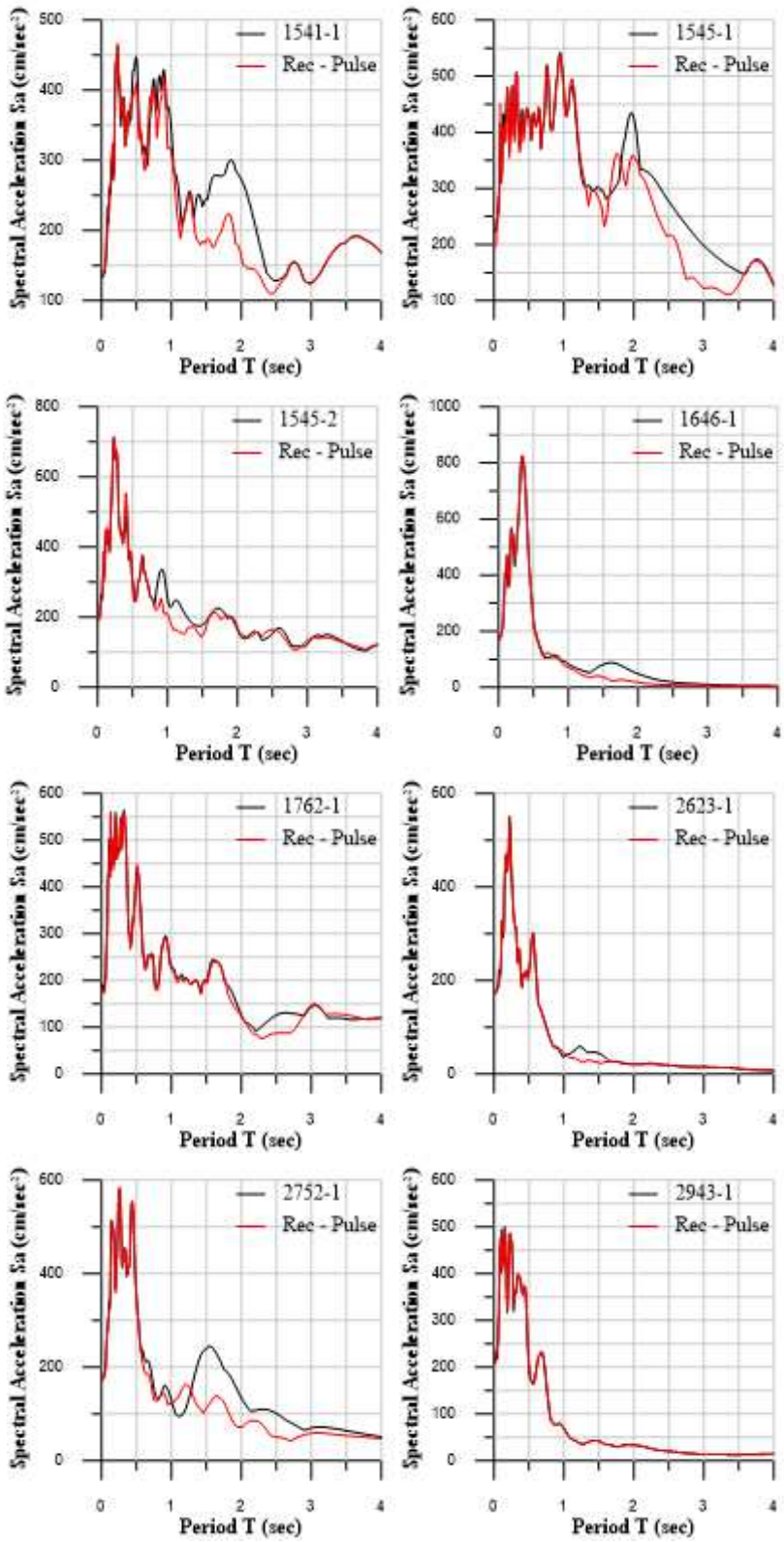

579-1
Rec - Pulse
692-2
Rec - Pulse
725-1
Rec - Pulse
728-2
Rec - Pulse
729-1
Rec - Pulse
741-2
Rec - Pulse
769-1
Rec - Pulse
778-1
Rec - Pulse
Spectral Acceleration Sa (cm/sec²)
Period T (sec)

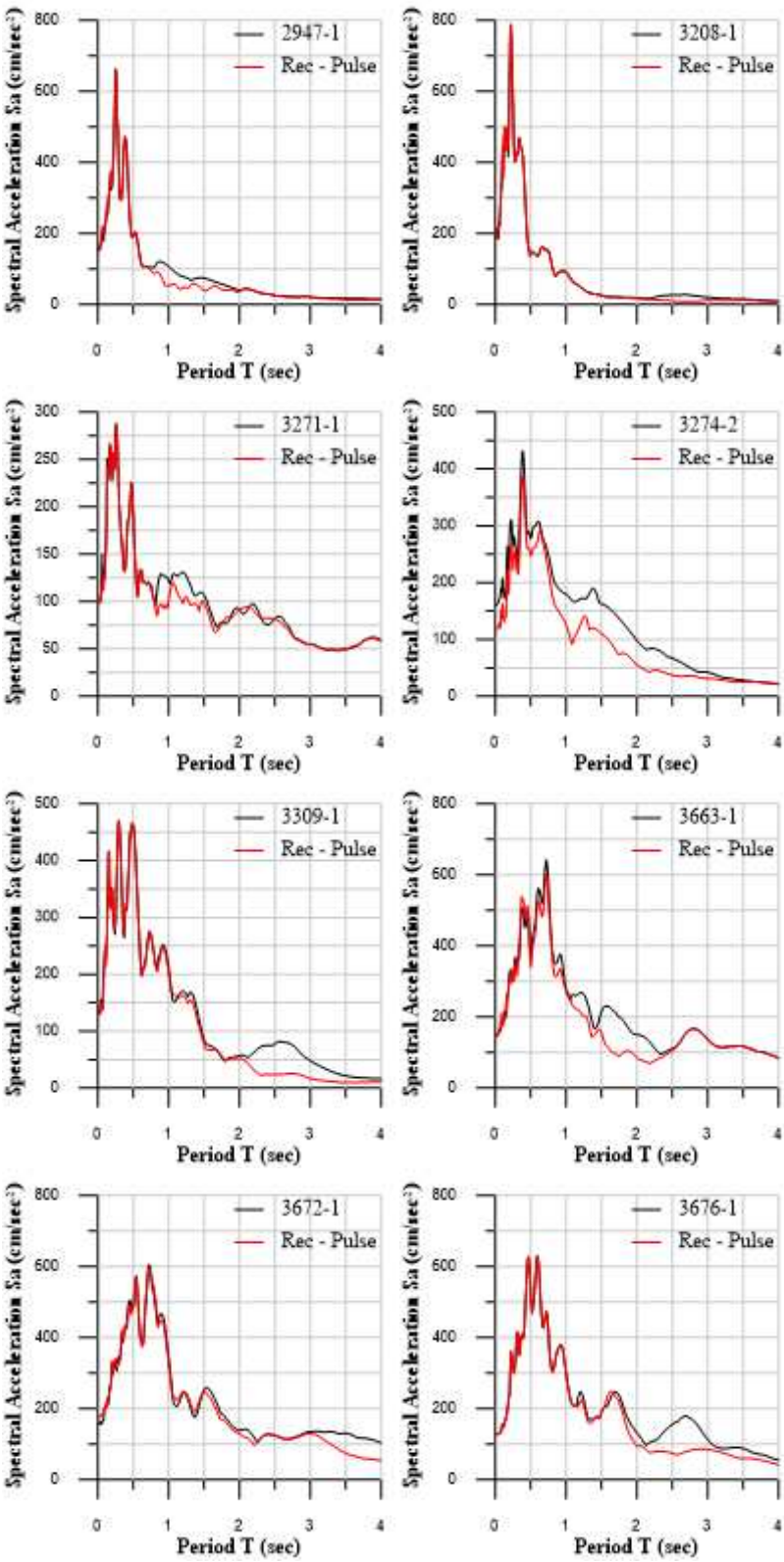

779-2
Rec - Pulse
787-1
Rec - Pulse
825-2
Rec - Pulse
848-2
Rec - Pulse
881-2
Rec - Pulse
952-2
Rec - Pulse
959-1
Rec - Pulse
959-2
Rec - Pulse
Spectral Acceleration Sa (cm/sec²)
Period T (sec)

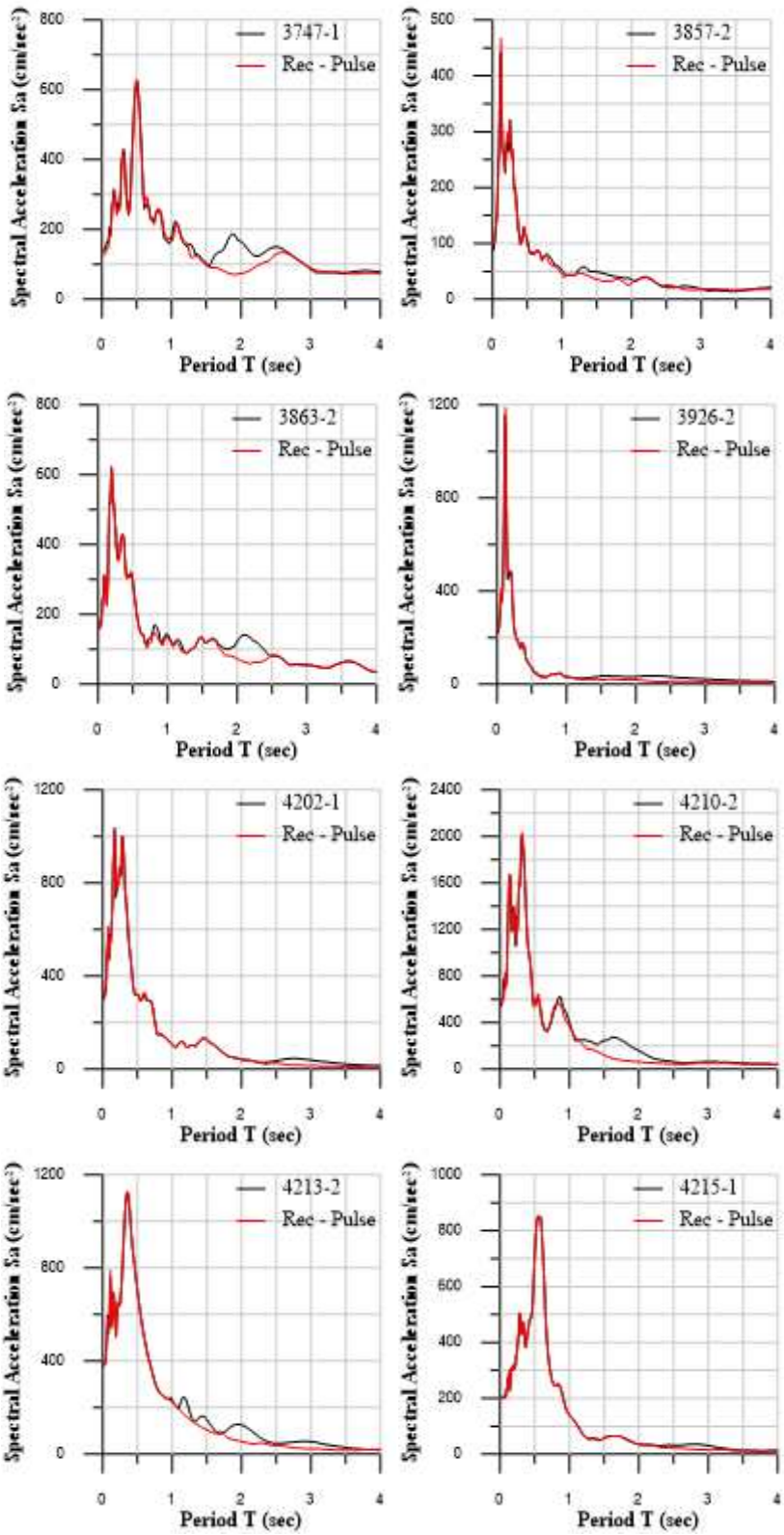

984-1
Rec - Pulse
991-1
Rec - Pulse
993-1
Rec - Pulse
1005-1
Rec - Pulse
1020-1
Rec - Pulse
1039-1
Rec - Pulse
1049-1
Rec - Pulse
1055-2
Rec - Pulse
Spectral Acceleration Sa (cm/sec²)
Period T (sec)

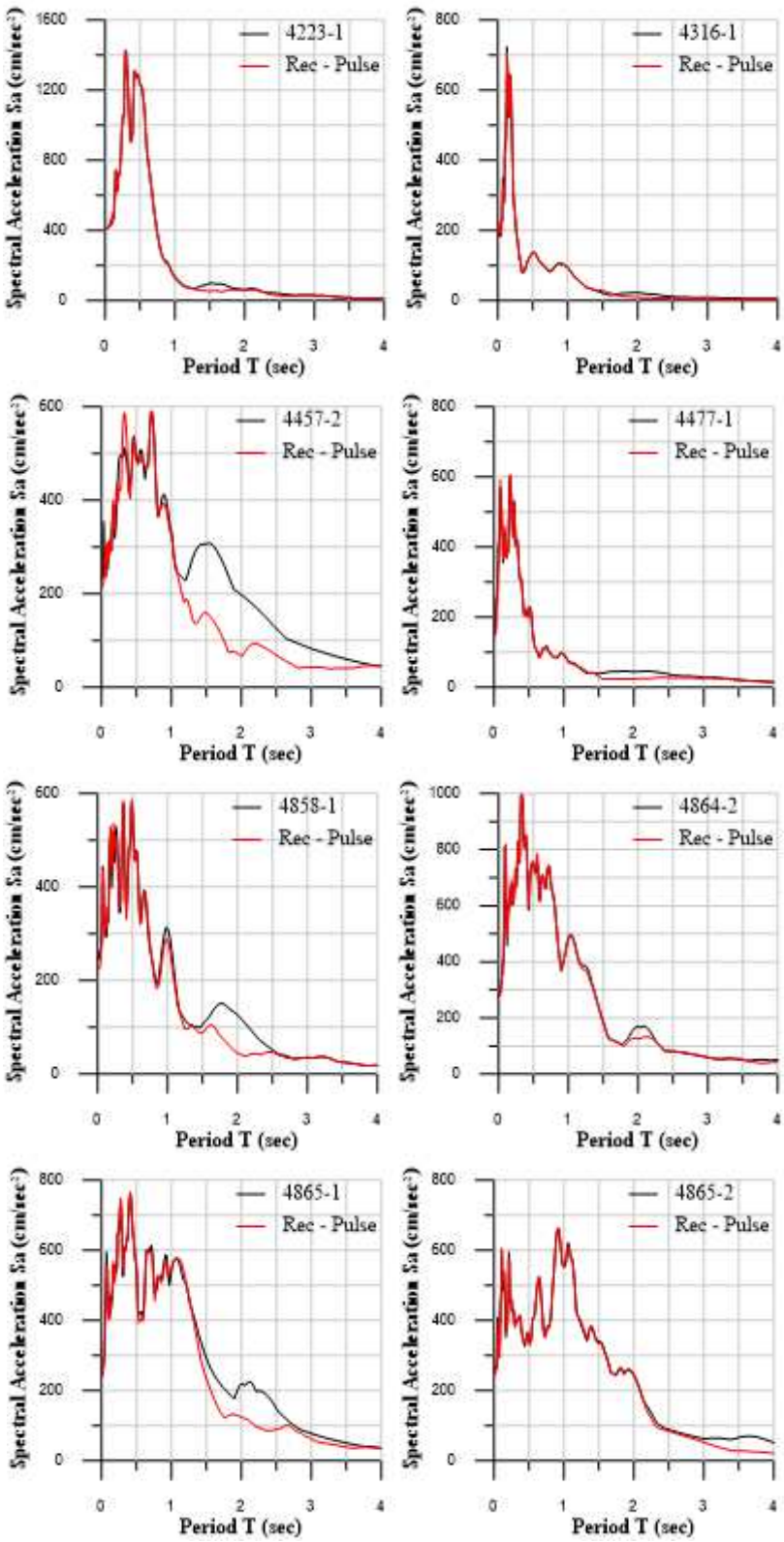

1101-2
Rec - Pulse
1111-1
Rec - Pulse
1116-1
Rec - Pulse
1118-2
Rec - Pulse
1184-1
Rec - Pulse
1184-2
Rec - Pulse
1187-2
Rec - Pulse
1202-2
Rec - Pulse
Spectral Acceleration Sa (cm/sec²)
Period T (sec)

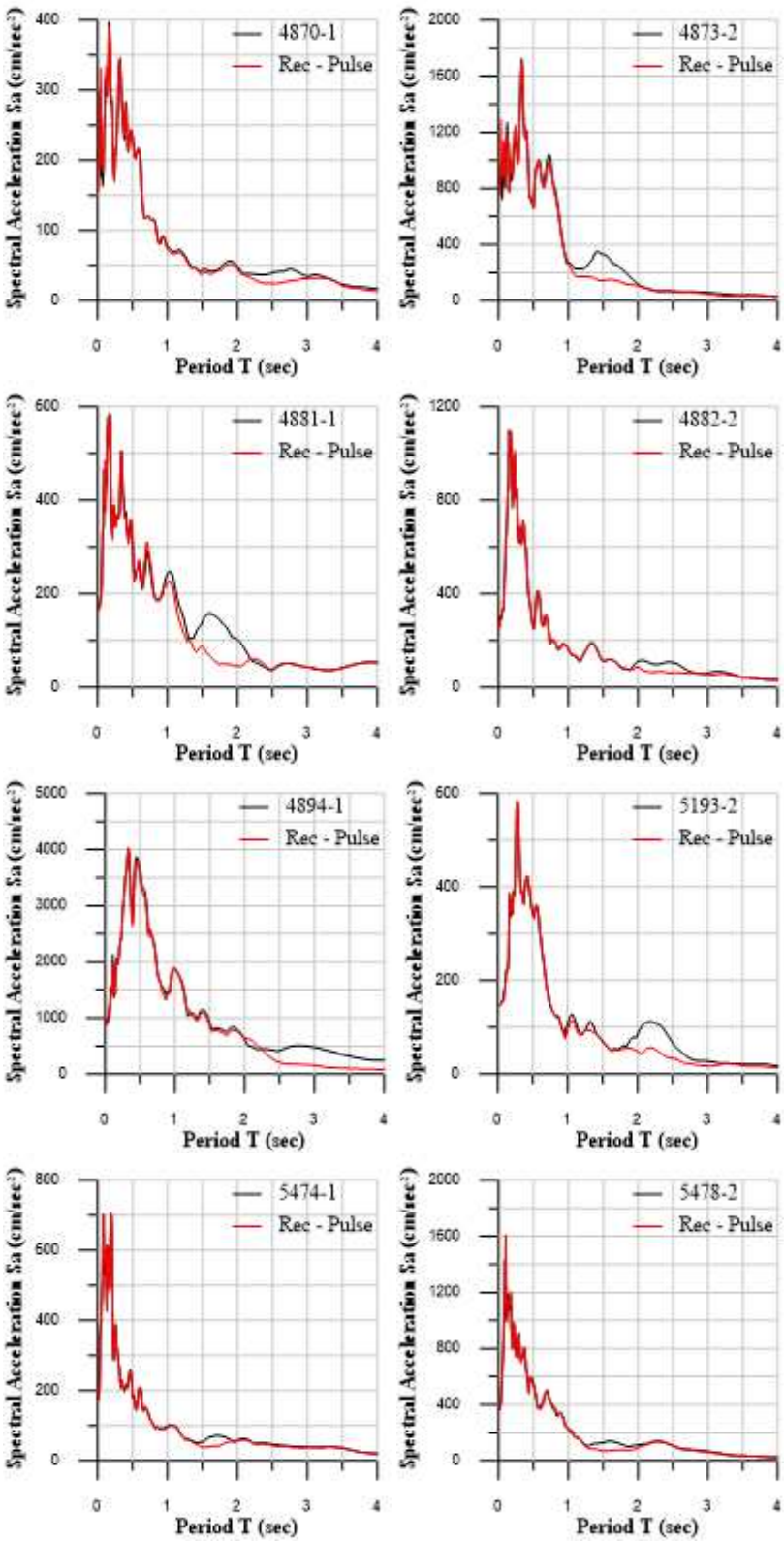

1203-1
Rec - Pulse
1208-1
Rec - Pulse
1209-1
Rec - Pulse
1227-1
Rec - Pulse
1227-2
Rec - Pulse
1494-2
Rec - Pulse
1504-1
Rec - Pulse
1506-2
Rec - Pulse
Spectral Acceleration Sa (cm/sec²)
Period T (sec)

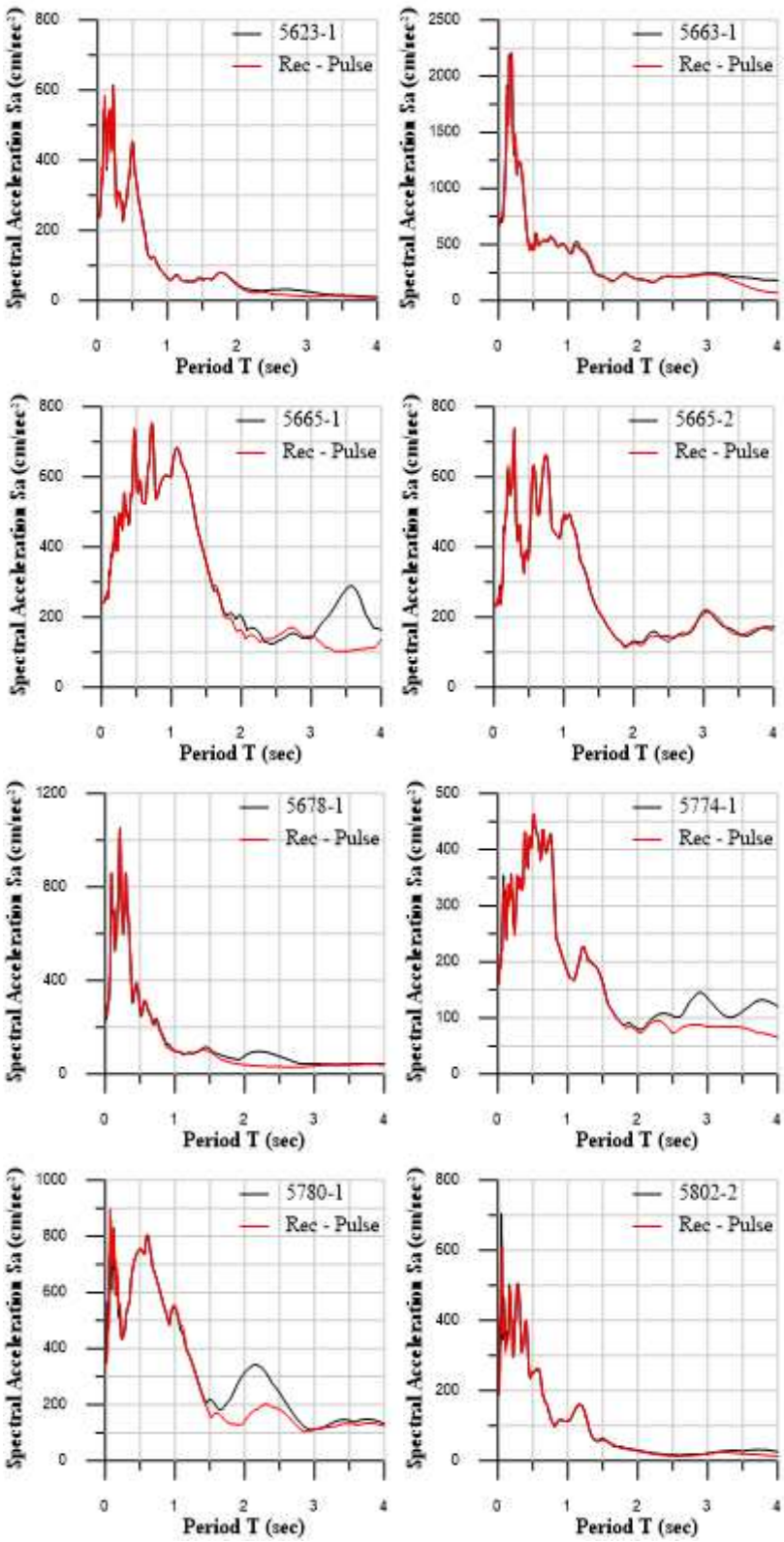

1541-1
Rec - Pulse
1545-1
Rec - Pulse
1545-2
Rec - Pulse
1646-1
Rec - Pulse
1762-1
Rec - Pulse
2623-1
Rec - Pulse
2752-1
Rec - Pulse
2943-1
Rec - Pulse
Spectral Acceleration Sa (cm/sec²)
Period T (sec)

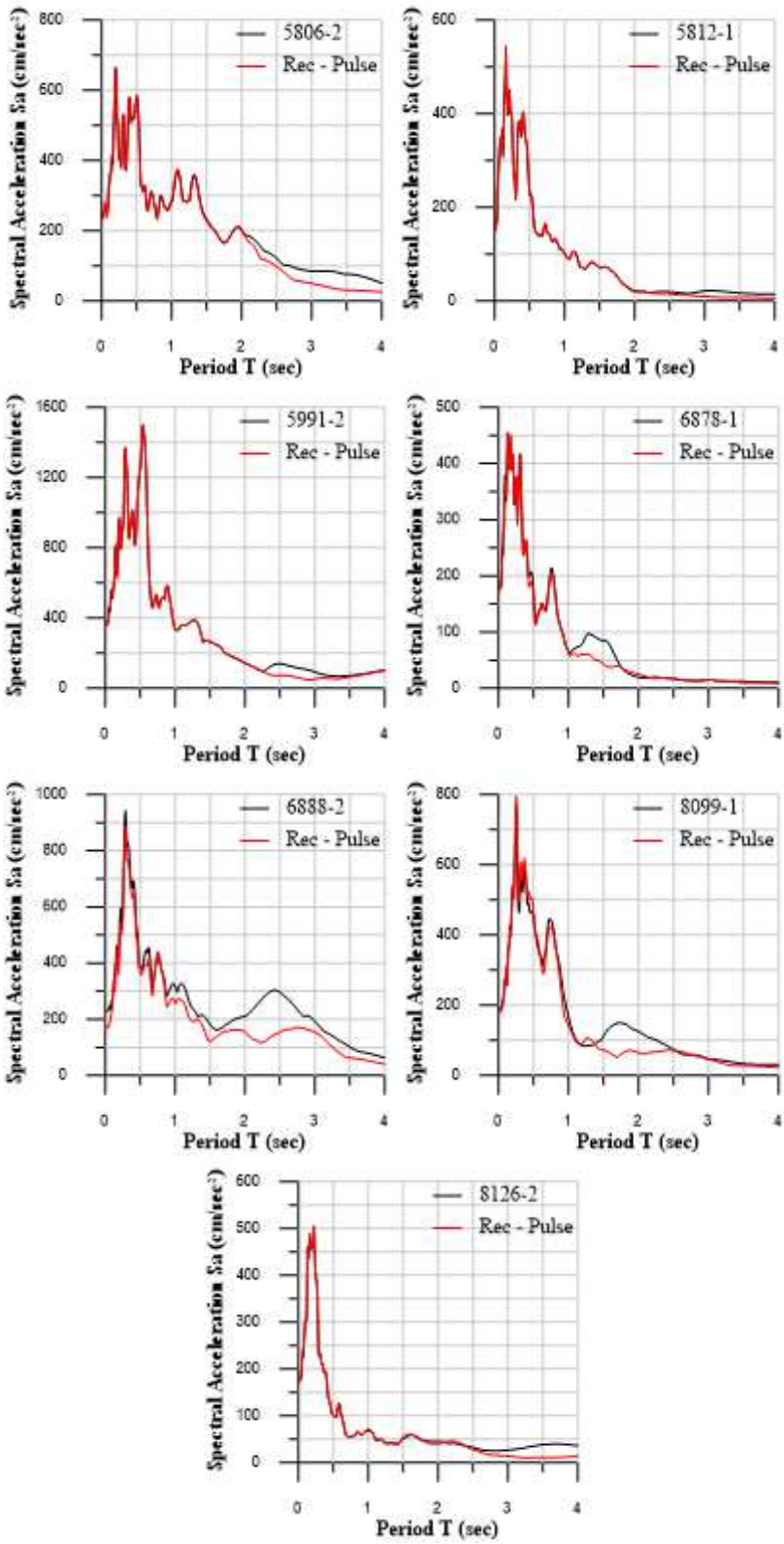

2947-1
Rec - Pulse
3208-1
Rec - Pulse
3271-1
Rec - Pulse
3274-2
Rec - Pulse
3309-1
Rec - Pulse
3663-1
Rec - Pulse
3672-1
Rec - Pulse
3676-1
Rec - Pulse
Spectral Acceleration Sa (cm/sec²)
Period T (sec)


3747-1
Rec - Pulse
3857-2
Rec - Pulse
3863-2
Rec - Pulse
3926-2
Rec - Pulse
4202-1
Rec - Pulse
4210-2
Rec - Pulse
4213-2
Rec - Pulse
4215-1
Rec - Pulse
Spectral Acceleration Sa (cm/sec²)
Period T (sec)

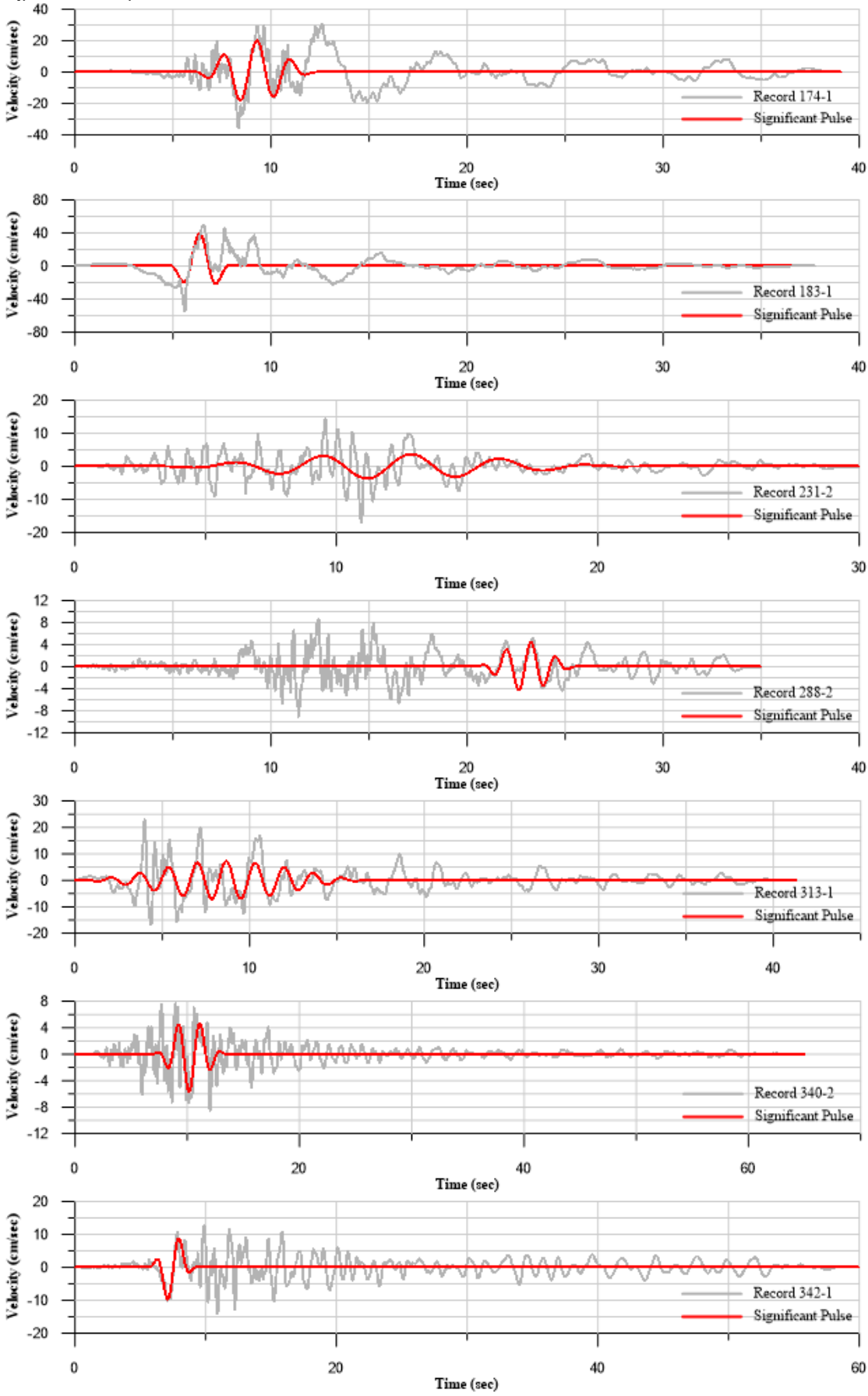

4223-1
Rec - Pulse
4316-1
Rec - Pulse
4457-2
Rec - Pulse
4477-1
Rec - Pulse
4858-1
Rec - Pulse
4864-2
Rec - Pulse
4865-1
Rec - Pulse
4865-2
Rec - Pulse
Spectral Acceleration Sa (cm/sec²)
Period T (sec)

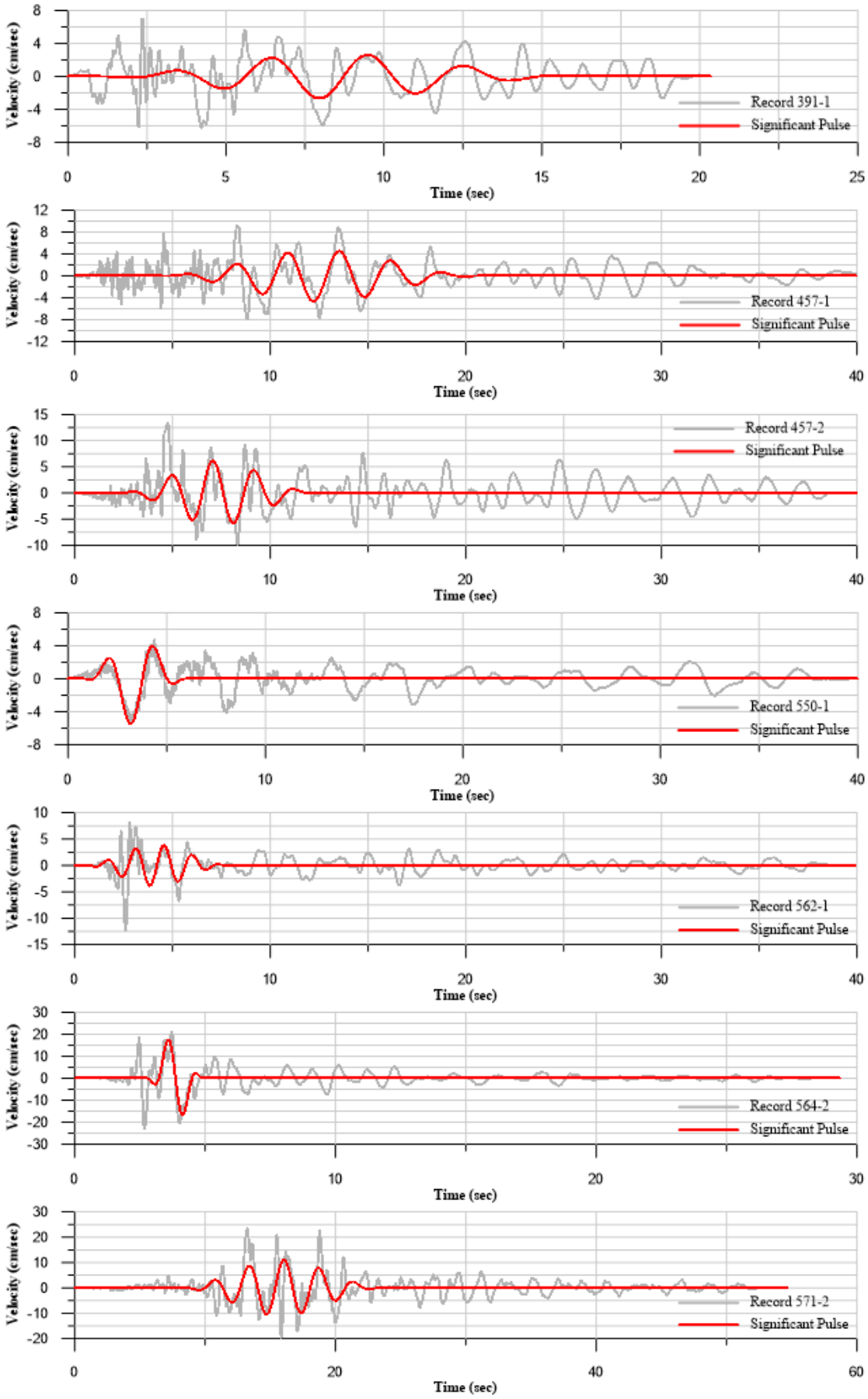

4870-1
Rec - Pulse
4873-2
Rec - Pulse
4881-1
Rec - Pulse
4882-2
Rec - Pulse
4894-1
Rec - Pulse
5193-2
Rec - Pulse
5474-1
Rec - Pulse
5478-2
Rec - Pulse
Spectral Acceleration Sa (cm/sec²)
Period T (sec)

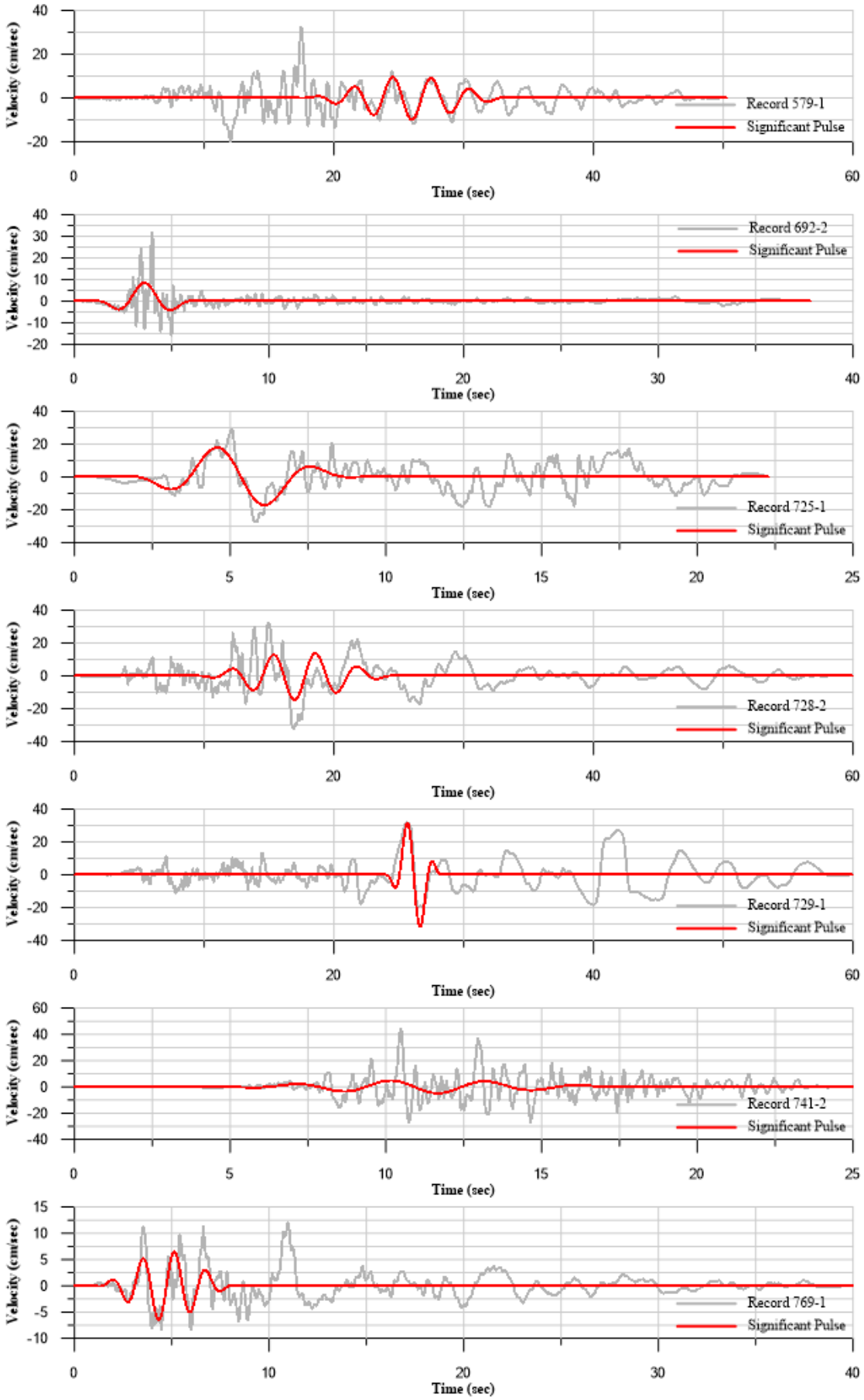

5623-1
Rec - Pulse
5663-1
Rec - Pulse
5665-1
Rec - Pulse
5665-2
Rec - Pulse
5678-1
Rec - Pulse
5774-1
Rec - Pulse
5780-1
Rec - Pulse
5802-2
Rec - Pulse
Spectral Acceleration Sa (cm/sec²)
Period T (sec)

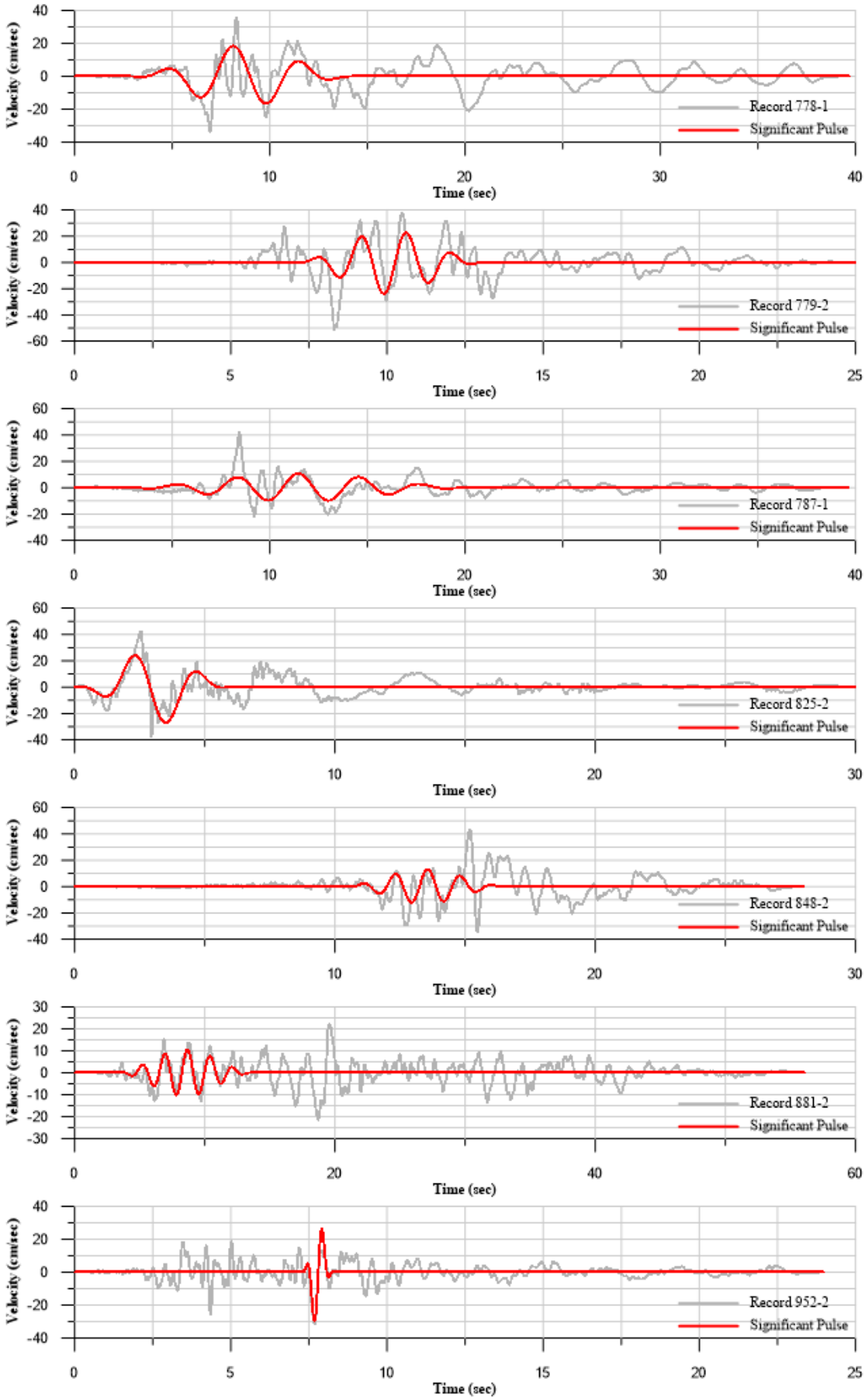

5806-2
Rec - Pulse
5812-1
Rec - Pulse
5991-2
Rec - Pulse
6878-1
Rec - Pulse
6888-2
Rec - Pulse
8099-1
Rec - Pulse
8126-2
Rec - Pulse
Spectral Acceleration Sa (cm/sec²)
Period T (sec)

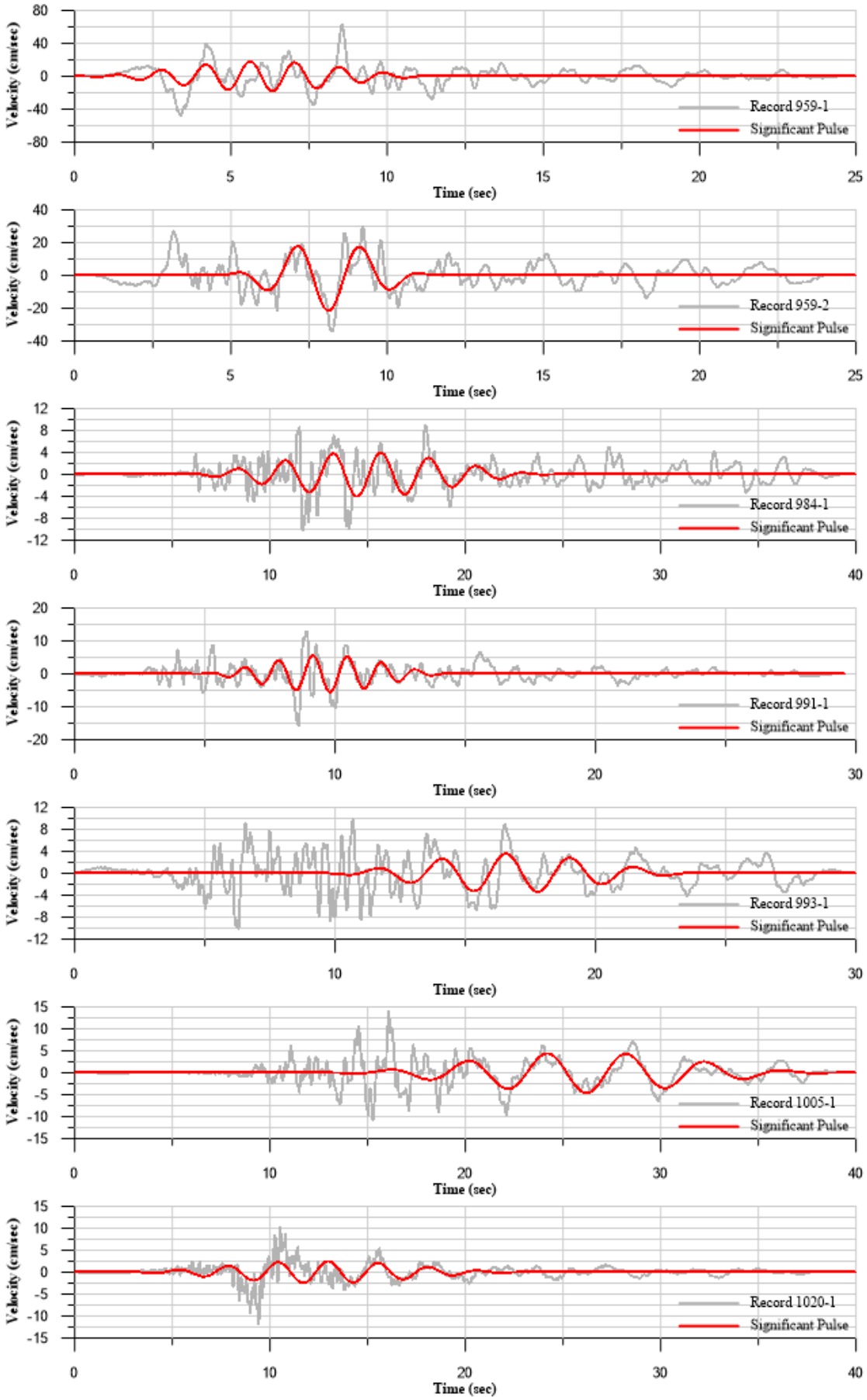
Χρονοϊστορία της ταχύτητας της αρχικής καταγραφής και χρονοϊστορία της ταχύτητας για τον σημαντικό παλμό

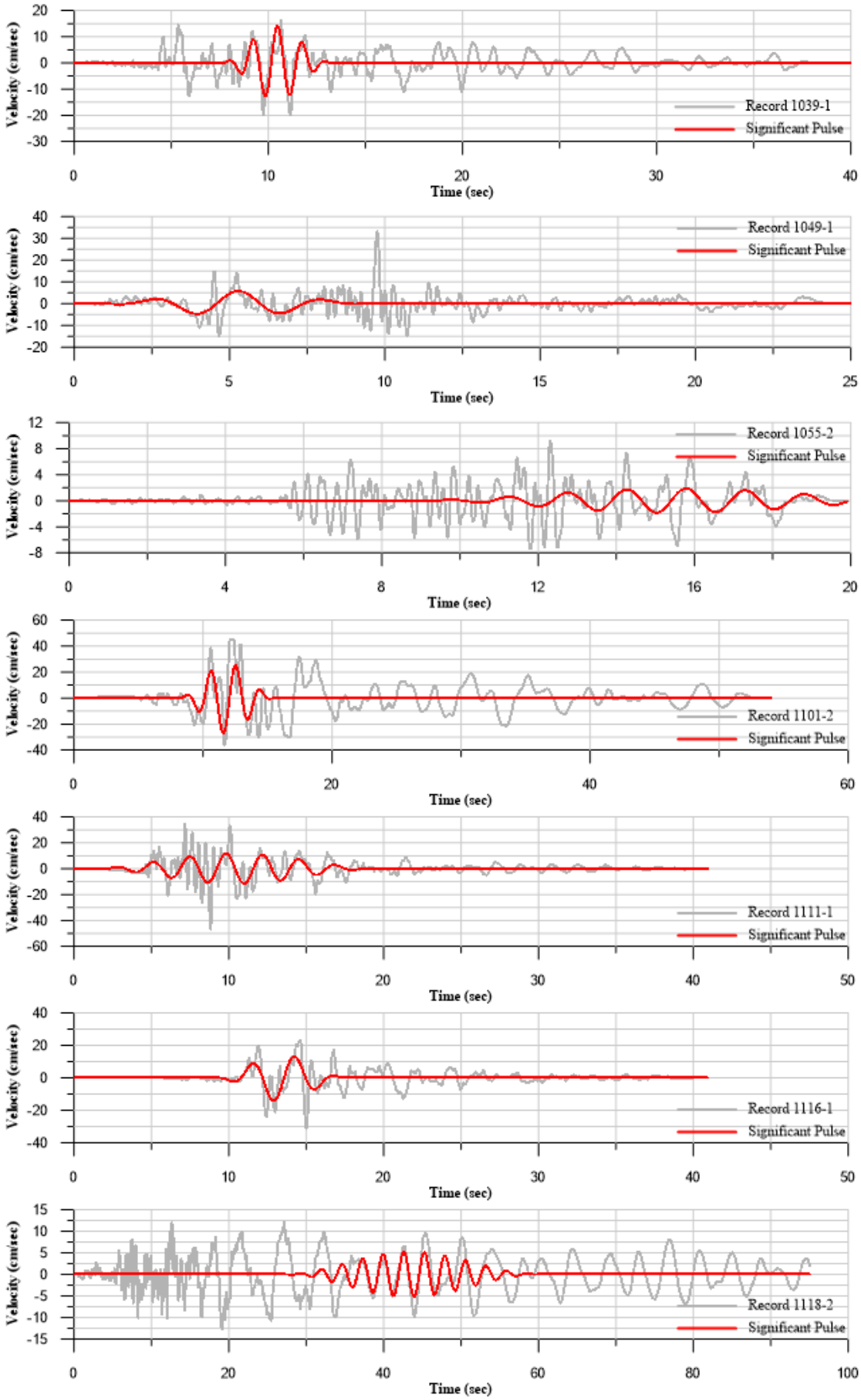


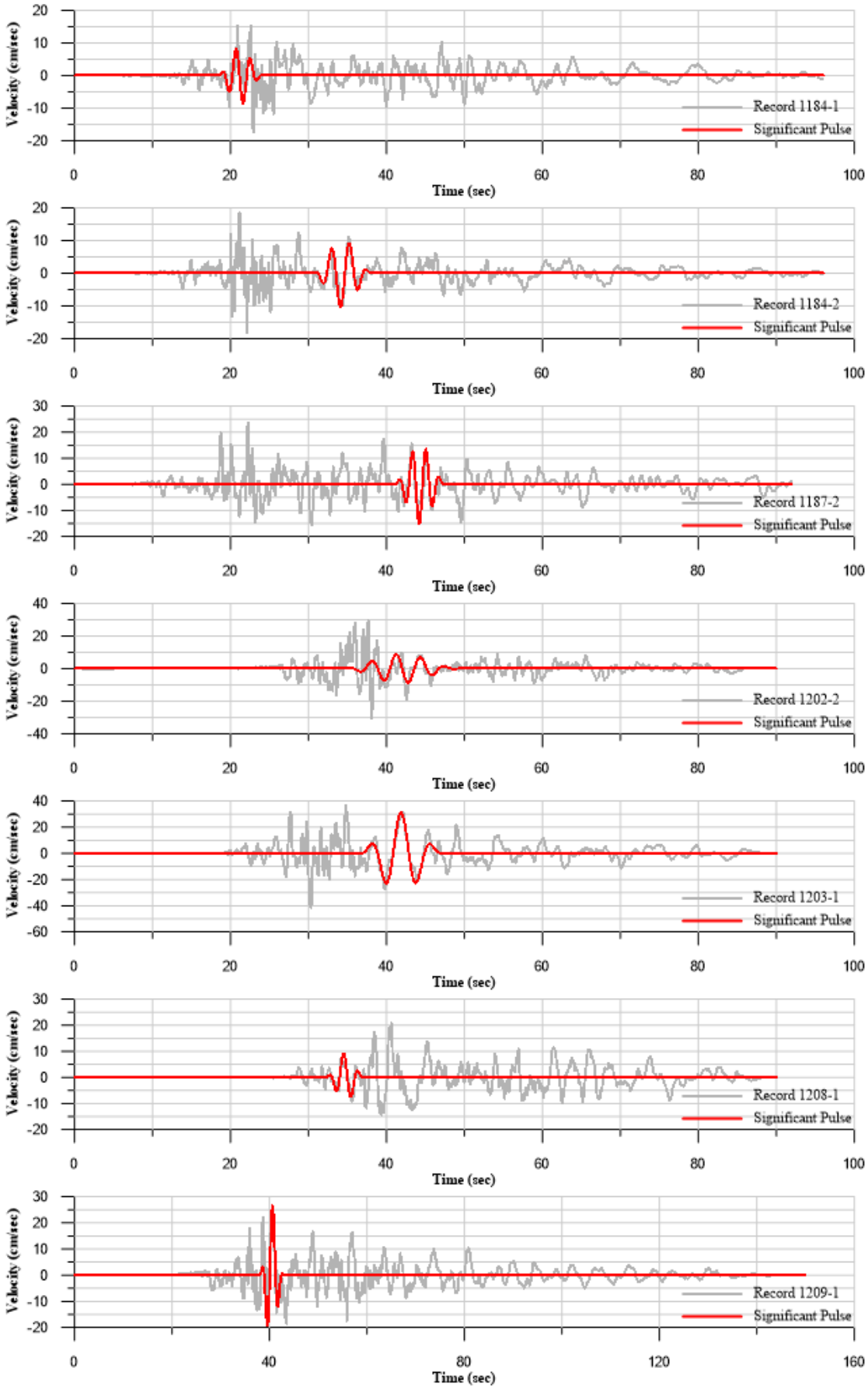

Velocity (cm/sec)
Time (sec)
Record 391-1
Significant Pulse
Record 457-1
Significant Pulse
Record 457-2
Significant Pulse
Record 550-1
Significant Pulse
Record 562-1
Significant Pulse
Record 564-2
Significant Pulse
Record 571-2
Significant Pulse

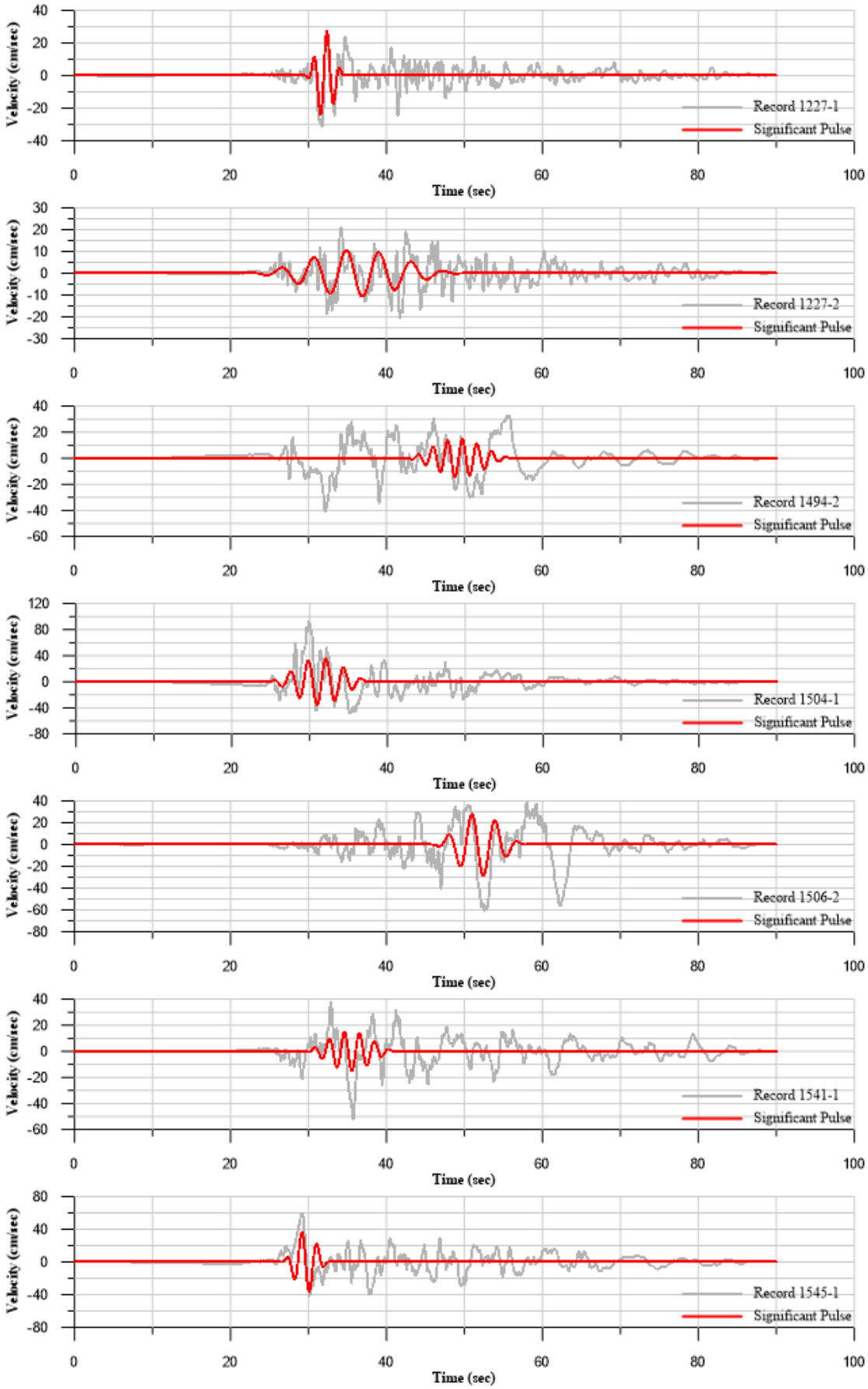

Velocity (cm/sec)
Time (sec)
Record 579-1
Significant Pulse
Record 692-2
Significant Pulse
Record 725-1
Significant Pulse
Record 728-2
Significant Pulse
Record 729-1
Significant Pulse
Record 741-2
Significant Pulse
Record 769-1
Significant Pulse

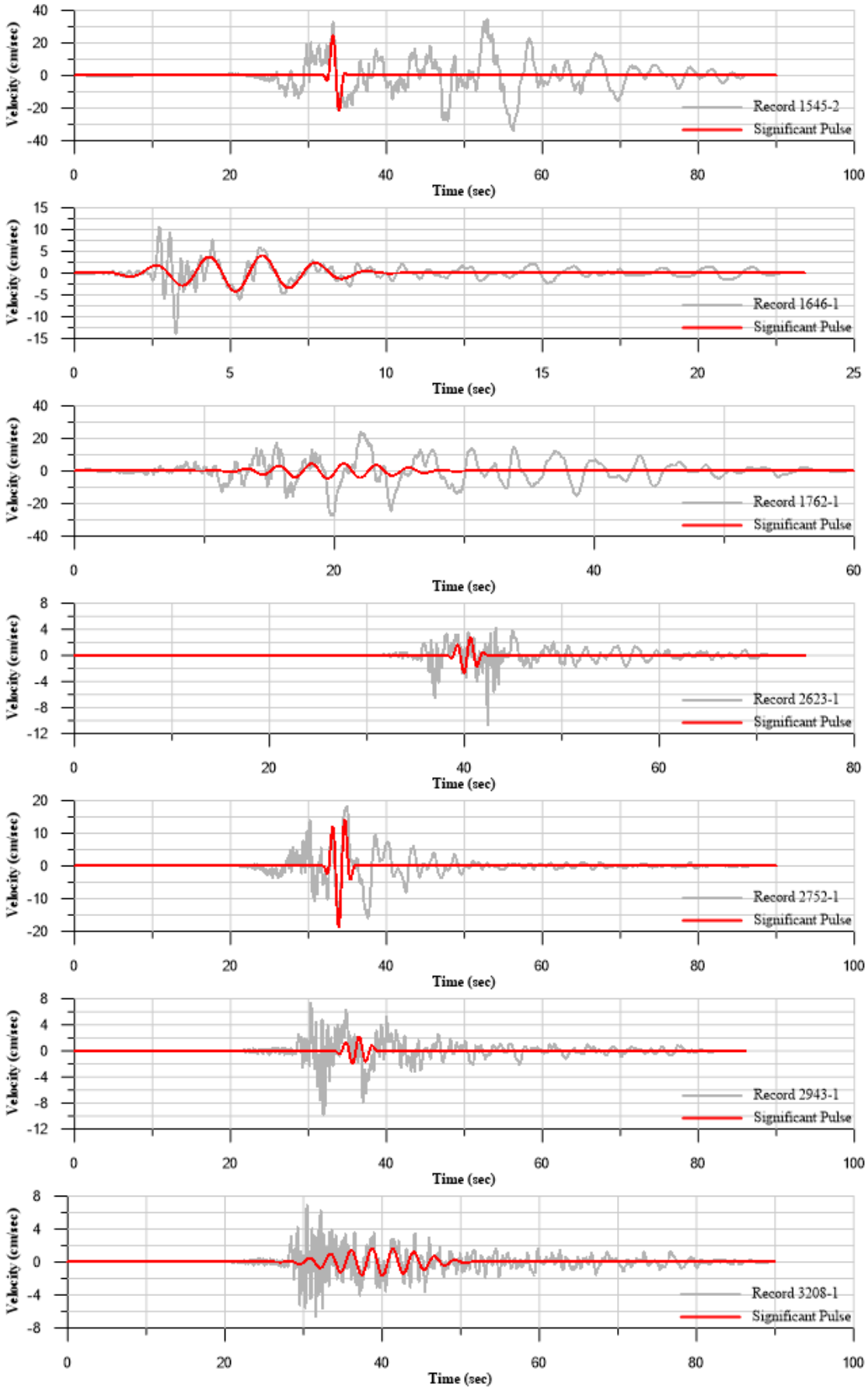

Velocity (cm/sec)
Time (sec)
Record 778-1
Significant Pulse
Record 779-2
Significant Pulse
Record 787-1
Significant Pulse
Record 825-2
Significant Pulse
Record 848-2
Significant Pulse
Record 881-2
Significant Pulse
Record 952-2
Significant Pulse

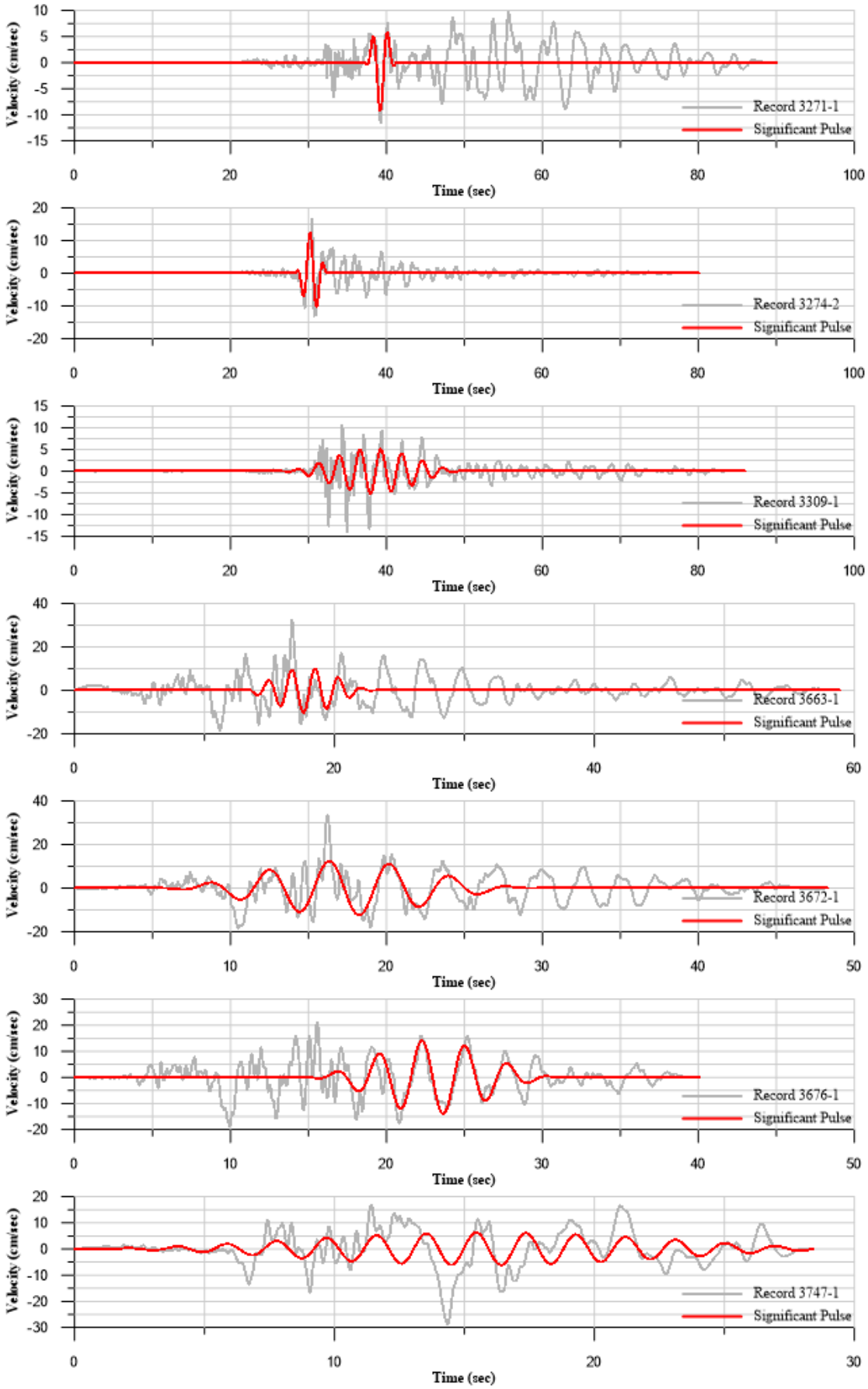

Velocity (cm/sec)
Time (sec)
Record 959-1
Significant Pulse
Record 959-2
Significant Pulse
Record 984-1
Significant Pulse
Record 991-1
Significant Pulse
Record 993-1
Significant Pulse
Record 1005-1
Significant Pulse
Record 1020-1
Significant Pulse

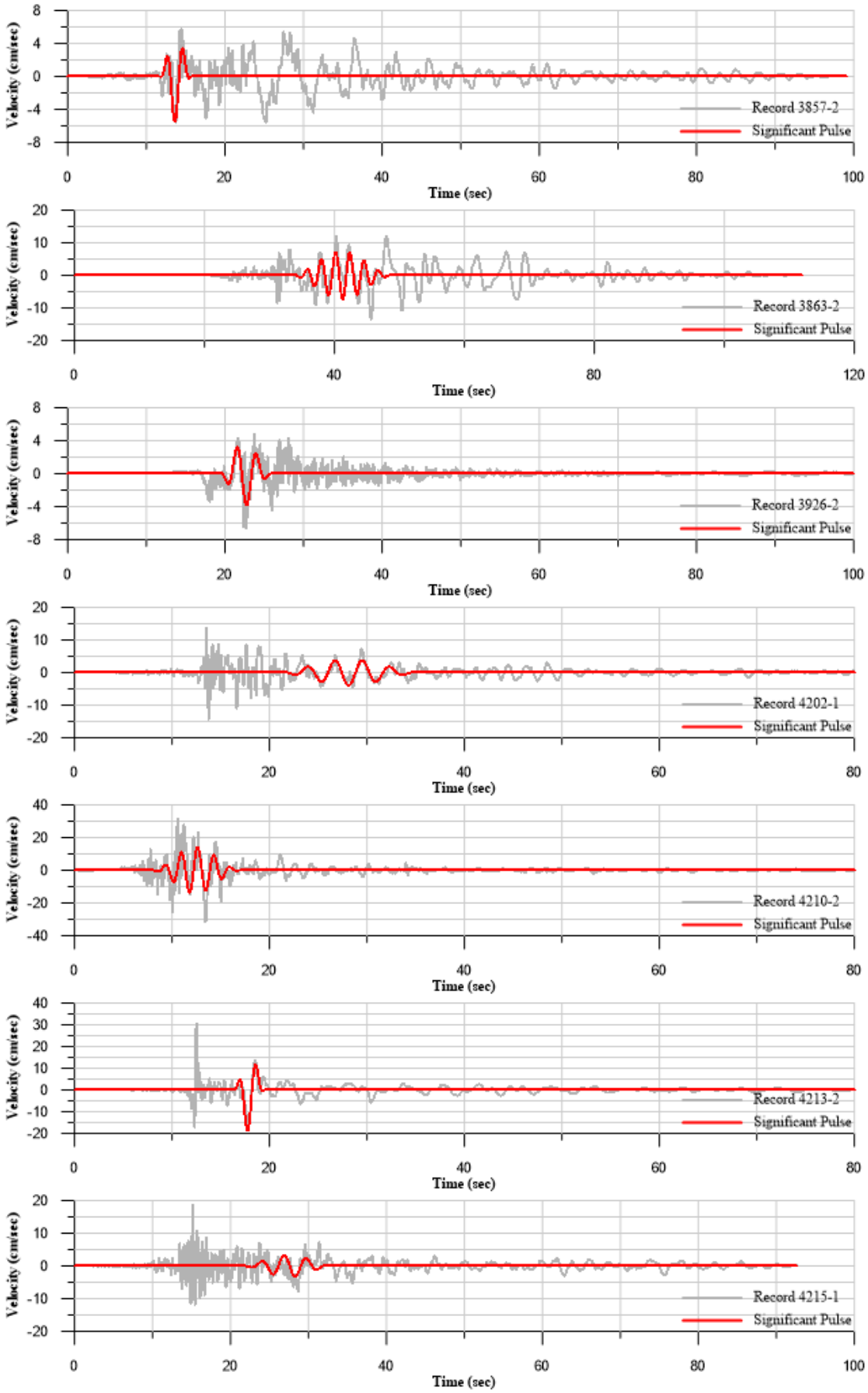

Velocity (cm/sec)
Time (sec)
Record 1039-1
Significant Pulse
Record 1049-1
Significant Pulse
Record 1055-2
Significant Pulse
Record 1101-2
Significant Pulse
Record 1111-1
Significant Pulse
Record 1116-1
Significant Pulse
Record 1118-2
Significant Pulse

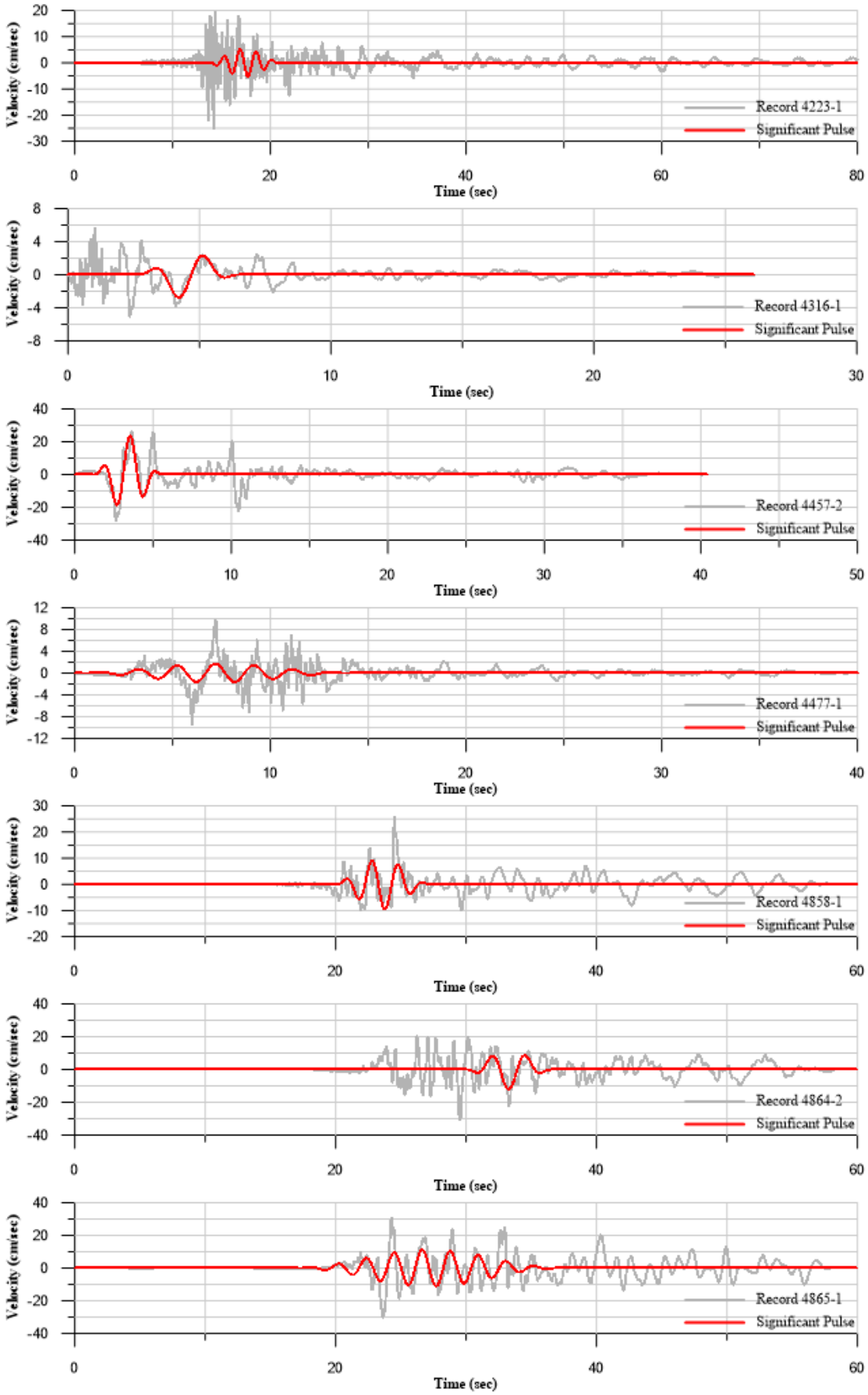

Velocity (cm/sec)
Time (sec)
Record 1184-1
Significant Pulse
Record 1184-2
Significant Pulse
Record 1187-2
Significant Pulse
Record 1202-2
Significant Pulse
Record 1203-1
Significant Pulse
Record 1208-1
Significant Pulse
Record 1209-1
Significant Pulse

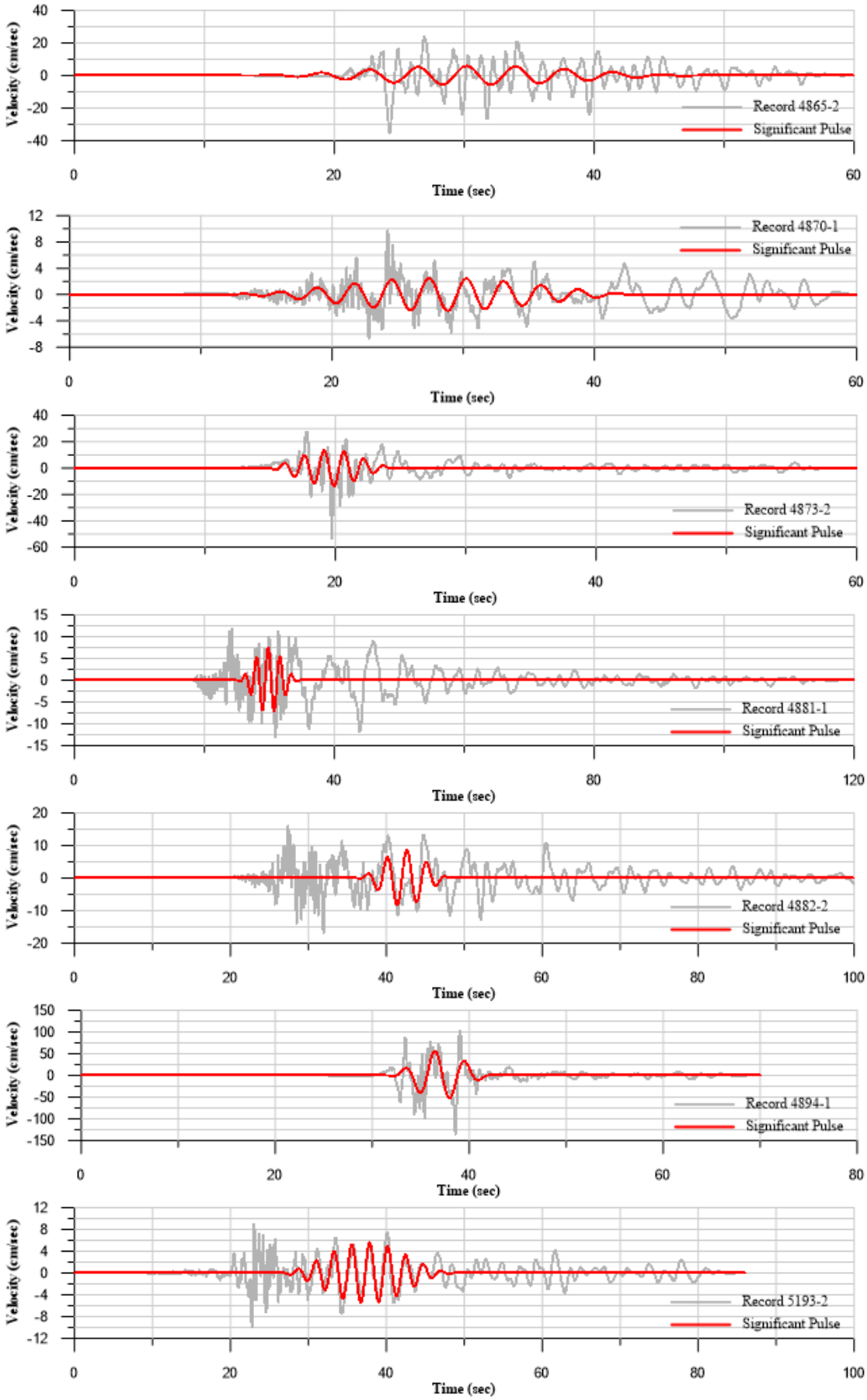

Velocity (cm/sec)
Time (sec)
Record 1227-1
Significant Pulse
Record 1227-2
Significant Pulse
Record 1494-2
Significant Pulse
Record 1504-1
Significant Pulse
Record 1506-2
Significant Pulse
Record 1541-1
Significant Pulse
Record 1545-1
Significant Pulse

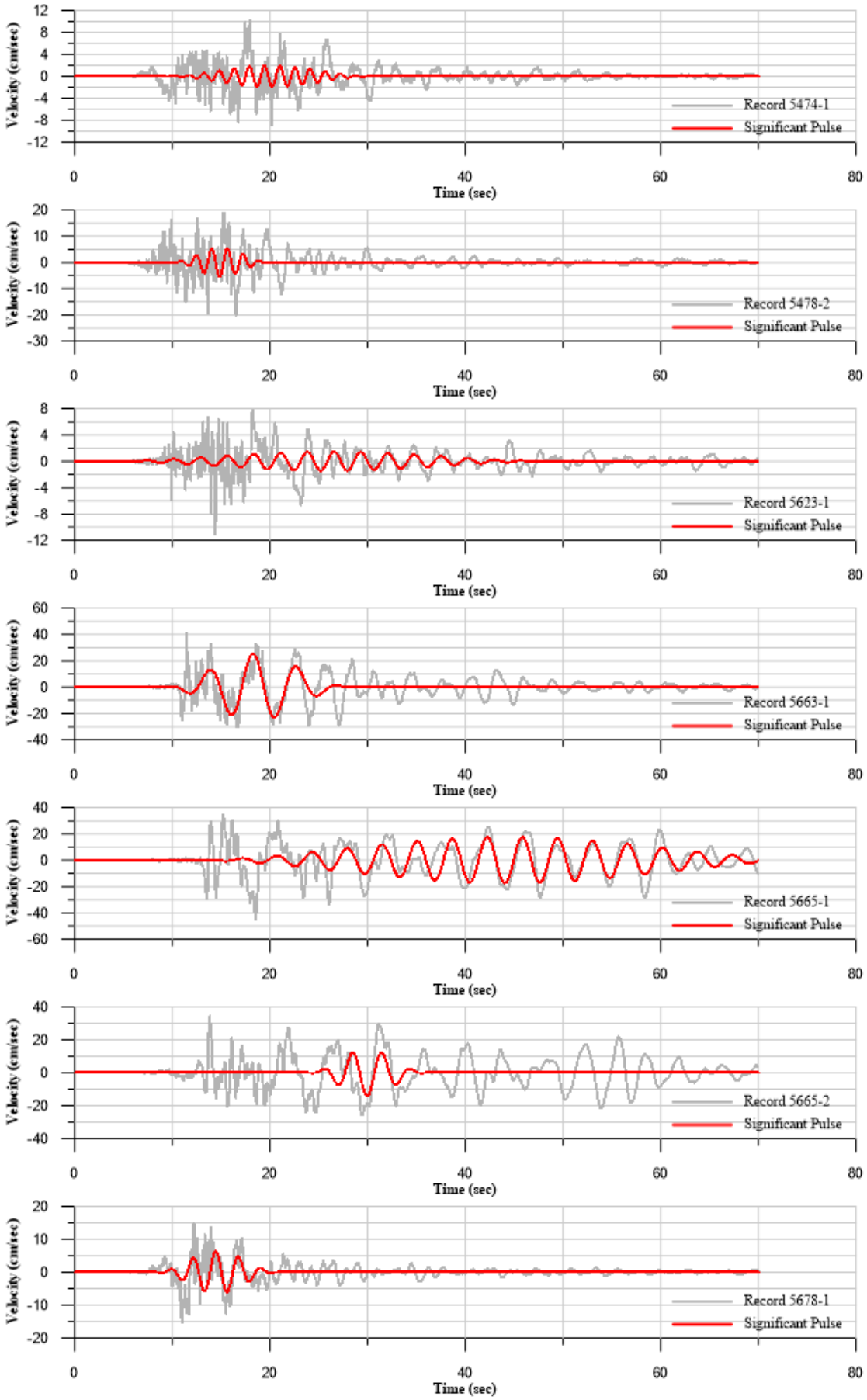

Velocity (cm/sec)
Time (sec)
Record 1545-2
Significant Pulse
Record 1646-1
Significant Pulse
Record 1762-1
Significant Pulse
Record 2623-1
Significant Pulse
Record 2752-1
Significant Pulse
Record 2943-1
Significant Pulse
Record 3208-1
Significant Pulse

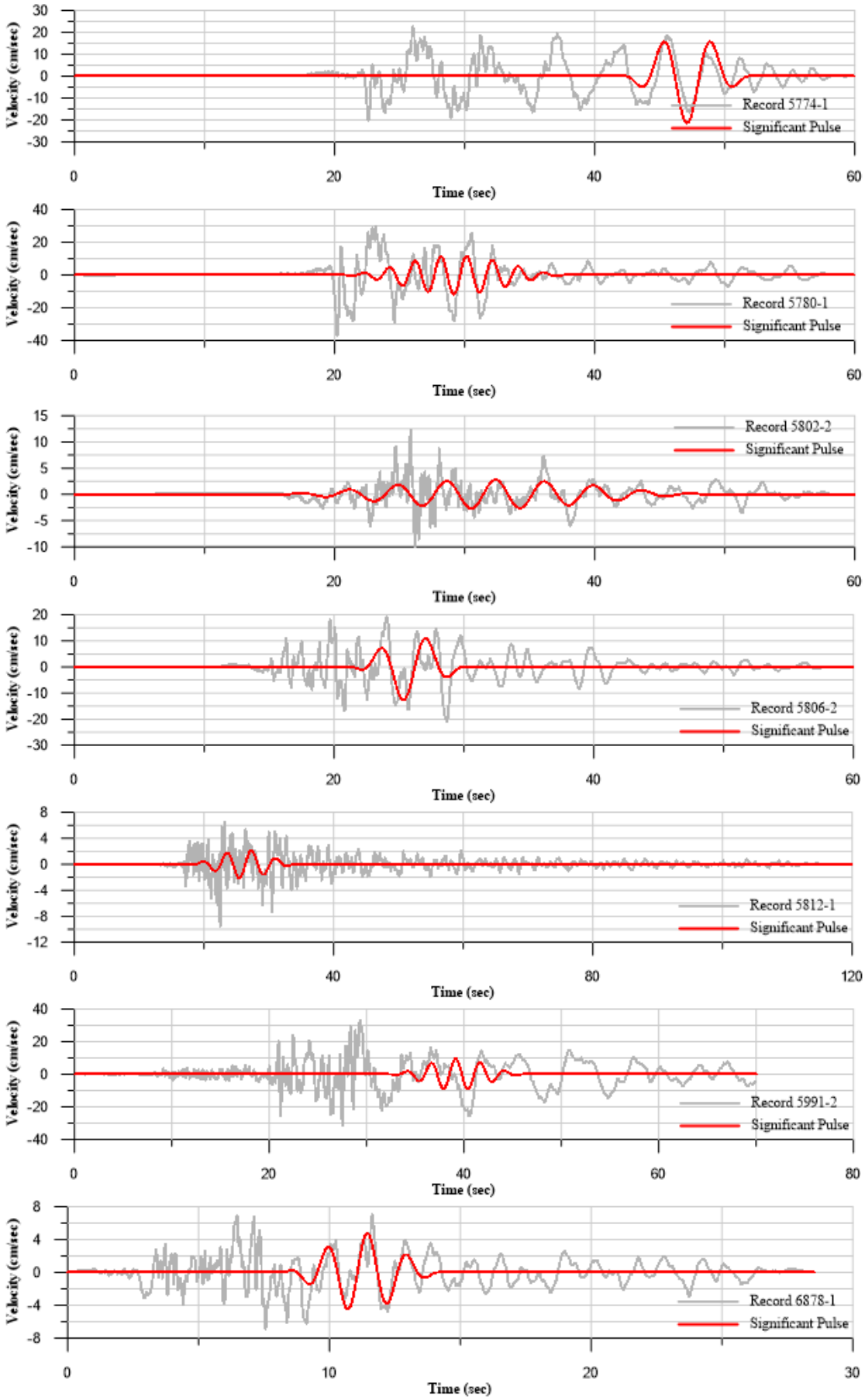

Velocity (cm/sec)
Time (sec)
Record 3271-1
Significant Pulse
Record 3274-2
Significant Pulse
Record 3309-1
Significant Pulse
Record 3663-1
Significant Pulse
Record 3672-1
Significant Pulse
Record 3676-1
Significant Pulse
Record 3747-1
Significant Pulse

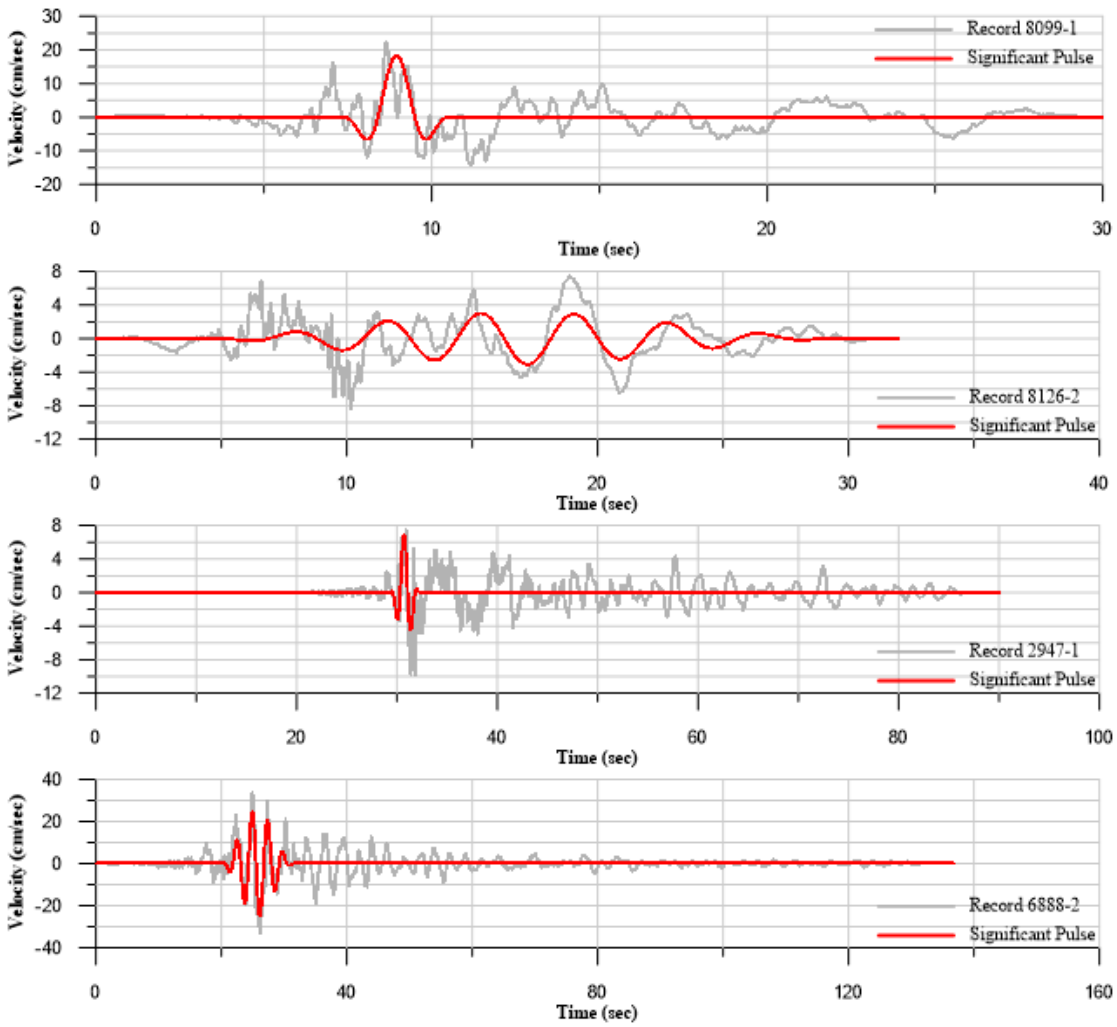

Velocity (cm/sec)
Time (sec)
Record 3857-2
Significant Pulse
Record 3863-2
Significant Pulse
Record 3926-2
Significant Pulse
Record 4202-1
Significant Pulse
Record 4210-2
Significant Pulse
Record 4213-2
Significant Pulse
Record 4215-1
Significant Pulse


Velocity (cm/sec)
Time (sec)
Record 4223-1
Significant Pulse
Record 4316-1
Significant Pulse
Record 4457-2
Significant Pulse
Record 4477-1
Significant Pulse
Record 4858-1
Significant Pulse
Record 4864-2
Significant Pulse
Record 4865-1
Significant Pulse


Velocity (cm/sec)
Time (sec)
Record 4865-2
Significant Pulse
Record 4870-1
Significant Pulse
Record 4873-2
Significant Pulse
Record 4881-1
Significant Pulse
Record 4882-2
Significant Pulse
Record 4894-1
Significant Pulse
Record 5193-2
Significant Pulse


Velocity (cm/sec)
Time (sec)
Record 5474-1
Significant Pulse
Record 5478-2
Significant Pulse
Record 5623-1
Significant Pulse
Record 5663-1
Significant Pulse
Record 5665-1
Significant Pulse
Record 5665-2
Significant Pulse
Record 5678-1
Significant Pulse


Velocity (cm/sec)
Time (sec)
Record 5774-1
Significant Pulse
Record 5780-1
Significant Pulse
Record 5802-2
Significant Pulse
Record 5806-2
Significant Pulse
Record 5812-1
Significant Pulse
Record 5991-2
Significant Pulse
Record 6878-1
Significant Pulse


Record 8099-1
Significant Pulse
Velocity (cm/sec)
Time (sec)
Record 8126-2
Significant Pulse
Velocity (cm/sec)
Time (sec)
Record 2947-1
Significant Pulse
Velocity (cm/sec)
Time (sec)
Record 6888-2
Significant Pulse
Velocity (cm/sec)
Time (sec)

A/A	Serial no	T	μ	ratio	pulse	Tp	PGA (cm/sec^2)	PGV (cm/sec)	Amplitude	Baker	Kardoutsou
1	174-1	1.17	7.92	0.45	3	1.74	359.840	35.938	20.179	0.002	0.413
2	183-1	1.08	8.15	0.46	2	1.89	595.38283	54.50116	39.268	0.006	0.513
3	231-2	1.76	7.86	0.57	2	3.42	277.42426	16.87278	3.731	0.004	0.411
4	288-2	1	8.2	0.58	4	1.28	177.58527	9.05078	4.464	0.000	0.271
5	313-1	1.23	7.61	0.4	2	1.66	232.27235	22.95592	7.22	0.001	0.432
6	340-2	1.32	7.72	0.38	1	1.97	140.40818	8.59727	5.631	0.000	0.443
7	342-1	1.73	7.93	0.47	4	1.93	137.23238	13.95157	10.781	0.000	0.344
8	391-1	2.28	7.99	0.48	1	3.1	164.17359	7.01156	2.702	0.000	0.428
9	457-1	1.36	7.16	0.34	1	2.65	189.25393	9.10137	4.676	0.008	0.539
10	457-2	1.32	8.54	0.54	1	2.13	196.1586	13.2951	6.153	0.005	0.422
11	550-1	1.01	15.8	0.6	1	2.48	163.22427	5.47515	5.554	0.055	0.522
12	562-1	1	7.52	0.34	1	1.46	183.3591	12.24637	3.901	0.002	0.426
13	564-2	1	8.49	0.53	1	1.28	266.68452	22.97746	20.606	0.006	0.576
14	571-2	1.31	7.35	0.49	1	2.69	185.95699	23.31646	11.049	0.000	0.522
15	579-1	1.97	10.07	0.58	2	2.99	124.19195	32.17612	9.98	0.000	0.377
16	692-2	1.45	10.35	0.34	2	3.09	446.69688	31.53233	8.368	0.007	0.46
17	725-1	1.56	6.97	0.43	1	3.3	280.7415	29.01563	19.372	0.371	0.552
18	728-2	2.45	8.42	0.62	2	3.27	206.94617	32.34852	14.661	0.000	0.401
19	729-1	1.67	9.54	0.44	2	2.2	175.84072	31.71965	36.312	0.003	0.438
20	741-2	2.38	7.49	0.56	5	3.08	492.73854	44.06332	4.983	0.000	0.182
21	769-1	1.2	6.86	0.47	1	1.63	123.03818	11.90545	6.609	0.000	0.449
22	778-1	1.8	9.31	0.46	2	3.51	273.23067	35.80099	18.702	0.003	0.42
23	779-2	1.1	7.98	0.26	2	1.46	587.47538	51.42837	24.161	0.002	0.441

A/A	Serial no	T	μ	ratio	pulse	Tp	PGA (cm/sec^2)	PGV (cm/sec)	Amplitude	Baker	Kardoutsou
24	787-1	1.66	7.05	0.61	1	3.14	191.07604	41.5876	10.585	0.027	0.518
25	825-2	1.22	7.86	0.26	1	2.59	1018.9912	42.41712	28.677	0.308	0.631
26	848-2	1.04	9.49	0.36	4	1.26	409.0258	43.35465	12.952	0.000	0.376
27	881-2	1.01	10.73	0.43	2	1.74	161.18271	22.21813	10.572	0.000	0.546
28	952-2	1.35	9.01	0.45	1	1.76	441.35857	31.39245	33.705	0.009	0.468
29	959-1	1.11	8.18	0.46	2	1.43	384.3507	63.28551	18.139	0.002	0.395
30	959-2	1.03	8.69	0.59	1	2.05	350.82659	33.79164	21.497	0.015	0.538
31	984-1	1.3	8.96	0.47	1	2.46	204.41274	10.26917	4.037	0.002	0.47
32	991-1	1	7.4	0.27	1	1.32	210.8684	15.72266	5.581	0.029	0.498
33	993-1	1.44	8.75	0.64	2	2.48	169.14843	10.0972	3.541	0.000	0.355
34	1005-1	1.03	8.15	0.49	1	1.73	123.72637	13.89826	4.586	0.006	0.542
35	1020-1	1.27	13.26	0.66	2	2.57	171.13643	11.7296	2.502	0.003	0.446
36	1039-1	1.01	9.08	0.3	1	1.28	189.38362	20.14144	14.046	0.064	0.495
37	1049-1	1.88	9.13	0.5	1	2.8	451.75521	33.19871	5.765	0.000	0.321
38	1055-2	1.11	7.43	0.45	6	1.52	185.70301	9.1663	1.859	0.000	0.259
39	1101-2	1.16	10.11	0.37	2	1.95	320.64534	44.83462	27.215	0.000	0.388
40	1111-1	1.24	11.23	0.51	1	2.36	474.04392	46.82464	11.706	0.021	0.492
41	1116-1	1.66	11.91	0.27	1	2.78	220.72912	31.32738	14.465	0.003	0.527
42	1118-2	1.65	9.53	0.58	5	2.66	181.40979	12.69308	5.186	0.000	0.305
43	1184-1	1.19	9.12	0.61	4	1.85	174.03788	17.47696	8.837	0.000	0.232
44	1184-2	1.84	6.88	0.35	1	2.31	218.9851	18.50917	10.38	0.000	0.357
45	1187-2	1.13	9.07	0.58	1	1.74	140.83177	23.54312	15.238	0.000	0.315
46	1202-2	2.44	9.48	0.62	4	3.14	244.66189	30.96624	8.944	0.000	0.279

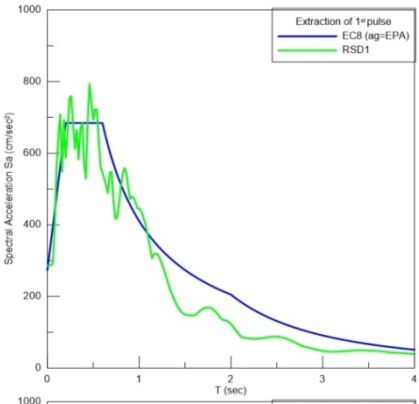
A/A	Serial no	T	μ	ratio	pulse	Tp	PGA (cm/sec^2)	PGV (cm/sec)	Amplitude	Baker	Kardoutsou
47	1203-1	2.42	9.82	0.44	1	4.01	267.37155	41.68675	30.952	0.003	0.538
48	1208-1	1.43	10.47	0.61	5	1.96	142.28316	20.79158	9.294	0.000	0.429
49	1209-1	1.15	11.92	0.57	1	2.36	177.28907	26.60441	26.979	0.002	0.375
50	1227-1	1	13.56	0.49	1	1.72	299.367	31.42661	27.534	0.085	0.551
51	1227-2	1.92	9.55	0.5	1	4.18	156.85121	21.04731	10.77	0.015	0.492
52	1494-2	1.32	9.11	0.63	5	1.89	190.3964	41.40873	14.599	0.000	0.258
53	1504-1	1.29	9.73	0.41	2	2.28	486.41737	92.04954	35.804	0.016	0.413
54	1506-2	1.91	15.22	0.41	3	3.02	156.96294	60.21058	29.237	0.000	0.344
55	1541-1	1.14	13.73	0.51	4	1.93	130.6329	52.26406	14.977	0.001	0.263
56	1545-1	1.29	15.9	0.52	2	1.97	222.31706	59.81363	38.215	0.003	0.362
57	1545-2	1.37	12.09	0.52	6	1.93	191.8321	34.62485	28.071	0.000	0.279
58	1646-1	1.2	7.01	0.4	1	1.73	171.76545	13.82715	4.196	0.096	0.6
59	1762-1	2..20	10.13	0.48	6	2.51	178.45871	27.61886	4.633	0.000	0.145
60	2623-1	1	12.22	0.51	4	1.41	171.96641	10.72266	2.833	0.000	0.275
61	2752-1	1.11	15.77	0.5	2	1.66	173.4304	18.12583	18.726	0.010	0.52
62	2943-1	1.27	10.17	0.48	4	1.76	211.58632	9.87874	2.191	0.000	0.184
63	2947-1	1.29	8.42	0.39	2	1.49	152.95856	9.95816	6.944	0.000	0.367
64	3208-1	1.64	8.86	0.45	1	2.66	184.69719	6.90268	1.666	0.000	0.365
65	3271-1	1.78	8.51	0.58	6	2.01	98.80259	11.59553	9.206	0.001	0.323
66	3274-2	1.11	7.28	0.37	1	1.8	160.25528	16.46178	12.619	0.919	0.638
67	3309-1	1.73	13.13	0.25	1	2.67	131.25594	13.9167	5.109	0.094	0.572
68	3663-1	1.39	9.17	0.46	3	1.8	147.78775	32.24453	10.376	0.004	0.322
69	3672-1	2.24	8.8	0.6	1	3.87	156.22337	33.38886	12.583	0.399	0.552

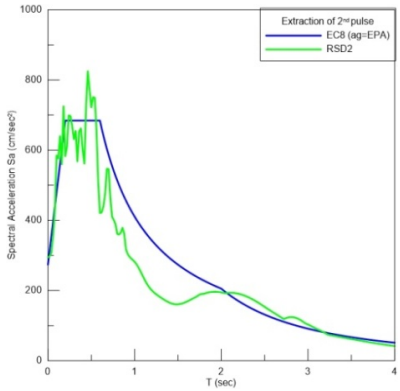
A/A	Serial no	T	μ	ratio	pulse	Tp	PGA (cm/sec^2)	PGV (cm/sec)	Amplitude	Baker	Kardoutsou
70	3676-1	1.33	9.9	0.58	1	2.76	128.57182	21.06599	14.208	0.008	0.594
71	3747-1	1.39	9.41	0.34	2	1.92	136.89777	28.92366	6.179	0.003	0.395
72	3857-2	1.02	15.74	0.61	3	2.2	87.71367	5.71435	5.549	0.000	0.273
73	3863-2	1.27	17.35	0.52	3	2.2	160.265	13.41884	7.317	0.001	0.417
74	3926-2	1.09	11.64	0.4	1	2.52	217.85813	6.59691	3.862	0.027	0.586
75	4202-1	2.34	7.97	0.32	2	2.82	299.07366	14.36521	3.992	0.000	0.368
76	4210-2	1.39	7.73	0.44	1	1.68	537.96113	31.47638	14.173	0.002	0.494
77	4213-2	1.64	12.19	0.58	1	1.96	380.19928	30.58083	19.458	0.001	0.521
78	4215-1	1.97	9.14	0.61	4	2.87	200.23166	18.5012	3.303	0.000	0.193
79	4223-1	1.26	11.39	0.48	4	1.65	409.06049	25.07238	5.372	0.000	0.224
80	4316-1	1.59	8.61	0.64	2	2.06	183.19644	5.64629	2.949	0.000	0.385
81	4457-2	1.07	9	0.33	1	1.8	223.67114	28.15453	23.744	0.192	0.634
82	4477-1	1.31	8.27	0.46	2	1.98	145.65741	9.67586	1.688	0.002	0.412
83	4858-1	1.4	11.66	0.27	1	2.04	245.96741	25.79764	9.754	0.005	0.437
84	4864-2	1.75	8.01	0.5	5	2.65	278.55868	30.77974	11.997	0.000	0.268
85	4865-1	1.9	8.56	0.38	1	2.15	233.56099	30.88045	11.122	0.008	0.414
86	4865-2	2.52	8.31	0.5	5	3.76	253.3665	35.34488	5.844	0.000	0.266
87	4870-1	1.46	11.72	0.45	1	2.85	158.77505	9.67076	2.484	0.006	0.447
88	4873-2	1.08	10.64	0.47	1	1.53	713.04711	53.85447	13.704	0.008	0.449
89	4881-1	1.29	7.67	0.51	3	1.81	158.93985	13.11195	7.525	0.000	0.307
90	4882-2	1.85	7.4	0.55	2	2.54	252.41594	16.74341	8.701	0.000	0.309
91	4894-1	2.17	7.56	0.53	1	3.13	892.00309	136.01865	56.623	0.039	0.568
92	5193-2	1.6	7.96	0.44	1	2.3	146.66725	9.90458	5.569	0.016	0.612

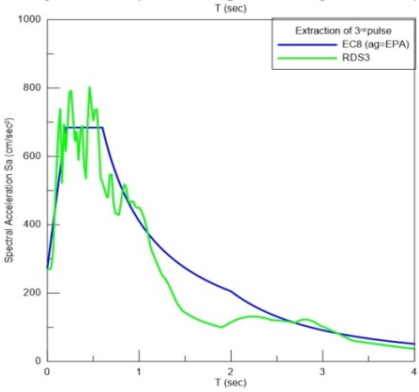
A/A	Serial no	T	μ	ratio	pulse	Tp	PGA (cm/sec^2)	PGV (cm/sec)	Amplitude	Baker	Kardoutsou
93	5474-1	1.38	9.49	0.4	5	1.55	171.4767	10.24823	1.926	0.000	0.219
94	5478-2	1.27	8.28	0.54	5	1.61	361.29525	20.39393	5.543	0.000	0.241
95	5623-1	2.15	10.51	0.53	4	2.74	239.3048	11.13744	1.434	0.000	0.288
96	5663-1	2.22	10.29	0.47	1	4.49	670.37762	40.93591	25.268	0.002	0.592
97	5665-1	2.07	16.41	0.42	1	3.59	239.83362	45.31968	17.445	0.007	0.559
98	5665-2	1.75	10.08	0.55	4	3.03	232.12643	34.42012	14.174	0.000	0.395
99	5678-1	1.92	9.41	0.38	2	2.33	233.49507	15.43256	6.386	0.000	0.435
100	5774-1	1.72	12.41	0.68	2	3.77	161.03635	22.65651	21.346	0.000	0.414
101	5780-1	1.63	8.22	0.38	3	1.99	347.36572	36.87079	11.791	0.000	0.393
102	5802-2	2.36	8.11	0.51	1	3.77	188.82043	12.22119	2.754	0.000	0.46
103	5806-2	1.72	8.02	0.63	2	3.65	233.57669	20.83366	13.05	0.001	0.383
104	5812-1	2.2	14.55	0.43	3	3.81	150.68346	9.53003	2.18	0.000	0.279
105	5991-2	2.25	11.67	0.44	6	2.53	356.523	33.18652	9.483	0.000	0.208
106	6878-1	1.01	9.16	0.68	1	1.53	175.41792	7.04881	4.818	0.000	0.441
107	6888-2	1.32	8.96	0.45	1	2.46	228.87485	33.43852	25.331	0.731	0.64
108	8099-1	1.13	8.48	0.55	2	2.2	185.03102	22.34818	18.309	0.008	0.477
109	8126-2	2.63	9.48	0.57	3	3.74	172.96815	8.36076	3.096	0.037	0.572
110	8134-2	1.59	12.7	0.56	2	2.99	136.69303	23.92352	15.606	0.006	0.51

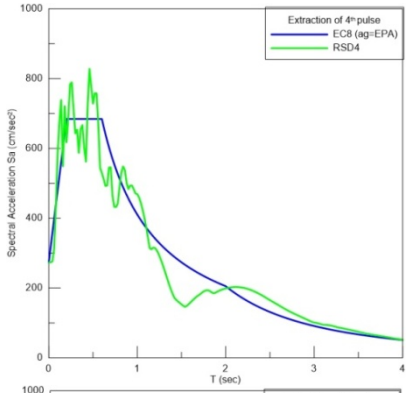
Φάσματα EC8, επιτάχυνση για κάθε καταγραφή και επιτάχυνση αρχικής μείον τον εξαγόμενο κάθε φορά παλμό

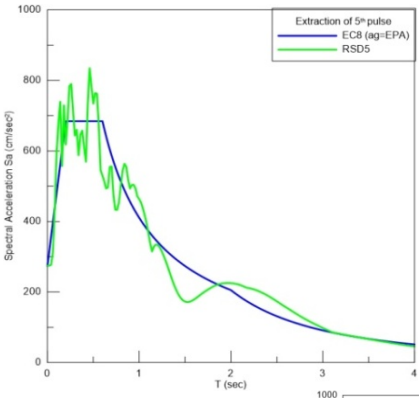
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 6-1:

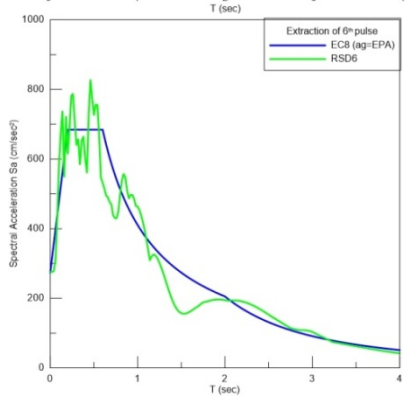


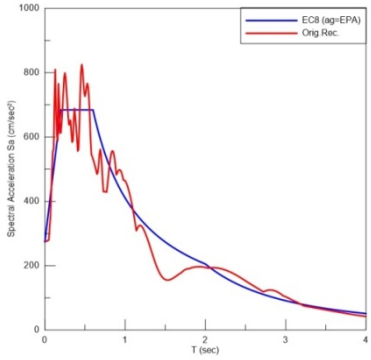




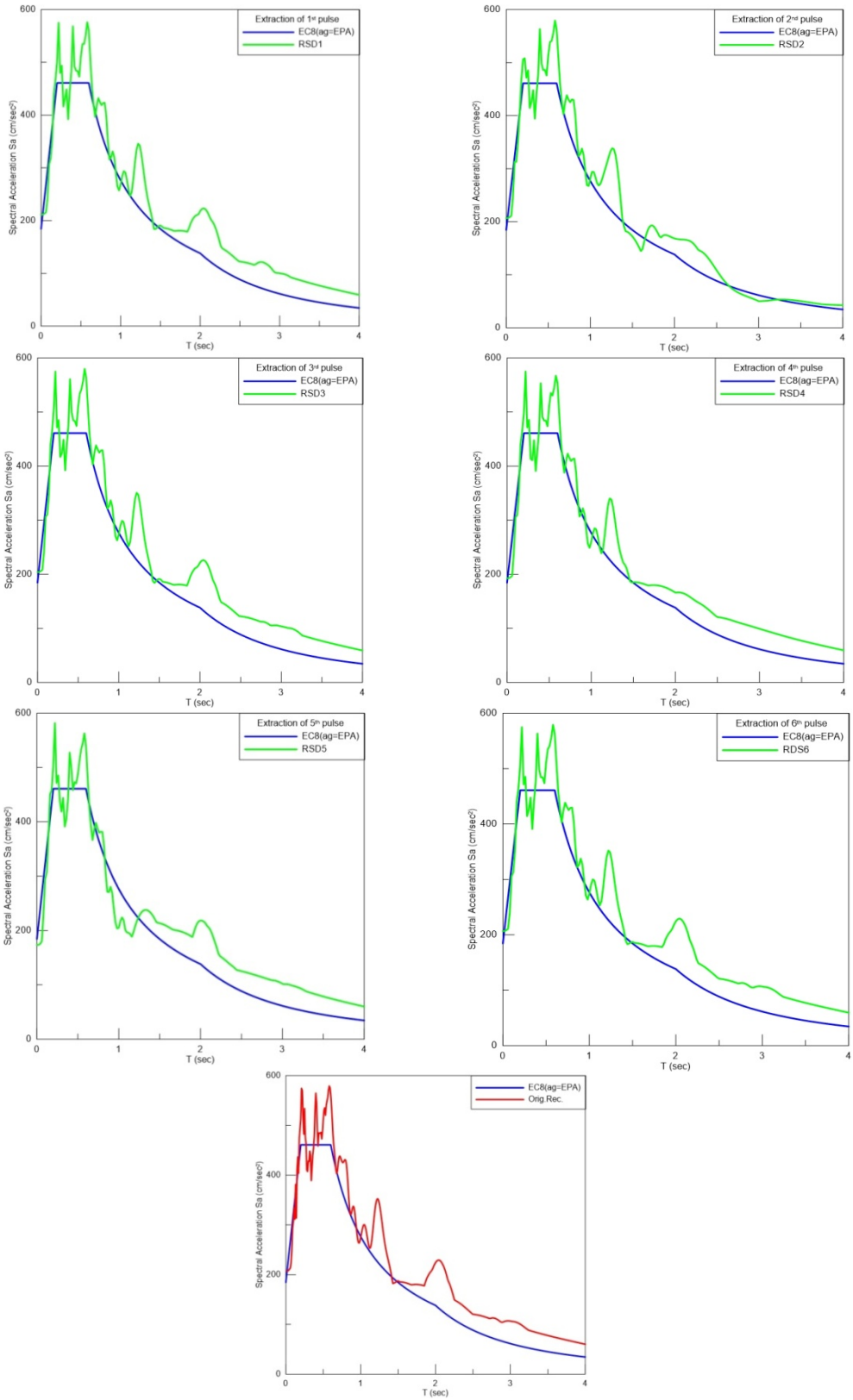




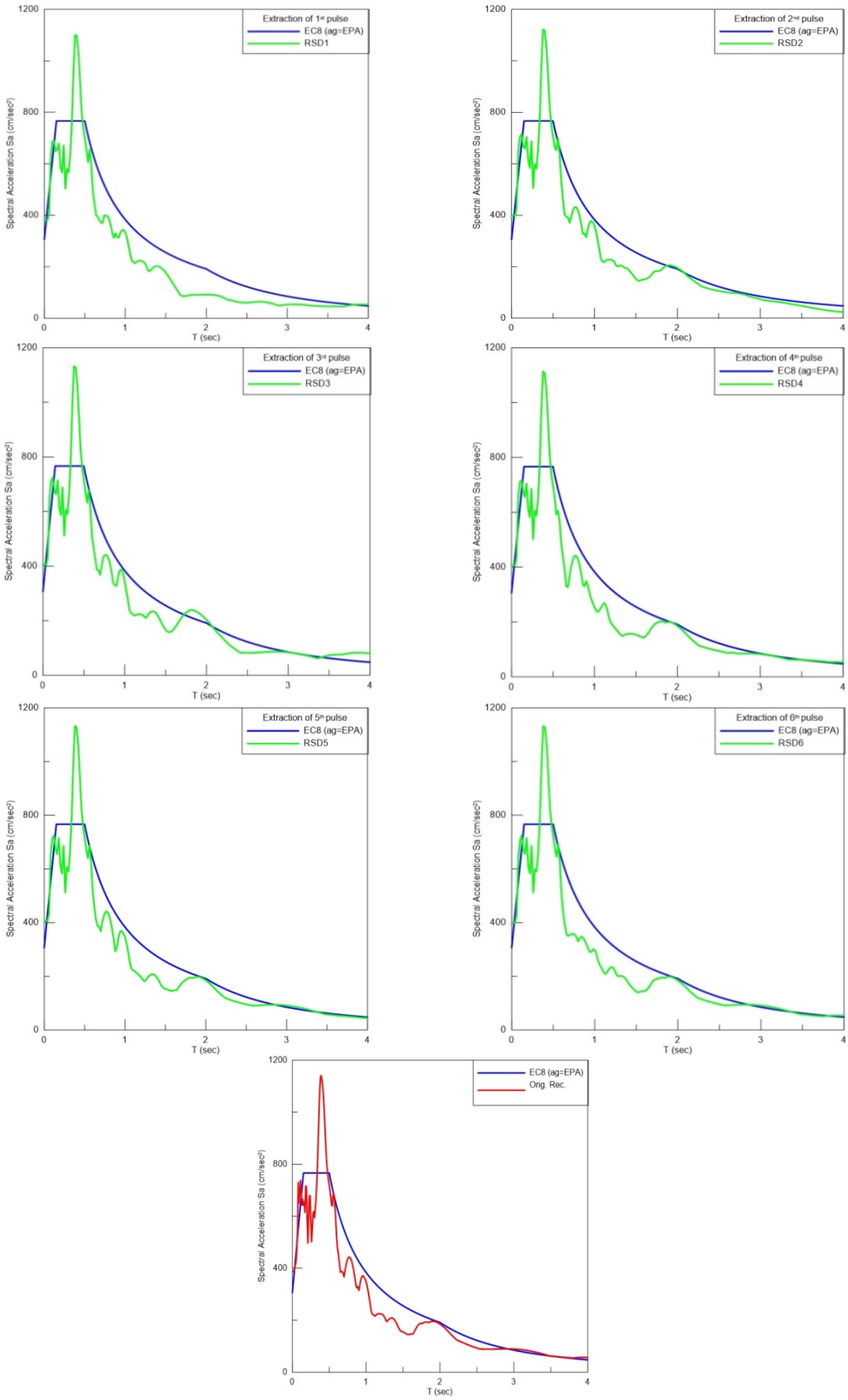




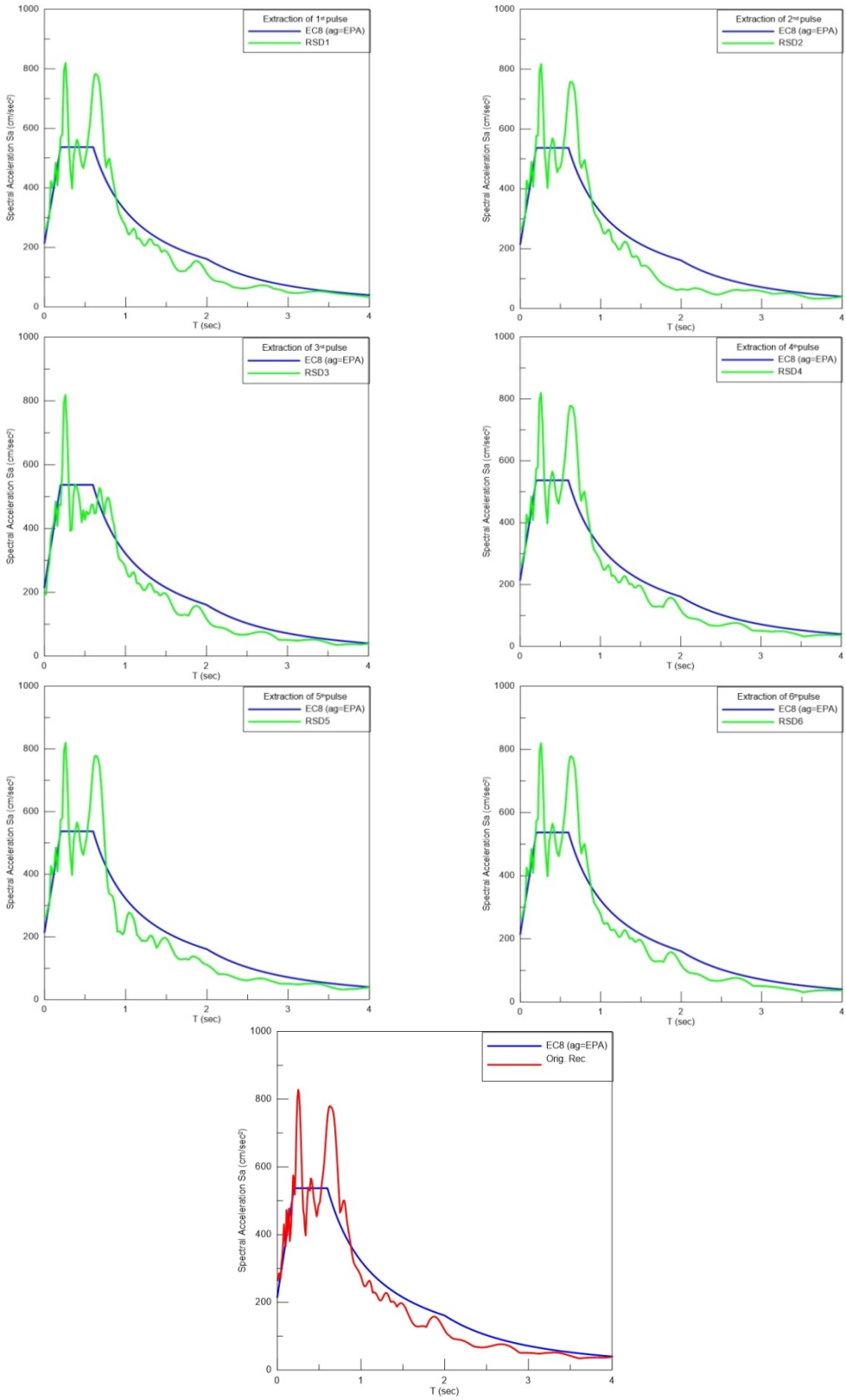
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 6-2:



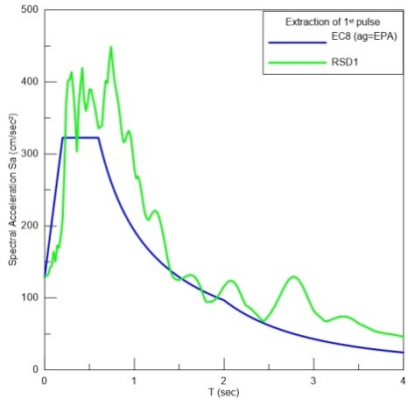
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 139-2:

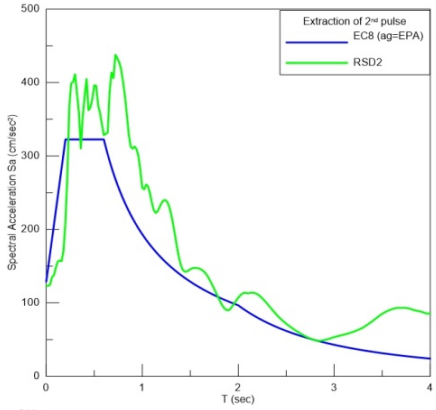


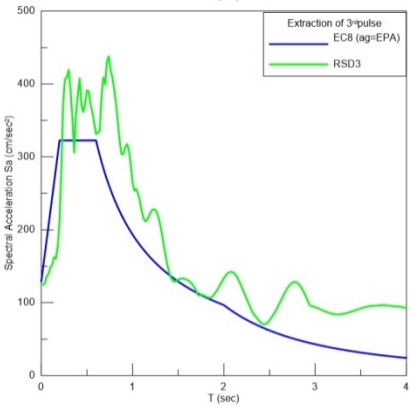
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 165-1:

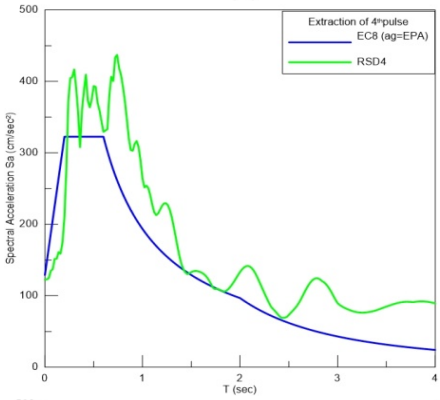


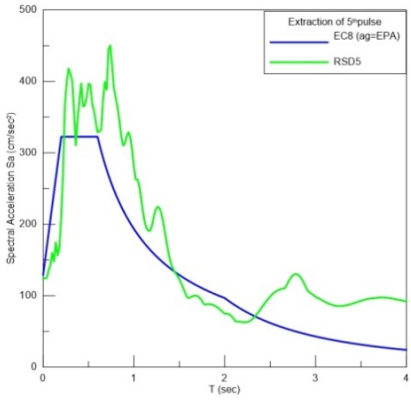
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 577-1:

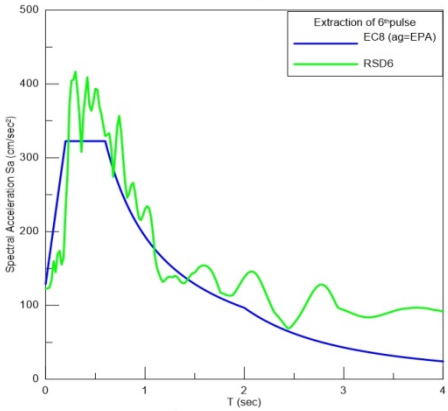


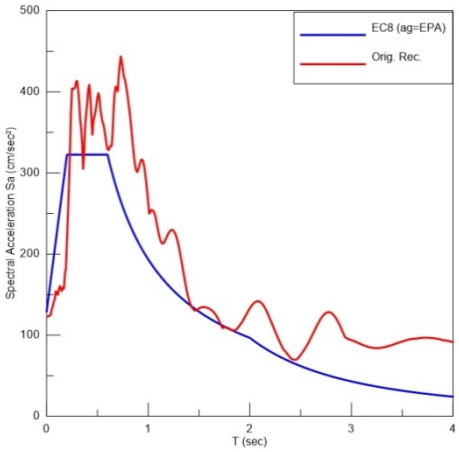




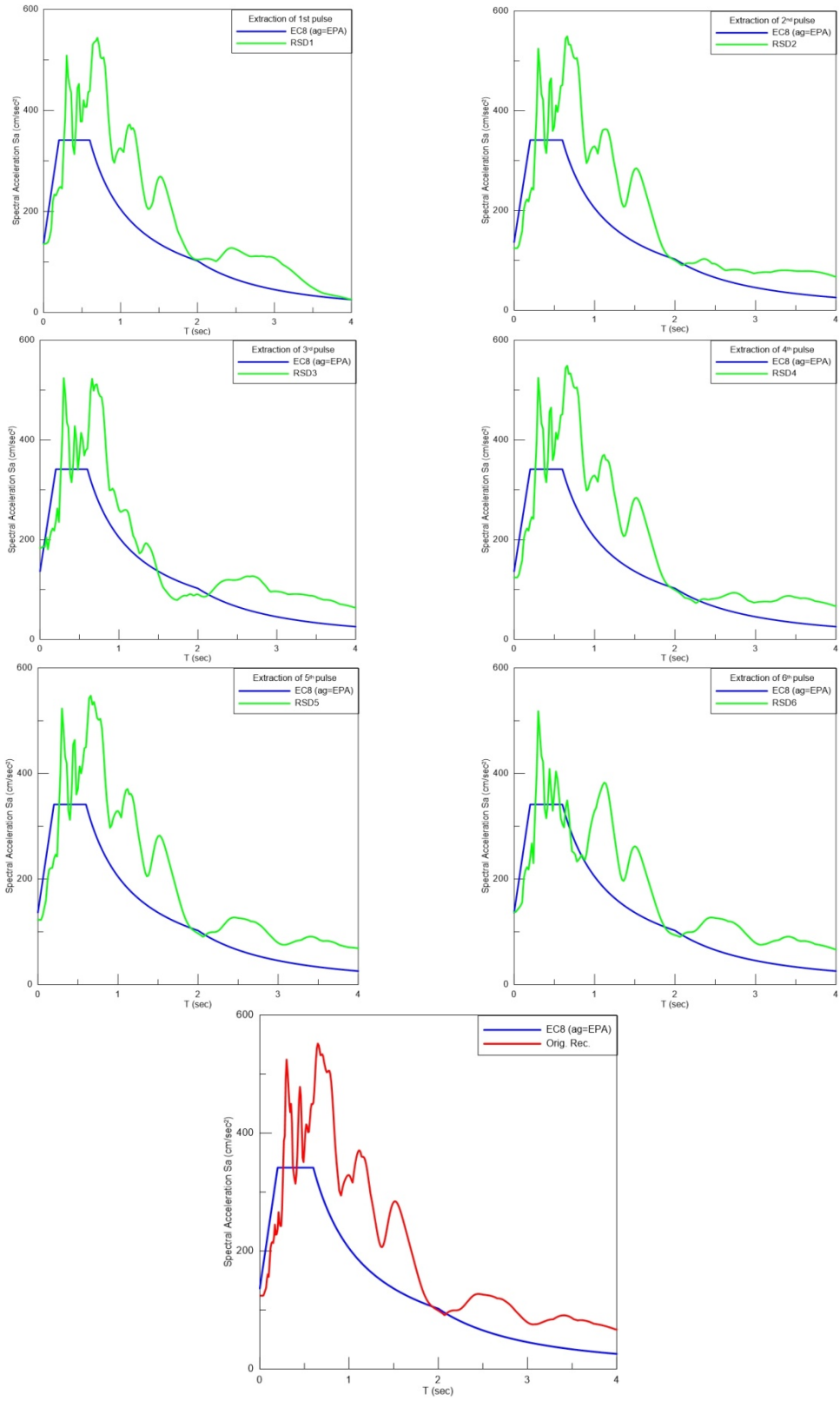




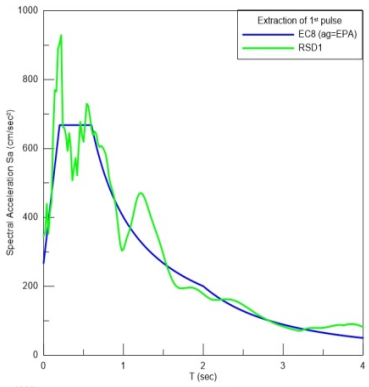


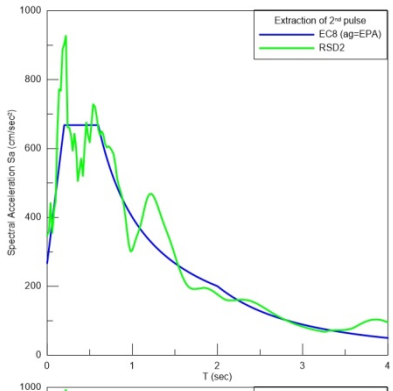


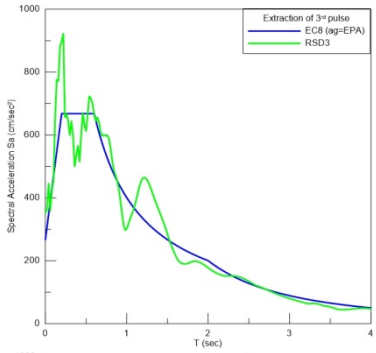
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 579-1:

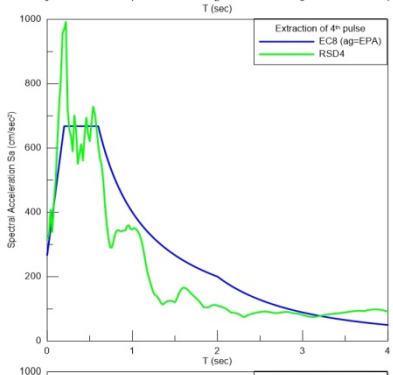


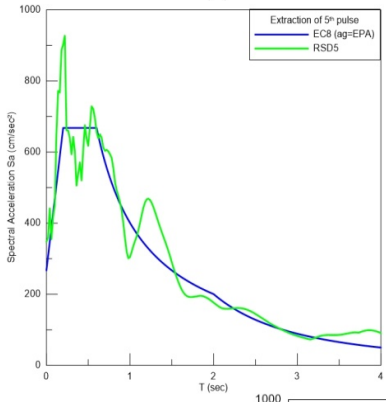
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 721-2:

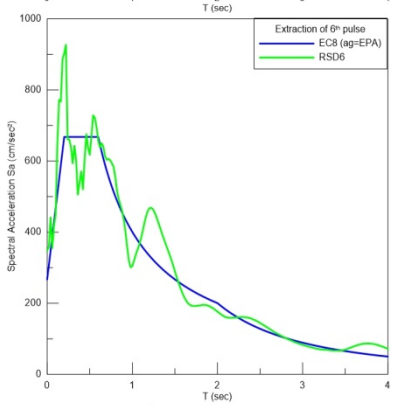


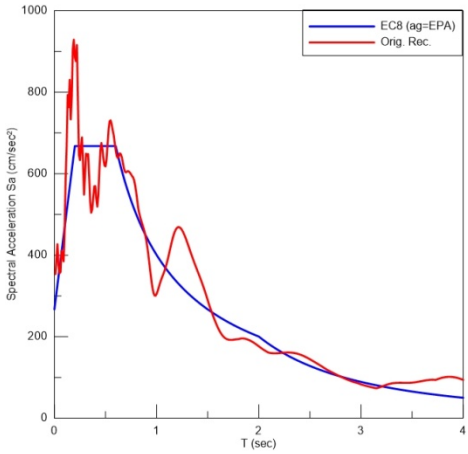




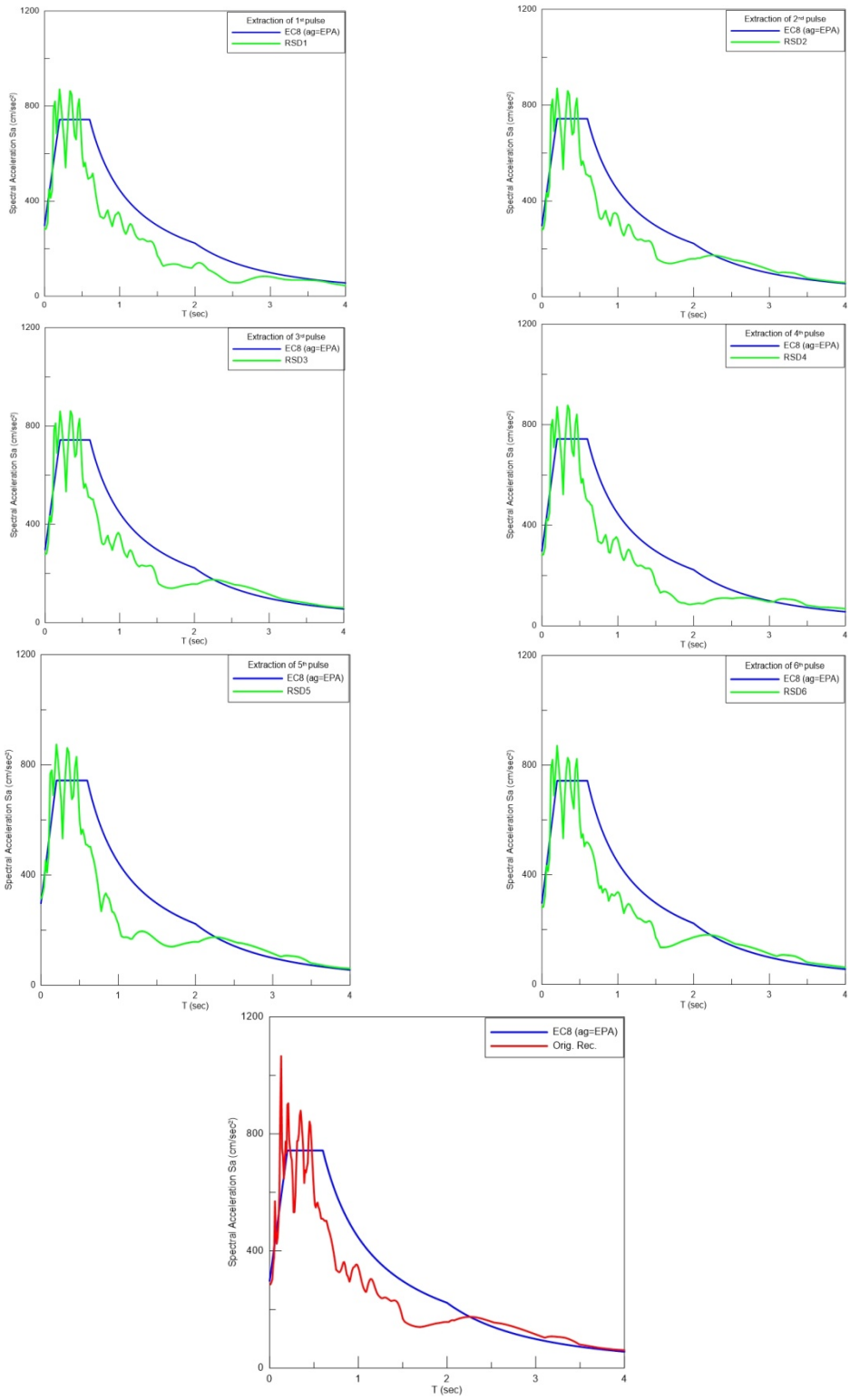




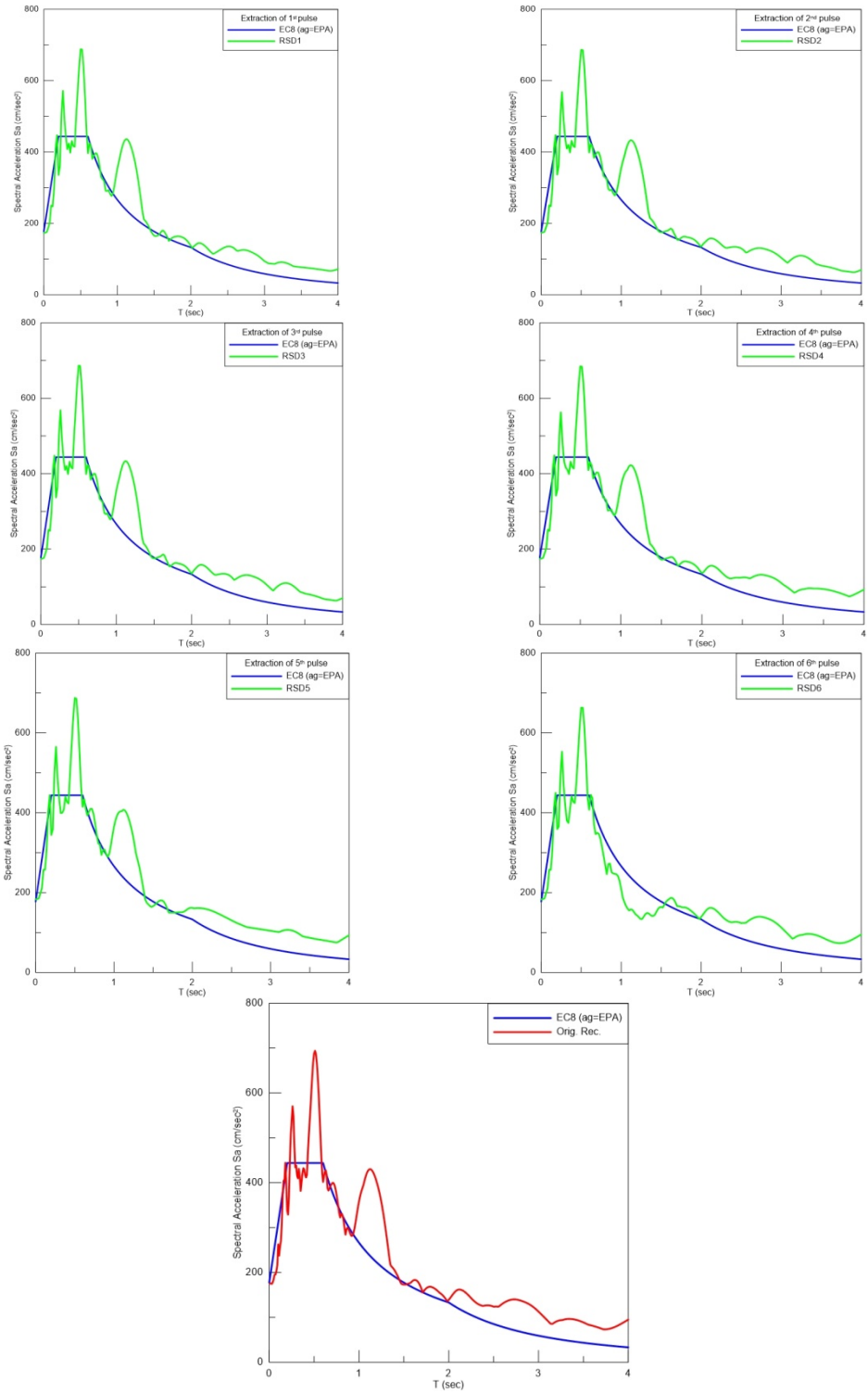




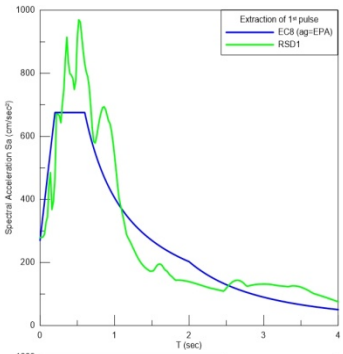
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 725-1:

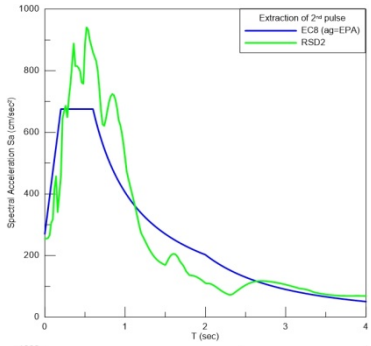


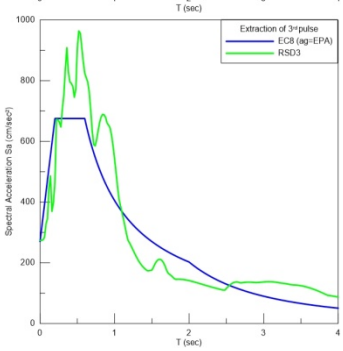
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 776-1:

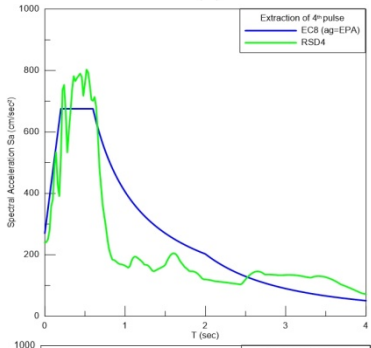


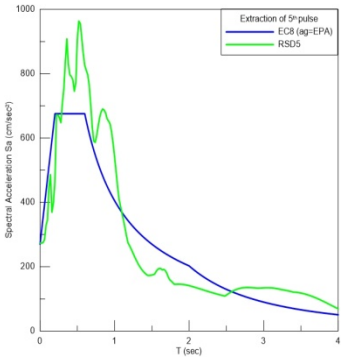
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 778-1:

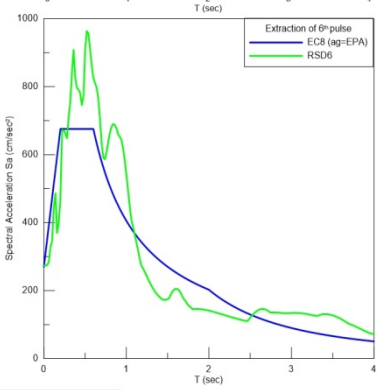


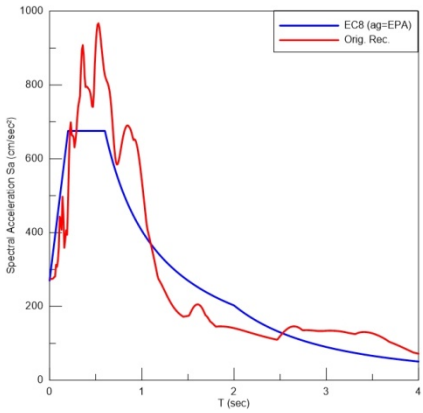




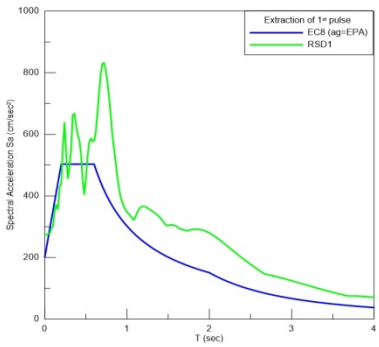


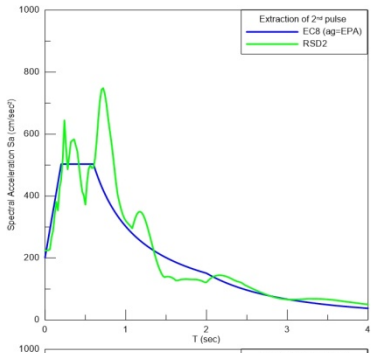


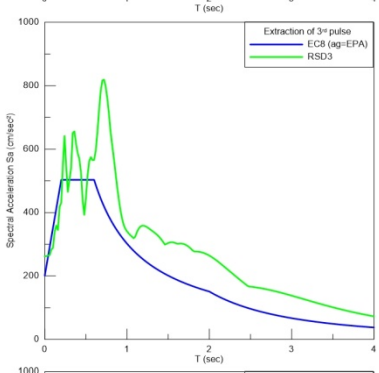


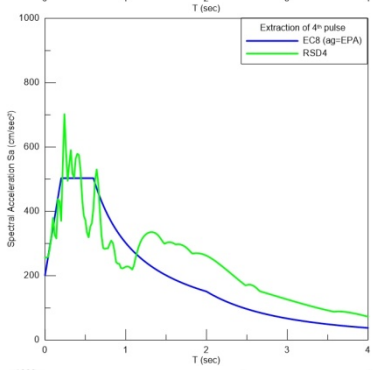


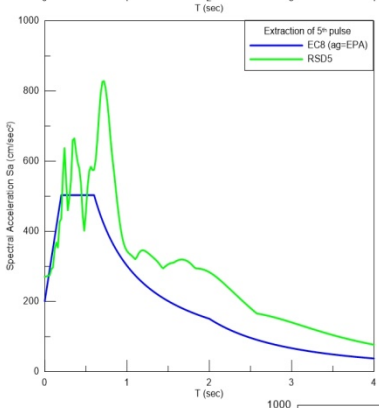
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 778-2:

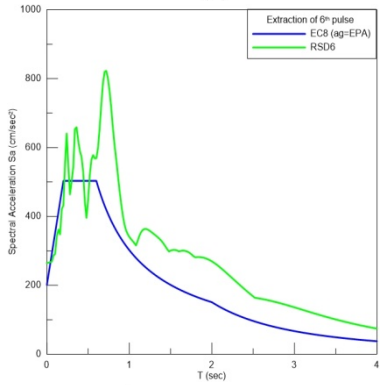


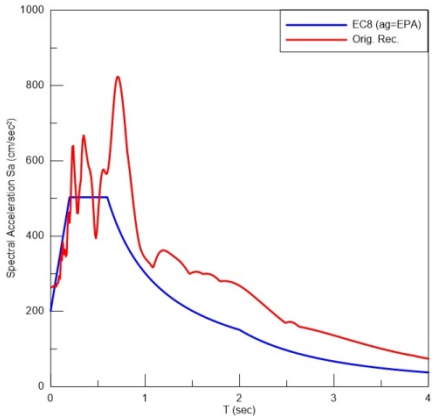




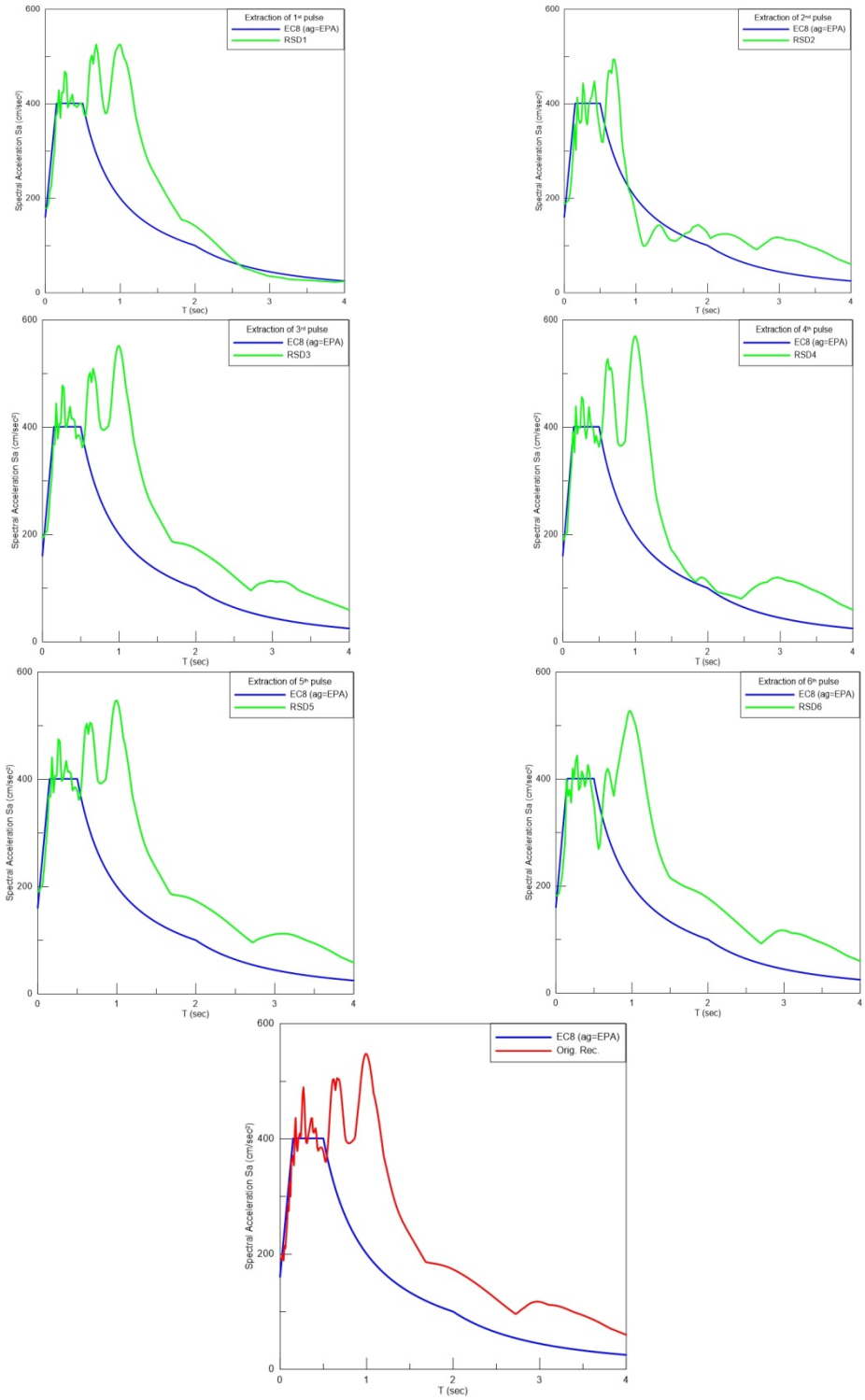




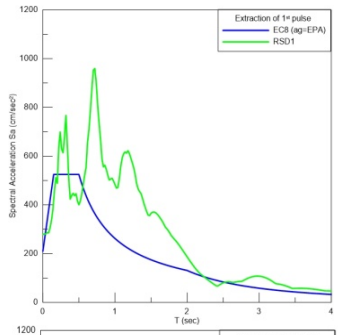


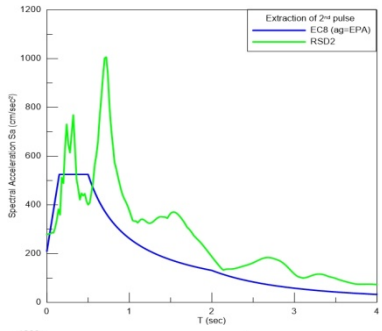


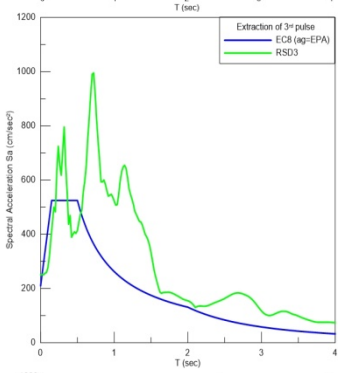
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 787-1:

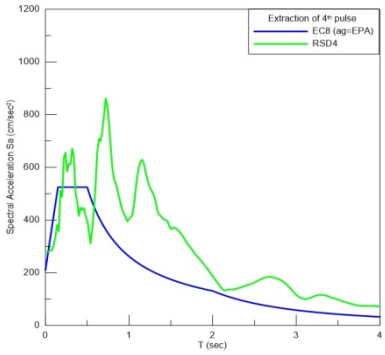


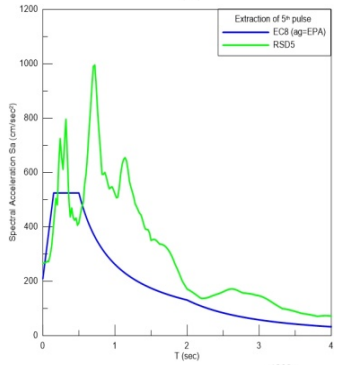
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 864-1:

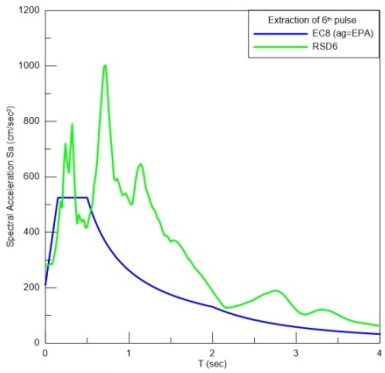


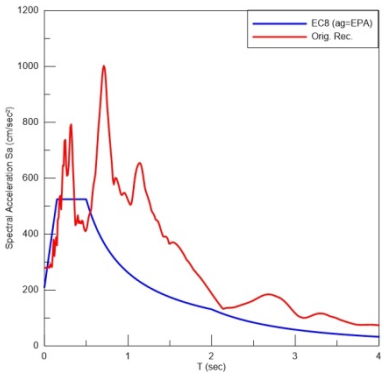




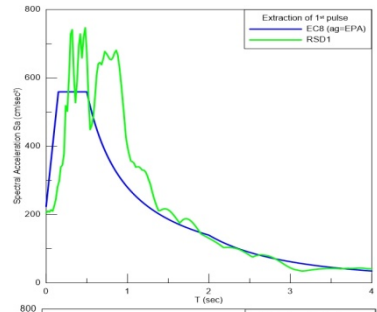


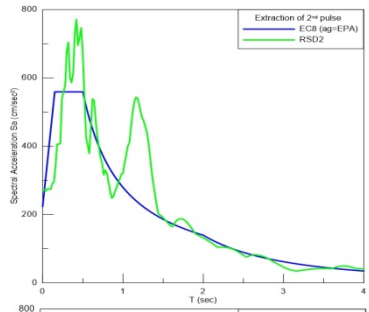


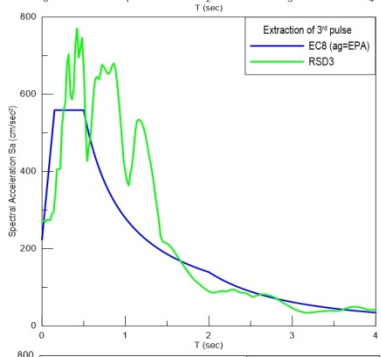


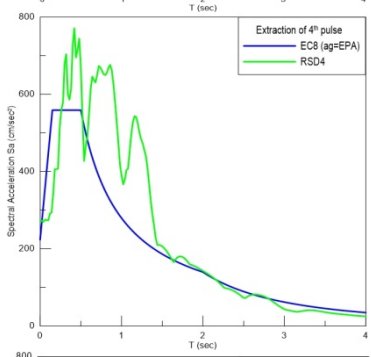


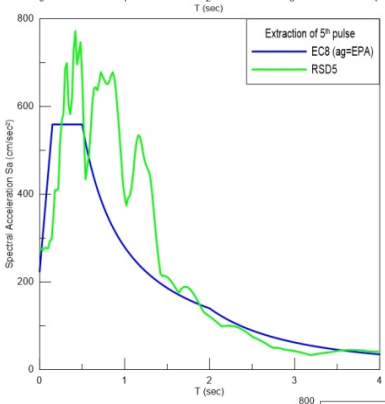
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 864-2:

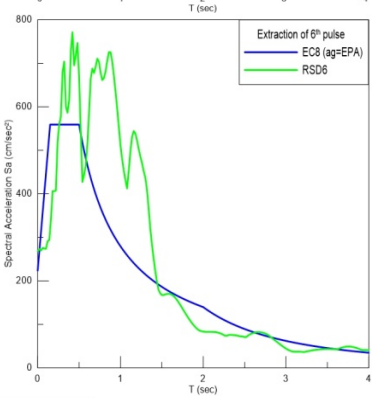


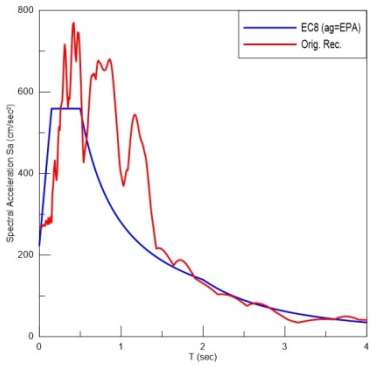




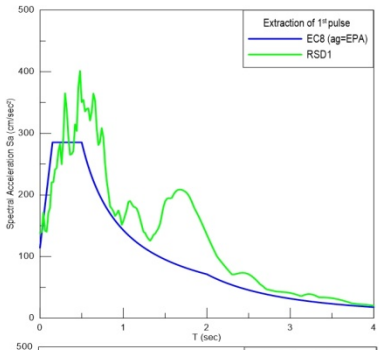


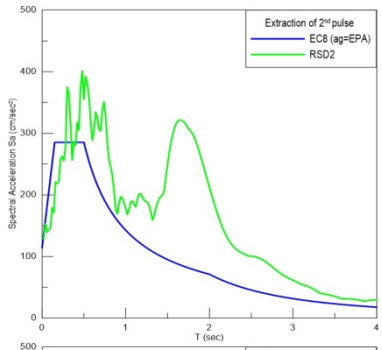


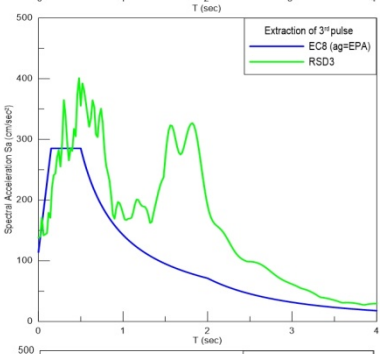


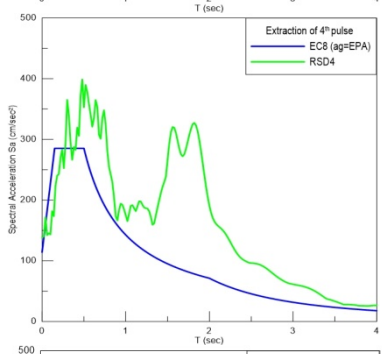


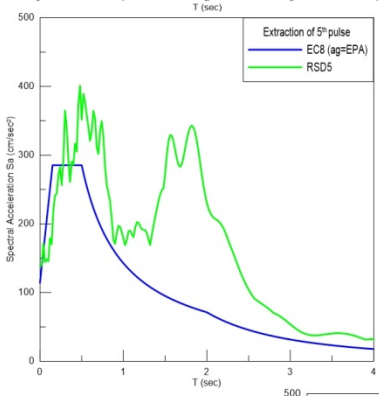
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 881-2:

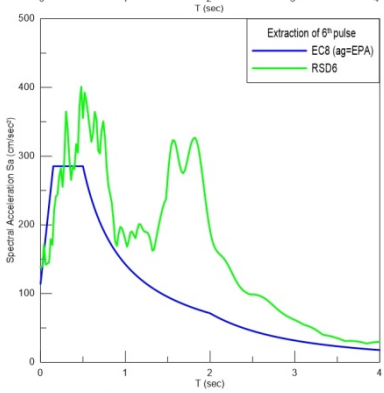


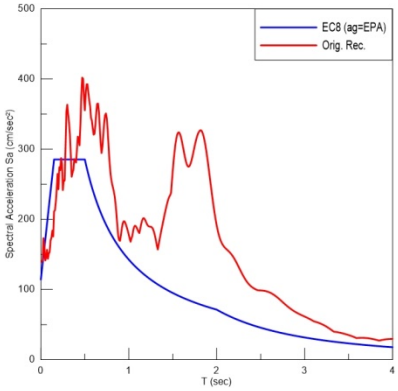




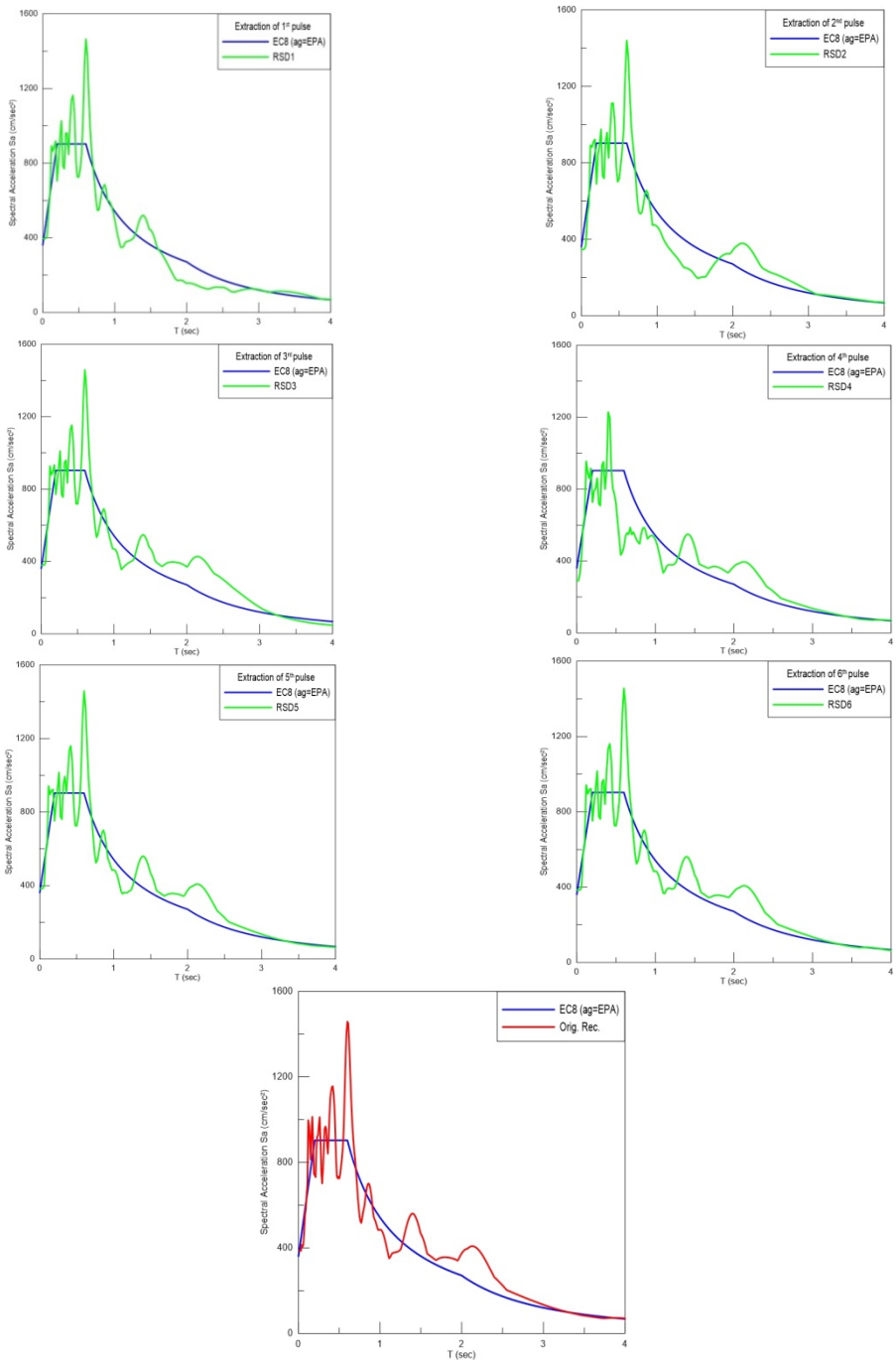




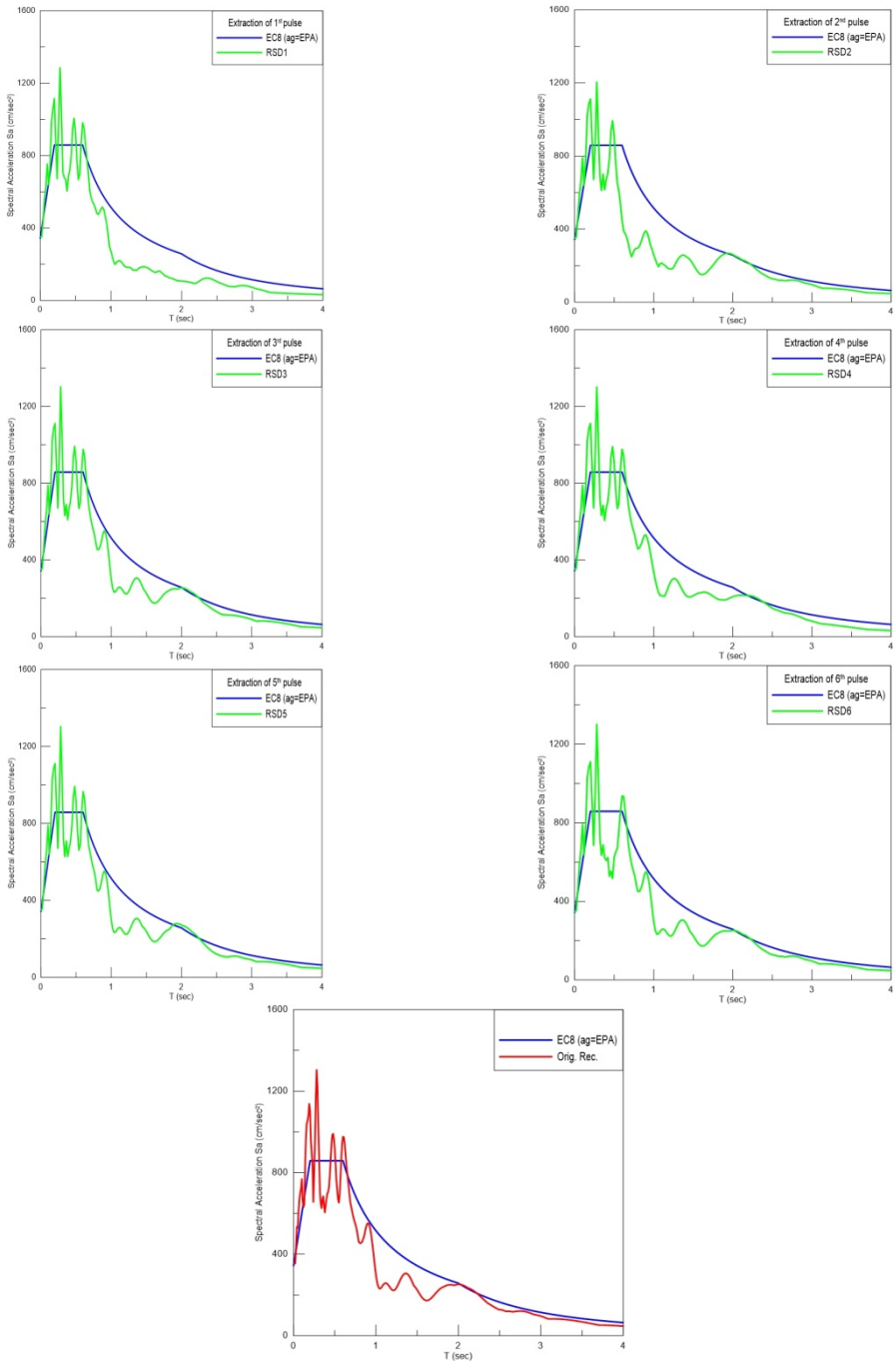




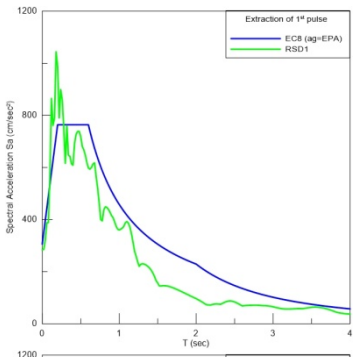
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 959-1:

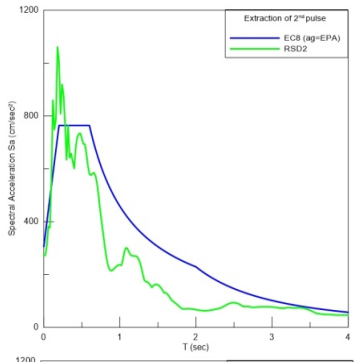


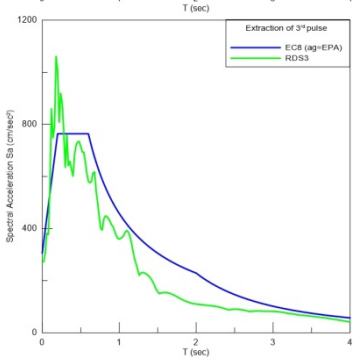
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 959-2:

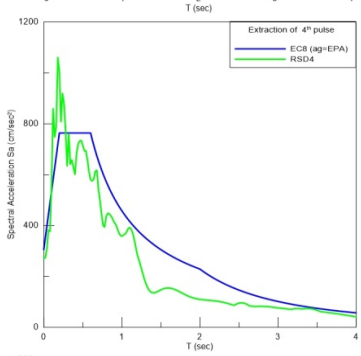


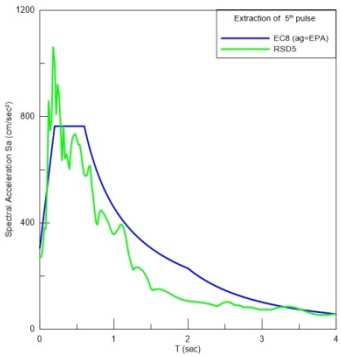
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1082-1:

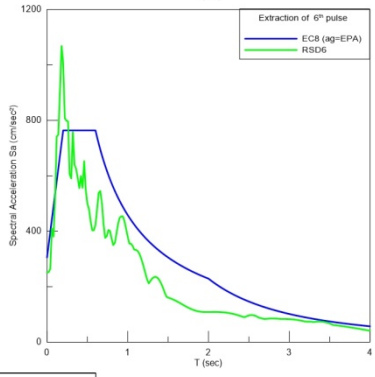


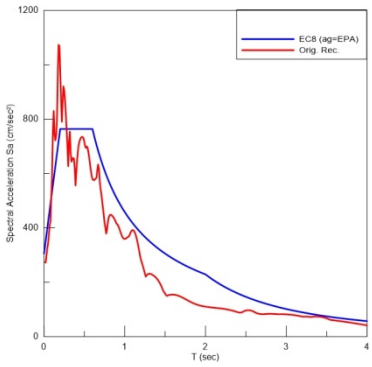




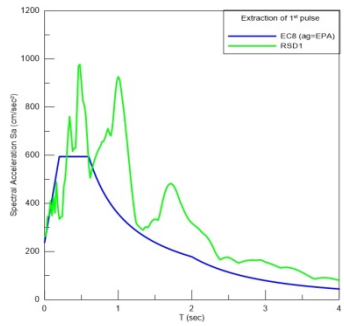


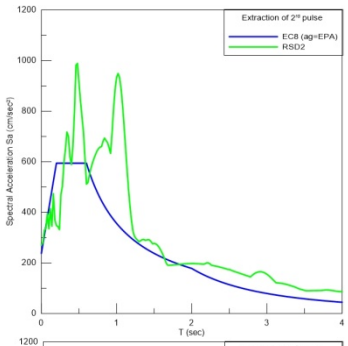


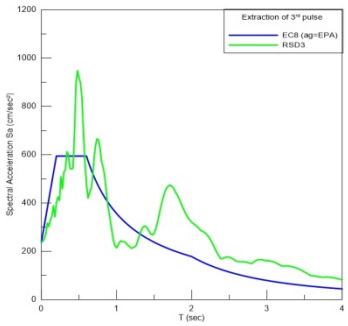


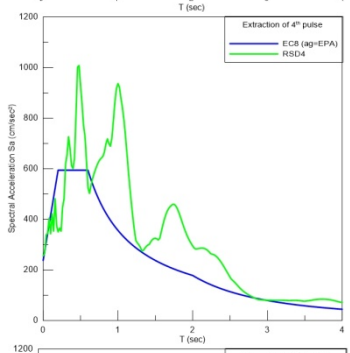


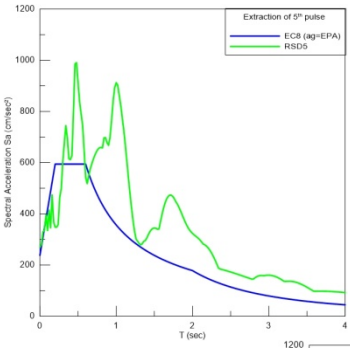
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1101-1:

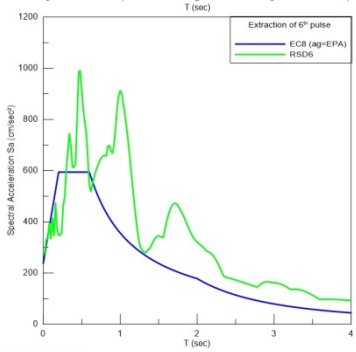


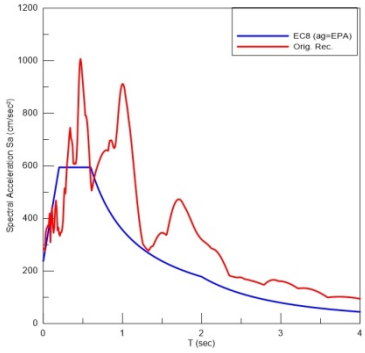




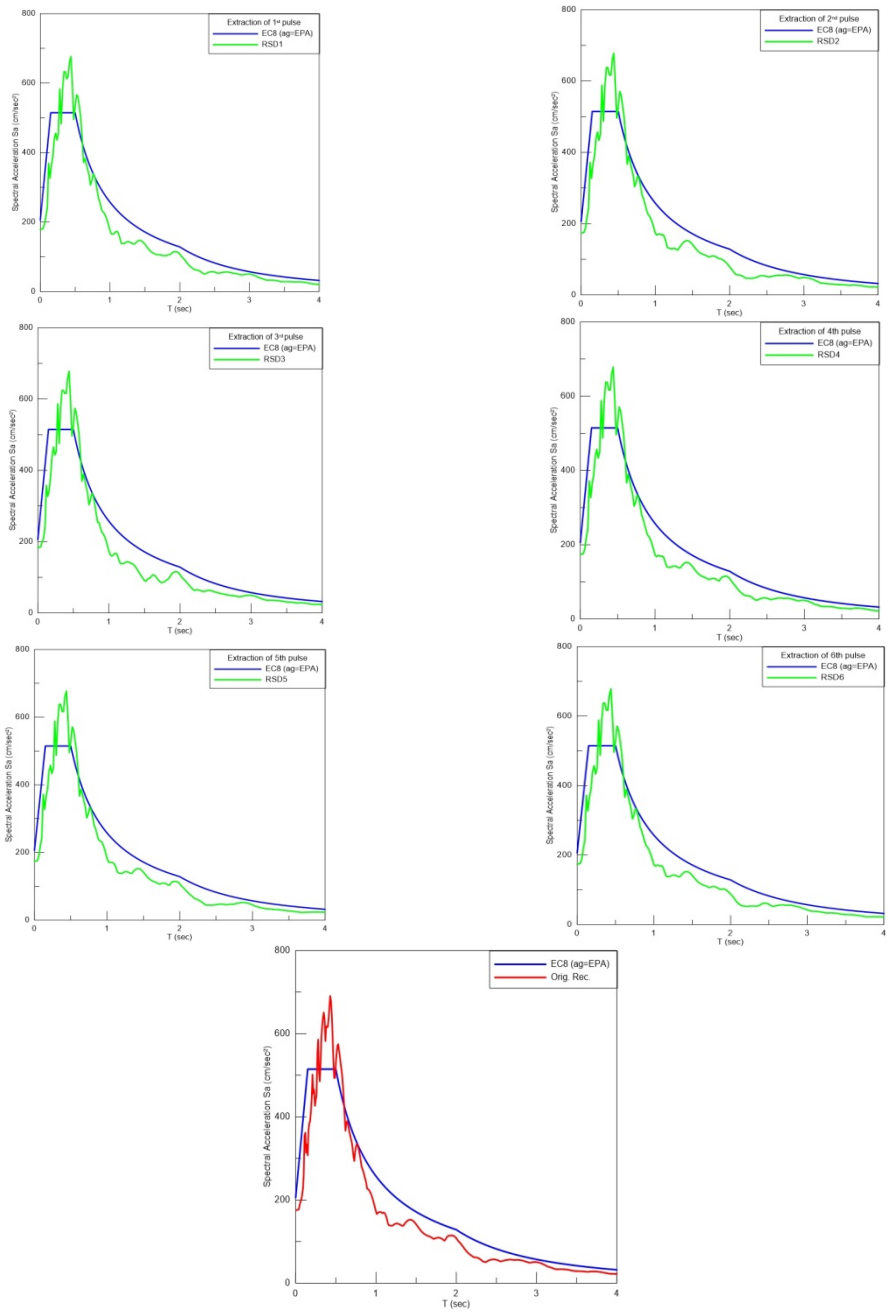




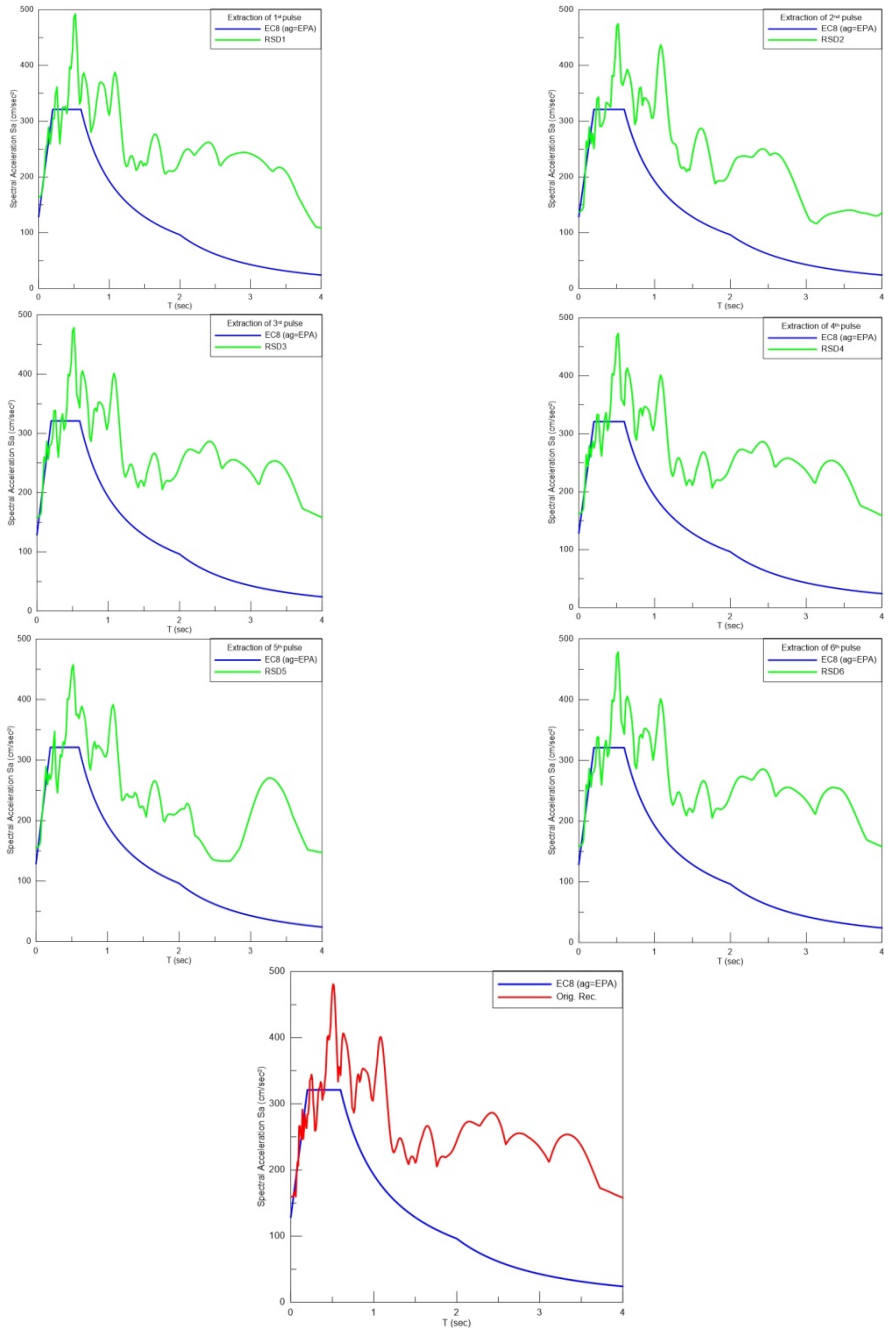




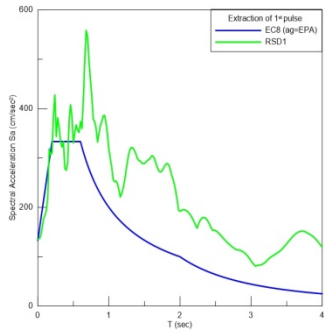
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1184-1:

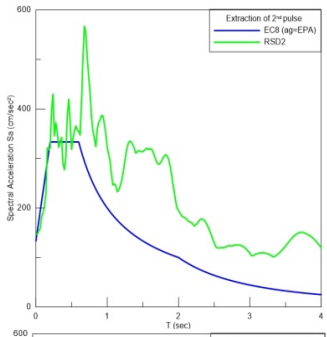


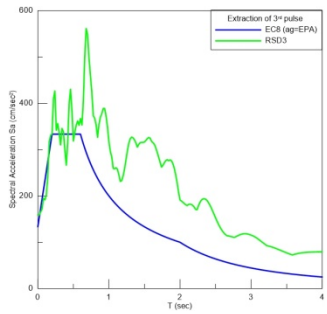
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1194-1:

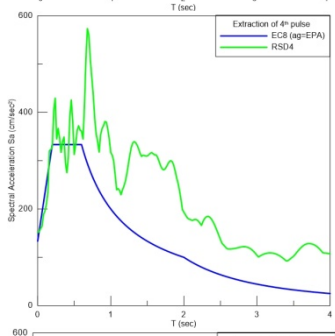


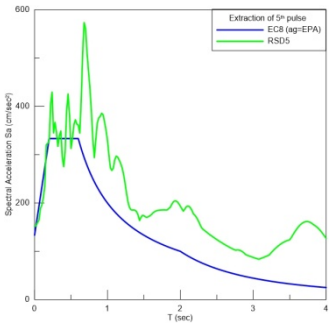
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1194-2:

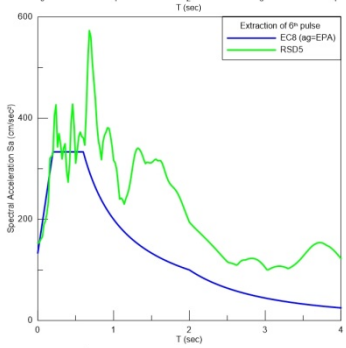


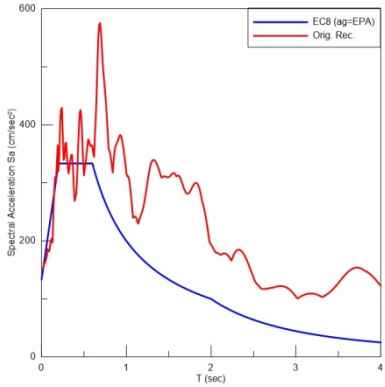




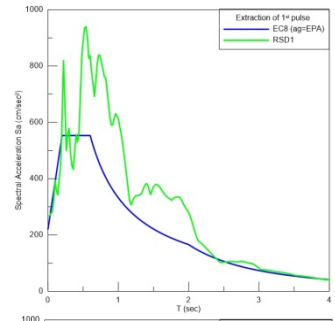


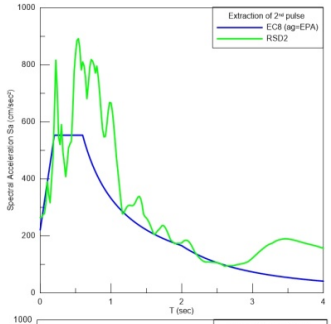


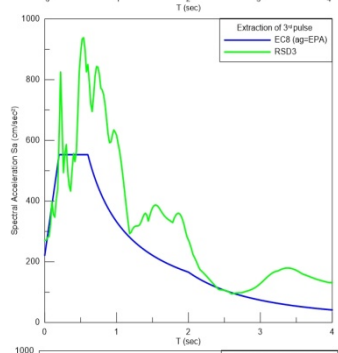


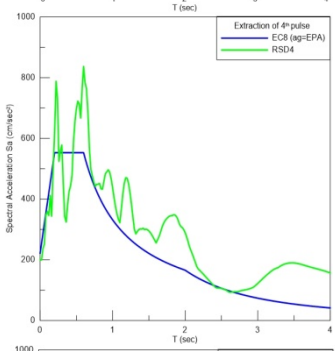


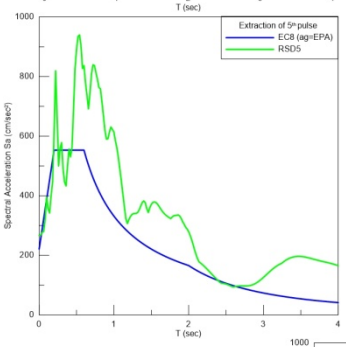
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1203-1:

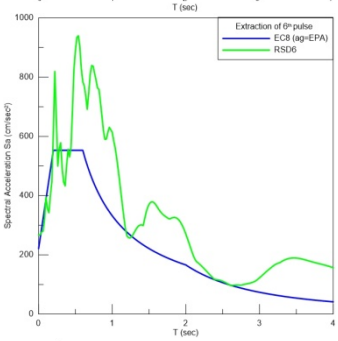


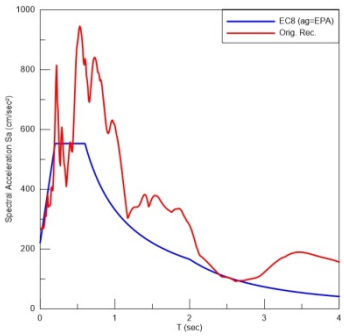




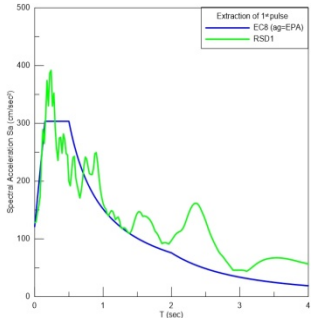


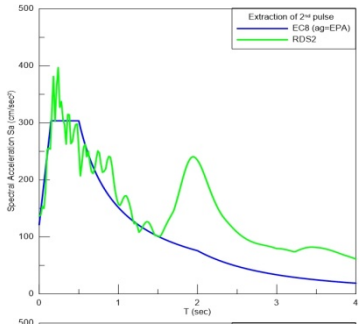


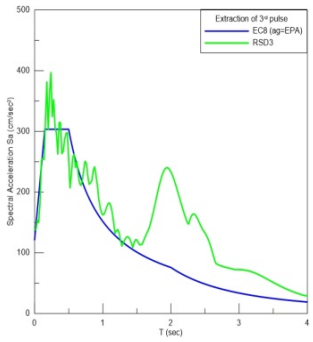


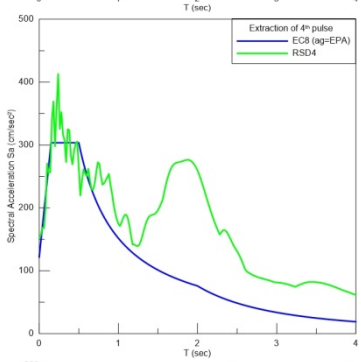


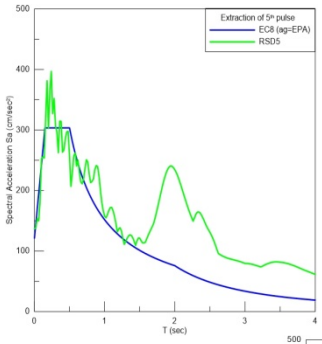
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1208-1:

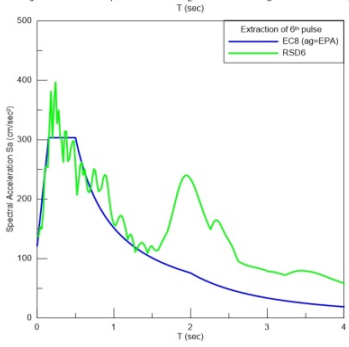


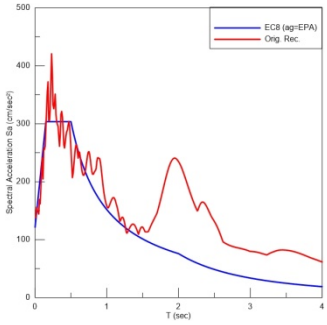




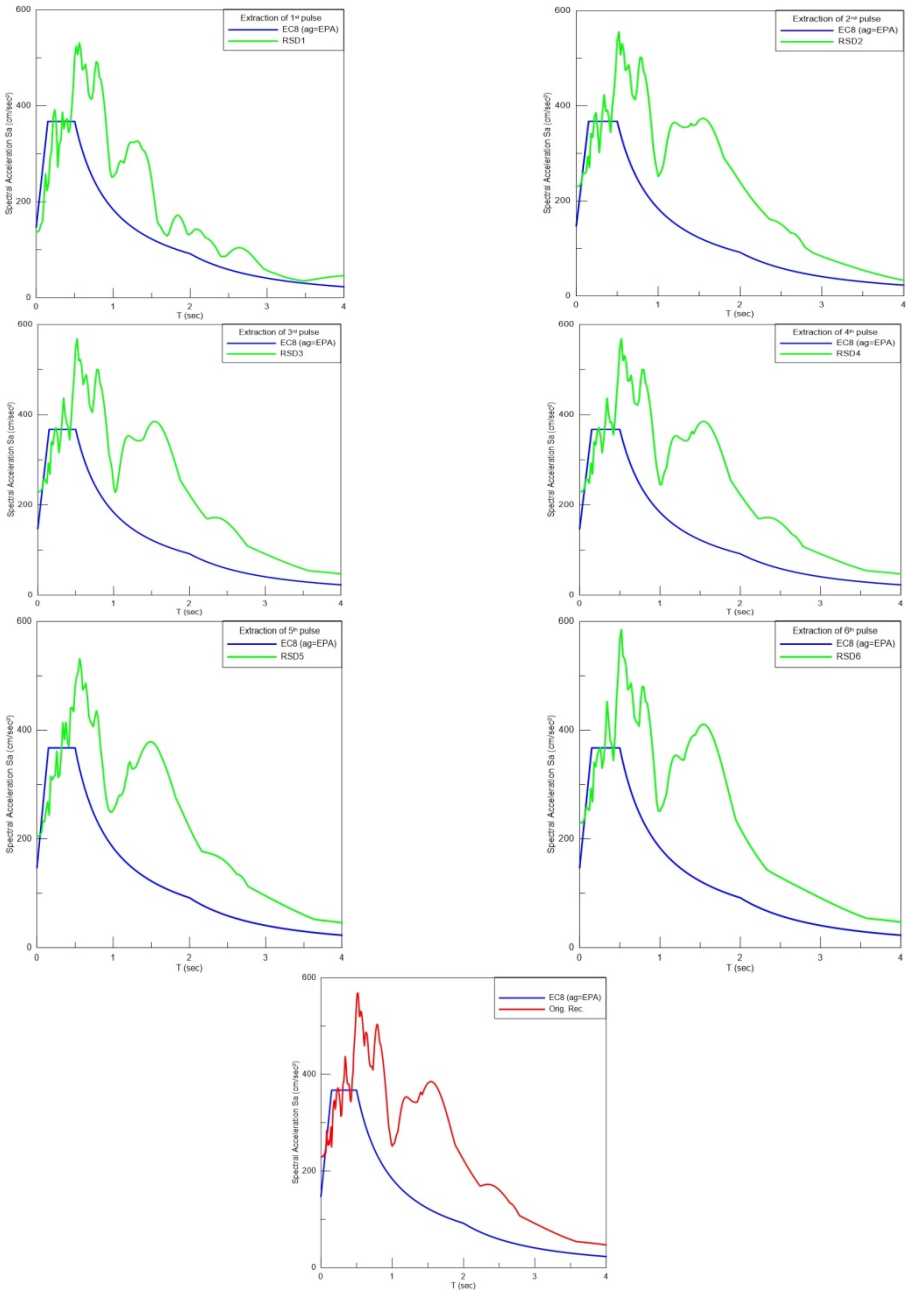




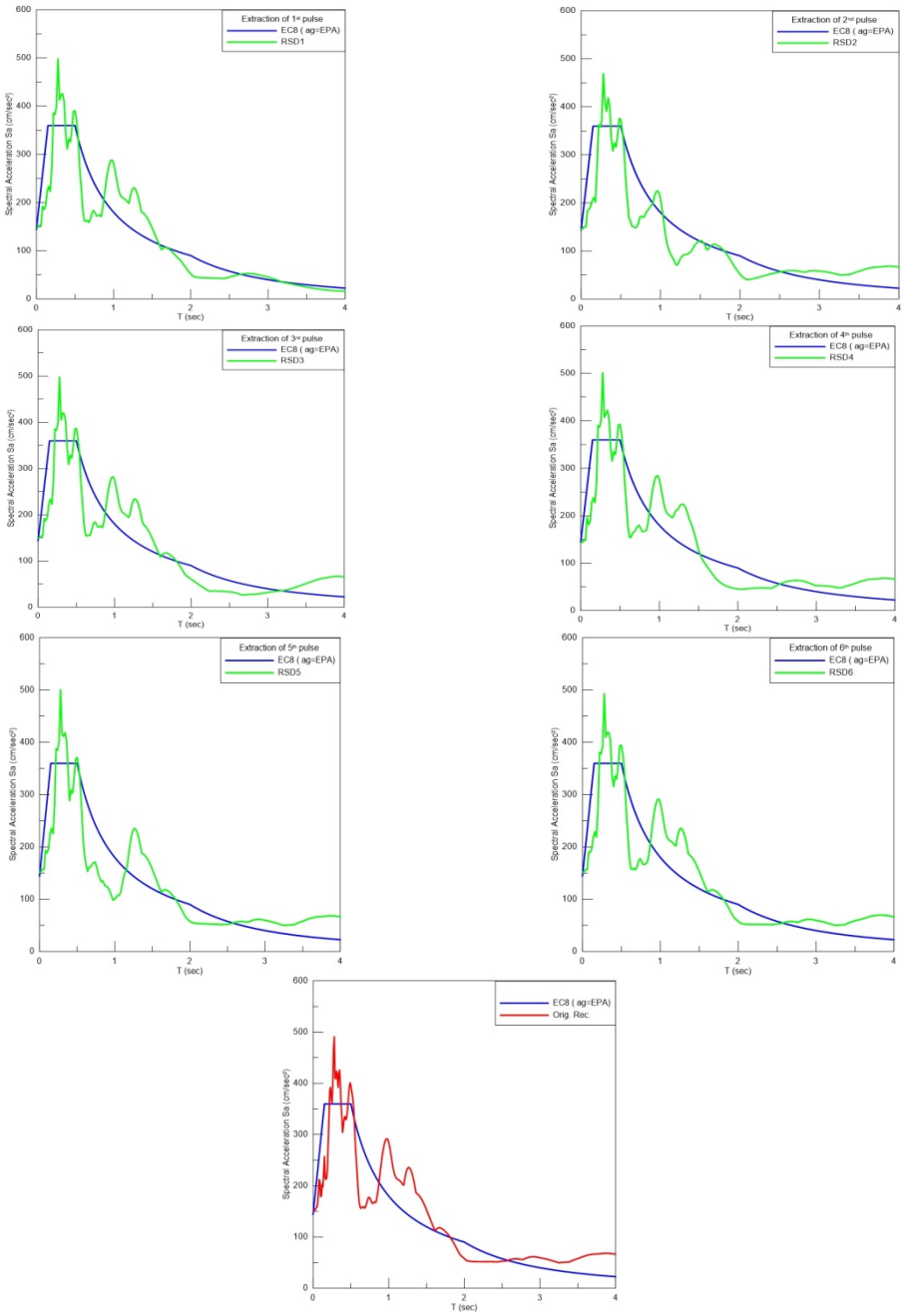




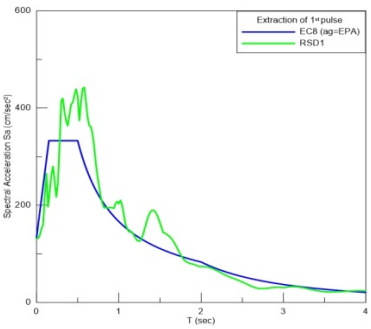
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1227-1:

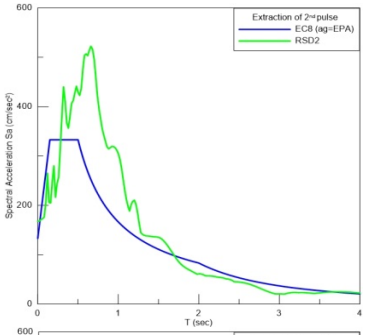


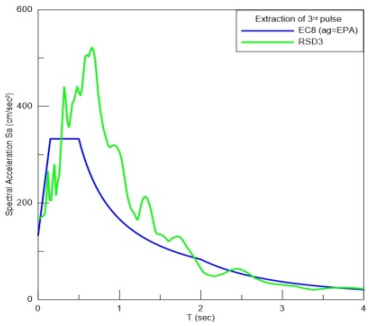
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1297-1:

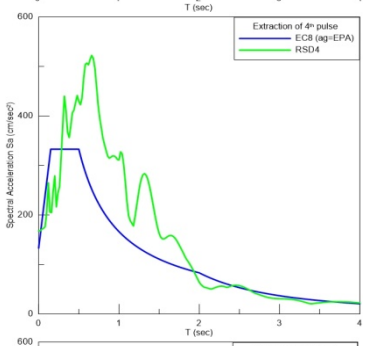


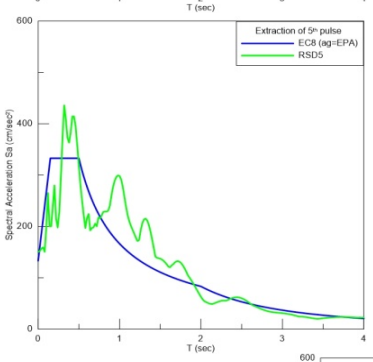
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1297-2:

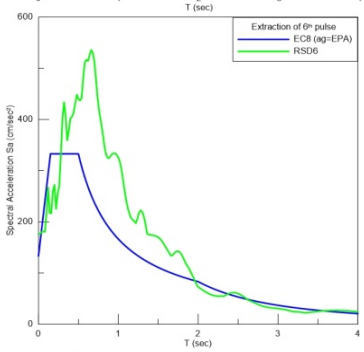


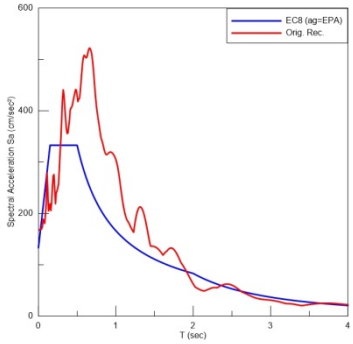




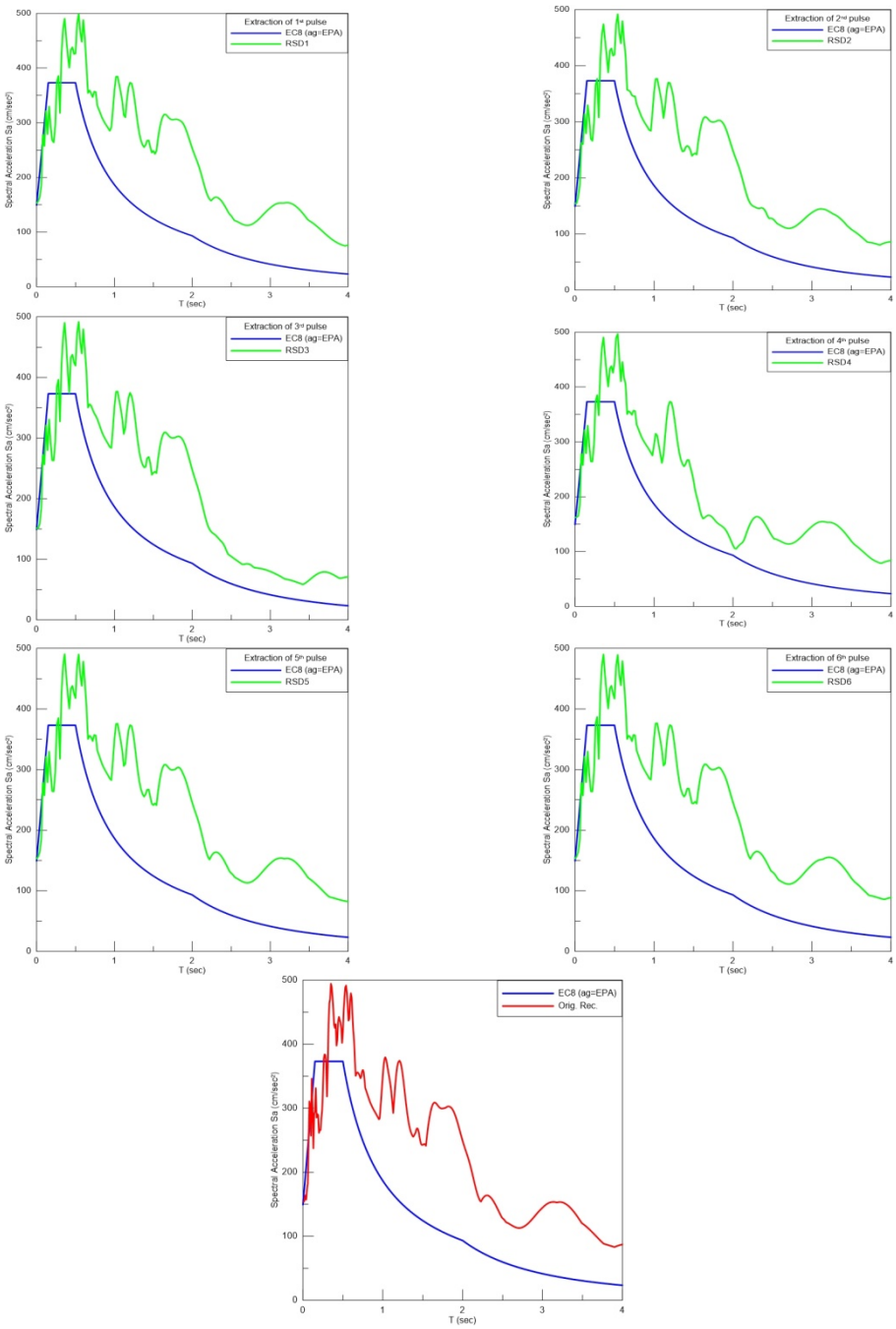




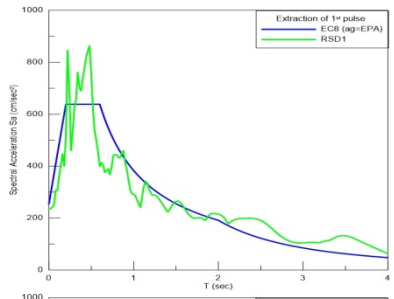


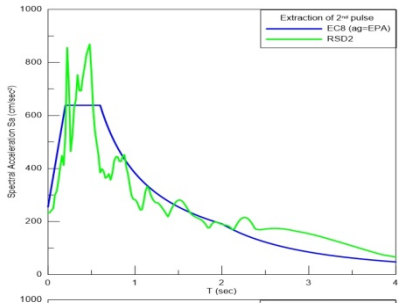


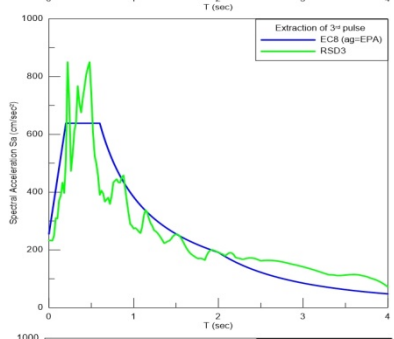
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1494-2:

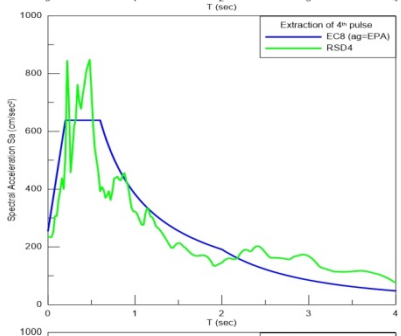


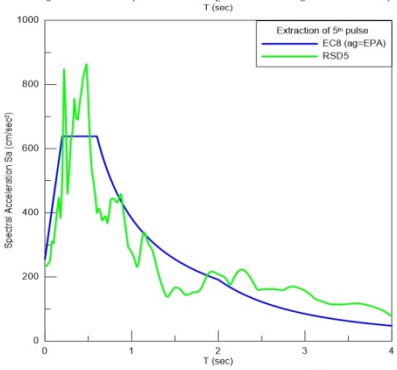
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1495-1:

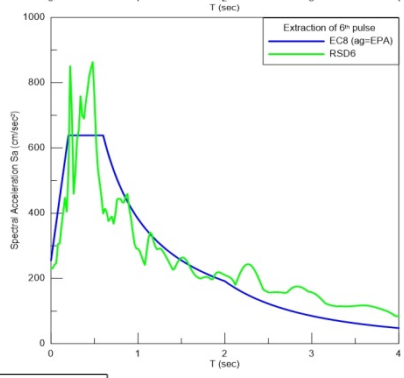


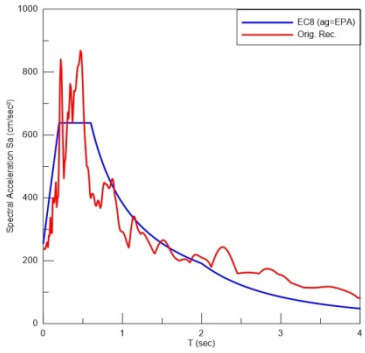




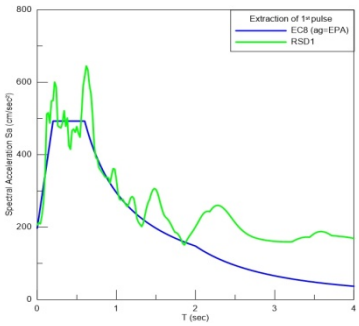


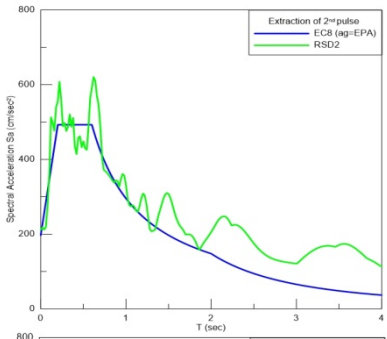


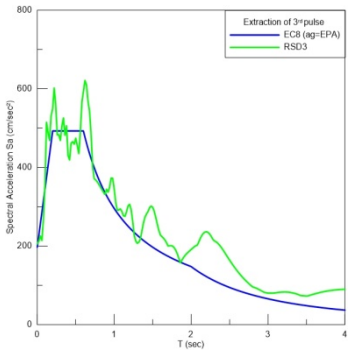


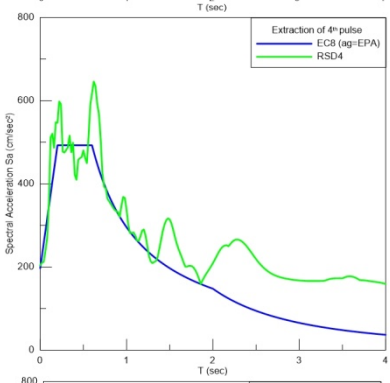


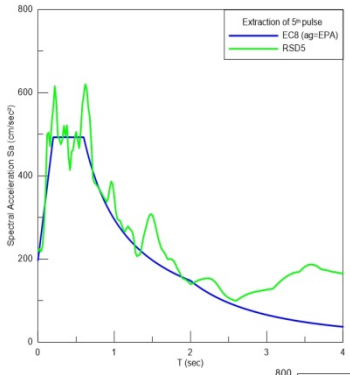
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1495-2:

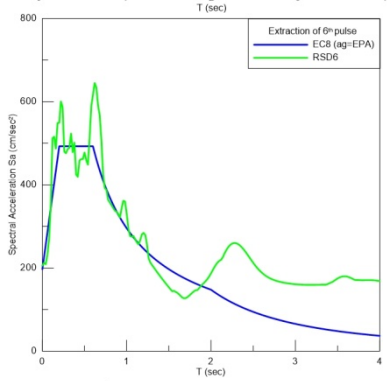


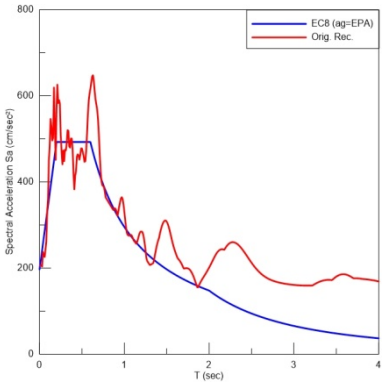




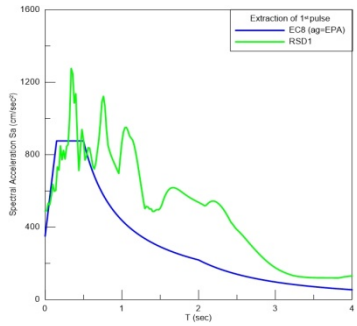


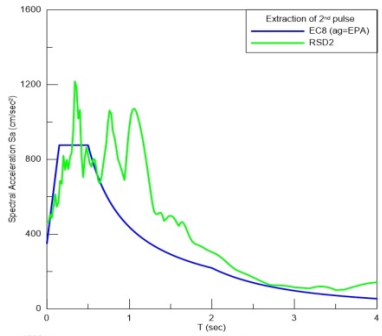


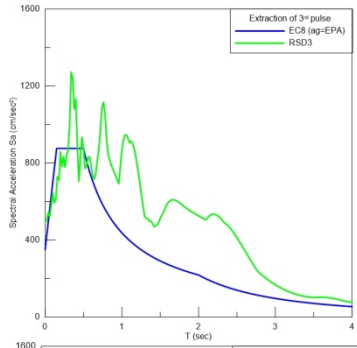


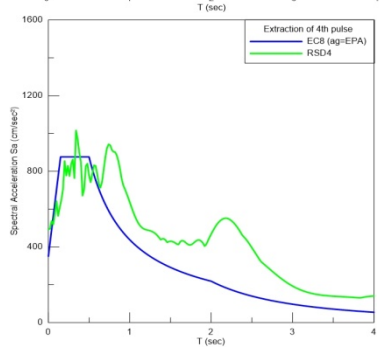


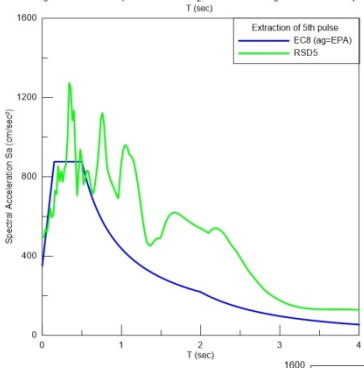
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1504-1:

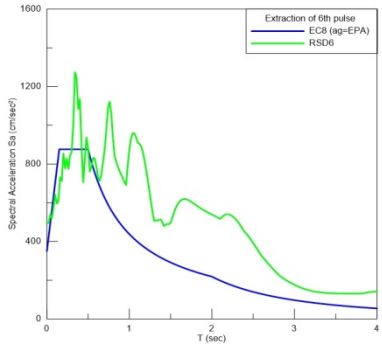


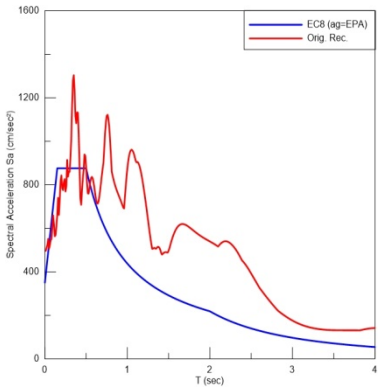




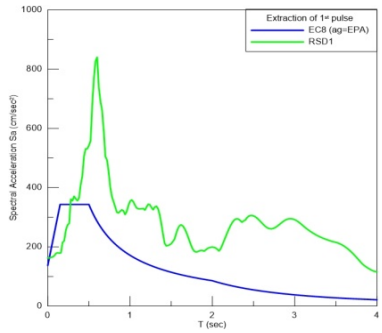


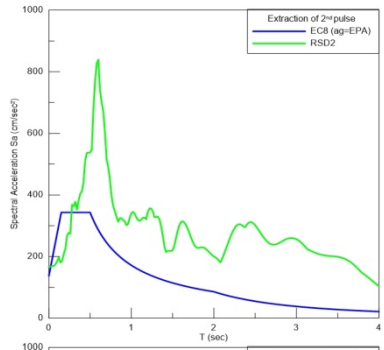


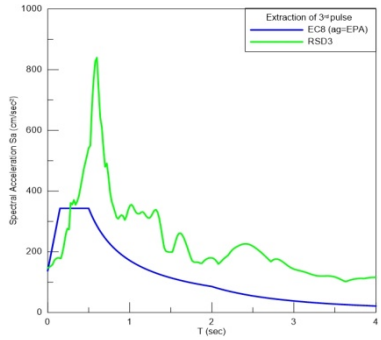


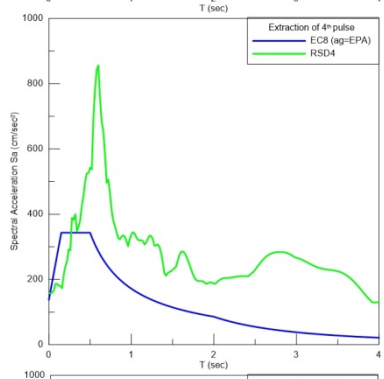


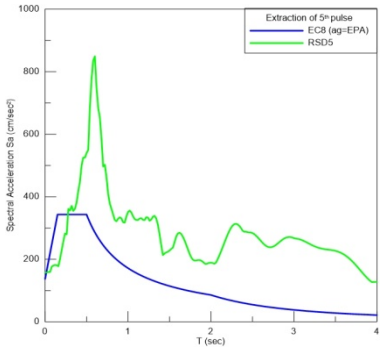
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1506-2:

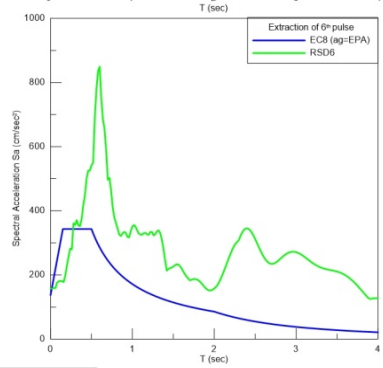


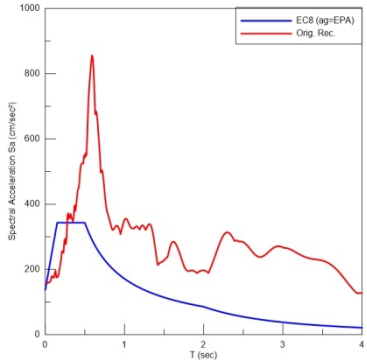




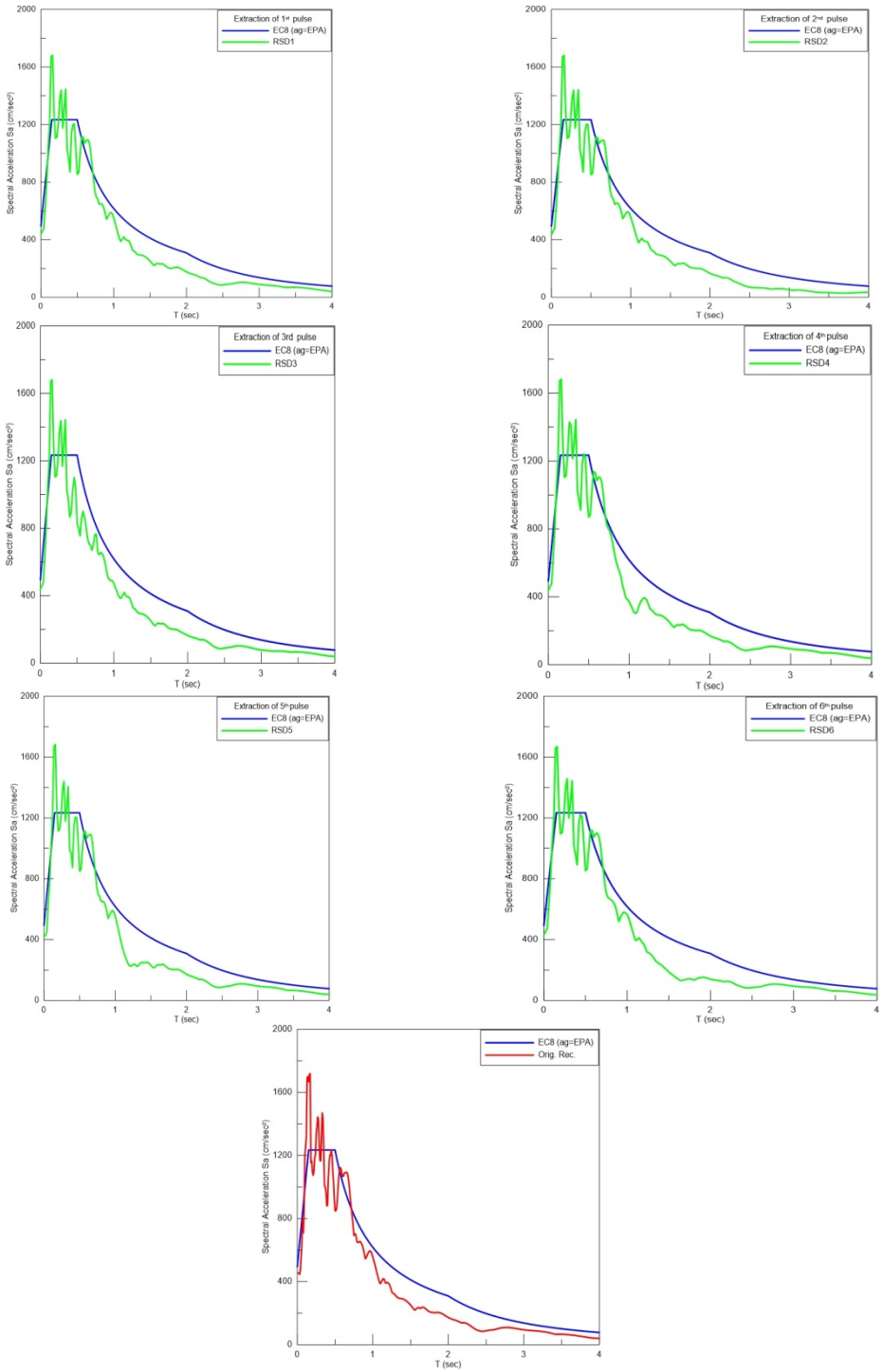




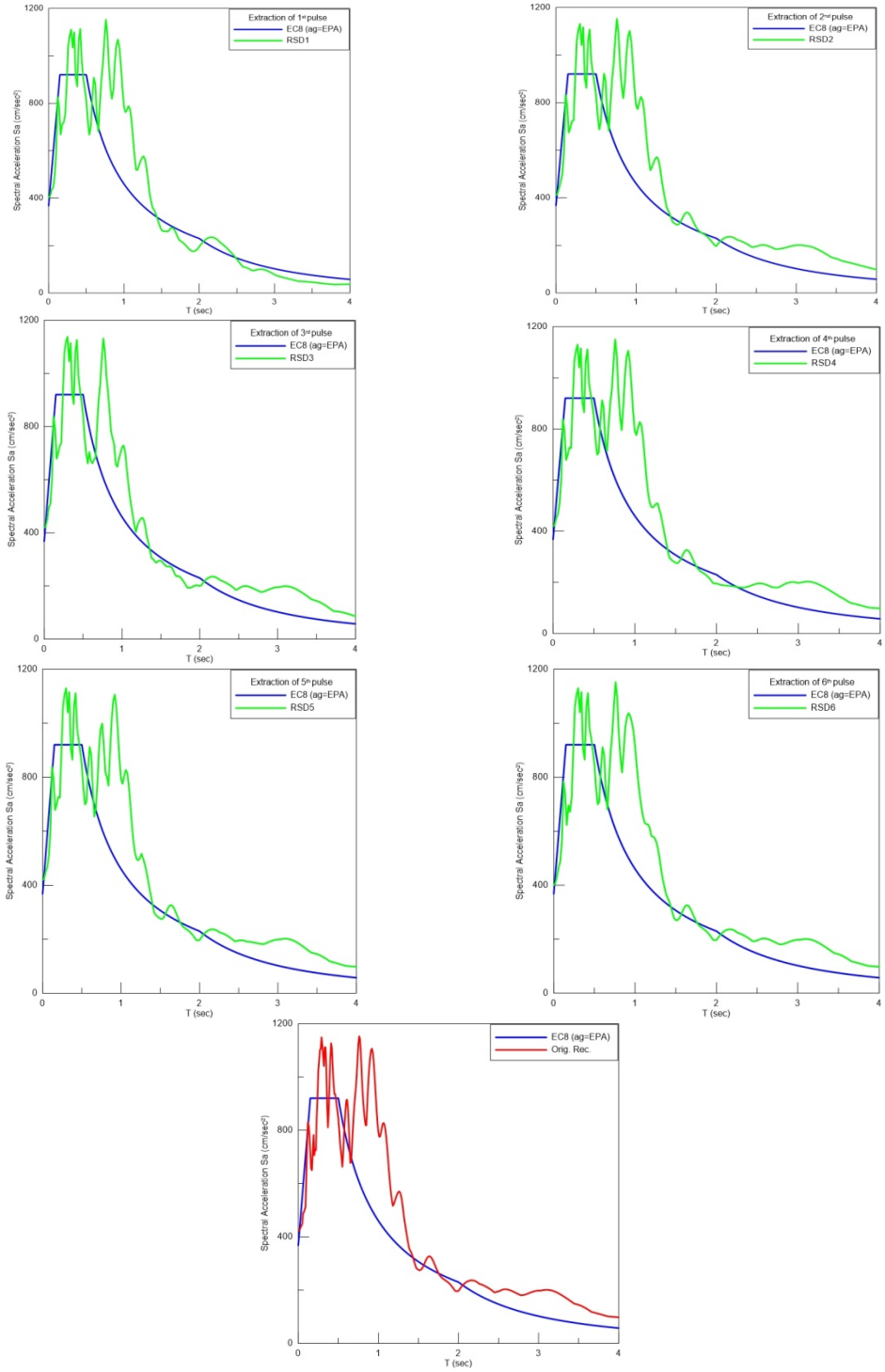




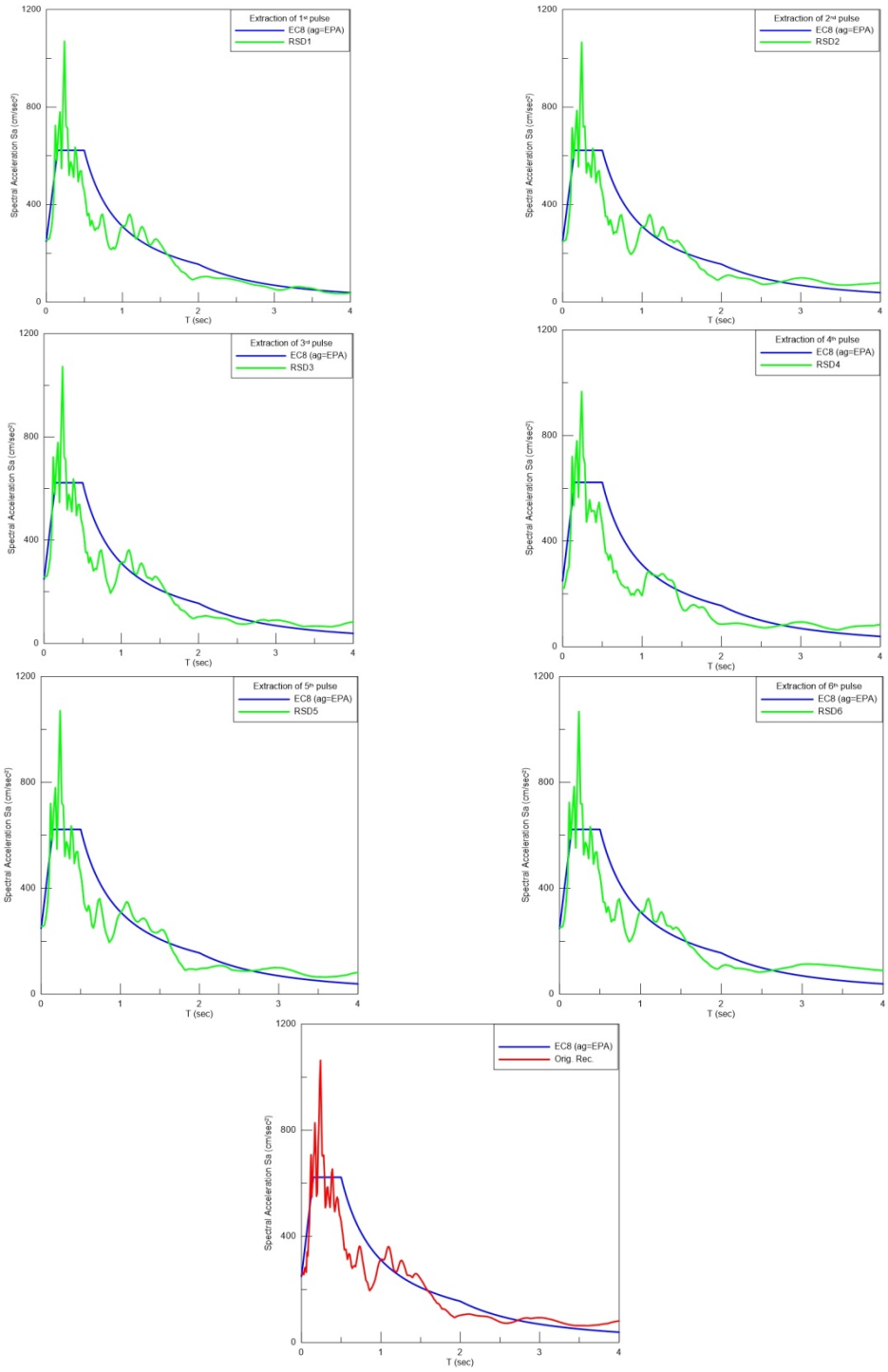
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1512-1:



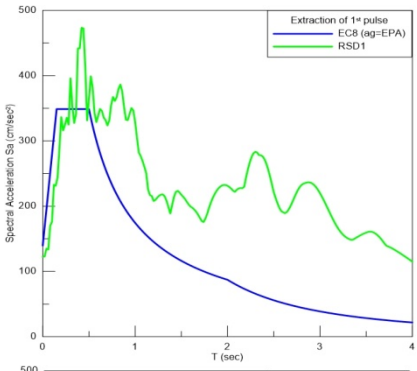
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1517-2:

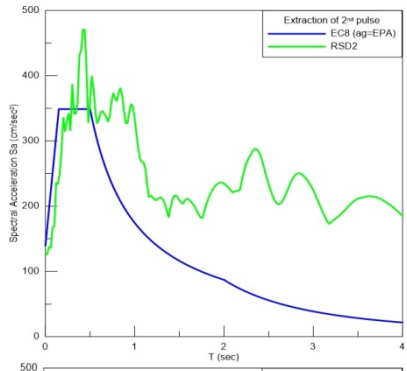


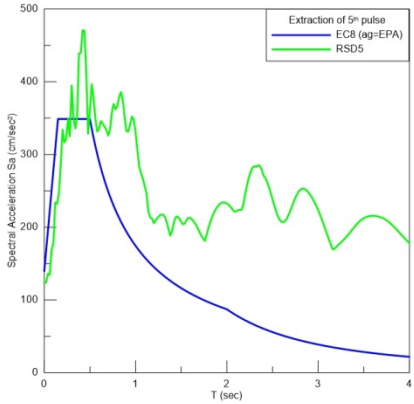
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1521-2:

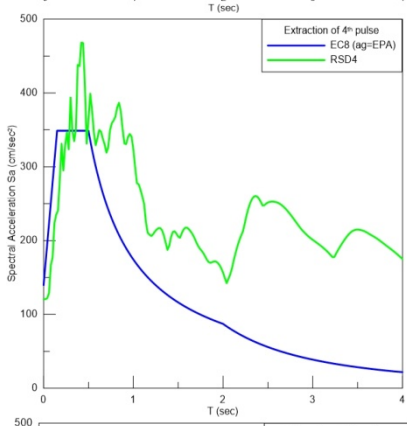


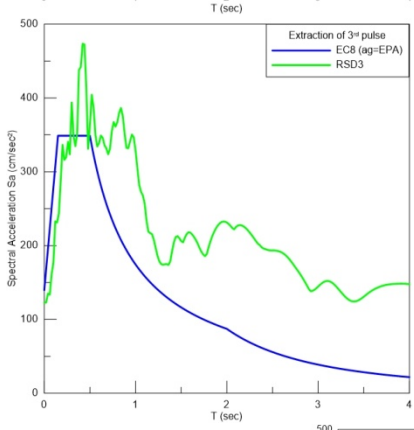
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1533-2:

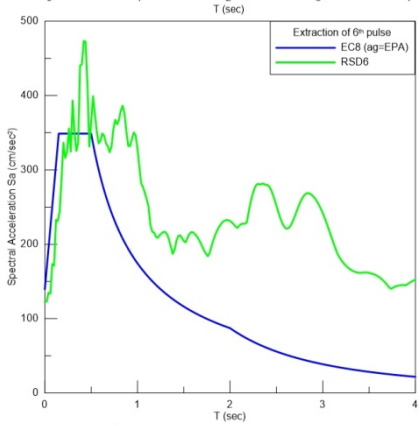


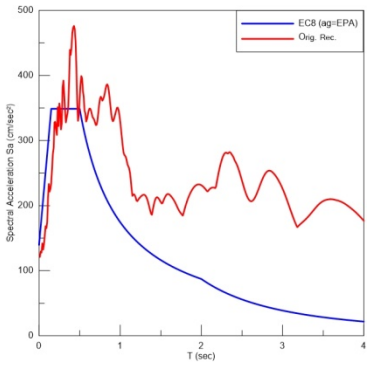




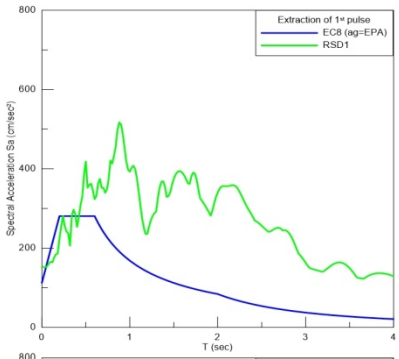


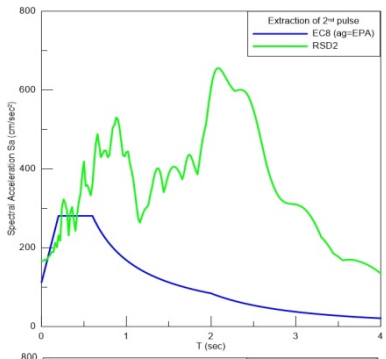


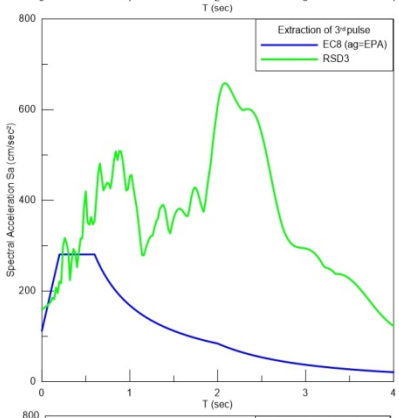


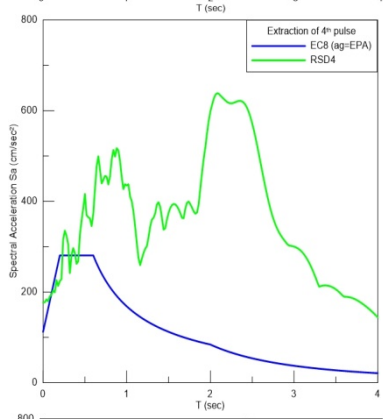


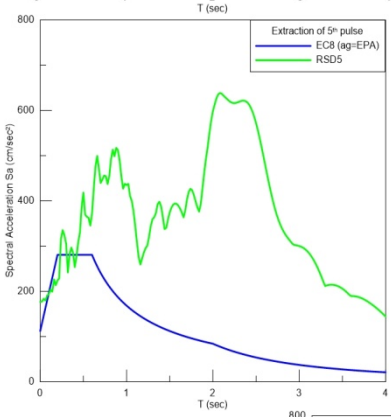
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1536-1:

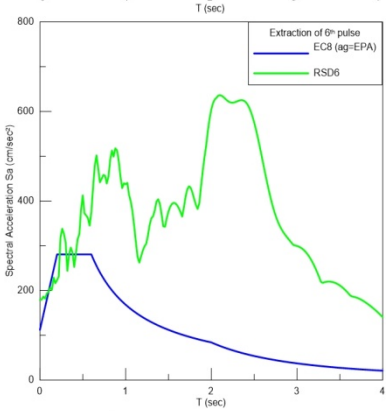


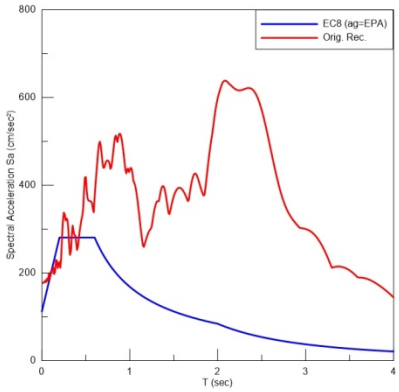




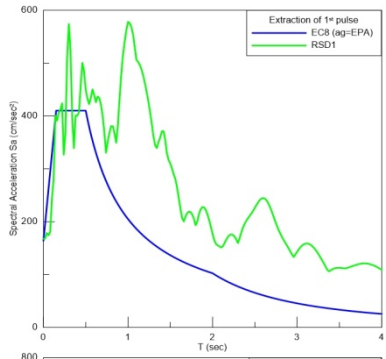


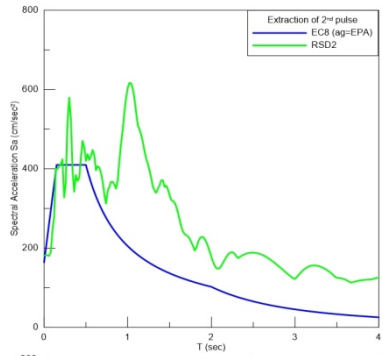


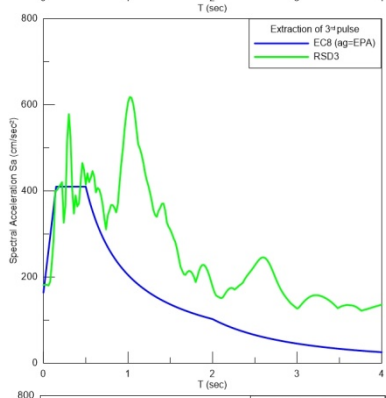


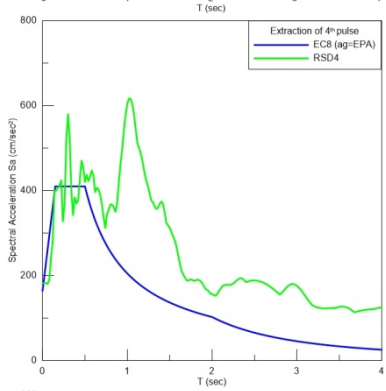


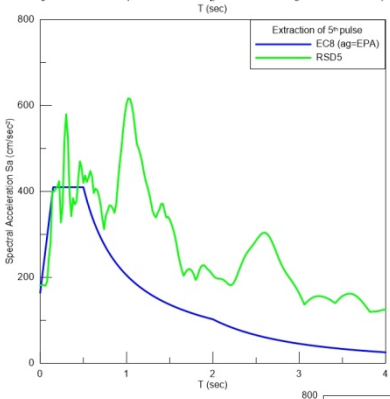
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1541-1:

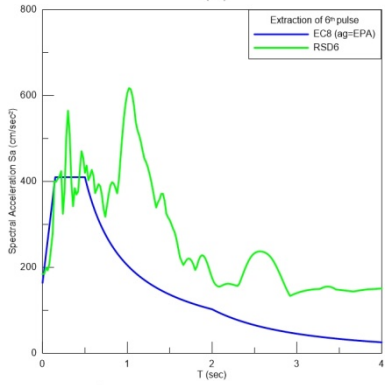


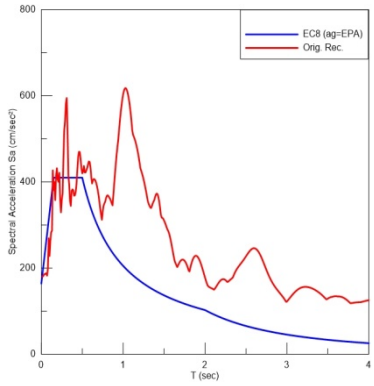




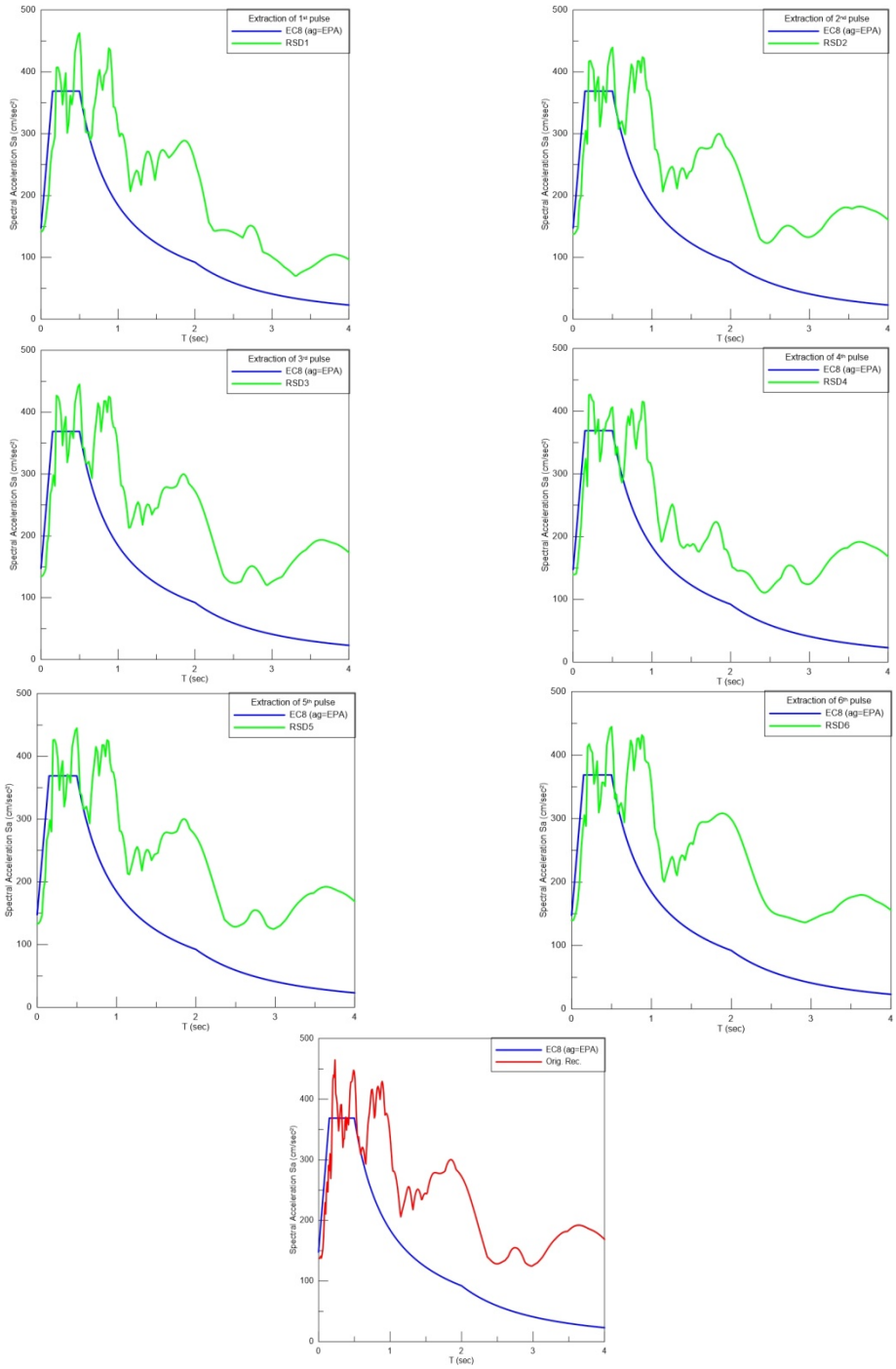




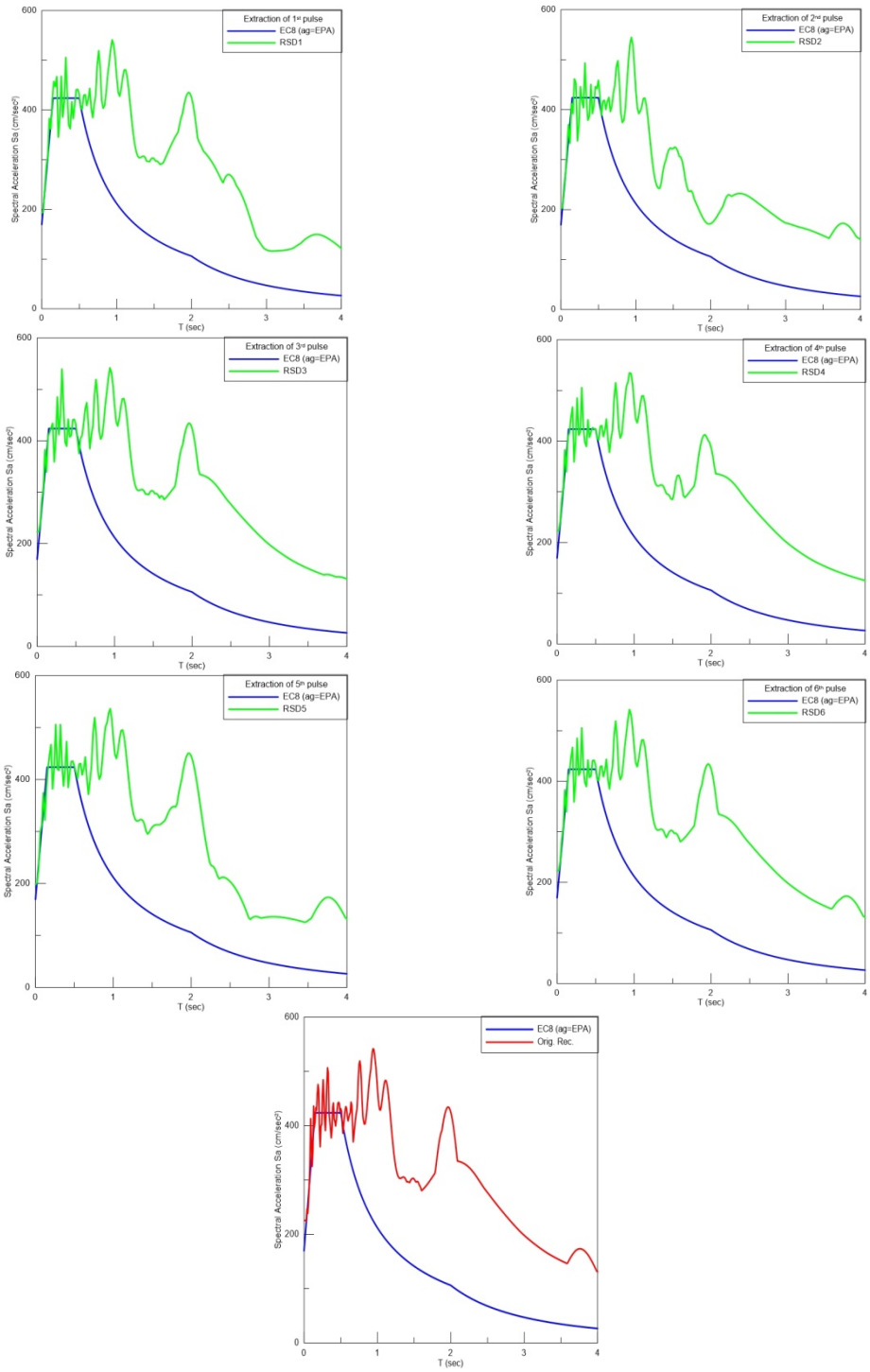




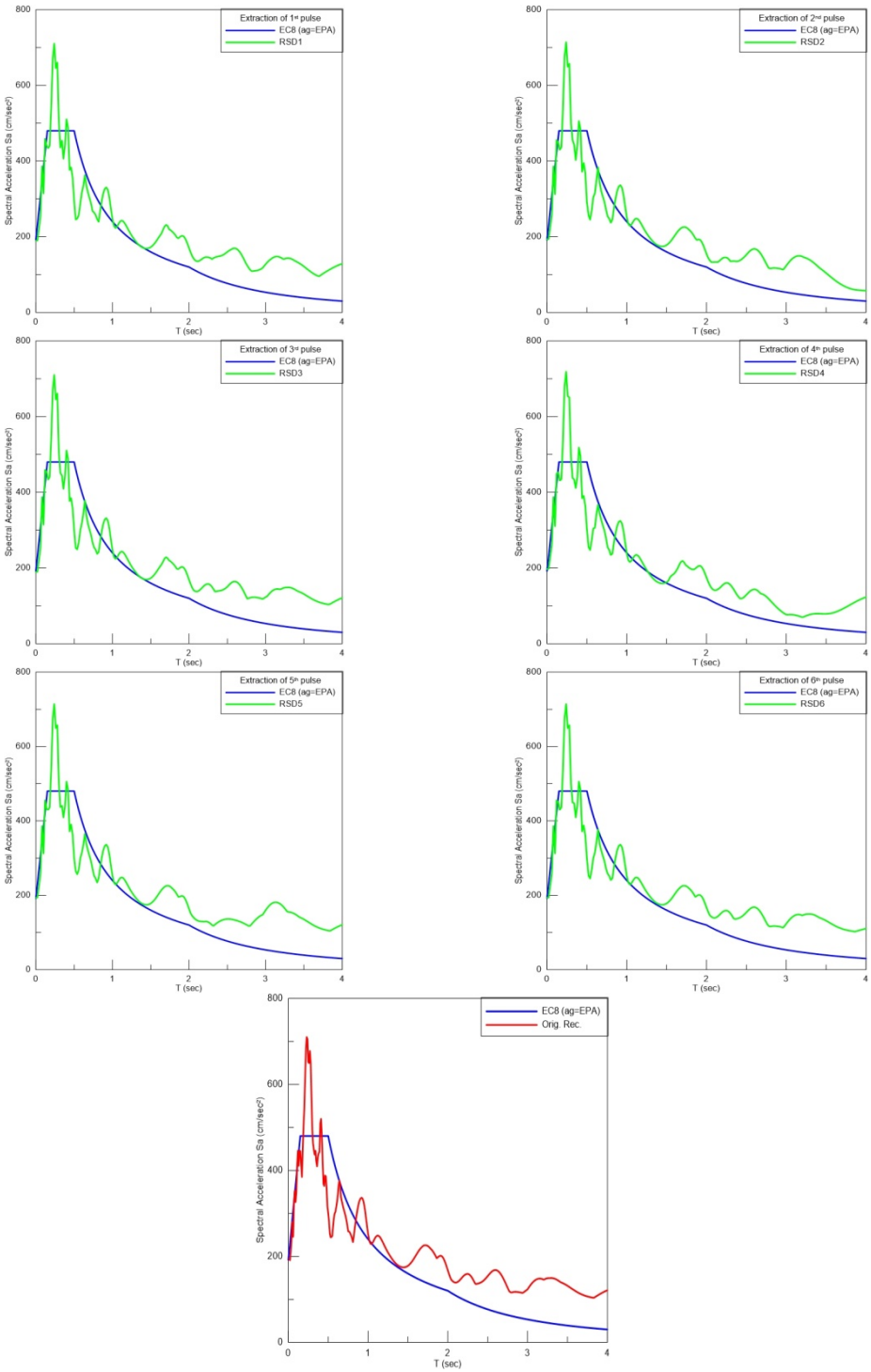
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1541-2:



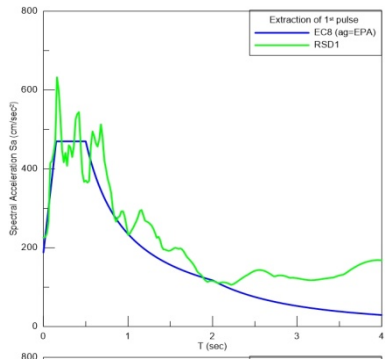
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1545-1:

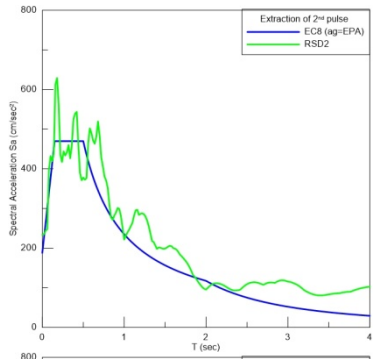


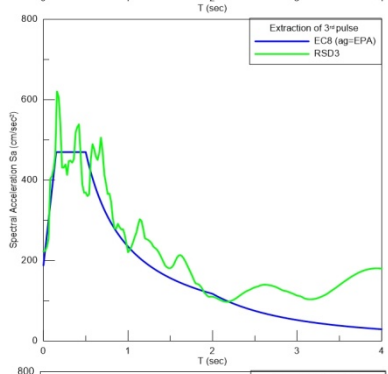
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1545-2:

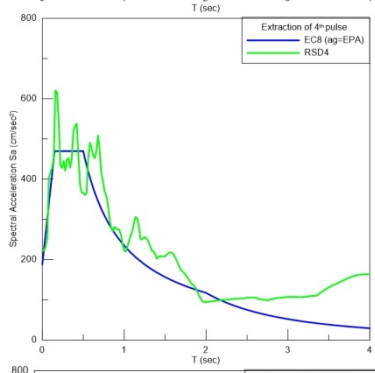


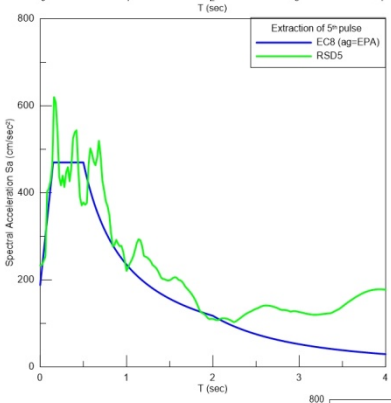
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1546-1:

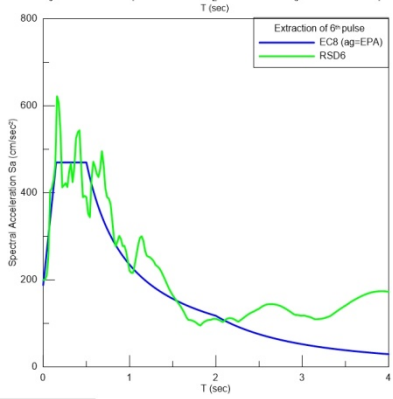


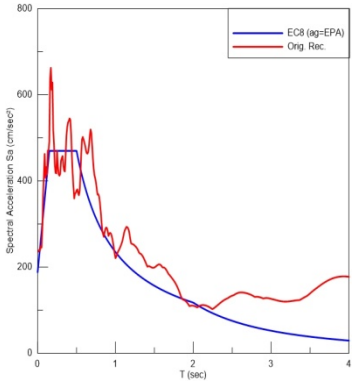




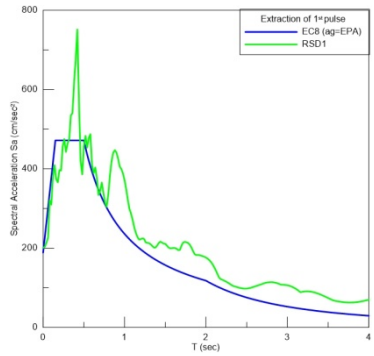


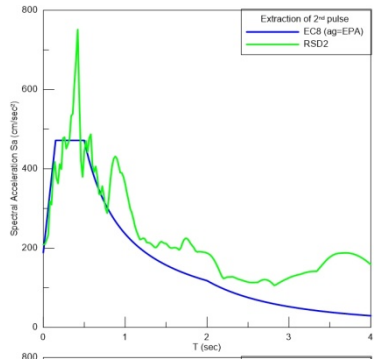


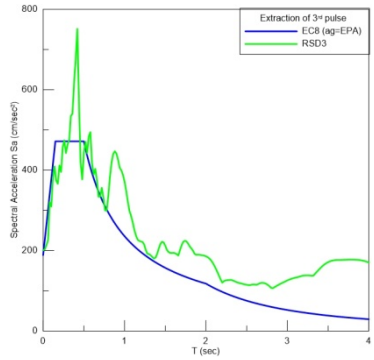


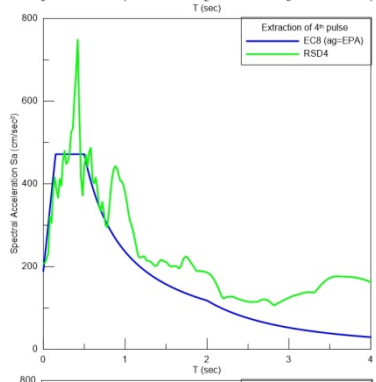


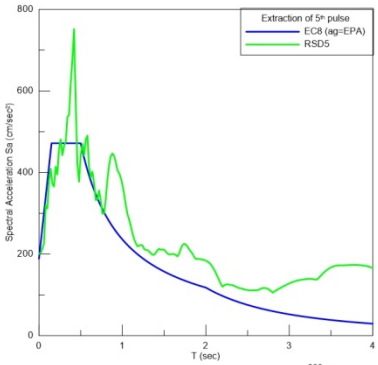
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1551-2:

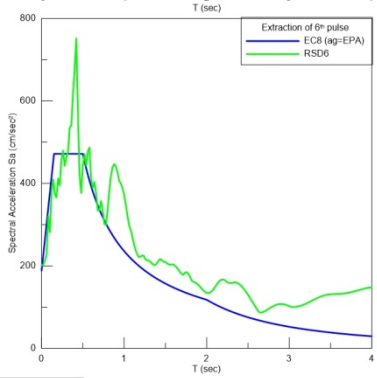


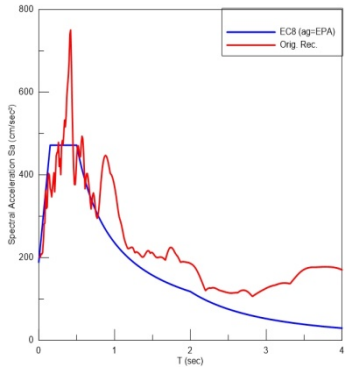




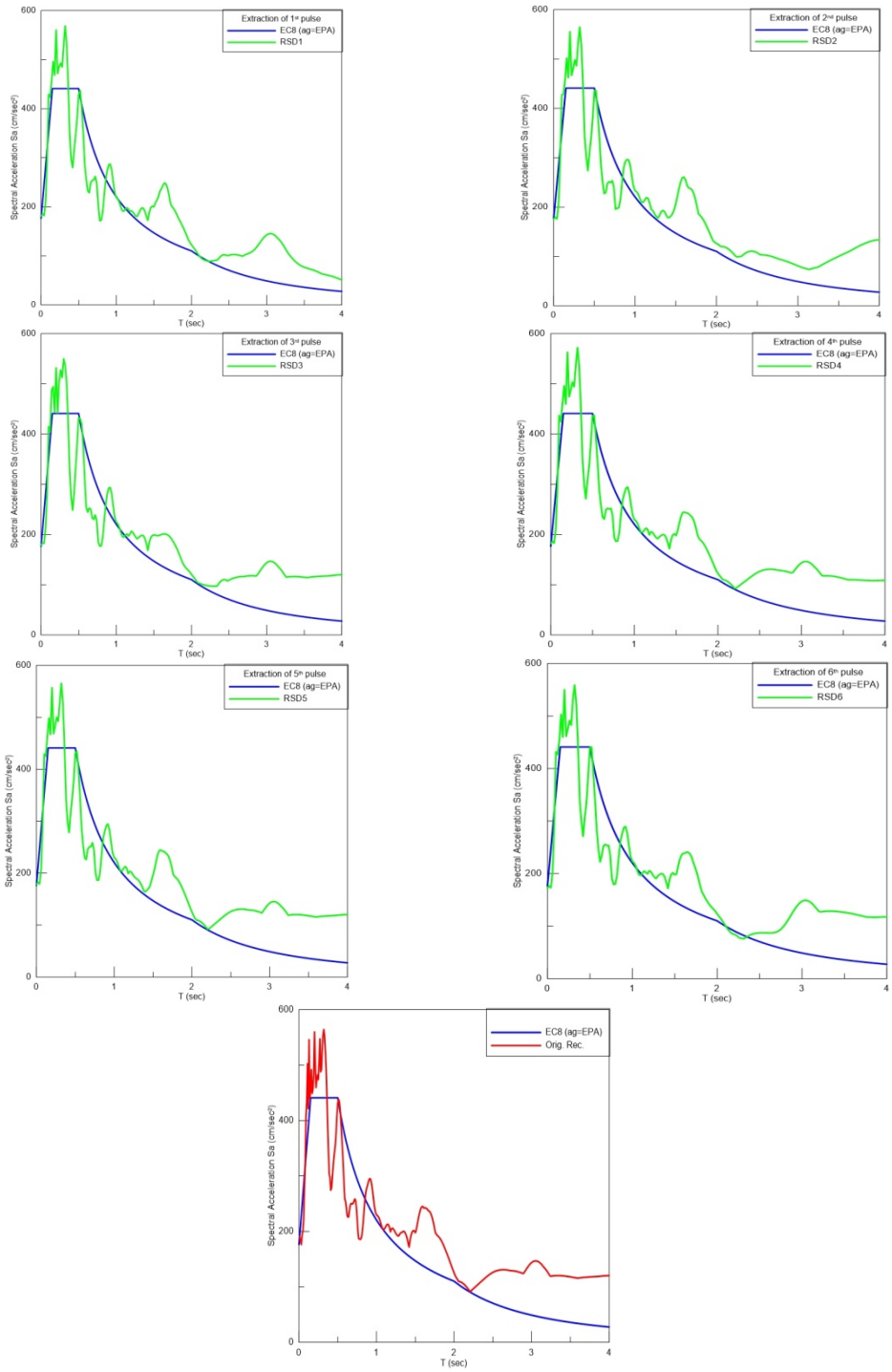




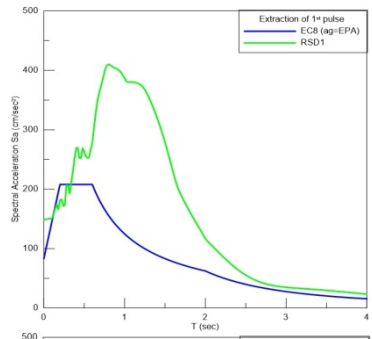


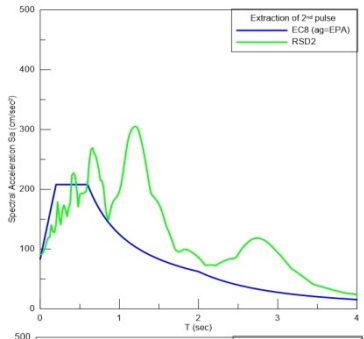


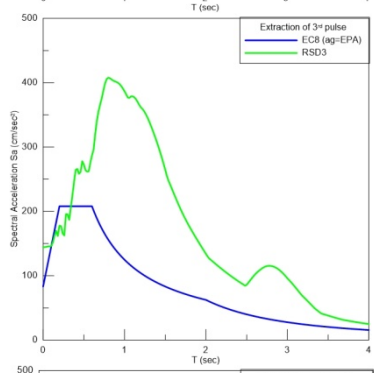
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 1762-1:

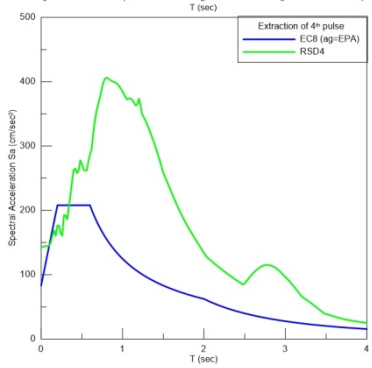


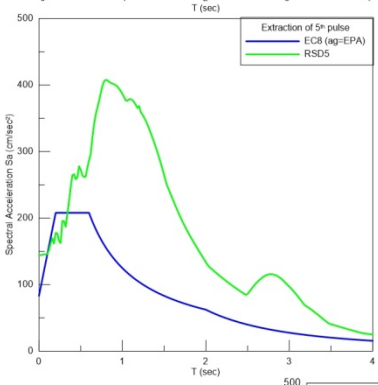
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 3648-1:

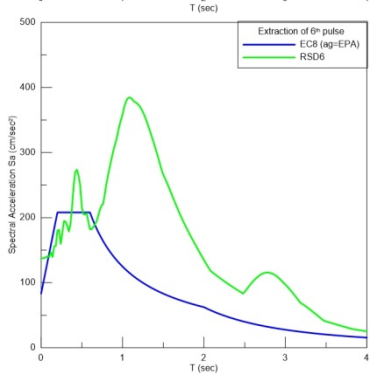


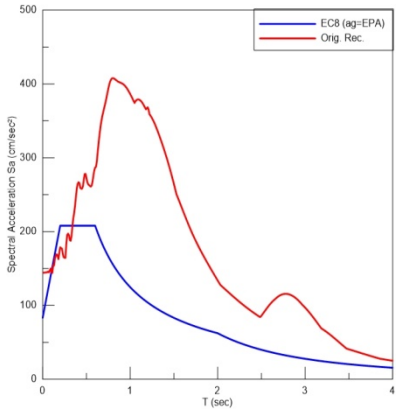




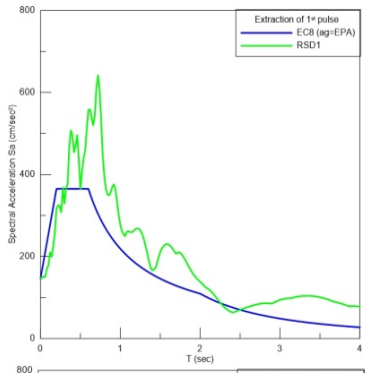


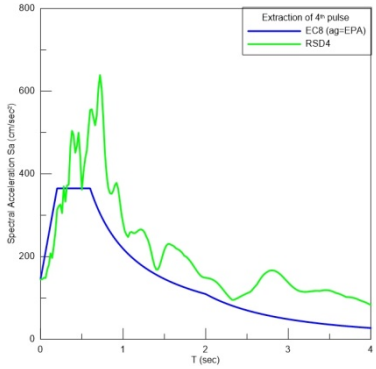


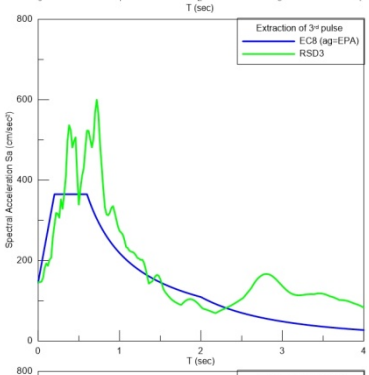


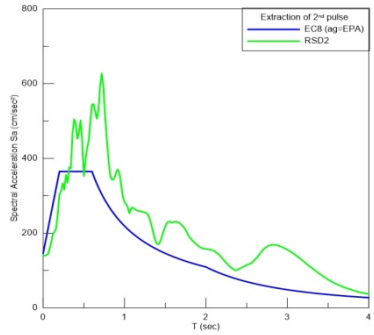


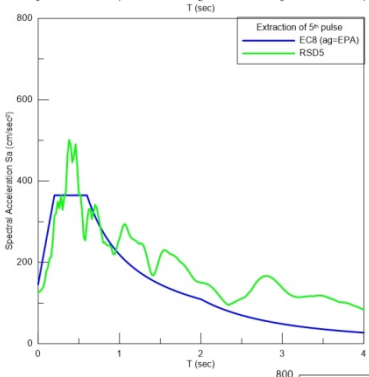
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 3663-1:

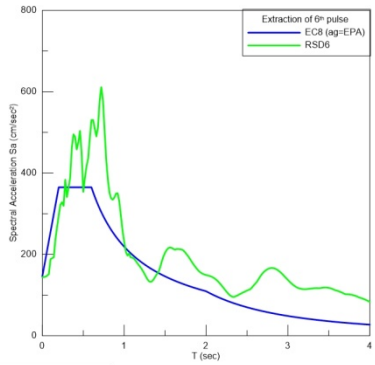


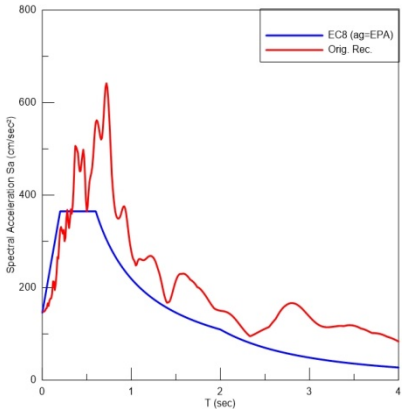




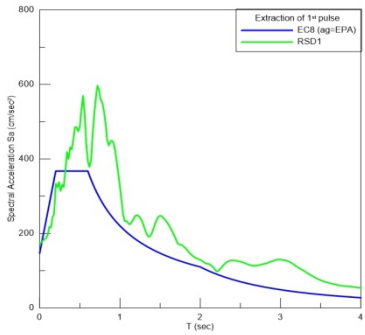


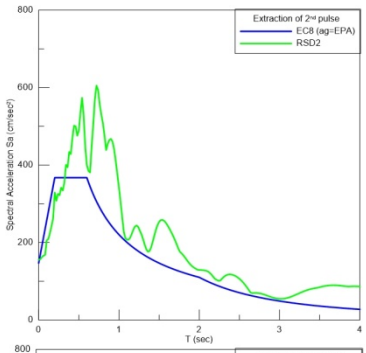


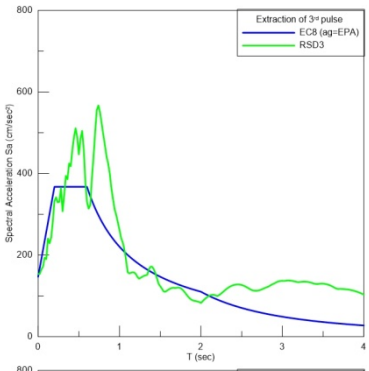


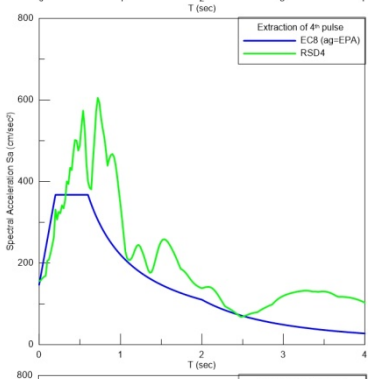


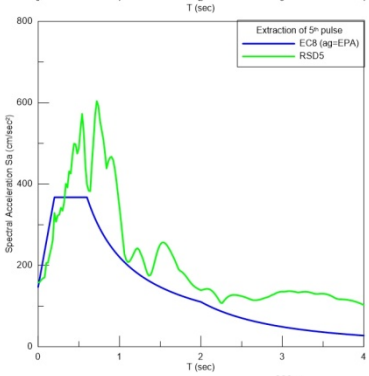
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 3672-1:

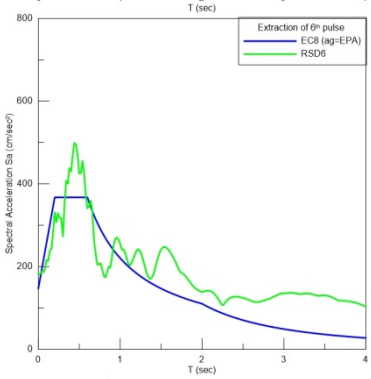


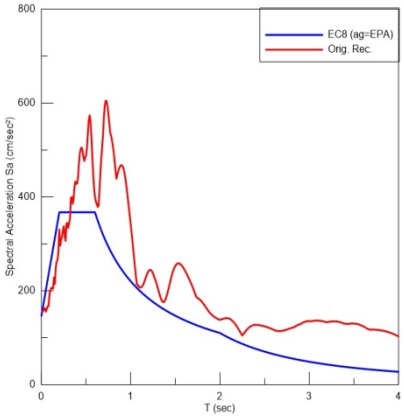




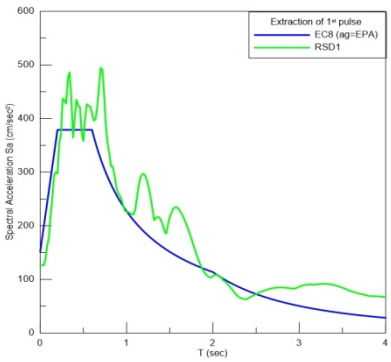


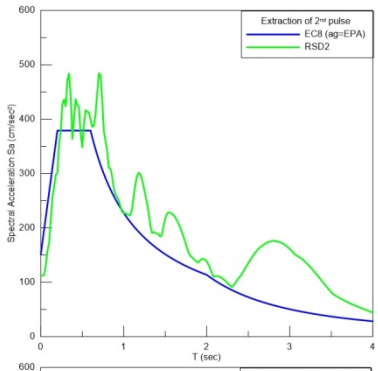


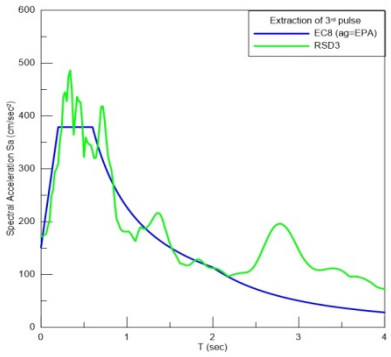


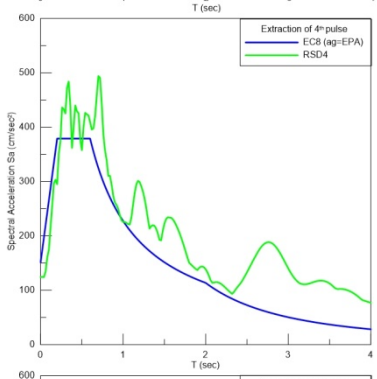


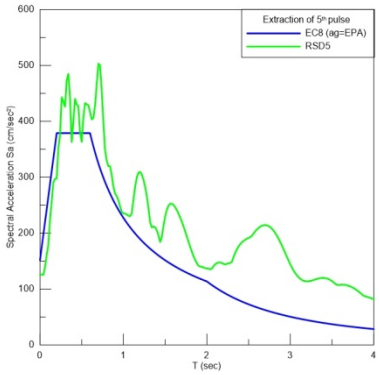
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 3674-1:

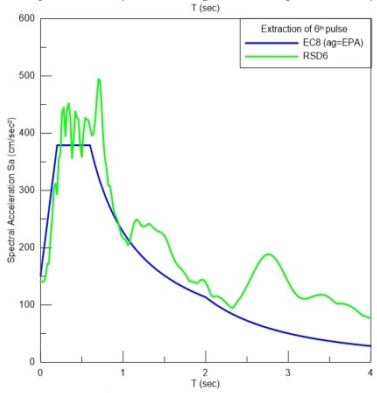


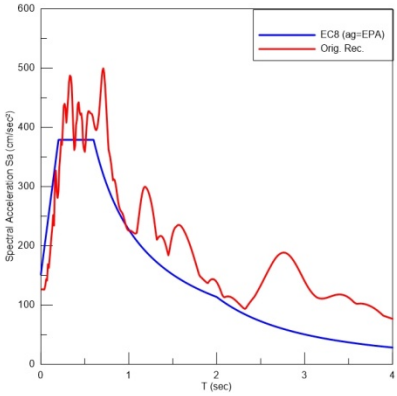




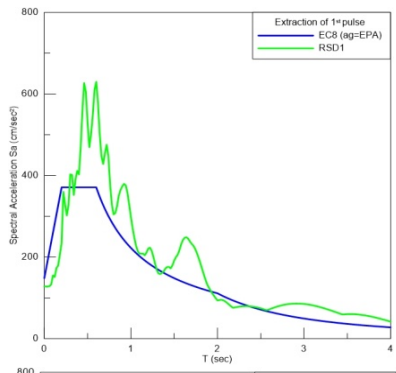


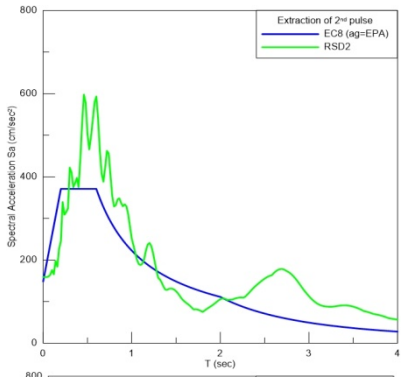


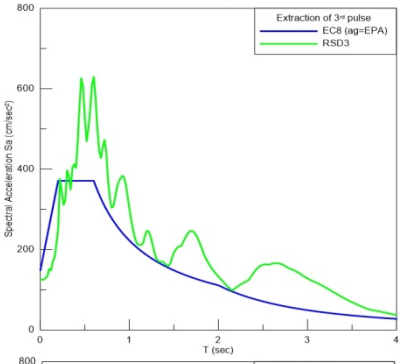


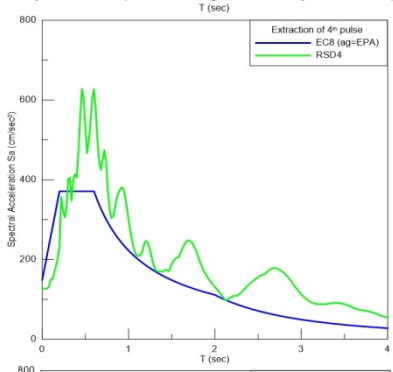


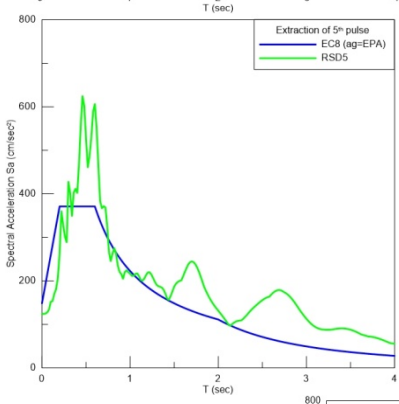
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 3676-1:

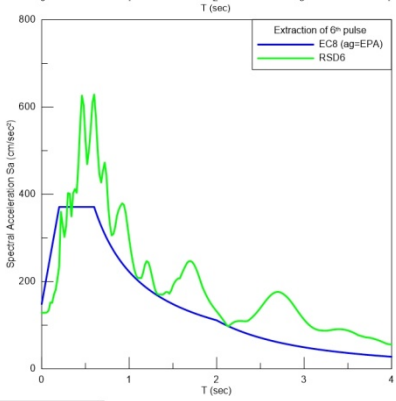


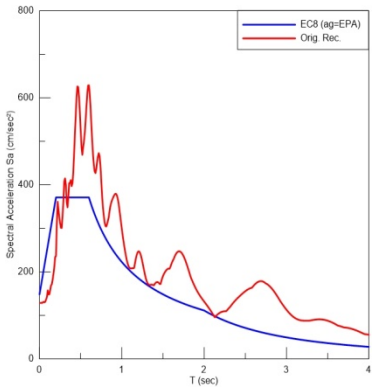




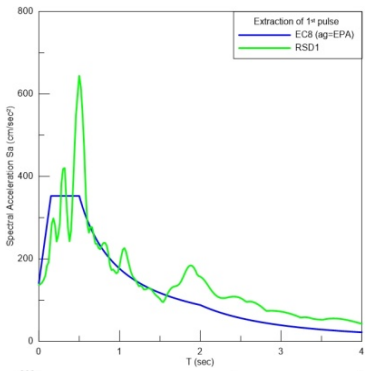


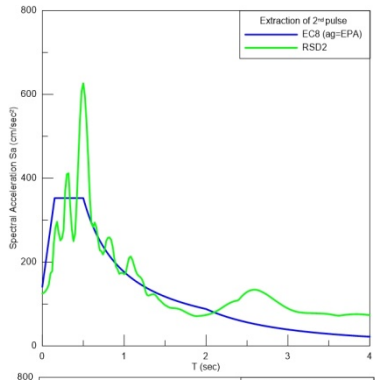


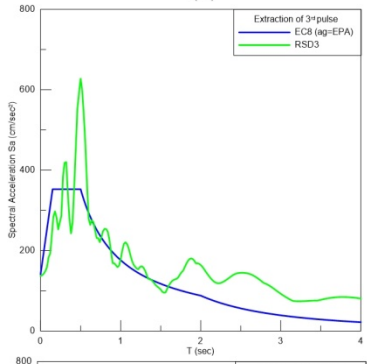


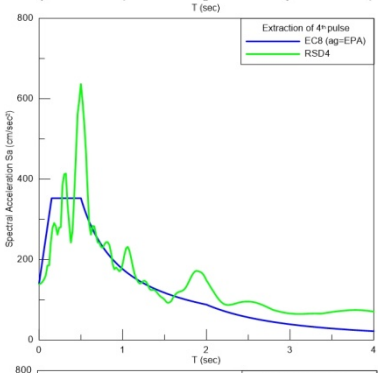


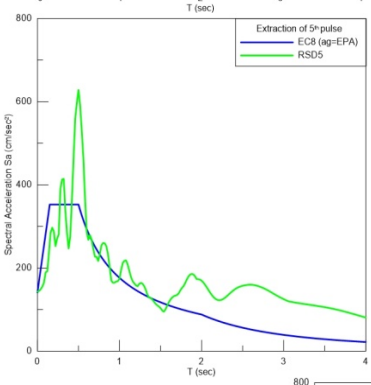
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 3747-1:

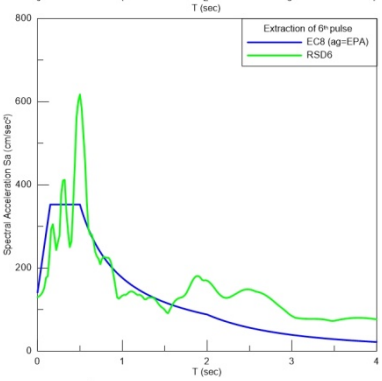


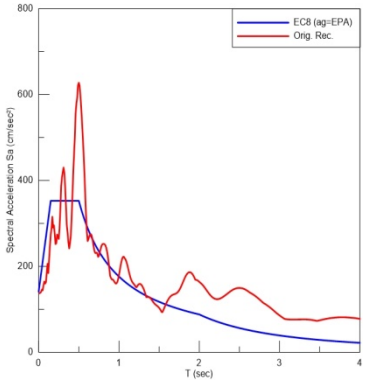




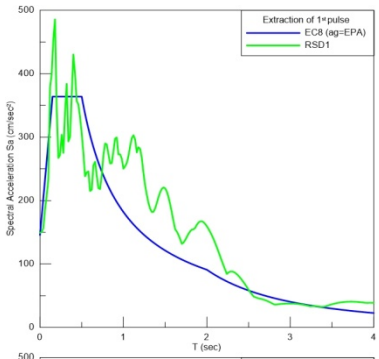


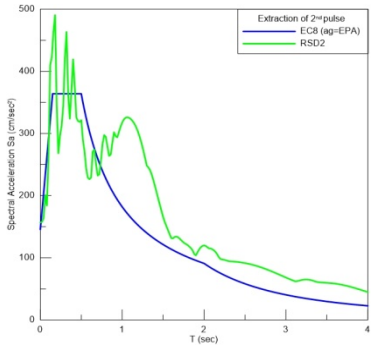


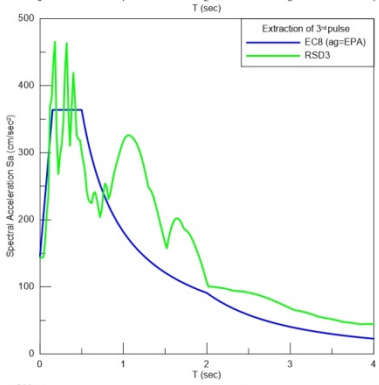


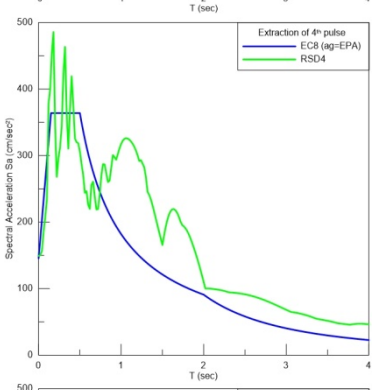


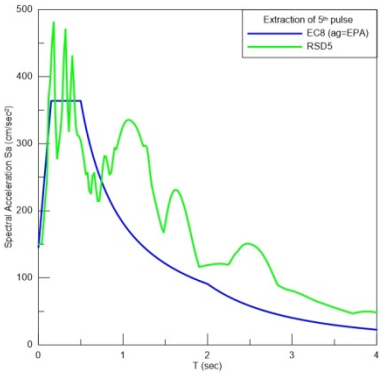
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 3751-1:

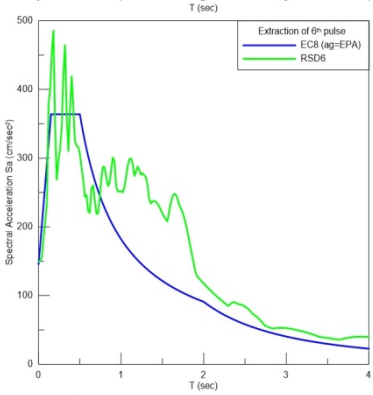


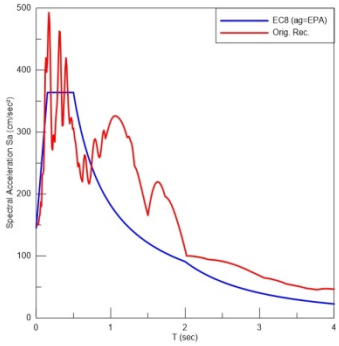




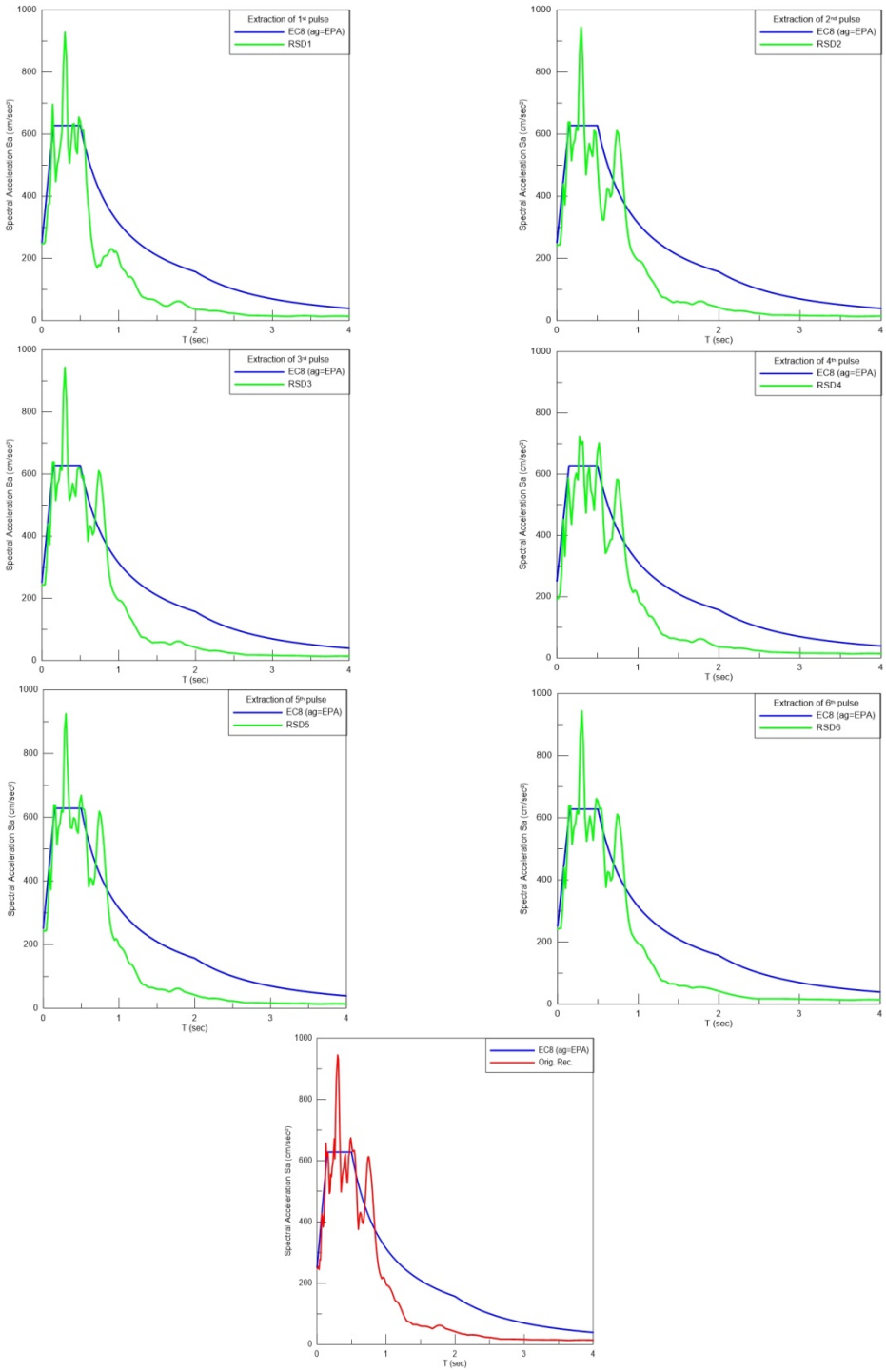




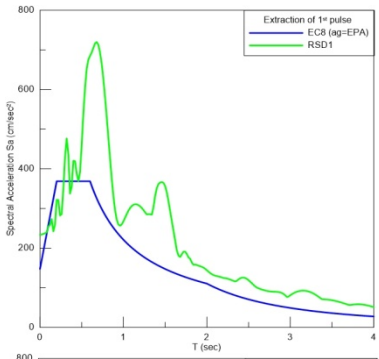


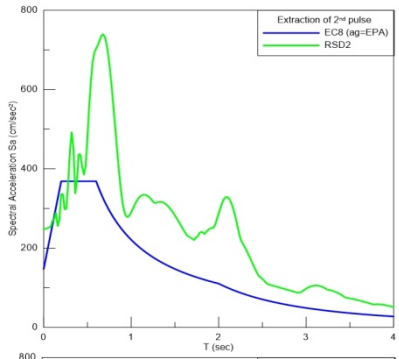


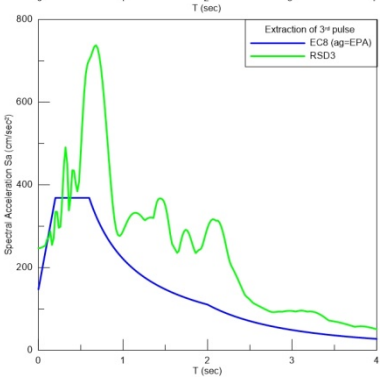
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 4142-1:

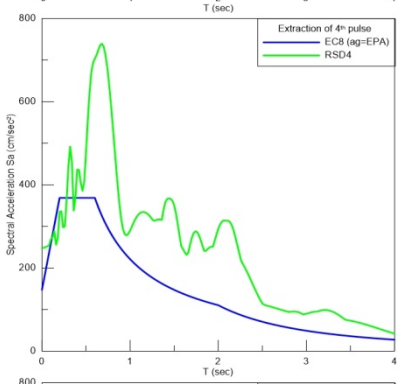


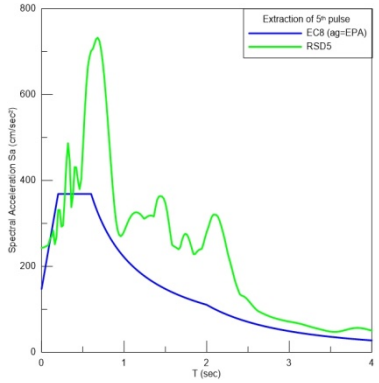
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 4849-2:

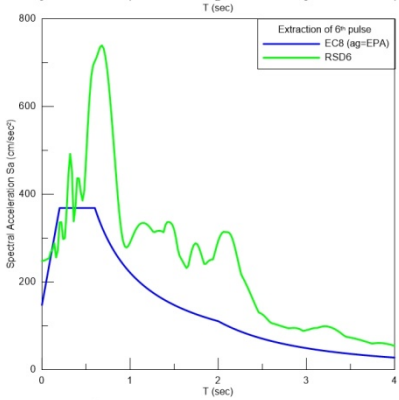


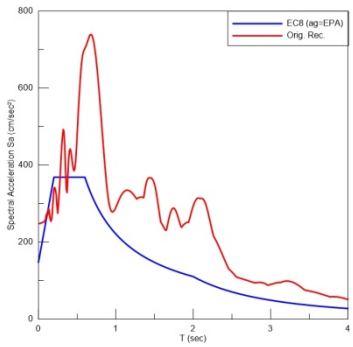




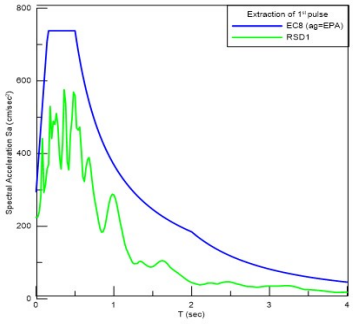


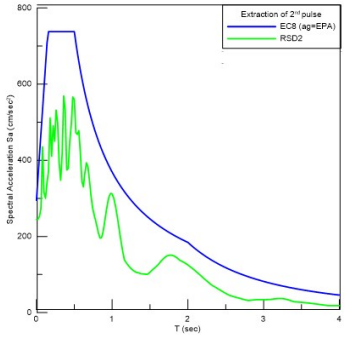


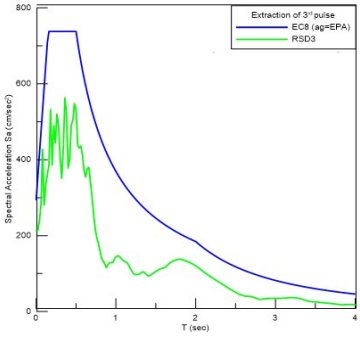


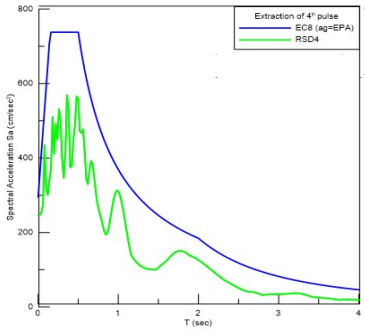


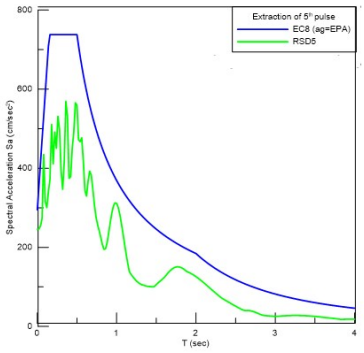
КАТАГРАФН 4858-1:

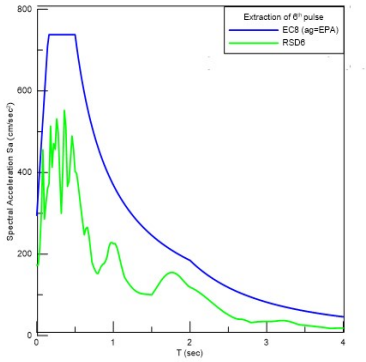


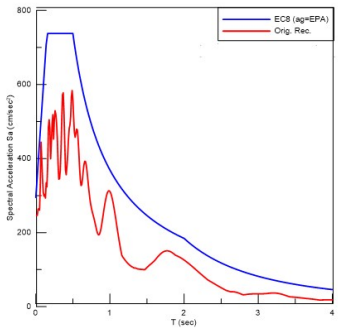




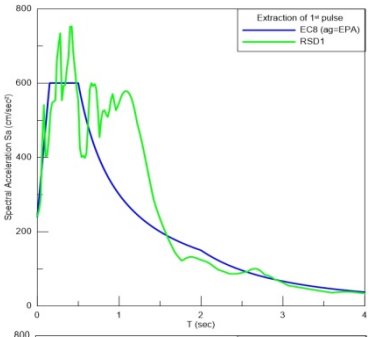


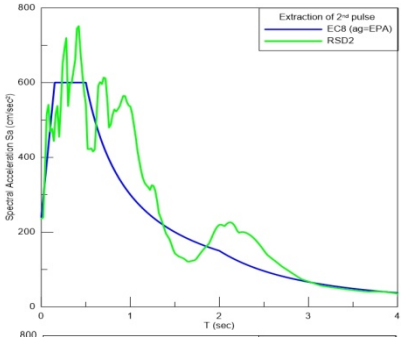


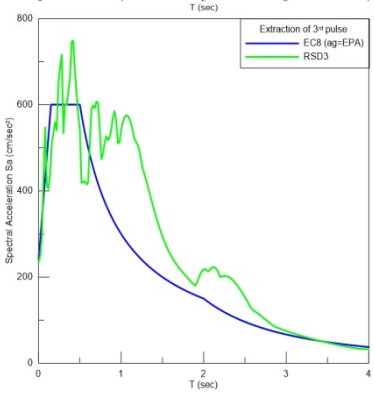


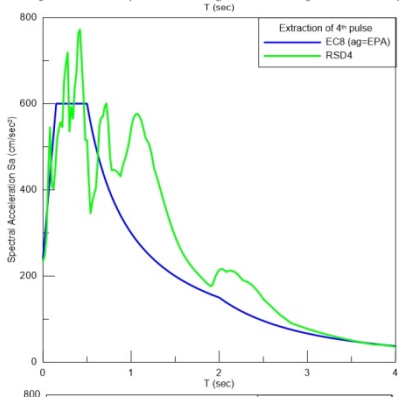


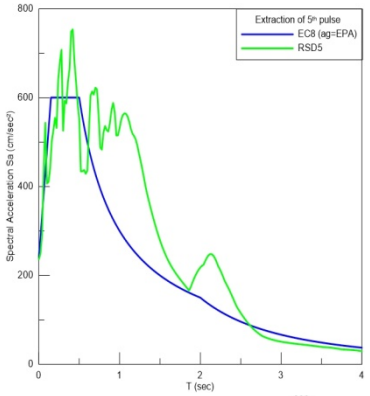
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 4865-1:

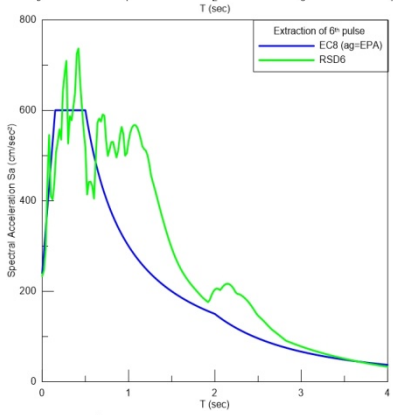


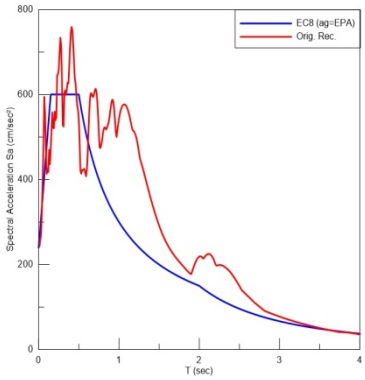




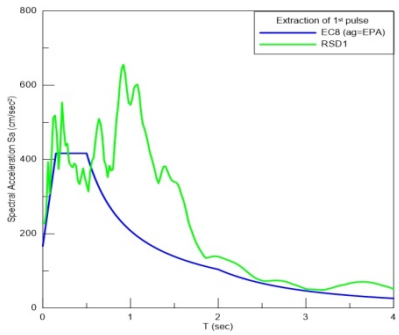


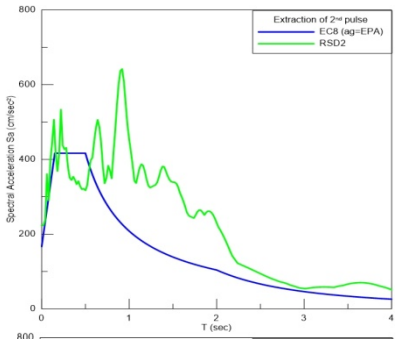


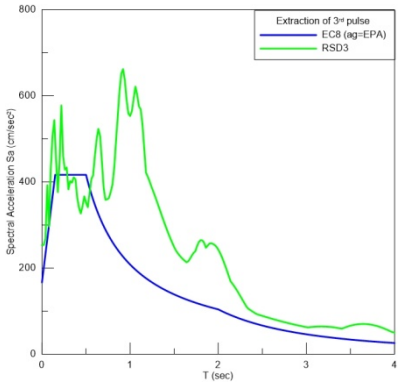


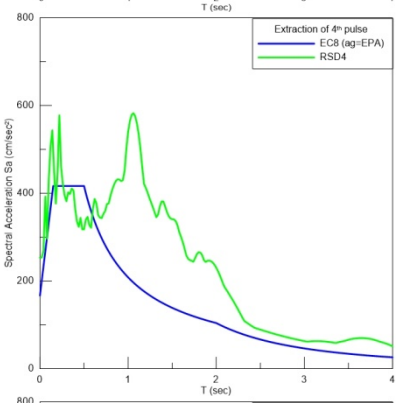


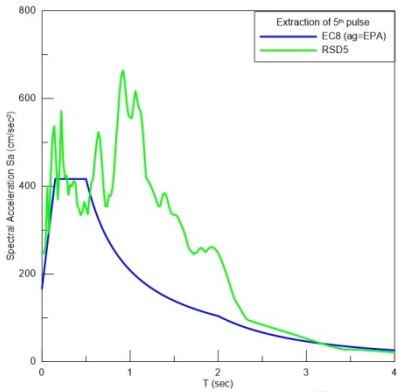
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 4865-2:

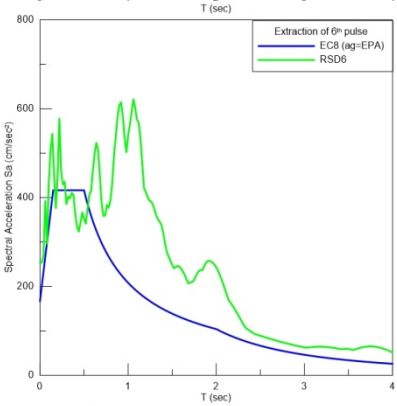


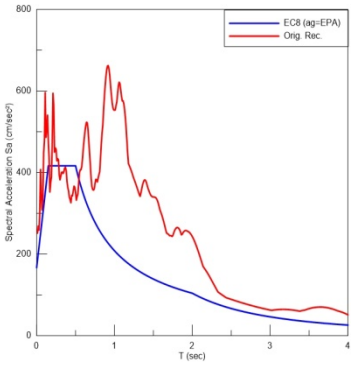




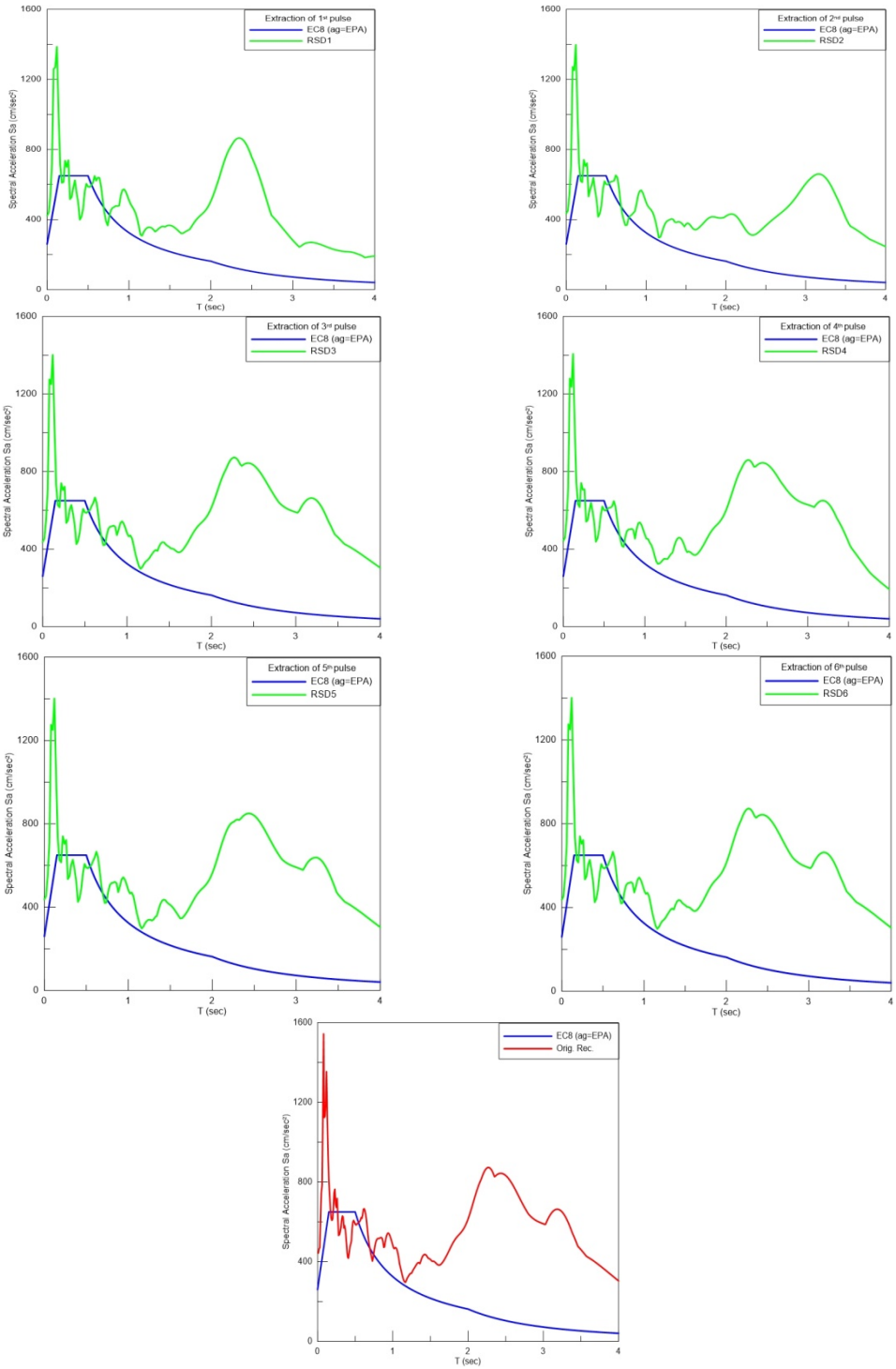




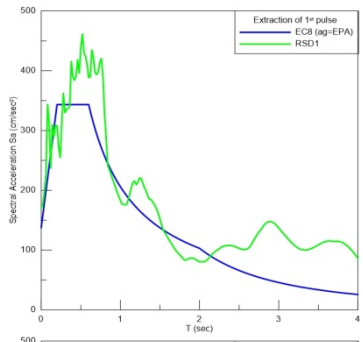


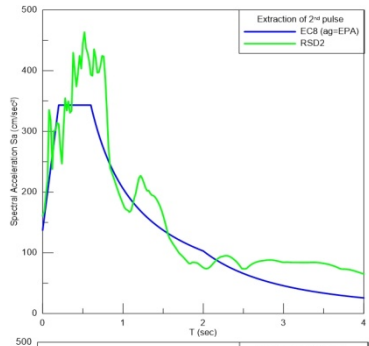


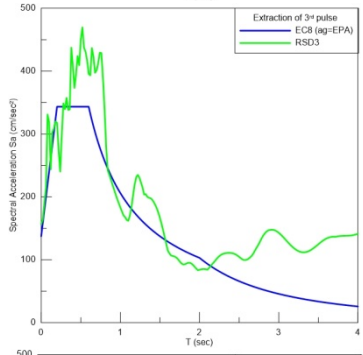
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 5664-2:

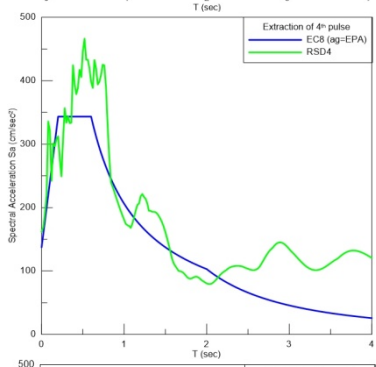


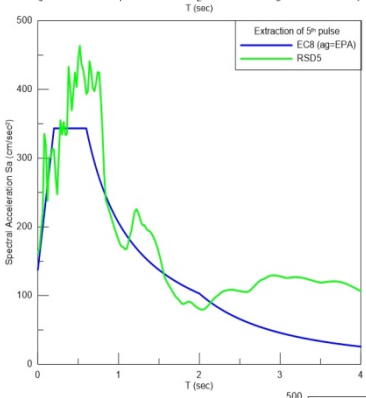
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 5774-1:

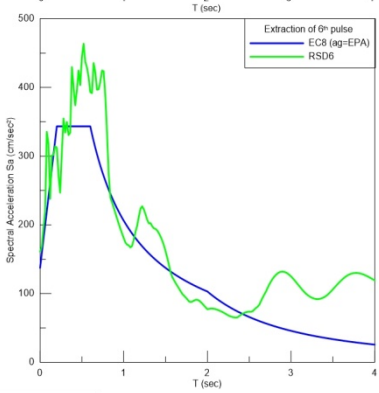


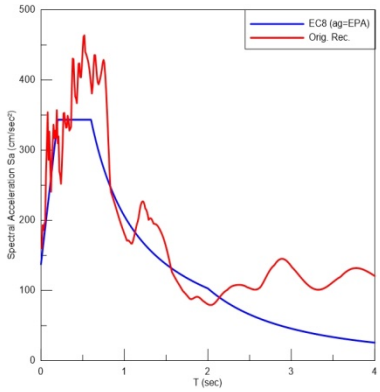




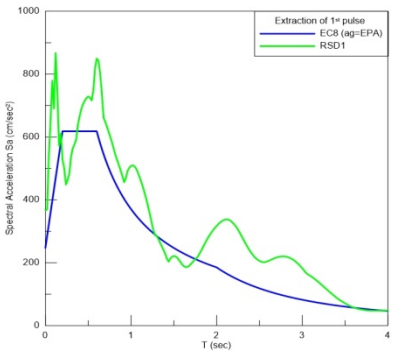


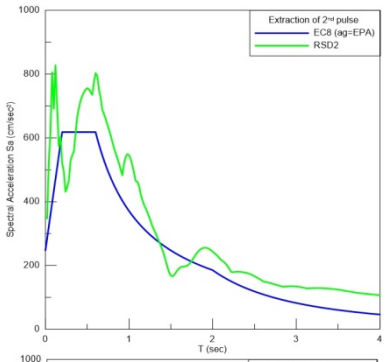


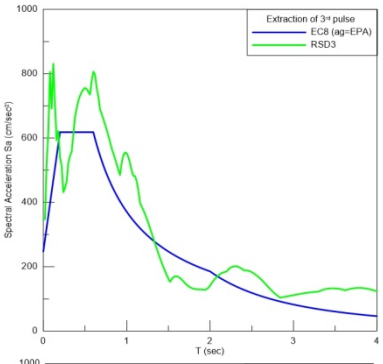


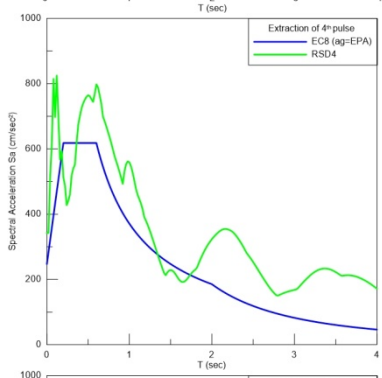


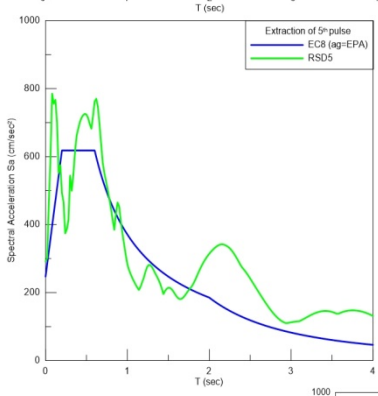
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 5780-1:

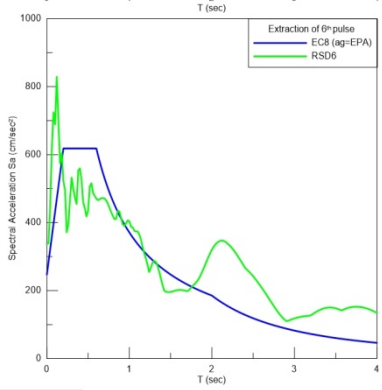


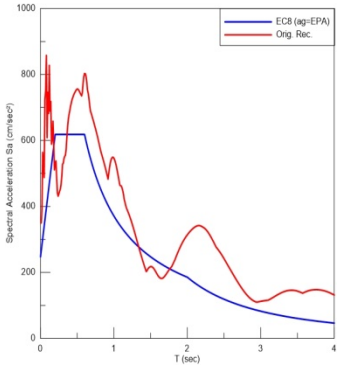




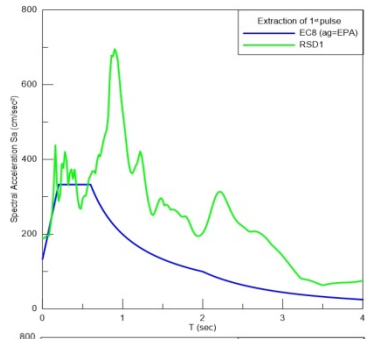


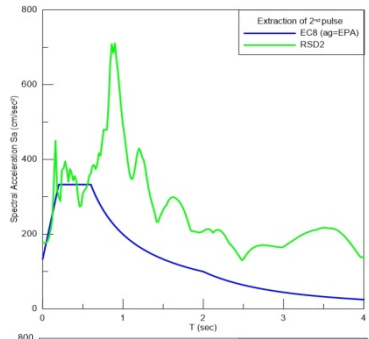


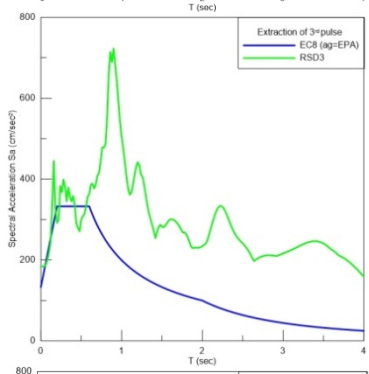


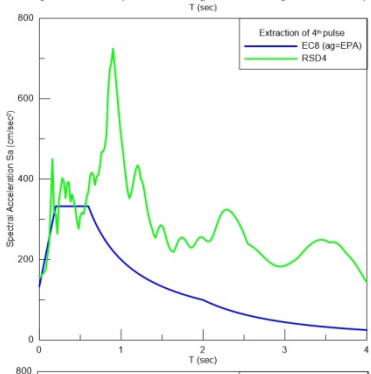


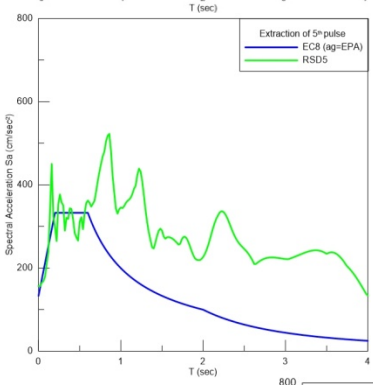
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 5786-2:

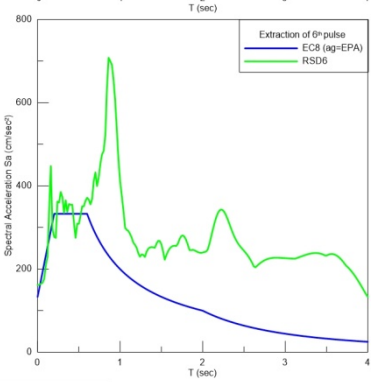


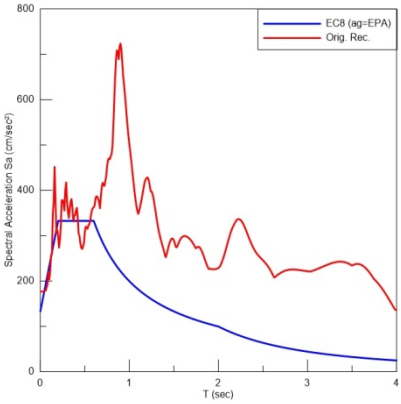




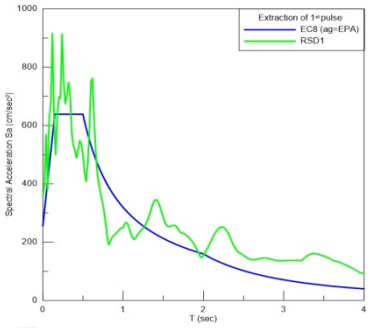


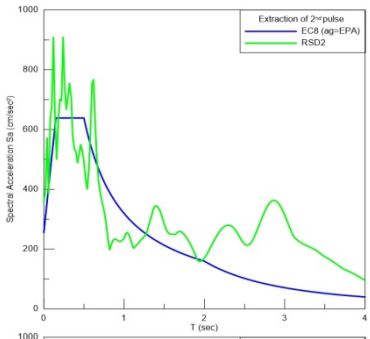


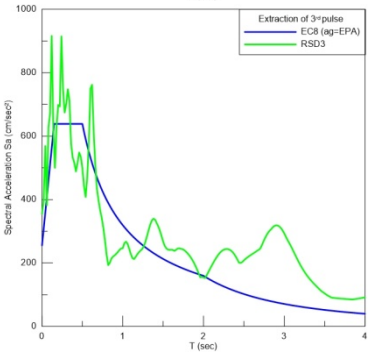


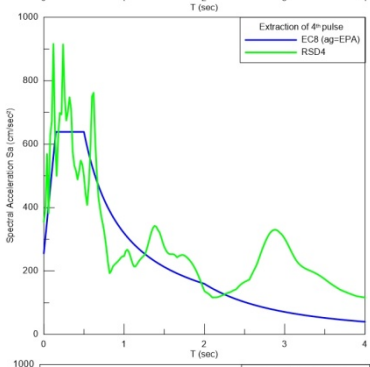


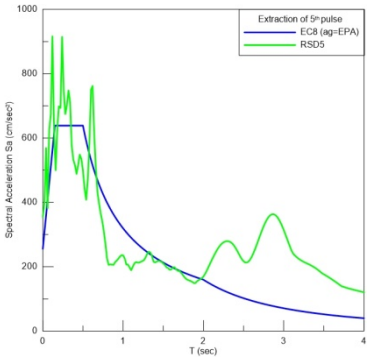
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 5813-2:

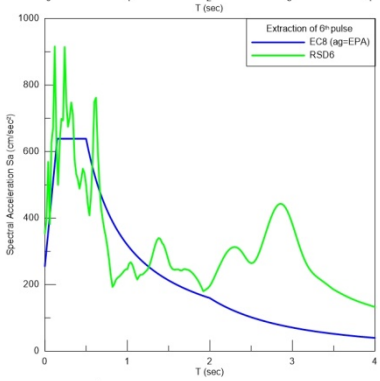


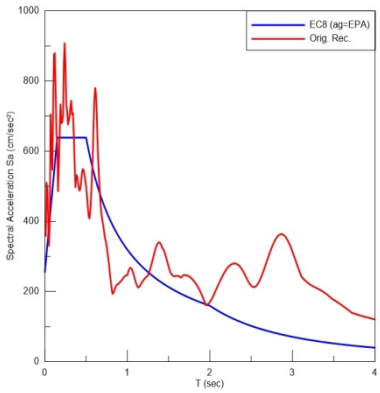




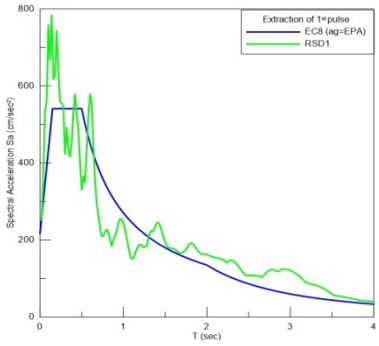


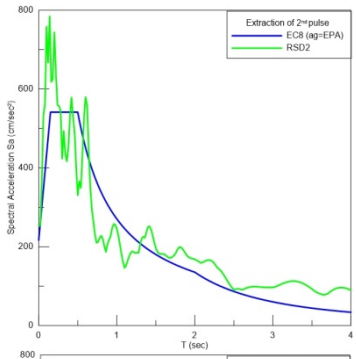


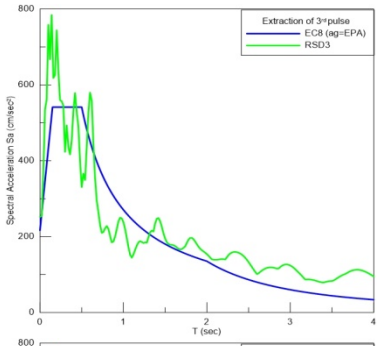


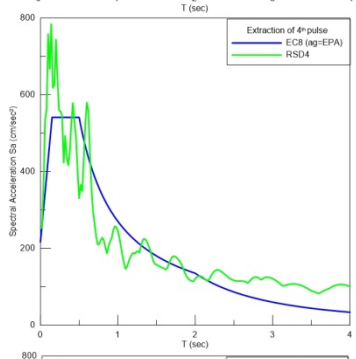


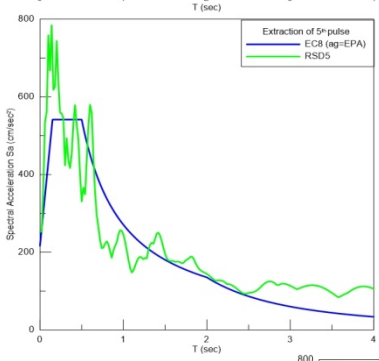
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 5813-1:

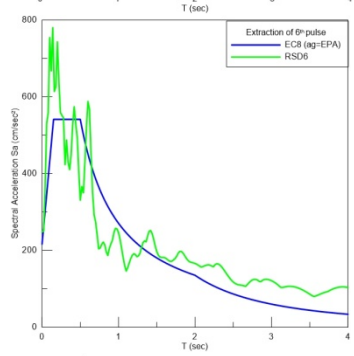


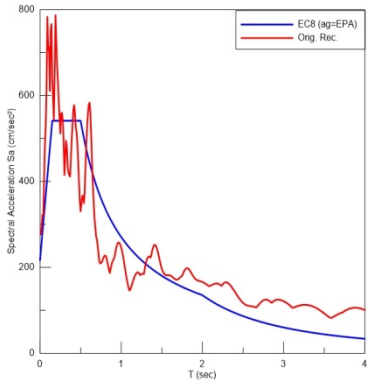




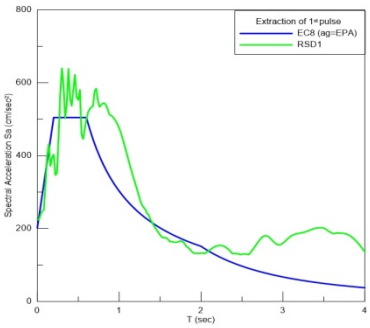


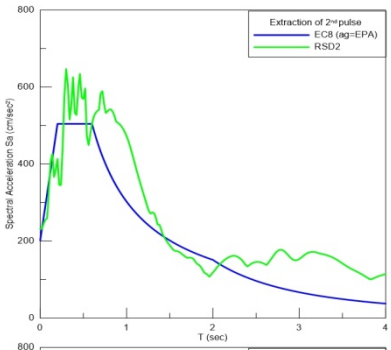


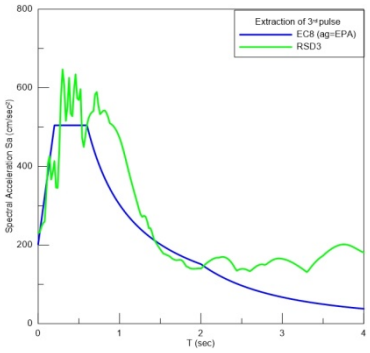


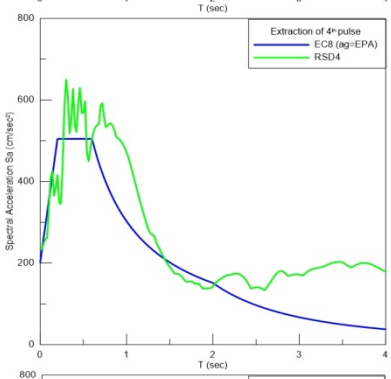


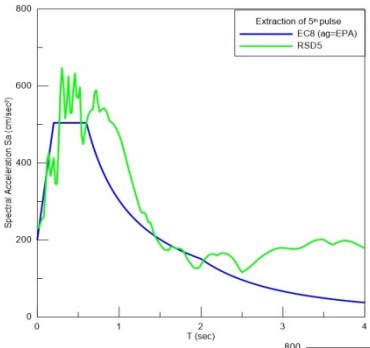
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 5814-2:

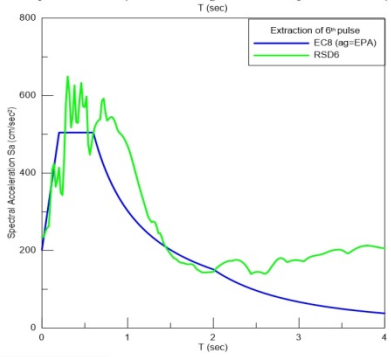


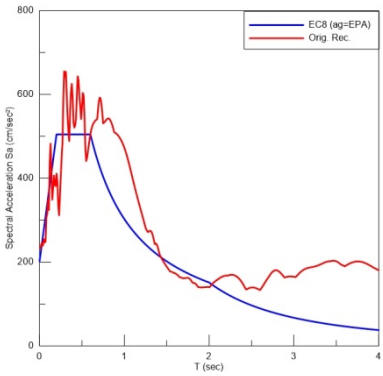




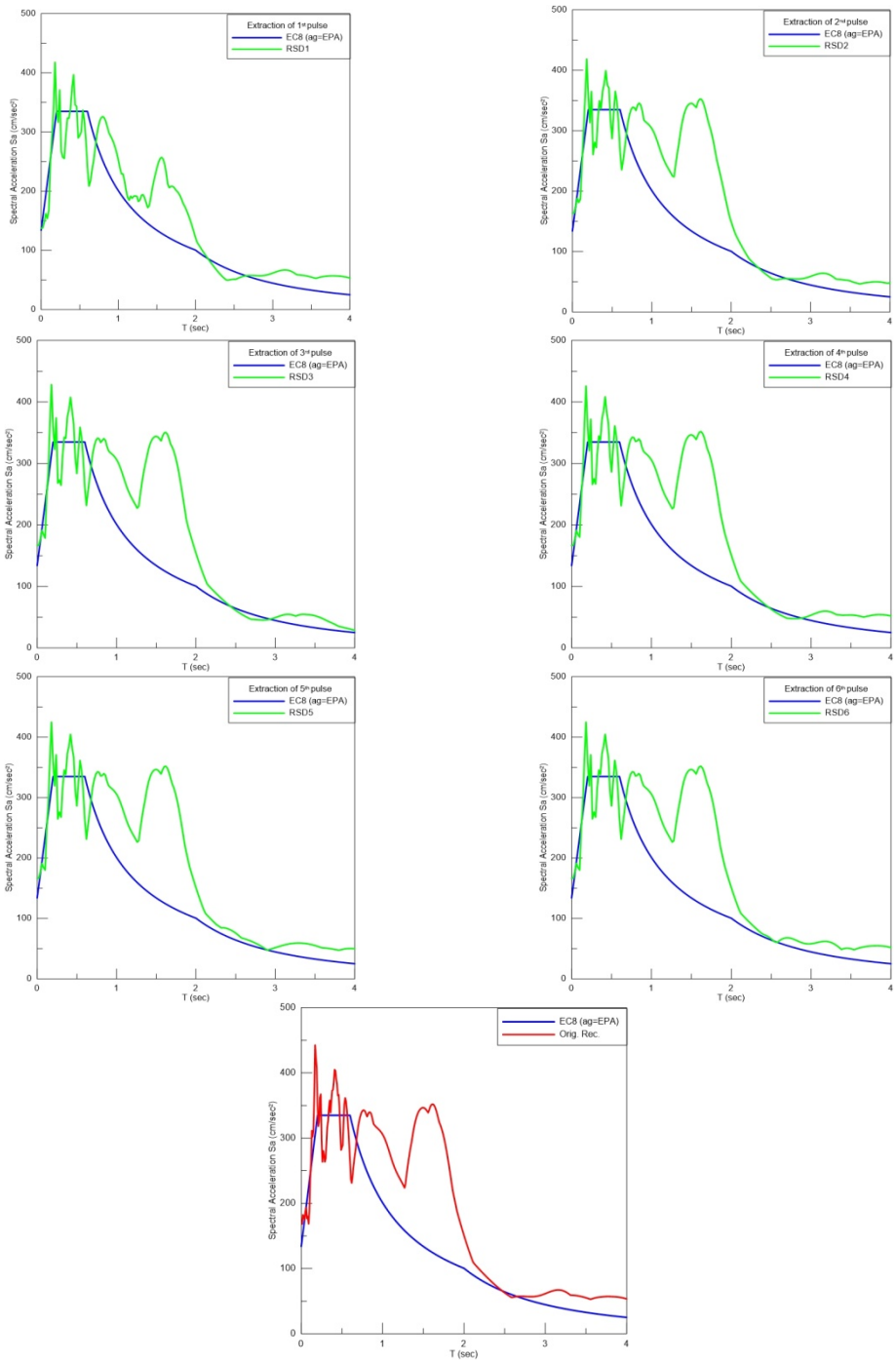




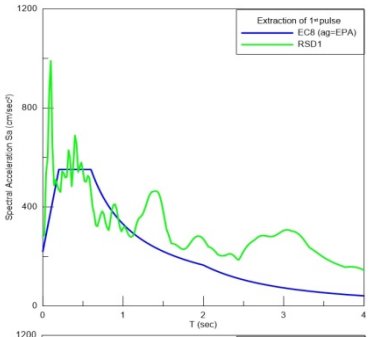


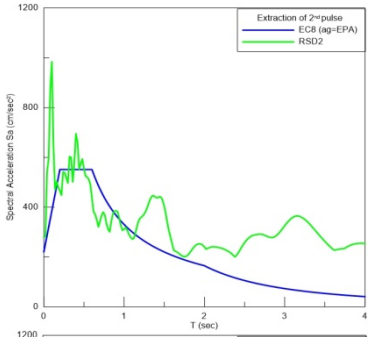


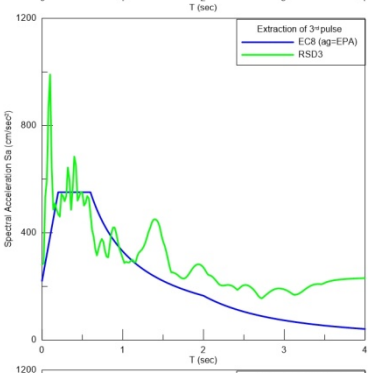
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 5816-1:

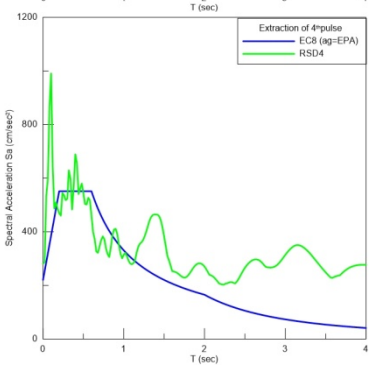


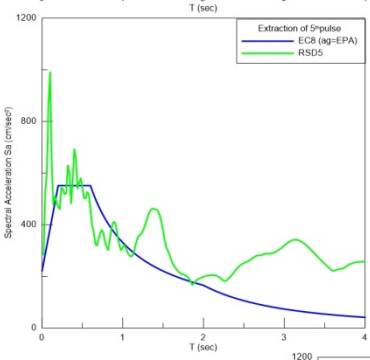
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 5825-1:

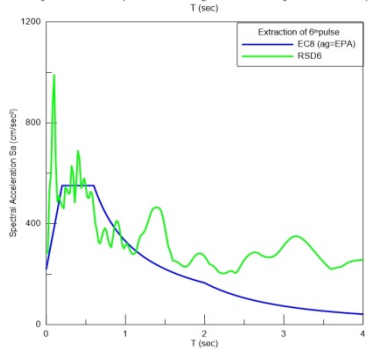


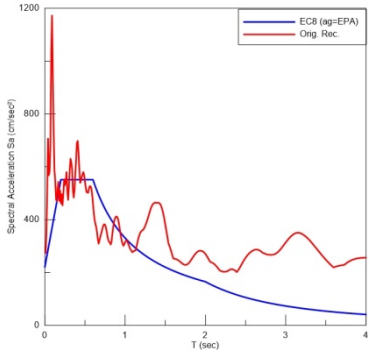




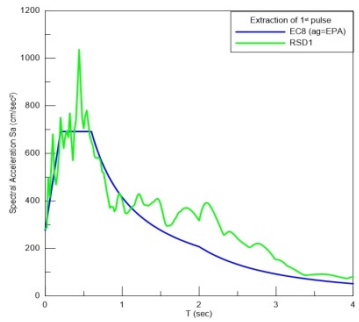


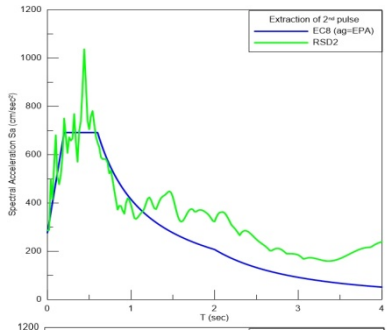


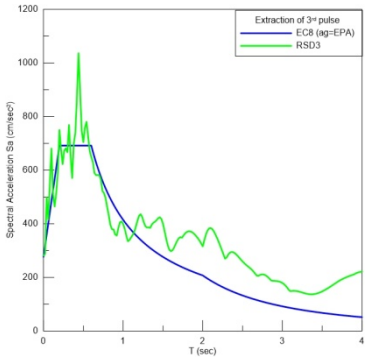


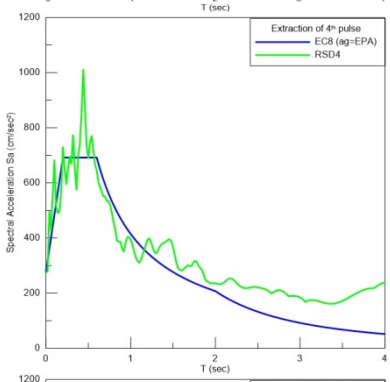


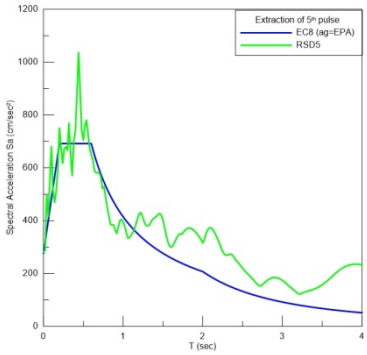
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 5825-2:

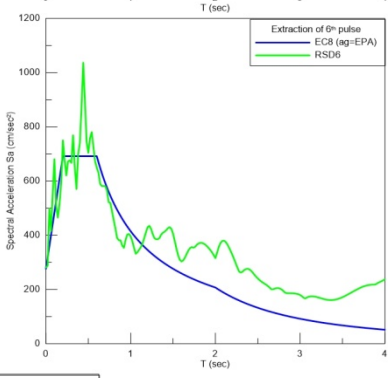


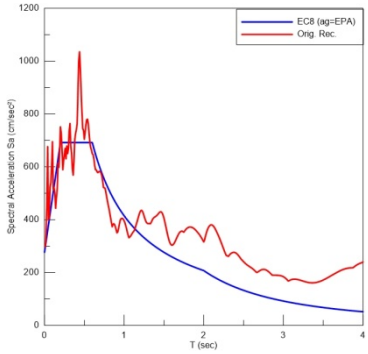




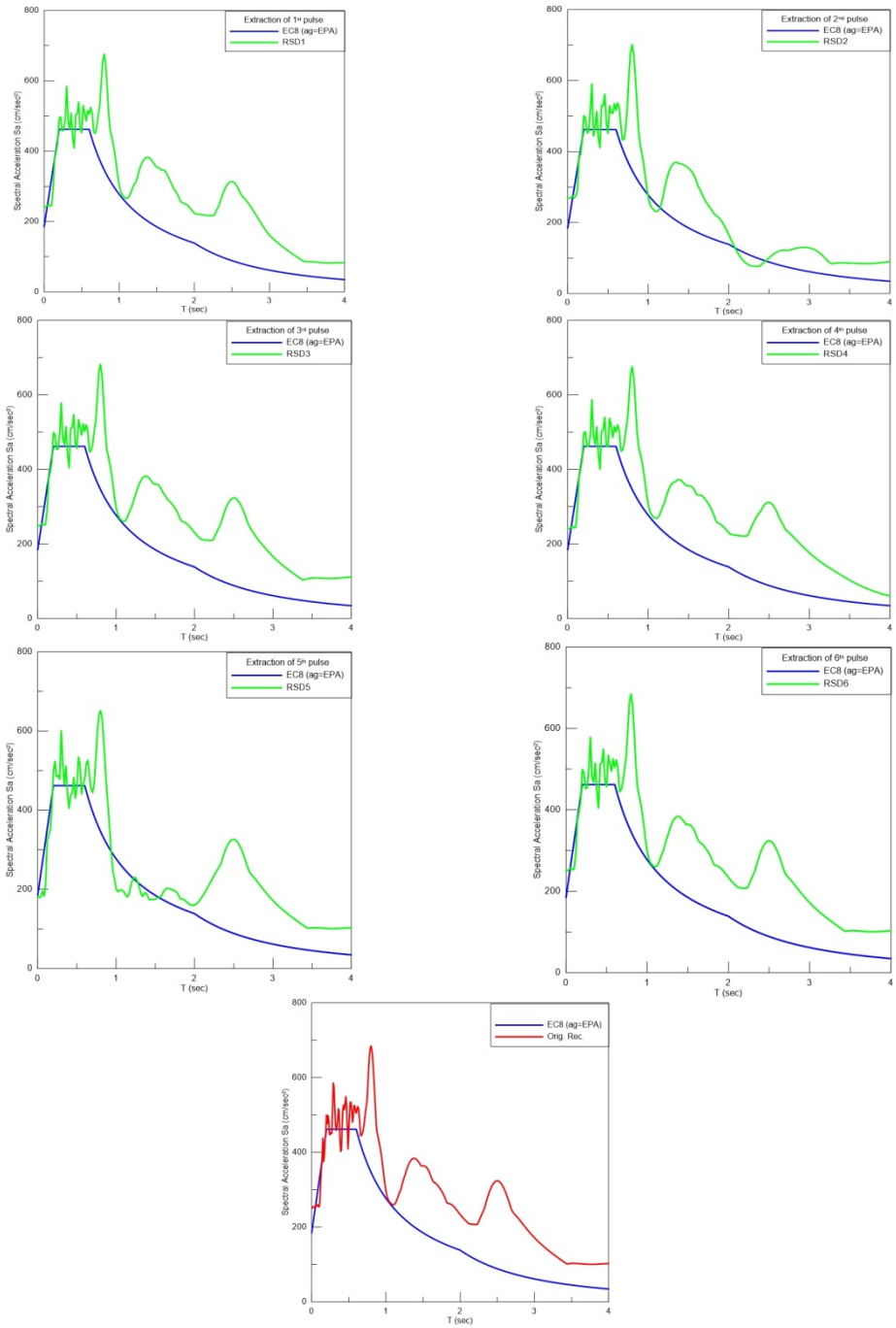




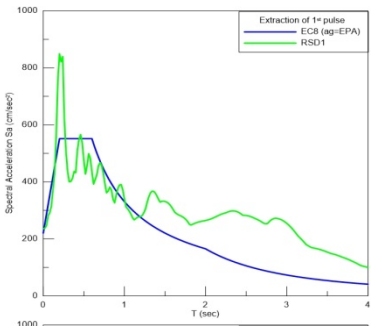


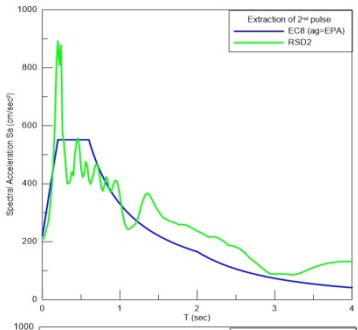


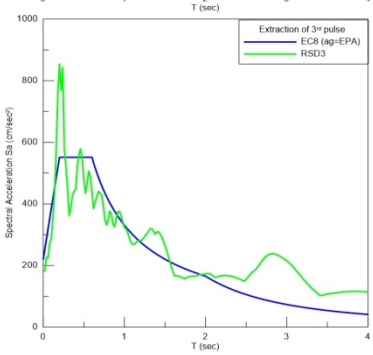
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 6952-1:

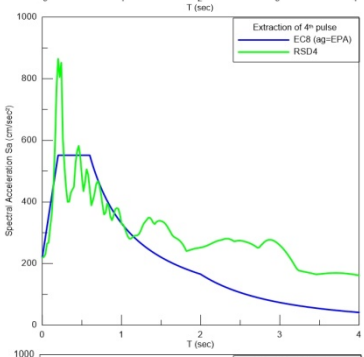


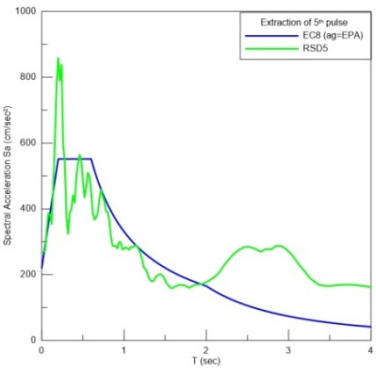
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ 6953-1:

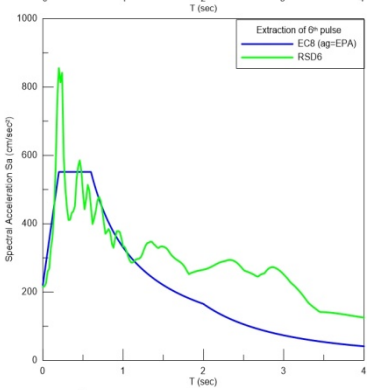


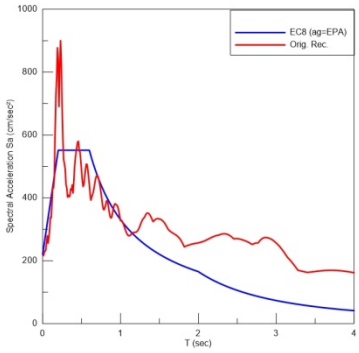


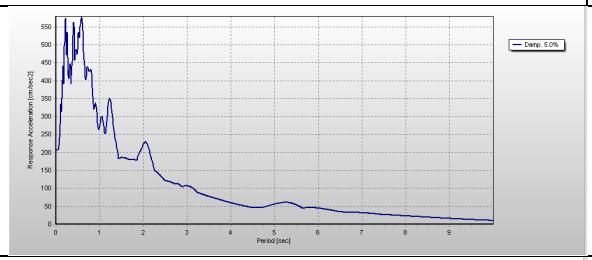
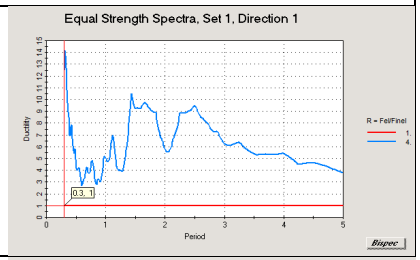
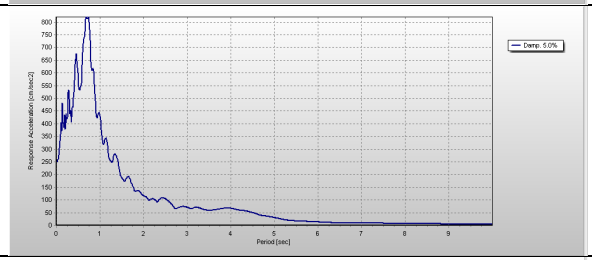
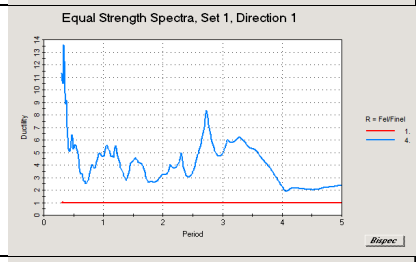
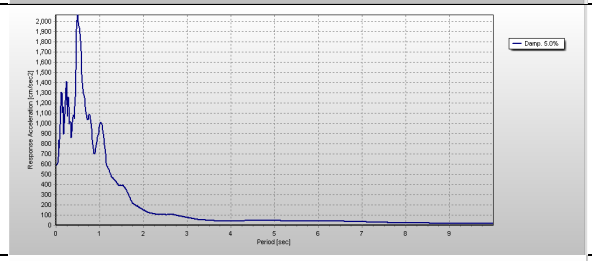
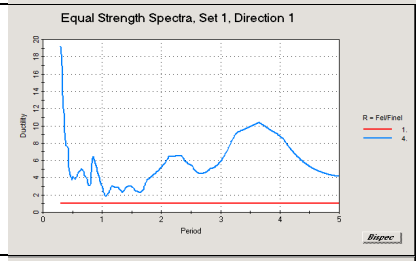
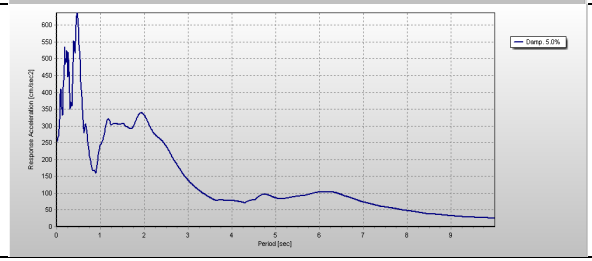
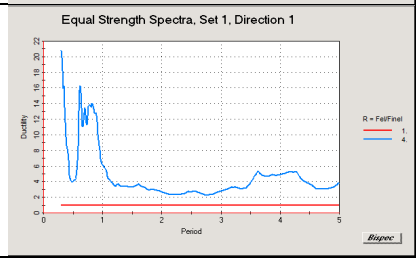


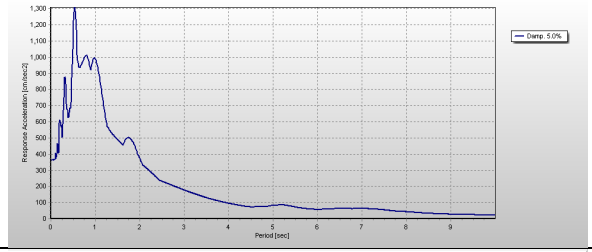
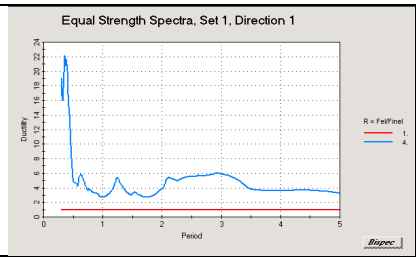
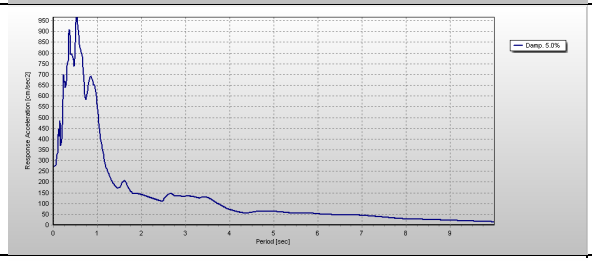
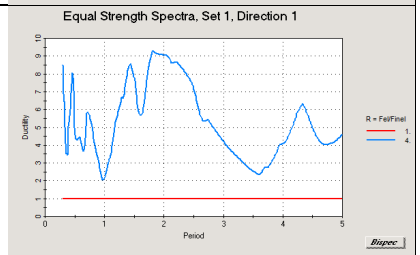
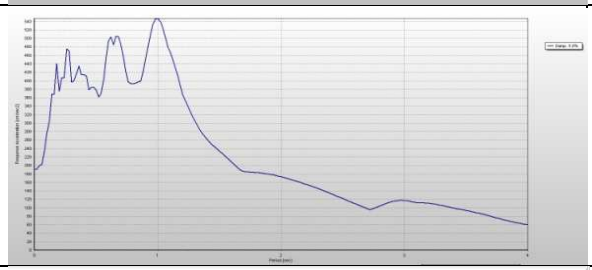
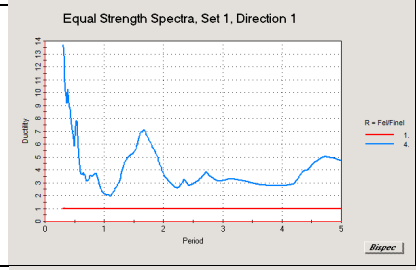
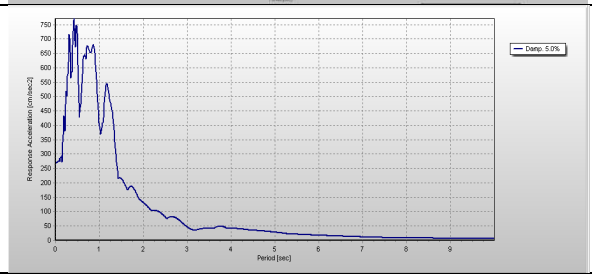
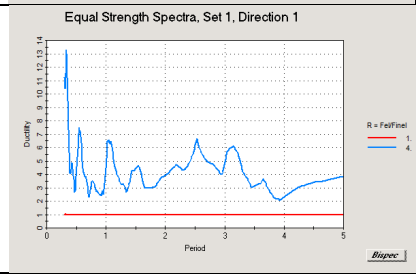


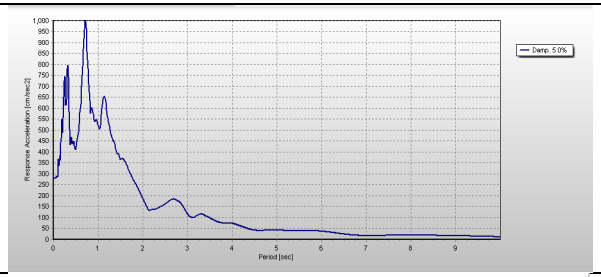
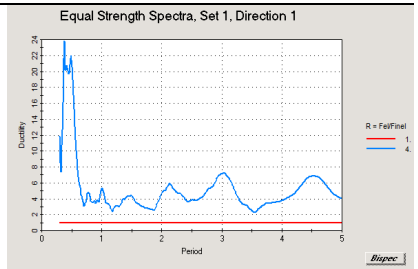
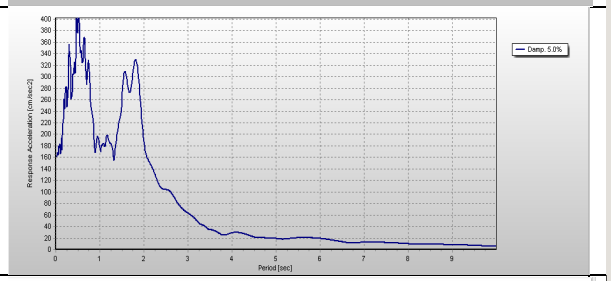
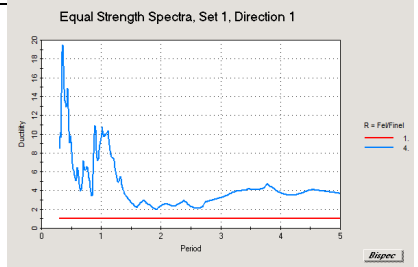
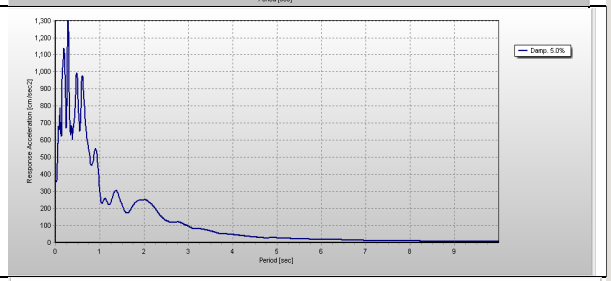
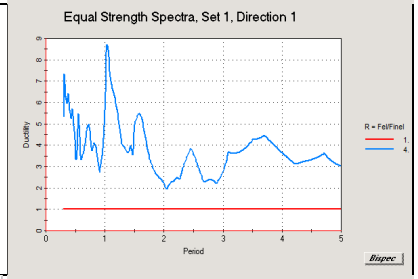
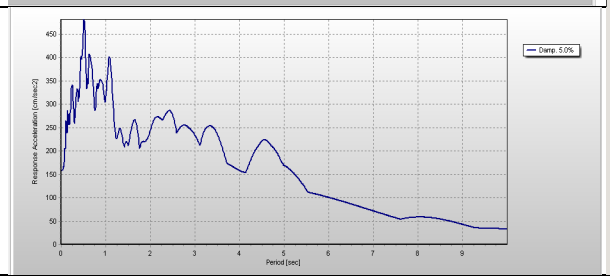
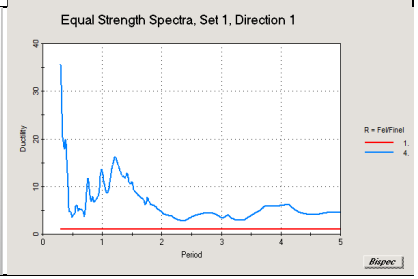


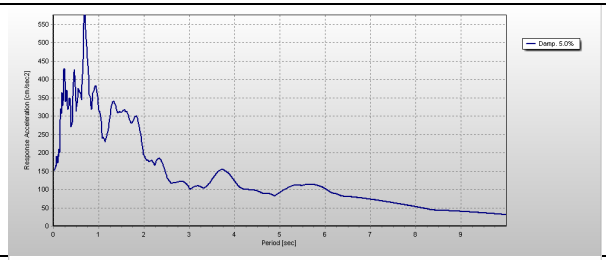
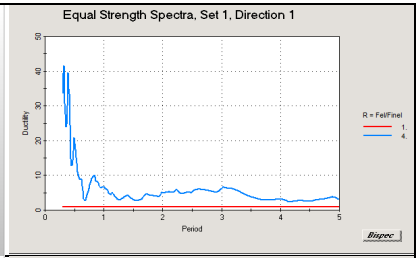
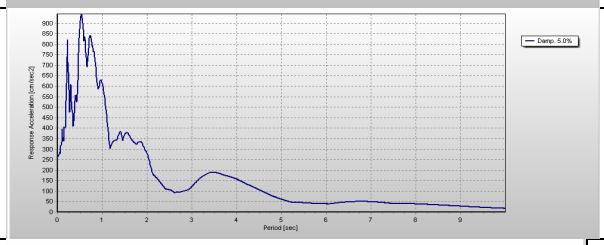
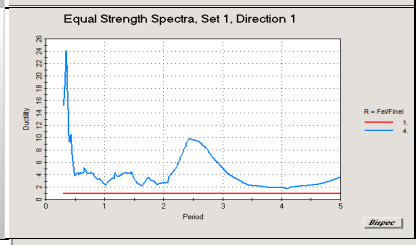
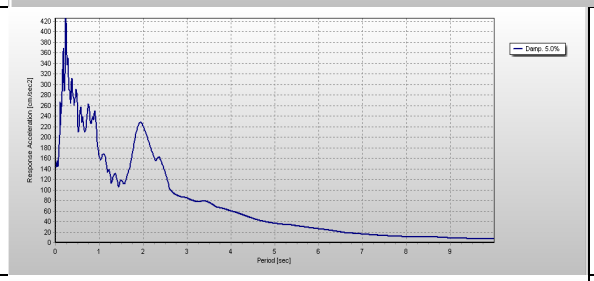
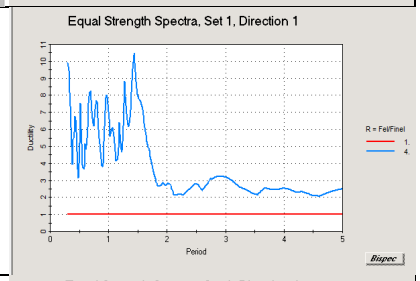
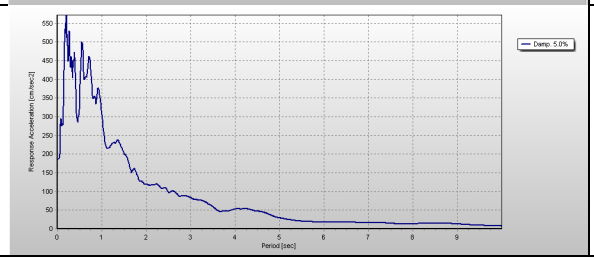
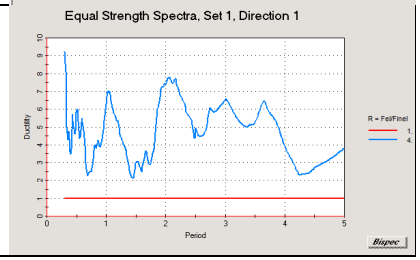


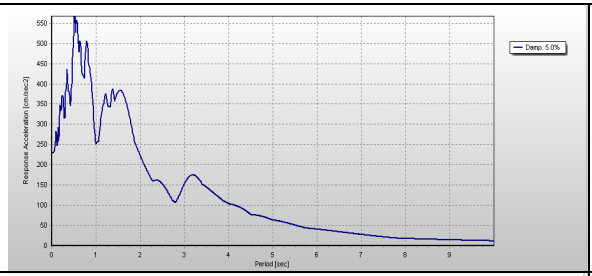
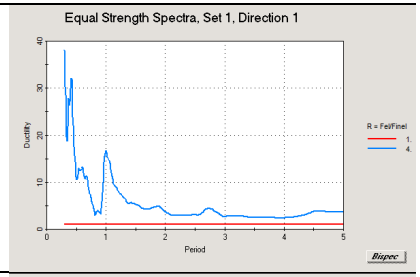
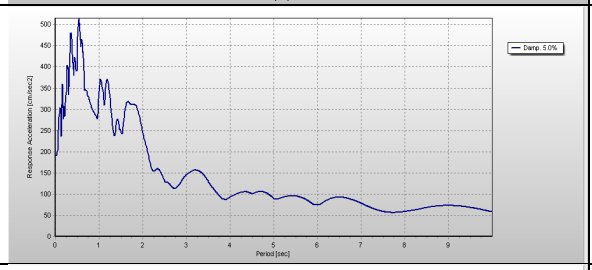
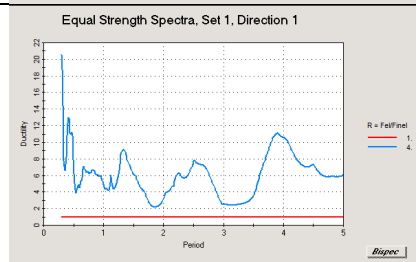
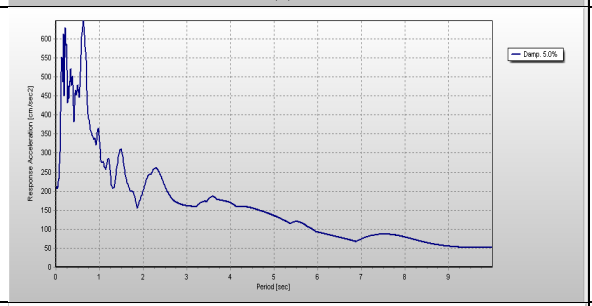
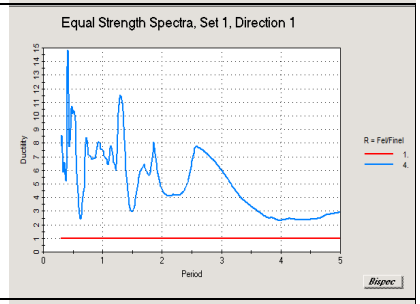
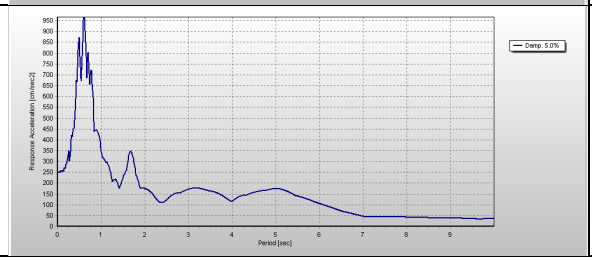
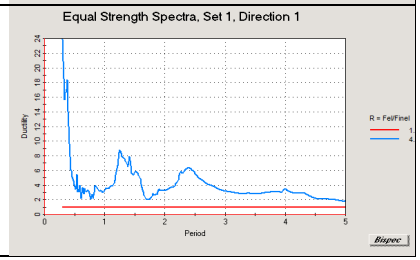


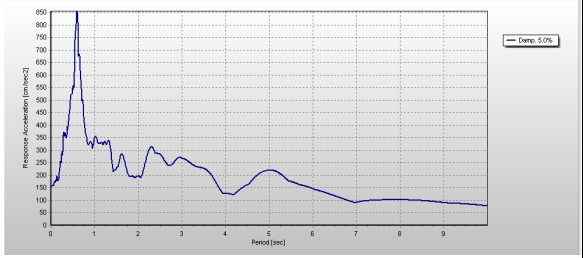
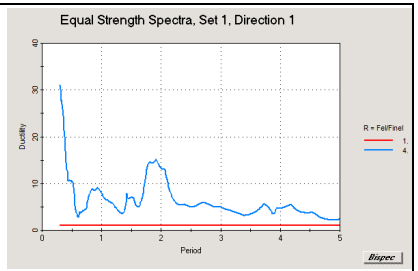
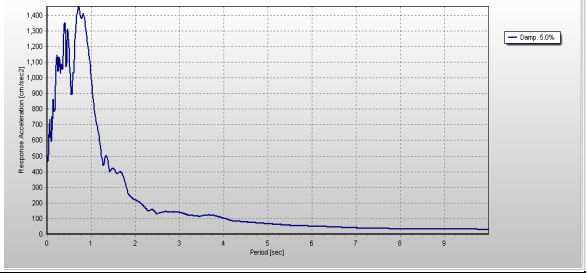
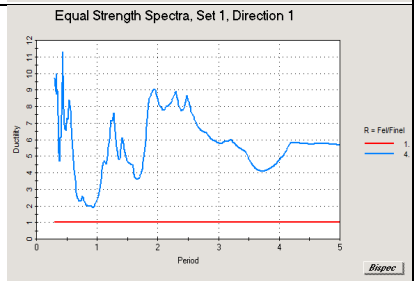
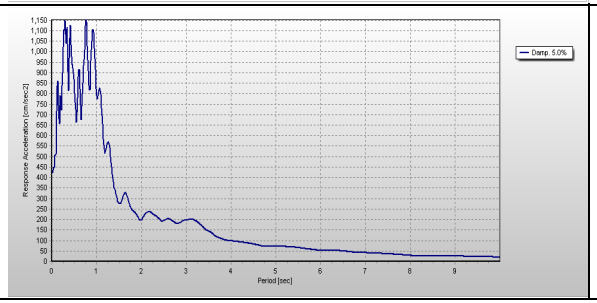
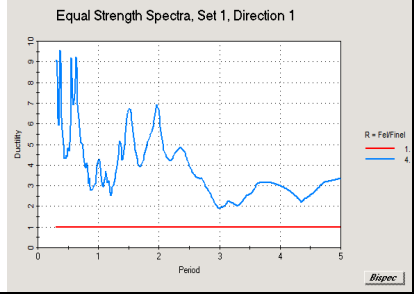
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ	ΕΛΑΣΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ	ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ
6-2		
165-2		
368-1		
721-2		

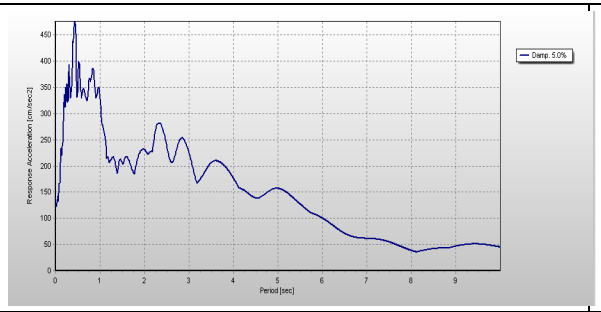
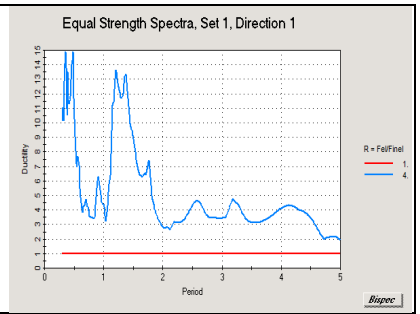
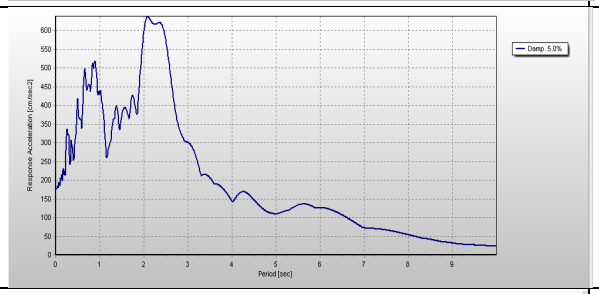
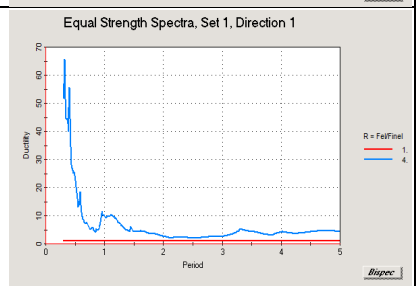
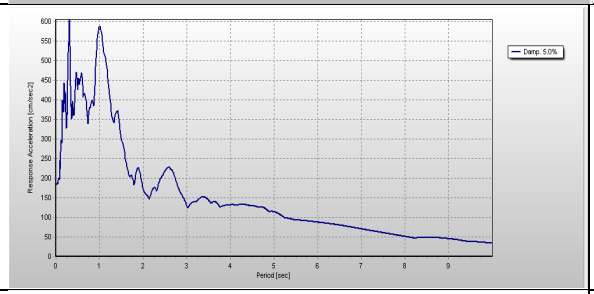
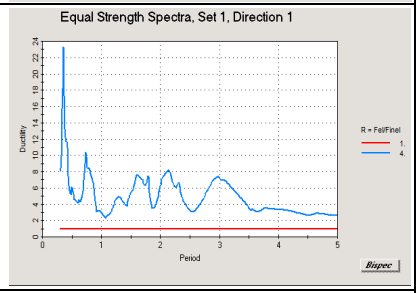
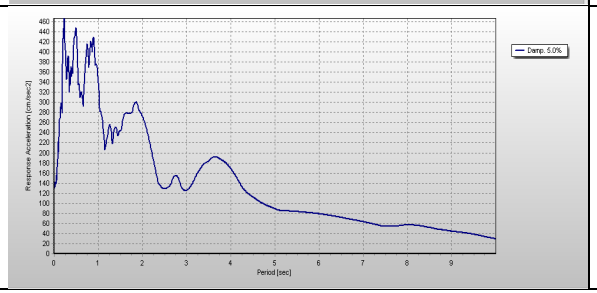
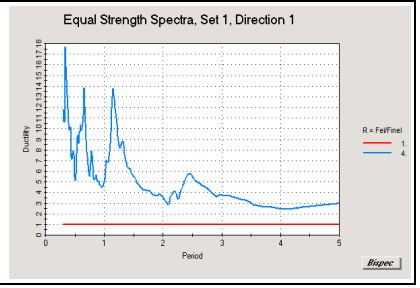
776-1		
778-2		
787-1		
864-1		

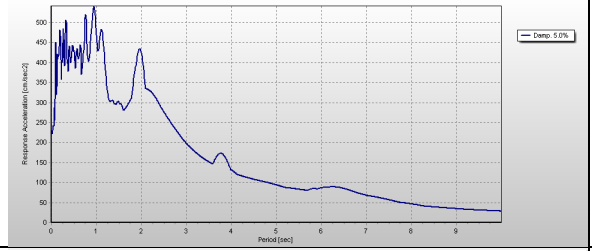
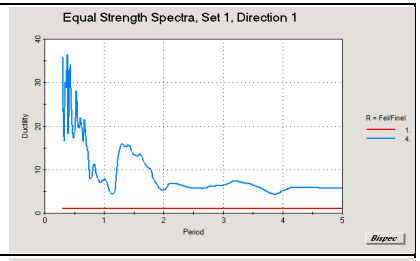
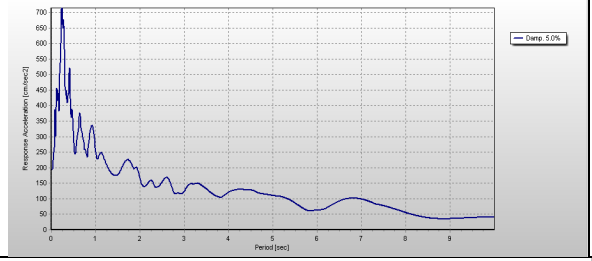
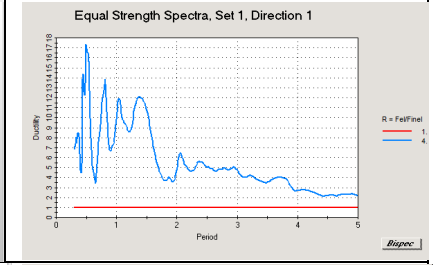
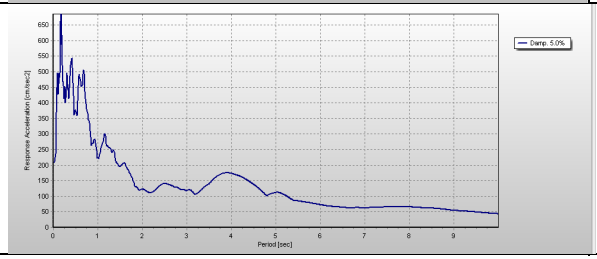
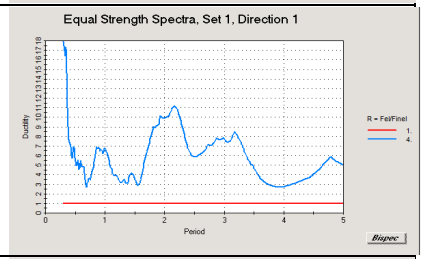
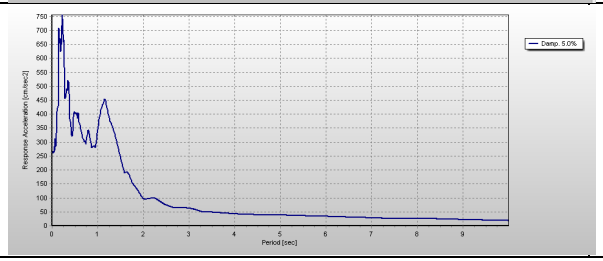
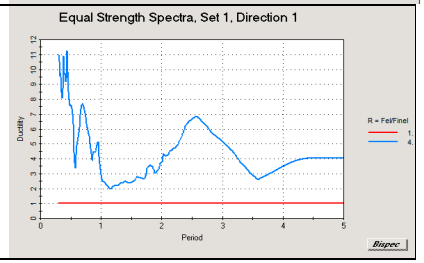
864-2		
881-2		
959-1		
1194-1		

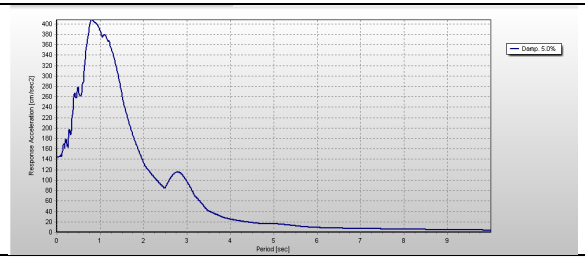
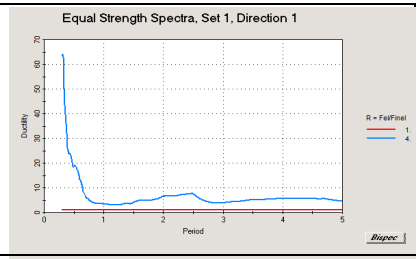
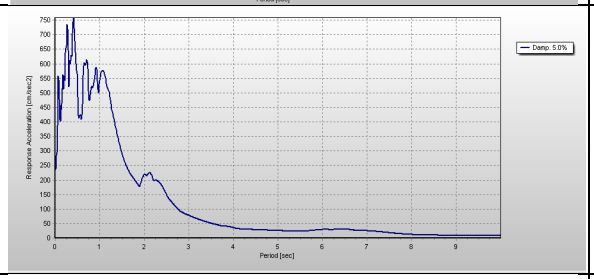
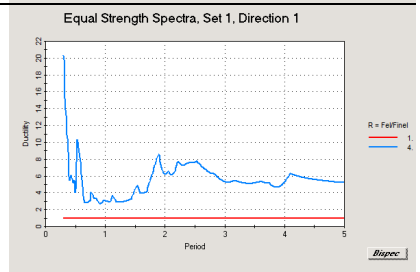
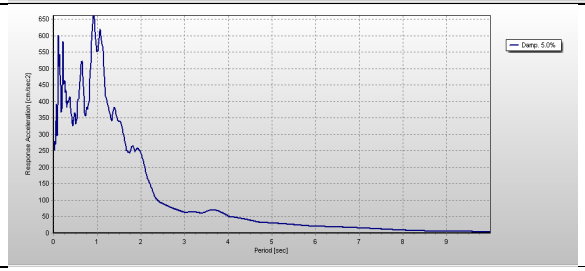
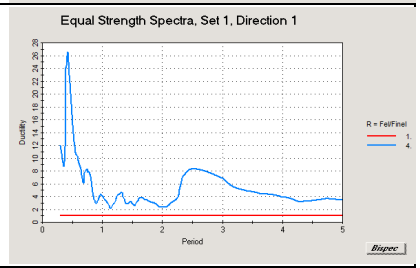
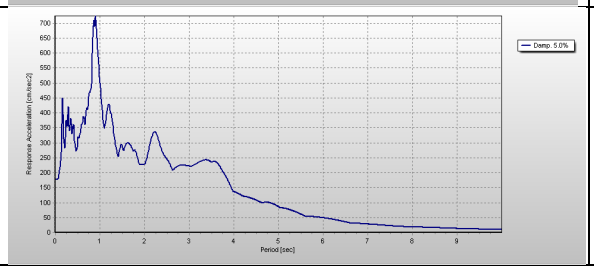
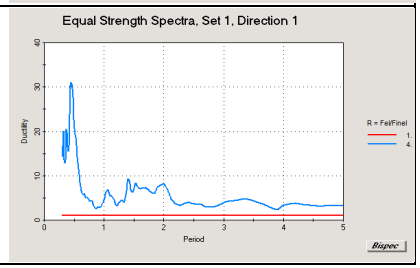
1194-2		
1203-1		
1208-1		
1208-2		

1227-1		
1494-2		
1495-2		
1506-1		

1506-2		
1508-1		
1517-2		

1533-2		
1536-1		
1541-1		
1541-2		

1545-1		
1545-2		
1546-1		
1787-1		

3648-1		
4685-1		
4685-2		
5786-2