



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**Διπλωματική Εργασία**

**Διερεύνηση της Ανελαστικής Συμπεριφοράς Οκταώροφου Κτηρίου  
από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα με τη Μέθοδο της Προσαυξητικής  
Δυναμικής Ανάλυσης σε Σεισμούς Κοντινού Πεδίου**

**Diploma Thesis**

**Investigation of the Inelastic Response of a Reinforced Concrete Eight-  
Storey Building subjected to Near-Fault Seismic Ground Motions using  
Incremental Dynamic Analysis**

**Αναστασία Δουλουμπέκη**

**Επιβλέπων Καθηγητής : Ι.Ψυχάρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π  
Συνεπιβλέπων: Ι. Ταφλαμπάς, Δρ Πολιτικός Μηχανικός**

**Αθήνα, Νοέμβριος 2017**





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

**Διερεύνηση της Ανελαστικής Συμπεριφοράς Οκταωρόφου Κτηρίου  
από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα με τη Μέθοδο της Προσαυξητικής  
Δυναμικής Ανάλυσης σε Σεισμούς Κοντινού Πεδίου**

Diploma Thesis

**Investigation of the Inelastic Response of a Reinforced Concrete Eight-  
Storey Building subjected to Near-Fault Seismic Ground Motions using  
Incremental Dynamic Analysis**

**Αναστασία Δουλουμπέκη**

Επιβλέπων Καθηγητής : Ι. Ψυχάρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π  
Συνεπιβλέπων: Ι. Ταφλαμπάς, Δρ Πολιτικός Μηχανικός

Αθήνα, Νοέμβριος 2017



---

---

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

---

Ολοκληρώνοντας τον κύκλο των προπτυχιακών μου σπουδών, με την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσοι συνέβαλαν σε αυτή τη διαδικασία.

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

Τον επιστημονικό συνεργάτη και συνεπιβλέποντα, Δρ Πολιτικό Μηχανικό κ. Ιωάννη Ταφλαμπά, που με ιδιάζουσα όρεξη και ενδιαφέρον, συνέβαλε στην επιστημονική στήριξη της εργασίας με τις ουσιαστικές παρατηρήσεις και συμβουλές του σε όλα τα στάδια εκπόνησής της.

Τον Δρ Πολιτικό Μηχανικό κ. Κωνσταντίνο Ρεπαπή, για την πολύτιμη στήριξή του σε θέματα υπολογιστικού περιεχομένου, βοηθώντας να ξεπεραστούν όλα τα προβλήματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Τον επίκουρο καθηγητή κ. Μιχαήλ Φραγκιαδάκη, για το ειλικρινές ενδιαφέρον και την καθοδήγηση περί της εργασίας.

Με ιδιαίτερη θέρμη θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους μου τους φίλους, νέους και παλιούς, που στάθηκαν στο πλάι μου σε αυτήν την προσπάθεια, προσφέροντας με τον δικό τους τρόπο και από διαφορετικό πόστο ο καθένας, και γέμισαν με όμορφες σκηνές και αναμνήσεις αυτή την πενταετία. Εύχομαι να ζήσουμε πολλές ακόμα αξέχαστες στιγμές μαζί υπερπηδώντας κάθε εμπόδιο.

Ολοκληρώνοντας, δεν θα μπορούσα να παραβλέψω φυσικά την ίδια μου την οικογένεια. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Κωνσταντίνο και Δήμητρα, και τα αδέρφια μου Μιχάλη και Γιώργο για την έμπρακτη στήριξή τους σε όλα τα σχολικά και φοιτητικά μου χρόνια. Ήταν οι άνθρωποι που με την αγάπη τους, την υπομονή τους και την διαρκή υποστήριξή τους έκαναν τις δύσκολες στιγμές να μοιάζουν ευκολότερες.

Νατάσα Δουλουμπέκη,  
Αθήνα, Νοέμβριος 2017



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Διερεύνηση της Ανελαστικής Συμπεριφοράς Οκταώροφου Κτηρίου από  
Ωπλισμένο Σκυρόδεμα με τη Μέθοδο της Προσαυξητικής Δυναμικής Ανάλυσης  
σε Σεισμούς Κοντινού Πεδίου**

Αναστασία Δουλουμπέκη

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

Συνεπιβλέπων: Ι. Ταφλαμπάς, Δρ Πολιτικός Μηχανικός

---

---

## ΣΥΝΟΨΗ

---

---

Οι σεισμοί κοντινού πεδίου με παλμό κατευθυντικότητας στη χρονοϊστορία ταχύτητας αποτελούν αντικείμενο μεγάλου ενδιαφέροντος για την αντισεισμική τεχνολογία, καθώς επιδρούν σημαντικά στην ανελαστική συμπεριφορά των κατασκευών. Σε αυτόν τον άξονα, διερευνήθηκε η συσχέτιση μεταξύ της περιόδου του παλμού της διέγερσης του εδάφους και της περιόδου του παλμού της απόκρισης δεδομένης κατασκευής στις χρονοϊστορίες της ταχύτητας. Για την εξαγωγή και προσομοίωση των παλμών, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των (Mimoglou, Psycharis, & Taflampas, 2014), η οποία βασίζεται στο μαθηματικό μοντέλο που πρότειναν οι (George P. Mavroeidis & Parageorgiou, 2003). Το σύνολο των 42 εδαφικών κινήσεων που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνονται στην βάση δεδομένων *NGA (Next Generation Attenuation)*, και έχουν χαρακτηριστεί από τον (Baker, 2007) ως παλμικές. Ο φορέας που δέχεται ως διέγερση βάσης αυτές τις καταγραφές κοντινού πεδίου υποβάλλεται σε προσαυξητική δυναμική ανάλυση (Incremental Dynamic Analysis), μέσω του λογισμικού *SeismoStruct*, και μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα οκτώροφο τοιχωματικό κτίριο από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Εφαρμόζοντας αυτή τη μέθοδο ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης, η κλιμάκωση που αντιστοιχεί στο στάδιο μερικής κατάρρευσης, σύμφωνα με τα *HRC-scale damage limit states* (Rossetto & Elnashai, 2003), είναι και αυτή από την οποία εξήχθησε η χρονοϊστορία ταχύτητας απόκρισης. Συμπεραίνεται ότι υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των περιόδων των παλμών της διέγερσης εδάφους και της απόκρισης κατασκευής στο στάδιο που αναφέρθηκε, η οποία προσεγγίζει ικανοποιητικά την γραμμική συσχέτιση. Εξετάζεται η δρώσα ακαμψία της κατασκευής μέσω της θέσης των καμπυλών *IDA*, σε σχέση με την περίοδο του παλμού. Δεδομένης της αναλογίας μεταξύ του μεγέθους ενός σεισμικού γεγονότος και της περιόδου του παλμού διέγερσης, συμπεραίνεται η επίδραση του μεγέθους αυτού στην επιλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος καμπυλών *IDA* κατά την διερεύνηση συμπεριφοράς του κτιρίου.

**Λέξεις - κλειδιά:** Σεισμοί κοντινού πεδίου, παλμικές καταγραφές, παλμός χρονοϊστορίας ταχύτητας, ανάλυση κυματιδίων, φάσμα συνέλιξης, προσαυξητική δυναμική ανάλυση

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
LABORATORY FOR EARTHQUAKE ENGINEERING

**DIPLOMA THESIS**

**Investigation of the Inelastic Response of a Reinforced Concrete Eight-Storey Building subjected to Near-Fault Seismic Ground Motions using Incremental Dynamic Analysis**

Anastasia Douloumpeki

Supervisor: Ioannis N. Psycharis, Professor NTUA  
Co-Supervisor: Ioannis Taflampas, Dr Civil Engineer

---

---

## **ABSTRACT**

---

---

Near fault ground motions with directivity pulses at the beginning of the velocity time history are of great interest to earthquake technology, due to their effect in the inelastic behavior of structures. Considering that, the correlation between the ground motion pulse period and a given structure's response pulse period in the velocity time history is investigated. The classification method used in this thesis is introduced by the researchers P. Mimoglou, I. Psycharis, I. Taflampas (2014), according to which the significant pulses of a ground motion are extracted through wavelet analysis, while the mathematical presentation of the pulse is described by the wavelet used by Mavroeidis and Papageorgiou (2003). A set of 42 records from the NGA (*Next Generation Attenuation*) database was employed, which were characterized as pulse-like from Baker (2007). The eight-storey structural model of reinforced concrete consisting of shear walls is subjected to the aforementioned ground motion records and through IDA (Incremental Dynamic Analysis) study its inelastic performance is scrutinized, via the software SeismoStruct. Each ground motion record scaled (up or down) so that the entire range of displacements can be covered from the elastic segment to the inelastic one until partial collapse. The velocity time history response is extracted from the scaling that corresponds better to the partial collapse level (HRC-scale damage limit states). The correlation between the pulse periods of the ground motion records and the structural model's response emerged linear to appropriate extent. The structure's stiffness is investigated, when subjected to scaled motion records, through IDA curves' position according to pulse period. Given the analogy between the magnitude of a ground motion and the pulse period, the effect of that magnitude in the choice of a representative IDA curve set is concluded for the analysis of the building's behavior.

**Keywords:** Near fault ground motions, pulse-like records, velocity pulse, wavelet analysis, displacement-velocity product spectrum, incremental dynamic analysis



---

---

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

---

Οι σεισμοί κοντινού πεδίου με παλμό κατευθυντικότητας στη χρονοϊστορία ταχύτητας αποτελούν αντικείμενο μεγάλου ενδιαφέροντος για την αντισεισμική τεχνολογία, καθώς επιδρούν σημαντικά στην ανελαστική συμπεριφορά των κατασκευών. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων, γίνονται αρκετές προσπάθειες εντοπισμού του σημαντικού παλμού σε μια διέγερση κοντινού πεδίου, αλλά και προσδιορισμού των χαρακτηριστικών του όπως η δεσπόζουσα περίοδος του παλμού. Στην παρούσα εργασία εντοπίζεται πλέον του παλμού της διέγερσης, και ο σημαντικός παλμός στην απόκριση ενός τοιχωματικού κτιρίου από ωπλισμένο σκυρόδεμα όταν υποβάλλεται σε αυτές τις διεγέρσεις.

Αρχικά, περιγράφεται η έννοια και τα χαρακτηριστικά που διέπουν τους σεισμούς κοντινού πεδίου, αλλά παρατίθενται και ορισμένες γεωμετρικές παράμετροι του μηχανισμού διάρρηξης που έχουν συνδεθεί με τους παλμούς των εδαφικών κινήσεων. Συγκεκριμένα, η περιοχή στην οποία επικεντρώνονται οι βλάβες κατά την διάρκεια ενός σεισμού είναι συνήθως συγκεντρωμένη γύρω από το ρήγμα, έχει διαστάσεις ανάλογες με την επιφάνεια ρηγμάτωσης και ονομάζεται *κοντινό πεδίο (near fault area)*, ενώ κοντά της η εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται από το *φαινόμενο της κατευθυντικότητας (rupture directivity)*. Μία πρόσφατη σημαντική μέθοδος που προτάθηκε από τον Baker (2007), περιγράφει την ποσοτική ταξινόμηση των σεισμών κοντινού πεδίου και τον διαχωρισμό των χρονοϊστοριών σε παλμικές ή μη. Προκειμένου μια καταγραφή να θεωρείται παλμική πρέπει ο παλμός να μην φτάνει στο τέλος στη χρονοϊστορία ταχύτητας, η μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV να ξεπερνά τα 30cm/sec και οι τιμές του δείκτη πρόβλεψης παλμού P.I. του Baker (2007) να είναι μεγαλύτερες του 0.85 s. Εδαφικές καταγραφές που είχαν ταξινομηθεί από την ανάλυση του Baker ως παλμικές, υπάρχουν στην βάση δεδομένων NGA (*Next Generation Attenuation*) και πλήθος αυτών χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Μία σημαντική προσπάθεια προσομοίωσης εδαφικών κινήσεων με παλμό κατευθυντικότητας, δίνεται από τους (George P. Mavroeidis & Papageorgiou, 2003) με την χρήση *κυματομορφών (wavelets)*. Συγκεκριμένα, η χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας προσομοιάζεται με ένα ημιτονικό σήμα, πολλαπλασιασμένο με μία κωδωνόσχημη περιβάλλουσα που προκύπτει από ένα μετατεθειμένο κύκλο συνημιτόνου. Το χρησιμοποιούμενο *κυματίδιο M&P (M&P wavelet)* περιγράφεται από τη συχνότητα  $f_p$ , το εύρος  $A$ , τη διαφορά φάσης  $\nu$  και τη διάρκεια του κυματιδίου  $\gamma$ . Με τη χρήση των παραμέτρων αυτών επιτυγχάνεται καλή προσέγγιση του παλμού, που αποδίδει ικανοποιητικά την επίδρασή του στην απόκριση των κατασκευών.

Με βάση την αποδεδειγμένη αποτελεσματικότητα της μαθηματικής παρουσίασης των παλμών κατευθυντικότητας από τους (George P. Mavroeidis & Papageorgiou, 2003), προτάθηκε από τους (Mimoglou et al., 2014) μια νέα μεθοδολογία, που αφορά

σε μία καλώς καθορισμένη διαδικασία για τον καθορισμό των σημαντικών παλμών αλλά και τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των σχετικών κυματιδίων. Έτσι, οι σημαντικοί παλμοί μιας εδαφικής κίνησης αναγνωρίζονται μέσω κυματικής ανάλυσης και οι περίοδοι των παλμών  $T_p$  προσδιορίζονται από τις κορυφές του φάσματος συνέλιξης  $S_d \times S_v$  για  $\xi=5\%$ .

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, εκτός από τους παλμούς διέγερσης, στην παρούσα εργασία, εντοπίστηκαν και οι παλμοί απόκρισης μιας κατασκευής. Όσον αφορά την κατασκευή, πρόκειται για ένα οκταώροφο κτίριο ωπλισμένου σκυροδέματος αποτελούμενο αποκλειστικά από τοιχώματα. Παρουσιάζει, επίσης συμμετρία κάτοψης αλλά και όπλισης κατά τον άξονα  $\chi$ . Η προσομοίωση του φορέα έγινε μέσω του λογισμικού SeismoStruct, ενώ υποβλήθηκε σε 42 καταγραφές εδαφικής κίνησης της βάσης NGA που αναφέρθηκε προηγουμένως, η καθεμία από τις οποίες κλιμακώνεται καταλλήλως (μεγεθύνεται ή σμικρύνεται), έτσι ώστε η μη-γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας της κάθε κλιμάκωσης να καλύπτει πλήρως (και περαιτέρω) όλο το φάσμα της παραμορφωσιακής ικανότητας του φορέα. Κάθε κλιμακωμένη καταγραφή παράγει μία καμπύλη, την *καμπύλη IDA*, το σύνολο των οποίων για όλες τις καταγραφές, μας δίνει σημαντικές πληροφορίες για την ανελαστική συμπεριφορά της κατασκευής. Το φάσμα της παραμορφωσιακής ικανότητας του μοντέλου θεωρήθηκε ότι θα καλύπτεται, όταν η σχετική μετακίνησή του σε κάποια κλιμάκωση φτάσει ή ξεπεράσει την στάθμη σχεδόν κατάρρευσης (HRC-scale damage limit states). Η χρονοϊστορία ταχύτητας που αντιστοιχεί σε αυτό το στάδιο βλάβης, είναι και αυτή από την οποία θα εξαχθεί ο παλμός απόκρισης, μέσω του υπολογιστικού κώδικα CROSS5NEW-5 των (Mimoglou et al., 2014).

---

---

# ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

---

---

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει τη διάταξη των κεφαλαίων της διπλωματικής εργασίας, δίνοντας μία συνοπτική εικόνα για το περιεχόμενο τους.

## ***Κεφάλαιο 1***

Το παρόν κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει την εισαγωγή στην έννοια και στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που διέπουν τους σεισμούς κοντινού πεδίου, τη μέθοδο ποσοτικής ταξινόμησης και διάκρισης τέτοιων χρονοϊστοριών σε παλμικές ή μη όπως αυτή προτάθηκε από τον (Baker, 2007) και τέλος, τη μέθοδο προσομοίωσης εδαφικών κινήσεων με παλμό κατευθυντικότητας των (George P. Manroeidis & Parageorgiou, 2003) με την χρήση κυματομορφών. Λειτουργεί με αυτόν τον τρόπο ως θεωρητικό υπόβαθρο για την πραγμάτωση της εργασίας.

## ***Κεφάλαιο 2***

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που προτάθηκε από τους (Mimoglou et al., 2014) και αφορά τον καθορισμό των σημαντικών παλμών που περιλαμβάνονται στις καταγραφές των σεισμών κοντινού πεδίου. Αυτή η νέα μέθοδος, χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας και επιτρέπει τον εντοπισμό και την εξαγωγή όλων των σημαντικών παλμών στο μεσαίο και μεγάλο εύρος περιόδων.

## ***Κεφάλαιο 3***

Παρατίθεται η μέθοδος της προσαυξητικής δυναμικής ανάλυσης, ή αγγλιστί IDA (Incremental Dynamic Analysis). Αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά της, γενικές ιδιότητές της, όπως επίσης, γίνεται σύγκρισή της με την στατική ανελαστική Pushover. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται δια μακρών στην παρούσα εργασία, καθώς το μοντέλο υποβάλλεται σε αυτή τη δυναμική ανελαστική ανάλυση για όλες τις καταγραφές εδαφικών κινήσεων που επιλέχθηκαν, με σκοπό την εξαγωγή των χρονοϊστοριών ταχύτητας της απόκρισης.

## ***Κεφάλαιο 4***

Περιλαμβάνεται η περιγραφή του κτιρίου και η προσομοίωσή του στο λογισμικό SeismoStruct. Η παρουσίαση προσομοίωσης ξεκινά με την περιγραφή των υλικών ,των διατομών και των φορτίων. Στη συνέχεια, παρατίθενται οι παραδοχές σχεδιασμού που συμπεριλήφθηκαν κατά την προσομοίωση του μοντέλου. Ακολουθούν η ιδιομορφική και η στατική ανελαστική ανάλυση με τα αποτελέσματά τους.

## ***Κεφάλαιο 5***

Απεικονίζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Συγκεκριμένα, για κάθε καταγραφή εδαφικής κίνησης που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται η καμπύλη IDA και έπονται αυτής, οι χρονοϊστορίες ταχύτητας της διέγερσης και της απόκρισης συνοδευόμενη η καθεμιά από τον κυρίαρχο παλμό της. Σε λεζάντα, κατατίθεται η περίοδος του κάθε παλμού και ο συντελεστής συσχέτισης του παλμού απόκρισης με το αρχικό σήμα.

## ***Κεφάλαιο 6***

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας συνοδευόμενα από χαρακτηριστικά σχήματα.

---

---

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	i
ΣΥΝΟΨΗ.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	v
ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ .....	vii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	xi
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	xiv

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

1.1 Εισαγωγή.....	3
1.2 Ρήγματα .....	3
1.2.1 Βασικοί τύποι διάρρηξης ρηγμάτων.....	4
1.2.2 Χαρακτηριστικά ρήγματος .....	5
1.3 Επιδράσεις κατευθυντικότητας .....	6
1.4 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου .....	11
1.4.1 Η σχετική θέση ως προς το ρήγμα.....	11
1.4.2 Εμφάνιση παλμού στη χρονοϊστορία ταχύτητας .....	13
1.4.3 Εξαγωγή και μαθηματική αναπαράσταση του παλμού .....	14
1.5 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού .....	16
1.6 Μέθοδοι εκτίμησης συχνοτικού περιεχομένου παλμών κατευθυντικότητας.....	21
1.6.1 Μέθοδος κυματιδίων κατά Baker.....	21
1.6.2 Η μέθοδος των Mavroeidis & Papageorgiou .....	32

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ ΣΤΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΝΕΛΙΞΗΣ

2.1 Εισαγωγή.....	41
2.2 Θεωρητικό υπόβαθρο .....	41
2.3 Προσδιορισμός των περιόδων των σημαντικών παλμών .....	44
2.4 Εύρος, διάρκεια, διαφορά φάσης και στιγμή έναρξης του παλμού .....	49

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΑΥΞΗΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ**

3.1 Εισαγωγή.....	57
3.2 Βασικές έννοιες της μεθόδου IDA για μια καταγραφή χρονοϊστορίας.....	58
3.3 Γενικές ιδιότητες της καμπύλης IDA.....	62
3.4 Ικανότητα και οριακές καταστάσεις σε καμπύλες IDA .....	67
3.5 Χαρακτηριστικά καμπυλών IDA πολλών καταγραφών .....	70
3.6 Σύγκριση της ανάλυσης IDA με την ανελαστική ανάλυση PUSHOVER .....	73

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ**

4.1 Περιγραφή γεωμετρίας φορέα .....	79
4.2 Προσομοίωση του φορέα .....	81
4.3 Υλικά .....	83
4.4 Διατομές μελών.....	84
4.4.1 Τοιχώματα .....	85
4.4.2 Δοκοί .....	87
4.4.3 Πλάκες.....	88
4.5 Φορτία .....	88
4.6 Παραδοχές Σχεδιασμού.....	88
4.7 Ιδιομορφική Ανάλυση .....	90
4.8 Στατική ανελαστική ανάλυση (Static pushover analysis) .....	91
4.9 Προσαυξητική δυναμική ανάλυση.....	92

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ**

5.1 Εισαγωγή.....	97
5.2 Αποτελέσματα αναλύσεων.....	99

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>142</b>
--------------------------	------------

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>149</b>
--------------------------	------------

---

---

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

---

---

Σχήμα 1. 1 Βασικοί τύποι ρηγμάτων : (1) Κανονικό ρήγμα, (2) Ανάστροφο ρήγμα, (3) Ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης.....	4
Σχήμα 1. 2 Γεωμετρικές παράμετροι ενός ρήγματος (NGA Database Documentation File) ....	5
Σχήμα 1. 3 Επίκεντρο και υπόκεντρο ρήγματος .....	6
Σχήμα 1. 4 Διευθύνσεις ανάπτυξης των διαφορετικών τύπων κατευθυντικότητας .....	7
Σχήμα 1. 5 Σχηματική απεικόνιση της συμβολής των παλμών των διατμητικών κυμάτων στην κατεύθυνση της διάρρηξης (έμπροσθεν κατευθυντικότητα) και της παράθεσης των παλμών στην αντίθετη κατεύθυνση (όπισθεν κατευθυντικότητα) (Benioff, 1955) .....	8
Σχήμα 1. 6 Σχηματικό διάγραμμα επίδρασης της κατευθυντικότητας της διάρρηξης για οριζόντιο ρήγμα ολίσθησης. Η διάρρηξη αρχίζει στο υπόκεντρο και διαδίδεται με ταχύτητα περίπου ίση με το 80% της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Η εικόνα παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο του μετώπου της ρήξης σε μία δεδομένη χρονική στιγμή (Somerville, Smith, Graves, & Abrahamson, 1997).....	8
Σχήμα 1. 7 Αποτελέσματα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις καταγεγραμμένες ιστορίες μετακινήσεων του σεισμού του Loma Prieta του 1989 για τις κάθετες (άνω) και τις παράλληλες (κάτω) στο ρήγμα συνιστώσες, EERI, 1995 .....	9
Σχήμα 1. 8 Σχηματικό διάγραμμα των προσανατολισμών της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα κεκλιμένης ολίσθησης.....	10
Σχήμα 1. 9 Χρονοϊστορίες για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα κατακόρυφης βύθισης στο οποίο η παραμένουσα μετακίνηση και ο παλμός κατευθυντικότητας παρουσιάζονται μαζί και χωριστά.....	11
Σχήμα 1. 10 Παράμετροι που σχετίζονται με την διάρρηξη και καθορίζουν το εύρος στο φαινόμενο της πρόσω κατευθυντικότητας (Somerville et al, 1997) .....	12
Σχήμα 1. 11 Επίπτωση των παραμέτρων της διάρρηξης στην φασματική μεγέθυνση σε σχέση με συνήθεις καταγραφές (Somerville et al, 1997) .....	13
Σχήμα 1. 12 Απλοποιημένες μορφές παλμών κατευθυντικότητας .....	14
Σχήμα 1. 13 Απλοποιημένοι παλμοί των (Makris & Black, 2004) .....	15
Σχήμα 1.14 Καθορισμός περιόδου παλμού από την ιστορία της ταχύτητας (Rodriguez-Marek, 2000).....	16
Σχήμα 1. 15 Συνοριακό μοντέλο Papageorgiou and Aki (George P. Mavroeidis & Papageorgiou, 2003) .....	17
Σχήμα 1. 16 Σχέσεις υπολογισμού παλμού κατευθυντικότητας (Rodriguez-Marek, 2000) ...	21
Σχήμα 1. 17 Σχέσεις υπολογισμού παλμού κατευθυντικότητας για διαφορετικές κατηγορίες εδάφους (Rodriguez-Marek , 2000) .....	21
Σχήμα 1. 18 Παραδείγματα κάθετων στο ρήγμα συνιστωσών σε σεισμούς κοντινού πεδίου (Baker 2007) .....	22
Σχήμα 1. 19 Πρότυπα μητρικά κυματίδια (Baker, 2007) .....	24
Σχήμα 1. 20 Μετασχηματισμοί κυματιδίων (Baker 2007) .....	25
Σχήμα 1. 21 Ανάλυση με κυματίδια κατά Baker (Baker, 2007) .....	26
Σχήμα 1. 22 Περιγραφή της διαδικασίας αφαίρεσης παλμού (Baker 2007) .....	27
Σχήμα 1. 23 Παλμός στην αρχή της ιστορίας. α,β) ιστορία ταχύτητας και παλμού ,γ) CSV (Baker 2007) .....	29
Σχήμα 1. 24 Παλμός στο τέλος της ιστορίας. α,β) ιστορία ταχύτητας και παλμού ,γ) CSV (Baker 2007) .....	29

Σχήμα 1. 25 Εδαφική κίνηση με μικρή PGV που εμφανίζεται ως παλμική και αποκλείεται (Baker 2007) .....	30
Σχήμα 1. 26 Κυματίδιο Daubechies και ημιτονικό κύμα με περίοδο ίση με τη μέγιστη της κυματομορφής από το φάσμα Fourier (Baker 2007).....	31
Σχήμα 1. 27 Απόκλιση περιόδου παλμού και δεσπόζουσας περιόδου φάσματος ταχυτήτων (Baker , 2007).....	31
Σχήμα 1. 28 Η αρχική κίνηση, ο εξαγόμενος παλμός και η εναπομένουσα εδαφική κίνηση για την εδαφική κίνηση Landers 1992, Yermo Fire Station. (a) Χρονοϊστορίες ταχύτητας, (b) φάσματα ταχύτητας στα οποία φαίνεται ο προσδιορισμός της περιόδου του παλμού με τη χρήση του φάσματος ψευδο-ταχύτητας και μέσω κυματικής ανάλυσης. ....	32
Σχήμα 1. 29 Σύγκριση της κυματομορφής των Mavroeidis & Parageorgiou (2003) με το κυματίδιο Gabor. (a) κωδωνόσχημες περιβάλλουσες, (b) ημιτονικά σήματα, (c) συνδυασμοί των (a) και (b). ....	33
Σχήμα 1. 30 Προσομοίωση παλμού (Loma Prieta 1989 Station STG) ,( Mavroeidis and Parageorgiou ,2003) .....	35
Σχήμα 1. 31 Χρονοϊστορία επιταχύνσεων και φάσμα ταχυτήτων προσομοίωσης (Loma Prieta 1989 Station STG) (George P. Mavroeidis & Parageorgiou, 2003) .....	36
Σχήμα 1. 32 Φάσμα Fourier παλμού με παράμετρο $\gamma=1$ (Mavroeidis and Parageorgiou, 2003) .....	37
Σχήμα 1. 33 Φάσματα μετακινήσεων και ταχυτήτων παλμού με παράμετρο $\gamma=1$ (Mavroeidis et al ,2004).....	37
Σχήμα 2. 1 Σχέση μεταξύ της μέγιστης φασματικής μετακίνησης $S_{d,max}$ και CAD για κυματίδιο M&P και διάφορες τιμές $\gamma$ και $\nu$ . (a) μηδενική απόσβεση (b) απόσβεση 5% (Mimoglou et al 2014) .....	44
Σχήμα 2. 2 Καταγραφή Petrolia από το σεισμό στο Cape Mendocino, 1992. (a) Φάσμα ψευδοταχύτητας για απόσβεση 5%, (b) χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας και ο υπολογισμένος δεσπόζων παλμός (Mimoglou 2014).....	45
Σχήμα 2. 3 Καταγραφή #38 (Πίνακας 2.1). (a) σύγκριση του φάσματος Fourier της εδαφικής ταχύτητας με το φάσμα απόκρισης μετακίνησης για μηδενική απόσβεση και (b) φάσμα απόκρισης μετακίνησης για 5% απόσβεση. ....	46
Σχήμα 2. 4 Καταγραφή #20 (Πίνακας 2.1). (a) φάσμα απόκρισης μετακίνησης για απόσβεση 5% και (b) φάσμα απόκρισης ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5%. ....	46
Σχήμα 2. 5 Καταγραφές (a) #38 και (b) #20 (Πίνακας 2.1). Πάνω σειρά, καθορισμός της περιόδου του παλμού από την κορυφή του φάσματος συνέλιξης για απόσβεση 5% (συγκρίνεται με την αντίστοιχη για μηδενική απόσβεση). Κάτω σειρά, σύγκριση των χρονοϊστοριών ταχύτητας του εξαγόμενου κυματίδιου M&P με της αρχικής καταγραφής. .48	
Σχήμα 3. 1 Ένα παράδειγμα της πληροφορίας που μπορεί να συναχθεί από μίας καταγραφής μελέτη IDA ενός 20ώροφου χαλύβδινου καμπτικού πλαισίου με όλκιμα μέλη και συνδέσεις, λαμβάνοντας υπόψη φαινόμενα P-Δ δευτέρας τάξεως, υποβαλλόμενο στην καταγραφή του El Centro (1940) (συνιστώσα παράλληλη στο ρήγμα). ....	61
Σχήμα 3. 2 Καμπύλες IDA για ένα 5-ώροφο μεταλλικό πλαίσιο με συνδέσμους δυσκαμψίας ( $T_1=1.8$ sec) υποβαλλόμενο σε τέσσερις (4) διαφορετικές καταγραφές. ....	62
Σχήμα 3. 3 Καμπύλες IDA της μέγιστης στροφής ορόφου (peak interstorey drift) για κάθε όροφο ενός 5-ώροφου μεταλλικού πλαισίου με συνδέσμους δυσκαμψίας ( $T_1=1.8$ sec). Παρατηρήστε τη σύνθετη «κυματοειδή» αλληλεπίδραση, όπου η ακραία «χαλάρωση» του	



2ου ορόφου λειτουργεί ως μία «δικλείδα ασφαλείας» για την ανακούφιση των ανωτέρων ορόφων (3,4,5).....	64
Σχήμα 3. 4 Πλαστιμότητα ενός μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού ταλαντωτή ( $T=1$ sec) σε διάφορα επίπεδα δόνησης. Η πρωιμότερη διαρροή στην ισχυρότερη εδαφική κίνηση οδηγεί σε μία μικρότερη μέγιστη απόκριση κατ' απόλυτη τιμή. ....	65
Σχήμα 3. 5 Επαναφορά της κατασκευής (structural resurrection) στην καμπύλη IDA ενός 3-ώροφου μεταλλικού καμπτικού πλαισίου με ψαθυρές συνδέσεις ( $T_1=1.3$ sec).....	66
Σχήμα 3. 6 Δύο διαφορετικοί κανόνες που παράγουν πολλαπλά σημεία ικανότητας για ένα 3-ώροφο μεταλλικό καμπτικό πλαίσιο με ψαθυρές συνδέσεις ( $T_1=1.3$ sec). Ο κανόνας DM, όπου DM είναι το $\theta_{max}$ , εφαρμόζεται για $CDM=0.08$ και ο κανόνας IM χρησιμοποιεί το κριτήριο της 20% κλίσης.....	69
Σχήμα 3. 7 Μία μελέτη IDA για 30 καταγραφές σε ένα 5-ώροφο μεταλλικό πλαίσιο με συνδέσμους δυσκαμψίας ( $T_1=1.8$ sec) που δείχνει (a) τις 30 ξεχωριστές καμπύλες και (b) την συγκέντρωσή τους στις καμπύλες που αντιστοιχούν στα 16%, 50% και 84% ποσοστιαία σημεία (σε λογαριθμική κλίμακα). ....	72
Σχήμα 3. 8 (a) Η διάμεσος καμπύλη IDA σε σύγκριση με την καμπύλη SPO για ένα 20-ώροφο μεταλλικό καμπτικό πλαίσιο με πλάστιμες συνδέσεις ( $T_1=4$ sec).....	74
Σχήμα 3. 9 (b) Η διάμεσος καμπύλη IDA σε σύγκριση με την καμπύλη SPO για ένα 5-ώροφο μεταλλικό πλαίσιο με συνδέσμους δυσκαμψίας ( $T_1=1.8$ sec). ....	75
Σχήμα 4. 1 Τομή του εξεταζόμενου κτιρίου κατά χ .....	79
Σχήμα 4. 2 Κάτοψη τυπικού ορόφου .....	80
Σχήμα 4. 3 Κάτοψη τυπικού ορόφου φορέα προσομοίωσης στο πρόγραμμα SeismoStruct. ....	82
Σχήμα 4. 4 Τρισδιάστατη προσομοίωση του υπό μελέτη φορέα στο πρόγραμμα SeismoStruct .....	82
Σχήμα 4. 5 Διγραμμικό μοντέλο χάλυβα.....	83
Σχήμα 4. 6 Μη γραμμικό μοντέλο περισφιγμένου σκυροδέματος .....	84
Σχήμα 4. 7 Διατομή τοιχώματος στο SeismoStruct.....	85
Σχήμα 4. 8 Τομές και οπλισμοί τοιχωμάτων .....	86
Σχήμα 4. 9 Διατομή δοκού στο πρόγραμμα SeismoStruct.....	87
Σχήμα 4. 10 Εισαγωγή χαρακτηριστικών τιμών φάσματος σχεδιασμού .....	90
Σχήμα 4. 11 Καμπύλη Ικανότητας του υπό εξέταση φορέα για ομοιόμορφο φορτίο. ....	92

---

---

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

---

---

Πίνακας 4. 1 Διαστάσεις τοιχωμάτων φορέα.....	85
Πίνακας 4. 2 Διαστάσεις δοκών φορέα .....	87
Πίνακας 4. 3 Σεισμική επιτάχυνση εδάφους : $A = a \cdot g$ ( $g$ : επιτάχυνση βαρύτητας) .....	88
Πίνακας 4. 4 Κατηγορίες σπουδαιότητας για κτίρια .....	89
Πίνακας 4. 5 Τιμές χαρακτηριστικών περιόδων και συντελεστή εδάφους για την οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης .....	89
Πίνακας 4. 6 HRC (Homogenised Reinforced Concrete ) -scale damage limit states .....	93

---

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

---

---



## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Στο *Κεφάλαιο 1* γίνεται συνοπτική περιγραφή των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των ισχυρών εδαφικών κινήσεων όπως αυτές εκδηλώνονται σε μικρή απόσταση από την σεισμική εστία. Αρχικά, παρουσιάζεται η έννοια του ρήγματος, περιγράφονται οι τρεις βασικοί μηχανισμοί διάρρηξης τους και αναφέρονται κάποιες παράμετροι της γεωμετρίας τους. Κατόπιν, αναλύεται ο τρόπος γένεσης των παλμών κατευθυντικότητας και η διαφοροποίηση της επιρροής του φαινομένου σε περιοχές με διαφορετικές σχετικές θέσεις ως προς την επιφάνεια του ρήγματος. Επίσης, περιγράφονται οι βασικές παράμετροι που σχετίζονται με το φαινόμενο της κατευθυντικότητας, όπως έχουν διατυπωθεί από ερευνητές που έχουν ασχοληθεί εκτεταμένα με τις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου και αποτελούν πλέον βιβλιογραφία για την κατανόηση και αντιμετώπιση του εν λόγω φαινομένου.

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται δύο μέθοδοι εκτίμησης του συχνοτικού περιεχομένου των παλμών κατευθυντικότητας. Η πρώτη μέθοδος εισήχθη από τον (Baker, 2007) και αφορά τον εντοπισμό των σημαντικών παλμών που εμπριέχονται στη χρονοϊστορία της ταχύτητας, καθώς και στην ταξινόμηση των καταγραφών σε παλμικές και μη. Το πρόβλημα προσεγγίζεται μέσω κυματικής ανάλυσης (*wavelet analysis*) για την εξαγωγή του μεγαλύτερου παλμού ταχύτητας από μια δεδομένη εδαφική κίνηση. Η δεύτερη μέθοδος που προτείνεται από τους (George P. Mavroeidis & Papageorgiou, 2003), αφορά την διαμόρφωση ενός σύνθετου κυματιδίου (*κυματίδιο M&P*) που εκφράζεται με μία απλή μαθηματική μορφή και επιτρέπει αφενός την ικανοποιητική προσέγγιση των παλμών σε σημαντικό αριθμό εδαφικών καταγραφών, και αφετέρου, την ανάπτυξη κλειστών λύσεων για την εκτίμηση φασμάτων αποκρίσεως και Fourier και επομένως, την παραμετρική εκτίμηση της απόκρισης κατασκευών σε παλμούς κοντινού πεδίου.

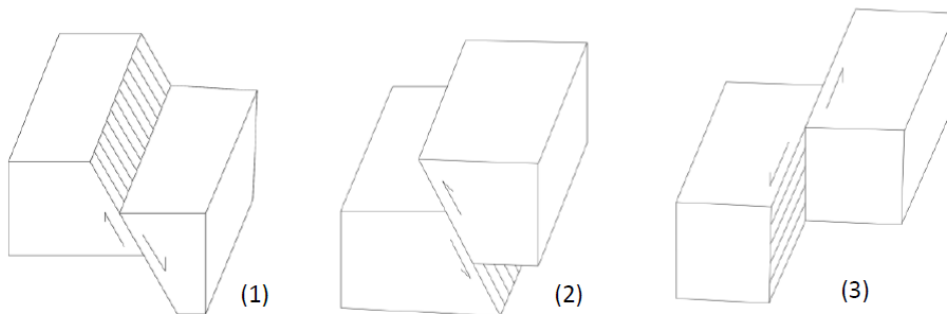
## 1.2 ΡΗΓΜΑΤΑ

---

Η θεωρία του (Reid, 1910) αποδίδει τη γένεση των επιφανειακών σεισμών στη συνεχή ελαστική παραμόρφωση των πετρωμάτων, λόγω συσσώρευσης μεγάλων ποσών δυναμικής ενέργειας, η οποία ονομάζεται 'ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης'. Όταν οι τάσεις αυτές υπερβούν την αντοχή του πετρώματος έχουμε θραύση και μετακίνηση των δύο τεμαχίων πάνω σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια και κατά συγκεκριμένη διεύθυνση. Ο χώρος στον οποίο γίνεται η συγκέντρωση των τάσεων λέγεται *σεισμογόνος χώρος* και η επιφάνεια ολίσθησης λέγεται *ρήγμα*. Οι ισχυρότεροι σεισμοί προέρχονται από συσσώρευση τάσεων γύρω από παλαιά ρήγματα και όχι από τη δημιουργία νέων.

### 1.2.1 Βασικοί τύποι διάρρηξης ρηγμάτων

Μία απλουστευμένη και συνήθως χρησιμοποιούμενη κατηγοριοποίηση των ρηγμάτων είναι αυτή που βασίζεται στην διεύθυνση και φορά της σχετικής κίνησης των τεμαχών κατά την διάρρηξη. Έτσι, διακρίνονται σε κανονικά ρήγματα, ανάστροφα ρήγματα και ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης.



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

Τα κανονικά και τα ανάστροφα ρήγματα, συχνά αναφέρονται στη βιβλιογραφία ενιαία ως ρήγματα κεκλιμένης ολίσθησης ή ρήγματα κατακόρυφης βύθισης (dip-slip faults).

Τα κανονικά (*normal faults*), είναι αυτά στα οποία το πάνω τέμαχος της κεκλιμένης ρηξιγενούς επιφάνειας κινείται προς τα κάτω, δηλαδή τα δύο τεμάχη απομακρύνονται το ένα από το άλλο. Τα ρήγματα αυτά είναι αποτέλεσμα εφελκυστικών δυνάμεων, συνδέονται επομένως με έκταση του γεωλογικού σχηματισμού και παρατηρούνται εκεί όπου η λιθόσφαιρα διευρύνεται. Το επίπεδο της ρηξιγενούς επιφάνειας έχει συνήθως μεγάλη κλίση (πάνω από  $45^\circ$ ), παρ' όλο δε που ονομάζονται 'κανονικά', δεν είναι τα πλέον συχνά συναντώμενα.

Τα ανάστροφα (*reverse faults*), είναι αυτά στα οποία συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο απ' ότι στα 'κανονικά', δηλαδή το άνω πάνω τέμαχος του ρήγματος κινείται προς τα πάνω, επομένως τα δύο τεμάχη πλησιάζουν το ένα στο άλλο και έχουμε σμίκρυνση του γεωλογικού σχηματισμού. Τα ανάστροφα ρήγματα συνδέονται με θλιπτικές δυνάμεις και μείωση του φλοιού, παρατηρούνται δε στα όρια σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών και της δημιουργίας των ορεινών όγκων, που συνοδεύονται από επωθήσεις και πτυχωσεις. Στη βιβλιογραφία γίνεται διαχωρισμός αυτού του τύπου ρηγμάτων, ανάλογα με την γωνία κλίσης του επιπέδου του ρήγματος. Έτσι, ανάστροφα θεωρούνται όσα έχουν κλίση μεγαλύτερη των  $45^\circ$ , ενώ αν η κλίση είναι μικρότερη των  $45^\circ$  χαρακτηρίζονται ως εφτυπεύσεις (*thrust faults*).

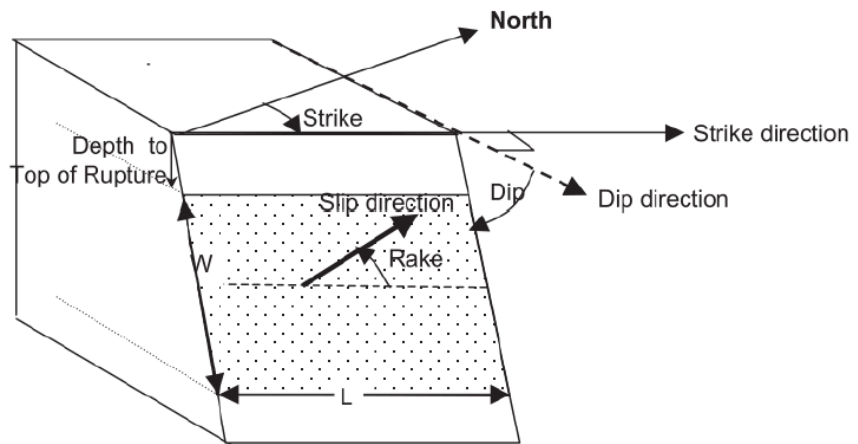
Τα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης (*strike-slip faults*), είναι αυτά στα οποία παρατηρείται οριζόντια μετατόπιση των τεμαχών επί της ρηξιγενούς επιφάνειας, χωρίς αύξηση ή μείωση του γεωλογικού σχηματισμού. Διακρίνονται σε δεξιόστροφα (*dextral strike-slip faults*) όταν η μία πλευρά του ρήγματος φαίνεται κινούμενη από αριστερά προς τα δεξιά, όταν παρατηρείται από την άλλη πλευρά του ρήγματος, και αριστερόστροφα (*sinistral strike-slip faults*) στα οποία η μία πλευρά του ρήγματος φαίνεται να κινείται από δεξιά προς τα αριστερά, όταν παρατηρείται από την άλλη πλευρά του ρήγματος. Τα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης

αποκτούν όλο και μεγαλύτερη σημασία, διότι φαίνεται να συνδέονται με πολλούς και καταστρεπτικούς σεισμούς

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

### 1.2.2 Χαρακτηριστικά ρήγματος

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



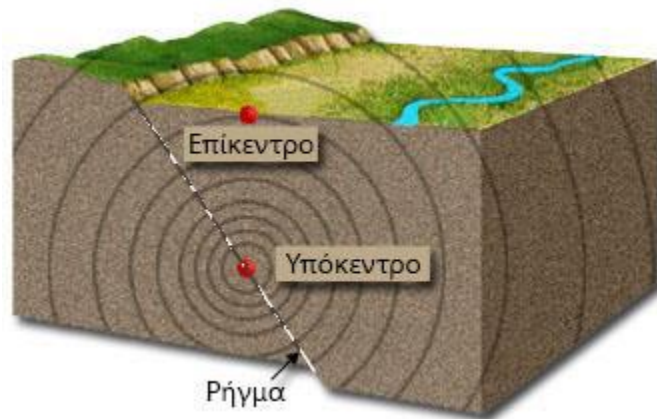
Σχήμα 1. 2 Γεωμετρικές παράμετροι ενός ρήγματος (NGA Database Documentation File)

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

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

Η διάρρηξη ξεκινά από ένα σημείο της επιφάνειας του ρήγματος που ονομάζεται *εστία του σεισμού*. Αν η εστία θεωρηθεί ως σημείο, αυτό ονομάζεται *υπόκεντρο* και η οριζόντια

προβολή του στην επιφάνεια της γης ονομάζεται *επίκεντρο*. Η κατακόρυφη απόσταση της εστίας από το επίκεντρο ονομάζεται *εστιακό βάθος*.



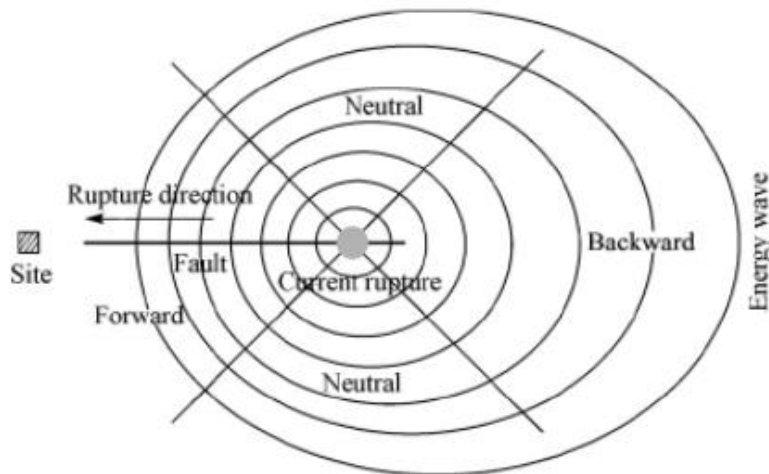
Σχήμα 1. 3 Επίκεντρο και υπόκεντρο ρήγματος

### 1.3 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Οι εδαφικές κινήσεις κοντά στην περιοχή της διάρρηξης ενός ρήγματος μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από τις αντίστοιχες κινήσεις που καταγράφονται μακριά από την περιοχή του ρήγματος. Συγκεκριμένα, η διάρρηξη επέρχεται όταν οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις ξεπεράσουν την φύσει και θέσει αντοχή ('θέσει' επειδή λόγω της τριαξονικής εντατικής κατάστασης η αντοχή του πετρώματος είναι γενικά μεγαλύτερη από την 'φύσει' αντοχή του) του πετρώματος στην περιοχή της σεισμικής εστίας. Η ρηγμάτωση που προκαλείται απαρτίζεται από μία σειρά μικρότερες διαρρήξεις (θραύση 'κλειδιών' κατά μήκος του ρήγματος) που μπορούν να θεωρηθούν σαν μία σειρά μικρών σεισμών με μεγάλη χωρική και χρονική εγγύτητα. Η περιοχή στην οποία επικεντρώνονται οι βλάβες κατά την διάρκεια ενός σεισμού είναι συνήθως συγκεντρωμένη γύρω από το ρήγμα και έχει διαστάσεις ανάλογες με την επιφάνεια ρηγμάτωσης. Η περιοχή αυτή ονομάζεται *κοντινό πεδίο* (*near fault area*) και κοντά της η εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται από το *φαινόμενο της κατευθυντικότητας* (*rupture directivity*). Θεωρητικά, η περιοχή αυτή βρίσκεται μέσα σε μια απόσταση 20-60 km από την περιοχή της επιφάνειας διάρρηξης, ανάλογα με το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος. Μέσα σε αυτήν την ζώνη κοντινού πεδίου, οι εδαφικές κινήσεις επηρεάζονται σημαντικά από το μηχανισμό διάρρηξης, την κατεύθυνση της διάδοσης της διάρρηξης σε σχέση με την εξεταζόμενη θέση και τις πιθανές μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις ως αποτέλεσμα της ολίσθησης του ρήγματος.

Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε *έμπροσθεν* (*forward*), *όπισθεν* (*backward*) και *ουδέτερη* (*neutral*) κατευθυντικότητα ανάλογα με την σχετική θέση της διεύθυνσης διάδοσης της διάρρηξης και της θέσης καταγραφής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4.



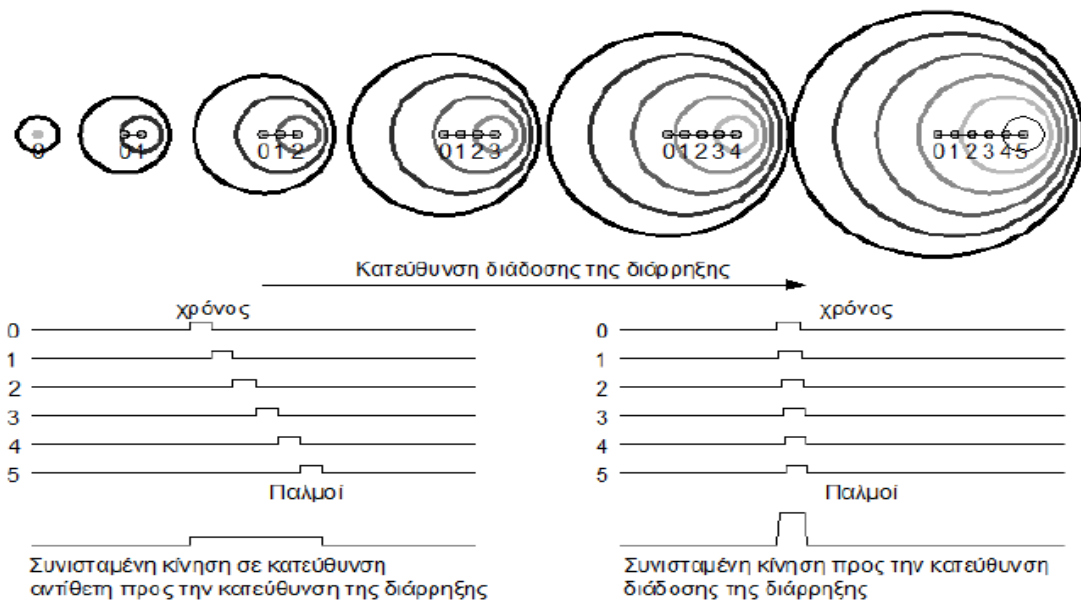


Σχήμα 1. 4 Διευθύνσεις ανάπτυξης των διαφορετικών τύπων κατευθυντικότητας

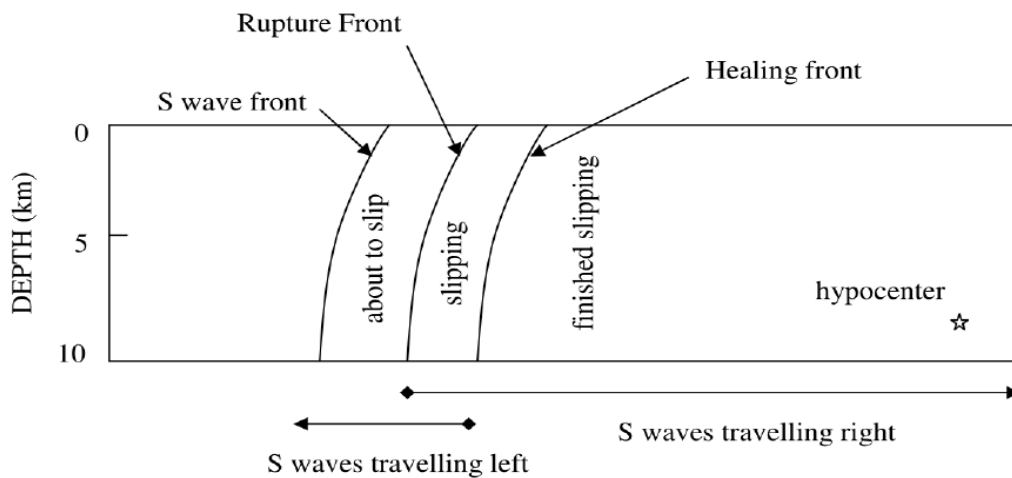
Η *έμπροσθεν κατευθυντικότητα (forward directivity)*, η οποία θεωρείται και η περισσότερο επικίνδυνη για τις κατασκευές εμφανίζεται όταν η διάρρηξη κατευθύνεται προς τη θέση καταγραφής. Όταν η ρηγματώση κατευθύνεται από το επίκεντρο του σεισμού προς μία θέση, παρουσιάζεται ένα φαινόμενο αντίστοιχο με το Doppler της ακουστικής που θεωρεί την διάρρηξη σαν ένα κινούμενο υπόκεντρο (Σχήμα 1.5). Όπως είδαμε, η διάρρηξη γίνεται σταδιακά σε επιμέρους περιοχές του ρήγματος. Κατά την διάρκεια κάθε τέτοιας διάρρηξης, παράγεται ένας παλμός ταχύτητας που διαδίδεται ως διατμητικό κύμα S. Επειδή η ταχύτητα διάδοσης της διάρρηξης είναι κοντά (γενικά λίγο μικρότερη) στην ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (κύματα S), καθώς η διάρρηξη πλησιάζει σε μια θέση οι παλμοί των επιμέρους διαρρήξεων προστίθενται και δημιουργούν έναν παλμό κίνησης μεγάλου εύρους σε μεσαίες και μεγάλες περιόδους και μικρής διάρκειας, όπως φαίνεται Σχήμα 1.5 (Benioff, 1955). Λόγω της πόλωσης των διατμητικών κυμάτων, η παλμική αυτή κίνηση είναι ιδιαίτερα έντονη στην κάθετη στο ίχνος του ρήγματος συνιστώσα της εδαφικής κίνησης. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.5 για έναν μηχανισμό οριζόντιας ολίσθησης, όπου το μέτωπο της διάρρηξης διαδίδεται μακριά από το υπόκεντρο προς μια θέση, η ενέργεια η οποία εκλύεται από τις διαδοχικές ολισθήσεις του ρήγματος, συσσωρεύεται κοντά στο μέτωπο της διάρρηξης.

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

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



Σχήμα 1. 5 Σχηματική απεικόνιση της συμβολής των παλμών των διατμητικών κυμάτων στην κατεύθυνση της διάρρηξης (έμπροσθεν κατευθυντικότητα) και της παράθεσης των παλμών στην αντίθετη κατεύθυνση (όπισθεν κατευθυντικότητα) (Benioff, 1955)

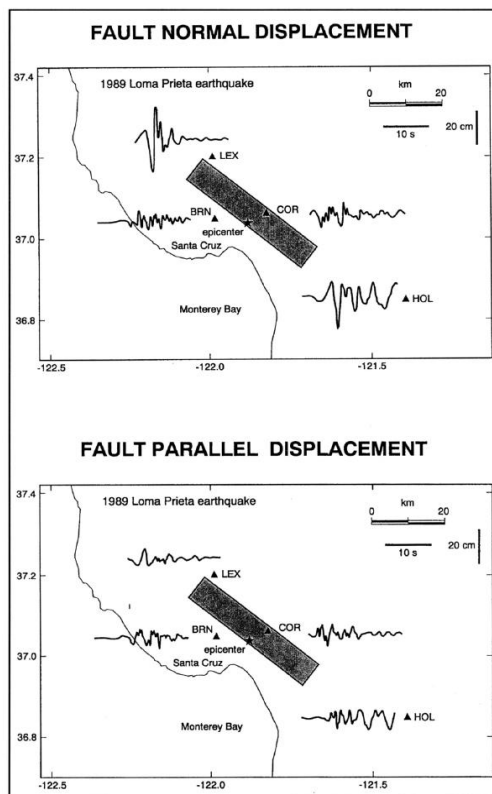


Σχήμα 1. 6 Σχηματικό διάγραμμα επίδρασης της κατευθυντικότητας της διάρρηξης για οριζόντιο ρήγμα ολίσθησης. Η διάρρηξη αρχίζει στο υπόκεντρο και διαδίδεται με ταχύτητα περίπου ίση με το 80% της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Η εικόνα παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο του μετώπου της ρήξης σε μία δεδομένη χρονική στιγμή (Somerville, Smith, Graves, & Abrahamson, 1997).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της επίδρασης του φαινομένου της κατευθυντικότητας στις εδαφικές μετακινήσεις, παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.7 και αφορά το σεισμό στο Loma Prieta (Santa Cruz Mountains) στην California το 1989. Στο επίκεντρο του σεισμού το οποίο είναι κοντά στο «Corralitos and Branciforte Drive», καταγράφονται μέτριες οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις τόσο στην παράλληλη (fault parallel), όσο και στην κάθετη (fault normal)

συνιστώσα του ρήγματος, το οποίο αποδίδεται στο φαινόμενο της όπισθεν κατευθυντικότητας. Όμως στα άκρα του ρήγματος, στο «Lexington Dam» και το «Hollister», λόγω της έμπροσθεν κατευθυντικότητας παρατηρούνται έντονες οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις στην κάθετη συνιστώσα του ρήγματος, ενώ στην παράλληλη με το ρήγμα συνιστώσα οι εδαφικές μετακινήσεις έχουν παρόμοιες τιμές με αυτές κοντά στο επίκεντρο. Οι μεγάλες παλμικές κινήσεις παρατηρούνται μόνο στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα και μόνο μακριά από το επίκεντρο.

Τα αποτελέσματα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης μπορούν να παρουσιαστούν τόσο σε περιπτώσεις οριζόντιας ολίσθησης (strike-slip) όσο και σε κατακόρυφης ολίσθησης/βύθισης (dip-slip). Στις περιπτώσεις κατακόρυφης βύθισης (dip-slip), οι συνθήκες εμπρόσθιας κατευθυντικότητας εμφανίζονται για περιοχές κοντά στην προβολή του υπερκειμένου τεμάχου του ρήγματος. Όπως και με μηχανισμούς οριζόντιας ολίσθησης, ο τρόπος εκπομπής ενέργειας λόγω διάτμησης σε ένα ανάστροφο ρήγμα (reverse fault) προκαλεί τον παλμό της κίνησης να είναι προσανατολισμένος κάθετα στο οριζόντιο ρήγμα (strike fault) (Somerville et al., 1997).

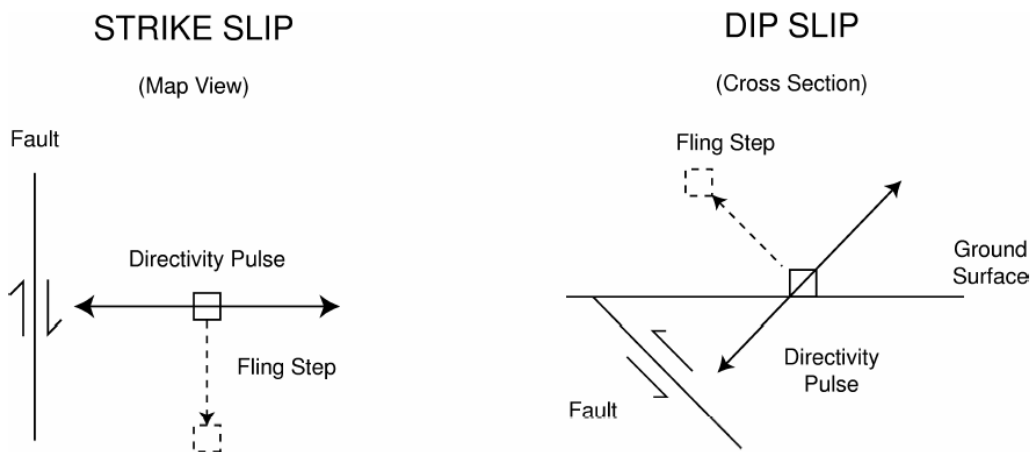


Σχήμα 1. 7 Αποτελέσματα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις καταγεγραμμένες ιστορίες μετακινήσεων του σεισμού του Loma Prieta του 1989 για τις κάθετες (άνω) και τις παράλληλες (κάτω) στο ρήγμα συνιστώσες, EERI, 1995

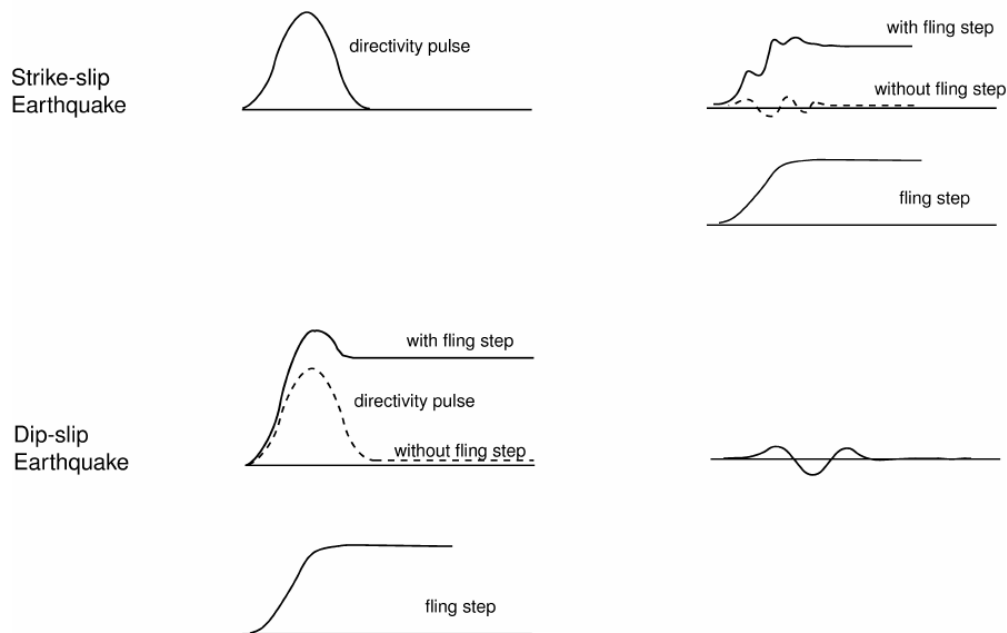
Οι σύγχρονες ψηφιακές καταγραφές των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου από τους σεισμούς της Τουρκίας και της Ταϊβάν το 1999, παρατηρήθηκε ότι εμπεριέχουν παραμένουσες μετακινήσεις λόγω της στατικής παραμόρφωσης του πεδίου του σεισμού. Αυτές οι στατικές μετατοπίσεις, που καλούνται παραμένουσες μετακινήσεις (*fling step*), εμφανίζονται μετά από ένα χρονικό διάστημα αρκετών δευτερολέπτων καθώς η ολίσθηση

του ρήγματος προχωρά. Οι παραμένουσες μετακινήσεις (fling step) εμφανίζονται παράλληλα στην διεύθυνση ολίσθησης του ρήγματος και επομένως δεν συνδέονται έντονα με τις προαναφερθείσες δυναμικές μετακινήσεις που αναφέρονται ως «παλμός κατευθυντικότητας της διάρρηξης». Στα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, ο παλμός κατευθυντικότητας εμφανίζεται εντονότερα στην κάθετη συνιστώσα προς την διάρρηξη, ενώ η παραμένουσα μετακίνηση εμφανίζεται στην παράλληλη συνιστώσα. Στα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης, τόσο η παραμένουσα μετακίνηση όσο και ο παλμός κατευθυντικότητας εμφανίζονται στην κάθετη συνιστώσα της διάρρηξης και συνεπώς θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως συνδυαζόμενες δράσεις που μπορούν να αυξήσουν την καταστροφική δυνατότητα των εδαφικών κινήσεων.

Οι προσανατολισμοί της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και κατακόρυφης βύθισης παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχήμα 1.8, ενώ χρονοϊστορίες στις οποίες αυτές εμφανίζονται μαζί και χωριστά παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.9.



Σχήμα 1. 8 Σχηματικό διάγραμμα των προσανατολισμών της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα κεκλιμένης ολίσθησης



Σχήμα 1. 9 Χρονοϊστορίες για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα κατακόρυφης βύθισης στο οποίο η παραμένουσα μετακίνηση και ο παλμός κατευθυντικότητας παρουσιάζονται μαζί και χωριστά

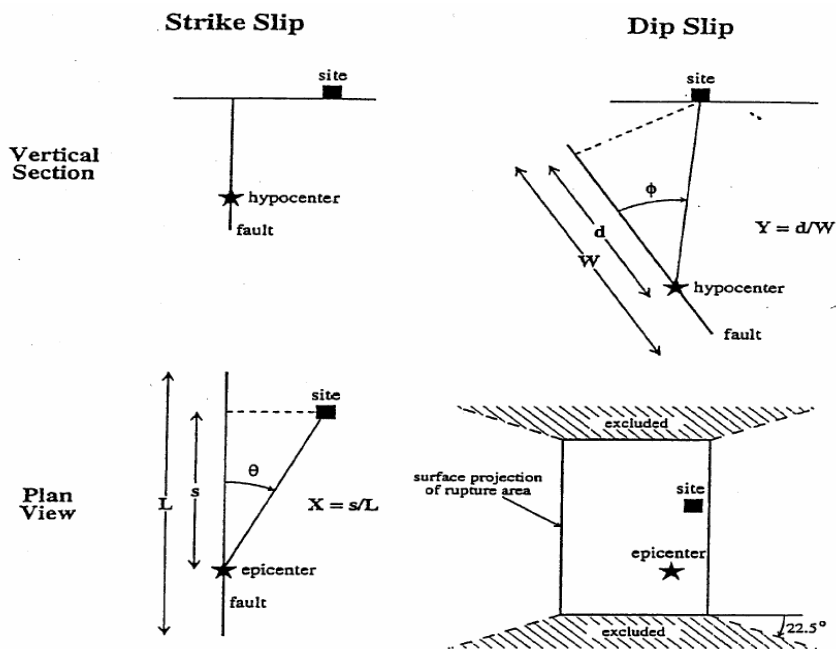
## 1.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

### 1.4.1 Η σχετική θέση ως προς το ρήγμα

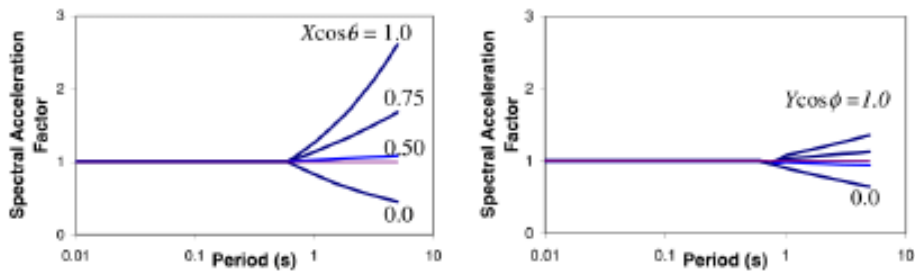
Οι (Somerville et al., 1997) βασιζόμενοι σε κατάλληλες παραμέτρους εδαφικής κίνησης, πρότειναν τροποποίηση των εμπειρικών σχέσεων εξασθένησης προκειμένου να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα της κατευθυντικότητας στο εύρος και στην διάρκεια. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.10, η διαφοροποίηση στο χώρο των αποτελεσμάτων της κατευθυντικότητας προτάθηκε να συναρτάται από *i)* τη γωνία μεταξύ της διεύθυνσης της διάδοσης της διάρρηξης και της διεύθυνσης των κυμάτων που ταξιδεύουν από το ρήγμα στην περιοχή ( $\theta$  για τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και  $\phi$  για τα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης) και *ii)* το λόγο του τμήματος της ρηγματώσης που βρίσκεται μεταξύ του υποκέντρου και της εξεταζόμενης περιοχής προς το συνολικό μήκος ρηγματώσης ( $X$  για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και  $Y$  για κατακόρυφης βύθισης). Τα φαινόμενα της εμπρόσθιας κατευθυντικότητας έχουν μεγαλύτερη επίδραση όταν προκύπτουν μικρές γωνίες μεταξύ της εξεταζόμενης περιοχής και του ρήματος, και για μεγαλύτερους λόγους του διερρηγμένου ρήματος μεταξύ της θέσης και υποκέντρου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, ακόμα κι όταν ικανοποιούνται οι γεωμετρικές προϋποθέσεις για εμφάνιση της εμπροσθεν κατευθυντικότητας, οι επιπτώσεις της μπορεί να μην εμφανιστούν. Αυτό θα μπορούσε να συμβεί, εάν ένας καταγραφικός σταθμός βρίσκεται στο άκρο ενός ρήματος και η διάρρηξη κατευθύνεται προς το σταθμό, αλλά η ολίσθηση συγκεντρωθεί κοντά στο άκρο του ρήματος όπου και βρίσκεται ο σταθμός.

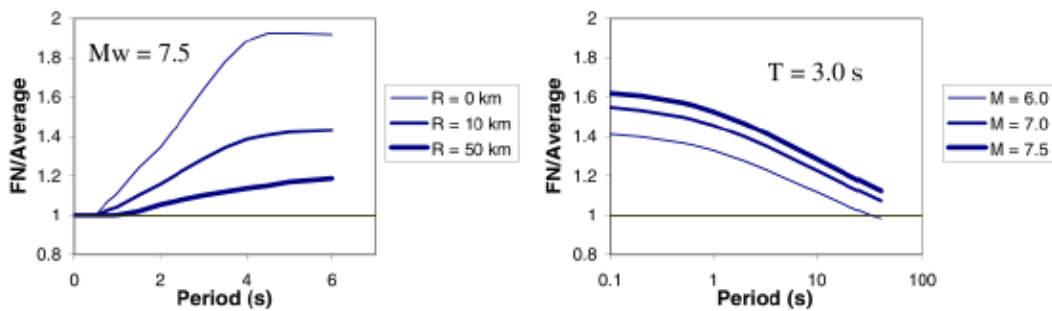
Εν συνεχεία, για να εξηγήσουν τα αποτελέσματα της κατευθυντικότητας, οι (Somerville et al 1997) συσχέτισαν τις φασματικές τιμές για απόσβεση 5% με τις γεωμετρικές παραμέτρους που καθορίζονται στο Σχήμα 1.10 και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 1.11. Από το Σχήμα 1.11(α) οι καταγραφές που έχουν επηρεαστεί από το φαινόμενο της έμπροσθεν κατευθυντικότητας παρουσιάζουν ενίσχυση των φασματικών τιμών στην περιοχή μεσαίων και μεγάλων περιόδων. Η αύξηση αυτή είναι εντονότερη όσο μεγαλύτερο το τμήμα της ρηγμάτωσης ανάμεσα στο υπόκεντρο και την υπό εξέταση θέση, λόγω της συσσωρευμένης ενέργειας από τις επιμέρους διαρρήξεις. Αντίθετα, όσο μεγαλύτερη είναι η προαναφερθείσα γωνία, όσο δηλαδή απομακρύνεται η θέση από την ρηγμάτωση τόσο μειώνεται η φασματική επαύξηση λόγω κατευθυντικότητας. Επίσης, από το Σχήμα 1.11(β) παρατηρούμε ότι η επιρροή των φαινομένων κατευθυντικότητας αυξάνει σημαντικά με τη μείωση της απόστασης ενώ μειώνεται με τη μείωση του μεγέθους του σεισμού. Όπως όμως αναφέρουν και οι (Bray & Rodriguez-Marek, 2004), (Li & Zhu, 2004b) και (Shuang, 2007) το φαινόμενο της κατευθυντικότητας δεν εμφανίζεται μόνο στους μεγάλους και μεσαίους σεισμούς. Αυτοί οι σεισμοί οι οποίοι παράγουν μικρότερες περιόδους παλμού μπορεί να δημιουργούν εδαφικές κινήσεις μεγαλύτερων απαιτήσεων για άκαμπτες κατασκευές.



Σχήμα 1. 10 Παράμετροι που σχετίζονται με την διάρρηξη και καθορίζουν το εύρος στο φαινόμενο της πρόσω κατευθυντικότητας (Somerville et al, 1997)



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



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

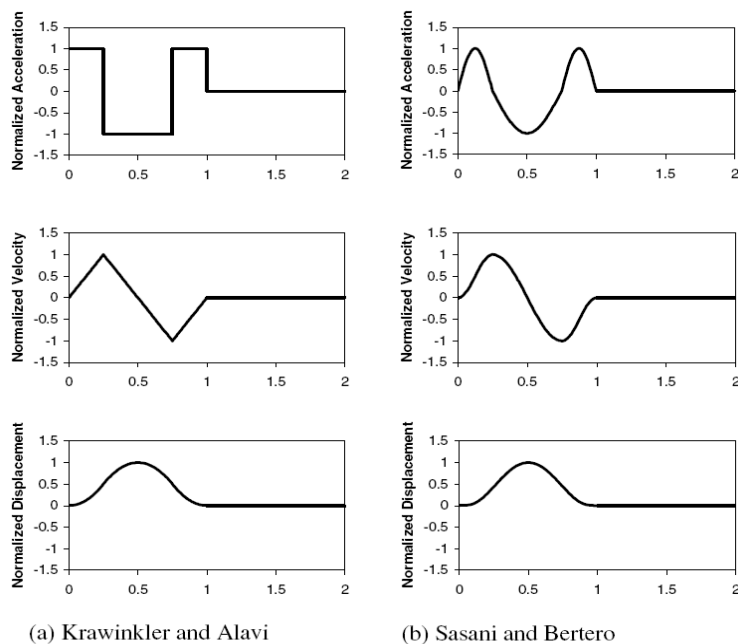
Σχήμα 1. 11 Επίπτωση των παραμέτρων της διάρρηξης στην φασματική μεγέθυνση σε σχέση με συνθήκες καταγραφές (Somerville et al, 1997)

### 1.4.2 Εμφάνιση παλμού στη χρονοϊστορία ταχύτητας

Έρευνες πάνω στην απόκριση των κατασκευών σε κινήσεις κοντινού πεδίου έχουν δείξει ότι μια απεικόνιση των κινήσεων βάσει χρονοϊστορίας είναι προτιμότερη από μια απεικόνιση βάσει του φάσματος απόκρισης (π.χ. (Somerville, 1998), (Alavi & Krawinkler, 2000), (Sasani & Bertero, 2000), (Rodriguez-Marek, 2000)). Μια απεικόνιση βάσει χρονοϊστορίας είναι προτιμητέα, επειδή ο χαρακτηρισμός στο πεδίο συχνοτήτων της εδαφικής κίνησης (δηλαδή μέσω ενός φάσματος απόκρισης) υποδηλώνει μια στοχαστική διαδικασία που έχει μια σχετικά ομοιόμορφη διανομή της ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης. Όταν η ενέργεια συγκεντρώνεται σε λίγους παλμούς κίνησης, το φαινόμενο του «συντονισμού», το οποίο το φάσμα απόκρισης ανέλαβε να παρουσιάσει, μπορεί να μη διαθέτει επαρκή χρόνο να αναπτυχθεί (Somerville, 1998).

Μελέτες από τους (Krawinkler & Alavi, 1998) και (Sasani & Bertero, 2000) υποστήριξαν ότι η απόκριση των κατασκευών σε εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου μπορεί εύκολα να προσεγγισθεί με απλοποιημένες μορφές των παλμών που εντοπίζονται στη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας (Σχήμα 1.12). Οι παράμετροι που καθορίζουν τους παλμούς είναι ο αριθμός των ημίκυκλων (*halfcycles*) που ισοδυναμούν με τους παλμούς της εδαφικής κίνησης,

η δεσπόζουσα περίοδος που αντιστοιχεί στην διάρκεια κάθε ημίκυκλου και το αντίστοιχο εύρος. Επομένως, σύμφωνα με τους μελετητές, η περιγραφή της εδαφικής κίνησης ανάγεται στην εκτίμηση της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας  $PGV$ , της δεσπόζουσας περιόδου του παλμού  $T_p$  και του αριθμού των σημαντικών ημίκυκλων  $N$  της κίνησης του εδάφους στη (μεγαλύτερη) κάθετη διεύθυνση στο ρήγμα.



Σχήμα 1. 12 Απλοποιημένες μορφές παλμών κατευθυντικότητας

### 1.4.3 Εξαγωγή και μαθηματική αναπαράσταση του παλμού

Το πλέον σημαντικό χαρακτηριστικό των εδαφικών καταγραφών κοντινού πεδίου μπορεί να θεωρηθεί ο περιορισμένος αριθμός ευκρινών παλμών, που η άφιξή τους συμπίπτει, στην αρχή της καταγραφής, με την άφιξη των διατμητικών κυμάτων. Για τον προσδιορισμό των κύριων χαρακτηριστικών τους, πολλοί ερευνητές έχουν παρουσιάσει διαφορετικές μεθόδους προσομοίωσης και εξαγωγής του σημαντικού παλμού, κυρίως χρησιμοποιώντας κυματική ανάλυση.

Μία σημαντική προσπάθεια προσομοίωσης εδαφικών κινήσεων με παλμό κατευθυντικότητας δίνεται από τους (George P. Manroeidis & Parageorgiou, 2003) με την χρήση κυματομορφών (wavelets). Η μέθοδος αυτή θα περιγραφεί αναλυτικά παρακάτω στο παρόν κεφάλαιο και υιοθετείται από τη διαδικασία των (Mimoglou et al., 2014), που τελικώς εφαρμόζεται για την επεξεργασία των σεισμικών καταγραφών στην εργασία αυτή.

Βασιζόμενοι στον αριθμό των παλμών της εδαφικής ταχύτητας, οι (Makris & Black, 2004), ταξινομούν τις καταγραφές κοντινού πεδίου σε τρεις κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία η εδαφική ταχύτητα χαρακτηρίζεται από ένα καθαρό παλμό και ορίζεται σαν τύπος παλμού A



(Σχήμα 1.13). Οι προσομοιωμένες χρονοϊστορίες της εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$\ddot{u}_g^A(t) = \omega_p \frac{u_p}{2} \sin(\omega_p t) \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (1.1)$$

$$\dot{u}_g^A(t) = \frac{u_p}{2} - \frac{u_p}{2} \cos(\omega_p t) \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (1.2)$$

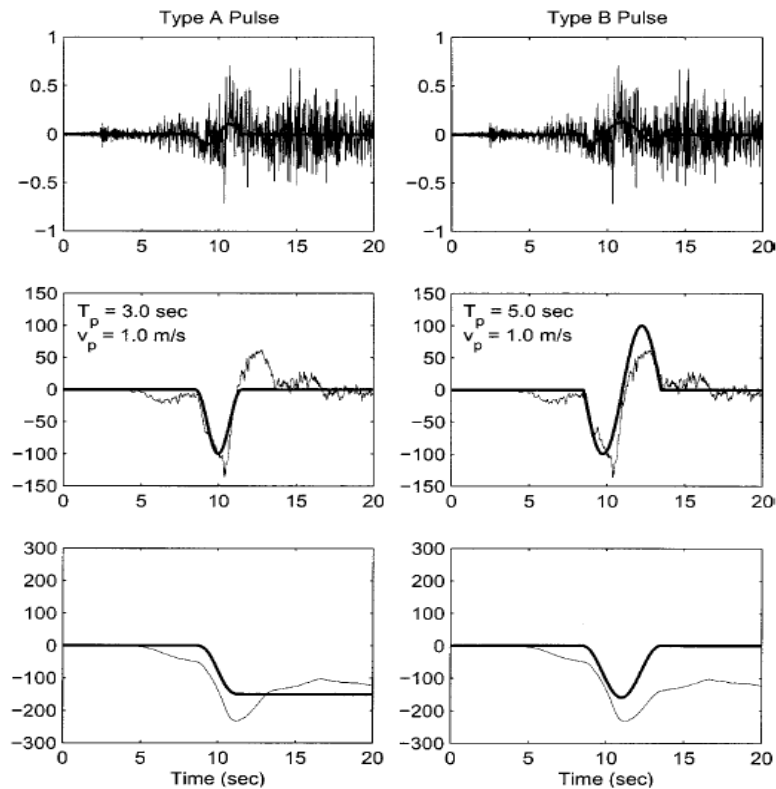
$$u_g^A(t) = \frac{u_p}{2} t - \frac{u_p}{2\omega_p} \sin(\omega_p t) \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (1.3)$$

Όταν η ταχύτητα χαρακτηρίζεται από δύο παλμούς ορίζεται σαν τύπος Β και οι χρονοϊστορίες της δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\ddot{u}_g^B(t) = \omega_p u_p \cos(\omega_p t) \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (1.4)$$

$$\dot{u}_g^B(t) = u_p \sin(\omega_p t) \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (1.5)$$

$$u_g^B(t) = \frac{u_p}{\omega_p} - \frac{u_p}{\omega_p} \cos(\omega_p t) \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (1.6)$$



Σχήμα 1. 13 Απλοποιημένοι παλμοί των (Makris & Black, 2004)

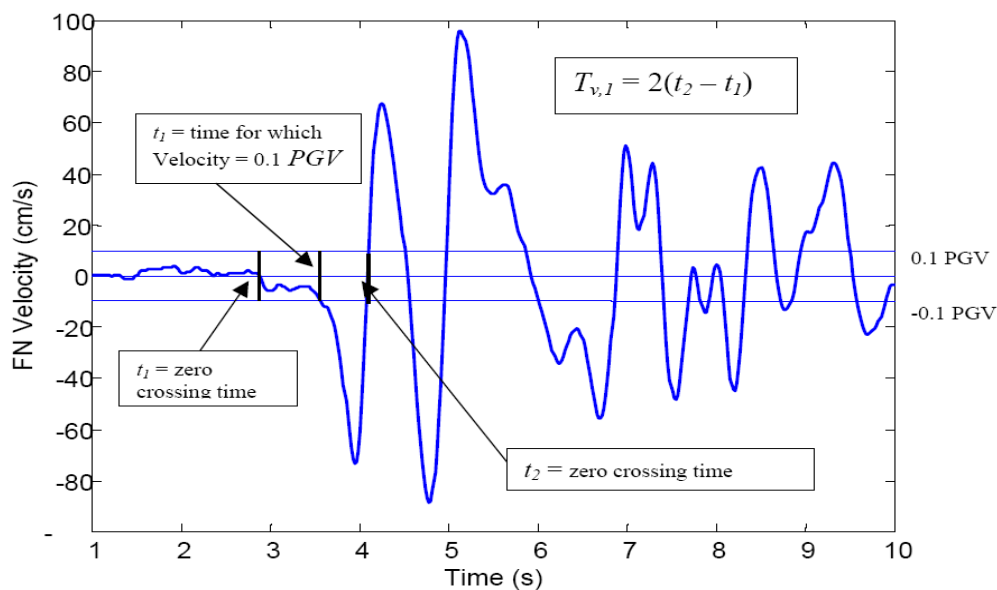
Τέλος στην περίπτωση που η εδαφική ταχύτητα διακρίνεται από τρεις ή περισσότερους παλμούς η καταγραφή χαρακτηρίζεται σαν τύπος C και οι χρονοϊστορίες ορίζονται με ανάλογο τρόπο.

## 1.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ

Η πλέον κρίσιμη παράμετρος του υπό μελέτη φαινομένου, είναι η περίοδος των παλμών κατευθυντικότητας της εδαφικής κίνησης (George P. Manroeidis & Parageorgiou, 2003). Μια συχνή τακτική προσδιορισμού της περιόδου του δεσπόζοντος παλμού  $T_p$ , βασίζεται στην παραδοχή ότι η περίοδος του παλμού προκύπτει από την αιχμή του φάσματος απόκρισης της ταχύτητας για απόσβεση 5% (Alavi & Krawinkler, 2000), μια μέθοδος που έχει αμφισβητηθεί από αρκετούς ερευνητές ((Baker, 2007), (Rodriguez-Marek, 2000)).

Μια διαφορετική μέθοδος έχει προταθεί από τους (Zhai, Chang, Li, & Xie, 2013), η οποία καλείται *The Peak Method* (Μέθοδος του Σημείου Αιχμής), σύμφωνα με την οποία η περίοδος του παλμού είναι ίση με το χρονικό διάστημα στο οποίο ολοκληρώνεται εκείνος ο κύκλος της καταγραφής που περιέχει τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα  $PGV$ , ανεξαρτήτως του αν αυτή έχει θετική ή αρνητική τιμή, δηλαδή αν ο κύκλος έχει τη μορφή όρους ή κοιλάδας.

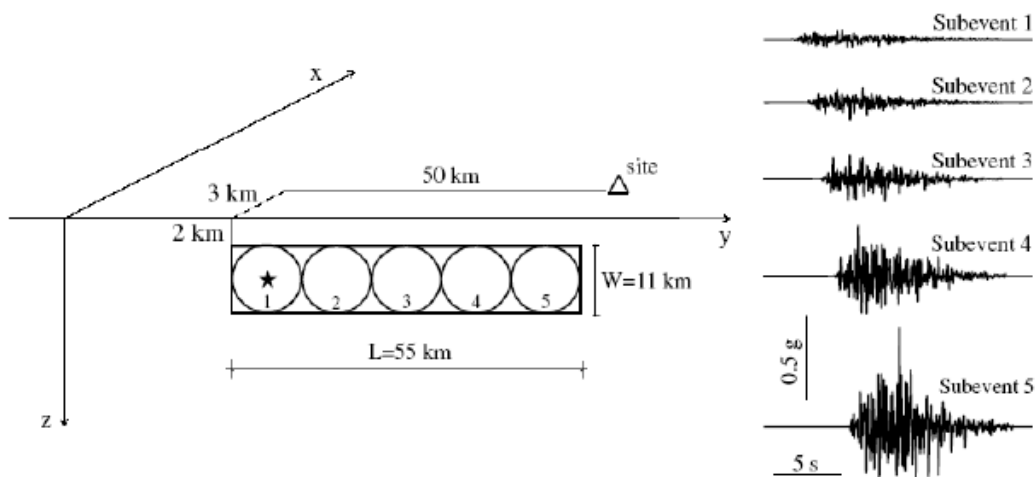
Κάποιοι μελετητές όπως οι (Makris & Black, 2004), επιλέγουν ως παλμό κατευθυντικότητας το μέγιστο παλμό εδαφικής επιτάχυνσης, ενώ άλλοι όπως ο (Rodriguez-Marek, 2000), τον παλμό που αντιστοιχεί στην μέγιστη εδαφική ταχύτητα. Σύμφωνα με τον τελευταίο, η δεσπόζουσα περίοδος καθορίζεται από τη διάρκεια του παλμού. Από τη χρονοϊστορία της ταχύτητας, βάσει των σημείων στα οποία υπάρχει διάβαση του μηδενικού άξονα ή των σημείων στα οποία το εύρος της ταχύτητας αποκτά τιμή ίση με το 10% της μέγιστης ταχύτητας του παλμού προσδιορίζεται η διάρκειά του (Σχήμα 1.14). Η δεύτερη προσέγγιση γίνεται προκειμένου να αποφευχθεί ενδεχόμενο σφάλμα στην περίπτωση που υπάρχει μικρή κατακόρυφη μετάθεση (*drift*) του σήματος. Η περίοδος του παλμού  $T_p$  δίνεται από την σχέση:  $T_p = 2(t_2 - t_1)$ , όπου  $t_2, t_1$  τα χρονικά όρια του παλμού.



Σχήμα 1.14 Καθορισμός περιόδου παλμού από την χρονοϊστορία της ταχύτητας (Rodriguez-Marek, 2000)

Από την διερεύνηση των (George P. Mavroeidis & Papageorgiou, 2003), όπως ήδη αναφέρθηκε, προκύπτει ότι η πλέον κρίσιμη παράμετρος για τον προσδιορισμό της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου, είναι η περίοδος  $T_p$ , που σχετίζεται με την διάρκεια του παλμού κατευθυντικότητας. Η παράμετρος αυτή είναι άμεσα εξαρτημένη από την διαδικασία διάρρηξης και συγκεκριμένα από την διάρκεια διάρρηξης (rise time)  $\tau$ . Η διάρκεια διάρρηξης σχετίζεται με τα επιμέρους γεγονότα που απαρτίζουν το κύριο σεισμικό γεγονός. Το συνοριακό μοντέλο (specific barrier model) που προτείνεται από τους (Papageorgiou & Aki, 1983), θεωρεί ότι τα επιμέρους σεισμικά γεγονότα προκαλούνται από προσεγγιστικά ισομεγέθεις κυκλικές επιφάνειες διάρρηξης που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στην επιφάνεια ενός ρήγματος (Σχήμα 1.15). Οι επιφάνειες αυτές έχουν μια μέση διάμετρο  $2\rho_0$  που σχετίζεται με το μέγεθος σεισμικής ροπής  $M_w$  του σεισμικού γεγονότος. Η εμπειρική σχέση που προκύπτει δίνεται με την μορφή:

$$\log(2\rho_0) = -2.6 + 0.5M_w \quad (1.7)$$



Σχήμα 1. 15 Συνοριακό μοντέλο Papageorgiou and Aki (George P. Mavroeidis & Papageorgiou, 2003)

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:

$$\frac{\rho_0}{V_r} \leq \tau \leq \frac{2\rho_0}{V_r} \quad (1.8)$$

Επιπλέον δίνεται μία σχέση εκτίμησης της περιόδου του παλμού κατευθυντικότητας συναρτήσεως του μεγέθους  $M_w$ , που προκύπτει από την σύμφωνη με τα δεδομένα κοντινού πεδίου παραδοχή, ότι η περίοδος είναι ανεξάρτητη από την απόσταση της θέσης καταγραφής από το ρήγμα. Η σχέση δίνεται με την μορφή:

$$\log T_p = -2.9 + 0.5M_w \quad (1.9)$$

Από τις σχέσεις 1.7 και 1.9 που ορίζουν τα μεγέθη  $2\rho_0$  και  $T_p$  προκύπτει ότι:

$$\log\left(\frac{2\rho_0}{T_p}\right) \approx 0.3 \Rightarrow \rho_0 \approx T_p \quad (1.10)$$

όπου οι παράμετροι  $\rho_0$  και  $T_p$  είναι εκφρασμένες σε χιλιόμετρα και sec αντίστοιχα.

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

$$0.35T_p \leq \tau \leq 0.70T_p \quad (1.11)$$

και κατ'επέκταση:

$$\tau \approx 0.5T_p \quad (1.12)$$

Σαν συνέπεια της παραδοχής ότι η περίοδος του παλμού  $T_p$  είναι ανεξάρτητη της απόστασης από την ρηγμάτωση, έχουν προταθεί διάφορες σχέσεις που συνδέουν το μέγεθος του σεισμού με την περίοδο του παλμού της ταχύτητας. Ο (Somerville, 1998) προτείνει για τον υπολογισμό της περιόδου του παλμού κατευθυντικότητας μία σχέση παρεμφερή με την προαναφερθείσα που έχει την μορφή:

$$\log(T_p) = -3.0 + 0.5M_w \quad (1.13)$$

Οι (Alavi & Krawinkler, 2000) όρισαν, με την χρήση των ιδίων δεδομένων, την περίοδο του παλμού σαν την δεσπίζουσα περίοδο του φάσματος ψευδοταχυτήτων  $T_{p-v}$  που την εκτιμούν από την παρακάτω σχέση:

$$\log(T_{p-v}) = -1.76 + 0.31M_w \quad (1.14)$$

Είναι χαρακτηριστικό ότι η σχέση των (Alavi & Krawinkler, 2000) παρουσιάζει σαφώς μικρότερες τιμές από αυτές της σχέσης του (Somerville, 1998) και η απόκλιση των δύο σχέσεων αυξάνει με την αύξηση του μεγέθους σεισμικής ροπής  $M_w$ . Παρά τις σημαντικές αποκλίσεις που παρουσιάζονται μεταξύ των δύο σχέσεων, ειδικά για την περίπτωση μεγάλων σεισμικών μεγεθών, η προτεινόμενη παραδοχή για την ισότητα των δύο περιόδων  $T_p$  και  $T_{p-v}$  παραμένει ιδιαίτερα διαδεδομένη.

Δεδομένων των προτεινόμενων διαφορετικών ορισμών, στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει ιδιαίτερη διερεύνηση σε ότι αφορά το κομβικό θέμα της περιόδου των παλμών της εδαφικής κίνησης, προκειμένου να διαλευκανθούν ασαφή σημεία σχετικά με τον προσδιορισμό της και να προταθεί μια αξιόπιστη μέθοδος εκτίμησης.

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.

Ο (Rodriguez-Marek, 2000) διατυπώνει για την εκτίμηση της περιόδου του παλμού της ταχύτητας μία σειρά από σχέσεις ανάλογες με αυτές των (Somerville, 1998) και (Alavi & Krawinkler, 2000), στηριζόμενος σε μία σειρά από σεισμικά γεγονότα, που το καθένα περιλαμβάνεται στο εξεταζόμενο δείγμα με διαφορετικό αριθμό καταγραφών που μπορεί να κυμαίνονται από μία έως δεκατρείς, όπως στην περίπτωση του Imperial Valley. Προκειμένου να αποφευχθεί η εξάρτηση των αποτελεσμάτων από τα σεισμικά γεγονότα που παρουσιάζουν μεγάλο αριθμό καταγραφών, το τυπικό σφάλμα που σχετίζεται με κάθε σημείο του δείγματος διαχωρίζεται σε δύο όρους, σε έναν όρο που αφορά στην διασπορά μεταξύ διαφορετικών γεγονότων και σε έναν όρο που αφορά στην διασπορά μεταξύ των καταγραφών του ίδιου γεγονότος. Έτσι η γενική σχέση για την εκτίμηση της περιόδου του παλμού αποκτά την μορφή:

$$\ln(T_{v})_{ij} = a + bM_w + n_i + \varepsilon_{ij} \quad (1.15)$$

όπου  $T_{v_{ij}}$  είναι η περίοδος που αντιστοιχεί στον παλμό της ταχύτητας για την  $j$ -οστή καταγραφή του  $i$ -οστού γεγονότος,  $a$  και  $b$  οι παράμετροι της σχέσης,  $n_i$  το σφάλμα που σχετίζεται με την απόκλιση μεταξύ καταγραφών του ίδιου γεγονότος και  $\varepsilon_{ij}$  το σφάλμα που σχετίζεται με την απόκλιση μεταξύ γεγονότων. Οι δύο όροι σφάλματος μπορούν να θεωρηθούν τυχαίες μεταβλητές με διασπορές  $\tau^2$  και  $\sigma^2$  αντίστοιχα. Η συνολική διασπορά που σχετίζεται με την εκτίμηση της περιόδου  $T_{v_{ij}}$  δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_{total}^2 = \tau^2 + \sigma^2 \quad (1.16)$$

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

$$\ln T_p = -8.33 + 1.33M_w \quad \text{για όλες τις κατηγορίες εδαφών} \quad (1.17)$$

$$\ln T_p = -11.10 + 1.70M_w \quad \text{για βράχο} \quad (1.18)$$

$$\ln T_p = -5.81 + 0.97M_w \quad \text{για μαλακό έδαφος} \quad (1.19)$$

$$\ln T_p = -6.92 + 1.08M_w \quad \text{για όλες τις κατηγορίες εδαφών} \quad (1.20)$$

$$\ln T_p = -9.53 + 1.42M_w \quad \text{για βράχο} \quad (1.21)$$

$$\ln T_p = -5.66 + 0.91M_w \quad \text{για μαλακό έδαφος} \quad (1.22)$$

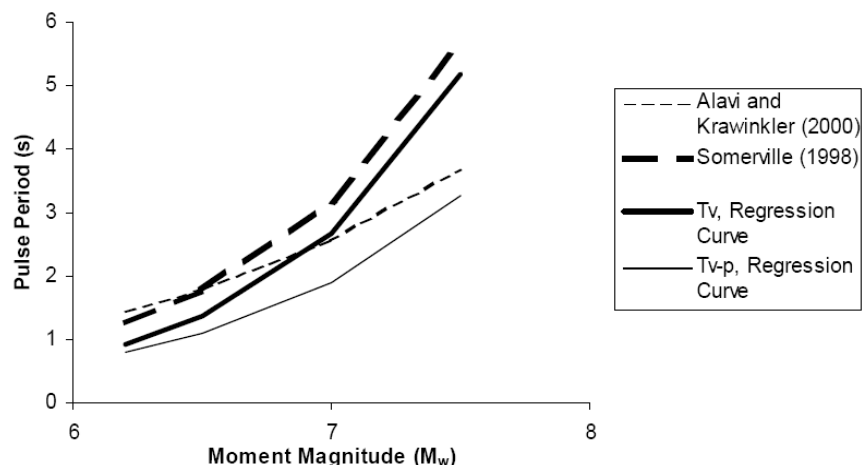
Χαρακτηριστικό στοιχείο για την ορθότητα επιλογής της περιόδου του παλμού κατευθυντικότητας είναι ότι οι σχέσεις εκτίμησης της δεσπόζουσας περιόδου του φάσματος ταχυτήτων  $T_{p-v}$  δίνουν σαφώς χαμηλότερες τιμές από τις σχέσεις υπολογισμού της περιόδου

του παλμού  $T_p$ . Η διαφοροποίηση αυτή αυξάνεται όσο μεγαλώνουν τα αντίστοιχα σεισμικά μεγέθη (Σχήμα 1.16).

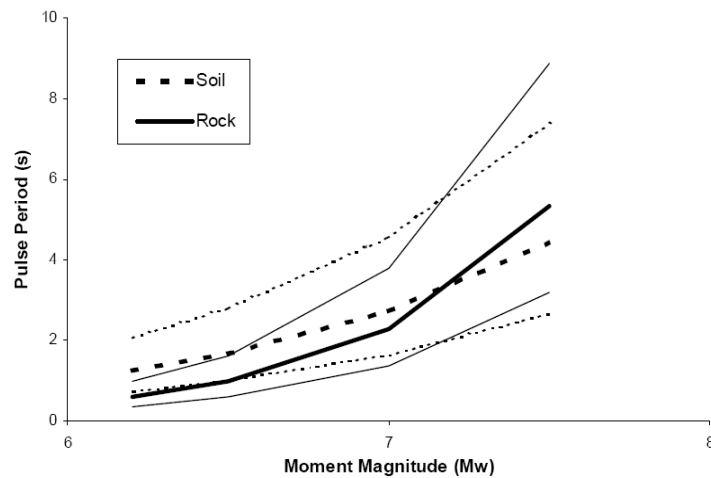
Οι τιμές των παραμέτρων των σχέσεων έχουν υπολογισθεί για μεγέθη σεισμών που κυμαίνονται από 6.1 έως 7.4. Καταγραφές για μεγαλύτερα μεγέθη σπανίζουν γι' αυτό τον λόγο η χρήση κάθε σχέσης, πέραν της οριζόμενης περιοχής, πρέπει να γίνεται με επιφύλαξη. Οι καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν βρίσκονται σε θέσεις που απέχουν λιγότερο από 20 km από το επίπεδο του ρήγματος, που είναι και η μεγαλύτερη απόσταση για την διατύπωση προβλέψεων μέσω της προτεινόμενης σχέσης. Η σύγκριση της σχέσης του (Rodriguez-Marek, 2000) για την περίοδο  $T_p$  με αυτήν που προτείνει ο (Somerville, 1998) δίνει παρεμφερή αποτελέσματα, με την διαφορά ότι για μικρές περιόδους η πρώτη σχέση παρουσιάζει μικρότερες εκτιμώμενες τιμές περιόδου.

Με βάση τα ίδια σεισμικά γεγονότα καταστρώθηκε από τον Rodriguez-Marek μία σχέση για την εκτίμηση της περιόδου  $T_{v-p}$  που αντιστοιχεί στην περίοδο της μέγιστης φασματικής ταχύτητας και έγινε σύγκριση με την ανάλογη σχέση που προτείνουν οι (Alavi & Krawinkler, 2000). Και στην περίπτωση αυτή διαπιστώθηκε σύγκλιση των αποτελεσμάτων, με μικρότερες τιμές στην περιοχή μικρών σεισμικών μεγεθών για την σχέση του (Rodriguez-Marek, 2000). Οι μικρές περίοδοι που εκτιμώνται για τα μικρότερα σεισμικά μεγέθη οδηγούν στο συμπέρασμα 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.

Μία περαιτέρω παρατήρηση σχετίζεται με την διαφοροποίηση της περιόδου του παλμού ανάλογα με το έδαφος στην θέση καταγραφής. Από την απεικόνιση των γραφικών παραστάσεων των αντιστοιχών σχέσεων παρατηρούμε ότι για μεγάλα σεισμικά μεγέθη η διαφοροποίηση στην εκτίμηση της περιόδου του παλμού μεταξύ καταγραφών σε βράχο και σε μαλακό έδαφος δεν είναι σημαντική και παραμένει σαφώς μικρότερη της τυπικής απόκλισης της προτεινόμενης σχέσης. Αντίθετα στην περίπτωση μικρών σεισμικών μεγεθών η διαφορά είναι σημαντική και συγκρίσιμη με την τιμή της τυπικής απόκλισης (Σχήμα 1.17).



Σχήμα 1. 16 Σχέσεις υπολογισμού παλμού κατευθυντικότητας (Rodríguez-Marek, 2000)



Σχήμα 1. 17 Σχέσεις υπολογισμού παλμού κατευθυντικότητας για διαφορετικές κατηγορίες εδάφους (Rodríguez-Marek, 2000)

Τέλος, η περίοδος του δεσπόζοντος παλμού σύμφωνα με τους (Mimoglou et al., 2014) προκύπτει από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος συνέλιξης (*convolution spectrum* ή *product spectrum*)  $S_{d,5} \times S_{v,5}$ , όπου  $S_{d,5}$  είναι το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης και  $S_{v,5}$  το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας για απόσβεση 5%. Η συγκεκριμένη μέθοδος περιγράφεται αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας.

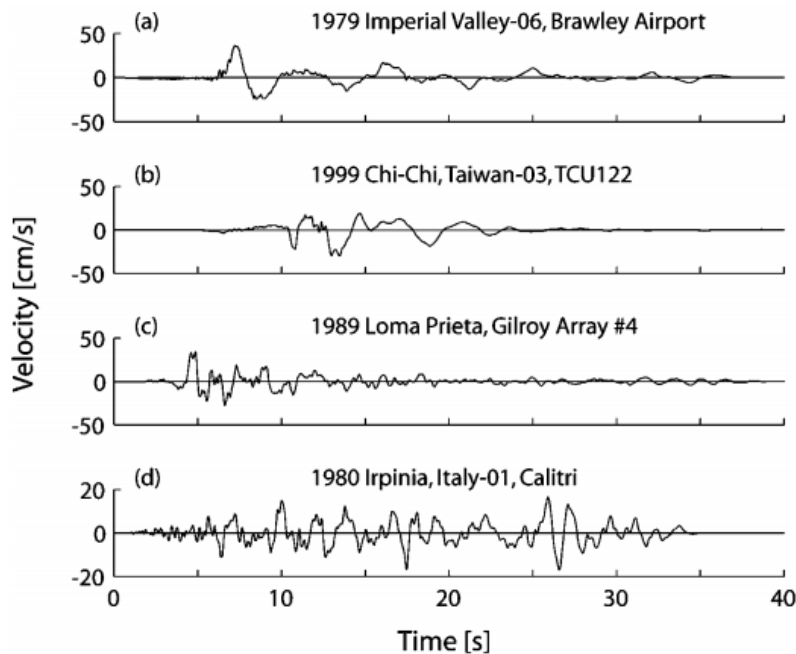
## 1.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ ΠΑΛΜΩΝ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Σύμφωνα με τις ανωτέρω προτεινόμενες σχέσεις προκύπτουν 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.

### 1.6.1 Μέθοδος κυματιδίων κατά Baker

Στην δεύτερη κατηγορία που αναφέρθηκε, ανήκει μία πρόσφατη σημαντική μέθοδος που προτείνεται από τον Baker (2007). Αυτή η μέθοδος περιγράφει την ποσοτική ταξινόμηση των σεισμών κοντινού πεδίου και τον διαχωρισμό των χρονοϊστοριών σε παλμικές ή μη.

Οι επιλεγμένες χρονοϊστορίες των προηγούμενων ετών χαρακτηρίζονται ως παλμικές εξαιτίας της ύπαρξης ενός μεγάλου ορατού παλμού στη χρονοϊστορία ταχύτητας όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1.α. ή επειδή η γεωμετρία της περιοχής του ρήγματος καθόριζε την πιθανότητα να εμφανιστεί παλμός κατευθυντικότητας. Ο χαρακτηρισμός των καταγραφών ως παλμικών ή μη με τους προαναφερθέντες τρόπους προϋποθέτει την κρίση του ερευνητή και μπορεί να οδηγήσει σε αμφιλεγόμενα συμπεράσματα, όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα 1.18b και 1.18c.



Σχήμα 1. 18 Παραδείγματα κάθετων στο ρήγμα συνιστωσών σε σεισμούς κοντινού πεδίου (Baker 2007)

Η διαδικασία που προτάθηκε από τον Baker είναι βασισμένη στην ανάλυση με κυματίδια και στοχεύει στην αναγνώριση και στη συνέχεια στην αφαίρεση του παλμού από την χρονοϊστορία ταχύτητας. Στην περίπτωση που ο αφαιρούμενος παλμός είναι μεγάλος συγκριτικά με τις εναπομείνουσες τιμές ταχύτητας, η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως παλμική. Ο προσδιορισμός της περιόδου του παλμού είναι επίσης ένα αντικείμενο που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο.

### **Αιτίες δημιουργίας παλμού ταχύτητας**

Σύμφωνα με τον (Baker, 2007) μια σεισμική κίνηση θεωρείται παλμική όταν στην καταγραφή της περιέχει έναν παλμό με μικρή διάρκεια, εμφανίζεται νωρίς στην χρονοϊστορία της ταχύτητας και έχει μεγάλο πλάτος. Η κύρια αιτία δημιουργίας τέτοιων παλμών είναι το φαινόμενο της κατευθυντικότητας στην περιοχή κοντινού πεδίου. Έμπροσθεν κατευθυντικότητα λέγεται το φαινόμενο κατά το οποίο η διάρρηξη κατευθύνεται προς τη θέση καταγραφής με μια ταχύτητα ίση με την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων και η διεύθυνση ολίσθησης του ρήγματος είναι επίσης προς τη θέση καταγραφής. Η έμπροσθεν κατευθυντικότητα συναντάται στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της εδαφικής κίνησης. Η επιρροή της μετακίνησης που είναι γνωστή ως fling step αγνοείται.

Πέραν του φαινομένου της κατευθυντικότητας, όμως, υπάρχουν και άλλα φαινόμενα που μπορεί να προκαλέσουν παλμούς στην χρονοϊστορία της ταχύτητας. Εάν μια περιοχή είναι



τοποθετημένη κοντά σε ασπερίτη, τότε μπορεί να δημιουργηθεί παλμός κατά τη δημιουργία των κυμάτων από εκείνη τη θέση. Η παρεμβολή σεισμικών κυμάτων όταν αυτά διέρχονται από σύνθετες γεωλογικές δομές μπορεί επίσης να προκαλέσει παλμό στην χρονοϊστορία της ταχύτητας. Παρ' όλο που το φαινόμενο της κατευθυντικότητας δεν είναι η μοναδική αιτία για την δημιουργία παλμού κοντινού πεδίου, η μέθοδος του Baker δεν διαχωρίζει τον μηχανισμό γένεσής τους.

### **Επιλογή της διαδικασίας ταξινόμησης**

Όταν χρησιμοποιείται μια μέθοδος ταξινόμησης είναι απαραίτητο να οριστούν ορισμένα κριτήρια επιλογής. Συγκεκριμένα, η μέθοδος πρέπει να είναι ικανή να διαχωρίζει μια παλμική από μια μη παλμική καταγραφή και να μην απαιτεί κριτική σκέψη προκειμένου να μην υπάρχουν περιθώρια λάθους και αμφισβήτησης.

Οι παραπάνω στόχοι επιτυγχάνονται με τη χρήση ενός σχετικά απλού μοντέλου. Πολλοί ερευνητές έχουν αναπτύξει αρκετά περίπλοκα μοντέλα ((Fu & Menun, 2004), (George P. Manroeidis & Parageorgiou, 2003)), αλλά μια απλούστερη παρουσίαση είναι ευκολότερα εφαρμόσιμη για αυτόματη κατηγοριοποίηση και ταξινόμηση των μεγάλων παλμών. Μια αναλογία με τον εδαφικό τύπο θα μπορούσε να είναι χρήσιμη.

Τα παραπάνω μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι μια ανάλυση με τη χρήση κυματιδίων είναι κατάλληλη για την ταξινόμηση των εδαφικών κινήσεων. Είναι συμφέρουσα υπολογιστικά, ποσοτική και αξιόπιστη. Οι παλμοί ταχύτητας μπορούν πολύ εύκολα να εντοπιστούν και να αφαιρεθούν.

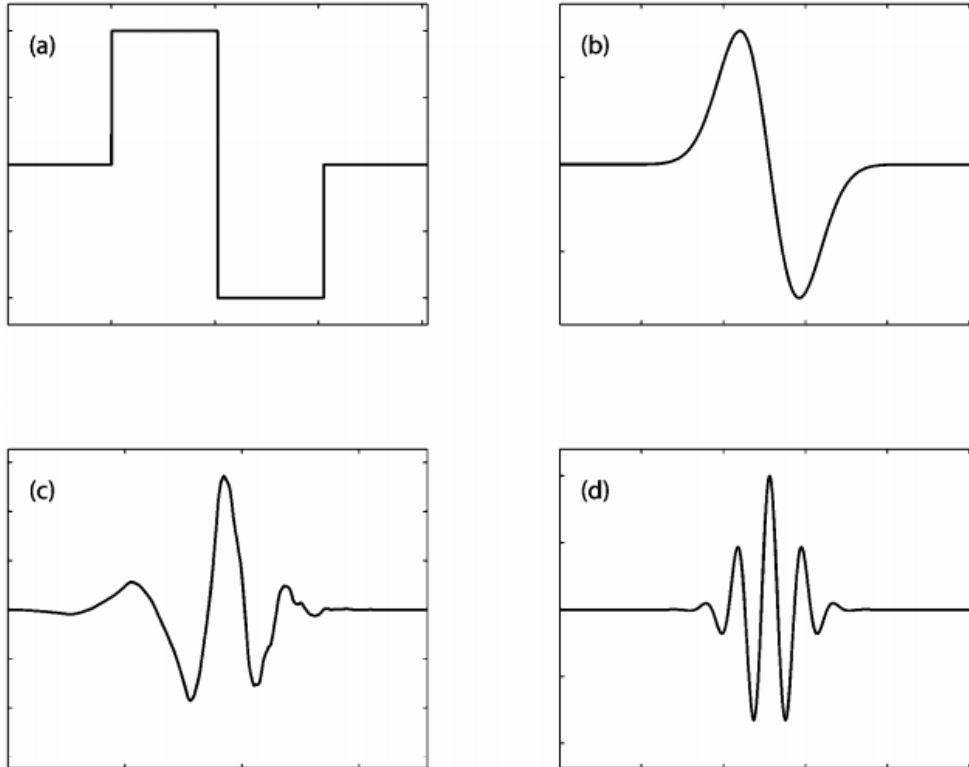
### **Ανάλυση με κυματίδια**

Η *ανάλυση με κυματίδια (wavelet analysis)* έχει αναπτυχθεί αρκετά κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Υπάρχει ευρεία βιβλιογραφία που αφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο καθώς και αλγοριθμικές λεπτομέρειες.

Μια βασική κατανόηση της μεθόδου μπορεί να επιτευχθεί μέσω της σύγκρισής της με την ανάλυση Fourier. Η ανάλυση Fourier αντιπροσωπεύει ένα σήμα χρησιμοποιώντας γραμμικό συνδυασμό από ημιτονικά κύματα, που το καθένα αντιπροσωπεύει ένα σήμα άπειρου μήκους και μιας μοναδικής συχνότητας. Αντίθετα, η ανάλυση με κυματίδια αποσυνθέτει ένα σήμα σε μικρότερα κυματίδια, ορισμένα στο χρόνο σε στενό εύρος συχνοτήτων. Για τα μη στάσιμα κύματα, όπως οι σεισμικές εδαφικές κινήσεις, είναι προτιμότερο το σήμα να παρουσιάζεται ως άθροισμα κυματιδίων παρά ως άθροισμα στάσιμων ημιτονικών κυμάτων.

Τα κυματίδια είναι βασικές συναρτήσεις που ικανοποιούν ορισμένα μαθηματικά κριτήρια. Υπάρχουν αρκετά πρότυπα κυματίδια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποσύνθεση ενός σήματος. Το πρότυπο κυματίδιο ονομάζεται *μητρικό κυματίδιο (mother wavelet)* και επεξεργάζεται στο χρόνο προκειμένου να αποτελέσει μια ομάδα βασικών συναρτήσεων. Ένας μεγάλος αριθμός θεωρητικών προσεγγίσεων μας οδηγεί στην επιλογή του

αντιπροσωπευτικού μητρικού κυματιδίου, συμπεριλαμβάνοντας την ύπαρξη συμμετρίας, συμβατότητας, παραγώγων κτλ. (Mallat, 1999). Τα κυματίδια που χρησιμοποιούνται ευρέως δίνονται στο Σχήμα 1.19.



Σχήμα 1. 19 Πρότυπα μητρικά κυματίδια (Baker, 2007)

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

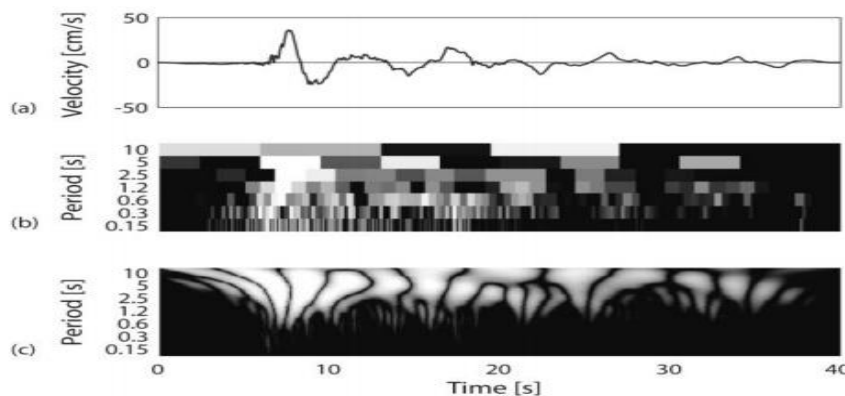
$$\Phi_{s,l} = \frac{1}{\sqrt{s}} \Phi\left(\frac{t-l}{s}\right) \quad (1.23)$$

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

$$C_{s,l} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Phi_{s,l}(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \Phi\left(\frac{t-l}{s}\right) dt \quad (1.24)$$

Για να αναλύσουμε ψηφιακά σήματα όπως οι χρονοϊστορίες ταχύτητας, χρησιμοποιείται η εξίσωση 1.24 περισσότερο ως άθροισμα παρά ως ολοκλήρωμα. Υπάρχουν δύο κατηγορίες μετασχηματισμού κυματιδίων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ενός σήματος ανάλογα με τα επίπεδα και τις θέσεις στις οποίες υπολογίζονται οι συντελεστές. Ο συνεχής

μετασχηματισμός κυματιδίου (continuous wavelet transform) υπολογίζει τους συντελεστές κυματιδίου που σχετίζονται με κάθε τιμή ολοκληρώματος από κάθε επίπεδο και παραμέτρους θέσης. Η παραπάνω διαδικασία παρέχει λεπτομερή πληροφορία για το συχνοτικό περιεχόμενο του σήματος. Ένα ψηφιακό όμως σήμα μήκους  $n$ , μπορεί να περιγραφεί πλήρως χρησιμοποιώντας έναν μειωμένο αριθμό συντελεστών. Στην περίπτωση ορθογωνικών κυματιδίων, μόνο  $n$  κυματίδια απαιτούνται για την πλήρη περιγραφή του σήματος. Ο διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίου (discrete wavelet transform), παρέχει τους  $n$  συντελεστές που περιγράφουν τα πλάτη των  $n$  κυματιδίων σε διάφορες θέσεις και επίπεδα. Ένα παράδειγμα των δυο μετασχηματισμών δίνεται στο Σχήμα 1.20.



Σχήμα 1. 20 Μετασχηματισμοί κυματιδίων (Baker 2007)

Στην περίπτωση που ένα μητρικό κυματίδιο αντιπροσωπεύει επαρκώς το επιθυμητό σχήμα, τότε λιγότεροι από  $n$  συντελεστές απαιτούνται για την περιγραφή του σήματος. Κάποιοι από τους συντελεστές θα είναι μεγάλοι και τα κυματίδιά τους θα αντιπροσωπεύουν το κυρίως μέρος του σήματος, ενώ άλλοι θα είναι κοντά στο μηδέν και θα αντιστοιχούν σε πολύ μικρό μέρος. Η παραπάνω παρατήρηση είναι σημαντική για τον εξής λόγο: εάν ένα σημαντικό μέρος της ιστορίας της εδαφικής κίνησης περιγράφεται από ένα ή δύο κυματίδια με μεγάλες τιμές συντελεστών, τότε υποδεικνύεται η ύπαρξη παλμού.

Τόσο ο συνεχής, όσο και ο διακριτός μετασχηματισμός έχουν σημεία χρήσιμα στην μέθοδο ταξινόμησης του Baker. Ενώ ο συνεχής μετασχηματισμός έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος, καθώς υπολογίζονται περισσότεροι από τους απαιτούμενους συντελεστές, παραταύτα μπορεί να προσδιορίσει την περίοδο και τη θέση του παλμού της καταγραφής κοντινού πεδίου. Αντίθετα με τον διακριτό μετασχηματισμό, ο συνεχής δεν επηρεάζεται στην περίπτωση περισσότερων μηδενικών στην αρχή ή στο τέλος της ιστορίας, κάτι που είναι σημαντικό στην περίπτωση που δημιουργήθηκε πρόβλημα με το μηχάνημα καταγραφής.

### **Ταξινόμηση των ιστοριών**

Για τη δόμηση μιας μεθόδου ταξινόμησης των καταγραφών, είναι απαραίτητος ο καθορισμός κάποιων καλώς ορισμένων κριτηρίων επιλογής, ώστε να διαχωρίζεται αν μια μορφή που εμπεριέχεται στη ιστορία της ταχύτητας είναι ή όχι παλμός. Ο διαχωρισμός γίνεται με μια κατάταξη των καταγραφών μέσω δεικτών που εκφράζουν το κατά πόσο είναι ή όχι

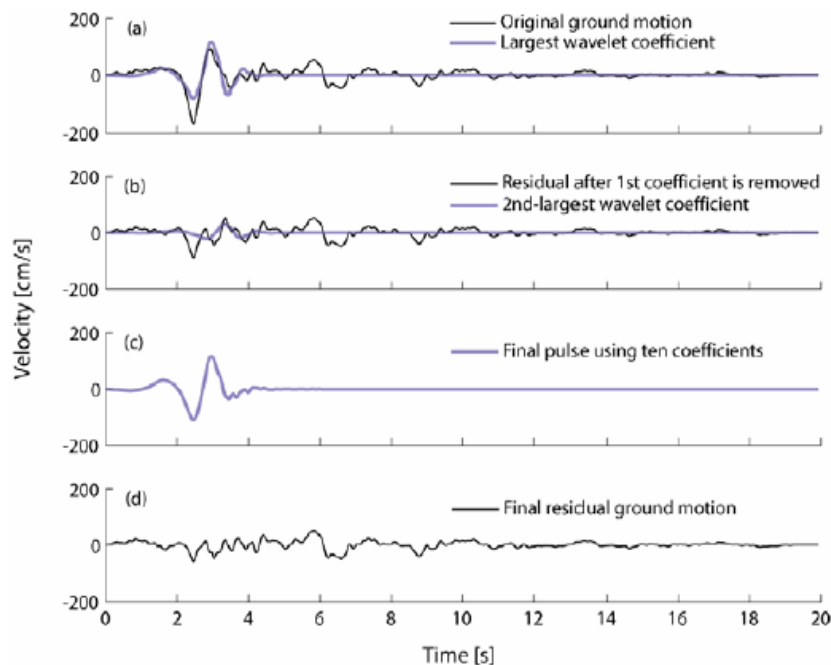
παλμικές και τον ορισμό ενός ορίου (*threshold*), με βάση το οποίο εξάγεται συμπέρασμα δυαδικού τύπου, δηλαδή *Pulse Like* ή *Non Pulse Like*.

### Αφαίρεση του παλμού ταχύτητας

Για κάθε μελετώμενη εδαφική κίνηση, αφαιρείται ο μεγαλύτερος παλμός χρησιμοποιώντας την αποσύνθεση του κύματος με την ανάλυση των κυματιδίων, όπως αυτή περιγράφηκε παραπάνω. Το κυματίδιο Daubechies (Σχήμα 1.21c) χρησιμοποιείται ως μητρικό καθώς το σχήμα του αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά αυτού του είδους τους παλμούς. Για να αξιολογηθεί μια σεισμική εδαφική κίνηση, αρχικά υπολογίζεται ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου από τη χρονοϊστορία ταχύτητας και αναγνωρίζεται η συνιστώσα με τις μεγαλύτερες τιμές. Τα κυματίδια που συνδέονται με αυτούς τους συντελεστές αναγνωρίζουν την περίοδο και τη θέση του παλμού όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 1.21.

Το κυματίδιο αφαιρείται από την εδαφική κίνηση και υπολογίζεται ο συνεχής μετασχηματισμός για την εναπομείνουσα εδαφική κίνηση. Σε αυτό το στάδιο επιλέγονται κυματίδια που έχουν την ίδια θέση και περίοδο με αυτό που εντοπίστηκε από τη μεγαλύτερη συνιστώσα. Δέκα κυματίδια είναι ικανοποιητικά για την περιγραφή του παλμού.

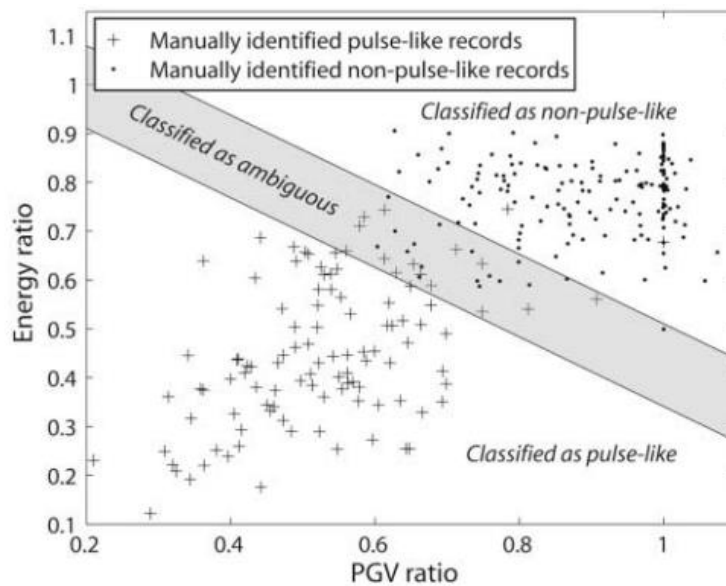
Χρησιμοποιώντας αυτή τη διαδικασία ένας παλμός μπορεί να αφαιρεθεί από οποιαδήποτε εδαφική κίνηση είτε υπάρχει, είτε όχι παλμός κατευθυντικότητας. Πρέπει να οριστεί λοιπόν, ένα κριτήριο για το αν ο παλμός θα θεωρείται σημαντικός ή όχι.



Σχήμα 1. 21 Ανάλυση με κυματίδια κατά Baker (Baker, 2007)

### Προσδιορισμός της σημαντικότητας του αφαιρούμενου παλμού

Χρησιμοποιώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε, ένας παλμός μπορεί να αφαιρεθεί από οποιαδήποτε εδαφική κίνηση είτε υπάρχει, είτε όχι παλμός κατευθυντικότητας. Πρέπει λοιπόν να οριστεί ένα κριτήριο για το αν ο παλμός θα θεωρείται σημαντικός ή όχι. Για το λόγο αυτό, ο Baker (2007) υπολόγισε ένα πλήθος μεταβλητών και αξιολόγησε ποιες μπορούν να αποτελέσουν δείκτες της σημαντικότητας του παλμού. Για τη μόρφωση μιας ομάδας ταξινομημένων καταγραφών επιλέγονται όλες οι συνιστώσες στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση από τη βάση δεδομένων *Next Generation Attenuation (NGA)* για σεισμούς μεγέθους μεγαλύτερου από 5,5 και εντός μίας ζώνης 30 km από κάθε σεισμικό γεγονός. Οι 398 επιλεγείσες καταγραφές ταξινομούνται βάσει οπτικών ελέγχων και εντοπίζονται οι παλμοί στις χρονοϊστορίες ταχύτητας. Καταγραφές με εμφανή παλμικά ή μη παλμικά χαρακτηριστικά, όπως αυτές στα σχήματα και , κατατάσσονται κατάλληλα. Καταγραφές χωρίς διακριτά χαρακτηριστικά, όπως αυτές στα σχήματα και , ταξινομούνται ως ασαφείς και διαχειρίζονται χωριστά. Αυτός ο “χειροκίνητος” έλεγχος του Baker έδωσε 124 πιθανώς παλμικές, 190 μη παλμικές και 84 ασαφείς εδαφικές κινήσεις. Μετά από αυτήν την ταξινόμηση, χρησιμοποιήθηκαν στατιστικά εργαλεία πρόβλεψης με χρήση κυματικής ανάλυσης. Στις μεταβλητές που χρησιμοποιεί συμπεριλαμβάνονται το μέγεθος των συντελεστών που προκύπτουν από την αποσύνθεση του σήματος σε κυματίδια, οι φασματικές τιμές απόκρισης, οι μέγιστες εδαφικές ταχύτητες και ενεργειακές τιμές. Δύο μεταβλητές που είναι αφενός εύκολες στον υπολογισμό και αφετέρου δείχνουν την ικανότητα πρόβλεψης που αναζητείται, είναι η μέγιστη εδαφική ταχύτητα (*Peak Ground Velocity* ή *PGV*) της εναπομένουσας καταγραφής προς τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα της αρχικής και η ενέργεια της εναπομένουσας καταγραφής προς την ενέργεια της αρχικής. Αυτές οι μεταβλητές αναφέρονται στις μελέτες του Baker ως *Λόγος PGV (PGV ratio)* και *Λόγος Ενεργειών (Energy ratio)* αντίστοιχα. Στο Σχήμα 1.22 εμφανίζεται ένα διάγραμμα μεταξύ των λόγων αυτών για τις καταγραφές που έχουν ταξινομηθεί χειροκίνητα, στο οποίο φαίνεται ότι οι παραπάνω δείκτες επιβεβαιώνουν την ταξινόμηση.



Σχήμα 1. 22 Περιγραφή της διαδικασίας αφαίρεσης παλμού (Baker 2007)

Ο (Baker, 2007) προχώρησε στη συνέχεια στη δημιουργία ενός δείκτη που προβλέπει την ύπαρξη ή όχι παλμού σε μια σεισμική εδαφική κίνηση:

$$Pulse\ indicator = \frac{1}{1 + e^{-23.3+14.6(PGV\_ratio)+20.5(energy\_ratio)}} \quad (1.25)$$

Οι τιμές του P.I. κυμαίνονται από μηδέν έως ένα με τις μεγάλες τιμές να υποδεικνύουν την ύπαρξη παλμού. Καταγραφές με τιμές πάνω από 0.85 και κάτω από 0.15 χαρακτηρίζονται αντίστοιχα ως παλμικές και μη.

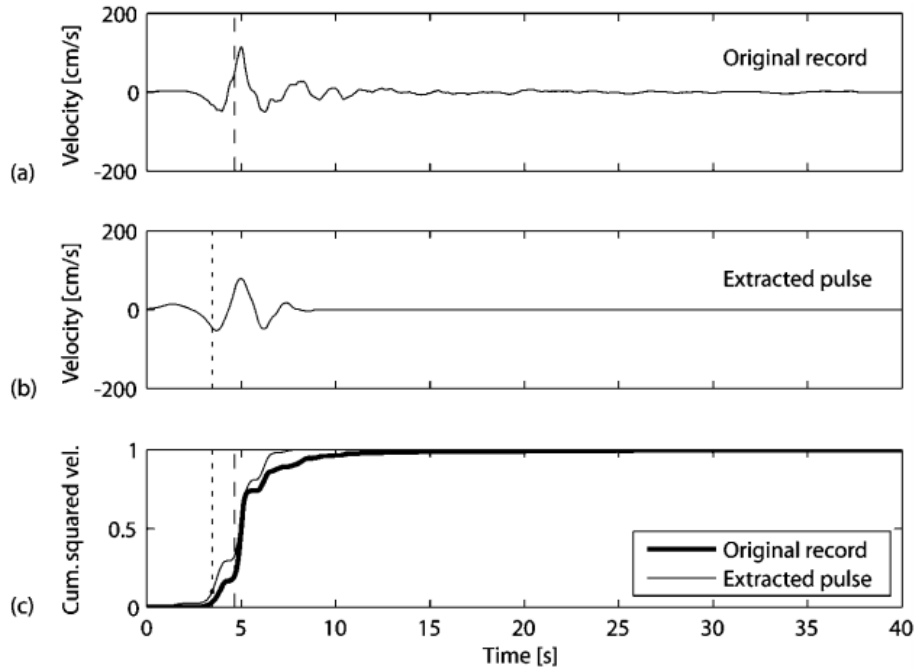
#### Αποκλεισμός των παλμών που φτάνουν στο τέλος της χρονοϊστορίας

Η έως τώρα διαδικασία εντοπίζει και αφαιρεί τους παλμούς από τη χρονοϊστορία ταχύτητας, οι παλμοί όμως αυτοί μπορεί να δημιουργούνται από διάφορα αίτια. Στόχος του Baker ήταν να αφαιρέσει μόνο τους παλμούς που οφείλονται στο φαινόμενο της κατευθυντικότητας στους σεισμούς κοντινού πεδίου. Οι παλμοί αυτοί είναι αυτοί που φτάνουν νωρίς στη χρονοϊστορία της ταχύτητας και για αυτό το λόγο εισήγαγε ένα κριτήριο αποκλεισμού των παλμών που φτάνουν αργά. Οι παλμοί που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μπορούν να εντοπιστούν υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας της αρχικής καταγραφής και του αφαιρεθέντος παλμού. Συγκεκριμένα σε μια χρονική στιγμή  $t$  το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας υπολογίζεται ως εξής:

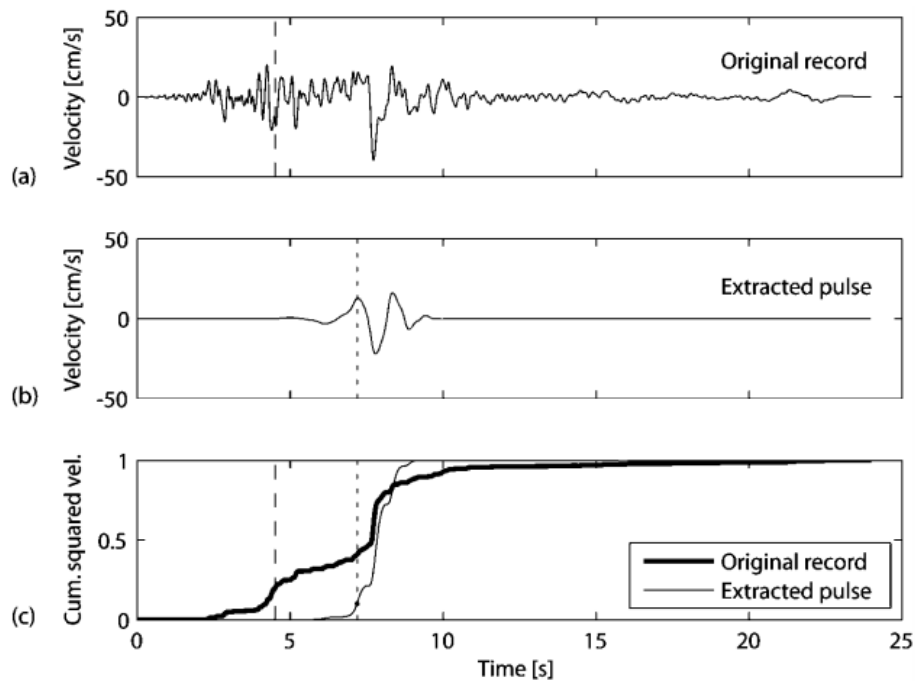
$$CSV = \int_0^t V^2(u) du \quad (1.26)$$

όπου  $V(u)$  είναι η ταχύτητα της εδαφικής κίνησης τη στιγμή  $u$ . Υπολογίζοντας το παραπάνω ολοκλήρωμα προσδιορίζουμε για την αρχική χρονοϊστορία και για τον παλμό το ποσοστό  $x\%$  του συνολικού CSV. Οι χρόνοι αυτοί στους οποίους επιτυγχάνονται τα ποσοστά συμβολίζονται ως  $t_{x\%,orig}$  και  $t_{x\%,pulse}$  για το αρχικό σήμα και τον παλμό αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τον Baker οι παλμοί που φτάνουν νωρίς στη χρονοϊστορία της ταχύτητας έχουν τιμές  $t_{20\%,orig}$  μεγαλύτερες από το χρόνο  $t_{10\%,pulse}$ . Το παραπάνω κριτήριο διασφαλίζει ότι ένα σημαντικό ποσοστό του παλμού έχει εκδηλωθεί πριν ακόμα αναπτυχθεί σημαντικό μέρος της ενέργειας της αρχικής χρονοϊστορίας. Παραδείγματα παλμών που έρχονται στην αρχή και στο τέλος της καταγραφής δίνονται στο παρακάτω σχήματα.



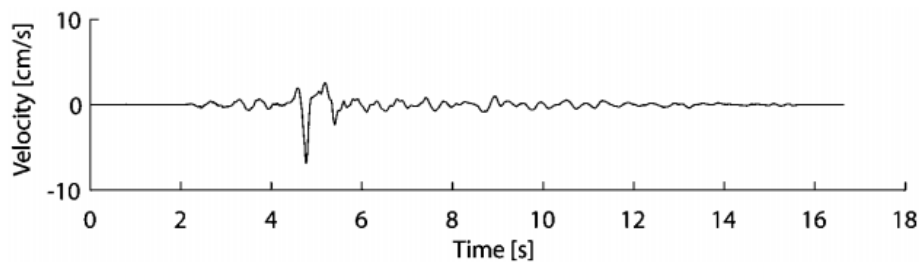
Σχήμα 1. 23 Παλμός στην αρχή της χρονοϊστορίας. α,β)χρονοϊστορία ταχύτητας και παλμού ,γ) CSV (Baker 2007)



Σχήμα 1. 24 Παλμός στο τέλος της χρονοϊστορίας. α,β)χρονοϊστορία ταχύτητας και παλμού ,γ) CSV (Baker 2007)

Αποκλεισμός των εδαφικών κινήσεων με μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV) <math><30\text{cm/s}</math>

Η τελευταία κατάσταση που τίθεται υπό μελέτη από τον Baker είναι οι σεισμοί μικρής έντασης που εμφανίζουν παλμό στη χρονοϊστορία ταχυτήτων τους. Αυτό παρατηρείται για παράδειγμα σε σεισμικές κινήσεις μικρής διάρκειας και μικρού μεγέθους που έχουν ανακλάσεις κατά τη διάρκεια διάδοσης των κυμάτων. Για παράδειγμα, η σεισμική κίνηση στο Σχήμα 1.25 είναι μεγέθους 5.1 και μπορούμε να καταλάβουμε ότι ο παλμός δημιουργείται κυρίως από τη μικρής διάρκειας κίνηση παρά από το φαινόμενο της κατευθυντικότητας.



Σχήμα 1. 25 Εδαφική κίνηση με μικρή PGV που εμφανίζεται ως παλμική και αποκλείεται (Baker 2007)

Για τον αποκλεισμό των παραπάνω καταγραφών αγνοούμε τις σεισμικές εδαφικές κινήσεις με PGV μικρότερη των 30cm/s. Το κριτήριο αυτό αποκλείει αυτόματα και τις καταγραφές μακρινού πεδίου.

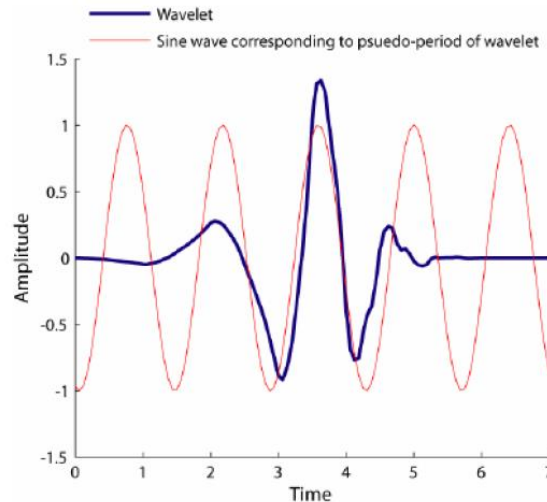
Τα τρία κριτήρια που περιγράφηκαν στην παρούσα ενότητα οδήγησαν τον Baker στον χαρακτηρισμό 91 καταγραφών από τη βάση δεδομένων της NGA ως παλμικές. Οι καταγραφές αυτές δίνονται στον Πίνακα 2.1 στο τέλος του κεφαλαίου. Τα κριτήρια για την τελική ταξινόμηση συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία:

1. Ο δείκτης παλμού P.I πρέπει να λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 0.85
2. Για τον παλμό που φτάνει νωρίς στην χρονοϊστορία της ταχύτητας ισχύει ότι οι τιμές του χρόνου  $t_{20\%orig}$  είναι μεγαλύτερες από το χρόνο  $t_{10\%pulse}$ .
3. Η αρχική εδαφική κίνηση έχει  $PGV > 30\text{cm/s}$

### **Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού**

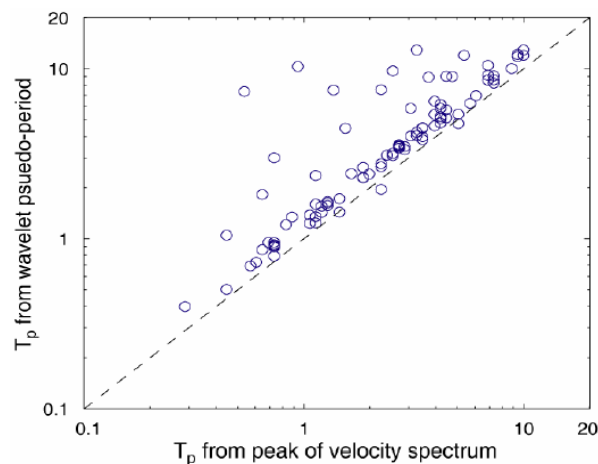
Η έννοια της περιόδου ενός κυματιδίου δεν είναι ξεκάθαρα ορισμένη, όπως συμβαίνει στα ημιτονικά κύματα που προκύπτουν από ανάλυση *Fourier*. Παρ' όλα αυτά η περίοδος που σχετίζεται με το μέγιστο πλάτος *Fourier* ενός κυματιδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό μιας ψευδοπεριόδου. Στο Σχήμα 1.26 παρουσιάζεται το παράδειγμα ενός κυματιδίου συγκριτικά με ένα ημιτονικό σήμα που έχει περίοδο ίση με εκείνη στην οποία παρατηρείται το μεγαλύτερο πλάτος *Fourier* του κυματιδίου. Η ψευδοπερίοδος της μεγαλύτερης συνιστώσας του κυματιδίου χρησιμοποιείται ως η περίοδος παλμού της εδαφικής κίνησης.





Σχήμα 1. 26 Κυματίδιο Daubechies και ημιτονικό κύμα με περίοδο ίση με τη μέγιστη της κυματομορφής από το φάσμα Fourier (Baker 2007)

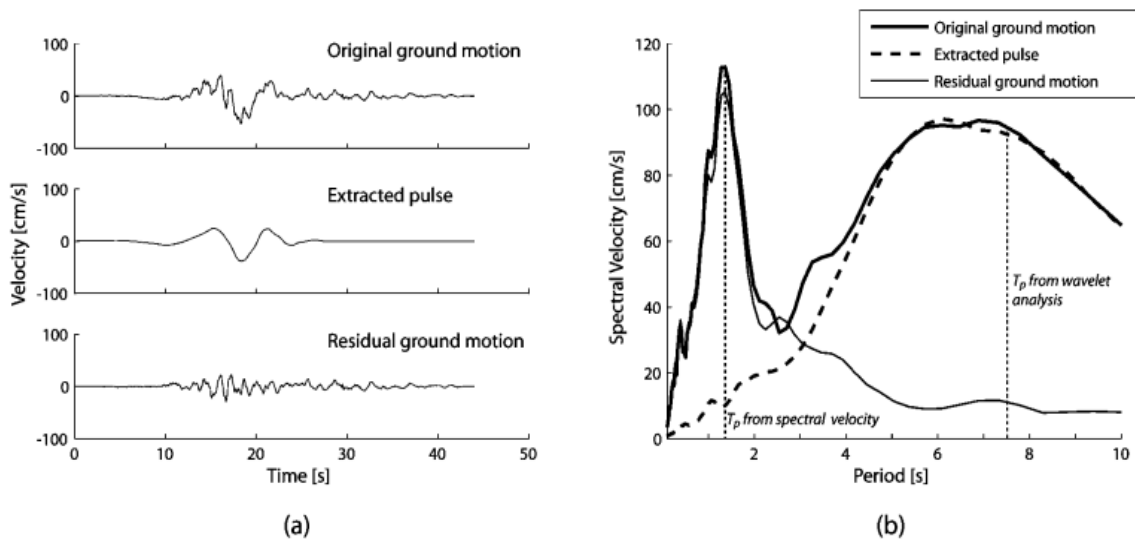
Η κύρια εναλλακτική μέθοδος για τον προσδιορισμό της περιόδου ενός παλμού είναι η επιλογή της περιόδου στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη αιχμή του φάσματος ταχύτητας της εδαφικής κίνησης. Στο Σχήμα 1.27 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα των περιόδων των παλμών που εξήχθησαν μέσω κυματικής ανάλυσης ως προς τις περιόδους που προκύπτουν από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος ταχύτητας, για τις 91 καταγραφές που έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές από το Baker. Οι περίοδοι που εξάγονται από τις δύο αυτές προσεγγίσεις είναι κατά βάση παρόμοιες με τις περιόδους  $T_p$  που προκύπτουν από την κυματική ανάλυση να είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες  $T_p$  που υπολογίζονται από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος της ταχύτητας.



Σχήμα 1. 27 Απόκλιση περιόδου παλμού και δεσπόζουσας περιόδου φάσματος ταχυτήτων (Baker , 2007)

Στις περιπτώσεις όπου οι περίοδοι που λαμβάνονται από την κυματική ανάλυση και από το φάσμα ταχύτητας διαφέρουν σημαντικά, η περίοδος που προκύπτει από την κυματική ανάλυση δείχνει να είναι πιο αξιόπιστο μέτρο ένδειξης της περιόδου του παλμού. Τέτοιες διαφοροποιήσεις εμφανίζονται όταν η περίοδος που αντιστοιχεί στη μέγιστη φασματική ταχύτητα σχετίζεται με υψίσυχνες συνιστώσες της ταλάντωσης της εδαφικής κίνησης. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.28 όπου οι κύριοι διαδοχικοί μηδενισμοί που σχετίζονται με τον

παλμό της εδαφικής κίνησης απέχουν κατά 7.3 sec, η αιχμή της φασματικής ταχύτητας εμφανίζεται σε περίοδο 1.4 sec, ενώ η ψευδοπερίοδος του κυματιδίου είναι 7.5 sec. Είναι εμφανές λοιπόν και οπτικά, ότι η ψευδοπερίοδος προσεγγίζει καλύτερα την περίοδο του παλμού.

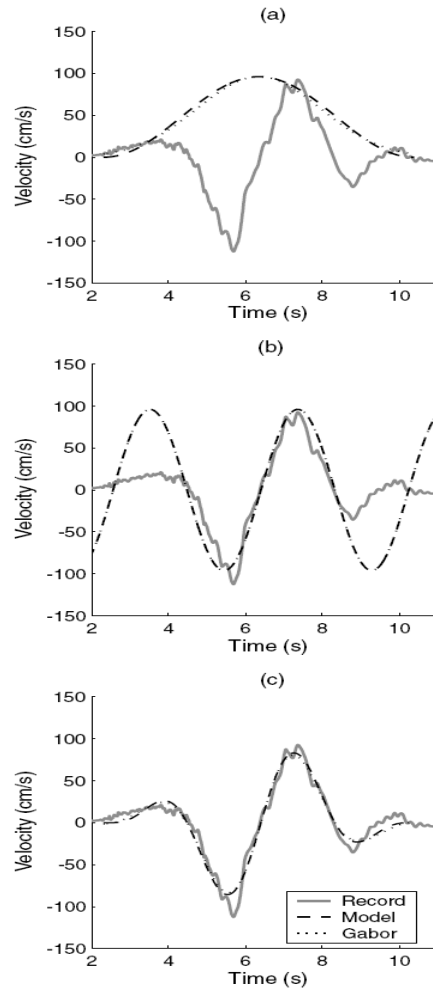


Σχήμα 1. 28 Η αρχική κίνηση, ο εξαγόμενος παλμός και η εναπομένουσα εδαφική κίνηση για την εδαφική κίνηση Landers 1992, Yermo Fire Station. (a) Χρονοϊστορίες ταχύτητας, (b) φάσματα ταχύτητας στα οποία φαίνεται ο προσδιορισμός της περιόδου του παλμού με τη χρήση του φάσματος ψευδο-ταχύτητας και μέσω κυματικής ανάλυσης.

## 1.6.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΜΑΝΡΟΕΙΔΙΣ & ΠΑΡΑΓΕΟΡΓΙΟΥ

Ιδιαίτερα ελκυστική σαν μέθοδος περιγραφής της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου είναι αυτή που προτείνεται από τους (George P. Manroeidis & Parageorgiou, 2003). Σε άρθρο τους, παρουσίασαν ένα μοντέλο που στηρίζεται στη διαμόρφωση ενός *σύνθετου κυματιδίου* (κυματίδιο M&P) και εκφράζεται με μία απλή μαθηματική μορφή. Το αναλυτικό αυτό μοντέλο επιτρέπει την ικανοποιητική προσέγγιση των παλμών σε σημαντικό αριθμό εδαφικών καταγραφών, ορίζει την περίοδό τους και μέσω μετασχηματισμού Fourier, εκτιμά τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη φασματική απόκριση των κατασκευών.

Συγκεκριμένα, η χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας προσομοιάζεται με ένα ημιτονικό σήμα, πολλαπλασιασμένο με μία κωδωνόσχημη περιβάλλουσα που προκύπτει από ένα μετατεθειμένο κύκλο συνημιτόνου (Σχήμα 1.29).



Σχήμα 1. 29 Σύγκριση της κυματομορφής των Manroeidis & Parageorgiou (2003) με το κυματίδιο Gabor. (a) κωδωνόσημες περιβάλλουσες, (b) ημιτονικά σήματα, (c) συνδυασμοί των (a) και (b).

Η μαθηματική σχέση έχει την ακόλουθη μορφή:

$$f(t) = A \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi f_p}{\gamma} t \right) \right] \cos(2\pi f_p t + \nu) \quad (1.27)$$

Η παράμετρος A ελέγχει το εύρος της εδαφικής ταχύτητας,  $f_p$  είναι η συχνότητα του σήματος,  $\nu$  η διαφορά φάσης της ημιτονικής συνιστώσας και  $\gamma$  το γινόμενο της διάρκειας της εδαφικής ταχύτητας επί την συχνότητα  $f_p$ . Η συνάρτηση ορίζεται στο παρακάτω χρονικό διάστημα:

$$-\frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq \frac{\gamma}{2f_p} \quad (1.28)$$

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

$$\frac{1}{f_p} < \frac{\gamma}{f_p} \Rightarrow \gamma > 1, T_p = \frac{1}{f_p} \quad (1.29)$$

Η παράμετρος  $\gamma$  κατ'έπекταση είναι ο λόγος της διάρκειας του προσομοιώματος της εδαφικής ταχύτητας προς την περίοδό της και αντιστοιχεί σε έναν αριθμό ισοδύναμων ημιτονικών κύκλων της προσομοιωμένης εδαφικής ταχύτητας.

Η επιτάχυνση, η ταχύτητα και η μετακίνηση της εδαφικής κίνησης δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$a(t) = -\frac{A\pi f_p}{\gamma} \left[ \sin\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_0)\right) \cos(2\pi f_p(t-t_0)+v) + \gamma \sin(2\pi f_p(t-t_0)+v) \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_0)\right)\right] \right] \quad (1.30)$$

$$v(t) = A \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_0)\right) \cos[2\pi f_p(t-t_0)+v] \right] \quad (1.31)$$

για  $-\frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_p}$  με  $\gamma > 1$

διαφορετικά  $\alpha(t)=0, v(t)=0$

$$d(t) = \frac{A}{4\pi f_p} \left[ \sin[2\pi f_p(t-t_0)+v] + \frac{1}{2} \frac{\gamma}{\gamma-1} \sin\left[\frac{2\pi f_p(\gamma-1)}{\gamma}(t-t_0)+v\right] + \frac{1}{2} \frac{\gamma}{\gamma+1} \sin\left[\frac{2\pi f_p(\gamma+1)}{\gamma}(t-t_0)+v\right] \right] + C \quad (1.32)$$

για  $t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_p}$  με  $\gamma > 1$  διαφορετικά,

$$d(t) = \frac{A}{4\pi f_p} \frac{1}{(1-\gamma^2)} \sin(v - \pi\gamma) + C$$

$$d(t) = \frac{A}{4\pi f_p} \frac{1}{(1-\gamma^2)} \sin(v + \pi\gamma) + C$$

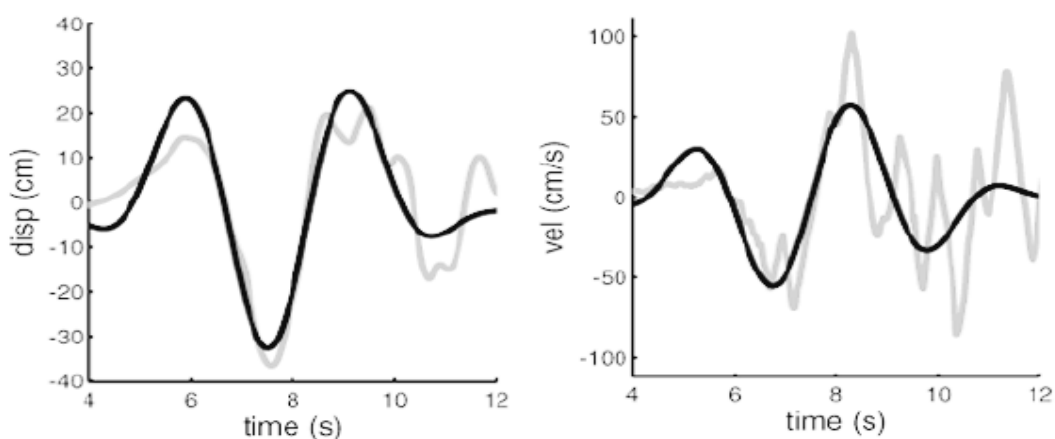
για  $t < t_0 - \frac{\gamma}{2f_p}$  και  $t > t_0 + \frac{\gamma}{2f_p}$  αντίστοιχα

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων  $f_p$ ,  $A$ ,  $v$  και  $\gamma$  γίνεται με μία σταδιακή διαδικασία. Κατ'αρχάς καθορίζεται η περίοδος του σήματος  $T_p$ , που αντιστοιχεί στην συχνότητα  $f_p$ , έτσι

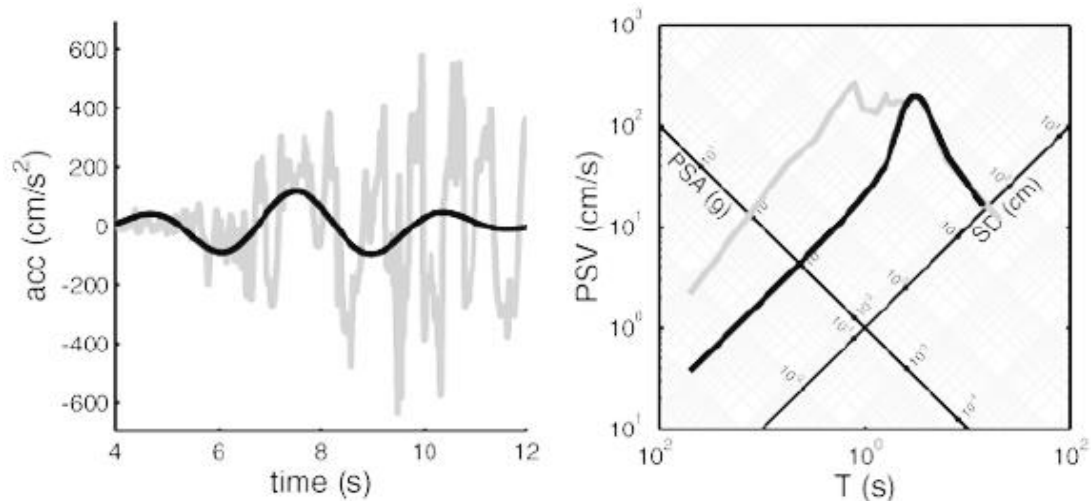
ώστε να υπάρχει σύμπτωση ανάμεσα στην δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος ταχυτήτων της πραγματικής καταγραφής και στην δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος που προκύπτει από την απλοποιημένη μαθηματική προσομοίωσή του παλμού της εδαφικής ταχύτητας. Η διαδικασία που προτείνεται στηρίζεται στην γνωστή και διαδεδομένη παραδοχή της συσχέτισης ανάμεσα στην περίοδο του παλμού κατευθυντικότητας και στην δεσπόζουσα περίοδο της φασματικής ταχύτητας. Η περίοδος  $T_p$ , σύμφωνα με τους μελετητές, δεν συμπίπτει απαραίτητα με την δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος, αν και η τιμή της είναι κοντά σε γενικές γραμμές.

Οι παράμετροι  $A$ ,  $\nu$  και  $\gamma$  προσεγγίζονται με σειρά δοκιμών προκειμένου να επιτευχθεί καλή σύμπτωση του προσομοιώματος με την πραγματική ιστορία της εδαφικής ταχύτητας και της μετακίνησης, πέραν της σύμπτωσης των φασματικών τιμών. Δεδομένου ότι, εκτός από το εύρος  $A$ , και η παράμετρος  $\gamma$  επηρεάζει το εύρος των φασματικών τιμών μέσω της φασματικής μεγέθυνσης, πρέπει να εκτιμηθεί ο κατάλληλος συνδυασμός των παραμέτρων.

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην συγκεκριμένη δημοσίευση αξίζει να σχολιασθεί ότι, ενώ σε πολλές περιπτώσεις ο παλμός της μέγιστης ταχύτητας ταυτίζεται με τον παλμό κατευθυντικότητας, υπάρχουν περιπτώσεις που ο παλμός μέγιστης ταχύτητας εμφανίζεται σχετικά υψίσυχνος και τελικά επιλέγεται σαν παλμός κατευθυντικότητας παλμός με μικρότερο εύρος και μεγαλύτερη περίοδο, που αντιστοιχεί κατά τα φαινόμενα σε μεγαλύτερο εμβαδόν από τον παλμό μέγιστης εδαφικής ταχύτητας. Αυτή η επιλογή οφείλεται στην χρήση, ως κριτηρίου επιλογής των παραμέτρων της προσομοίωσης του παλμού, της καλής σύμπτωσης ανάμεσα στην ιστορία της μετακίνησης που προκύπτει από την πραγματική καταγραφή και στην ιστορία των μετακινήσεων που εκτιμάται από την εξίσωση 1.32. Σε αυτήν την περίπτωση καθοριστικός παράγων για την διακρίβωση των χαρακτηριστικών του παλμού κατευθυντικότητας δεν είναι η μέγιστη εδαφική ταχύτητα αλλά η μέγιστη εδαφική μετακίνηση ( Σχήμα 1.30).



Σχήμα 1. 30 Προσομοίωση παλμού (Loma Prieta 1989 Station STG) ,( Mavroeidis and Papageorgiou ,2003)



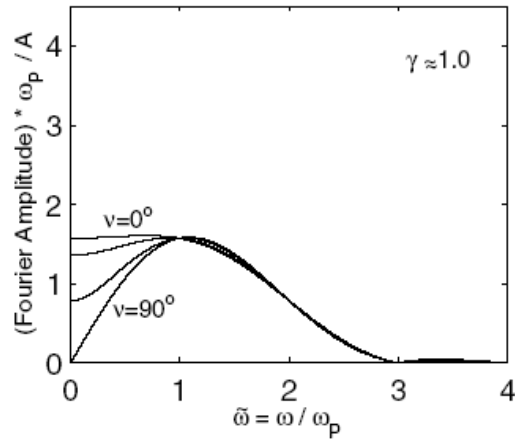
Σχήμα 1. 31 Χρονοϊστορία επιταχύνσεων και φάσμα ταχυτήτων προσομοίωσης (Loma Prieta 1989 Station STG) (George P. Mavroeidis & Parageorgiou, 2003)

Είναι, επίσης, χαρακτηριστικό ότι, παρά την δεδηλωμένη προσπάθεια ταύτισης της περιόδου του παλμού με την δεσπόζουσα περίοδο της φασματικής ταχύτητας, η επιλεγόμενη περίοδος δεν συμπίπτει πάντα με αυτήν που αντιστοιχεί στην μέγιστη φασματική τιμή της ταχύτητας, όπως ορίζει εκτός από τους (George P. Mavroeidis & Parageorgiou, 2003) και ο (Rodriguez-Marek, 2000), αλλά σε πιο μεγάλες περιόδους, που βρίσκονται κοντά στην περιοχή των μεγίστων φασματικών μετακινήσεων (Σχήμα 1.31).

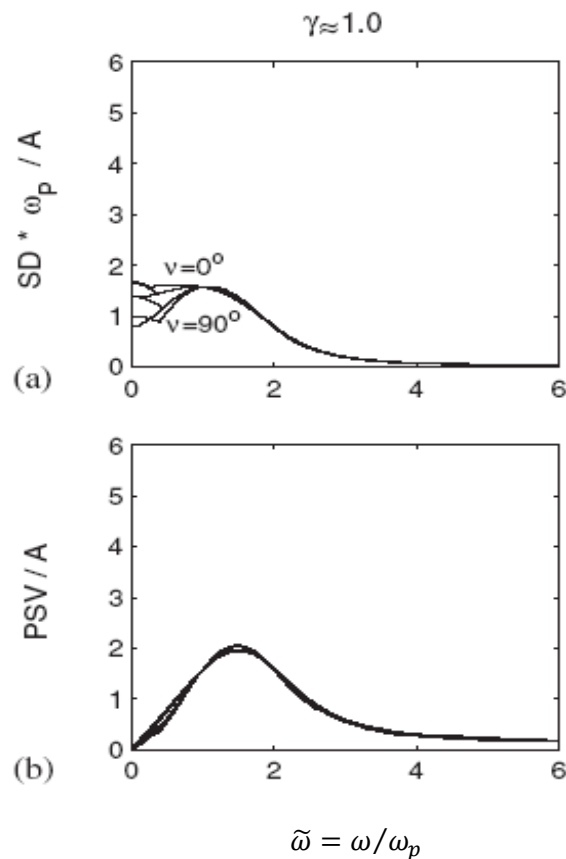
Ένα στοιχείο που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι σε επόμενη εργασία, οι (G. P. Mavroeidis et al, 2004), μετά από στατιστική διερεύνηση, εκτιμούν ότι η περίοδος του παλμού της κατευθυντικότητας είναι πολύ κοντά στην φασματική περίοδο  $T_d$ , που ορίζει την μετάβαση από την περιοχή σταθερών φασματικών ταχυτήτων στην περιοχή σταθερών φασματικών μετακινήσεων, και εκτιμάται συναρτήσει της εδαφικής μετακίνησης PGD και της εδαφικής ταχύτητας PGV. Ακόμη η εδαφική μετακίνηση, εφόσον προκύπτει από την ολοκλήρωση της εδαφικής ταχύτητας, πρέπει να σχετίζεται με τον παλμό της εδαφικής ταχύτητας που περικλείει το μεγαλύτερο εμβαδόν. Στην περίπτωση δύο διακριτών παλμών που αντιστοιχούν ο ένας στην μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV και ο άλλος στο μέγιστο περικλειόμενο εμβαδόν, δηλαδή στην μέγιστη διαφορική μετακίνηση ID, φαίνεται ότι οι (G. P. Mavroeidis et al, 2004) επιλέγουν τον παλμό με την μεγαλύτερη διάρκεια, και επομένως την μέγιστη ID, για την εκτίμηση της περιόδου του παλμού κατευθυντικότητας (Σχήμα 1.32).

Η αναλυτική μορφή της προσομοίωσης του παλμού από τους Mavroeidis και Parageorgiou, επιτρέπει την διατύπωση κλειστών σχέσεων για τα αντίστοιχα ελαστικά φάσματα απόκρισης και το φάσμα Fourier. Από την απεικόνιση του φάσματος Fourier της εδαφικής ταχύτητας και του αντίστοιχου φάσματος μετακινήσεων είναι εμφανής η συσχέτιση τους. Είναι χαρακτηριστική η συσχέτιση που υπάρχει ανάμεσα στο φάσμα μετακινήσεων και στο φάσμα Fourier του παλμού κατευθυντικότητας στην περίπτωση όπου η παράμετρος  $\gamma$  ισούται με 1. Στην περίπτωση αυτή, οι μέγιστες τιμές των δύο φασμάτων αντιστοιχούν στην συχνότητα που

αντιστοιχεί στην συχνότητα του παλμού, ενώ στο αντίστοιχο φάσμα ταχυτήτων η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη συχνότητα (Σχήματα 1.32 , 1.33).



Σχήμα 1. 32 Φάσμα Fourier παλμού με παράμετρο  $\gamma=1$  (Mavroeidis and Parageorgiou, 2003)



Σχήμα 1. 33 Φάσματα μετακινήσεων και ταχυτήτων παλμού με παράμετρο  $\gamma=1$  (Mavroeidis et al ,2004)





---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ  
ΠΑΛΜΟΥ ΣΤΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ  
ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ  
ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ  
ΣΥΝΕΛΙΞΗΣ

---



## 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που προτάθηκε από τους (Mimoglou et al., 2014) και αφορά τον καθορισμό των σημαντικών παλμών που περιλαμβάνονται στις καταγραφές των σεισμών κοντινού πεδίου. Πρόκειται για μία μέθοδο, η οποία συνδυάζει την αποδεδειγμένη αποτελεσματικότητα της μαθηματικής παρουσίασης των παλμών κατευθυντικότητας από τους (George P. Mavroeidis & Parageorgiou, 2003) με μια καλώς καθορισμένη διαδικασία για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των σχετικών κυματιδίων.

Αυτή η νέα μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας και επιτρέπει τον εντοπισμό και την εξαγωγή όλων των σημαντικών παλμών στο μεσαίο και μεγάλο εύρος περιόδων. Αν γίνει υπέρθεση όλων των εξαγόμενων παλμών, μπορεί να παραχθεί μια προσομοίωση ολόκληρης της εδαφικής κίνησης. Πρόκειται για μια μεθοδολογία που μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε καταγραφή, αναγνωρισμένη εκ των προτέρων ως παλμική, ανεξαρτήτως αν είναι κοντινού πεδίου ή όχι. Οι ερευνητές επέλεξαν την εξέταση των 91 καταγραφών της βάσης NGA, που έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές από τον Baker (2007).

Η σημαντικότητα της μεθόδου έγκειται στα πλεονεκτήματα που ακολουθούν. Αφενός παρέχει ένα νέο εργαλείο για την απομόνωση των σημαντικών παλμών που εμπεριέχονται στις καταγραφές εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, αφετέρου οδηγεί σε *απλουστευμένες τεχνητές χρονοϊστορίες (synthesized time histories)* που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί των αυθεντικών καταγραφών για τον αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών μέσω αναλύσεων χρονοϊστορίας φόρτισης. Όσον αφορά το τελευταίο, έχει δειχτεί ότι ενώ οι σημαντικοί παλμοί ανιχνεύονται από προσαρμογή τους στα ελαστικά φάσματα απόκρισης, οι τεχνητά κατασκευασμένες χρονοϊστορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επαρκή ακρίβεια και για μη γραμμικές αναλύσεις.

## 2.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

---

Οι (Mimoglou et al., 2014) υιοθέτησαν τη μαθηματική έκφραση που προτάθηκε από τους (George P. Mavroeidis & Parageorgiou, 2003) για την αναπαράσταση του παλμού ταχύτητας. Το χρησιμοποιούμενο *κυματίδιο M&P (M&P wavelet)* περιγράφεται από τέσσερις παραμέτρους: τη συχνότητα  $f_p$ , το εύρος  $A$ , τη διαφορά φάσης  $\nu$  και τη διάρκεια του κυματιδίου  $\gamma$ , που μετρά τον αριθμό των ταλαντώσεων και ορίζεται ως  $\gamma = t_p * f_p$ , όπου  $\gamma > 1$  και  $t_p$  η διάρκεια της εδαφικής ταχύτητας. Το *κυματίδιο M&P* δίνεται από την Εξίσωση (2.1). Με τη χρήση των παραμέτρων αυτών επιτυγχάνεται καλή προσέγγιση του παλμού, που αποδίδει ικανοποιητικά την

επίδρασή του στην απόκριση των κατασκευών. Για το λόγο αυτό, και επειδή η προτεινόμενη μεθοδολογία απευθύνεται σε φάσματα, επιλέγεται το *κυματίδιο M&P* μεταξύ άλλων ευρέως διαδεδομένων κυματομορφών.

Το εύρος  $A$  του κυματιδίου υπολογίζεται έτσι ώστε το φάσμα απόκρισης μετακινήσεων του παλμού να προσομοιάζει όσο το δυνατόν καλύτερα το αντίστοιχο φάσμα της καταγραφής. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται η έννοια της *απόλυτης αθροιστικής μετακίνησης CAD*, που εισήχθη από τους (Taflampas et al 2009) κατά αναλογία με το δείκτη *απόλυτης αθροιστικής ταχύτητας CAV* (*Cumulative Absolute Velocity*), και ορίζεται ως το χρονικό ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής της εδαφικής ταχύτητας :

$$CAD = \int_0^{t_{tot}} |v_g| dt \quad (2.1)$$

Έστω μία αρμονική εδαφική κίνηση εύρους  $d_{g,max}$ , η οποία εφαρμόζεται ως διέγερση στην βάση ενός μη αποσβενόμενου μονοβάθμιου ταλαντωτή. Στο συντονισμό, το πλάτος της απόκρισης του ταλαντωτή μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με τον αριθμό των κύκλων και για μία διέγερση  $\gamma$  κύκλων η μέγιστη απόκριση είναι:

$$S_{d,0}(T_{res}) = \gamma d_{g,max} \quad (2.2)$$

όπου  $S_{d,0}(T_{res})$  εκφράζει τη φασματική μετακίνηση στο συντονισμό για μηδενική απόσβεση. Ακόμη, η τιμή του  $CAD$  στο τέλος του  $\gamma$ -οστού κύκλου μιας αρμονικής διέγερσης είναι:

$$CAD = 4\gamma d_{g,max} \quad (2.3)$$

Έτσι, για μια αρμονική διέγερση  $\gamma$  κύκλων, υπάρχει μία σταθερή σχέση μεταξύ της φασματικής μετακίνησης για μηδενική απόσβεση στο συντονισμό και του  $CAD$ , η οποία είναι:

$$\frac{S_{d,0}(T_{res})}{CAD} = \frac{\pi}{4} \quad (2.4)$$

Ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί το *κυματίδιο M&P* αντί για μία καθαρά αρμονική διέγερση, η Εξίσωση (2.4) εξακολουθεί να ισχύει με ικανοποιητική ακρίβεια, παρά την ύπαρξη της κωδωνόσχημης συνάρτησης. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1, όπου ο λόγος της μέγιστης φασματικής μετακίνησης για μηδενική απόσβεση προς την τιμή του  $CAD$ ,  $S_{d,0,max}/CAD$ , αναπαριστάται σε σχέση με τη διαφορά φάσης  $\nu$  για τιμές του  $\gamma=1.5, 2.0, 3.0$  και  $5.0$ . Τα αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα της περιόδου  $T_p$  και του πλάτους  $A$ . Είναι προφανές ότι ο λόγος  $S_{d,0,max}/CAD$  είναι κοντά στην τιμή  $\pi/4$ , ειδικά για τους παλμούς μεγάλης διάρκειας (μεγάλες τιμές του  $\gamma$ ). Μεγαλύτερες αποκλίσεις

παρουσιάζονται για  $\gamma=1.5$  και  $\nu=30^\circ$ , αλλά ακόμα και τότε το σφάλμα είναι μικρότερο του 6%.

Μία παρόμοια σχέση μεταξύ της μέγιστης φασματικής μετακίνησης και του CAD μπορεί να παραχθεί και για άλλες τιμές της απόσβεσης. Για έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή με απόσβεση  $\xi$  και για καθαρά αρμονική διέγερση, η μετακίνηση στο συντονισμό,  $S_{d,t}(T_{res})$  είναι:

$$S_{d,\xi}(T_{res}) = \frac{1 - e^{-2\pi\gamma\xi}}{2\xi} d_{g,max} \quad (2.5)$$

Χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (2.3) προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\frac{S_{d,\xi}(T_{res})}{CAD} = \frac{1 - e^{-2\pi\gamma\xi}}{8\gamma\xi} \quad (2.6)$$

Αν η διέγερση δεν είναι καθαρά αρμονική αλλά ένα *κυματίδιο M&P*, η Εξίσωση παρουσιάζει σφάλμα για μεγάλες τιμές του  $\gamma$ . Η παραμετρική έρευνα που πραγματοποιήθηκε έδειξε ότι πρέπει να εφαρμοστεί ένας διορθωτικός συντελεστής στην περίπτωση αυτή, ίσος με  $1 + (\gamma - 1)\xi$ . Έτσι, για *κυματίδια M&P* ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{S_{d,\xi}(T_{res})}{CAD} = \frac{1 - e^{-2\pi\gamma\xi}}{8\gamma\xi} (1 + (\gamma - 1)\xi) \quad (2.7)$$

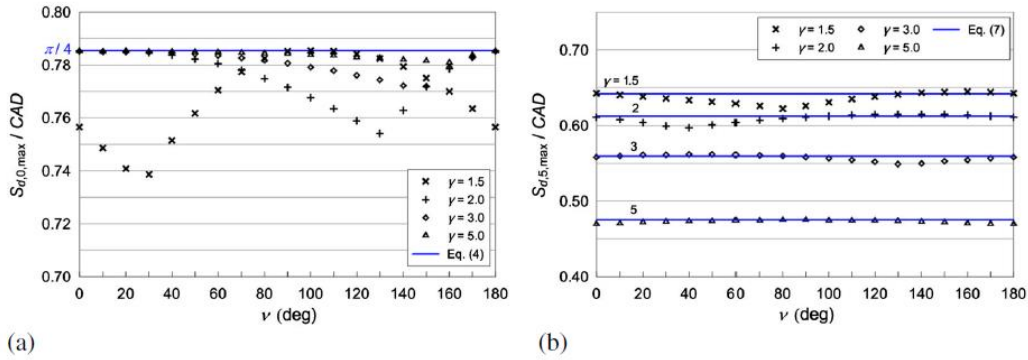
Η σύγκριση των τιμών που προκύπτουν από την Εξίσωση (2.7) με τις πραγματικές τιμές του λόγου  $S_{d,\xi,max}/CAD$ , για διαφορετικά  $\nu$  και  $\gamma$  παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1 για  $\xi=5\%$ . Όπως φαίνεται, η Εξίσωση (2.7) είναι ακριβής σε κάθε περίπτωση.

Με χρήση των εξισώσεων και της γνωστής σχέσης μεταξύ φασματικής μετακίνησης και ψευδο-ταχύτητας  $PS_v=(2\pi/T)S_d$ , προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$\frac{PS_{v,0,max}}{CAD} = \frac{\pi^2}{2T_p} \quad \text{για μηδενική απόσβεση} \quad (2.8)$$

$$\frac{PS_{v,\xi,max}}{CAD} = \frac{\pi(1 - e^{-2\pi\gamma\xi})(1 + (\gamma - 1)\xi)}{4\gamma\xi T_p} \quad \text{για απόσβεση } \xi \neq 0 \quad (2.9)$$

όπου,  $PS_{v,0}$  και  $PS_{v,\xi}$  υποδηλώνουν την ψευδοταχύτητα για μηδενική και για ίση με  $\xi$  απόσβεση, αντίστοιχα. Στη συνέχεια γίνεται χρήση των παραπάνω σχέσεων για τον υπολογισμό του εύρους.

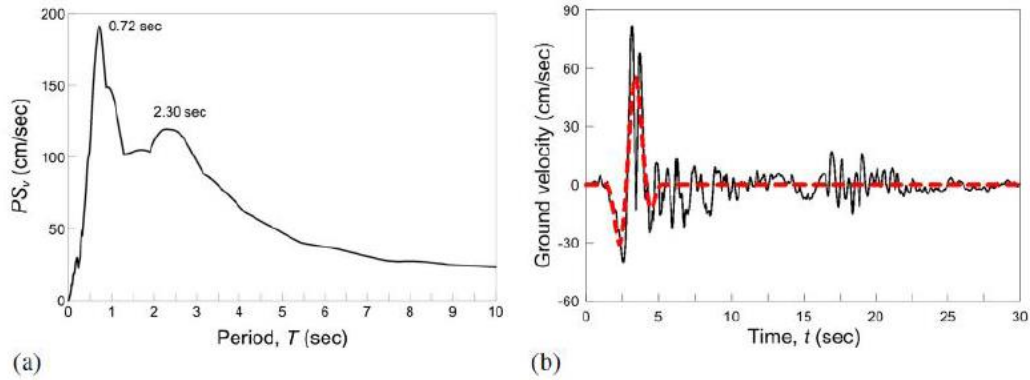


Σχήμα 2. 1 Σχέση μεταξύ της μέγιστης φασματικής μετακίνησης  $S_{d,max}$  και CAD για κυματίδιο M&P και διάφορες τιμές  $\gamma$  και  $\nu$ . (a) μηδενική απόσβεση (b) απόσβεση 5% (Mimoglou et al 2014)

## 2.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΔΩΝ ΤΩΝ ΣΗΜΑΝΤΙΚΩΝ ΠΑΛΜΩΝ

Μια κοινή πρακτική για την εκτίμηση της περιόδου  $T_p$  του δεσπόζοντος παλμού που περιέχεται στις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου ήταν η τιμή της περιόδου για την οποία το ελαστικό φάσμα απόκρισης της ψευδοταχύτητας (PSV) για απόσβεση 5% εμφανίζει τη μέγιστη αιχμή του. Ωστόσο, η ακρίβεια της διαδικασίας αυτής έχει αμφισβητηθεί από αρκετούς ερευνητές ((Rodriguez-Marek, 2000), (Baker, 2007)).

Ένα παράδειγμα στο οποίο αποδεικνύεται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος οδηγεί σε εσφαλμένα αποτελέσματα δίνεται στο Σχήμα 2.2 για την καταγραφή #38 (Petrolia, Cape Mendocino (1992)). Στην περίπτωση αυτή, η περίοδος που αντιστοιχεί στη μέγιστη ψευδοταχύτητα ισούται με 0.72sec (Σχήμα 2.2a). Η περίοδος παλμού που υπολογίστηκε από τον Baker για τη συγκεκριμένη καταγραφή είναι 3.00sec ενώ η περίοδος που προκύπτει από την προτεινόμενη μεθοδολογία είναι 2.74sec, πλησιέστερα σε αυτήν του Baker. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2a, οι τιμές αυτές προσεγγίζουν την περίοδο που αντιστοιχεί στη δεύτερη μεγαλύτερη κορυφή του φάσματος ψευδοταχυτήτων που είναι ίση με 2.30sec. Στο Σχήμα 2.2b, η χρονοϊστορία του παλμού που προσδιορίζεται με την νέα μέθοδο συγκρίνεται με την χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας: είναι προφανές ότι το κυματίδιο M&P με περίοδο 2.74sec αναπαριστά ικανοποιητικά τον παλμό που εμπεριέχεται στην καταγραφή, ενώ ένα κυματίδιο με περίοδο 0.72sec, όπως προτείνεται από την μέγιστη αιχμή του φάσματος ψευδοταχύτητας, θα αντιστοιχούσε σε μία υψίσυχη συνιστώσα της κίνησης και όχι στον κύριο παλμό ταχύτητας.



Σχήμα 2. 2 Καταγραφή Petrolia από το σεισμό στο Cape Mendocino, 1992. (a) Φάσμα ψευδοταχύτητας για απόσβεση 5%, (b) χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας και ο υπολογισμένος δεσπόζων παλμός (Mimoglou 2014).

Ένας εναλλακτικός υπολογισμός της περιόδου  $T_p$  από το φάσμα απόκρισης ψευδοταχύτητας θα ήταν με την χρήση του φάσματος απόκρισης μετακινήσεων. Αυτή σκέψη προκύπτει από το γεγονός ότι το φάσμα μετακίνησης είναι μια ικανοποιητική περιβάλλουσα του φάσματος ταχύτητας Fourier, όπως συμβαίνει και με το φάσμα ταχύτητας για μηδενική απόσβεση το οποίο θεωρείται περιβάλλουσα του φάσματος εδαφικής επιτάχυνσης Fourier. Πράγματι, όπως αποδεικνύεται από τον Hudson,

$$\tilde{a}_g(\omega) \leq S_{v,o}(\omega) \quad (2.10)$$

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

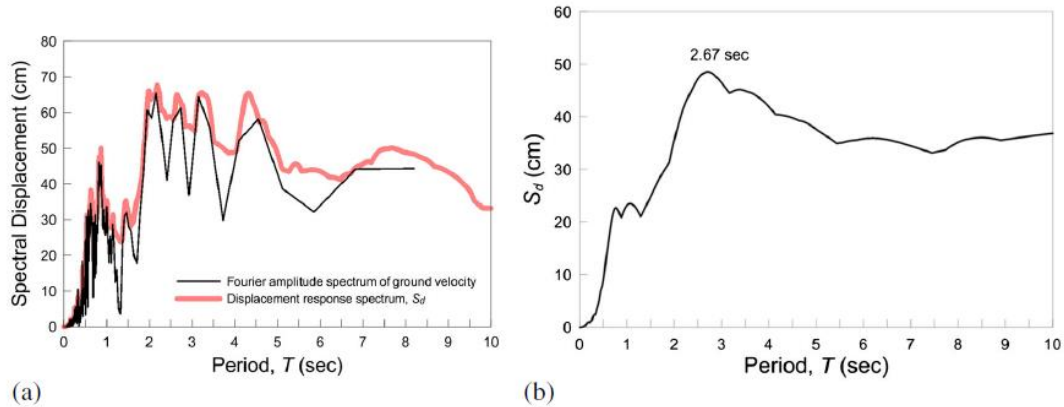
Για ταλαντωτές με μηδενική απόσβεση ( $\xi=0$ ), μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας  $S_{v,o}(\omega)$  συμπίπτει με το φάσμα απόκρισης της ψευδοταχύτητας  $PS_{v,o}(\omega)$ , εκτός από τις περιοχές μεγάλων περιόδων. Έτσι, σε ένα μεγάλο εύρος περιόδων, μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι  $S_{v,o}(\omega) = \omega S_{d,o}(\omega)$ , όπου  $S_{d,o}(\omega)$  είναι το φάσμα μετακίνησης για μηδενική απόσβεση. Έπειτα, διαιρώντας και τα δύο μέλη της Εξίσωσης (2.10) με  $\omega$  και λαμβάνοντας υπόψη ότι  $\tilde{a}_g(\omega)/\omega = \tilde{v}_g(\omega)$ , όπου  $\tilde{v}_g(\omega)$  το φάσμα Fourier της εδαφικής ταχύτητας, προκύπτει:

$$\tilde{v}_g(\omega) \leq S_{d,o}(\omega) \quad (2.11)$$

το οποίο δείχνει ότι το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης είναι μια επαρκής περιβάλλουσα καμπύλη του φάσματος Fourier για την εδαφική ταχύτητα. Ένα παράδειγμα δίνεται στο Σχήμα 2.3 για την ίδια καταγραφή #38 (Petrolia, Cape Mendocino (1992)).

Βασιζόμενοι στην παραπάνω ιδιότητα και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο παλμός είναι διακριτός στη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας, θα ήταν εύλογη η εκτίμηση της

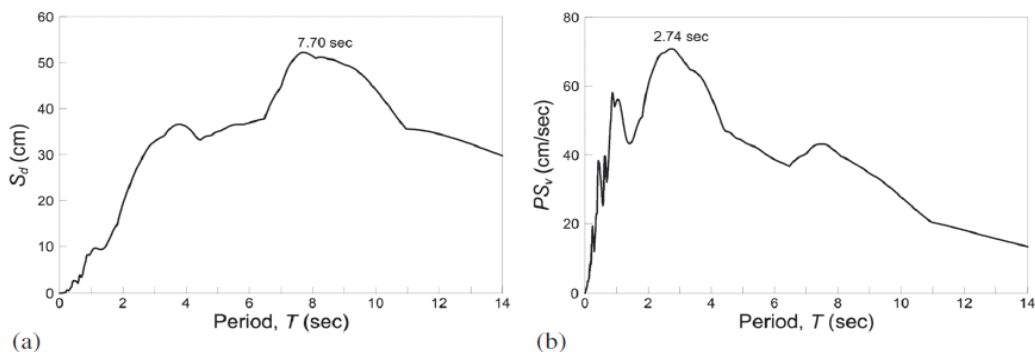
περιόδου  $T_p$  από τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης μετακινήσεων για απόσβεση 5%, έναντι του φάσματος ψευδοταχυτήτων. Για την καταγραφή #38, προκύπτει ότι  $T_p = 2.67$  sec (Σχήμα 2(b)), η οποία είναι κοντά στις προαναφερθείσες τιμές της περιόδου παλμού όπως υπολογίστηκαν από τον Baker (3.0 sec) και με την μεθοδολογία των *Mimoglou et al* (2.74 sec).



Σχήμα 2. 3 Καταγραφή #38 (Πίνακας 2.1). (α) σύγκριση του φάσματος Fourier της εδαφικής ταχύτητας με το φάσμα απόκρισης μετακίνησης για μηδενική απόσβεση και (β) φάσμα απόκρισης μετακίνησης για 5% απόσβεση.

Πρέπει να σημειωθεί ωστόσο, ότι η χρήση του φάσματος μετακινήσεων ενδέχεται να μην είναι προβληματική. Ένα μεγάλο πρόβλημα εντοπίζεται στο γεγονός ότι η μέγιστη τιμή της μετακίνησης μπορεί να επηρεαστεί από την παρουσία σφαλμάτων σε μεγάλες περιόδους στην καταγραφή της εδαφικής επιτάχυνσης. Επίσης, η κορυφή του φάσματος μετακινήσεων είναι πιθανό να αντιστοιχεί σε παλμό που περικλείει μεγάλο εμβαδόν αλλά έχει μικρό πλάτος και ο οποίος να μην είναι ο κυρίαρχος.

Επιπρόσθετα, αυτός ο εναλλακτικός ορισμός της περιόδου  $T_p$  μέσω της δεσπόζουσας περιόδου του φάσματος απόκρισης μετακίνησης δεν μπορεί να γενικευθεί καθώς υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες δεν έχει ισχύ. Για παράδειγμα, η δεσπόζουσα περίοδος του φάσματος μετακινήσεων της καταγραφής #20 του Πίνακα 2.1 που φαίνεται στο Σχήμα 2.4 (*Parachute Test Site, Westmorland (1981)*) ισούται με 7.70sec, λίγο μεγαλύτερη από την περίοδο που υπολογίστηκε από τον Baker ( $T_p=3.60$ sec) και από τους *Mimoglou et al*. ( $T_p=3.00$ sec).



Σχήμα 2. 4 Καταγραφή #20 (Πίνακας 2.1). (α) φάσμα απόκρισης μετακίνησης για απόσβεση 5% και (β) φάσμα απόκρισης ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5%.



Είναι σαφές λοιπόν, ότι ούτε το φάσμα ψευδοταχύτητας, αλλά ούτε και το φάσμα απόκρισης μετακίνησης μπορεί να γενικευθεί για τον προσδιορισμό της περιόδου του παλμού, καθώς υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι δύο προσεγγίσεις οδηγούν σε ιδιαίτερα διαφορετικά αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει διότι πολλές παλμικές καταγραφές επηρεάζονται από περισσότερους από έναν παλμούς με διαφορετικές περιόδους.

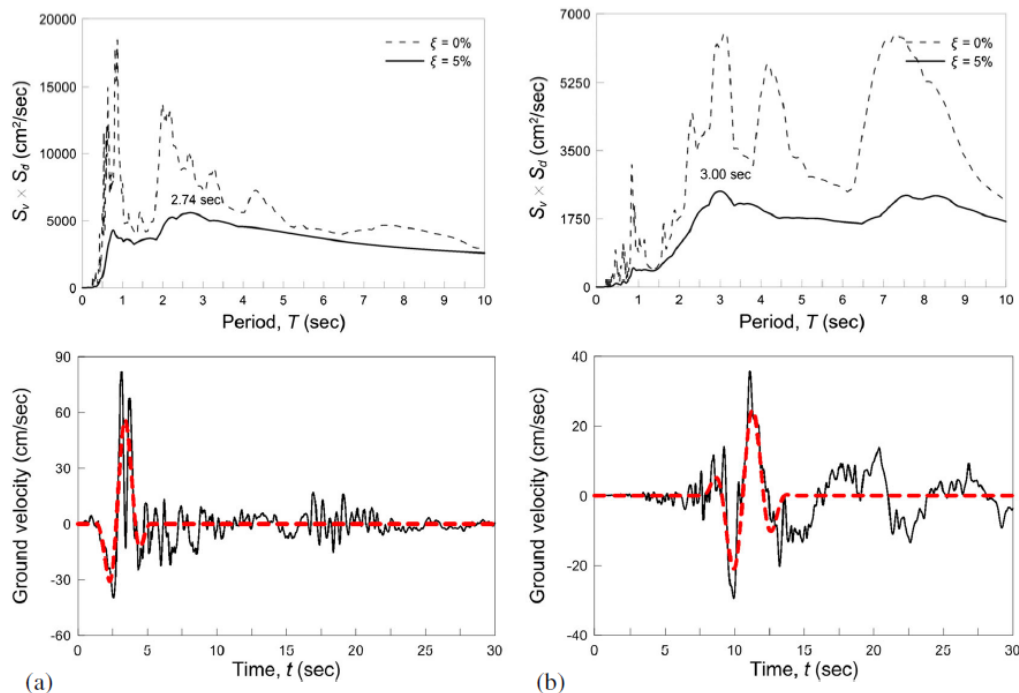
Η μεθοδολογία των *Mimoglou et al.* επιτρέπει την αναγνώριση του κυρίαρχου παλμού μέσω ενός συνδυασμού των φασμάτων απόκρισης ταχυτήτων και μετακινήσεων. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στην παρατήρηση ότι επειδή ο παλμός επηρεάζει τόσο την εδαφική επιτάχυνση όσο και την εδαφική ταχύτητα, σε διαφορετικό βαθμό βέβαια, η περίοδος  $T_P$  θα πρέπει να δεσπόζει στο ολοκλήρωμα της συνέλιξης των δύο αυτών χρονοϊστοριών. Συνεπώς, ο παλμός κατευθυντικότητας θα αντιστοιχεί στην κορυφή του φάσματος Fourier της συνέλιξης της επιτάχυνσης και της ταχύτητας.

Όπως είναι γνωστό, το φάσμα Fourier του ολοκληρώματος συνέλιξης ισούται με το γινόμενο των φασμάτων Fourier των συνελιχθέντων σημάτων. Από την άλλη πλευρά, όπως προαναφέρθηκε, το φάσμα ταχύτητας για μηδενική απόσβεση,  $S_{V,0}$ , αποτελεί την περιβάλλουσα του φάσματος εδαφικής επιτάχυνσης Fourier και το φάσμα μετακίνησης για μηδενική απόσβεση,  $S_{d,0}$ , είναι αντίστοιχα η περιβάλλουσα του φάσματος Fourier ταχύτητας. Χρησιμοποιώντας αυτές τις ιδιότητες, το φάσμα Fourier του ολοκληρώματος συνέλιξης μπορεί να υπολογιστεί ως γινόμενο των  $S_{d,0}(\omega) \times S_{V,0}(\omega)$  το οποίο θα αναφέρεται πλέον ως *φάσμα συνέλιξης* (convolution spectrum). Αντίστοιχα η περίοδος του παλμού κατευθυντικότητας, μπορεί πλέον να υπολογιστεί από τις κορυφές του φάσματος συνέλιξης.

Παρόλο που το πιο πάνω συμπέρασμα έχει εφαρμογή στο φάσμα  $S_d \times S_V$  για μηδενική απόσβεση, στη μέθοδο των *Mimoglou et al.* προτείνεται ο προσδιορισμός της περιόδου να γίνεται μέσω του φάσματος  $S_d \times S_V$  για απόσβεση 5%, που ορίζεται ως  $S_{d,5} \times S_{V,5}$ , όπου  $S_{d,5}$  και  $S_{V,5}$  είναι τα φάσματα μετακίνησης και ταχύτητας για απόσβεση 5%, αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η περίοδος που προκύπτει από το φάσμα για μηδενική απόσβεση, δεν συμπίπτει απαραίτητα με την αντίστοιχη για απόσβεση 5%. Ωστόσο, προτείνεται από τους ερευνητές η χρήση των φασμάτων για  $\xi=5\%$ , διότι τα αποτελέσματα συνάδουν καλύτερα με αυτά του Baker, τα οποία χρησιμοποιούνται ως δείκτες αναφοράς. Επιπρόσθετα, τα φάσματα απόκρισης για  $\xi=5\%$ , που είναι και πιο σημαντικά από αυτά με την μηδενική απόσβεση για την αντισεισμική μηχανική, προσεγγίζουν καλύτερα τα αντίστοιχα φάσματα των εξαγόμενων παλμών.

Στα επόμενα, θα χρησιμοποιείται μόνο το φάσμα για 5% απόσβεση και θα συμβολίζεται ως  $S_d \times S_V$ .

Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης διαδικασίας φαίνεται στο Σχήμα 2.5, όπου έγινε χρήση του  $S_d \times S_v$  για τον προσδιορισμό των περιόδων των καταγραφών #38 και #20. Στην πρώτη περίπτωση, η περίοδος παλμού σύμφωνα με τον Baker ισούται με 3.00sec και σχετίζεται με την δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως: χρησιμοποιώντας την κορυφή του φάσματος συνέλιξης, η περίοδος είναι ίση με  $T_p=2.74\text{sec}$ . Στην δεύτερη περίπτωση, η περίοδος σύμφωνα με τον Baker ισούται με 3.60sec και σχετίζεται με το φάσμα απόκρισης ψευδοταχύτητας: χρησιμοποιώντας την κορυφή του φάσματος συνέλιξης, η περίοδος είναι ίση με  $T_p=3.00\text{sec}$ . Έτσι, φαίνεται ότι η χρήση του φάσματος συνέλιξης για απόσβεση 5% οδηγεί σε περιόδους αρκετά πλησίον αυτών που ορίστηκαν από τον Baker.



Σχήμα 2. 5 Καταγραφές (a) #38 και (b) #20 (Πίνακας 2.1). Πάνω σειρά, καθορισμός της περιόδου του παλμού από την κορυφή του φάσματος συνέλιξης για απόσβεση 5% (συγκρίνεται με την αντίστοιχη για μηδενική απόσβεση). Κάτω σειρά, σύγκριση των χρονοϊστοριών ταχύτητας του εξαγόμενου κυματίδιου M&P με της αρχικής καταγραφής.

Επιπλέον, επισημαίνεται ότι πέραν του εντοπισμού του βασικού παλμού κατευθυντικότητας, το φάσμα συνέλιξης επιτρέπει και τον εντοπισμό και πρόσθετων παλμών. Ένα παράδειγμα αποτελεί η καταγραφή #20 η οποία φαίνεται να περιέχει δύο σημαντικούς παλμούς, που αντιστοιχούν στις δύο μεγαλύτερες κορυφές του φάσματος  $S_d \times S_v$ , με αρκετά διαφορετικές περιόδους (ευδιάκριτοι τόσο στο γινόμενο φάσμα όσο και στη χρονοϊστορία της ταχύτητας). Το γεγονός ότι ίσως απαιτούνται περισσότεροι του ενός παλμού για τον προσδιορισμό της εδαφικής κίνησης είχε σημειωθεί και από τους Manroedis and Parageorgiou (2003). Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητος ο συνδυασμός περισσότερων κυματιδίων προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική αναπαράσταση της αρχικής καταγραφής. Στην προκειμένη περίπτωση, για τον προσδιορισμό της  $T_p$  επιλέγεται η περίοδος που αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο εύρος του  $S_d \times S_v$  για  $\xi=5\%$ .

## 2.4 ΕΥΡΟΣ, ΔΙΑΡΚΕΙΑ, ΔΙΑΦΟΡΑ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΙΓΜΗ ΕΝΑΡΞΗΣ ΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ

Μετά τον προσδιορισμό της περιόδου  $T_p$ , οι εναπομένουσες παράμετροι του κυματιδίου  $M\&P$  (το πλάτος  $A$  της περιβάλλουσας, η διάρκεια του κυματιδίου  $\gamma$  και η διαφορά φάσης  $\nu$ ) υπολογίζονται έτσι ώστε το φάσμα απόκρισης μετακινήσεων του παλμού για απόσβεση 5% να συμπίπτει κατά το δυνατόν καλύτερα με το αντίστοιχο φάσμα της καταγραφής. Ωστόσο, καθώς η ψευδοταχύτητα συνδέεται άμεσα με τη μετακίνηση μέσω της σχέσης  $PSV = \omega S_d$ , το κυματίδιο θα συμπίπτει επίσης και με το φάσμα απόκρισης ψευδοταχυτήτων.

Ο καθορισμός των τριών υπολοίπων παραμέτρων του κυματιδίου  $A$ ,  $\gamma$  και  $\nu$  επιτυγχάνεται με χρήση της παραμέτρου  $CAD$  (*Cumulative Absolute Displacement*). Για τα κυματίδια  $M\&P$ , η τιμή του  $CAD$  συνδέεται άμεσα με το πλάτος  $A$  και την διάρκεια  $\gamma$ , λόγω της ακόλουθης σχέσης:

$$CAD = \frac{\gamma A T_p}{\pi} \quad (2.12)$$

Για την καλύτερη σύμπτωση των φασμάτων, αντικαθίσταται το  $CAD$  στην Εξίσωση (2.9) μέσω της Εξίσωσης (4.12), και η  $PS_{V,\xi,max}$  με  $PS_{V,\xi}(T_p)$ , η οποία είναι η τιμή της ψευδοταχύτητας για περίοδο  $T_p$  και απόσβεση  $\xi$  και προκύπτει:

$$A = \frac{4\xi PS_{V,\xi}(T_p)}{(1 - e^{-2\pi\gamma\xi})(1 + (\gamma - 1)\xi)} \quad (2.13)$$

Συνήθως χρησιμοποιείται το φάσμα ψευδο-ταχυτήτων για απόσβεση 5%. Σημειώνεται επίσης ότι το φάσμα απόκρισης μετακινήσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί για αυτό των ψευδοταχυτήτων, καθώς  $PS_v(T_p) = (2\pi/T_p)S_d(T_p)$ . Για τον προσδιορισμό του πλάτους  $A$  από την Εξίσωση (2.13), η τιμή της διάρκειας  $\gamma$  πρέπει να είναι γνωστή. Επειδή όμως πρόκειται για μία άγνωστη παράμετρο, εξετάζονται όλες οι τιμές του  $\gamma$  σε ένα επιλεγμένο εύρος τιμών. Από όλα τα ζεύγη  $(A,\gamma)$ , απορρίπτονται εκείνα τα οποία δίνουν τιμές του πλάτους επιτάχυνσης, ταχύτητας ή μετακίνησης μεγαλύτερες από τις μέγιστες τιμές εδαφικής επιτάχυνσης ( $PGA$ ), ταχύτητας ( $PGV$ ) ή μετακίνησης ( $PGD$ ), αντίστοιχα.

Για τα εναπομείναντα αποδεκτά ζεύγη  $(A,\gamma)$ , και για όλες τις τιμές της διαφοράς φάσης  $\nu$  μεταξύ  $0^\circ$  και  $360^\circ$ , υπολογίζονται τα αντίστοιχα κυματίδια. Για κάθε ένα από αυτά τα κυματίδια, εξετάζονται διάφορες τιμές της χρονικής υστέρησης  $t_d$  για την έναρξη του παλμού. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται ένα σύνολο υποψήφιων κυματιδίων, κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί σε διαφορετικό συνδυασμό παραμέτρων  $A$ ,  $\gamma$ ,  $\nu$  και  $t_d$ . Από τις αντίστοιχες ιστορίες παλμών,  $v_p(A,\gamma,\nu,t_d,t)$ , επιλέγεται το κυματίδιο που σχετίζεται καλύτερα με τη χρονοϊστορία της εδαφικής

ταχύτητας,  $v_g(t)$ . Έτσι, υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης  $r$  για κάθε ζεύγος χρονοϊστοριών  $(v_p, v_g)$  και επιλέγεται ο παλμός με το μεγαλύτερο  $r$ . Ακολουθώντας αυτή τη διαδικασία, μέσω του συντελεστή  $r$  δεν προσδιορίζεται μόνο ο παλμός που ταιριάζει καλύτερα στη χρονοϊστορία της ταχύτητας, αλλά και η στιγμή έναρξής του,  $t_d$ . Πρέπει να σημειωθεί ότι στην προτεινόμενη από τους *Manroeidis & Papageorgiou* (2003) μέθοδο, αντί για τη χρονική υστέρηση  $t_d$  χρησιμοποιείται η χρονική στιγμή  $t_0$  (περιοχή της κορυφής της περιβάλλουσας του κυματιδίου) για τον καθορισμό του παλμού. Η τιμή αυτή μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σχέσης  $t_0 = t_d + \gamma \frac{T_p}{2}$ .

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ ΣΤΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ  
ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΝΕΛΙΞΗΣ**

*Πίνακας 2. 1 Παλμικές κινήσεις που μελετήθηκαν και οι παράμετροι που προέκυψαν με την εφαρμογή της μεθόδου*

<b>Number</b>	<b>NGA Number</b>	<b>Event</b>	<b>Year</b>	<b>Station</b>	<b><math>T_p(s)</math></b>	<b>A (cm/s)</b>	<b><math>\gamma</math></b>	<b><math>\nu(^{\circ})</math></b>	<b><math>t_d(s)</math></b>
1	77	San Fernando	1971	Pacoima Dam (upper left abut)	1.41	96.55	1.8	5	1.79
2	150	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #6	0.94	44.94	1.6	355	1.93
3	158	Imperial Valley-06	1979	Aeropuerto Mexicali	1.64	46.78	2.1	345	3.64
4	159	Imperial Valley-06	1979	Agrarias	1.9	44.04	2	25	5.87
5	161	Imperial Valley-06	1979	Brawley Airport	4.78	48.66	1.1	100	5.47
6	170	Imperial Valley-06	1979	EC County Center FF	4.17	52.27	1.5	130	3.77
7	171	Imperial Valley-06	1979	EC Meloland Overpass FF	3.01	114.85	1.4	0	2.86
8	173	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #10	6.08	58.79	1.1	140	3.66
9	174	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #11	6.39	18.55	2.9	245	0.6
10	178	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #3	5.55	39.65	1.2	180	5
11	179	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #4	4.32	71.39	1.9	125	2
12	180	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #5	3.79	86.02	1.8	135	3.37
13	181	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #6	3.94	97.47	1.9	85	2.62
14	182	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #7	3.44	74.5	2.2	45	2.52
15	183	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #8	5.08	69.5	1.1	80	3.37
16	184	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array Differential Array	5.86	60.43	1.1	70	2.66
17	185	Imperial Valley-06	1979	Holtville Post Office	4.24	47.52	1.7	175	3.35
18	250	Mammoth Lakes-06	1980	Long Valley Dam (Upr L Abut)	1.14	34.99	1.4	300	4.59
19	292	Irpinia, Italy-01	1980	Sturno	2.64	23.95	5.6	110	1.13
20	316	Westmorland	1981	Parachute Test Site	3	25.91	2.2	300	7.54
21	407	Coalinga-05	1983	Oil City	0.56	35.39	3.4	0	2.22
22	415	Coalinga-05	1983	Transmitter Hill	0.75	44.06	3.2	310	2
23	418	Coalinga-07	1983	Coalinga-14th & Elm(Old CHP)	0.38	44.6	1.5	135	2.54
24	451	Morgan Hill	1984	Coyote Lake Dam (SW Abut)	0.77	42.78	4.2	300	2.3
25	459	Morgan Hill	1984	Gilroy Array #6	1.17	31.87	2.6	235	4.45
26	503	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 C00	1.49	29	2.1	215	5.91
27	508	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 M07	1.39	35.07	2.1	215	10.29
28	529	N. Palm Springs	1986	North Palm Springs	1.44	56.48	1.5	345	1.8
29	568	San Salvador	1986	Geotech Investig Center	0.7	68.43	2.2	190	0.63
30	615	Whittier Narrows-01	1987	Downey - Co Maint Bldg	0.81	27.35	2.5	260	4.36
31	645	Whittier Narrows-01	1987	LB - Orange Ave	0.78	30.64	2.4	255	5.1
32	723	Superstition Hills-02	1987	Parachute Test Site	2.41	117.66	1.5	80	10.65
33	738	Loma Prieta	1989	Alameda Naval Air Stn Hanger	2.31	48.18	1.1	315	10.87
34	766	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #2	1.54	28.64	4.8	270	1.16
35	783	Loma Prieta	1989	Oakland - Outer Harbor Wharf	1.51	30.82	3.5	255	10.83
36	802	Loma Prieta	1989	Saratoga - Aloha Ave	6.48	36.31	1.2	180	3.1
37	821	Erzican, Turkey	1992	Erzincan	2.42	89.81	1.7	20	1.58
38	828	Cape Mendocino	1992	Petrolia	2.74	57.86	1.5	325	1.13
39	838	Landers	1992	Barstow	7.57	22.97	1.7	135	11.2
40	879	Landers	1992	Lucerne	4.57	96.72	1.6	65	7.03

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ ΣΤΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ  
ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΝΕΛΙΞΗΣ

41	900	Landers	1992	Yermo Fire Station	8.73	56.46	1.1	160	13.28
42	982	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant	2.94	60.02	3	285	0
43	983	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant Generator	2.94	60.02	3	285	0
44	1009	Northridge-01	1994	LA - Wadsworth VA Hospital North	2.35	41.98	1.1	110	8.16
45	1013	Northridge-01	1994	LA Dam	2.17	76.26	1.1	220	1.78
46	1045	Northridge-01	1994	Newhall - W Pico Canyon Rd.	2.39	117.85	1.2	290	3.82
47	1050	Northridge-01	1994	Pacoima Dam (downstr)	3.37	11.71	3.2	25	0.04
48	1051	Northridge-01	1994	Pacoima Dam (upper left )	0.9	100.31	1.6	255	3.26
49	1063	Northridge-01	1994	Rinaldi Sta	1.11	132.51	1.9	240	1.55
50	1084	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta	2.95	73.38	3.3	330	0
51	1085	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta East	3.06	89.17	1.6	175	1.15
52	1086	Northridge-01	1994	Sylmar - Olive View Med FF	2.56	61.88	3.6	355	0.37
53	1119	Kobe, Japan	1995	Takarazuka	1.23	55.97	2.3	145	3.82
54	1120	Kobe, Japan	1995	Takatori	2.08	126.46	3.1	295	3.56
55	1161	Kocaeli, Turkey	1999	Gebze	4.88	42.18	1.8	190	3.37
56	1182	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY006	1.83	59.14	2	170	32.8
57	1202	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY035	1.51	32.83	4	295	32.27
58	1244	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY101	5.59	99.04	1.1	325	35.49
59	1410	Chi-Chi, Taiwan	1999	TAP003	2.8	25.13	3.6	10	21.88
60	1476	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU029	5.72	63.23	1.8	20	46.24
61	1477	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU031	5.33	58.44	2.3	45	47.98
62	1479	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU034	7.11	24.47	2.6	210	38.49
63	1480	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU036	5.26	61.86	2	235	42.32
64	1481	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU038	5.91	52.56	2	295	42.77
65	1483	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU040	5.68	59.94	1.9	265	43.61
66	1484	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU042	7.19	23.15	4	325	36.96
67	1486	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU046	7.57	28.39	2.5	220	31.14
68	1489	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU049	11.49	42.87	1.5	5	28.49
69	1493	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU053	9.8	27.25	2.2	5	26.92
70	1494	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU054	9.52	48.97	1.4	345	29.21
71	1496	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU056	11.74	23.59	2.1	145	26.15
72	1499	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU060	11.47	23.94	2.2	95	25.04
73	1503	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU065	4.73	82.41	3.7	70	23.65
74	1505	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU068	12.04	183.96	1.6	190	30.6
75	1510	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU075	5.52	96.87	1.3	310	25.8
76	1511	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU076	5.38	53.86	1.1	35	25.77
77	1515	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU082	7.88	44.81	1.7	355	29.04
78	1519	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU087	9.15	56.22	1.1	75	36.14
79	1526	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU098	5.51	18.62	4	85	41.79
80	1528	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU101	9.86	56.4	1.3	145	13.15
81	1529	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU102	9.3	87.11	1.1	70	32.94
82	1530	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU103	8.17	89.32	1.1	110	36.5
83	1531	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU104	11.01	21.6	2.5	170	28.34
84	1548	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU128	7.45	107.9	1.1	90	40.18
85	1550	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU136	10.56	60.31	1.1	170	36.72
86	1752	Northwest China-03	1997	Jiashi	1.34	39.33	1.1	40	4.9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ ΣΤΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ  
ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΝΕΛΙΞΗΣ

87	1853	Yountville 2000	2000	Fire Station #3	2.42	32.53	2.6	330	22.71
88	2457	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY024	0.7	43.01	1.7	175	12.58
89	2495	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY080	2.96	36.58	2.2	170	10.13
90	2627	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	TCU076	1.14	59.72	3.6	110	9.19
91	3317	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY101	0.88	61.24	1.4	315	9.78





---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΑΥΕΝΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

---



### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Η Προσαυξητική Δυναμική Ανάλυση (*Incremental Dynamic Analysis – IDA*) είναι μία παραμετρική μέθοδος ανάλυσης, η οποία εμφανίστηκε πρόσφατα σε διάφορες μορφές, προκειμένου να εκτιμήσει εκτενέστερα τη συμπεριφορά των κατασκευών υπό σεισμικά φορτία. Περιλαμβάνει την υποβολή του μοντέλου κάποιας κατασκευής σε μία (ή περισσότερες) καταγραφές εδαφικής κίνησης, η καθεμία από τις οποίες κλιμακώνεται σε διάφορα επίπεδα έντασης, παράγοντας έτσι μία (ή περισσότερες) καμπύλες απόκρισης ως προς κάποιο επίπεδο έντασης.

Η ανάπτυξη της υπολογιστικής ισχύος επιτρέπει την αναζήτηση ολοένα ακριβέστερων αλλά και συνθετότερων μεθόδων ανάλυσης. Έτσι, η κατάσταση της τεχνολογίας έχει προχωρήσει σταδιακά από την ελαστική στατική ανάλυση στη δυναμική ελαστική, την ανελαστική στατική και τελικώς στην ανελαστική δυναμική ανάλυση. Στην τελευταία περίπτωση, το σύνηθες ήταν το τρέξιμο διαφόρων καταγραφών, από μία φορά την κάθε μία, και η παραγωγή μίας ή περισσότερων αναλύσεων του «ενός σημείου», οι οποίες χρησιμοποιούνταν κατά κύριο λόγο για τον έλεγχο της σχεδιασθείσας κατασκευής. Από την άλλη πλευρά, μέθοδοι όπως η «μη-γραμμική στατική υπερωθητική» (Pushover) ή η «φασματικής ικανότητας» προσφέρουν, με κατάλληλη βαθμονόμηση του τρόπου στατικής φόρτισης, μία «συνεχή» εικόνα, καθώς εξετάζεται ολόκληρο το εύρος της συμπεριφοράς της κατασκευής, από την ελαστικότητα μέχρι τη διαρροή και τελικώς την κατάρρευση, διευκολύνοντας έτσι σημαντικά την κατανόηση του τρόπου παραμόρφωσης της κατασκευής.

Κατ' αναλογία με το πέρασμα από μία απλή στατική ανάλυση στην προσαυξητική στατική ανάλυση pushover, η ανάλυση των κατασκευών έχει προχωρήσει από μία απλή ανάλυση χρονοϊστορίας σε μία προσαυξητική (*Incremental Dynamic Analysis* ή *IDA*), στην οποία κλιμακώνεται η σεισμική «φόρτιση».

Η ιδέα απαντάται ήδη από το 1977 από τον Bertero και έχει προταθεί σε διάφορες μορφές στο έργο διαφόρων ερευνητών, συμπεριλαμβανομένων και των (Luco & Cornell, 2000), (Bazzurro & Cornell, 1994), (Yun, Hamburger, Cornell, & Foutch, 2002), (Mehanny & Deirlein, 2000), (Dubina, Ciutina, Stratan, & Dinu, 2000), (De Matteis, Landolfo, Dubina, & Stratan, 2000), (Nassar & Krawinkler, 1991) και (Psycharis, Papastamatiou, & Alexandris, 2000). Προσφάτως, έχει υιοθετηθεί και από τις οδηγίες της αμερικανικής FEMA ως «προσαυξητική δυναμική ανάλυση» (*Incremental Dynamic Analysis – IDA*) και έχει καθιερωθεί ως πλέον σύγχρονη μέθοδος για τον προσδιορισμό της γενικής ικανότητας κατάρρευσης μιας κατασκευής. Η μελέτη της IDA έχει πλέον ευρύτατη και πολυσχιδή εφαρμογή και οι στόχοι της, κάποιοι από τους οποίους φαίνονται στο Σχήμα 3.1α-β, περιλαμβάνουν:

1. Την κατανόηση σε βάθος του εύρους της απόκρισης της κατασκευής ή των «απαιτήσεων» σε σχέση με το εύρος των πιθανών διαβαθμίσεων του επιπέδου της έντασης των καταγραφών των εδαφικών κινήσεων.
2. Την καλύτερη κατανόηση των επιπτώσεων που επιφέρουν στην κατασκευή σπανιότερες ή αλλιώς σοβαρότερες εδαφικές κινήσεις.
3. Την καλύτερη κατανόηση των αλλαγών στη φύση της απόκρισης της κατασκευής καθώς αυξάνει το επίπεδο της έντασης της εδαφικής κίνησης (π.χ. αλλαγές στην καθ' ύψος απόκριση της κατασκευής, έναρξη της απομείωσης της δυσκαμψίας και αντοχής της κατασκευής καθώς και τα μοτίβα και την ένταση με την οποία εμφανίζονται τα παραπάνω).
4. Την εκτίμηση της δυναμικής ικανότητας ολόκληρου του φορέα.
5. Και τέλος, δοθέντος ενός συνόλου εδαφικών καταγραφών, την κατανόηση της ευστάθειας (ή αστάθειας) των παραπάνω παραγόντων από καταγραφή σε καταγραφή.

### **3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΙΔΑ ΓΙΑ ΜΙΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑΣ**

---

Σε πρώτη φάση, ας ορίσουμε με σαφήνεια όλους τους χρησιμοποιούμενους όρους και ας ξεκινήσουμε τη δόμηση της μεθοδολογίας που θα ακολουθήσουμε, χρησιμοποιώντας ως βασικό στοιχείο την ιδέα της κλιμάκωσης ενός επιταχυνσιογραφήματος.

Ας υποθέσουμε ότι μας δίνονται ένα επιταχυνσιογράφημα, το οποίο έχουμε επιλέξει από μια βάση δεδομένων επιταχυνσιογραφημάτων, στο οποίο θα αναφερόμαστε ως βασικό, όπως αυτό έχει καταγραφεί (παρ' όλο που μπορεί να έχει υποστεί κάποια επεξεργασία από σεισμολόγους), μη βαθμονομημένο επιταχυνσιογράφημα  $a_1$ , ένα διάγραμμα με στοιχεία  $a_1(t_i)$ ,  $t_i = 0, t_1, \dots, t_{n-1}$ . Προκειμένου να εξηγηθούν ισχυρότερες ή ηπιότερες εδαφικές κινήσεις, εισάγουμε έναν απλό μετασχηματισμό, βάσει του οποίου πολλαπλασιάζουμε το πλάτος επιταχυνσιογραφήματος με έναν κοινό προσαυξητικό ή μειωτικό συντελεστή  $\lambda \in (0, +\infty)$ :  $a_\lambda = \lambda \cdot a_1$ . Η παραπάνω διαδικασία ισοδυναμεί με τον πολλαπλασιασμό του φάσματος ελαστικής επιτάχυνσης με  $\lambda$  ή ισοδύναμα με τον πολλαπλασιασμό με  $\lambda$  των πλατών όλων των συχνοτήτων των συναρτήσεων του μετασχηματισμού Fourier, χωρίς να μεταβάλλουμε το φασικό περιεχόμενο.

**ΟΡΙΣΜΟΣ 1:** *Ο ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ (SCALE FACTOR – SF) ενός βαθμονομημένου επιταχυνσιογραφήματος  $a_1$  είναι ο θετικός αριθμητικός συντελεστής  $\lambda \in (0, +\infty)$  ο οποίος παράγει το  $a_\lambda$  όταν εφαρμοστεί πολλαπλασιαστικά στη μη-βαθμονομημένη (φυσική) χρονοϊστορία επιταχύνσεων  $a_1$ .*

Ας σημειωθεί εδώ ότι ο  $SF$  αποτελεί μια μία προς μία απεικόνιση του αρχικού επιταχυνσιογραφήματος σε όλες τις κλιμακωμένες εικόνες του. Το  $\lambda=1$  δηλώνει το αρχικό επιταχυνσιογράφημα, το  $\lambda < 1$  ένα μειωμένο, ενώ το  $\lambda > 1$  ένα αυξημένο.

Παρ' όλο που ο  $SF$  αποτελεί τον απλούστερο τρόπο περιγραφής των κλιμακωμένων εικόνων ενός επιταχυνσιογραφήματος, εντούτοις δεν προσφέρεται σε καμία περίπτωση για τους σκοπούς του μηχανικού, καθώς δεν παρέχει καμία πληροφορία για την πραγματική «ισχύ» της κλιμακωμένης καταγραφής, καθώς και της επίπτωσής της σε κάποια κατασκευή. Πρακτικότερο θα ήταν ίσως κάποιο μέγεθος το οποίο θα αποτελούσε μια μία προς μία απεικόνιση του  $SF$ , που όμως θα έδινε πληροφορίες για την ενδεχόμενη καταστροφική δύναμη του τελευταίου.

**ΟΡΙΣΜΟΣ 2:** Το ΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΜΙΑΣ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΣ ΚΛΙΜΑΚΟΥΜΕΝΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ (INTENSITY MEASURE –  $IM$ ) ενός βαθμονομημένου επιταχυνσιογραφήματος  $a_\lambda$  είναι ο θετικός αριθμητικός συντελεστής  $IM \in (0, +\infty)$  που αποτελεί μια συνάρτηση  $IM = f_{a1}(\lambda)$  και που εξαρτάται από το μη-βαθμονομημένο επιταχυνσιογράφημα  $a_1$  και μονοτονικά αυξάνει με τον αριθμητικό συντελεστή  $\lambda$ .

Παρ' όλο που έχουν προταθεί πολλές ποσότητες για το χαρακτηρισμό της «έντασης» μιας εδαφικής καταγραφής, δεν είναι πάντοτε προφανές το πώς αυτές θα κλιμακωθούν (π.χ. το Μέγεθος Σεισμικής Ροπής, η διάρκεια, η τροποποιημένη κλίμακα Έντασης Mercalli). Οι παραπάνω ποσότητες θα πρέπει να χαρακτηρισθούν ως μη-κλιμακούμενες. Συνήθη παραδείγματα κλιμακούμενων  $IM$ s αποτελούν η Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (PGA), η Μέγιστη Εδαφική Ταχύτητα, η Φασματική Επιτάχυνση για απόσβεση  $\xi=5\%$  για την πρώτη ιδιοπερίοδο της κατασκευής ( $Sa(T_1, 5\%)$ ) και ο κανονικοποιημένος συντελεστής  $R = \lambda / \lambda_{yield}$ , (όπου  $\lambda_{yield}$  για δεδομένη κατασκευή και επιταχυνσιογράφημα ο μικρότερος απαιτούμενος συντελεστής προκειμένου να προκληθεί διαρροή), ο οποίος είναι αριθμητικά ισοδύναμος με το μειωτικό συντελεστή ορίου διαρροής R-factor (για παράδειγμα για διγραμμικά μονοβάθμια συστήματα). Οι παραπάνω  $IM$  είναι ανάλογοι του  $SF$ , καθώς ικανοποιούν τη σχέση  $IM_{prop} = \lambda \cdot f_{a1}$ . Από την άλλη πλευρά, η ποσότητα  $S_{am}(T_1, \xi, a, b, c) = (Sa(T_1, \xi))^a \cdot (Sa(cT_1, \xi))^b$ , η οποία προτάθηκε από τους Shome και Cornell (1999) και (Mehanny & Deirlein, 2000) είναι μεν κλιμακούμενη και μονοτονική, όχι όμως αναλογική, εκτός αν  $a+b=1$ . Έχουν προταθεί επίσης κάποια μη-μονοτονικά  $IM$ s, όπως η ανελαστική μετακίνηση ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή από τους Lucio και Cornell, αλλά δεν θα εστιάσουμε σ' αυτά, ώστε εφεξής το  $IM$  θα σημαίνει απλουστευτικά μονοτονικό και κλιμακούμενο, εκτός αν ορίζεται διαφορετικά.

**ΟΡΙΣΜΟΣ 3:** ΜΕΤΡΟ ΒΛΑΒΗΣ (DAMAGE MEASURE –  $DM$ ) ή ΜΕΤΡΟ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ είναι ο θετικός αριθμητικός συντελεστής  $DM \in (0, +\infty)$  που χαρακτηρίζει την επιπλέον απόκριση του δομικού μοντέλου σ' ένα προκαθορισμένο σεισμικό φορτίο.

Με άλλα λόγια, ένα  $DM$  είναι μία αισθητή ποσότητα που είναι μέρος του αποτελέσματος ή μπορεί να συναχθεί από το αποτέλεσμα της αντίστοιχης μη-γραμμικής δυναμικής ανάλυσης. Πιθανές επιλογές θα μπορούσε να είναι η μέγιστη τέμνουσα βάση, οι στροφές των κόμβων, η μέγιστη πλαστιμότητα των ορόφων, διάφοροι άλλοι δείκτες βλάβης (όπως π.χ. η συνολική αθροιστική υστερητική ενέργεια, ο γενικός δείκτης Park–Ang (Ang & De Leon, 1997) ή ο δείκτης ευστάθειας κατά τον Mehanny (Mehanny & Deirlein, 2000), η μέγιστη μετακίνηση κορυφής, η

μέγιστη γωνία στροφής ορόφου  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  μιας κατασκευής με  $n$  ορόφους ή το μέγιστο αυτών,  $\theta_{max} = \max(\theta_1, \dots, \theta_n)$ . Η επιλογή του κατάλληλου  $DM$  εξαρτάται από τη χρήση του καθώς και από την ίδια την κατασκευή.

Μπορεί να είναι σκόπιμη η χρήση δύο ή και περισσότερων  $DMs$  (οι οποίοι προκύπτουν από τις ίδιες μη-γραμμικές αναλύσεις), προκειμένου να αποτιμήσουμε διαφορετικά χαρακτηριστικά της απόκρισης της κατασκευής, οριακές καταστάσεις ή τύπους αστοχίας. Αν θέλουμε να εκτιμήσουμε τις βλάβες σε μη-δομικά στοιχεία ενός πολυώροφου πλαισίου, είναι προφανής η επιλογή των μέγιστων επιταχύνσεων των ορόφων. Από την άλλη πλευρά, όταν πρόκειται για τις κατασκευαστικές βλάβες πλαισιωτών κτηρίων, η στροφή  $\theta_{max}$  σχετίζεται επαρκώς με τις στροφές των κόμβων, καθώς και με τη συνολική κατάρρευση της κατασκευής ή την τοπική κατάρρευση ορόφου και επομένως είναι ένας ισχυρός «υποψήφιος» για το  $DM$ .

**ΟΡΙΣΜΟΣ 4:** Μία ΜΕΛΕΤΗ IDA ΜΙΑΣ ΜΟΝΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ (SINGLE-RECORD IDA STUDY) είναι μια μελέτη δυναμικής ανάλυσης ενός δοσμένου μοντέλου κατασκευής που παραμετροποιείται από τον πολλαπλασιαστικό συντελεστή μιας δοσμένης ιστορίας εδαφικής κίνησης.

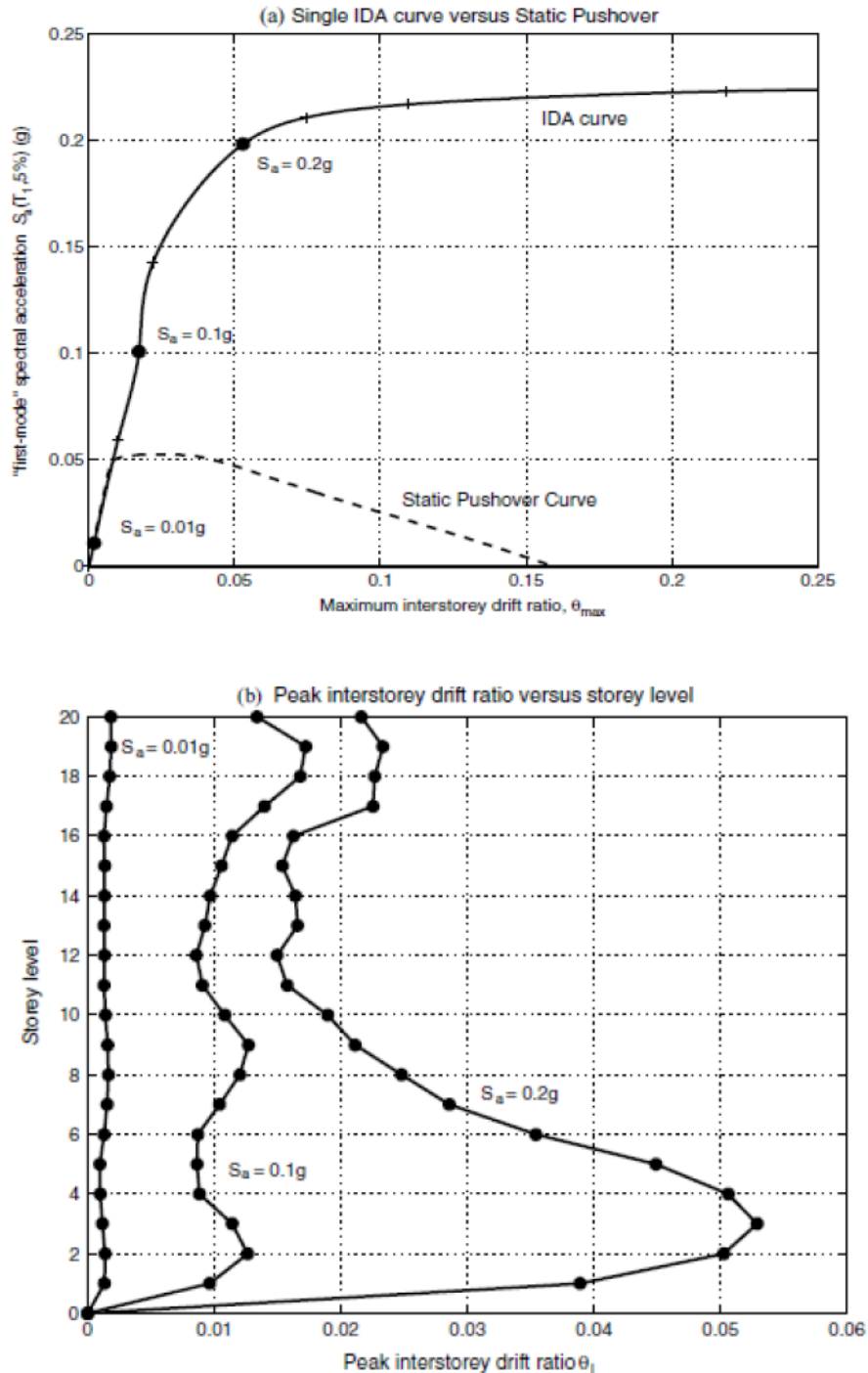
Γνωστή επίσης απλά και ως IDA ή δυναμική υπερωθητική ανάλυση (dynamic pushover – DPO), περιλαμβάνει μια σειρά δυναμικών ανελαστικών αναλύσεων εκτελουμένων επί τη βάση κλιμακωμένων εικόνων ενός επιταχυνσιογράφηματος, των οποίων τα IMs επιλέγονται, έτσι ώστε να καλύπτουν στην ιδανική περίπτωση ολόκληρο το εύρος απόκρισης της κατασκευής, από την ελαστική έως την ανελαστική απόκριση και τελικά την κατάρρευσή της. Σκοπός της είναι η καταγραφή των  $DMs$  του μοντέλου της κατασκευής σε κάθε επίπεδο IM της κλιμακωμένης εδαφικής κίνησης. Οι τιμές που προκύπτουν συχνά παριστάνονται γραφικά ως προς το επίπεδο έντασης ως συνεχείς καμπύλες.

**ΟΡΙΣΜΟΣ 5:** Μία ΚΑΜΠΥΛΗ IDA (IDA CURVE) είναι μία γραφική παράσταση ενός μέτρου κατάστασης της κατασκευής ( $DM$ ) σε μία μελέτη IDA σε σχέση με ένα ή περισσότερα IMs που χαρακτηρίζουν το εφαρμοζόμενο κλιμακωμένο επιταχυνσιογράφημα.

Μια καμπύλη IDA μπορεί να απεικονισθεί σε δύο ή περισσότερες διαστάσεις, ανάλογα με τον αριθμό των IMs. Προφανώς, τουλάχιστον ένας από αυτούς πρέπει να διαθέτει δυνατότητα κλιμάκωσης. Στη συνήθη πρακτική των μηχανικών, τέτοια διαγράμματα συχνά απεικονίζονται «ανάποδα», δηλαδή η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι το IM που θεωρείται ανάλογο προς τη «δύναμη» και παριστάνεται γραφικά στον κατακόρυφο άξονα (Σχήμα 3.1α), όπως σε μία καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης, δύναμης – μετατόπισης ή γραφήματα μη-γραμμικής στατικής ανάλυσης Pushover (SPO). Όπως είναι προφανές, τα αποτελέσματα μιας μελέτης IDA μπορούν να παρασταθούν γραφικά σ' ένα πλήθος διαφορετικών καμπυλών IDA, ανάλογα με την επιλογή των IMs και του  $DM$ .

Για την διευκρίνιση της ιδέας της IDA, θα χρησιμοποιήσουμε αρκετά μοντέλα πολλών βαθμών ελευθερίας (MDOF) και ενός βαθμού ελευθερίας (SDOF) κίνησης ως παραδείγματα στις επόμενες ενότητες. Ειδικότερα, τα μοντέλα MDOFs που χρησιμοποιούνται είναι ένα 2D-ώροφο μεταλλικό καμπτικό πλαίσιο με όλκιμα μέλη

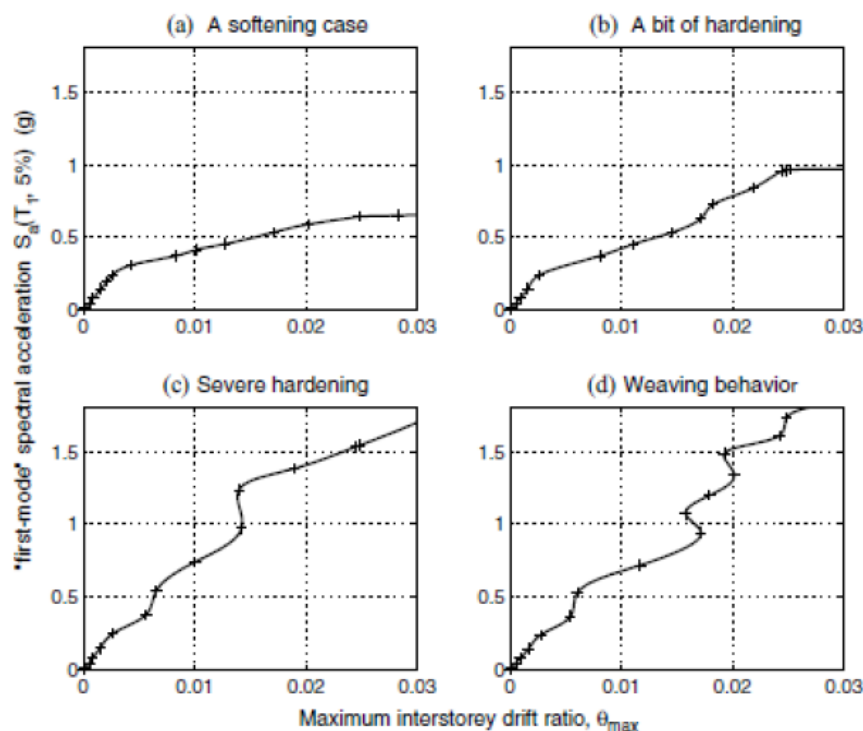
και συνδέσεις ( $T_1=4$  sec) (Luco & Cornell, 2000), που περιλαμβάνει μία πρώτης τάξεως αντιμετώπιση των γενικών γεωμετρικών μη-γραμμικοτήτων (P-Δ φαινόμενα), ένα 9-ώροφο κτίριο ( $T_1=2.2$  sec) και ένα 3-ώροφο ( $T_1=1.3$  sec) μεταλλικό καμπτικό πλαίσιο με όλκιμα μέλη (Luco & Cornell, 2000), ψαθυρές συνδέσεις και φαινόμενα P-Δ και τέλος ένα 5-ώροφο μεταλλικό πλαίσιο με συνδέσμους δυσκαμψίας, όλκιμα μέλη και συνδέσεις με φαινόμενα P-Δ ( $T_1=1.8$  sec) (Bazzurro & Cornell, 1994).



Σχήμα 3. 1 Ένα παράδειγμα της πληροφορίας που μπορεί να συναχθεί από μίας καταγραφής μελέτη IDA ενός 20ώροφου χαλύβδινου καμπτικού πλαισίου με όλκιμα μέλη και συνδέσεις, λαμβάνοντας υπόψη φαινόμενα P-Δ δευτέρας τάξεως, υποβαλλόμενο στην καταγραφή του El Centro (1940) (συνιστώσα παράλληλη στο ρήγμα).

### 3.3 ΓΕΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ IDA

Η μελέτη IDA αναφέρεται ειδικά στο εκάστοτε επιταχυνσιογράφημα και μοντέλο της κατασκευής. Υποβαλλόμενο σε διαφορετικές εδαφικές κινήσεις, ένα συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να παραγάγει πολύ ανόμοιες μεταξύ τους αποκρίσεις, οι οποίες είναι δύσκολο να προσδιορισθούν εκ των προτέρων. Παρατηρώντας, για παράδειγμα, το Σχήμα 3.2, διαπιστώνουμε ότι η απόκριση του εν λόγω πλαισίου κυμαίνεται από μια σταδιακή εξασθένηση προς κατάρρευση μέχρι μια γρήγορη, μη-μονοτονική, κυματοειδή συμπεριφορά. Κάθε ένα από τα γραφήματα παρουσιάζει τις απαιτήσεις που επιβάλλονται στην κατασκευή από κάθε εδαφική καταγραφή σε διάφορα επίπεδα έντασης και τόσο οι ομοιότητες όσο και οι ανομοιότητες τους παρουσιάζουν κάποιο ενδιαφέρον. Όλες οι καμπύλες παρουσιάζουν μια διακριτή ελαστική περιοχή, η οποία λήγει για  $S_{a,1}(T_1, 5\%) \approx 0.2g$  και  $\theta_{yield\ max} \approx 0.2\%$ , οπότε και συμβαίνει ο πρώτος λυγισμός των συνδέσμων δυσκαμψίας. Στην πραγματικότητα, κάθε μοντέλο με αρχικώς ελαστικά στοιχεία παρουσιάζει τέτοια συμπεριφορά, η οποία τερματίζεται τη στιγμή που εμφανίζεται η πρώτη μη-γραμμικότητα, δηλαδή όταν οποιοδήποτε στοιχείο φτάσει στο τέλος της ελαστικής περιοχής του. Την κλίση  $IM/DM$  αυτού του κλάδου σε κάθε καμπύλη IDA θα την ονομάζουμε ελαστική «στιβαρότητα» για τα δοθέντα  $DM, IM$ . Συνήθως μεταβάλλεται σε κάποιο βαθμό από καταγραφή σε καταγραφή, όμως παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως καταγραφής για μονοβάθμια συστήματα ακόμα και για πολυβάθμια συστήματα, αν το  $IM$  λαμβάνει υπόψιν την επιρροή ανώτερων ιδιομορφών.



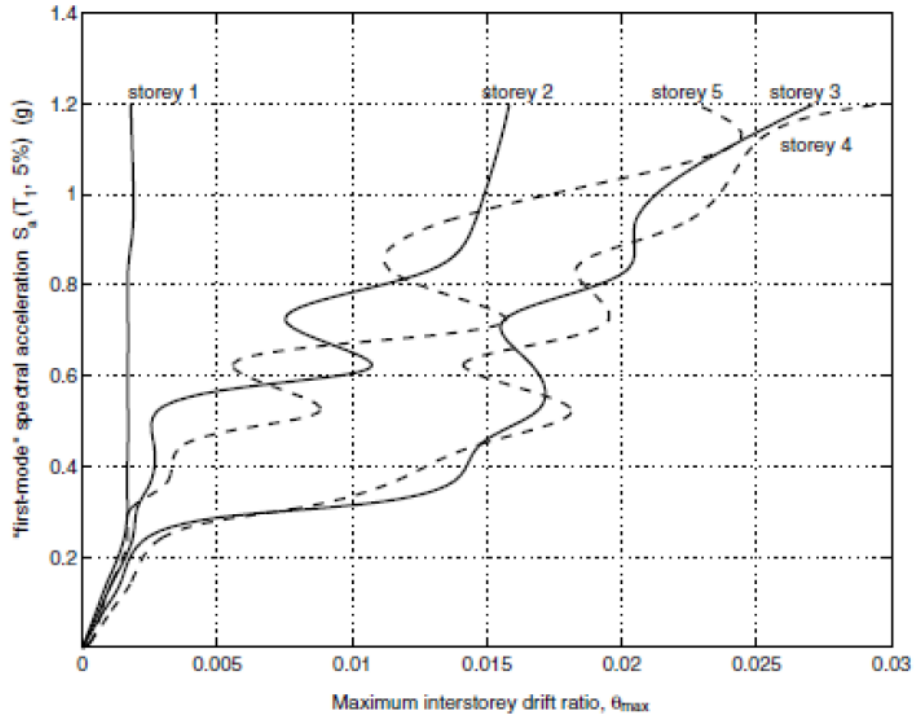
Σχήμα 3. 2 Καμπύλες IDA για ένα 5-ώροφο μεταλλικό πλαίσιο με συνδέσμους δυσκαμψίας ( $T_1=1.8\ sec$ ) υποβαλλόμενο σε τέσσερις (4) διαφορετικές καταγραφές.



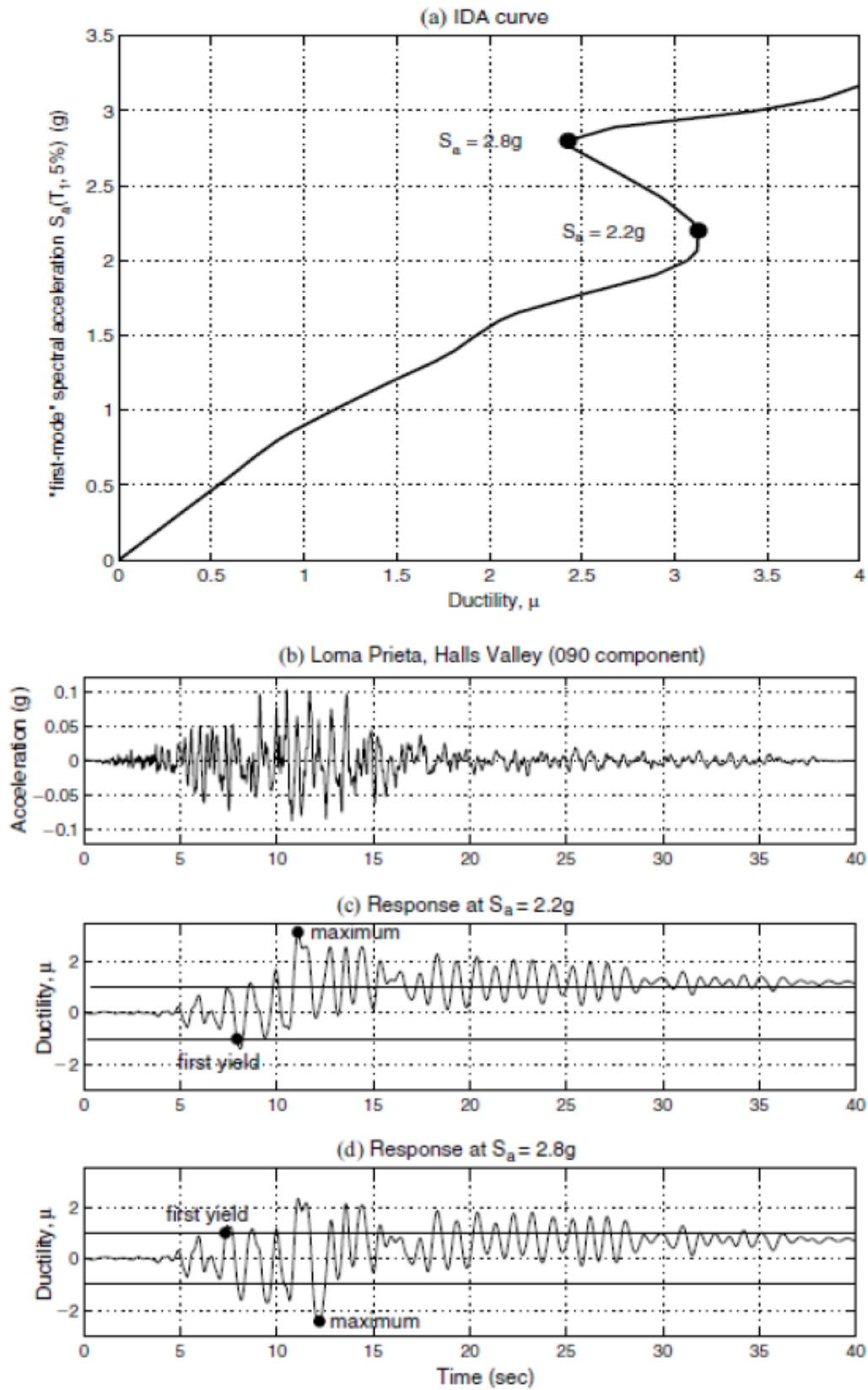
Εστιάζοντας στο άλλο άκρο των καμπυλών του Σχήματος 3.2, παρατηρούμε ότι τερματίζονται σε διαφορετικά επίπεδα του  $IM$ . Η καμπύλη (a) «χαλαρώνει» απότομα μετά τον πρώτο λυγισμό και επιταχύνει απότομα προς μεγάλες μετακινήσεις μέχρι την τελική κατάρρευση. Από την άλλη πλευρά, οι καμπύλες (c) και (d) φαίνεται να ελίσσονται γύρω από την ευθεία του ελαστικού κλάδου. Ακολουθούν στενά το γνωστό κανόνα των *ισων μετατοπίσεων*, δηλαδή την εμπειρική παρατήρηση ότι, για κατασκευές μεσαίας περιόδου, οι ανελαστικές συνολικές μετακινήσεις είναι περίπου ίσες με τις αντίστοιχες ελαστικές. Οι κυματοειδείς μορφές που εμφανίζουν οι καμπύλες (c) και (d) αποτελούν διαδοχικά τμήματα της «χαλάρωσης» (softening) και της «κράτυνσης» (hardening), περιοχές όπου η τοπική κλίση της καμπύλης (ή δυσκαμψία) μειώνεται με την αύξηση του  $IM$  και άλλες στις οποίες αυξάνεται. Σε όρους μηχανικής, αυτό σημαίνει ότι κατά διαστήματα η κατασκευή υπόκειται σε επιταχυνόμενο ρυθμό συσσώρευσης του  $DM$ , ενώ σε άλλες χρονικές στιγμές μια επιβράδυνση συμβαίνει, η οποία μπορεί να είναι αρκετά ισχυρή, ώστε να ανακόψει αμέσως τη συσσώρευση ή ακόμα και να την αναστρέψει, τραβώντας έτσι τοπικά την καμπύλη  $IDA$  προς χαμηλότερα  $DMs$  και κάνοντάς την μια μη-μονοτονική συνάρτηση του  $IM$  (Σχήμα 3.2d). Τέλος, υποθέτοντας ότι το μοντέλο προβλέπει κάποιο μηχανισμό κατάρρευσης και ότι το χρησιμοποιούμενο  $DM$  μπορεί να τον εντοπίσει, παρουσιάζεται ένα τελικό τμήμα «χαλάρωσης», όταν η κατασκευή συσσωρεύει το  $DM$  με ολοένα αυξανόμενους ρυθμούς, σηματοδοτώντας την έναρξη *δυναμικής αστάθειας*. Αυτή ορίζεται, κατ' ανάλογο τρόπο με τη στατική αστάθεια, ως το σημείο στο οποίο οι παραμορφώσεις αυξάνονται απεριόριστα για απειροστή αύξηση του  $IM$ . Τότε, για τη μέγιστη τιμή του  $IM$  η καμπύλη γίνεται οριζόντια καθώς το  $DM$  κινείται προς το «άπειρο» (Σχήμα 3.2a-b). Παρ' όλο που τα παραδείγματα που παρουσιάζονται αφορούν στα μεγέθη  $Sa(T_1, 5\%)$  και  $\dot{v}_{max}$ , αυτή η συμπεριφορά παρατηρείται για μια ευρεία γκάμα  $DMs$  και  $IMs$ .

Η «κράτυνση» στις καμπύλες  $IDA$  δεν είναι μια καινούργια παρατήρηση, μιας και έχει ήδη αναφερθεί ακόμα και για απλά διγραμμικά ελαστικά-τελειώς πλαστικά συστήματα, π.χ. από τον Chopra (1995, σελ. 257-259). Παρ' όλα αυτά, εξακολουθεί να είναι αντίθετο με τη διαίσθησή μας το γεγονός ότι ένα σύστημα το οποίο παρουσίασε υψηλή απόκριση για δεδομένο επίπεδο έντασης μπορεί να παρουσιάσει την ίδια ή και χαμηλότερη απόκριση, όταν υποβληθεί σε μεγαλύτερες σεισμικές εντάσεις λόγω πολύ μεγάλης «κράτυνσης». Όμως, πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι σημαντικό ρόλο παίζει όχι μόνο η ένταση του επιταχυνσιογραφήματος, αλλά μάλλον η μορφή του και ο χρόνος που αυτό ακολουθεί. Καθώς το επιταχυνσιογράφημα μεγεθύνεται, ασθενείς κύκλοι απόκρισης νωρίς στη χρονοϊστορία γίνονται αρκετά ισχυροί, ώστε να προκαλέσουν βλάβη (διαρροή), αλλάζοντας έτσι τις ιδιότητες της κατασκευής για τους επόμενους, ισχυρότερους κύκλους. Για πολυώροφες κατασκευές, μια ισχυρότερη εδαφική κίνηση μπορεί να οδηγήσει σε πρωιμότερη διαρροή κάποιου ορόφου, η οποία με τη σειρά της λειτουργεί ως δικλείδα ασφαλείας, ανακουφίζοντας κάποιον άλλο (συνήθως υψηλότερο) όροφο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Ακόμα και απλοί ταλαντωτές, όταν αυτοί αναγκάζονται να διαρρεύσουν σε κάποιον πρωιμότερο κύκλο, μπορεί να εμφανίσουν μικρότερη απόκριση σε επόμενους κύκλους, οι οποίοι είχαν προκαλέσει υψηλότερες τιμές του  $DM$  προηγουμένως (Σχήμα 3.4), ίσως λόγω της παρατηρούμενης «επιμήκυνσης της περιόδου». Τα ίδια φαινόμενα εξηγούν την «επαναφορά της κατασκευής» (structural

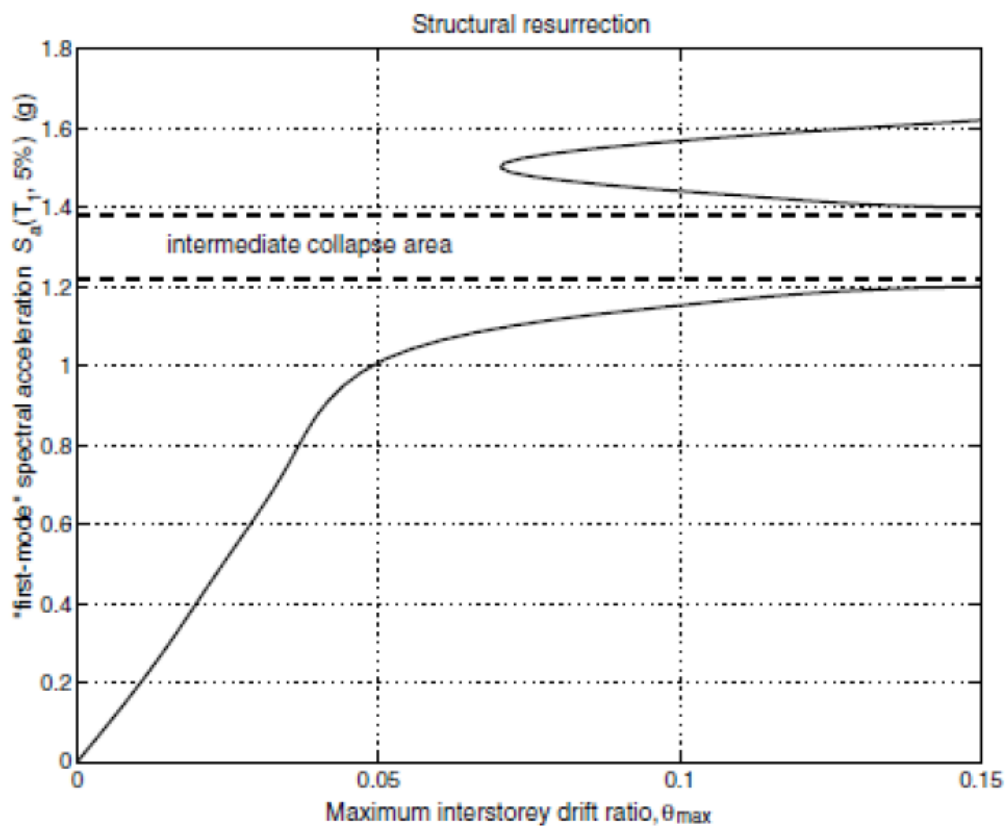
resurrection), μία ακραία περίπτωση «κράτynσης», στην οποία ένα σύστημα ωθείται εντελώς μέχρι τη συνολική κατάρρευση (δηλαδή ο κώδικας της ανάλυσης δεν συγκλίνει, παράγοντας «αριθμητικώς άπειρα»  $DMs$ ) για κάποιο  $IM$ , μόνο για να επανέλθει σε κατάσταση μη-κατάρρευσης σε κάποιο υψηλότερο επίπεδο έντασης, παρουσιάζοντας μεν υψηλή απόκριση, όμως ακόμη σταθερή (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3. 3 Καμπύλες IDA της μέγιστης στρωφής ορόφου (*peak interstorey drift*) για κάθε όροφο ενός 5-ώροφου μεταλλικού πλαισίου με συνδέσμους δυσκαμψίας ( $T_1=1.8$  sec). Παρατηρήστε τη σύνθετη «κυματοειδή» αλληλεπίδραση, όπου η ακραία «χαλάρωση» του 2ου ορόφου λειτουργεί ως μία «δικλείδα ασφαλείας» για την ανακούφιση των ανωτέρων ορόφων (3,4,5).



Σχήμα 3. 4 Πλασιμότητα ενός μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού ταλαντωτή ( $T=1$  sec) σε διάφορα επίπεδα δόνησης. Η πρωιμότερη διαρροή στην ισχυρότερη εδαφική κίνηση οδηγεί σε μία μικρότερη μέγιστη απόκριση κατ' απόλυτη τιμή.



Σχήμα 3. 5 Επαναφορά της κατασκευής (structural resurrection) στην καμπύλη IDA ενός 3-ωρόφου μεταλλικού καμπτικού πλαισίου με ψαθυρές συνδέσεις ( $T_1=1.3$  sec).

Λόγω της πολυπλοκότητας που παρουσιάζει η καμπύλη IDA ακόμα και σε δύο διαστάσεις, είναι φυσικό να εξετάσουμε τις ιδιότητές της ως μία μαθηματική οντότητα. Υποθέτοντας ένα μονοτονικό IM, η καμπύλη IDA γίνεται μια συνάρτηση  $((0, +\infty) \rightarrow (0, +\infty))$ , δηλαδή κάθε τιμή του IM παράγει μία μοναδική τιμή του DM, ενώ για κάθε δοθείσα τιμή DM υπάρχει τουλάχιστον ένας ή περισσότεροι IMs (για μη μονοτονικές καμπύλες IDA), καθώς η απεικόνιση δεν είναι απαραίτητα “1-1”. Επίσης, η καμπύλη IDA δεν είναι απαραίτητα ομαλή, μιας και το DM ορίζεται συχνά ως η μέγιστη, κατ’ απόλυτη τιμή, τιμή της απόκρισης, οπότε εξ ορισμού είναι μη-διαφορήσιμος. Επιπλέον, μπορεί να περιέχει έναν αριθμό (ας ελπίσουμε πεπερασμένο) ασυνεχειών, λόγω των πολλαπλών καταρρεύσεων και διαδοχικών «επαναφορών» της κατασκευής.

### 3.4 ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΚΑΜΠΥΛΕΣ IDA

Οι στάθμες επιτελεστικότητας ή οριακές καταστάσεις είναι σημαντικά συστατικά του αντισεισμικού σχεδιασμού των κατασκευών με στάθμες επιτελεστικότητας (performance-based earthquake engineering – PBEE) και η καμπύλη IDA περιέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για την εκτίμησή τους. Όμως, πρέπει να ορίσουμε αυτά τα συστατικά με έναν λιγότερο αφηρημένο τρόπο που να έχει νόημα σε μια καμπύλη IDA, δηλαδή μέσω ενός ισχυρισμού ή ενός κανόνα που, όταν ικανοποιούνται, οι ενδείξεις οδηγούν σε μια οριακή κατάσταση. Για παράδειγμα, η «Άμεση Χρήση» (Immediate Occupancy) είναι μία στάθμη επιτελεστικότητας που έχει συνδεθεί με μία δεδομένη τιμή του  $DM$ , συνήθως σε όρους της στροφής ορόφου  $\theta_{max}$ , ενώ η συνολική κατάρρευση συνδέεται με την τιμή του  $IM$  ή  $DM$ , όπου και παρατηρείται δυναμική αστάθεια.

Η αιτία των πολλαπλών σημείων που μπορούν να ικανοποιήσουν έναν κανόνα οριακής κατάστασης είναι κυρίως το θέμα της «κράτυνσης» και η ακραία της μορφή, η «επαναφορά της κατασκευής» (structural resurrection). Γενικά, θα ήθελε κανείς να είναι συντηρητικός και να θεωρήσει το χαμηλότερο, σε όρους  $IM$ , σημείο που θα σηματοδοτήσει την οριακή κατάσταση. Γενικεύοντας αυτήν την σκέψη στη συνολική καμπύλη IDA, σημαίνει ότι θα απορρίψουμε το τμήμα της πάνω από την γραμμή του πλατώ (σε όρους  $IM$ ) και να θεωρήσουμε απλά μόνο τα σημεία μέχρι αυτή την πρώτη ένδειξη δυναμικής αστάθειας.

Συνήθως, στην πρόβλεψη της κατάρρευσης μιας κατασκευής ταυτίζουμε τη δυναμική με την αριθμητική αστάθεια. Σαφέστατα, η μη-σύγκλιση της αριθμητικής χρονικής ολοκλήρωσης είναι το ασφαλέστερο και ίσως το μόνο αριθμητικό ισοδύναμο του πραγματικού φαινομένου της δυναμικής κατάρρευσης. Θα πρέπει όμως εδώ να τονιστεί ότι η μη-σύγκλιση επηρεάζεται από την αριθμητική μέθοδο που χρησιμοποιούμε, το μέγεθος βήματος της επανάληψης, ακόμα και από το σφάλμα στρογγυλοποίησης. Συνεπώς, θα υποθέτουμε ότι έχουμε φροντίσει τα παραπάνω θέματα όσο το δυνατόν καλύτερα, ώστε οι προβλέψεις που κάνουμε να είναι ακριβείς σε ικανοποιητικό βαθμό. Τώρα, μπορούμε να ορίσουμε τους πιο βασικούς κανόνες για τον καθορισμό μίας οριακής κατάστασης.

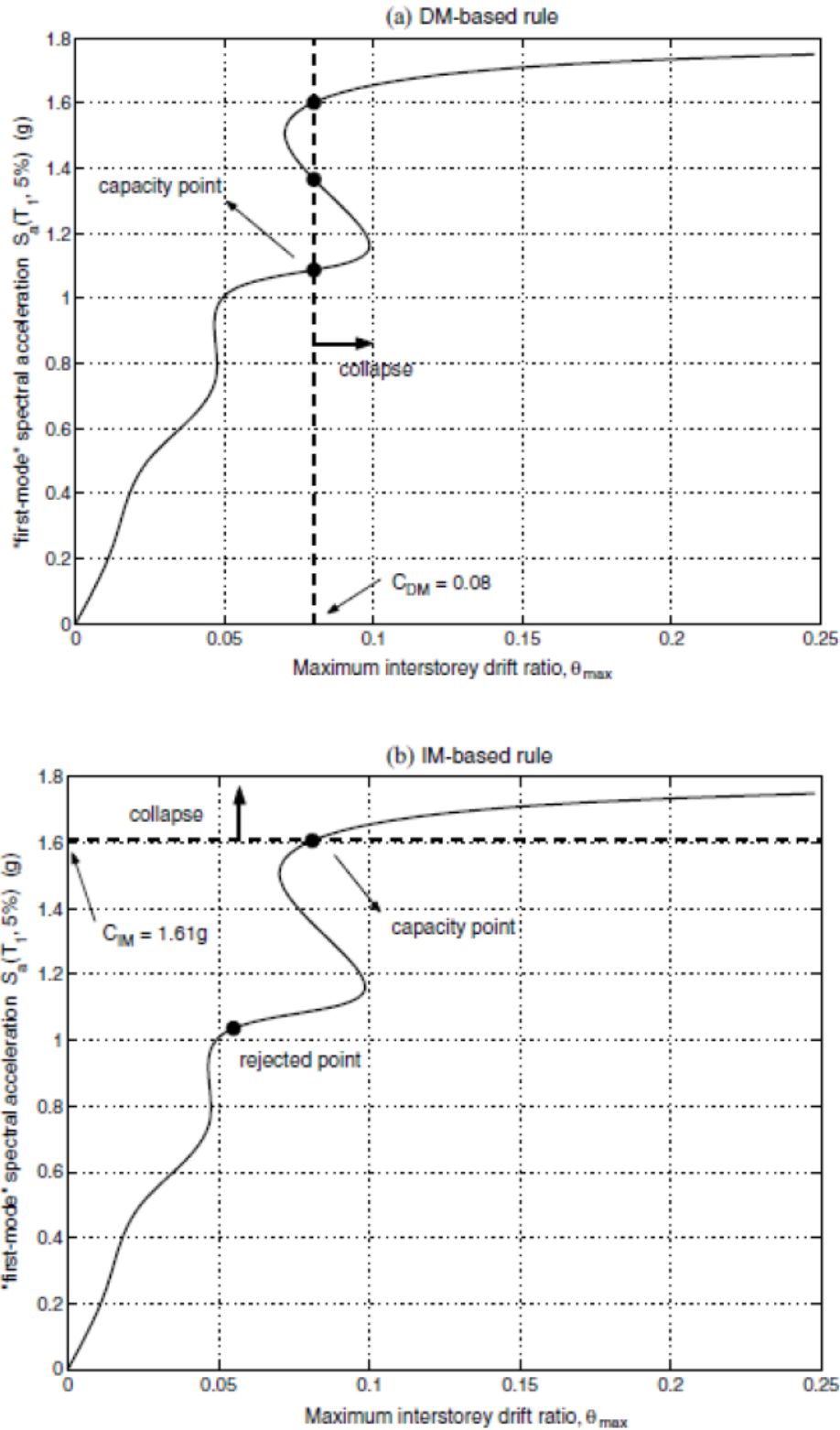
Ο πρώτος κανόνας βασίζεται στο  $DM$  και προκύπτει από τον εξής ισχυρισμό: «Εάν ισχύει  $DM \geq CDM$ , τότε η οριακή κατάσταση υπερβαίνεται» (Σχήμα 3.6α). Η βασική ιδέα είναι συνήθως ότι το  $DM$  είναι ένας δείκτης βλάβης, και ως εκ τούτου, όταν αυξάνει πέραν από μία συγκεκριμένη τιμή, το μοντέλο της κατασκευής υποτίθεται ότι είναι εντός της οριακής κατάστασης. Τέτοιες τιμές για το  $CDM$  μπορούν να αποκτηθούν μέσω πειραμάτων, θεωρίες και εμπειρίες της μηχανικής και δεν μπορεί να είναι ντετερμινιστικές, αλλά θα έχουν μία πιθανοτική κατανομή.

Ένα παράδειγμα είναι το όριο του  $\theta_{max}=2\%$  που δηλώνει τη στάθμη «Άμεση Χρήση» για μεταλλικά καμπτικά πλαίσια με συνδέσεις τύπου-1 στις οδηγίες της FEMA. Οι κανόνες που βασίζονται στο  $DM$  έχουν το πλεονέκτημα της απλότητας και της

ευκολίας υλοποίησης, ειδικότερα για στάθμες επιτελεστικότητας εκτός από την κατάρρευση.

Ο εναλλακτικός κανόνας που βασίζεται στο  $IM$  κυρίως δημιουργήθηκε από την ανάγκη καλύτερης εκτίμησης της ικανότητας κατάρρευσης, μέσω ενός σημείου στην καμπύλη  $IDA$  που ξεκάθαρα τη χωρίζει σε δύο περιοχές, της μη-κατάρρευσης (μικρότερο  $IM$ ) και αυτήν της κατάρρευσης (μεγαλύτερο  $IM$ ). Για μονοτονικά  $IMs$ , ένας τέτοιος κανόνας δημιουργείται από τον εξής ισχυρισμό: «Εάν ισχύει  $IM \geq CIM$ , τότε η οριακή κατάσταση υπερβαίνεται» (Σχήμα 3.6b). Μια σημαντική διαφορά με την προηγούμενη περίπτωση είναι η δυσκολία στον καθορισμό μιας τιμής του  $CIM$  που σηματοδοτεί την κατάρρευση για όλες τις καμπύλες  $IDA$ , συνεπώς πρέπει να γίνει χωριστά καμπύλη προς καμπύλη. Ακόμη, το πλεονέκτημα είναι ότι δημιουργεί ξεκάθαρα μια μονή περιοχή κατάρρευσης και το μειονέκτημα ότι υπάρχει δυσκολία στον καθορισμό ενός τέτοιου σημείου για κάθε καμπύλη μ' έναν ομοιόμορφο τρόπο. Γενικώς, ένας τέτοιος κανόνας καταλήγει σε περιγραφές της ικανότητας για το  $IM$  και το  $DM$ . Μία ειδική (ακραία) περίπτωση είναι να πάρουμε το «τελικό» σημείο της καμπύλης ως την ικανότητα, δηλαδή χρησιμοποιώντας την χαμηλότερη γραμμή του πλατώ για τον καθορισμό της ικανότητας σε όρους του  $IM$ , όπου όλα τα σημεία της καμπύλης  $IDA$  μέχρι την πρώτη εμφάνιση της πρώτης δυναμικής αστάθειας θεωρείται ως μη-κατάρρευση.

Σύμφωνα με τον κανονισμό FEMA, το τελευταίο σημείο της καμπύλης με μια εφαιπτόμενη κλίση ίση με το 20% της ελαστικής κλίσης ορίζεται ως το σημείο ικανότητας (αντίστασης). Αυτό προκύπτει θεωρώντας ότι οριζοντίωση της καμπύλης είναι ένα δείγμα δυναμικής αστάθειας (δηλαδή το  $DM$  παίρνει πολύ μεγάλες τιμές και επιταχύνεται προς το «άπειρο»). Καθώς το «άπειρο» δεν είναι ένα δυνατό αριθμητικό αποτέλεσμα, είμαστε ικανοποιημένοι με το να επιστρέψουμε σ' έναν ρυθμό αύξησης του  $\dot{v}_{max}$  ίσο με πέντε (5) φορές τον αρχικό/ελαστικό ρυθμό, ως την περιοχή όπου καταγράφουμε το σημείο ικανότητας. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται, καθώς η δυνατή «κυματοειδής» συμπεριφορά μιας καμπύλης  $IDA$  μπορεί να δώσει αρκετά τέτοια σημεία, όπου η κατασκευή φαίνεται να κατευθύνεται προς κατάρρευση, μόνο για να επανέλθει κάπως σ' ένα υψηλότερο επίπεδο του  $IM$ , όπως στο Σχήμα 3.6b. Κατ' αρχήν, αυτά τα χαμηλότερα σημεία πρέπει συνεπώς να απορριφτούν ως υποψήφια κατάρρευσης.



Σχήμα 3. 6 Δύο διαφορετικοί κανόνες που παράγουν πολλαπλά σημεία ικανότητας για ένα 3-ώροφο μεταλλικό καμπτικό πλαίσιο με ψαθυρές συνδέσεις ( $T_1=1.3$  sec). Ο κανόνας DM, όπου DM είναι το  $\theta_{max}$ , εφαρμόζεται για  $C_{DM}=0.08$  και ο κανόνας IM χρησιμοποιεί το κριτήριο της 20% κλίσης.

### 3.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΜΠΥΛΩΝ IDA ΠΟΛΛΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ

Όπως συνάγεται από τα παραπάνω, μια μελέτη IDA μίας μονής καταγραφής δεν μπορεί να συλλάβει πλήρως την απόκριση του κτηρίου σε κάποιο μελλοντικό γεγονός. Η IDA εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλεγείσα καταγραφή, επομένως χρειάζεται ένας επαρκής αριθμός καταγραφών, ώστε να καλυφθεί όλο το εύρος των πιθανών αποκρίσεων της κατασκευής. Επομένως, καταφεύγουμε αναγκαστικά στην υποβολή του μοντέλου της κατασκευής σε μια σειρά καταγραφών εδαφικών κινήσεων.

**ΟΡΙΣΜΟΣ 6:** Μία μελέτη IDA πολλών καταγραφών (MULTI-RECORD IDA STUDY) είναι μία συλλογή από μελέτες IDA μόνης καταγραφής του ιδίου όμως φορέα υπό διαφορετικά επιταχυνσιογραφήματα.

Μια τέτοια μελέτη παράγει αντίστοιχα μία σειρά καμπυλών IDA, οι οποίες, για μια κοινή επιλογή των IMs και του ιδίου DM, μπορούν να απεικονιστούν γραφικά στο ίδιο γράφημα, όπως στο Σχήμα 3.7α για ένα 5-ώροφο μεταλλικό πλαίσιο με συνδέσμους δυσκαμψίας.

**ΟΡΙΣΜΟΣ 7:** Μία σειρά καμπυλών IDA (IDA CURVE SET) είναι μια συλλογή από καμπύλες IDA του ιδίου φορέα υπό διαφορετικά επιταχυνσιογραφήματα, που είναι όλες παραμετροποιημένες στα ίδια μεγέθη IMs και DM.

Παρόλο που κάθε καμπύλη είναι μια πλήρως καθορισμένη ντετερμινιστική οντότητα για δεδομένο μοντέλο και εδαφική κίνηση, αν θέλουμε να λάβουμε υπόψιν την έμφυτη τυχαιότητα των καταγραφών στις οποίες είναι πιθανόν να υποβληθεί το κτίριο, πρέπει να καταφύγουμε σε πιθανοτική ανάλυση. Η καμπύλη IDA για δεδομένο μοντέλο και πληθυσμό καταγραφών παύει να είναι ντετερμινιστική. Είναι μια τυχαία καμπύλη ή μια τυχαία συνάρτηση  $DM=f(IM)$  (για ένα συγκεκριμένο, μονοτονικό IM). Έτσι, όπως ακριβώς μπορούμε να συνοψίσουμε μια σειρά καταγραφών, έχοντας για παράδειγμα τη μέση τιμή, τη διάμεσο, το 16% και το 84% των φασμάτων απόκρισης, με τον ίδιο τρόπο μπορούμε να ορίσουμε καμπύλες που αντιστοιχούν στη μέση τιμή, τη διάμεσο και στο ποσοστημόριο για το 16% ή το 84% (π.χ. Σχήμα 3.7b), για να περιγράψουμε (οριακά) μία σειρά καμπυλών IDA. Γι' αυτό το λόγο, χρειαζόμαστε μεθόδους στατιστικής ανάλυσης ενός τυχαίου δείγματος δισδιάστατων καμπυλών (για δεδομένο, μοναδικό IM), ένα θέμα με το οποίο ασχολείται η «Λειτουργική Ανάλυση Δεδομένων». Αυτές οι μέθοδοι εμπίπτουν εύκολα σε δύο μεγάλες κατηγορίες.

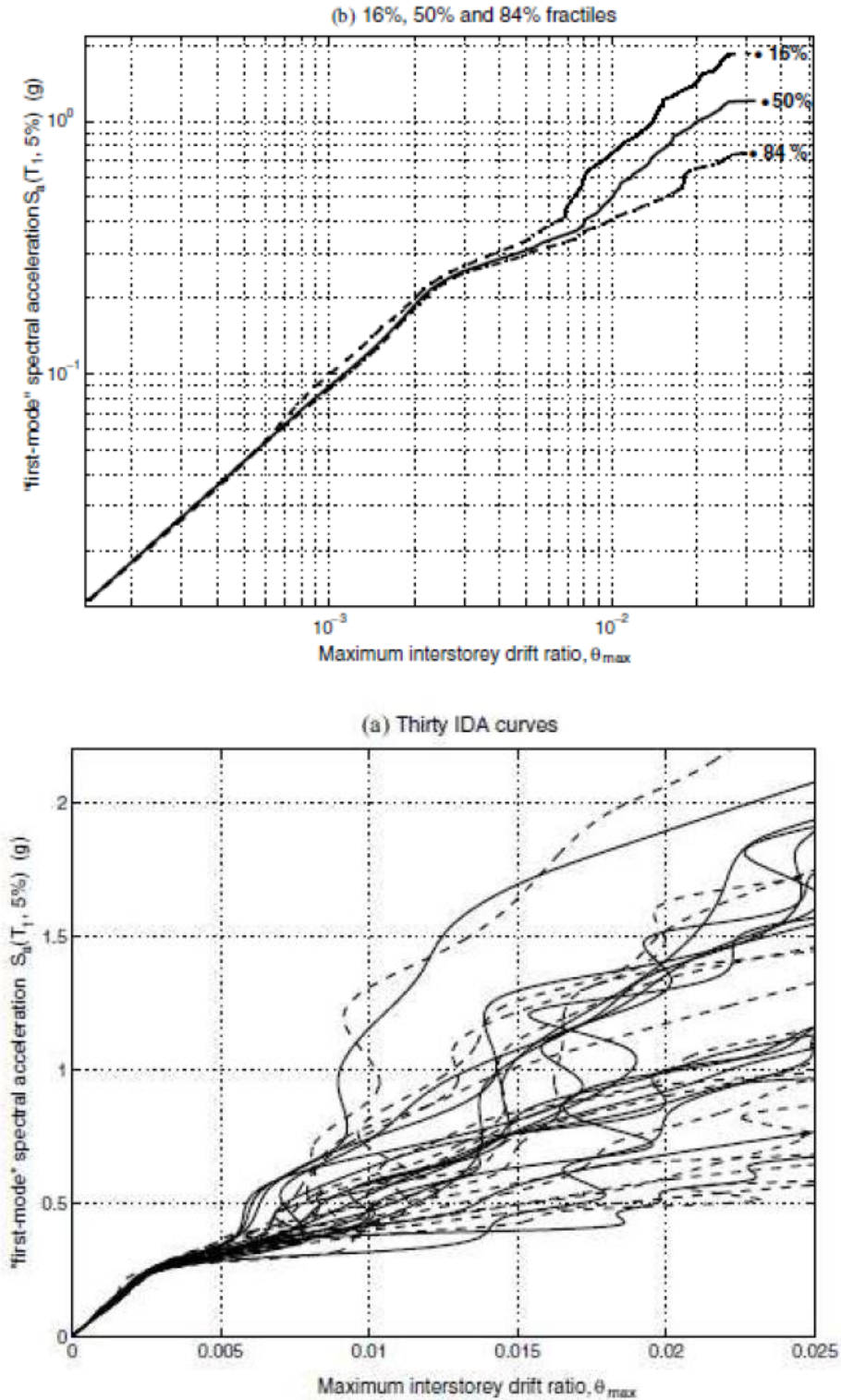
Κατ' αρχάς, υπάρχουν οι παραμετρικές μέθοδοι ανάλυσης. Σε αυτήν την περίπτωση, υποθέτουμε ένα παραμετρικό μοντέλο για το DM, δεδομένου του IM, στο οποίο προσαρμόζουμε κάθε καμπύλη χωριστά. Παράγεται έτσι ένα σύνολο τιμών για κάθε



παράμετρο του μοντέλου, του οποίου τα στατιστικά στοιχεία υπολογίζουμε. Εναλλακτικά, μπορούμε να προσαρμόσουμε ένα παραμετρικό μοντέλο στη διάμεσο του DM, για δεδομένο IM, σε όλες τις καμπύλες ταυτοχρόνως. Για παράδειγμα, έστω το διπαραμετρικό εκθετικό μοντέλο  $\theta_{\max} = \alpha \cdot (Sa(T_1, 5\%))^{\beta}$  (που εισήχθη από τους Shome και Cornell), το οποίο, υποθέτοντας ότι οι  $\theta_{\max}$  ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή για δεδομένο  $Sa(T_1, 5\%)$  (υπόθεση καλά τεκμηριωμένη), παρέχει συχνά μια απλή αλλά δυνατή περιγραφή των καμπυλών, επιτρέποντας την εξαγωγή μερικών σημαντικών αναλυτικών συμπερασμάτων. Αυτή είναι μια γενική ιδιότητα των παραμετρικών μεθόδων. Παρόλο που δε διαθέτουν την απαιτούμενη ευελιξία, ώστε να περιγράψουν με ακρίβεια κάθε καμπύλη χωριστά, εντούτοις επιτρέπουν την απλή περιγραφή του συνόλου των καμπυλών.

Στην άλλη άκρη του φάσματος, βρίσκονται οι μη-παραμετρικές μέθοδοι, οι οποίες περιλαμβάνουν κατά κύριο λόγο «εξομαλυντές γραφικών παραστάσεων», όπως τον τρέχοντα μέσο όρο, την τρέχουσα διάμεσο, τον εξομαλυντή LOESS ή την εξομαλυντική συνάρτηση παρεμβολής «spline». Ίσως ο πιο απλός εξομαλυντής από όλους, ο τρέχων μέσος όρος, να περιλαμβάνει απλώς τον υπολογισμό του συνόλου των τιμών του DM σε κάθε επίπεδο του IM και έπειτα τον υπολογισμό της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης του DM για κάθε επίπεδο του IM. Η μέθοδος δουλεύει χωρίς πρόβλημα μέχρι το πρώτο σημείο που καμπύλη εξαντλεί την αντοχή της, οπότε ο DM τείνει στο άπειρο, όπως και η μέση καμπύλη IDA. Δυστυχώς οι περισσότεροι εξομαλυντές πάσχουν από το παραπάνω πρόβλημα, εκτός από την τρέχουσα διάμεσο ή το «x-ποσοστιαίο σημείο» που αντιστοιχεί σε κάποιο ποσοστό του δείγματος, τα οποία είναι γενικώς πιο αξιόπιστα στο συγκεκριμένο θέμα. Αντί, λοιπόν, να υπολογίζουμε το μέσο όρο για κάθε επίπεδο του IM, υπολογίζουμε τη διάμεσο και τα 16% και 84% ποσοστιαία σημεία για το δείγμα, τα οποία τείνουν στο άπειρο, μόνο όταν συμβαίνει η κατάρρευση στο 50%, 84% και 16% των καταγραφών αντίστοιχα. Ένα άλλο πλεονέκτημα της παραπάνω μεθόδου είναι ότι, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις (π.χ. συνέχεια και μονοτονικότητα των καμπύλων), η καμπύλη που συνδέει τα x%-ποσοστιαία σημεία της κατανομής του DM για δεδομένο IM είναι η ίδια με εκείνη που συνδέει τα (100-x)%-ποσοστιαία σημεία του IM για δεδομένο DM. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή εναρμονίζεται πολύ καλά με την καλά τεκμηριωμένη υπόθεση της λογαριθμοκανονικής κατανομής της  $\theta_{\max}$  για δεδομένη  $Sa(T_1, 5\%)$ , όπου η διάμεσος είναι η συνήθης «κεντρική τιμή» και τα 16% και 84% ποσοστιαία σημεία αντιστοιχούν στη διάμεσο επί την ποσότητα  $e$  διασπορά  $\bar{\sigma}$ , όπου «διασπορά» είναι η τυπική απόκλιση των λογαρίθμων των τιμών.

Τέλος, μία παραλλαγή για την αντιμετώπιση των καταρρεύσεων προτάθηκε από τους Shome και Cornell, όπου χρησιμοποιούνται συμβατικές ροπές για τον χαρακτηρισμό μη-καταρρεύσεων, ώστε να εξαλείφεται το πρόβλημα με τις «άπειρες» τιμές, ενώ η πιθανότητα κατάρρευσης για δεδομένο IM συνοψίζεται χωριστά από μία συμβολική παλινδρόμηση.



Σχήμα 3. 7 Μία μελέτη IDA για 30 καταγραφές σε ένα 5-ώροφο μεταλλικό πλαίσιο με συνδέσμους δυσκαμψίας ( $T_1=1.8$  sec) που δείχνει (α) τις 30 ξεχωριστές καμπύλες και (β) την συγκέντρωσή τους στις καμπύλες που αντιστοιχούν στα 16%, 50% και 84% ποσοστιαία σημεία (σε λογαριθμική κλίμακα).

### 3.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ IDA ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ PUSHOVER

Η ομοιότητα των αναλύσεων IDA (incremental dynamic analysis) και SPO (static pushover) ως προς την προσαύξηση των επιβαλλόμενων φορτίων υποδεικνύει τη διερεύνηση της σύνδεσης μεταξύ των αποτελεσμάτων τους. Καθώς και οι δύο αποσκοπούν στην περιγραφή της ίδιας κατασκευής, περιμένει κανείς κάποιο βαθμό συσχέτισης μεταξύ της καμπύλης SPO και οποιασδήποτε καμπύλης IDA του κτηρίου (Σχήμα 3.1), ακόμα περισσότερο δε μεταξύ της SPO και της «μέσης» (διαμέσου) καμπύλης IDA, καθώς η τελευταία παρουσιάζει μικρότερη μεταβλητότητα από καταγραφή σε καταγραφή. Προκειμένου να παραστήσουμε και τις δύο καμπύλες στο ίδιο διάγραμμα, είναι προτιμητέο να εκφράσουμε την καμπύλη SPO ως προς τις συντεταγμένες IM και DM, οι οποίες έχουν επιλεγεί για τη «μέση» καμπύλη IDA. Παρ' όλο που κάποια DMs (π.χ. η  $\theta_{max}$ ) μπορούν εύκολα να ληφθούν τόσο από τη στατική όσο και από τη δυναμική ανάλυση, ίσως να μην είναι τόσο συνηθισμένη η μετατροπή των IMs, π.χ. της συνολικής τέμνουσας βάσης σε μορφή  $Sa(T_1, 5\%)$ . Η συνιστώμενη αντιμετώπιση είναι η προσαρμογή της «ελαστικής δυσκαμψίας» της SPO, ώστε να ταυτιστεί με αυτήν της IDA, δηλαδή ταιριάζοντας τα ελαστικά τμήματα των δύο καμπυλών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί στο προαναφερθέν παράδειγμα, διαιρώντας την τέμνουσα βάσης με τη μάζα του κτηρίου. Αυτό αρκεί για τα μονοβάθμια συστήματα και για τα πολυβάθμια συστήματα ο παραπάνω λόγος πρέπει να πολλαπλασιαστεί με κάποιον κατάλληλο συντελεστή.

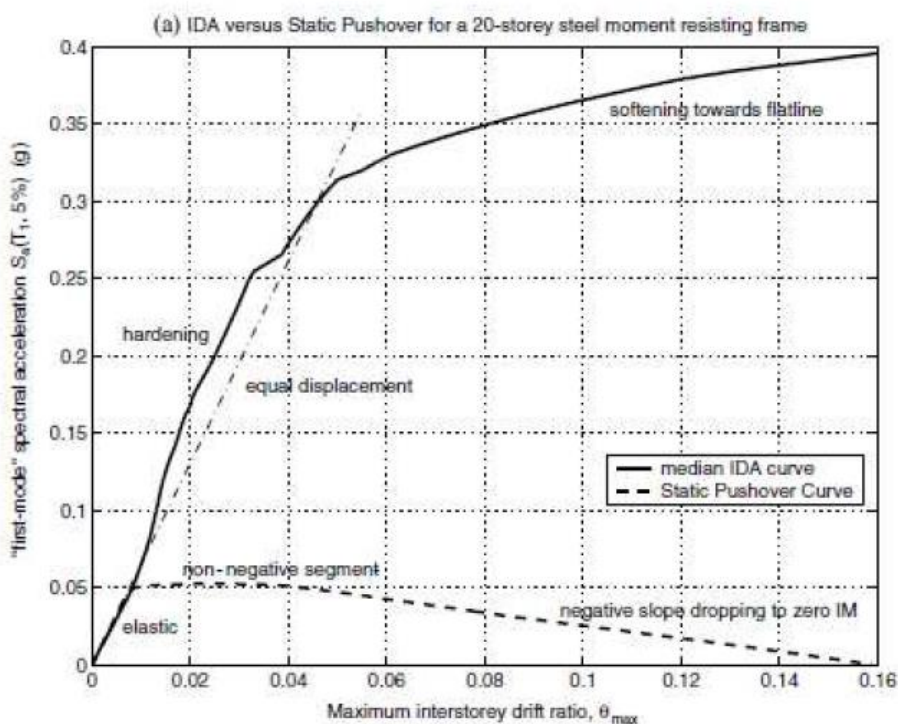
Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας διαδικασίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.8a-b, όπου σχεδιάζουμε την καμπύλη SPO, η οποία έχει παραχθεί χρησιμοποιώντας μια κατανομή δυνάμεων κατά την 1η ιδιομορφή, συγκριτικά με τη διάμεσο καμπύλη IDA για ένα 20-ώροφο μεταλλικό καμπτικό πλαίσιο με πλάστιμες συνδέσεις και για ένα 5-ώροφο μεταλλικό πλαίσιο με συνδέσμους δυσκαμψίας, με συντεταγμένες  $Sa(T_1, 5\%)$ ,  $\theta_{max}$ . Είναι εμφανές ότι οι και δύο καμπύλες διαθέτουν παρόμοια εύρη τιμών του DM. Ωστόσο, η καμπύλη IDA βρίσκεται συνεχώς αρκετά υψηλότερα από την καμπύλη SPO σε όρους IM. Παρ' όλο που η εξεύρεση μιας ποσοτικής σχέσης μεταξύ των δύο καμπυλών είναι δύσκολη και αξίζει βαθύτερη μελέτη, εντούτοις μπορούμε να κάνουμε κάποια γενικά ποιοτικά σχόλια που επιτρέπουν να συνάγουμε το προσεγγιστικό σχήμα της διαμέσου IDA, παρατηρώντας απλώς την καμπύλη SPO.

Συνεπώς, έχουμε:

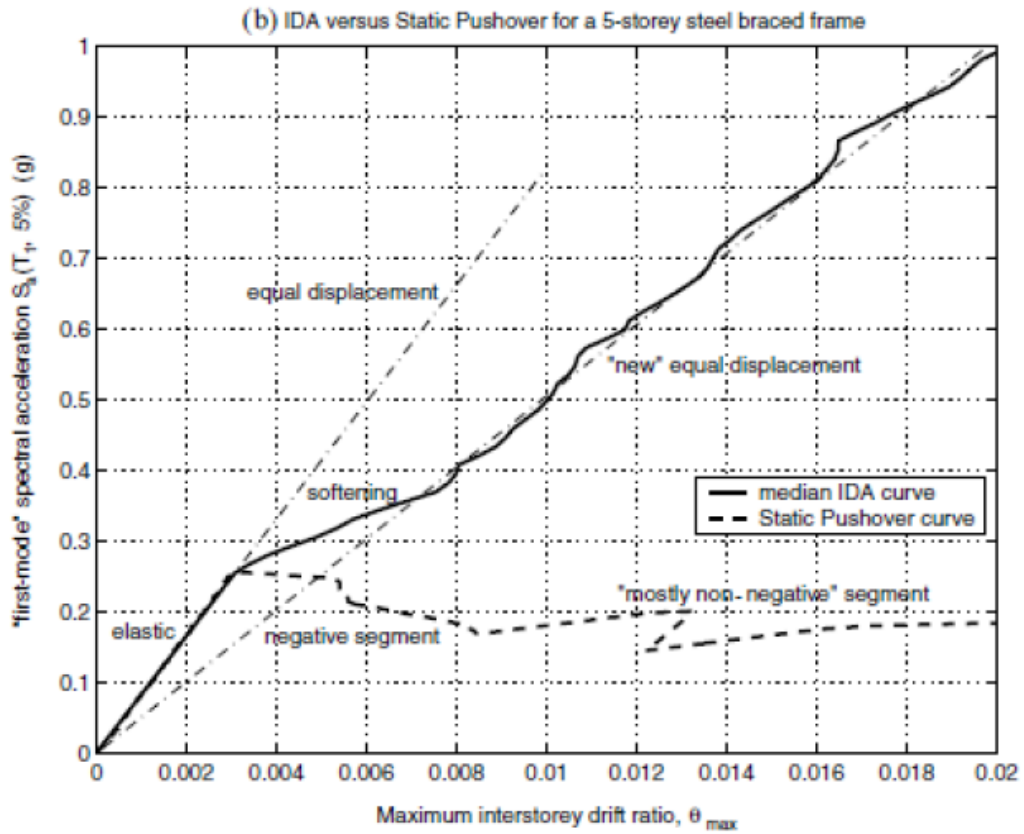
1. Εκ κατασκευής, ο ελαστικός κλάδος της SPO προσεγγίζει ικανοποιητικά αυτόν της IDA, συμπεριλαμβανομένου και του πρώτου σημείου μη- γραμμικότητας, το οποίο παρουσιάζεται για τις ίδιες τιμές των IM και DM και για τις δύο καμπύλες.
2. Ο επόμενος κλάδος μειωμένης, αλλά μη-αρνητικής δυσκαμψίας της SPO συσχετίζεται με την IDA βάσει του προσεγγιστικού κανόνα των «ίσων μετακινήσεων» (για κατασκευές μεσαίας περιόδου), δηλαδή υπάρχει σχεδόν μια συνέχιση του ελαστικού κλάδου. Πράγματι, αυτό το σχεδόν ελαστικό τμήμα της IDA συχνά έπεται ενός τμήματος αυξημένης δυσκαμψίας

(«κράτυνση») (Σχήμα 3.8a). Αντιθέτως, κατασκευές μικρότερης περιόδου παρουσιάζουν συνήθως κάποια μείωση δυσκαμψίας («χαλάρωση»).

3. Η αρνητική κλίση στην καμπύλη SPO μεταφράζεται σε μείωση της δυσκαμψίας («χαλάρωση») στην IDA, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση, δηλαδή σε οριζόντια καμπύλη IDA (Σχήμα 3.8a), εκτός αν κρατηθεί πριν φτάσει το μηδέν σε όρους IM από κάποιο μη-αρνητικό τμήμα της SPO (Σχήμα 3.8b).
4. Το μη-αρνητικό τμήμα της SPO, το οποίο ακολουθεί το τμήμα με την αρνητική κλίση, η οποία έχει προκαλέσει σημαντική μείωση του IM, εμφανίζεται φαινομενικά στην IDA ως ένας καινούργιος, τροποποιημένος κανόνας «ίσων μετατοπίσεων» (δηλαδή ένα σχεδόν γραμμικό τμήμα το οποίο βρίσκεται σε τέμνουσα θέση), που έχει μικρότερη «δυσκαμψία» από το ελαστικό τμήμα (Σχήμα 3.8b).



Σχήμα 3. 8 (a) Η διάμεσος καμπύλη IDA σε σύγκριση με την καμπύλη SPO για ένα 20-ώροφο μεταλλικό καμπτικό πλαίσιο με πλαστικές συνδέσεις ( $T_1=4$  sec)



Σχήμα 3. 9 (b) Η διάμεσος καμπύλη IDA σε σύγκριση με την καμπύλη SPO για ένα 5-ώροφο μεταλλικό πλαίσιο με συνδέσμους δυσκαμψίας ( $T_1=1.8$  sec).



---

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ

---

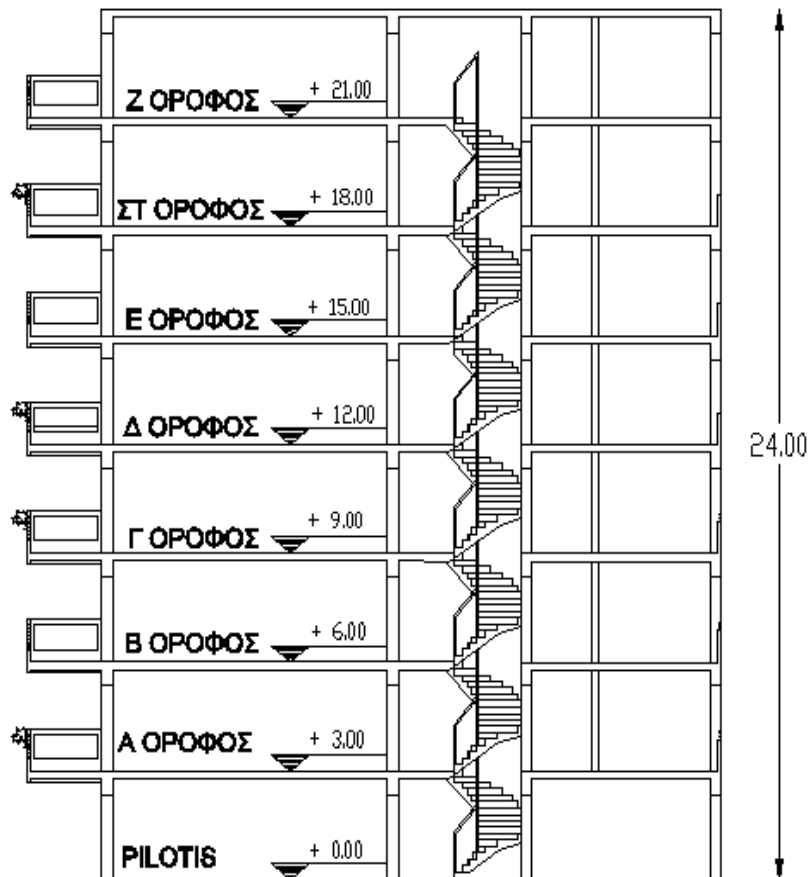
---





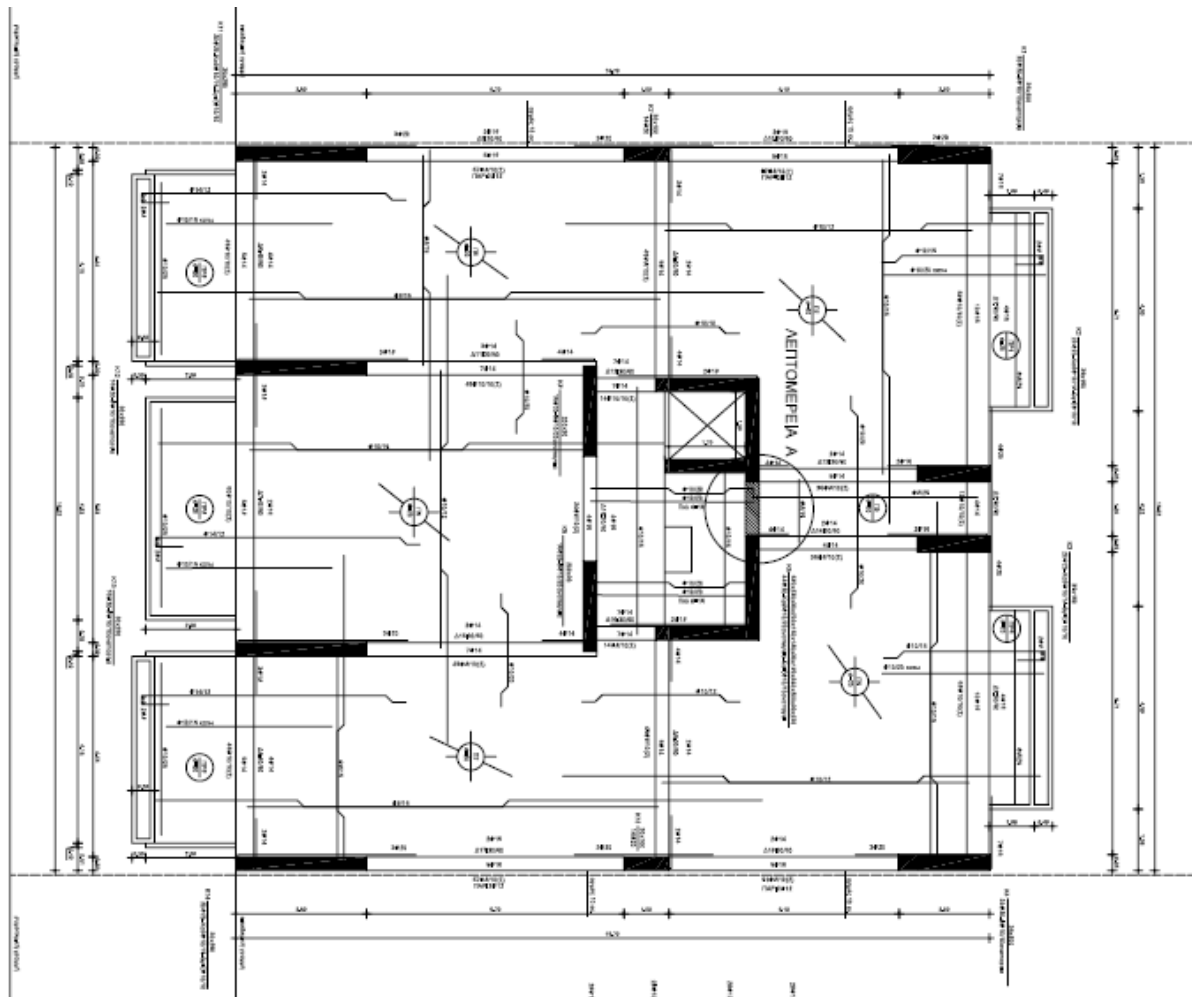
## 4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΦΟΡΕΑ

Η υπό μελέτη κατασκευή αποτελείται από οκτώ (8) ορόφους (οκτώ πλάκες οροφής) και έχει κατασκευαστεί από οπλισμένο σκυρόδεμα (Σχήμα 4.1). Το συνολικό ύψος της κατασκευής είναι 24 m, ενώ το ύψος του κάθε ορόφου είναι 3 m, με ενιαίο πάχος πλάκας για όλους τους ορόφους ίσο με 20 cm. Η κάτοψη του κτιρίου έχει ορθογωνικό σχήμα διαστάσεων  $16.02 \times 16.70 \text{ m}^2$  (Σχήμα 4.2) και δε διαφέρει από όροφο σε όροφο. Το κτίριο αυτό αποτελείται από τοιχώματα (υποστυλώματα δεν υπάρχουν) και στο εσωτερικό του, έναν πυρήνα, μέσα στον οποίο είναι τοποθετημένα το κλιμακοστάσιο και ο ανελκυστήρας. Επίσης, υπάρχουν συνολικά 3 και 2 εξώστες στην μπροστινή και στην πίσω όψη αντίστοιχα ανά όροφο.



Σχήμα 4. 1 Τομή του εξεταζόμενου κτιρίου κατά χ

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ



Σχήμα 4.2 Κάτοψη τυπικού ορόφου

Το κτίριο αυτό διαθέτει δομικό φορέα που συνίσταται στα φέροντα στοιχεία, δηλαδή τα τοιχώματα και τις δοκούς, και στα άκαμπτα διαφράγματα (οριζόντιες πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος πάχους 0.20 m μονολιθικά συνδεδεμένες με τις δοκούς).

Η ύπαρξη τοιχωμάτων βελτιώνει την αντισεισμική συμπεριφορά μίας κατασκευής. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των κατασκευών με τοιχώματα έναντι των πλαισιωτών φορέων υπό σεισμικές δράσεις είναι:

- Η μεγάλη δυσκαμψία των τοιχωμάτων οδηγεί σε μείωση των οριζόντιων μετακινήσεων του κτιρίου κατά τη διάρκεια του σεισμού, με αποτέλεσμα να μειώνεται η σημασία των φαινομένων 2ας τάξεως.
- Η μείωση των μετακινήσεων συνεπάγεται περιορισμό των βλαβών σε φέροντα και μη φέροντα στοιχεία μειώνοντας έτσι και το οικονομικό κόστος των σεισμών.
- Μειώνονται οι αβεβαιότητες ως προς τη συμμετοχή των τοιχοπληρώσεων στη σεισμική συμπεριφορά της κατασκευής.
- Μειώνονται οι αβεβαιότητες που σχετίζονται με τη συμπεριφορά των κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων, καθώς και οι συνέπειες μιας ενδεχόμενης κακής όπλισής τους.

- Τα τοιχώματα, καθώς κάμπτονται ως πρόβολοι, επιβάλλουν στροφές στα άκρα όλων των δοκών καθ' ύψος και τις αναγκάζει να πλαστικές αρθρώσεις στα προς το τοίχωμα άκρα τους.
- Χάρη στην «υπερύψωση» του σημείου συνδέσεως τοιχώματος-πλάκας ενεργοποιούνται τα διαφράγματα των ορόφων και αναπτύσσονται σταθεροποιητικές μεμβρανικές δυνάμεις.

## 4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

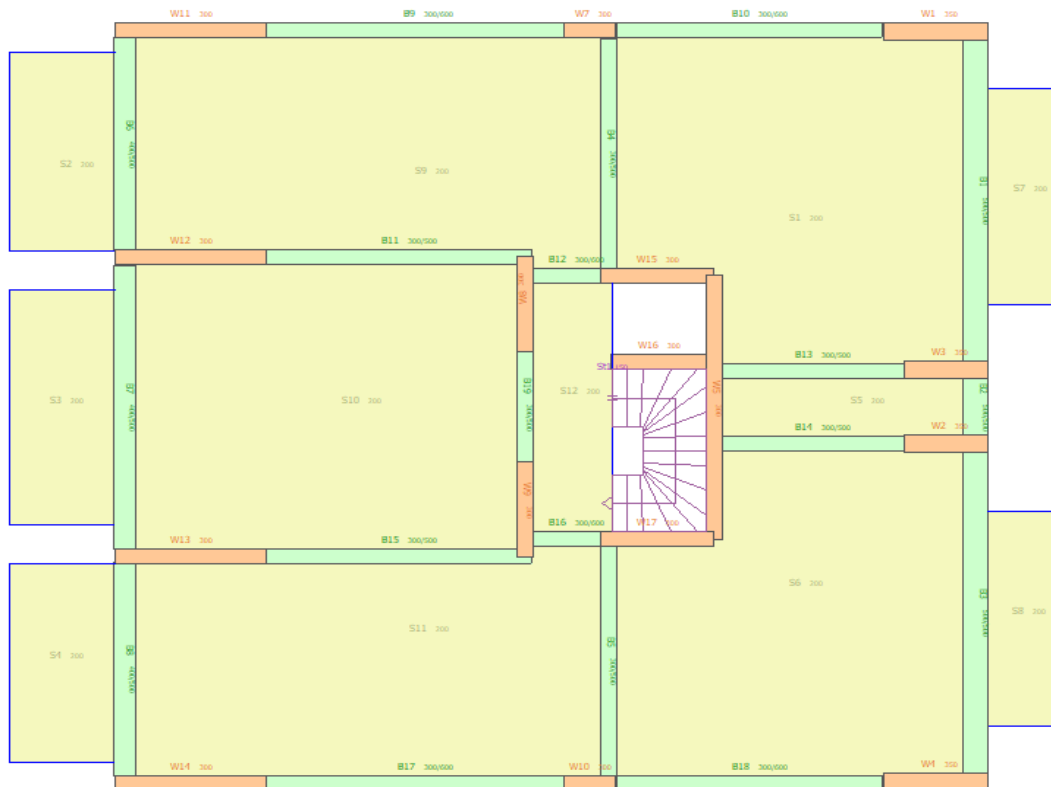
---

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την αποτίμηση της απόκρισης της κατασκευής υπό την επίδραση σεισμικών δράσεων είναι το SeismoStruct 2016 (Antonίου S. & Pinho R) της εταιρείας SeismoSoft, το οποίο έχει την δυνατότητα να λαμβάνει υπ' όψιν τόσο γεωμετρικές μη γραμμικότητες, όσο και την ανελαστική συμπεριφορά των υλικών.

Αρχικά, με την επιλογή Building Modeler σχεδιάστηκε η κάτοψη κάθε ορόφου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3, όπου εισήχθησαν οι δοκοί (beams), τα τοιχώματα (walls), οι πλάκες (slabs) και η σκάλα (stairs). Έπειτα, με την εντολή Exit & Create Project η κατασκευή είναι πλέον έτοιμη (Σχήμα 3.4) για να χρησιμοποιηθεί για οποιονδήποτε από τους επτά τύπους ανάλυσης διαθέτει το λογισμικό :

- Ιδιομορφική ανάλυση (Eigenvalue analysis)
- Στατική Ανάλυση (Static analysis)
- Στατική ανελαστική ανάλυση (Static pushover analysis)
- Στατική προσαρμοζόμενη ανελαστική ανάλυση (Static adaptive pushover analysis)
- Στατική ανάλυση χρονοϊστορίας (Static time – history analysis)
- Δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας (Dynamic time – history analysis)
- Επαυξητική δυναμική ανάλυση (Incremental dynamic analysis - IDA)

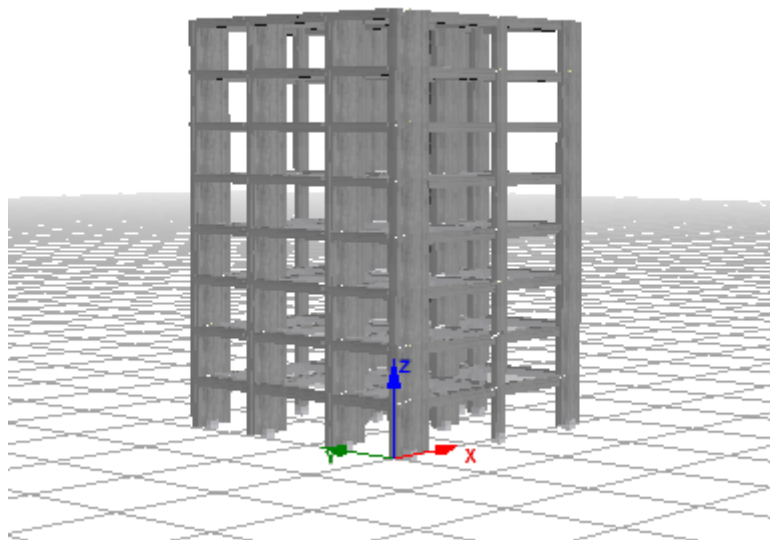
#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ



Σχήμα 4. 3 Κάτοψη τυπικού ορόφου φορέα προσομοίωσης στο πρόγραμμα SeismoStruct

Θεωρούμε ότι ο φορέας είναι πακτωμένος στο έδαφος στη στάθμη του ισογείου (το υπόγειο και η θεμελίωση αγνοούνται), χωρίς να υπάρχει αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής.

Επίσης, εξετάζουμε τη συμπεριφορά του φορέα σε οριζόντιες δράσεις μόνον κατά τη μία διεύθυνση και συγκεκριμένα κατά τη διεύθυνση  $x$ , που είναι και η διεύθυνση συμμετρίας του φορέα.



Σχήμα 4. 4 Τρισδιάστατη προσομοίωση του υπό μελέτη φορέα στο πρόγραμμα SeismoStruct

## 4.3 ΥΛΙΚΑ

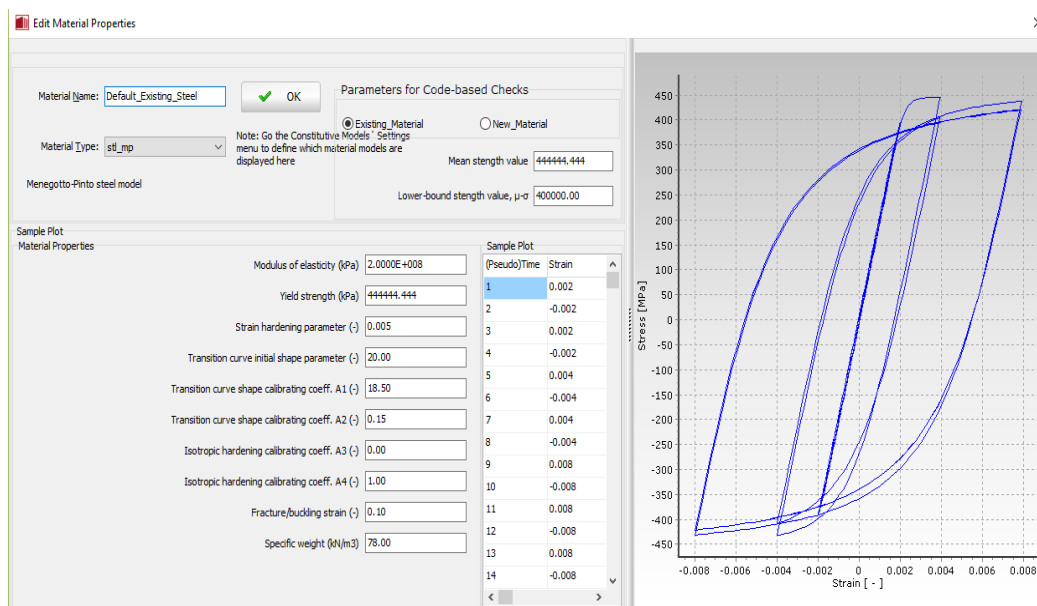
Το λογισμικό SeismoStruct δίνει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ επτά διαφορετικών προσομοιωμάτων υλικών σκυροδέματος και χάλυβα. Με κατάλληλες μετατροπές των παραμέτρων τους, καθίσταται δυνατό να προσομοιώσουμε με μεγάλη ακρίβεια τα υλικά των διατομών για την πλειοψηφία των κατασκευών.

Κατά την ανάλυση του κτιρίου, χρησιμοποιούνται μέσες τιμές για τα χαρακτηριστικά των υλικών σύμφωνα με τον EC8-3, καθώς σκοπός της ανάλυσης είναι η σεισμική αποτίμηση και όχι ο σχεδιασμός.

Συγκεκριμένα για τον φορέα που παρουσιάστηκε και παραπάνω επιλέχθηκε ένα διγραμμικό μοντέλο χάλυβα (stl\_mp) και ένα μη γραμμικό μοντέλο για περισφιγμένο σκυρόδεμα (con\_ma) ακολουθώντας Pre-Processor → Materials.

Έτσι, ο φέρων οργανισμός της κατασκευής αποτελείται εξ ολοκλήρου από σπλισμένο σκυρόδεμα μέσης αντοχής  $f_{cm} = 20$  MPa με μέτρο ελαστικότητας  $E=21$  GPa, ενώ ο χάλυβας τόσο για τον διαμήκη όσο και για τον εγκάρσιο σπλισμό των δομικών στοιχείων είναι αντοχής  $f_{ym}= 444$  MPa και διαθέτει μέτρο ελαστικότητας  $E=200$  GPa. Το ειδικό βάρος του σπλισμένου σκυροδέματος είναι  $24 \text{ kN/m}^3$ , ενώ του χάλυβα είναι ίσο με  $78 \text{ kN/m}^3$ .

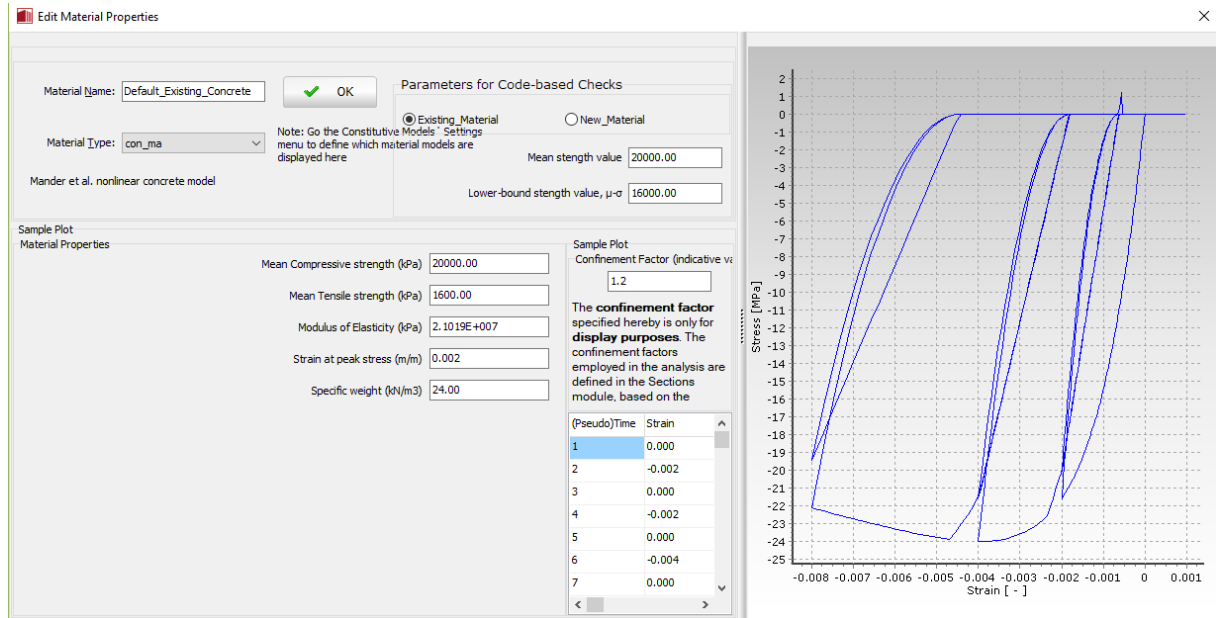
- **Διγραμμικό μοντέλο χάλυβα (stl\_mp)**



Σχήμα 4. 5 Διγραμμικό μοντέλο χάλυβα

- **Μη γραμμικό μοντέλο περισφιγμένου σκυροδέματος (con\_ma)**

Πρόκειται για ένα μοντέλο το οποίο ακολουθεί την προσέγγιση που προτείνεται από τους (Mander et al, 1988) για σταθερό συντελεστή περίσφιγξης. Το μοντέλο και οι προσδιοριζόμενοι παράμετροι  $\sigma'$  αυτό φαίνονται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4. 6 Μη γραμμικό μοντέλο περισιφιγμένου σκυροδέματος

## 4.4 ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΜΕΛΩΝ

Οι διατομές των δομικών στοιχείων εισήχθησαν από την γραμμή εργαλείων στην καρτέλα Building Modeller κάνοντας “insert” το στοιχείο που θέλουμε.

### 4.4.1 Τοιχώματα

Αρχικά, έγινε η προσομοίωση των τοιχωμάτων. Οι διαστάσεις τους φαίνονται στον Πίνακα 4.1. Λόγω της συμμετρίας της κάτοψης και των φορτίων σε κάθε όροφο, τα τοιχώματα μπορούν να ομαδοποιηθούν στις παρακάτω κατηγορίες ως προς τη γεωμετρία και τον σπλισμό τους:

Wall	Depth (mm)	Length (mm)
W1,W4	350	2006
W3,W2	350	1604
W7,W10	300	1002
W8,W9	300	1992
W11,W14	300	2908
W12,W13	300	2908
W15,W17	300	2172
W5	300	5556
W16	300	1822

Πίνακας 4. 1 Διαστάσεις τοιχωμάτων φορέα

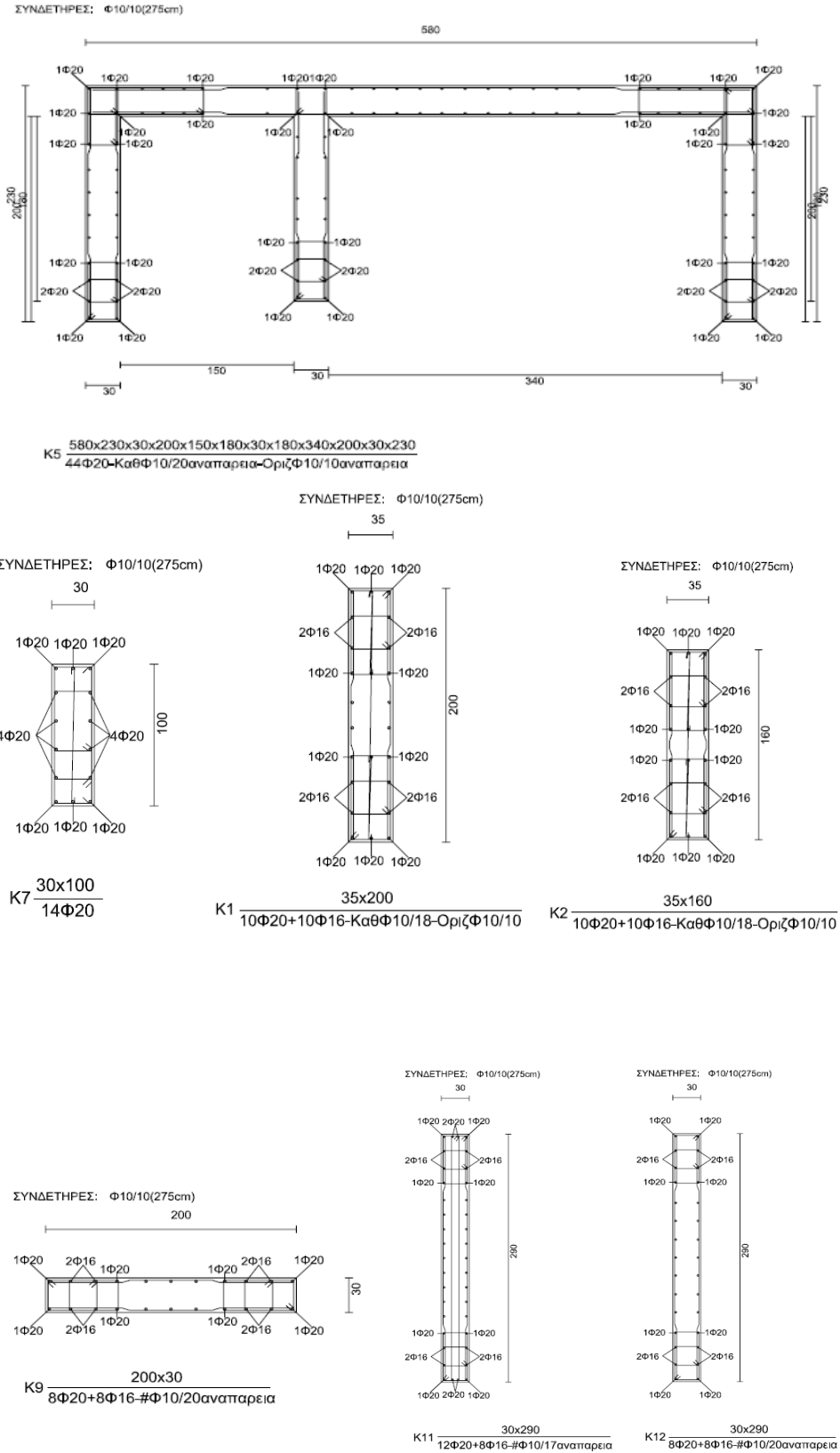
Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται μία χαρακτηριστική διατομή τοιχώματος, όπως αυτή δημιουργήθηκε από το λογισμικό SeismoStruct:



Σχήμα 4. 7 Διατομή τοιχώματος στο SeismoStruct

Στη συνέχεια, παρατίθενται διατομές των χαρακτηριστικών τοιχωμάτων κάθε ομάδας, σε κάθε όροφο του κτιρίου, στις οποίες φαίνεται ο τοποθετούμενος διαμήκης και εγκάρσιος σπλισμός. Τα στοιχεία W5,W15,W16 και W17, αντιπροσωπεύουν τον πυρήνα, όπου στο εσωτερικό του είναι τοποθετημένα το κλιμακοστάσιο και ο ανελκυστήρας, και συμβολίζεται με K5.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ



*Σχήμα 4. 8 Τομές και σπλισμοί τοιχωμάτων*



#### 4.4.2 Δοκοί

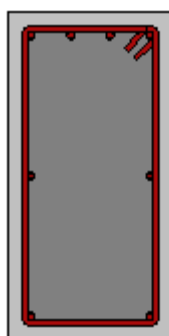
Στην συνέχεια εισήχθησαν οι δοκοί του φορέα. Οι διαστάσεις τους φαίνονται στον Πίνακα 4.2. Λόγω της συμμετρίας της κάτοψης και των φορτίων του κτιρίου, οι δοκοί κάθε ορόφου μπορούν να ομαδοποιηθούν στις παρακάτω κατηγορίες ως προς τη γεωμετρία και την όπλισή τους:

Beam	Height/Width (mm/mm)	Length(mm)
B1,B3	500/500	6730
B2	500/500	1204
B7	500/400	5948
B6,B8	500/400	4454
B9,B17	300/600	5718
B11,B15	500/300	5116
B10,B18	300/600	5116
B12,B16	600/300	1304
B4,B5	500/300	4826
B19	500/300	2338
B13,B14	500/300	3510

Πίνακας 4. 2 Διαστάσεις δοκών φορέα

Οι δοκοί B1,B2,B4,B12,B14,B16,B15,B19,B18,17 είναι οι περιμετρικές δοκοί του τυπικού ορόφου.

Στο Σχήμα 4.9 φαίνεται μια χαρακτηριστική διατομή δοκού όπως αυτή δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα SeismoStruct:



Σχήμα 4. 9 Διατομή δοκού στο πρόγραμμα SeismoStruct

Στο Σχήμα 4.2 της εργασίας αυτής παρουσιάζεται ο ξυλότυπος του τυπικού ορόφου της κατασκευής, στην οποία φαίνεται ο τοποθετούμενος διαμήκης και εγκάρσιος οπλισμός σε κάθε θέση.

### 4.4.3 Πλάκες

Κάθε όροφος αποτελείται από δώδεκα πλάκες πάχους  $h=20\text{cm}$ , εκ των οποίων οι πέντε είναι οι πρόβολοι. Οι πλάκες εισήχθησαν τελευταίες στο προσομοίωμα στο λογισμικό SeismoStruct.

## 4.5 ΦΟΡΤΙΑ

Ο υπολογισμός των μόνιμων φορτίων που καταπονούν την κατασκευή, συνίσταται στην κατανομή του συνολικού βάρους της κατασκευής και στα επιμέρους δομικά στοιχεία. Η συνολική μάζα της κατασκευής προέκυψε από τον χαρακτηριστικό συνδυασμό φορτίων  $Q_{sd} = G + \psi_2 Q$  (χαρακτηριστική τιμή  $Q=2 \text{ kN/m}^2$ ), όπου η τιμή του συντελεστή συνδυασμού  $\psi_2$  για τη μακροχρόνια («οιονεί μόνιμη») τιμή των κινητών φορτίων λαμβάνεται ίση με  $\psi_2=0.3$  και ισούται με 2412 tn, η οποία ισοκατανέμεται στα οχτώ διαφράγματα, έτσι ώστε η μάζα κάθε στάθμης να ισούται με 301.5 tn. Οι συντελεστές που αναφέρθηκαν  $C_g=1.00$  και  $C_q=0.3$  επιλέχθηκαν κατά την διαδικασία σχεδίασης στο Building Modeler επιλέγοντας Settings → Loading Combination Coefficients.

## 4.6 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

### Σεισμική Ζώνη

Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας	I	II	III
$\alpha$	0.16	0.24	0.36

Πίνακας 4. 3 Σεισμική επιτάχυνση εδάφους :  $A = a * g$  (  $g$  : επιτάχυνση βαρύτητας)

Το υπό μελέτη κτίριο ανήκει στη σεισμική ζώνη II (Importance Class II) οπότε έχει σεισμική επιτάχυνση εδάφους  $A = 0,24 \text{ g}$ .

## Σπουδαιότητα κτιρίου

Κατηγορία σπουδαιότητας	$\gamma_i$	Περιγραφή
I	0.80	Κτίρια δευτερεύουσας σημασίας για τη δημόσια ασφάλεια, π.χ. γεωργικά κτίρια, κλπ.
II	1.00	Συνήθη κτίρια, που δεν ανήκουν στις άλλες κατηγορίες.
III	1.20	Κτίρια των οποίων η σεισμική ασφάλεια είναι σημαντική, λαμβάνοντας υπόψη τις συνέπειες κατάρρευσης, π.χ. σχολεία, αίθουσες συνάθροισης, πολιτιστικά ιδρύματα κλπ.

Πίνακας 4. 4 Κατηγορίες σπουδαιότητας για κτίρια

Το κτίριό μας ανήκει στην κατηγορία II (συνήθη κτίρια) με  $\gamma=1,00$ .

## Τιμές χαρακτηριστικών περιόδων και συντελεστής εδάφους

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

Πίνακας 4. 5 Τιμές χαρακτηριστικών περιόδων και συντελεστή εδάφους για την οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης

Το έδαφος του κτιρίου ανήκει στην κατηγορία A, επομένως σύμφωνα με τον Πίνακα 4.5 του Εθνικού Προσαρτήματος για την Ελλάδα, ο συντελεστής εδάφους παίρνει την τιμή  $S= 1.00$  και οι χαρακτηριστικές περίοδοι είναι  $T_B= 0.15s$  ,  $T_C=0.40s$  και  $T_D=2.50s$ .

## Συντελεστής απόσβεσης

Για κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα προκύπτει η απόσβεση της κατασκευής (damping)  $\xi = 5\%$  .

Όλες οι παραπάνω τιμές που αφορούν στο φάσμα σχεδιασμού εισάγονται στο λογισμικό (Pre –Processor → Target Displacement → Seismic Action) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10.

Σχήμα 4. 10 Εισαγωγή χαρακτηριστικών τιμών φάσματος σχεδιασμού

## 4.7 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Για τον καθορισμό της κατανομής της αυξανόμενης οριζόντιας φόρτισης πραγματοποιήθηκε για το κτίριο η ιδιομορφική ανάλυση (Eigenvalue Analysis).

Η ιδιομορφική ανάλυση γίνεται με την ελεύθερη ταλάντωση του φορέα. Η ανάλυση του φορέα γίνεται κατά τη διεύθυνση συμμετρίας  $x$ . Οι μάζες των ορόφων του συστήματος προκύπτουν από τα κατακόρυφα φορτία (μόνιμα και κινητά) με βάση το συνδυασμό  $G+0.30Q$ . Ακόμη, το ποσοστό της κρίσιμης απόσβεσης είναι σταθερό και ίσο με  $\xi=5\%$ .

Από τα ποσοστά συμμετοχής της μάζας που αντιστοιχούν στη θεμελιώδη ιδιομορφή για κάθε διεύθυνση εκτιμάται η επίδραση των ανώτερων ιδιομορφών στην συμπεριφορά της κατασκευής. Υψηλές τιμές των ποσοστών αυτών υποδηλώνουν

πως η κατασκευή αποκρίνεται κυρίως σύμφωνα με το σχήμα της θεμελιώδους ιδιομορφής της, συνεπώς για την διεξαγωγή στατικών ανελαστικών αναλύσεων δύναται να χρησιμοποιηθεί η κατανομή της οριζόντιας φόρτισης σύμφωνα της ιδιομορφής αυτής.

Για το κτίριο κατά την διεύθυνση  $x$ , η τιμή ιδιοπεριόδου προέκυψε ίση με  $T = 0.49s$  με δρώσα μάζα 71.9% της συνολικής μάζας του κτιρίου (Eigenvalue Analysis → Post-Processor → Modal/Mass Quantities → Modal Periods and Frequencies). Επομένως, γίνεται η ιδιομορφική κατανομή των οριζόντιων φορτίων της μη-γραμμικής ανάλυσης βάσει της δεύτερης .

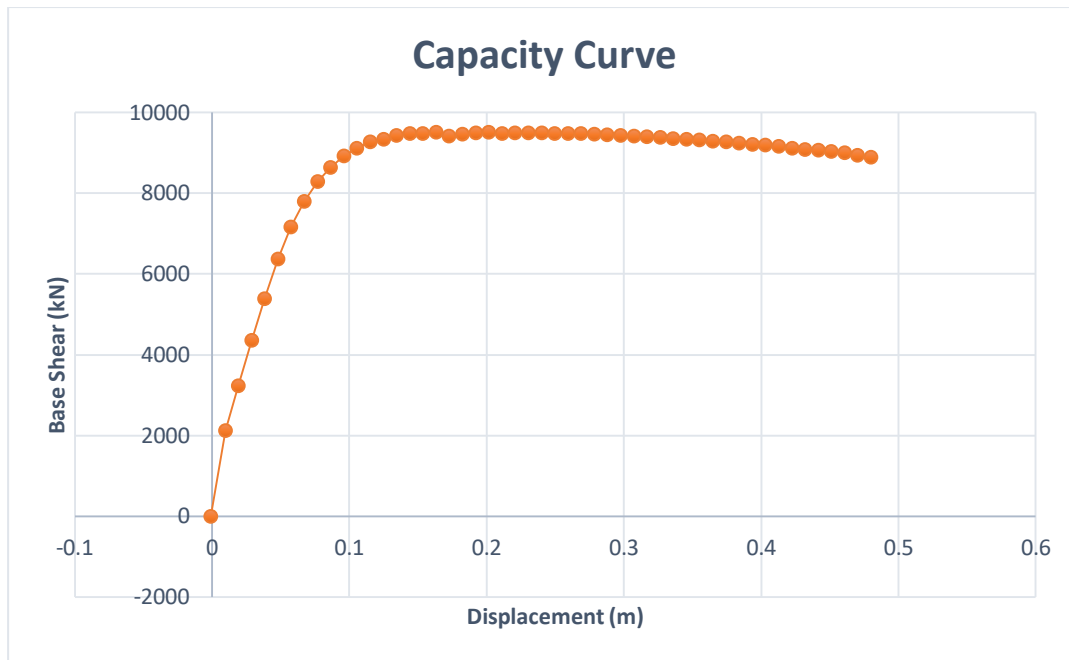
#### 4.8 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (STATIC PUSHOVER ANALYSIS)

---

Η συνολική ικανότητα της κατασκευής εξαρτάται από την επιμέρους ικανότητα των δομικών στοιχείων που συνθέτουν το φέροντα οργανισμό. Προκειμένου να προσδιοριστεί η ικανότητα πέραν από το όριο διαρροής, απαιτείται κάποιας μορφής ανελαστική ανάλυση, όπως η μέθοδος σταδιακού ελέγχου των μετακινήσεων (μη-γραμμική στατική ανάλυση, pushover analysis). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μία σειρά από διαδοχικές ελαστικές αναλύσεις για την προσέγγιση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς της κατασκευής. Καθεμία από τις αναλύσεις αυτές αποτελεί ένα ξεχωριστό υπολογιστικό βήμα. Τα αποτελέσματα κάθε ανάλυσης προστίθενται στα αποτελέσματα της προηγούμενης, έτσι ώστε να προσεγγιστεί το συνολικό διάγραμμα τέμνουσας βάσης  $V$  και μετακίνησης στην κορυφή της κατασκευής  $\Delta$ . Το διάγραμμα αυτό ονομάζεται *καμπύλη ικανότητας* ή αντίστασης και αγγλιστί *capacity curve*.

Μετά από κάθε ελαστική ανάλυση, το αναλυτικό προσομοίωμα της κατασκευής τροποποιείται κατάλληλα, ώστε να ληφθεί υπόψη η πραγματική εντατική κατάσταση και η μείωση της δυσκαμψίας των στοιχείων που έχουν διαρρεύσει. Εφαρμόζεται μία νέα κατανομή μονοτονικά αυξημένων πλευρικών φορτίων και η ελαστική ανάλυση επαναλαμβάνεται, μέχρι να διαρρεύσει μία νέα ομάδα δομικών στοιχείων. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, έως ότου η κατασκευή να γίνει ασταθής ή η συνολική μετακίνηση της κατασκευής να γίνει ίση με μία προκαθορισμένη οριακή τιμή.

Η καμπύλη ικανότητας του υπό εξέταση φορέα φαίνεται στο Σχήμα 4.11.



Σχήμα 4. 11 Καμπύλη Ικανότητας του υπό εξέταση φορέα για ομοιόμορφο φορτίο.

## 4.9 ΠΡΟΣΑΥΞΗΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η μέθοδος της προσαυξητικής δυναμικής ανάλυσης αναλύθηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 3.

Ο υπό μελέτη φορέας υποβλήθηκε σε 42 καταγραφές εδαφικής κίνησης της βάσης NGA, η καθεμία από τις οποίες κλιμακώνεται καταλλήλως (μεγεθύνεται ή σμικρύνεται), έτσι ώστε η μη-γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας της κάθε κλιμάκωσης να καλύπτει πλήρως (και περαιτέρω) όλο το φάσμα της παραμορφωσιακής ικανότητας του φορέα. Κάθε κλιμακωμένη καταγραφή παράγει μία καμπύλη, την *καμπύλη IDA*, το σύνολο των οποίων για όλες τις καταγραφές, μας δίνει σημαντικές πληροφορίες για την ανελαστική συμπεριφορά της κατασκευής.

Το φάσμα της παραμορφωσιακής ικανότητας του μοντέλου θεωρήθηκε ότι θα καλύπτεται, όταν η σχετική μετακίνησή του σε κάποια κλιμάκωση φτάσει ή ξεπεράσει την στάθμη σχεδόν κατάρρευσης σύμφωνα με τα HRC-scale damage limit states (Rossetto & Elnashai, 2003). Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ως στάθμες για το υπό μελέτη κτίριο, φαίνονται στον Πίνακα 4.6, στην στήλη που αντιστοιχεί στα τοιχωματικά κτίρια (shear-walls).

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ

ISD<sub>max</sub>%(%) limits for HRC-scale

HRC damage state	All	N-D MRF	Infilled MRF	Shear-walls
None	0.00	0.00	0.00	0.00
Slight	0.13	0.32	0.05	0.26
Light	0.19	0.43	0.08	0.34
Moderate	0.56	1.02	0.30	0.72
Extensive	1.63	2.41	1.15	1.54
Part. Coll.	3.34	4.27	2.80	2.56
Collapse	>4.78	>5.68	>4.36	>3.31

Πίνακας 4. 6 HRC (Homogenised Reinforced Concrete) -scale damage limit states





---

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

---

---



## 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Στο Κεφάλαιο 1 είχαμε αναπτύξει δια μακρών το θέμα των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου. Στο παρόν κεφάλαιο, θα ασχοληθούμε με την εφαρμογή τέτοιων εδαφικών κινήσεων στον φορέα που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται 42 εδαφικές καταγραφές της βάσης δεδομένων NGA οι οποίες είχαν ταξινομηθεί από τον (Baker, 2007) ως παλμικές. Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 1.6.1 της παρούσας εργασίας, προκειμένου μια καταγραφή να θεωρείται παλμική πρέπει ο παλμός να μην φτάνει στο τέλος στη χρονοϊστορία ταχύτητας, η μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV να ξεπερνά τα 30 cm/sec και οι τιμές του δείκτη πρόβλεψης παλμού P.I. να είναι μεγαλύτερες του 0.85 s.

Η αξιοποίηση των ως άνω καταγραφών γίνεται με μη-γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας σταδιακώς επαυξανόμενες. Κάθε επιταχυνσιογράφημα κλιμακώνεται καταλλήλως (μεγεθύνεται ή σμικρύνεται), έτσι ώστε η μη-γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας της κάθε κλιμάκωσης να καλύπτει πλήρως (και περαιτέρω) όλο το φάσμα της παραμορφωσιακής ικανότητας του φορέα. Κάθε κλιμάκωση μιας καταγραφής δίνει και από ένα ζεύγος τιμών που αφορούν σε κάποια μεγέθη έντασης. Η τοποθέτηση αυτών των διατεταγμένων ζευγών τιμών σε γράφημα σχηματίζει μία καμπύλη, την καμπύλη IDA. Η μέθοδος IDA έχει αναλυθεί εκτενώς στο Κεφάλαιο 3.

Η μη-γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας των χρησιμοποιηθεισών καταγραφών στην παρούσα εργασία έγινε με τη χρήση του προγράμματος *SeismoStruct*. Έτσι, εξάγονται οι καμπύλες IDA αλλά και οι χρονοϊστορίες ταχύτητας, επιτάχυνσης και μετακίνησης της απόκρισης της κατασκευής. Τα δεδομένα που προέκυψαν, εισήχθησαν στο λογισμικό *Seismosignal*, ώστε στην συνέχεια να αξιοποιηθεί ο υπολογιστικός κώδικας *CROSS5NEW-5* που αποτελεί εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας των (Mimoglou et al., 2014) για τη μετατροπή αυτών των χρονοϊστοριών σε φάσματα και εν τέλει για τη μόρφωση του φάσματος συνέλιξης. Έτσι, υπολογίστηκαν τα χαρακτηριστικά του παλμού κατευθυντικότητας της εδαφικής ταχύτητας (περίοδος T, πλάτος A, πλήθος κύκλων γ και συντελεστής συσχέτισης cc).

Στη συνέχεια, λοιπόν παρουσιάζεται οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Για κάθε καταγραφή απεικονίζονται:

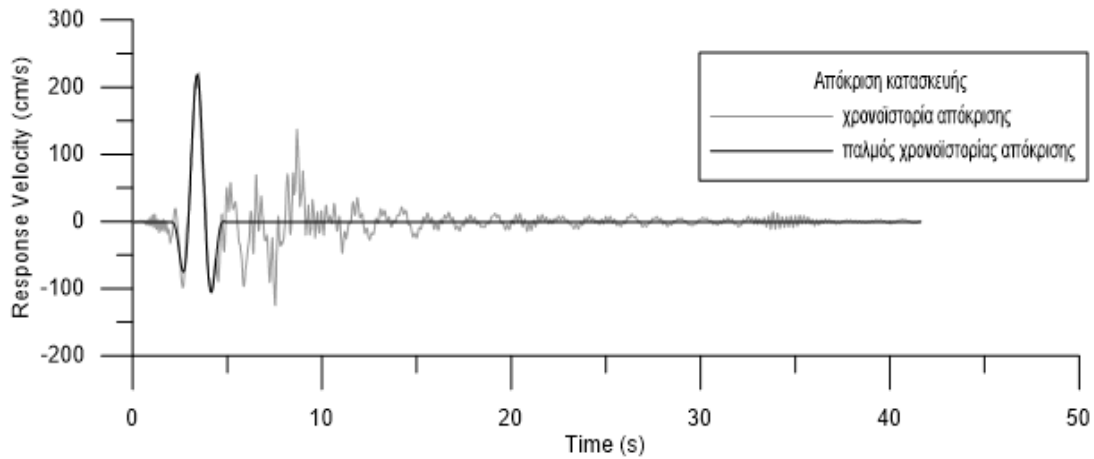
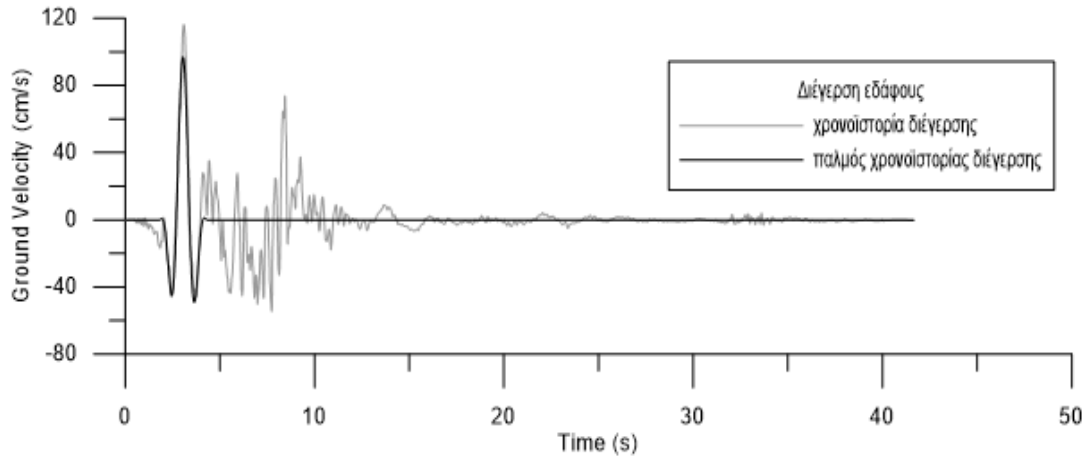
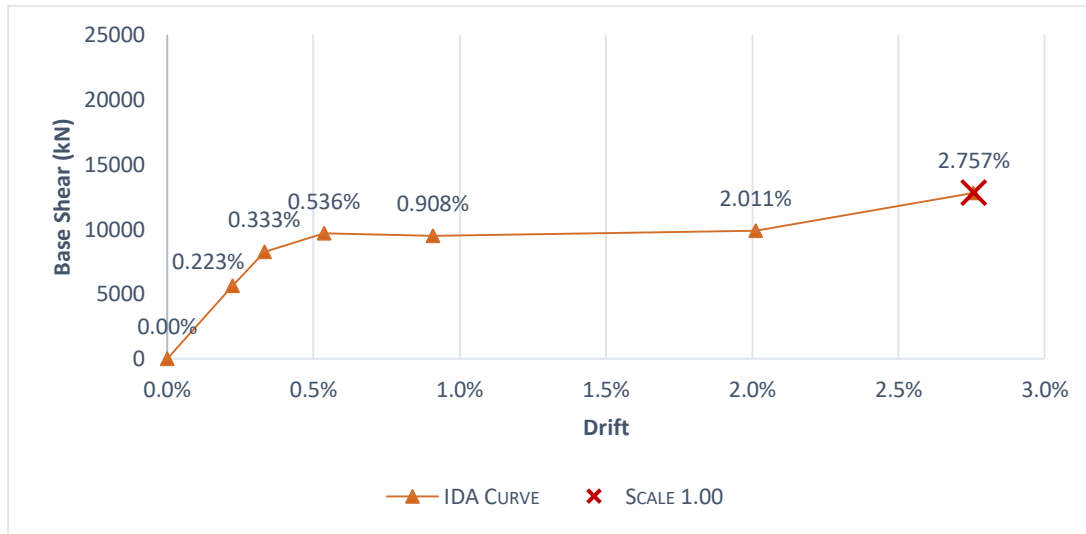
- η καμπύλη IDA για το ζεύγος μέγιστης τέμνουσας και μέγιστης σχετικής μετακίνησης για το «control node» που βρίσκεται στην κορυφή του κτιρίου. Επίσης, πάνω στην καμπύλη έχει σημειωθεί χαρακτηριστικά το «scale 1.00» δηλαδή το σημείο στο οποίο, ο πολλαπλασιαστικός συντελεστής ισούται με 1 και ουσιαστικά αντιστοιχεί στο αρχικό επιταχυνσιογράφημα.

- η χρονοϊστορία ταχύτητας της διέγερσης του εδάφους (από την βάση δεδομένων NGA) με γκρι χρώμα, και ο δεσπόζων παλμός της (από την μεθοδολογία των *Mimoglou et al*) με μαύρο χρώμα.
- η χρονοϊστορία ταχύτητας της απόκρισης της κατασκευής (από το SeismoStruct) με γκρι χρώμα και ο δεσπόζων παλμός της (από την μεθοδολογία των *Mimoglou et al*) με μαύρο χρώμα.
- οι περίοδοι των παλμών διέγερσης και απόκρισης, και ο συντελεστής συσχέτισης του παλμού απόκρισης με την χρονοϊστορία απόκρισης.

Σημειώνεται ότι η αρίθμηση των καταγραφών έχει διατηρηθεί αυτούσια όπως δίνεται στη βάση δεδομένων σεισμικών καταγραφών του προγράμματος NGA.

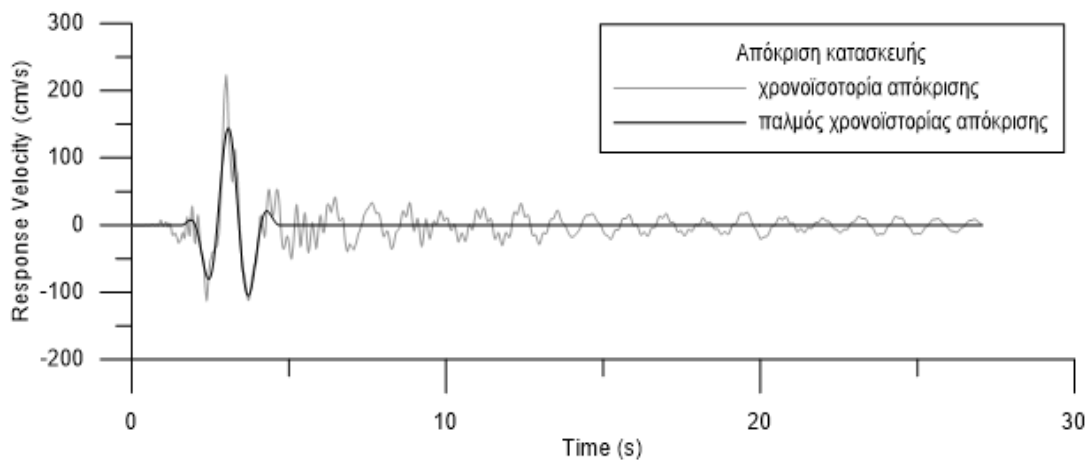
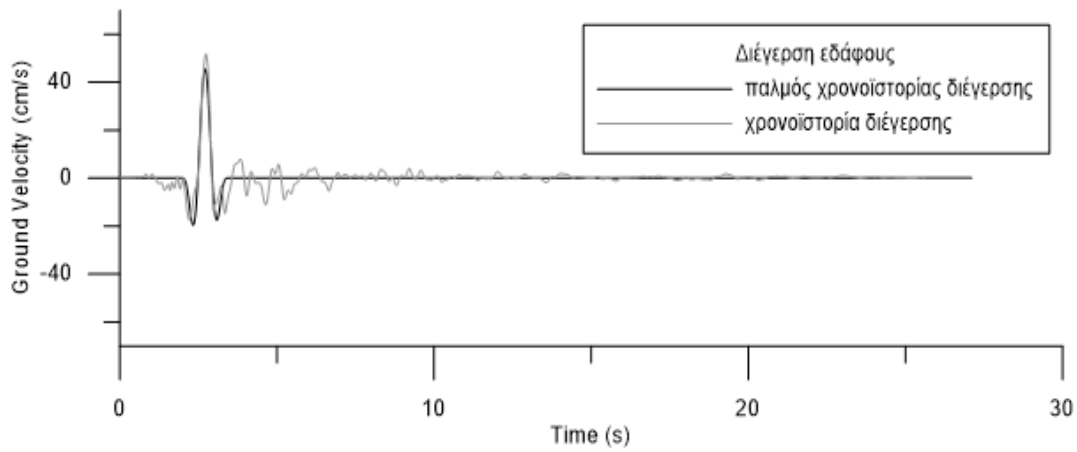
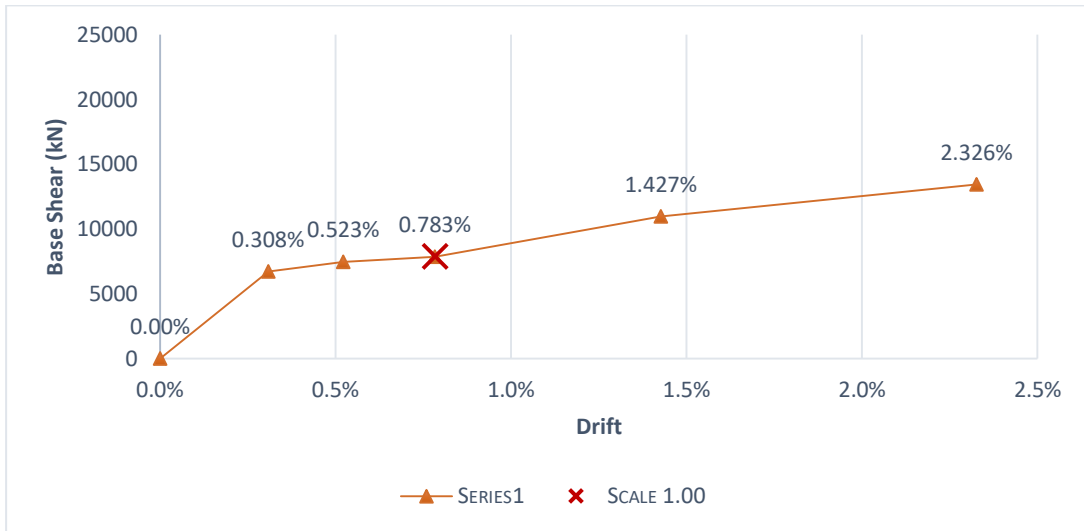
## 5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

#1



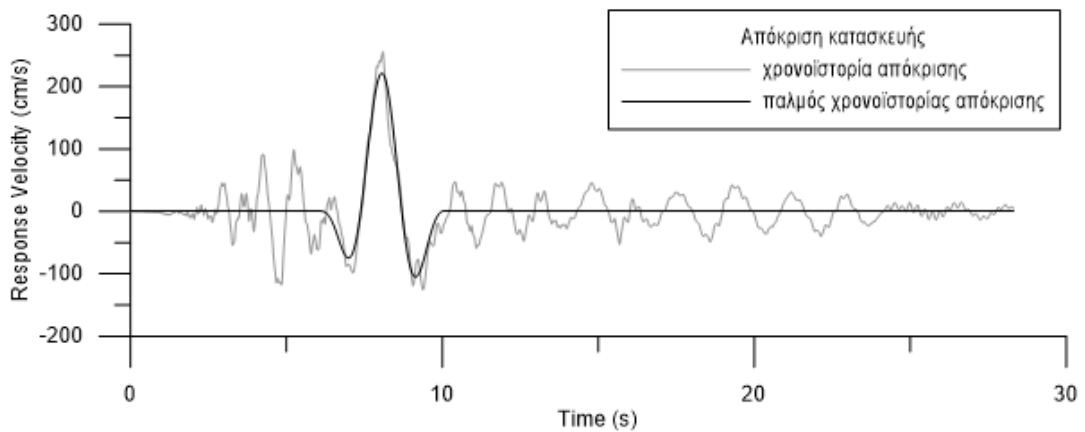
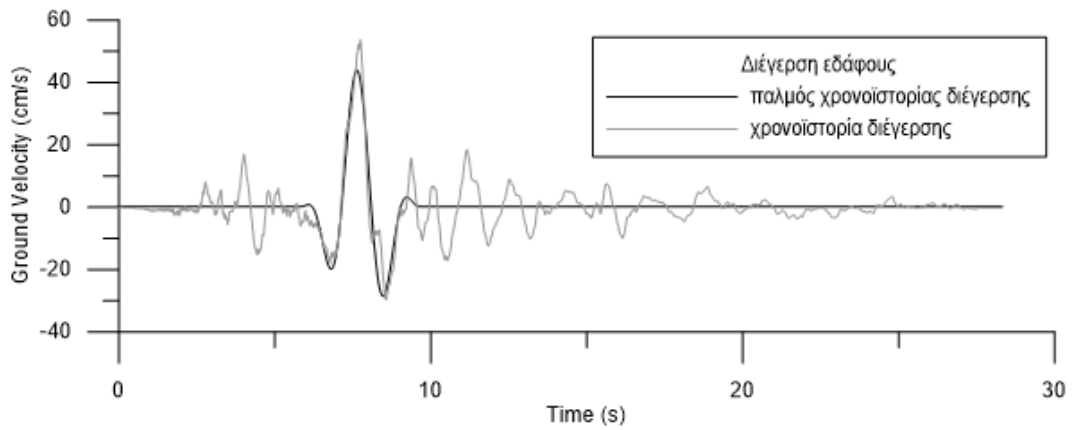
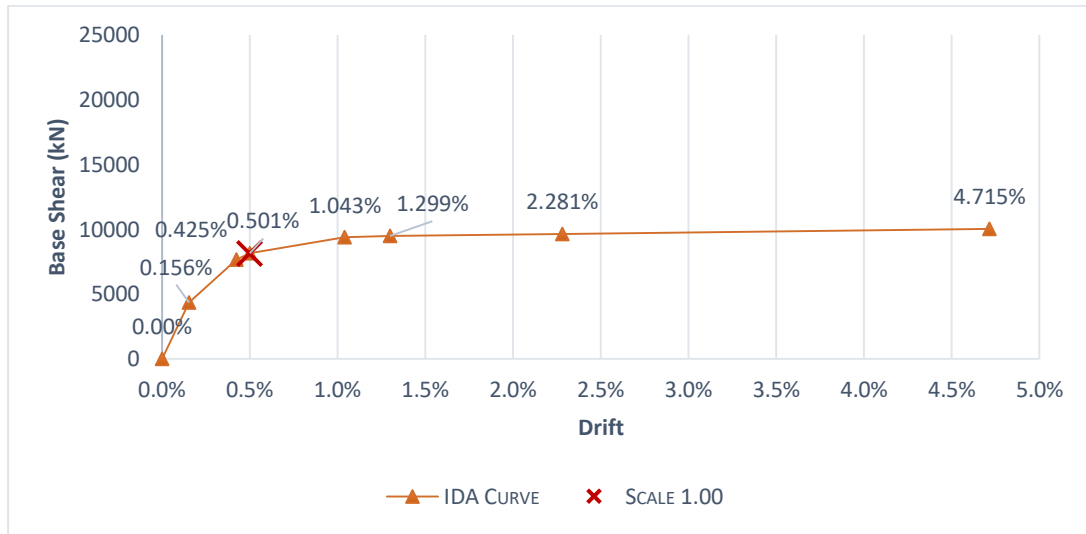
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
1.41	1.80	0.792

#2



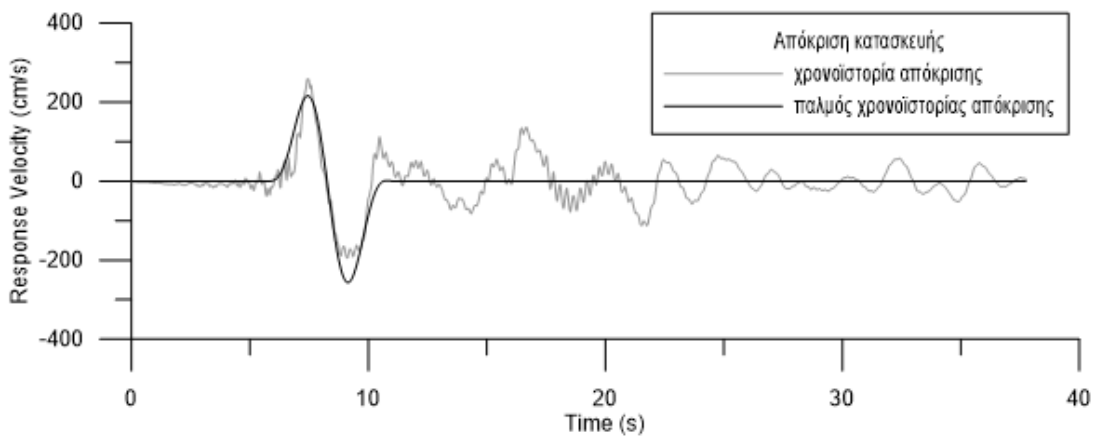
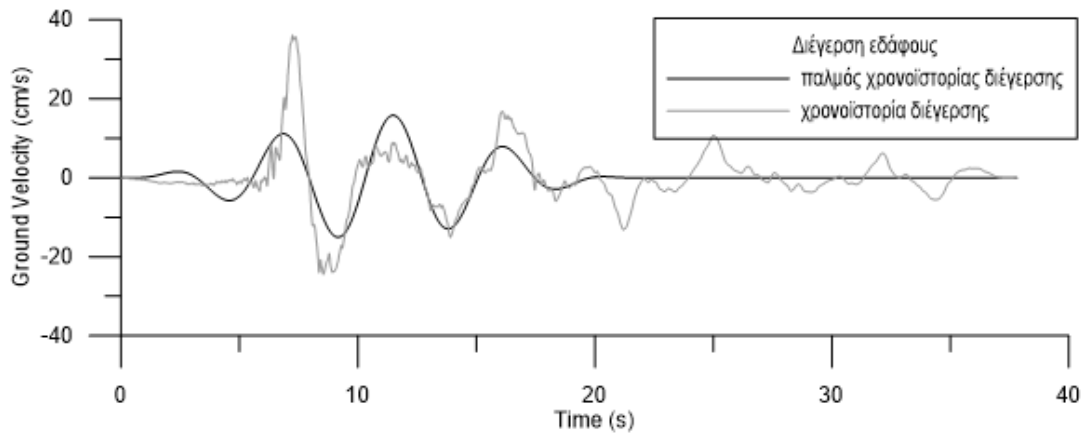
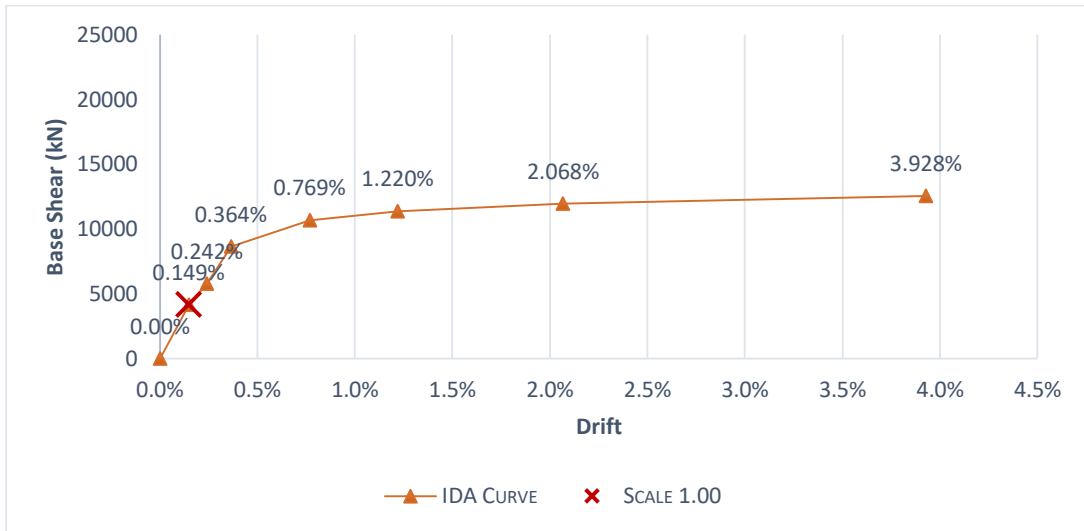
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
0.94	1.39	0.820

#4



Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
1.90	2.63	0.809

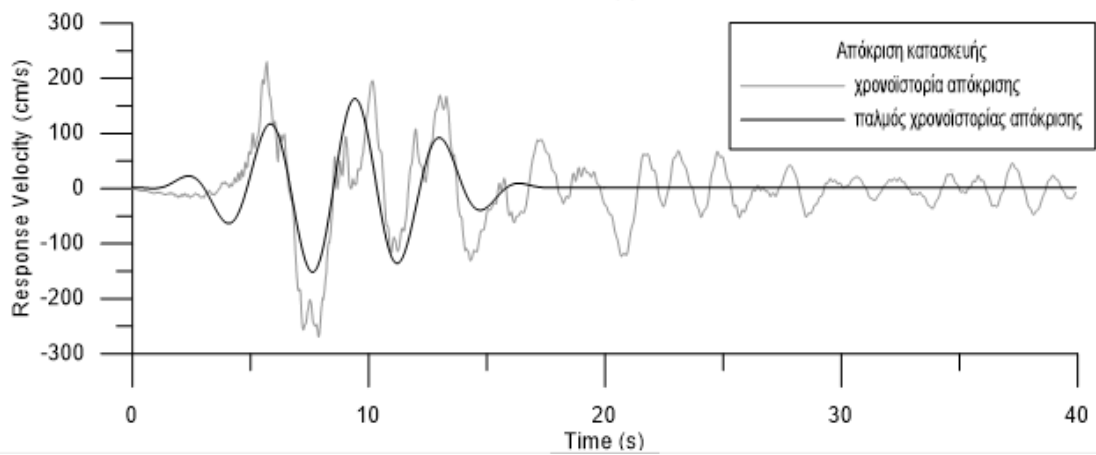
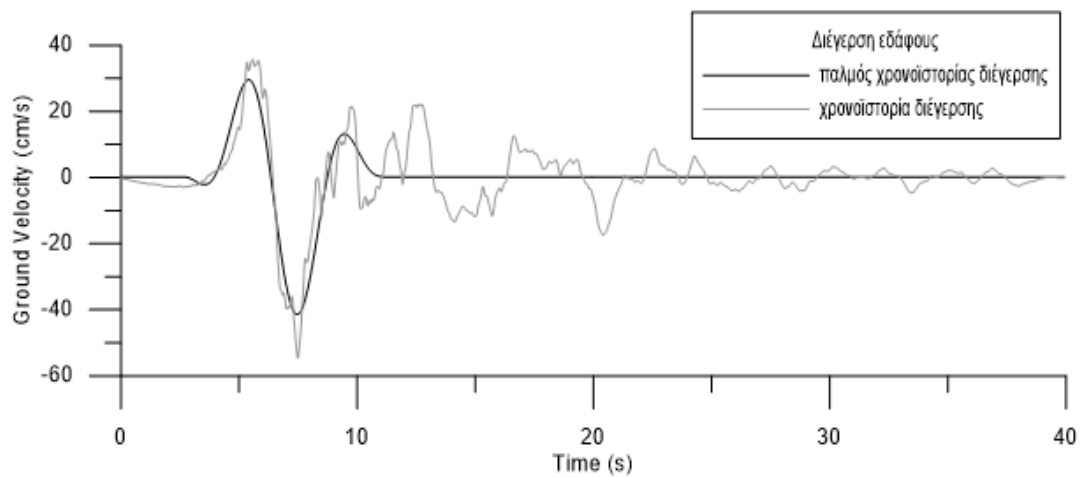
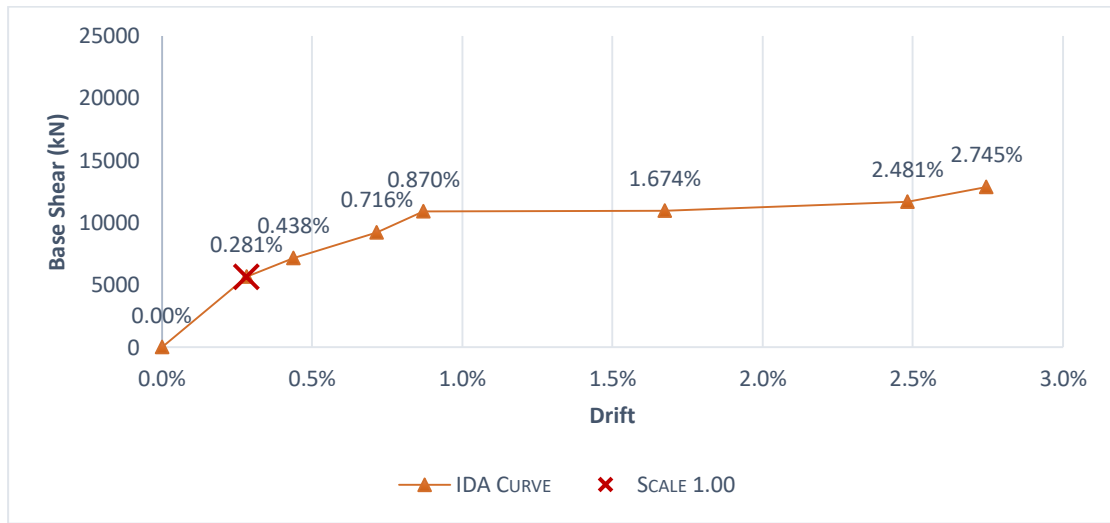
#5



Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
4.78	4.80	0.745

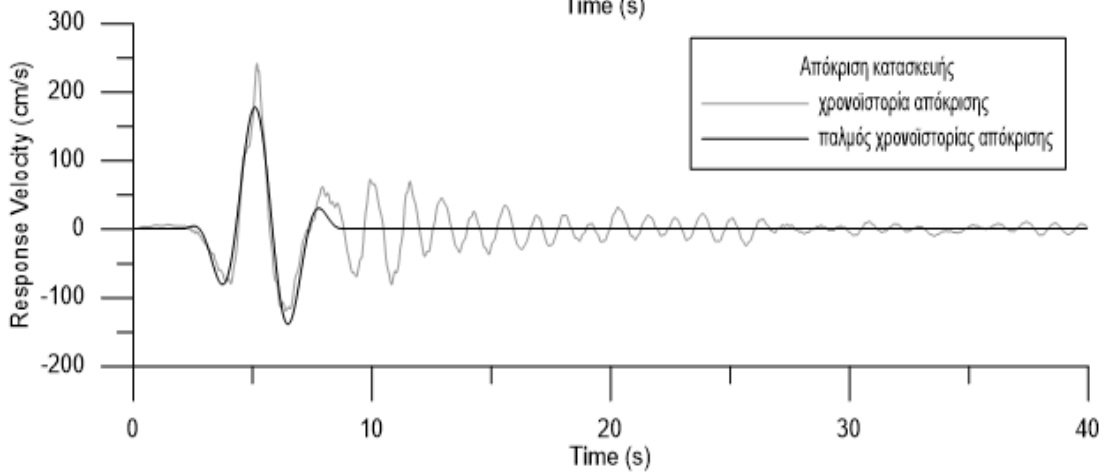
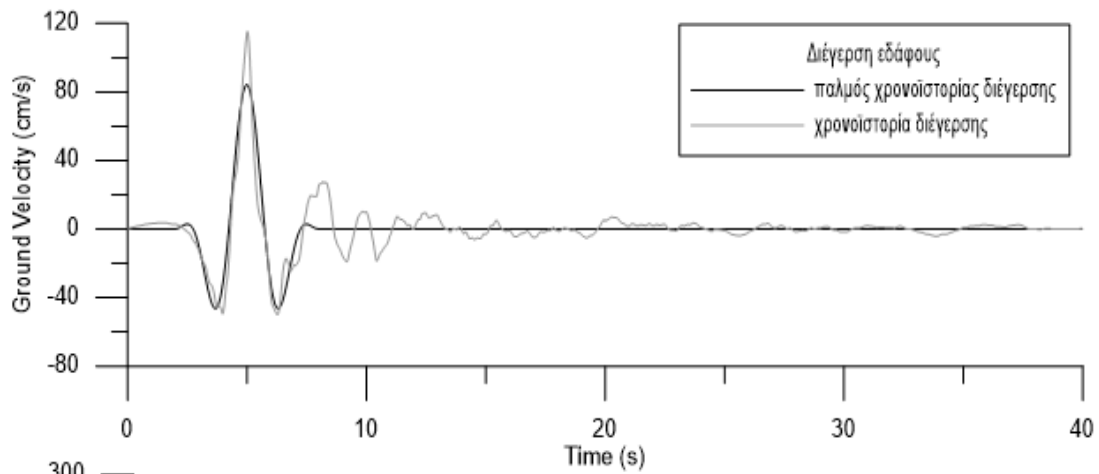
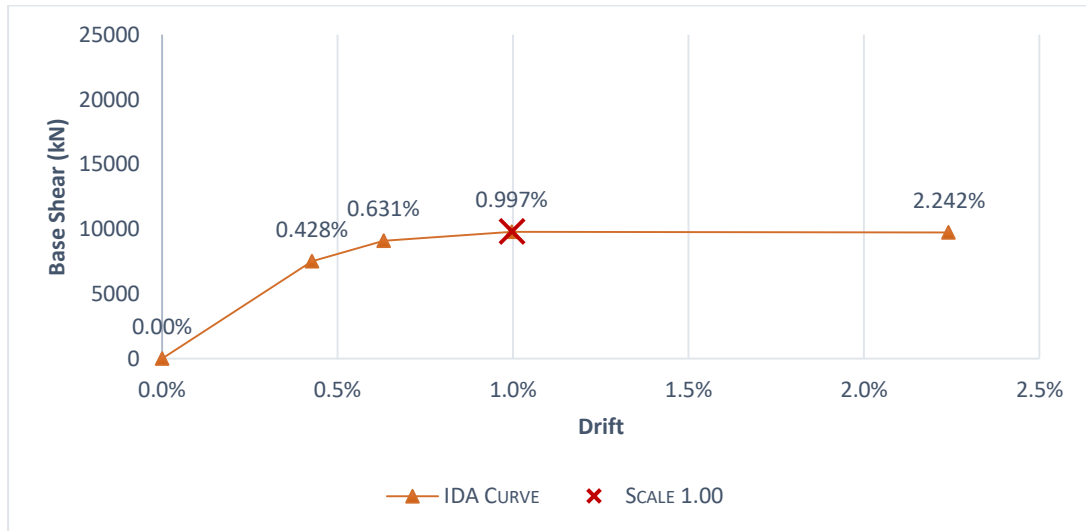


#6



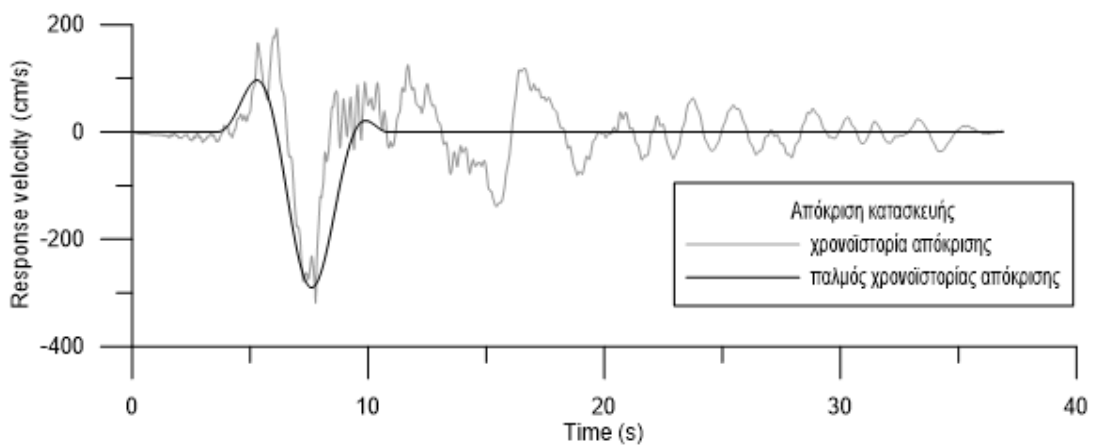
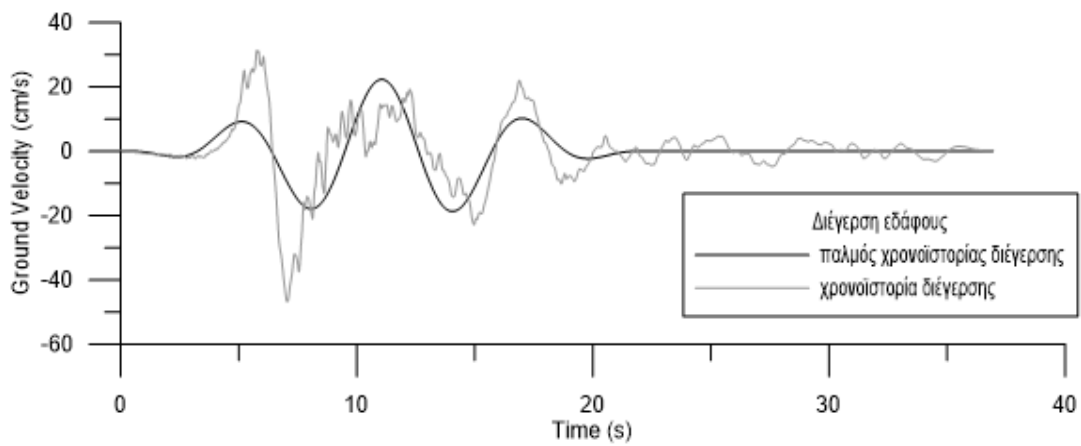
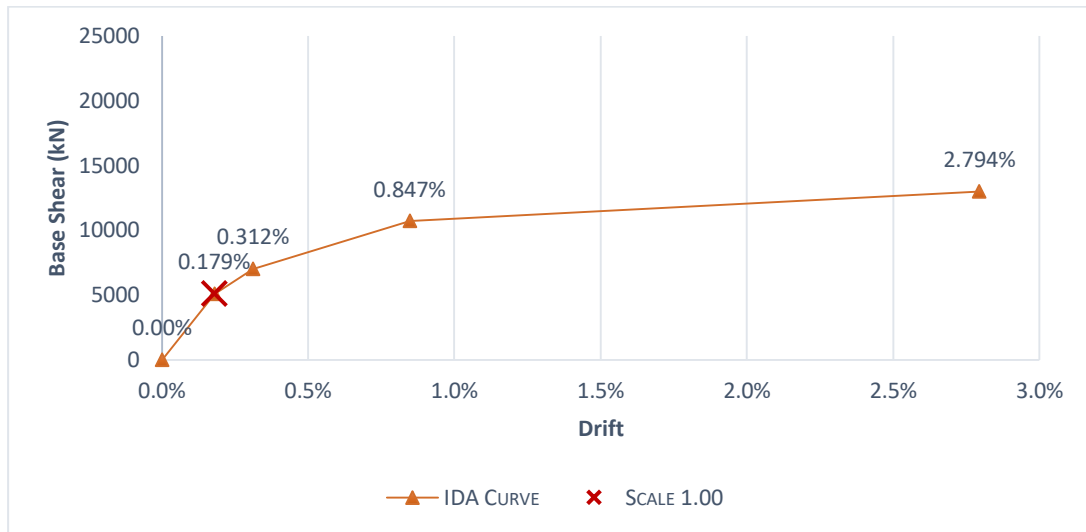
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
4.17	3.66	0.686

#7



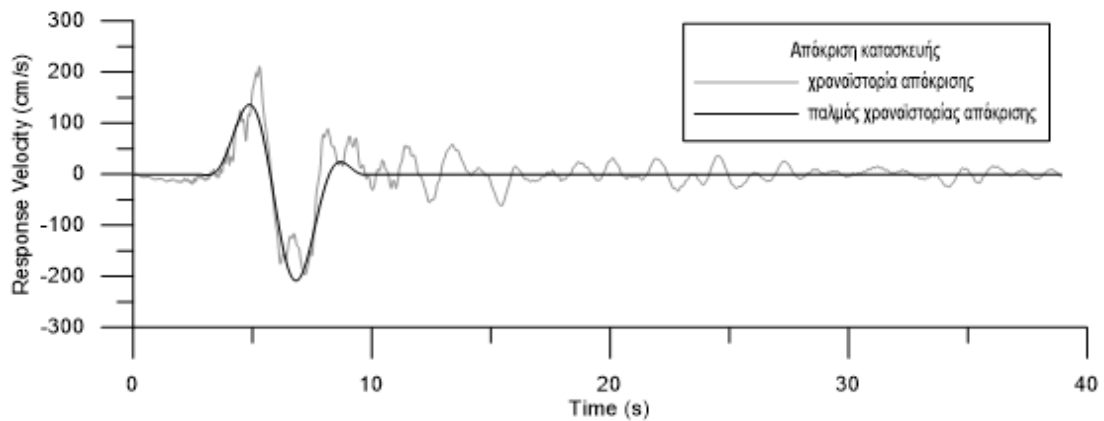
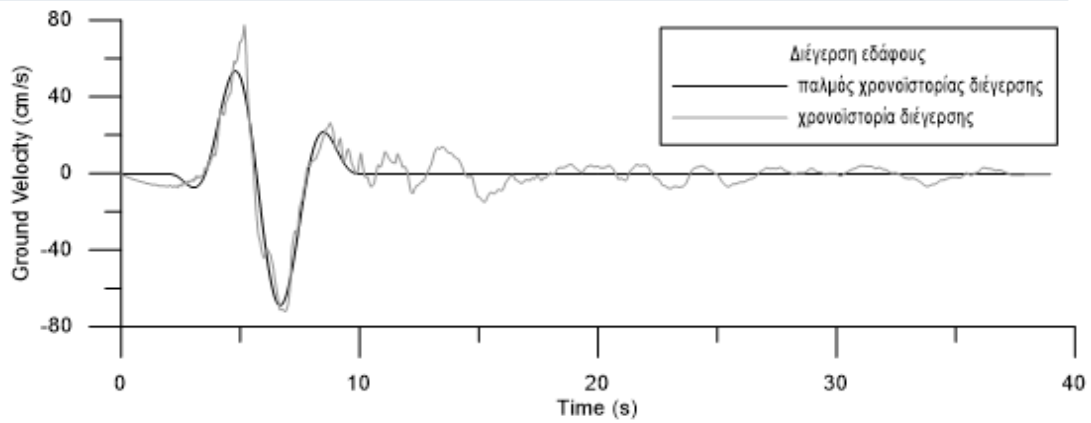
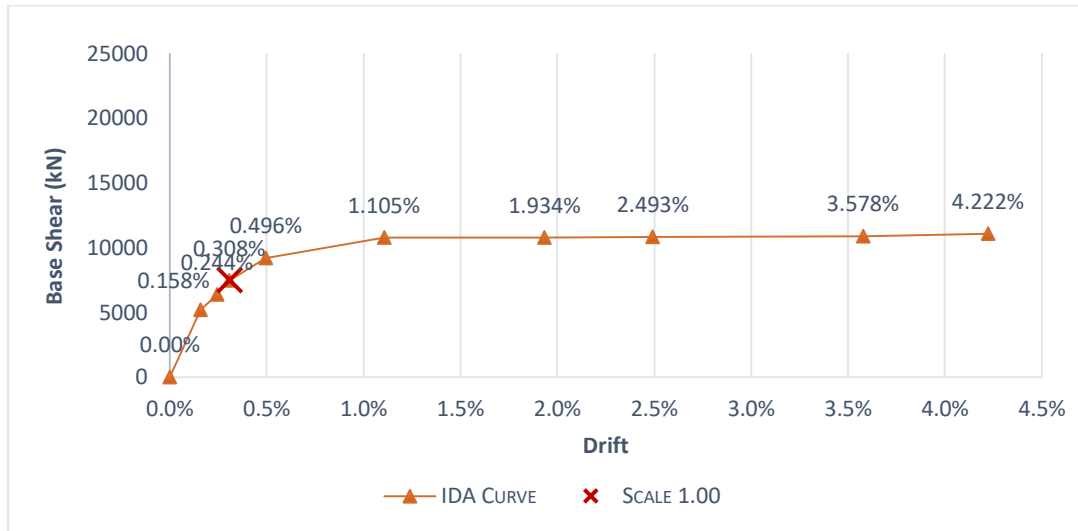
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
3.01	3.06	0.841

#8



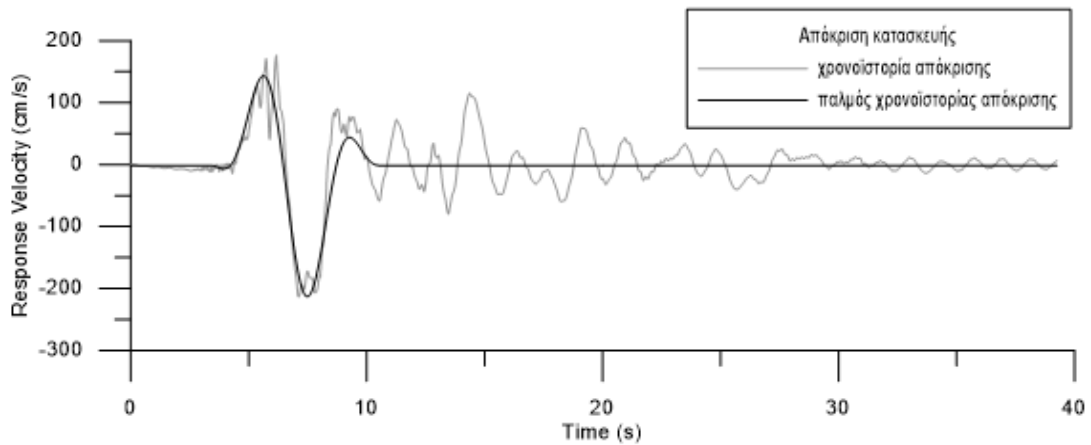
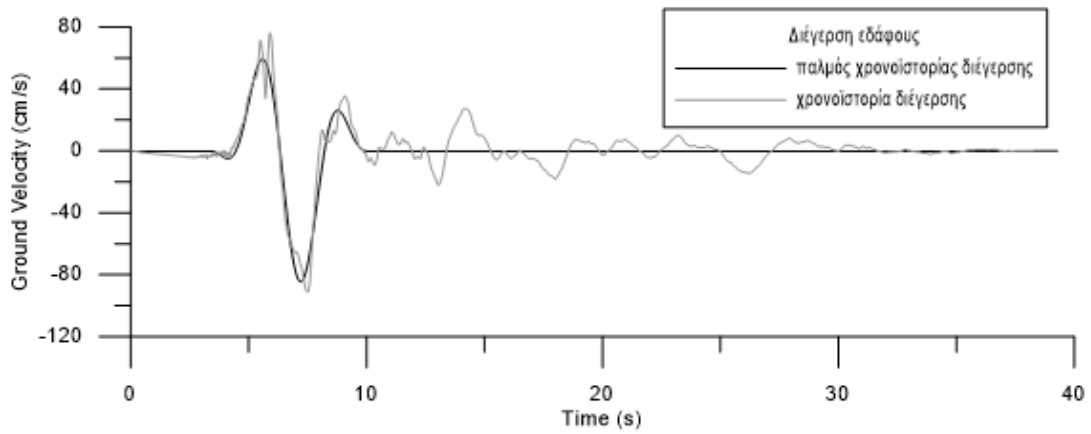
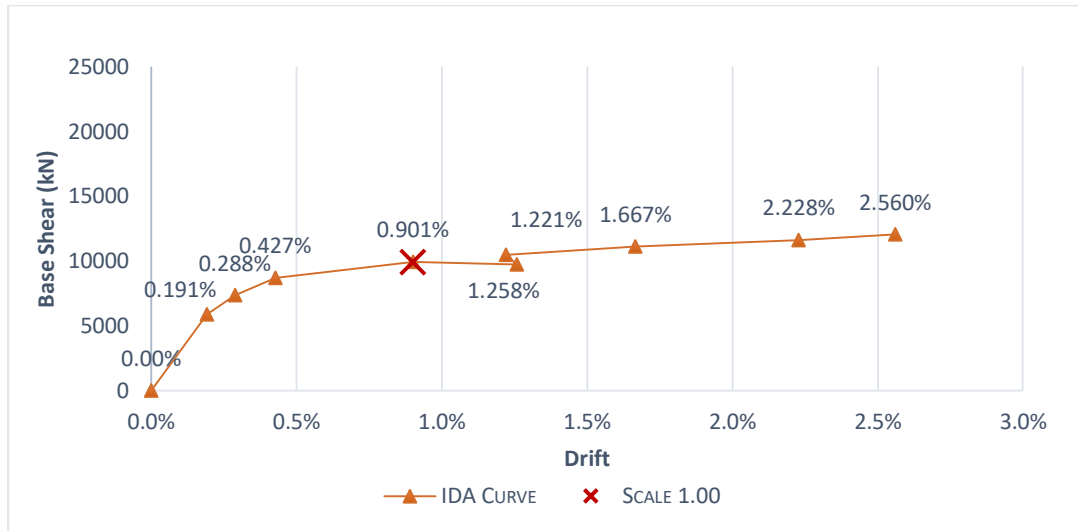
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
6.08	6.61	0.609

#11



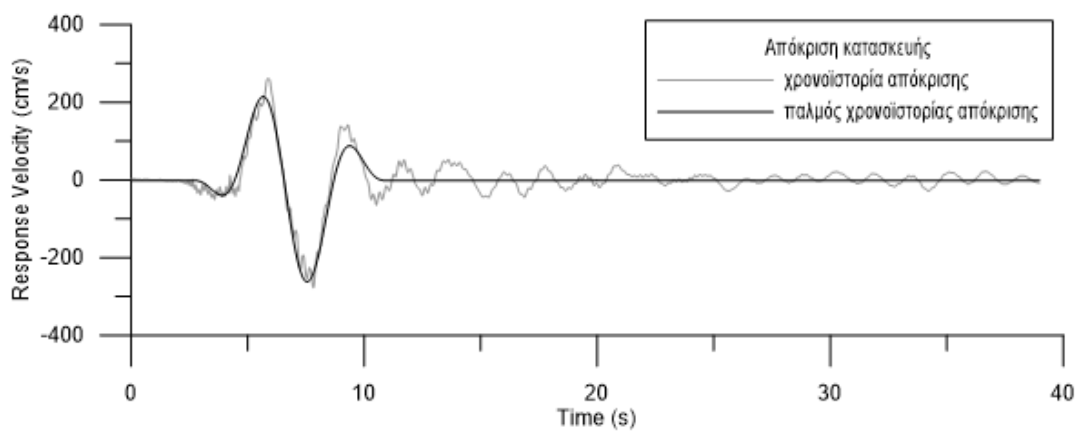
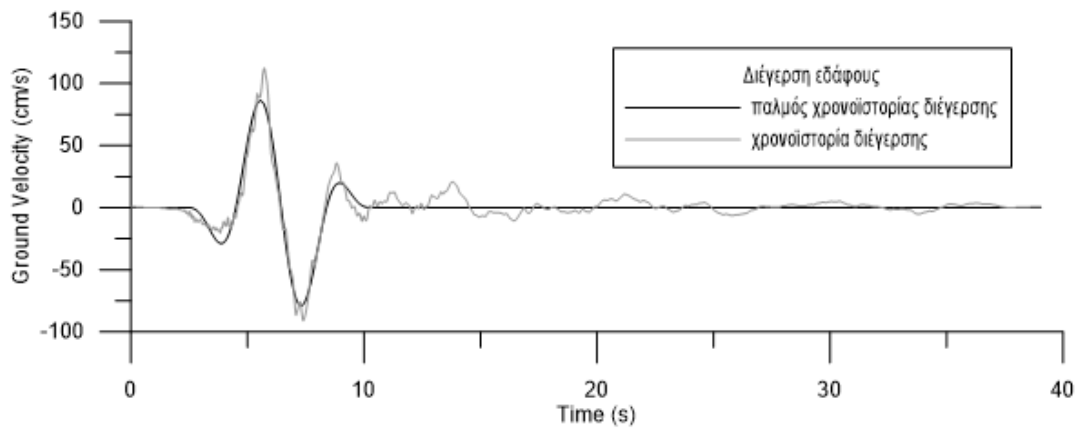
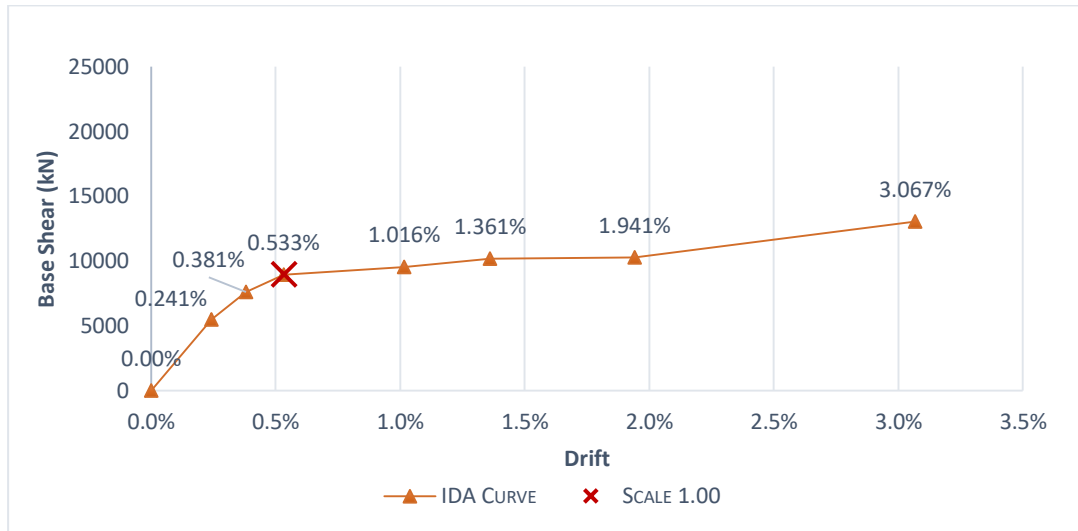
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
4.32	4.95	0.844

#12



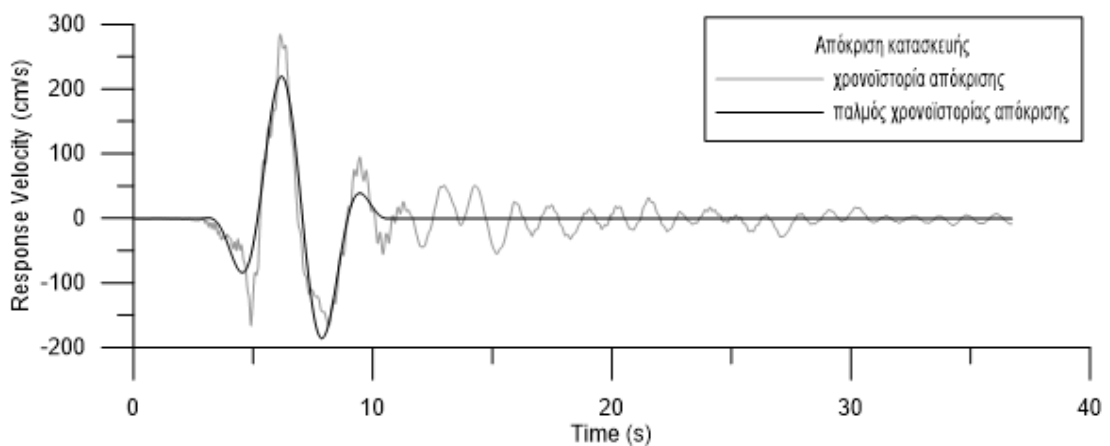
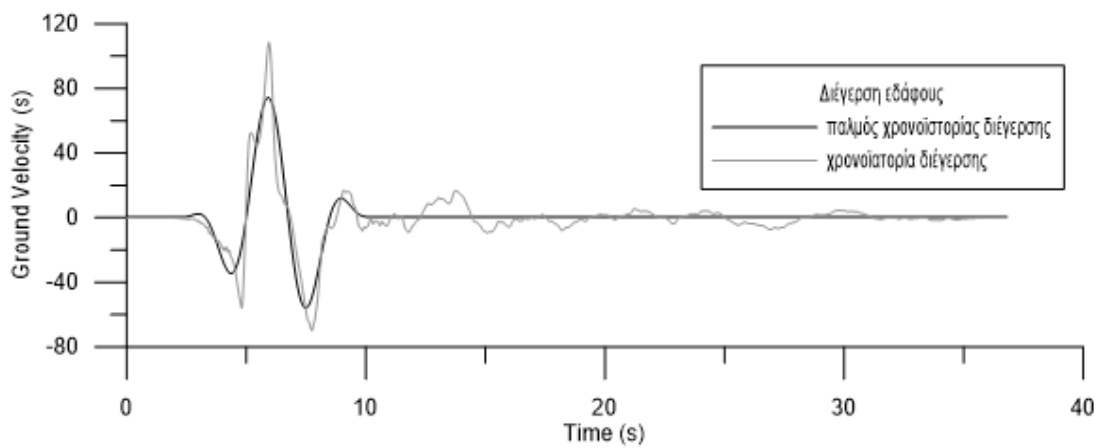
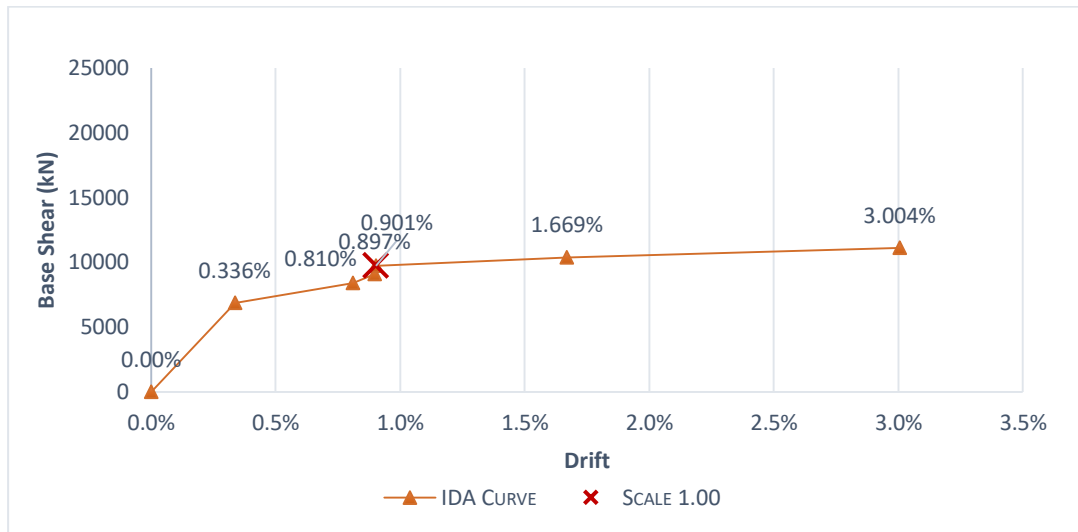
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
3.79	4.49	0.817

#13



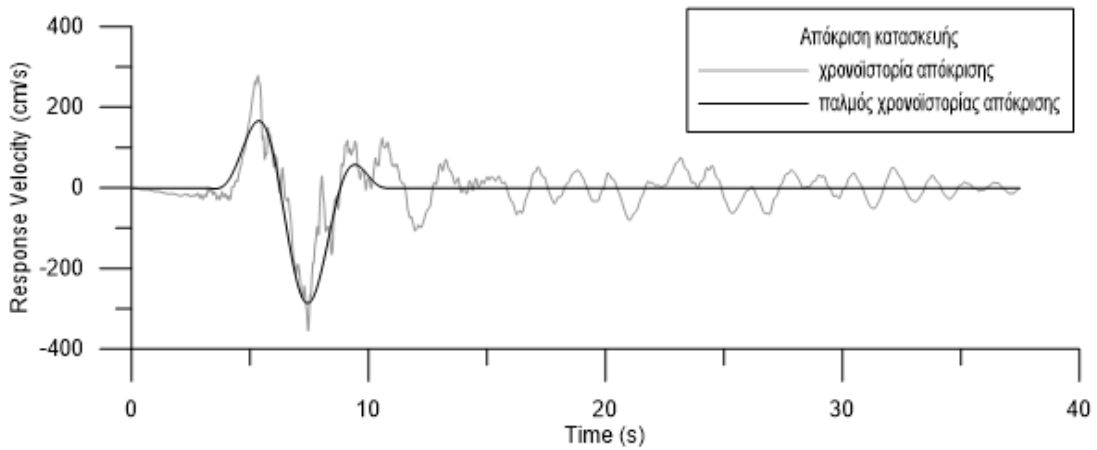
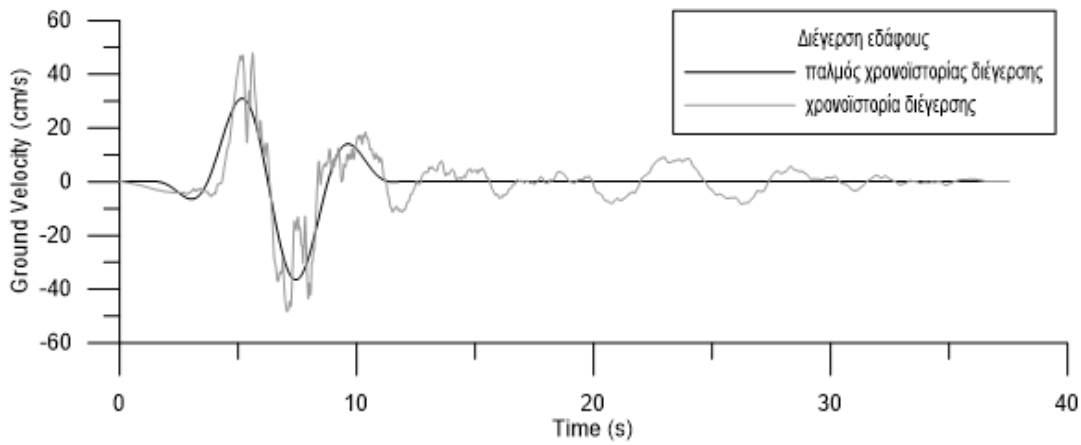
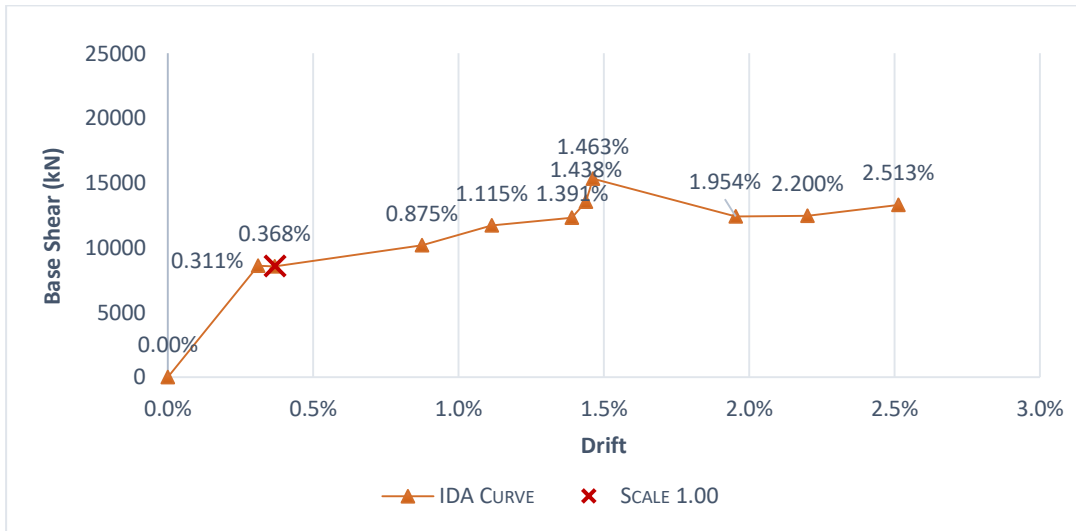
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
3.94	4.26	0.93

#14



Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
3.44	3.77	0.904

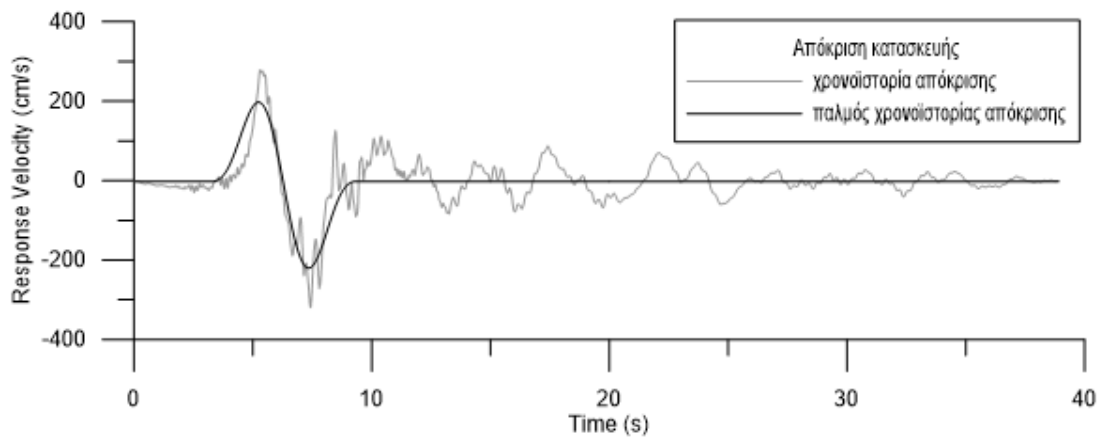
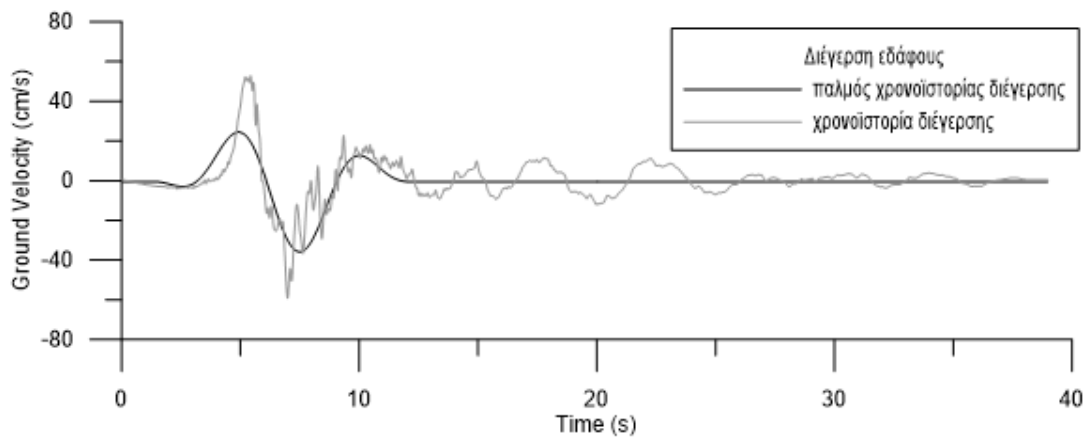
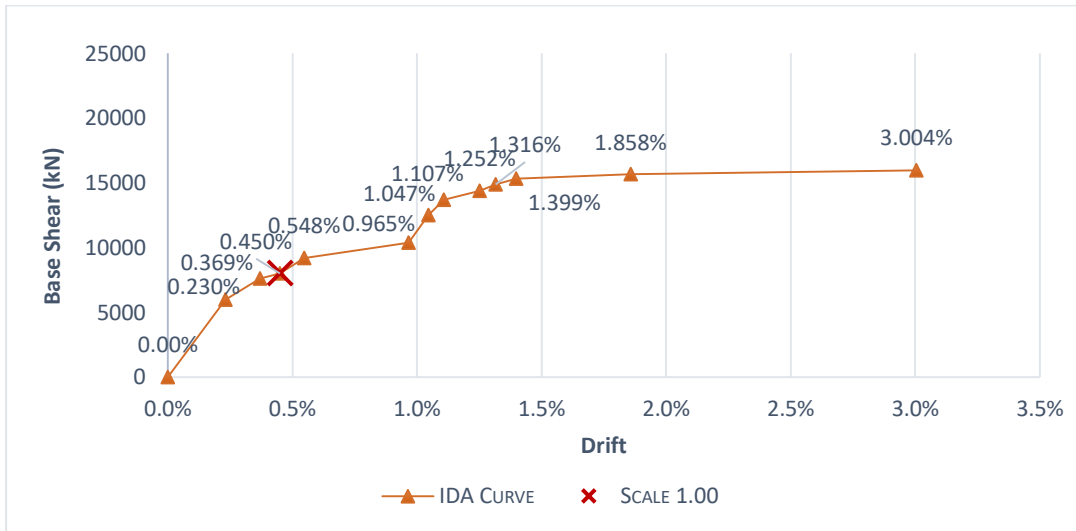
#15



Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
5.08	5.10	0.784

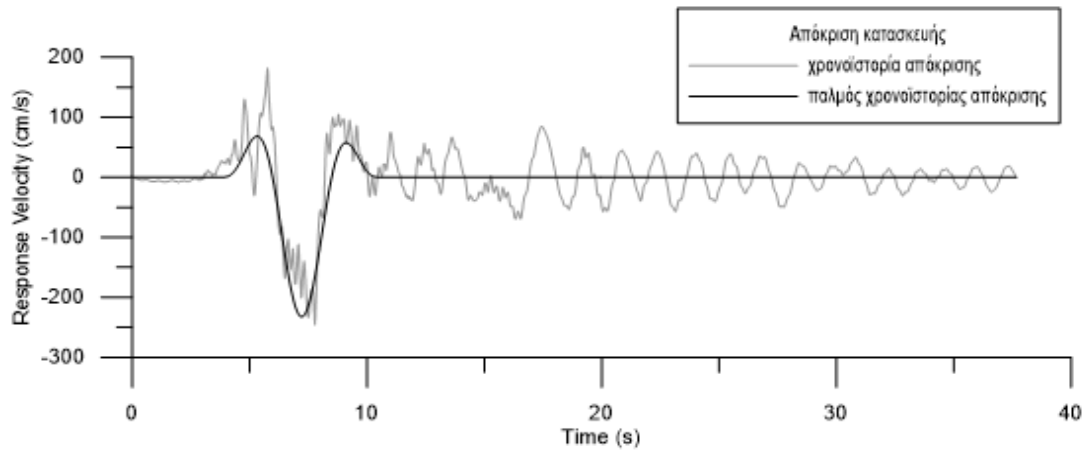
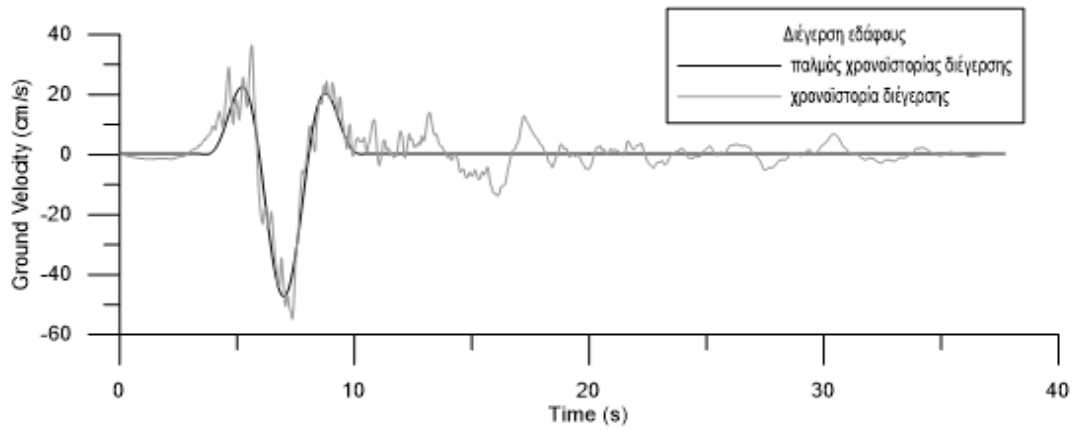
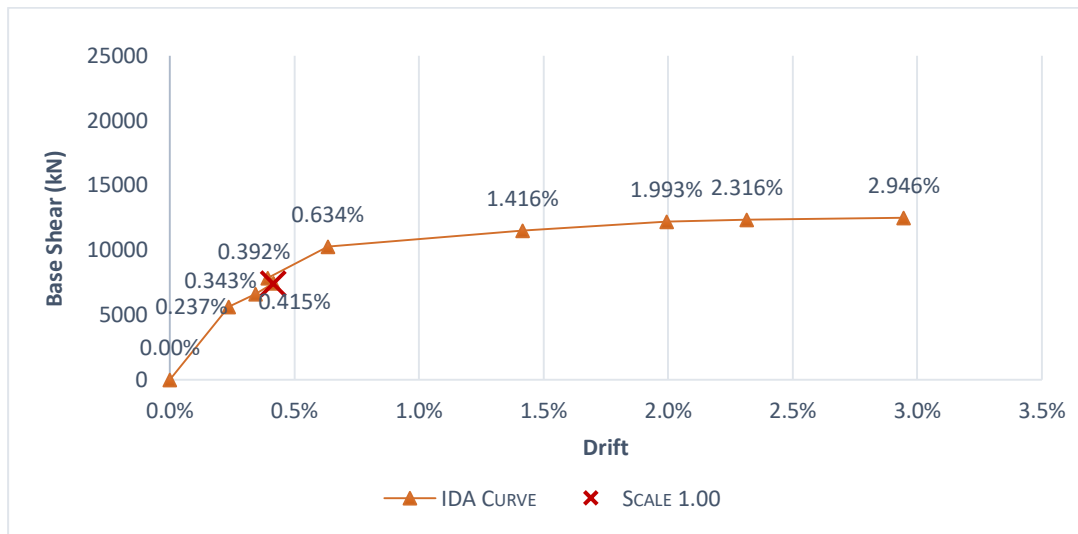


#16



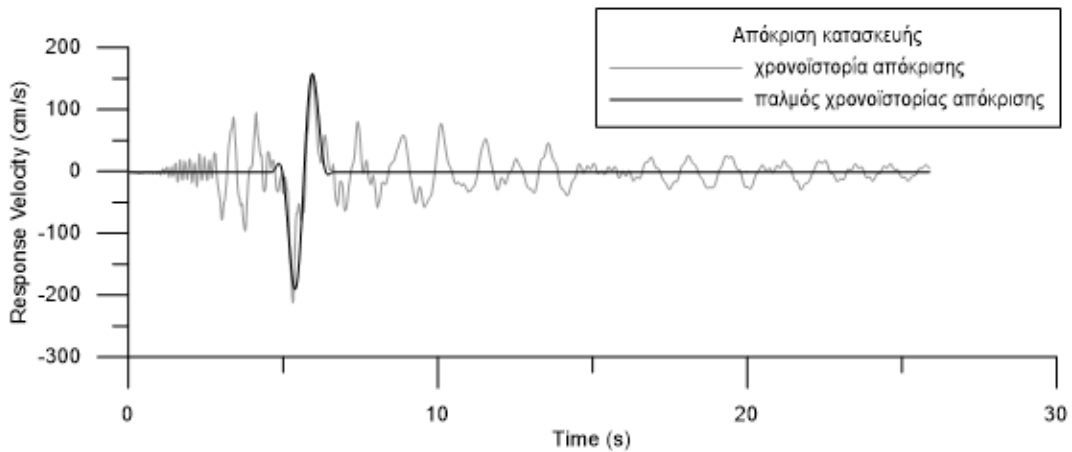
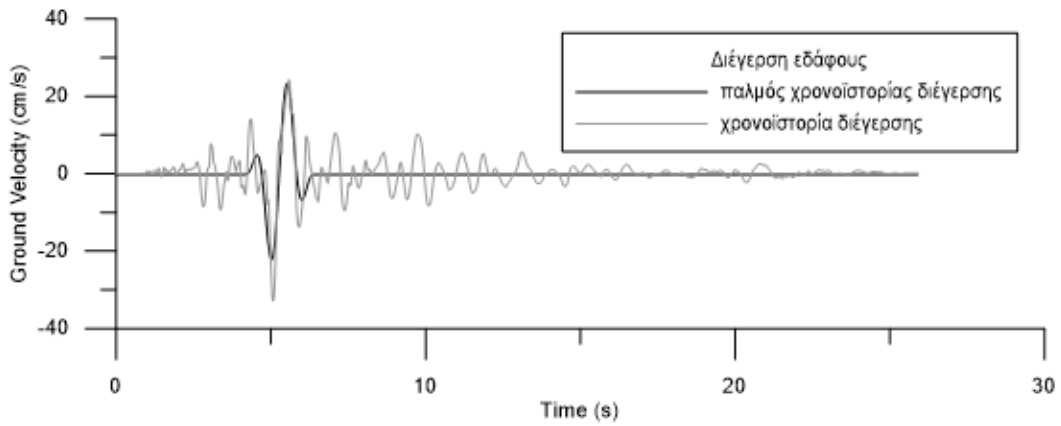
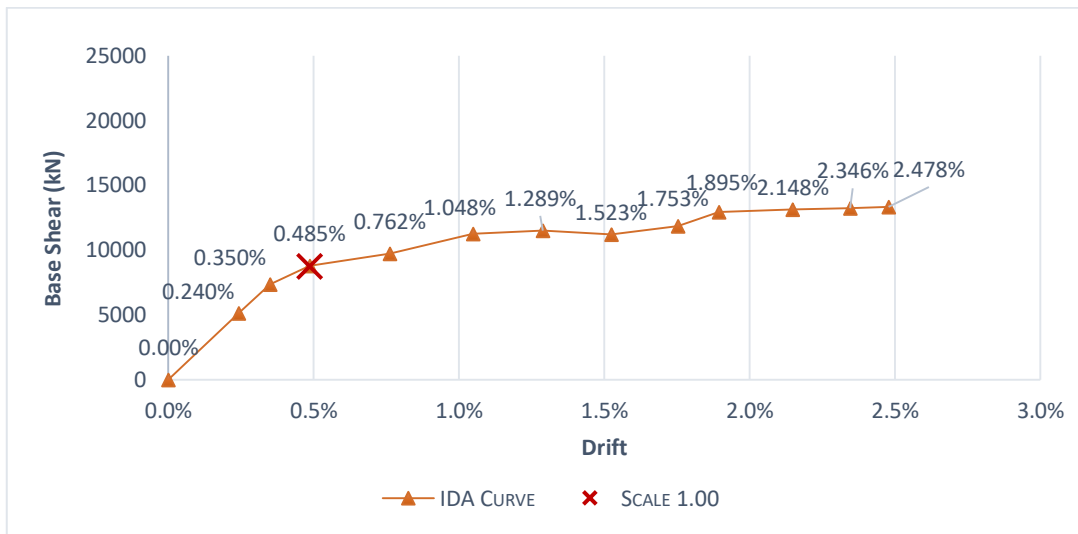
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
5.86	5.98	0.788

#17



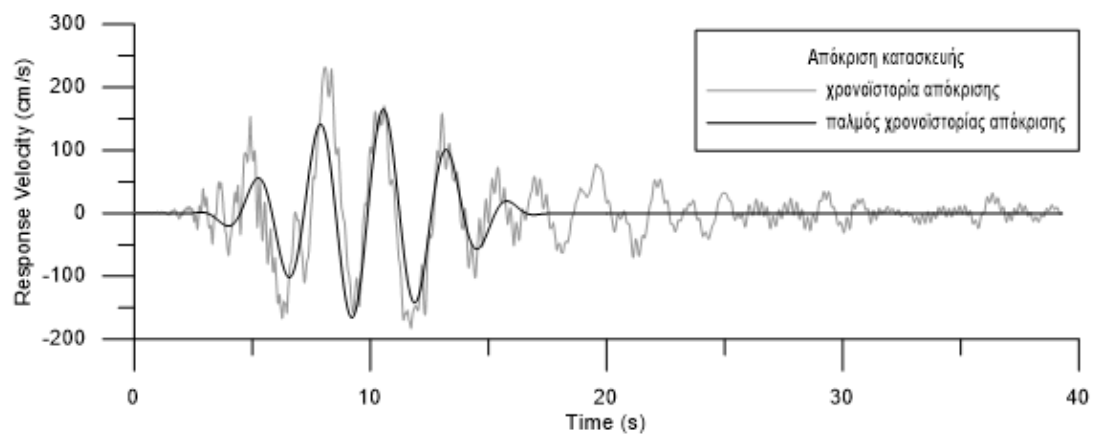
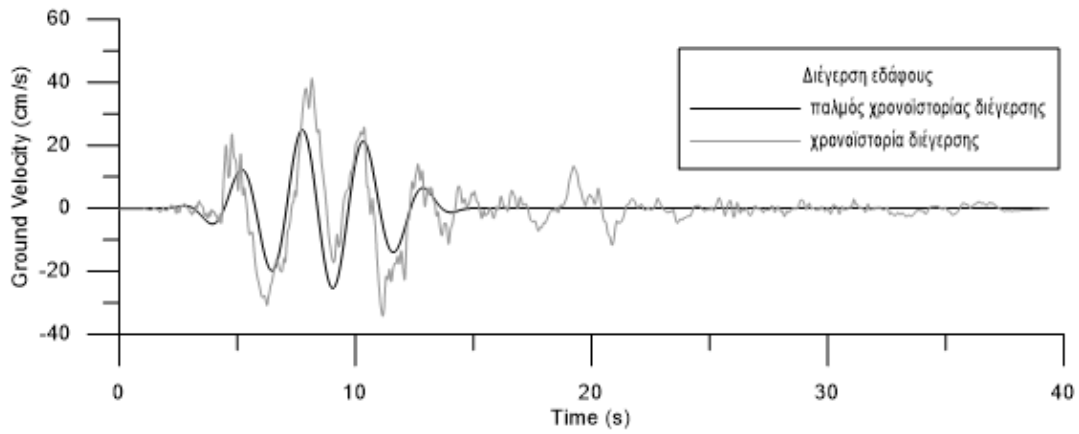
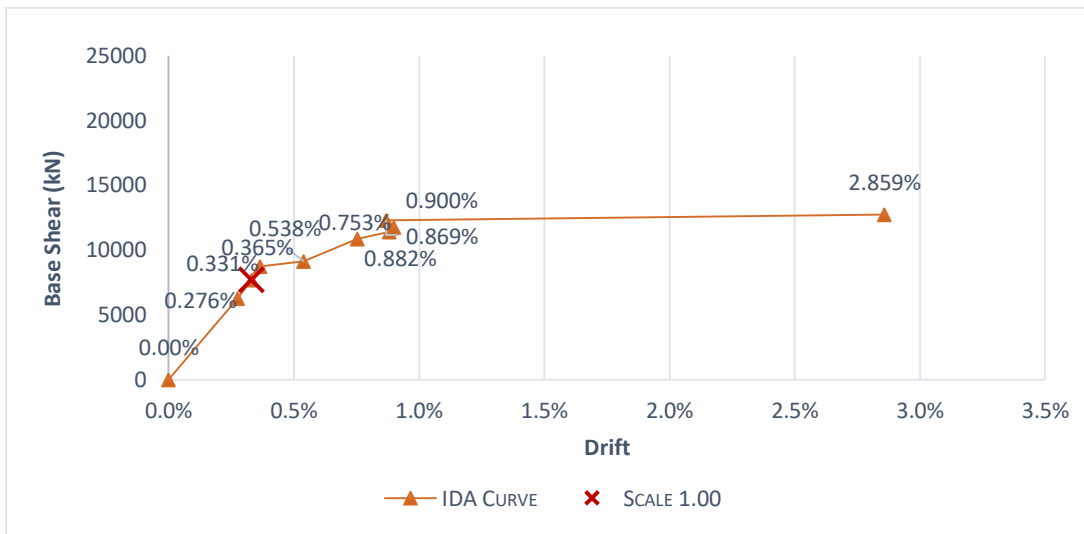
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
4.24	5.04	0.756

#18



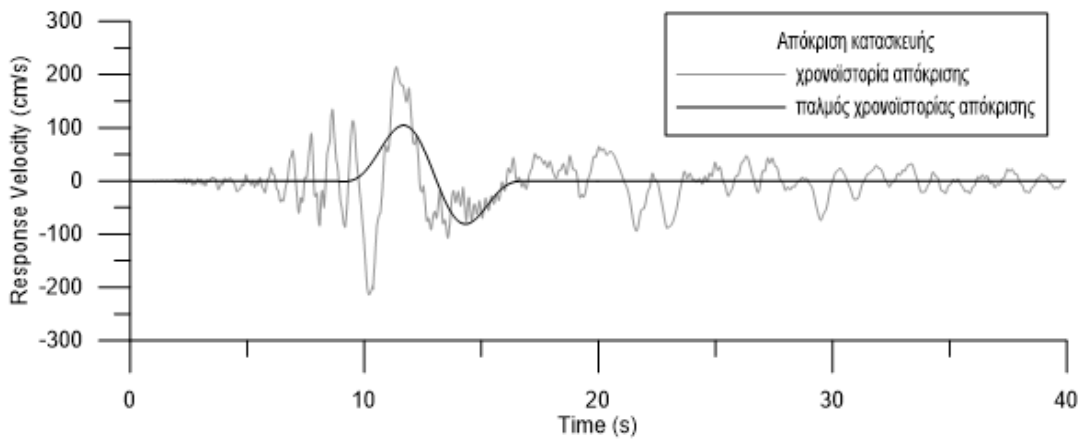
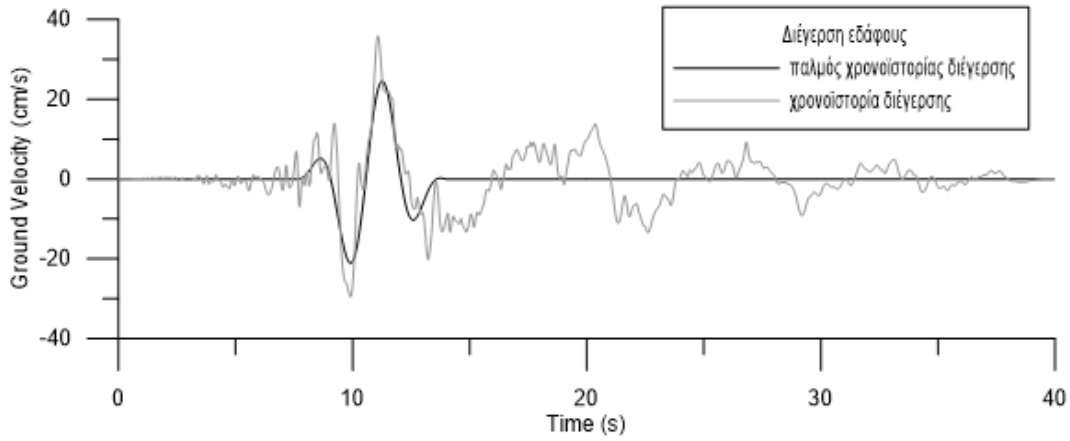
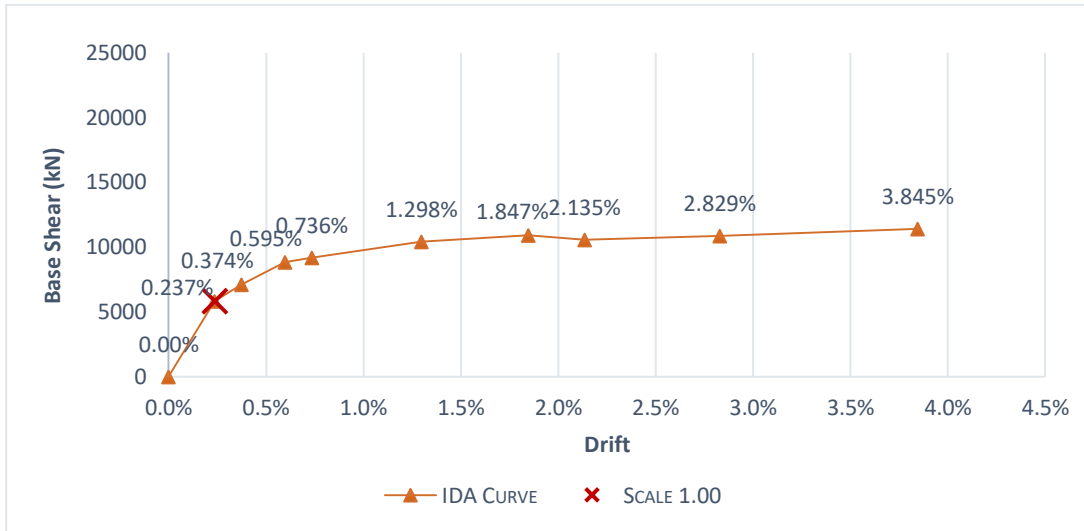
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
1.14	1.41	0.612

#19



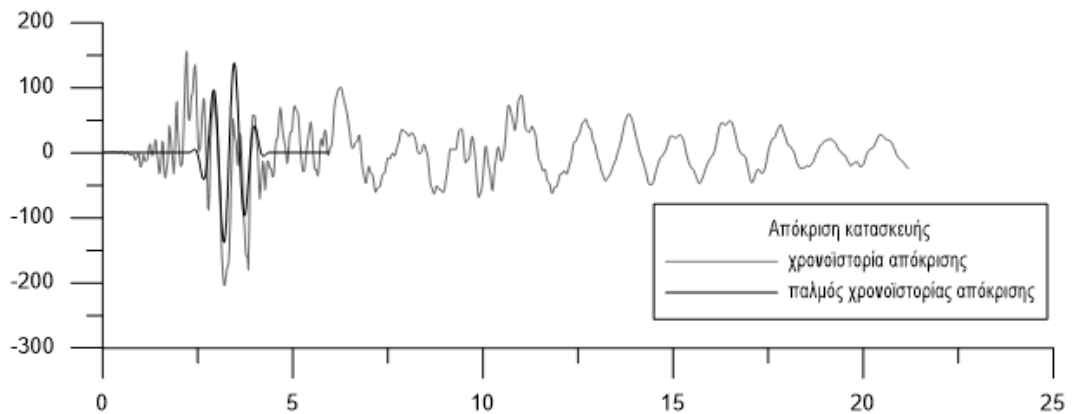
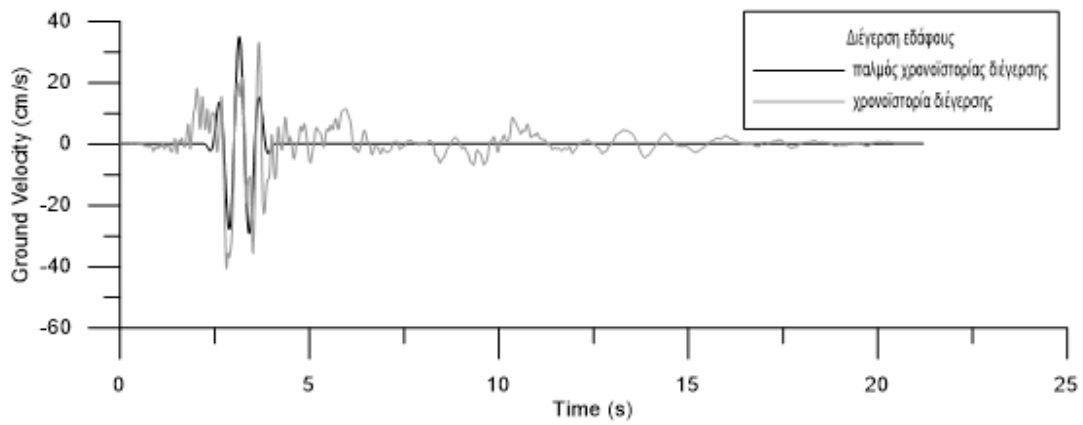
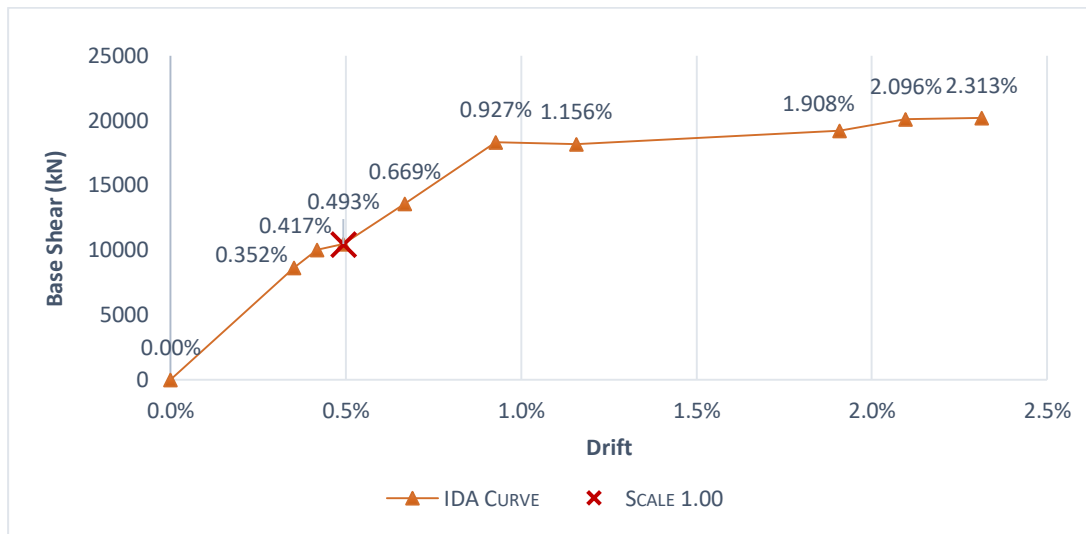
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
2.64	2.70	0.766

#20



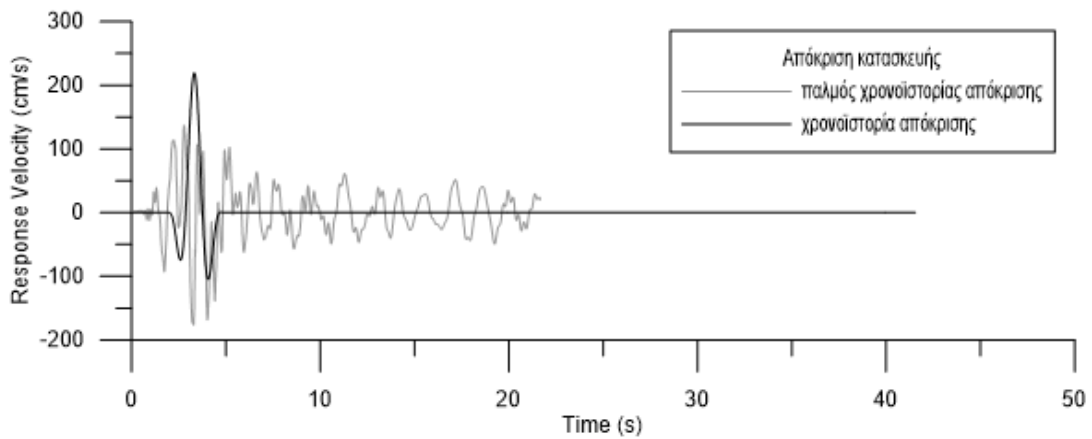
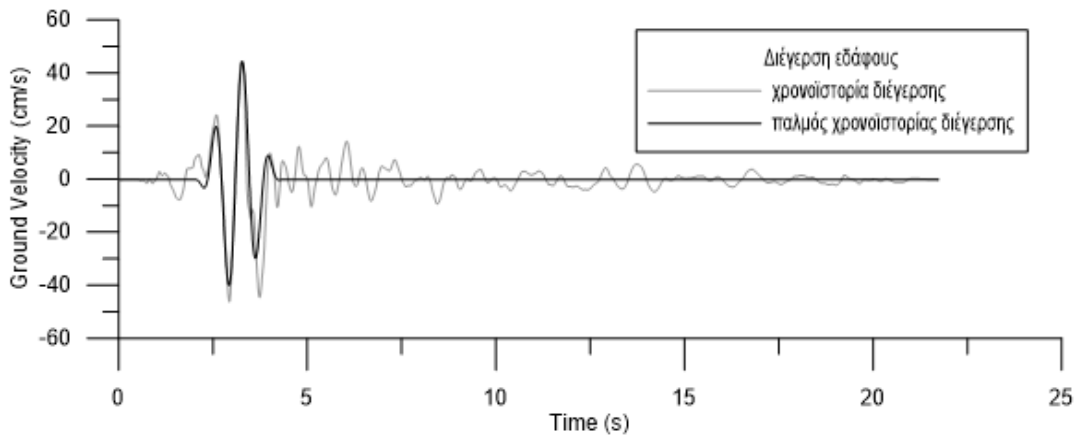
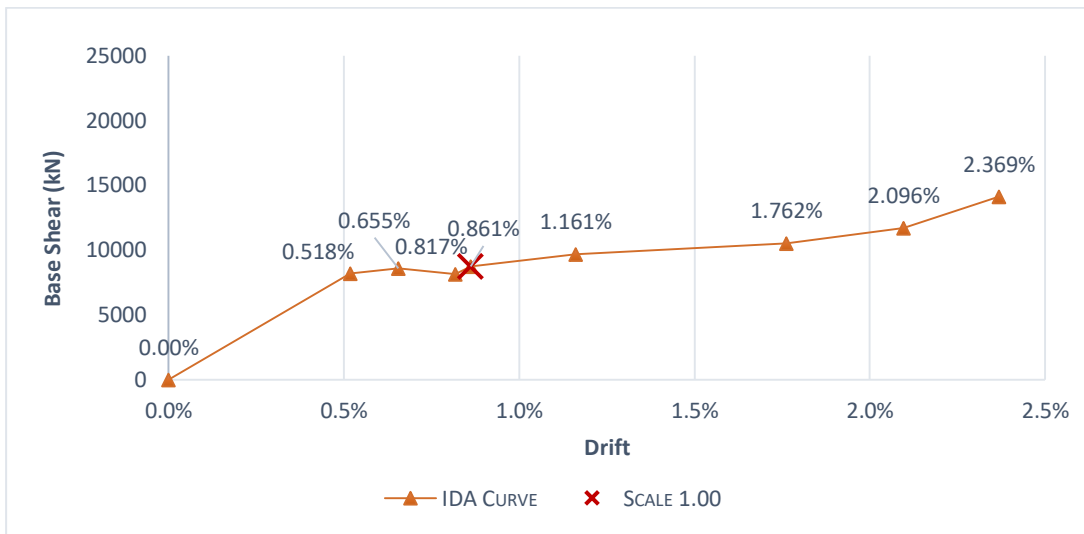
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
3.00	7.50	0.439

#21



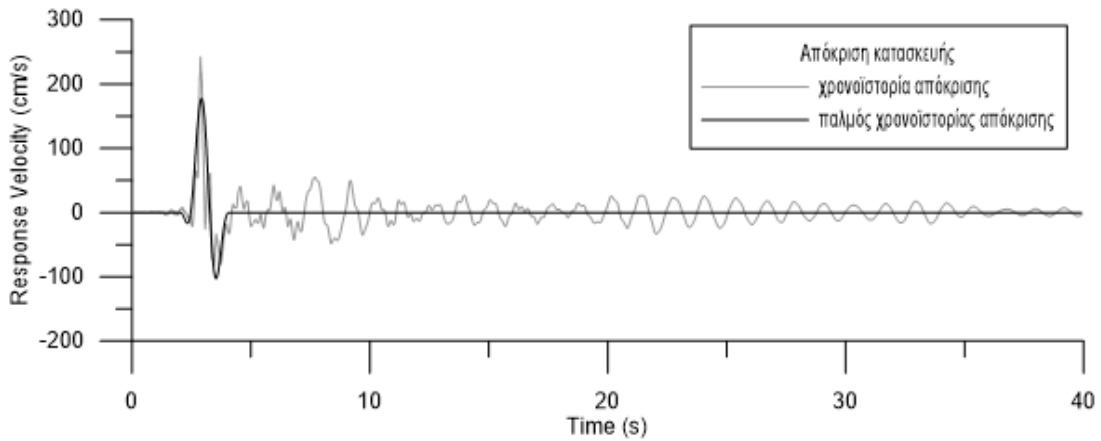
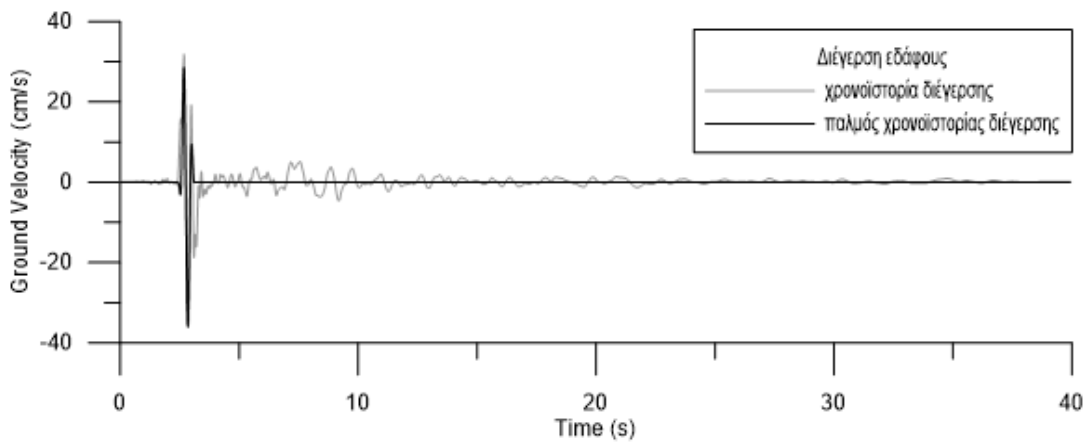
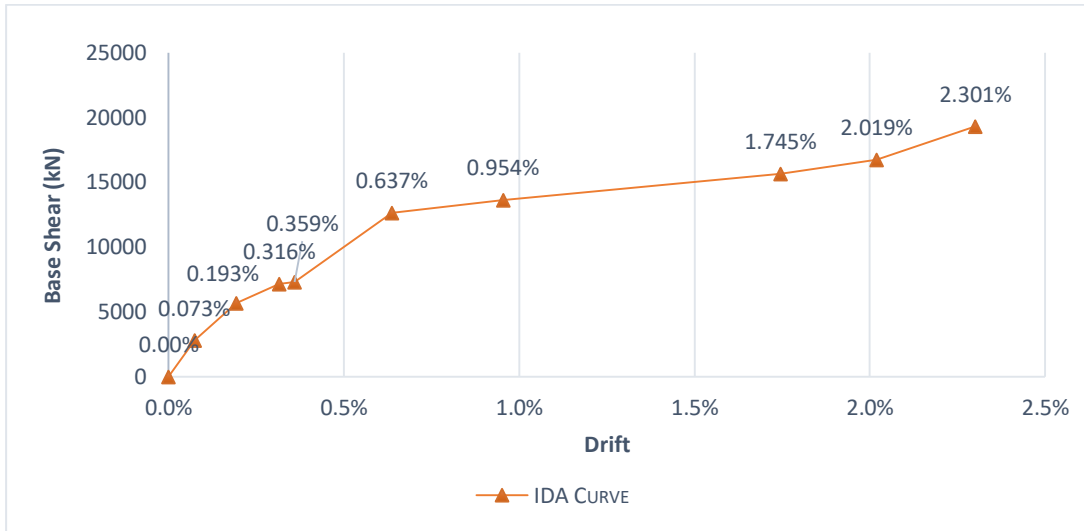
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
0.56	1.90	0.343

#22



Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
0.75	1.80	0.792

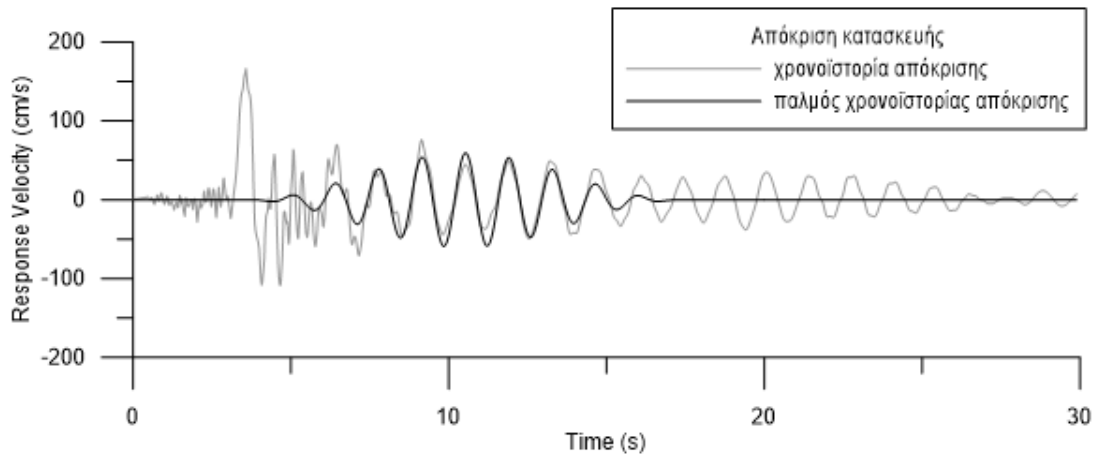
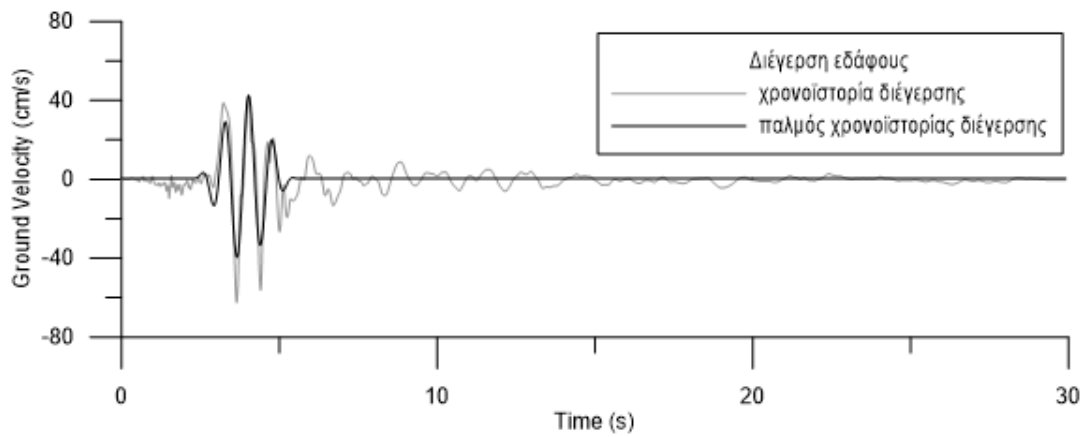
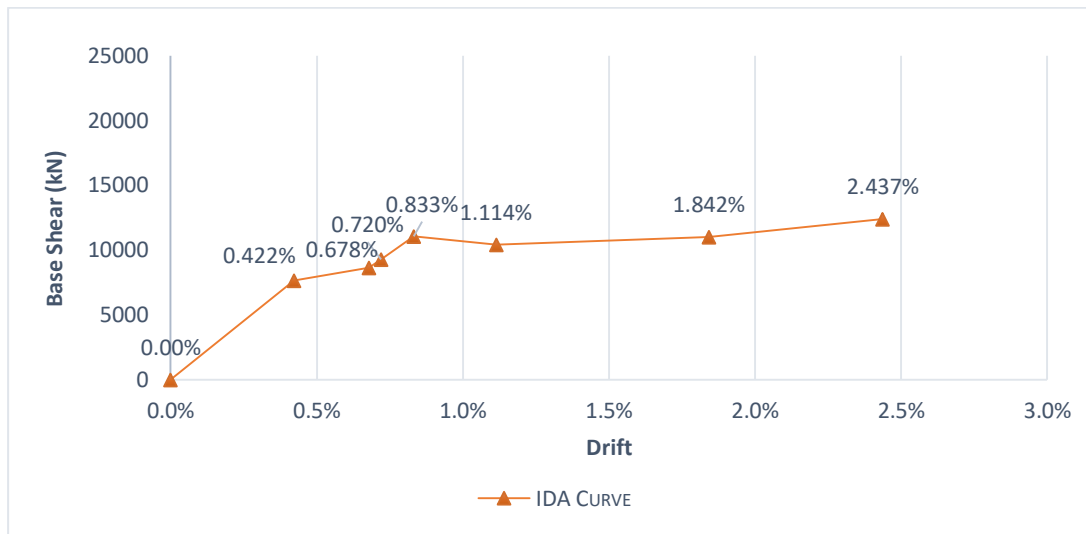
#23



Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
0.38	1.61	0.630

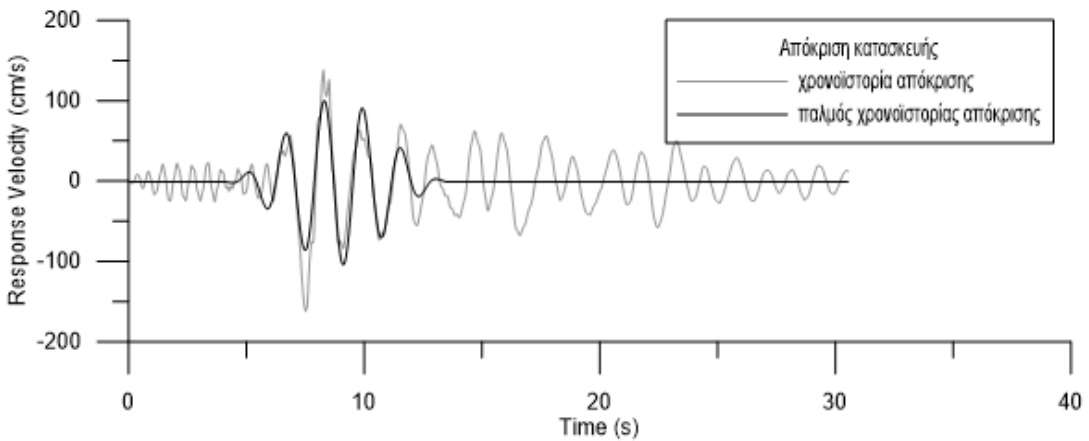
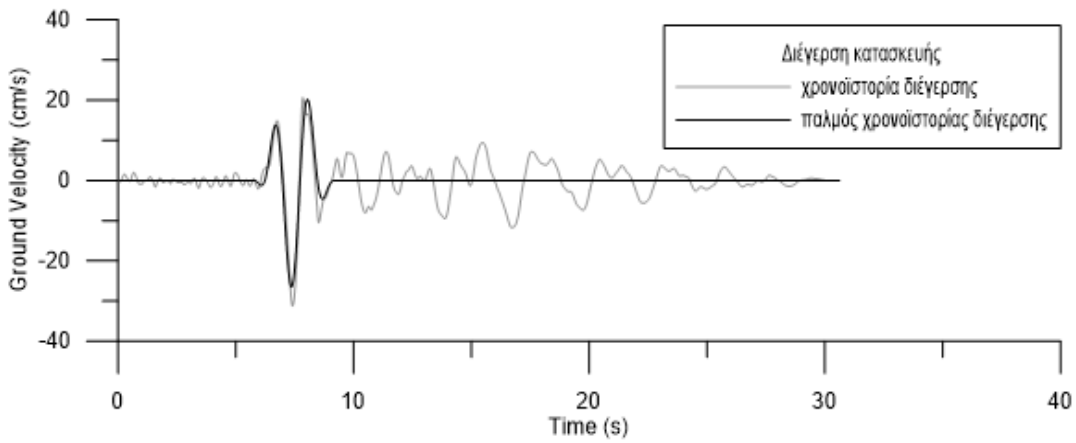
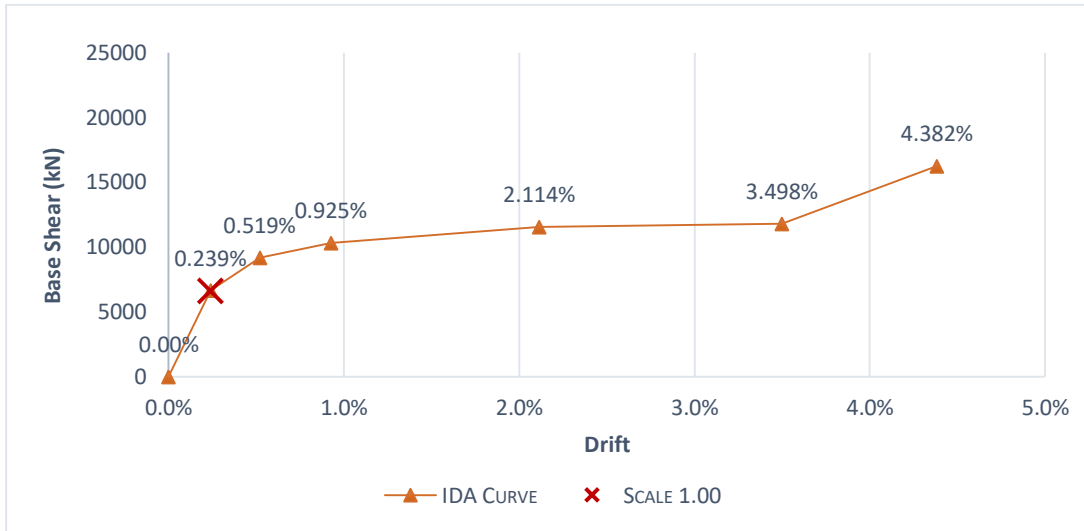


#24



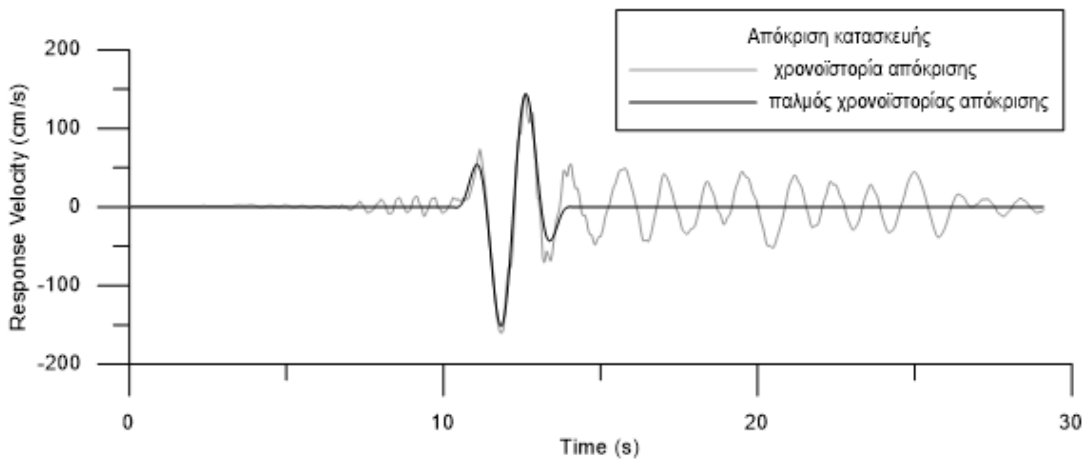
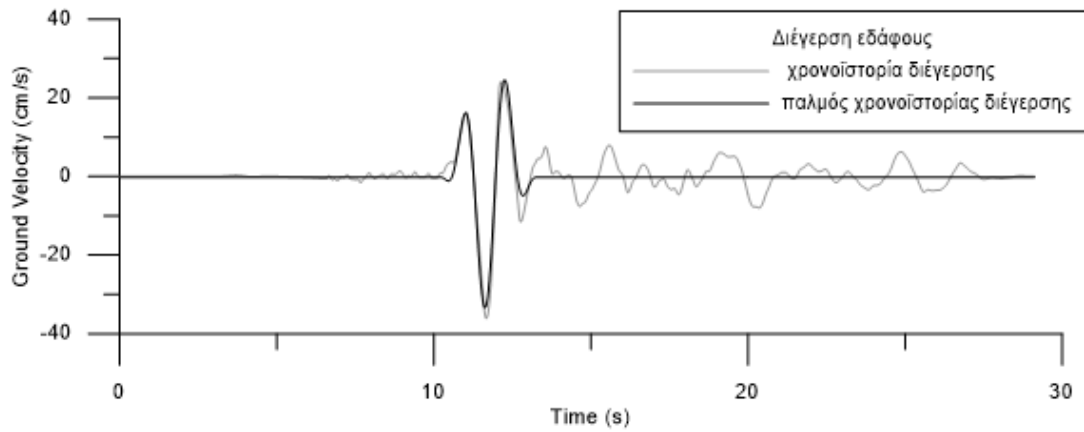
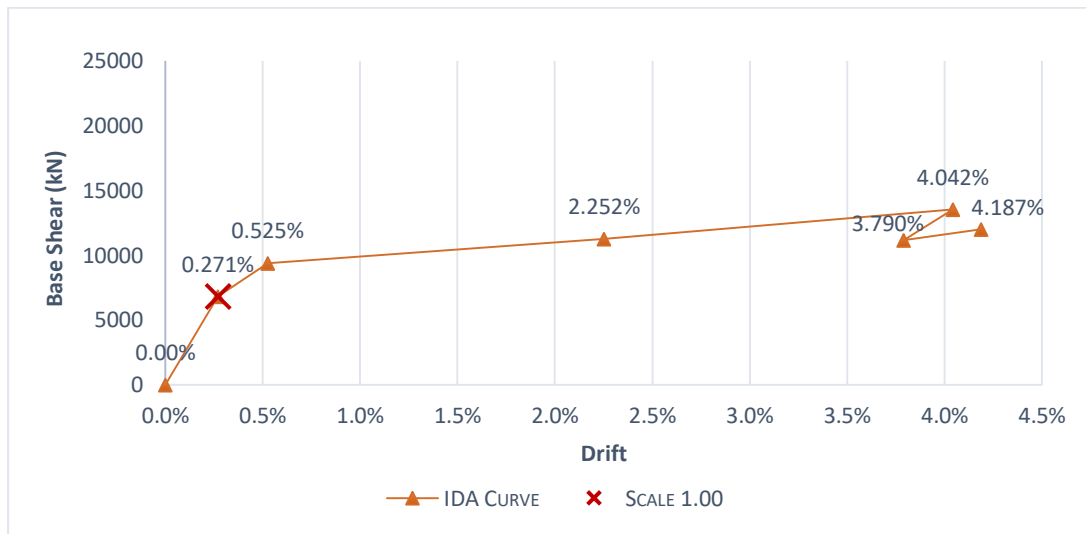
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
0.77	1.38	0.562

#26



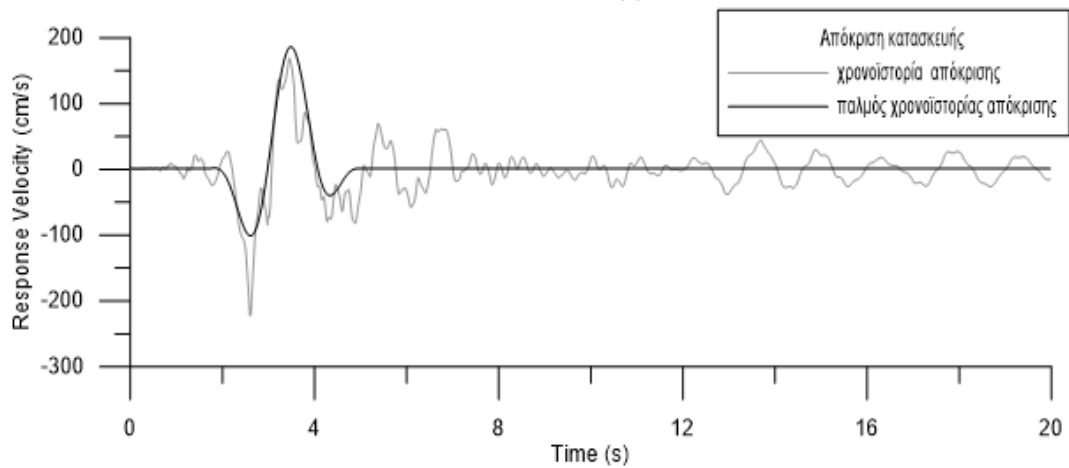
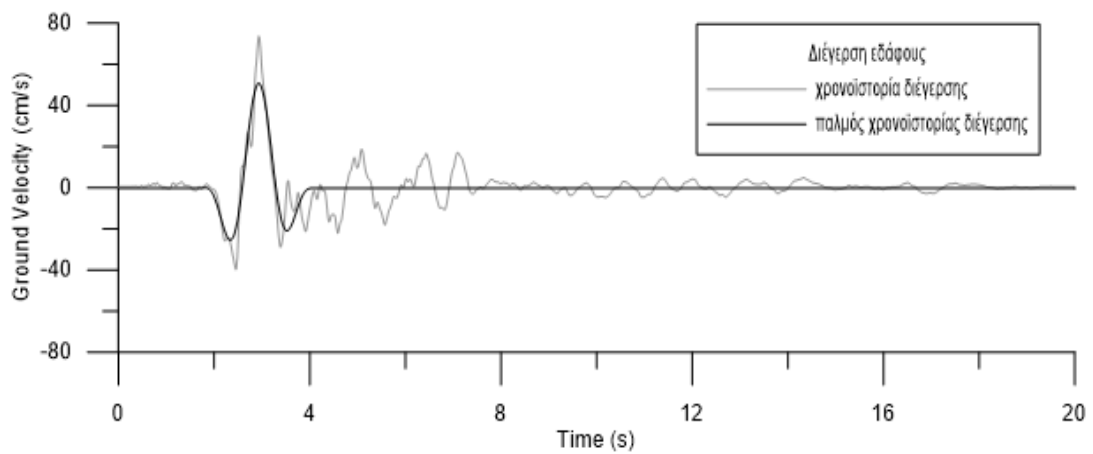
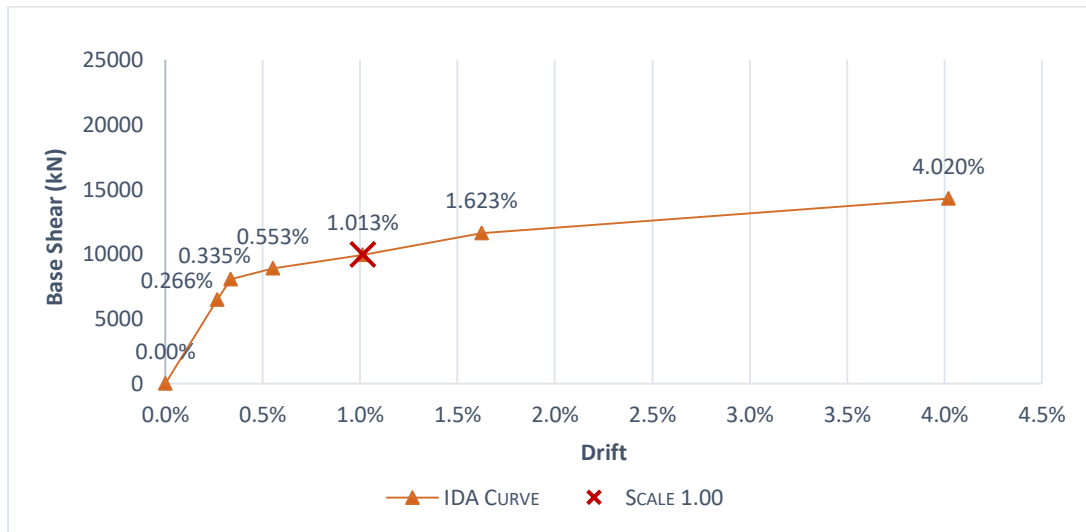
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
1.49	1.64	0.722

#27



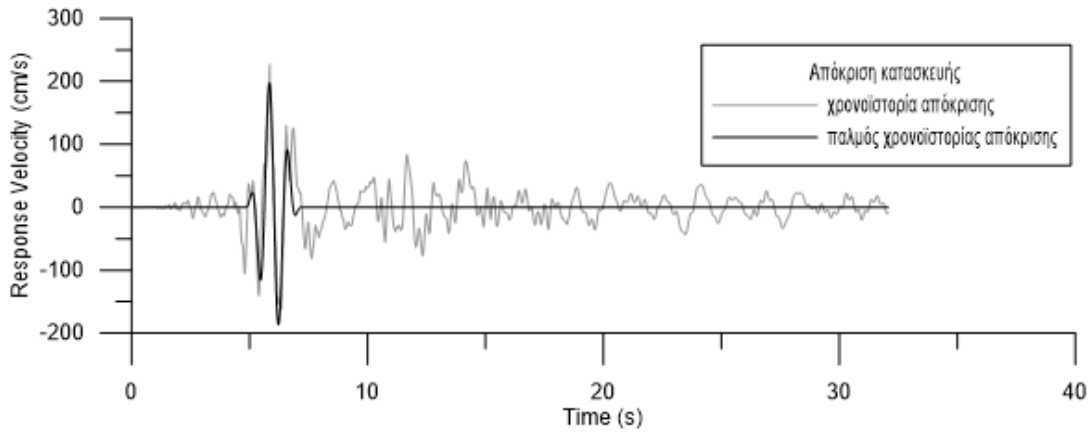
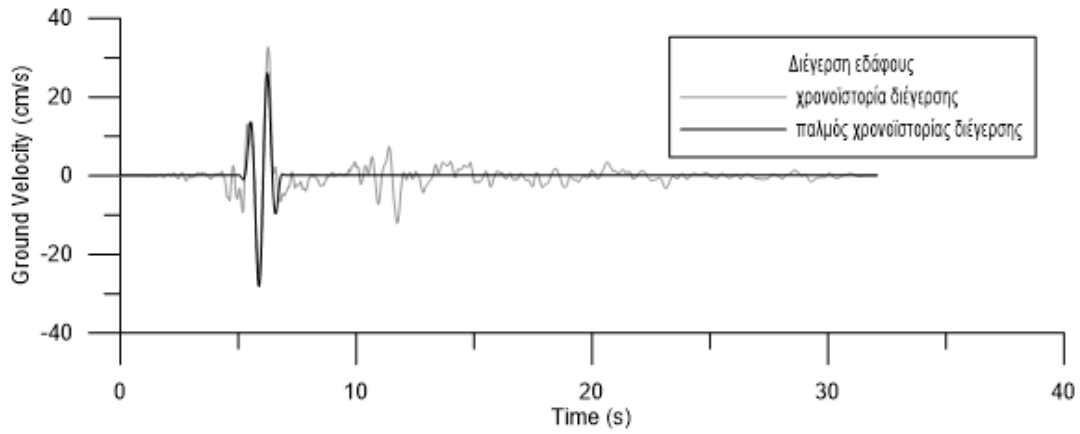
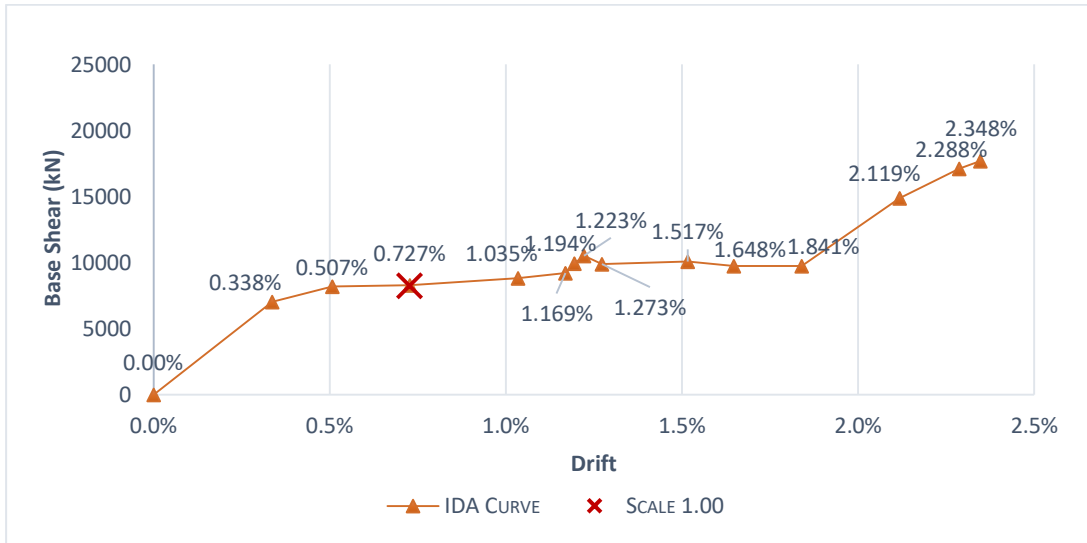
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
1.39	1.75	0.799

#28



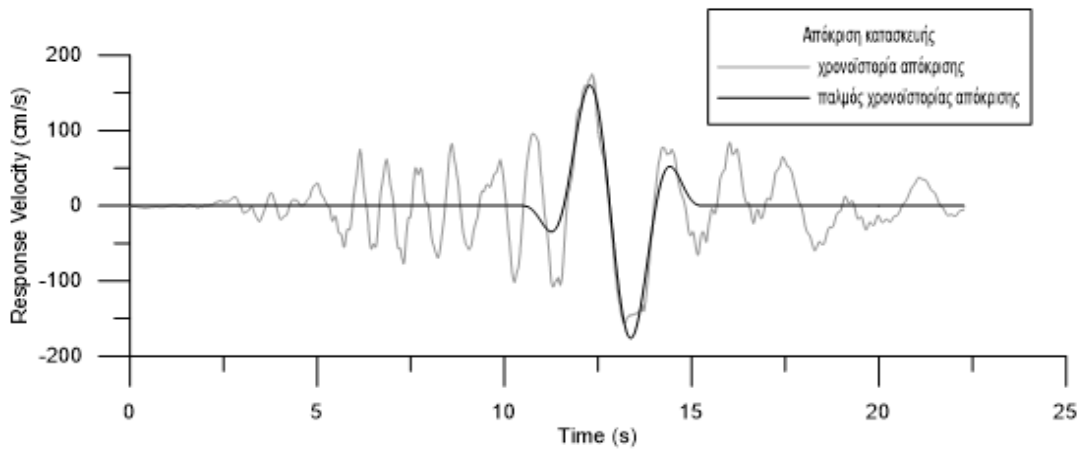
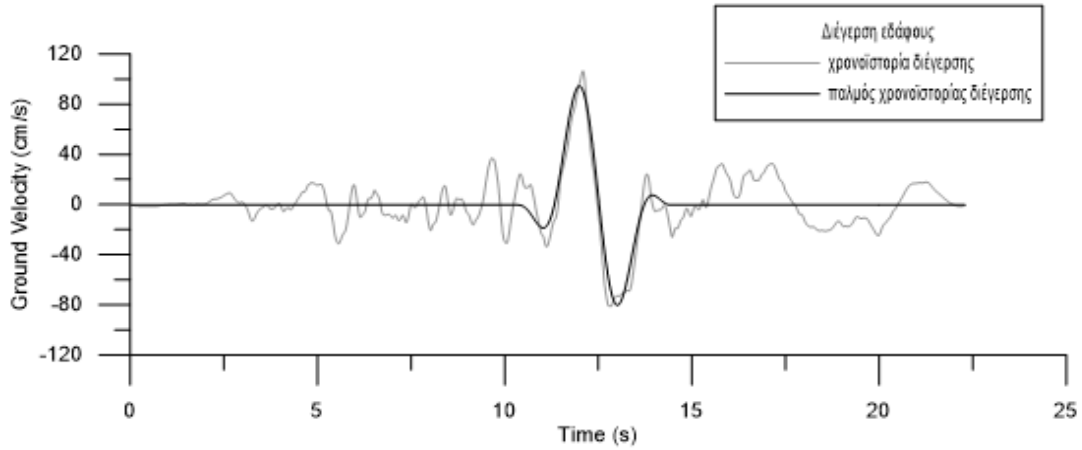
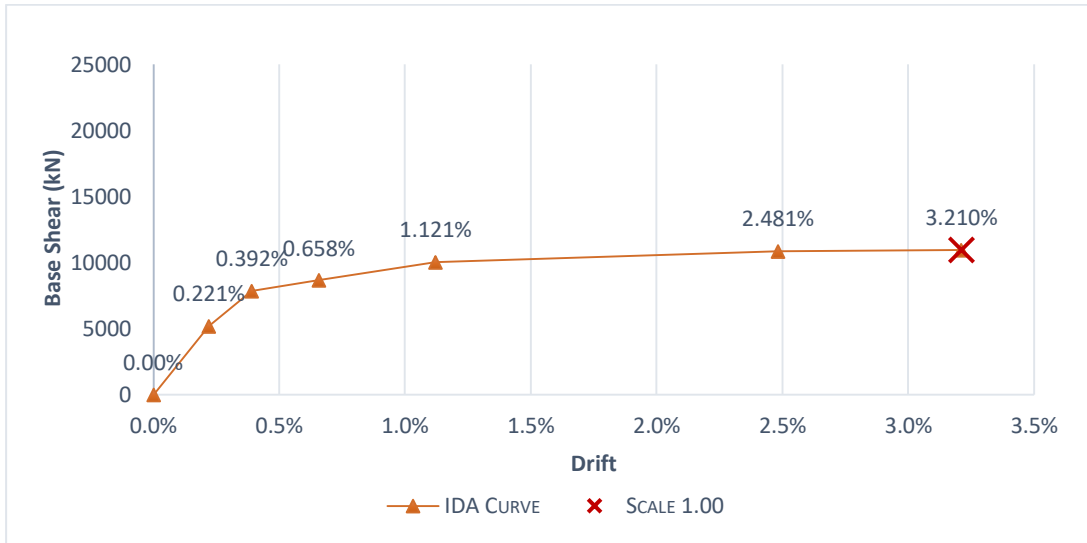
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
1.44	2.17	0.752

#31



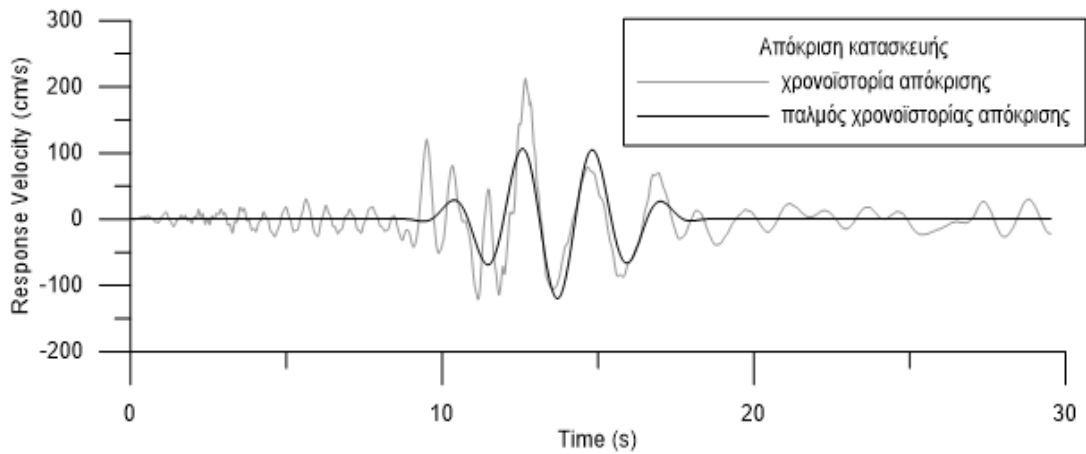
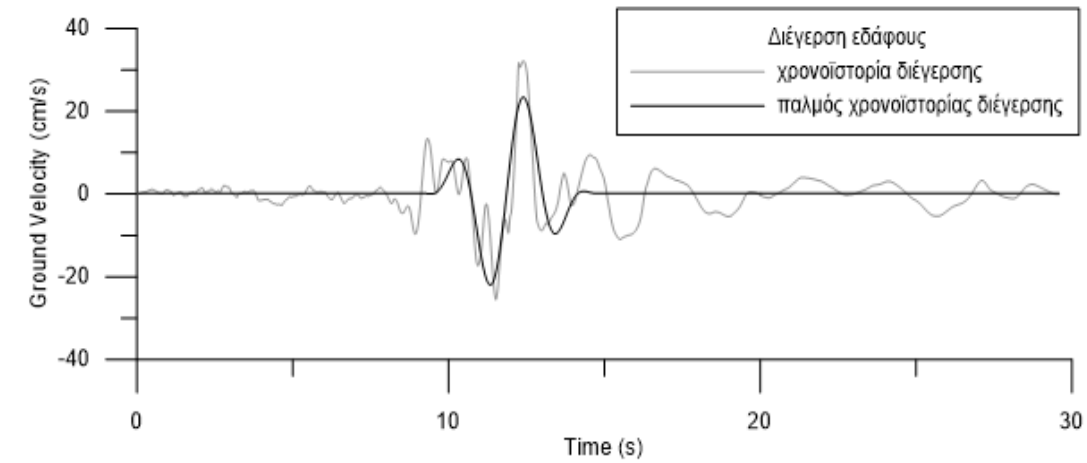
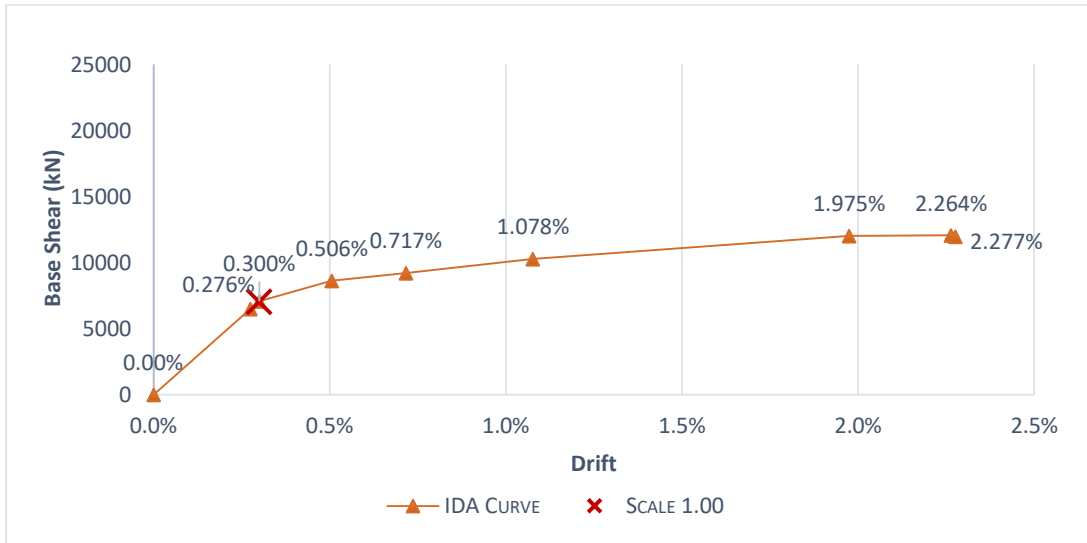
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
0.778	0.81	0.641

#32



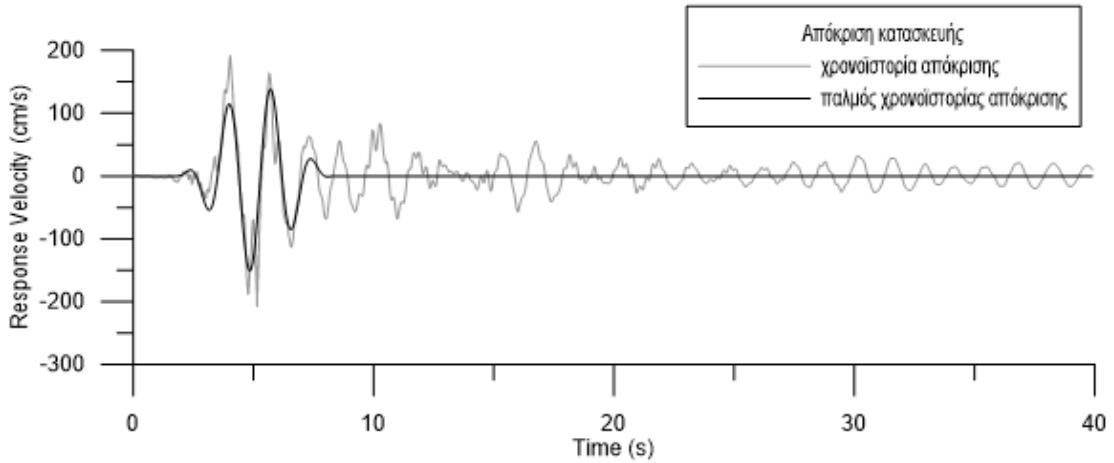
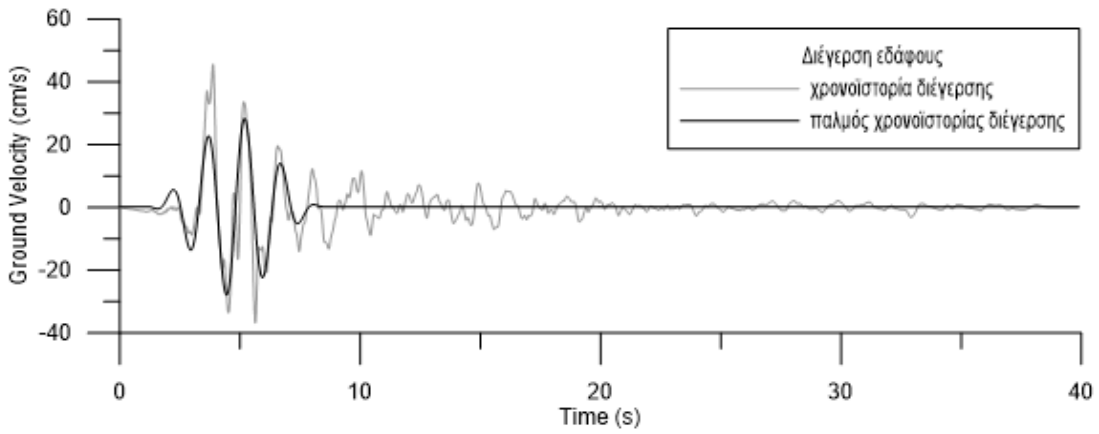
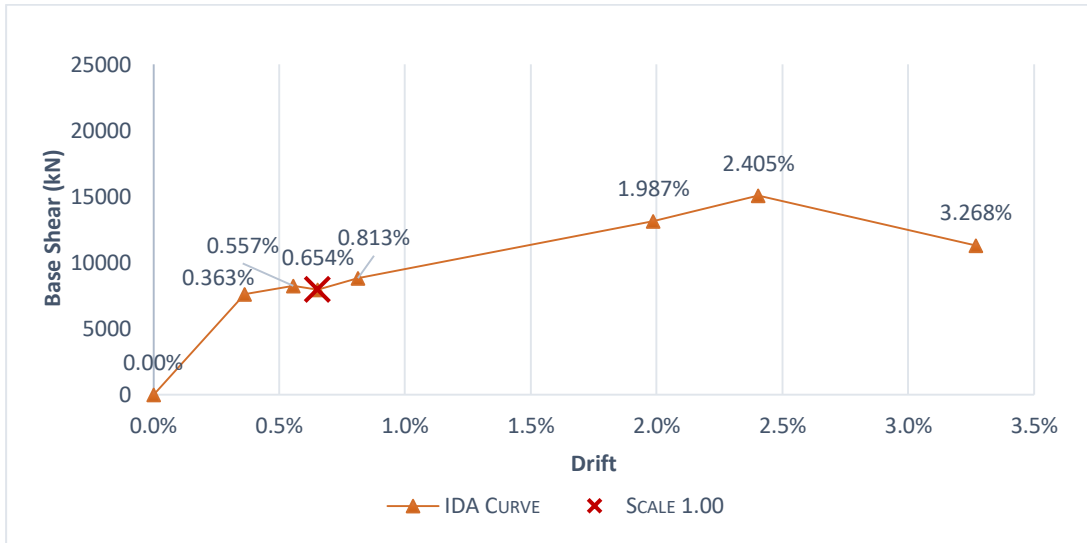
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
2.41	2.46	0.758

#33



Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
2.31	2.30	0.725

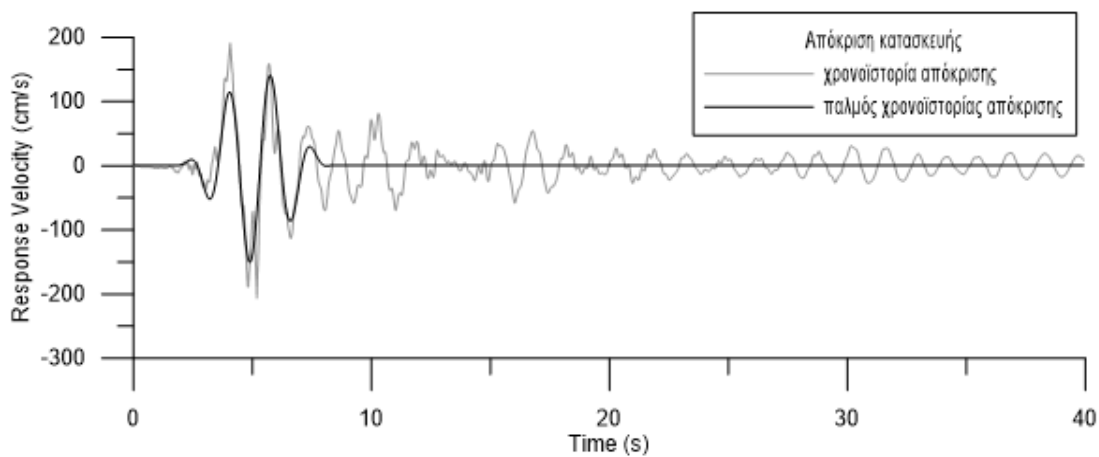
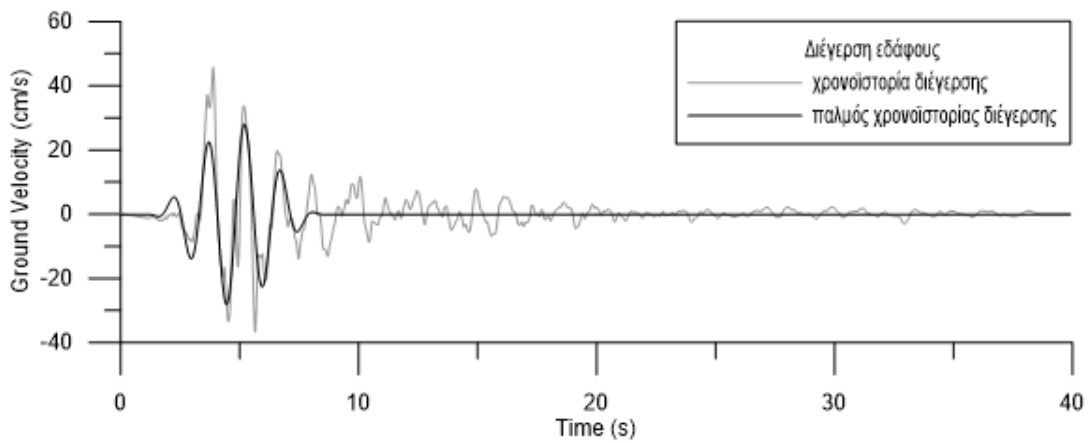
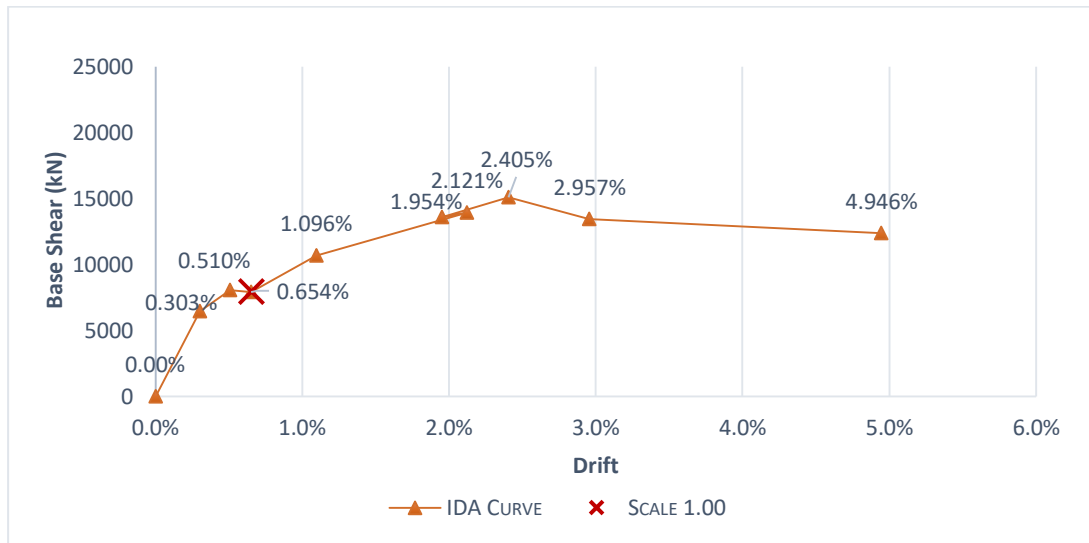
#34



Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
1.54	1.78	0.766

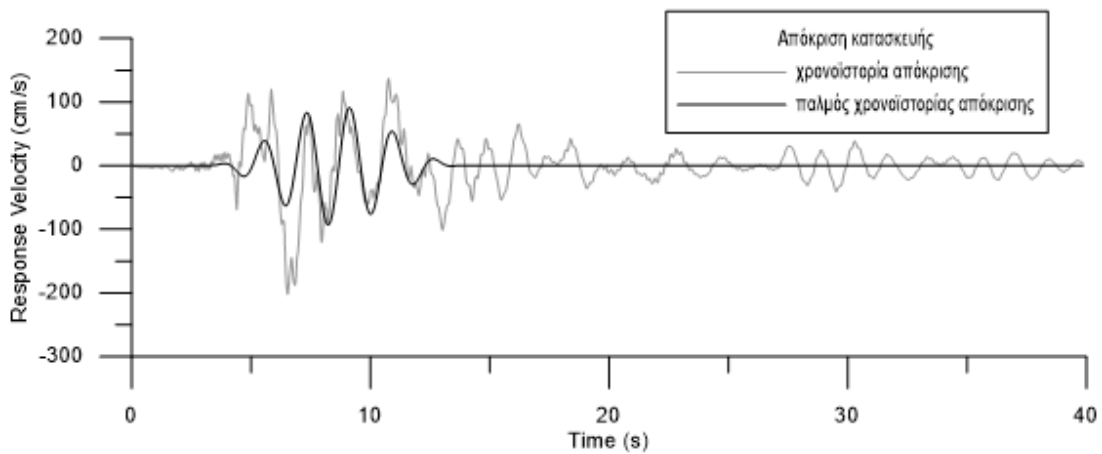
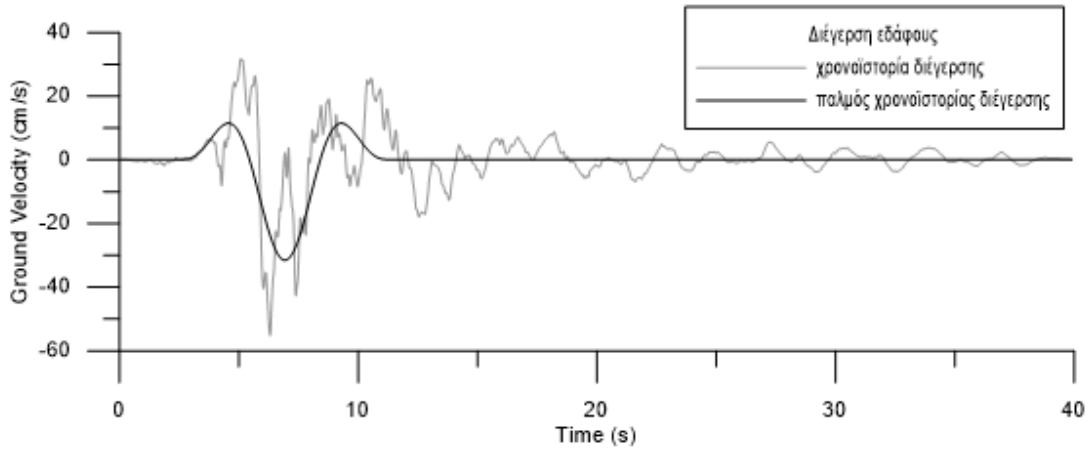
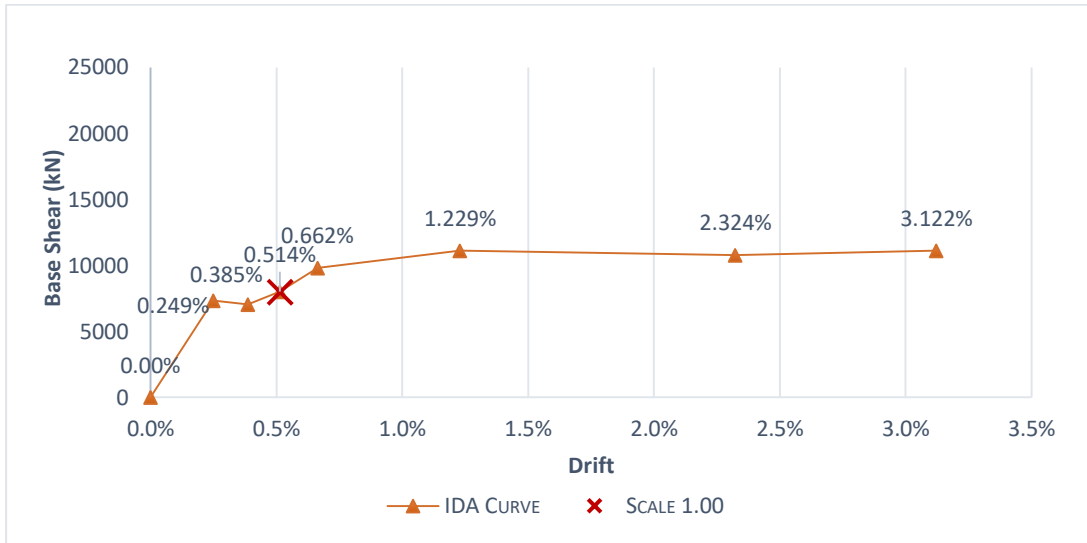


#35



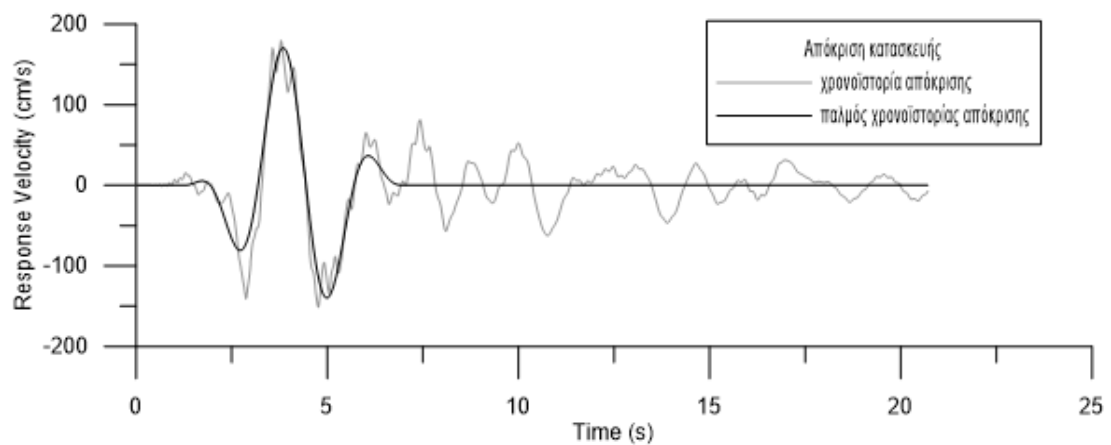
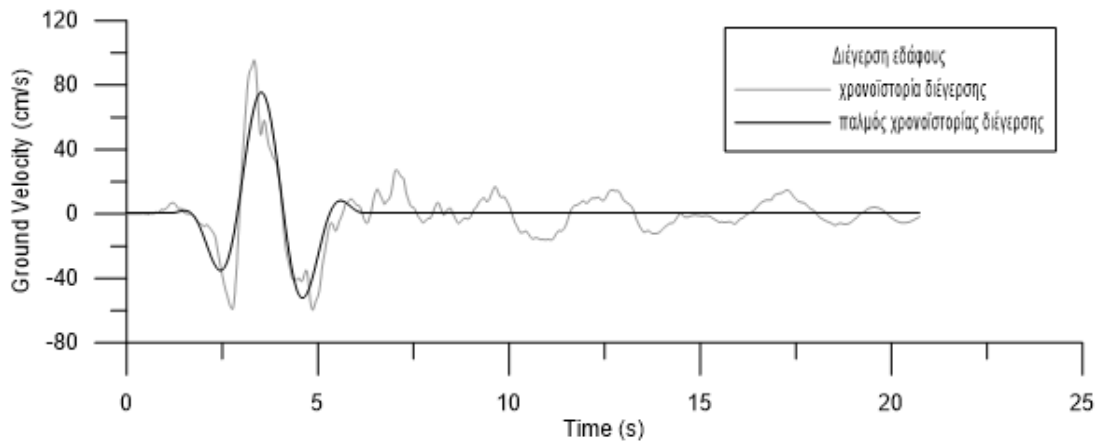
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
1.51	1.77	0.766

#36



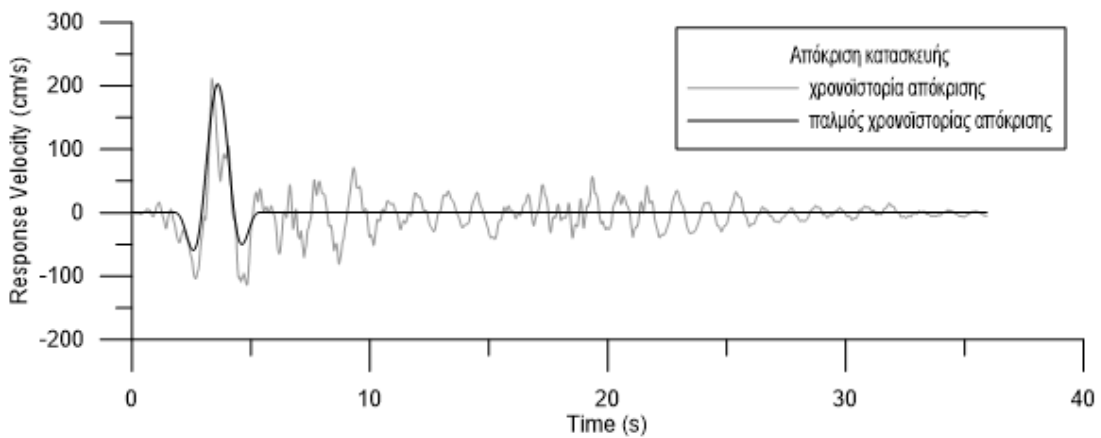
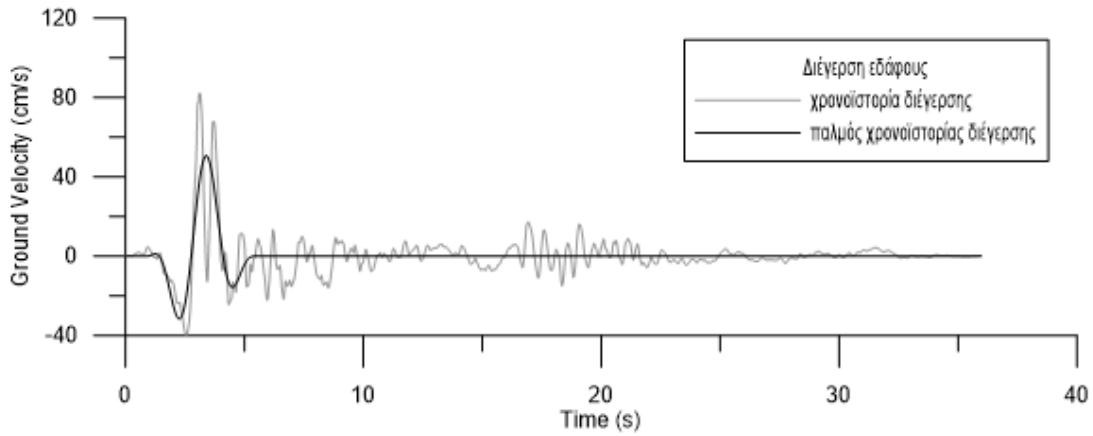
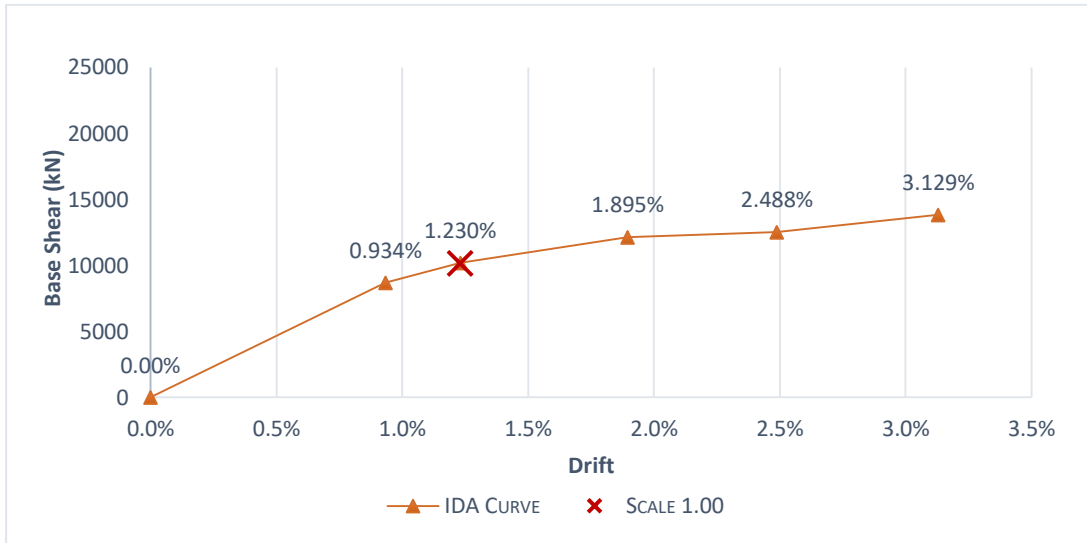
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
6.48	1.81	0.517

#37



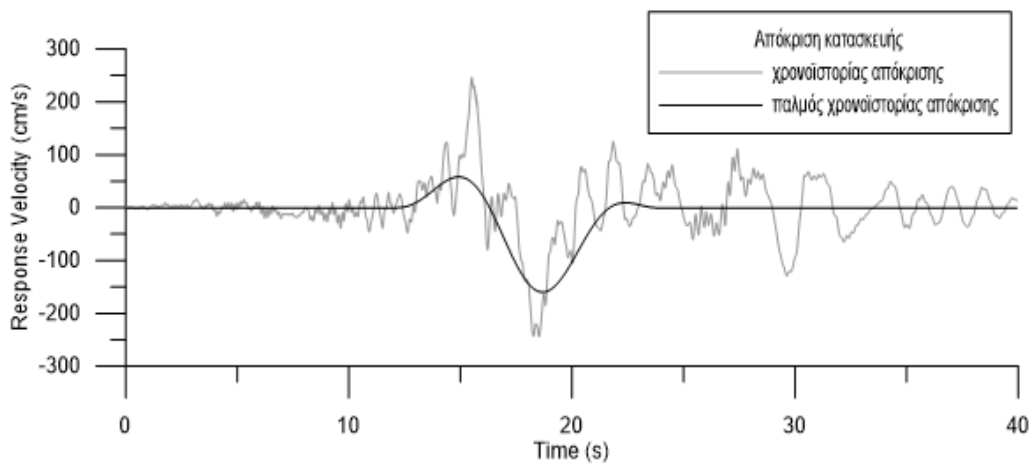
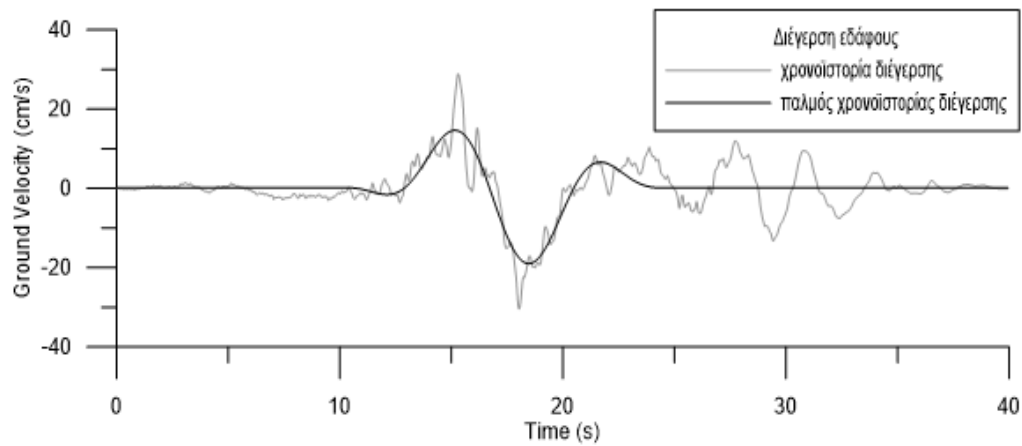
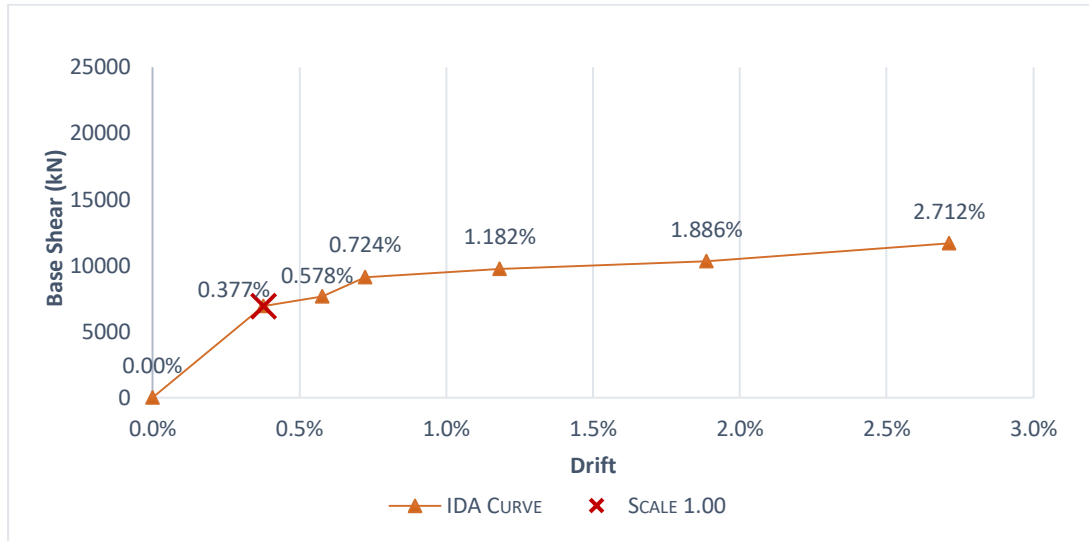
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
2.42	2.51	0.860

#38



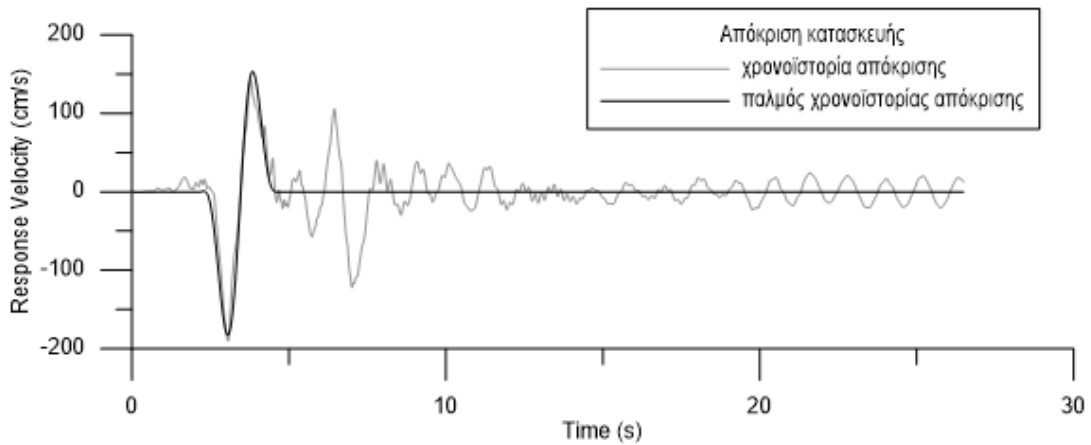
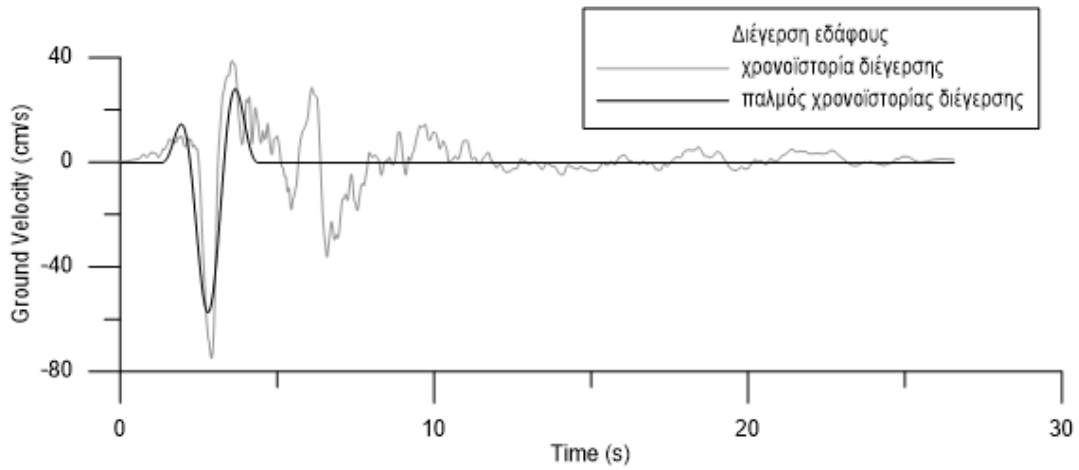
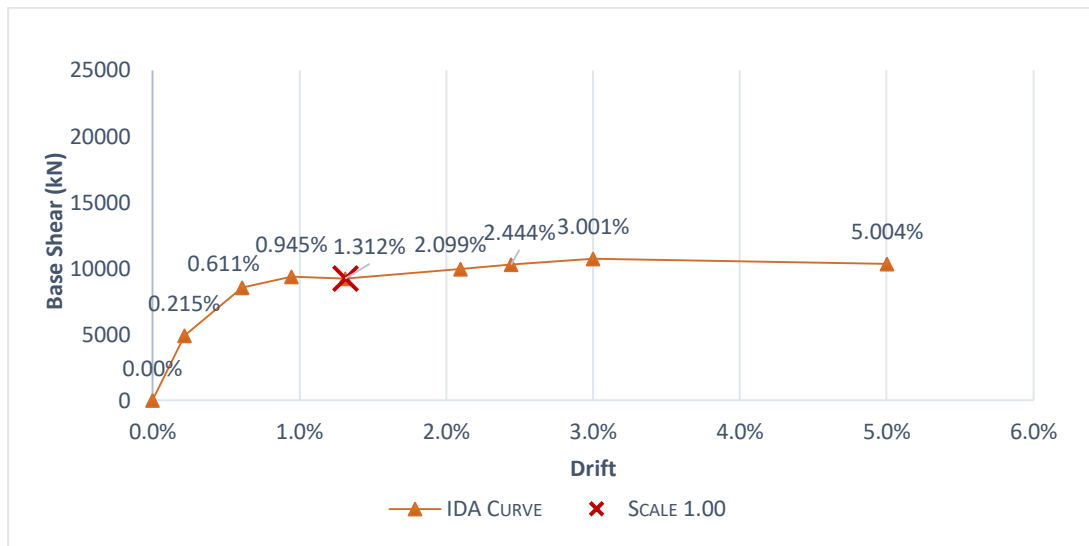
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
2.74	2.72	0.678

#39



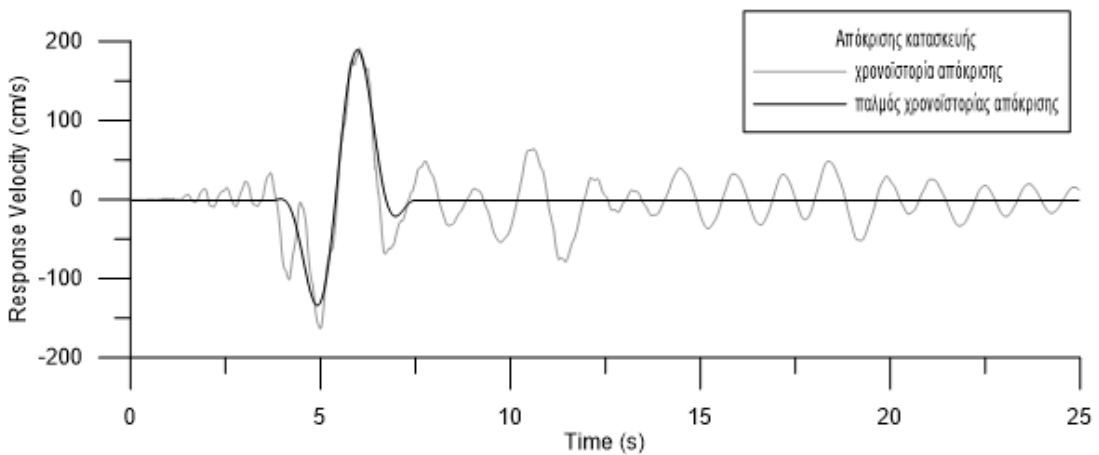
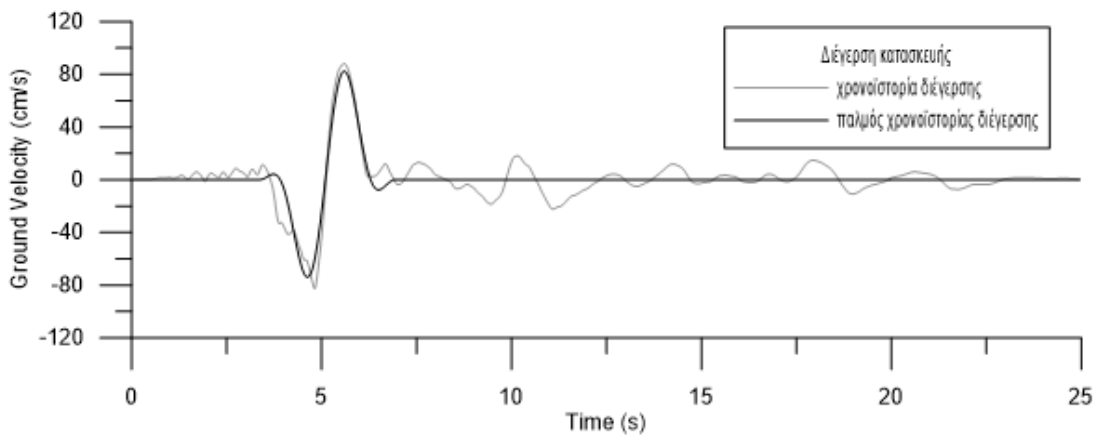
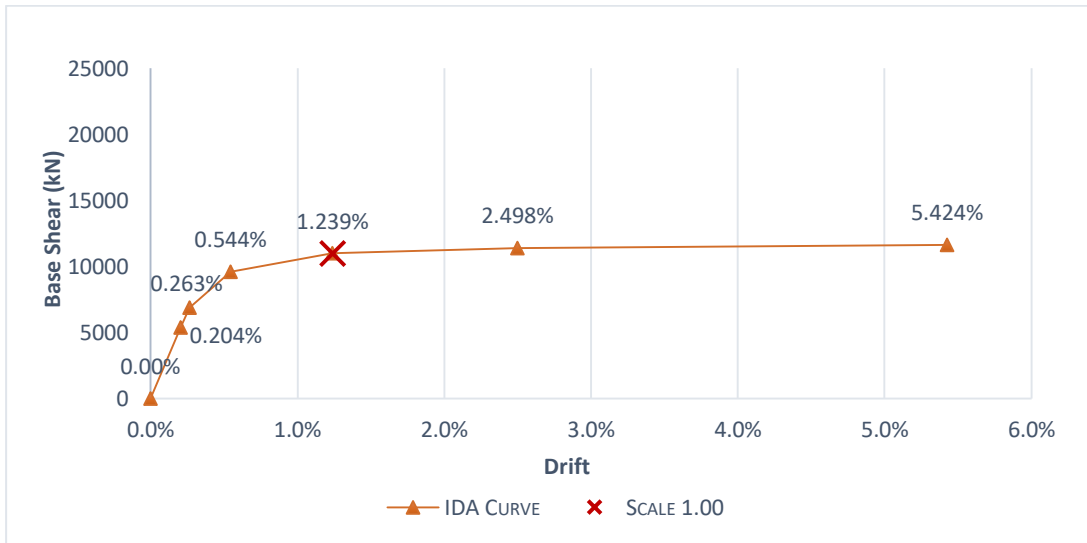
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
7.57	10.72	0.766

#45



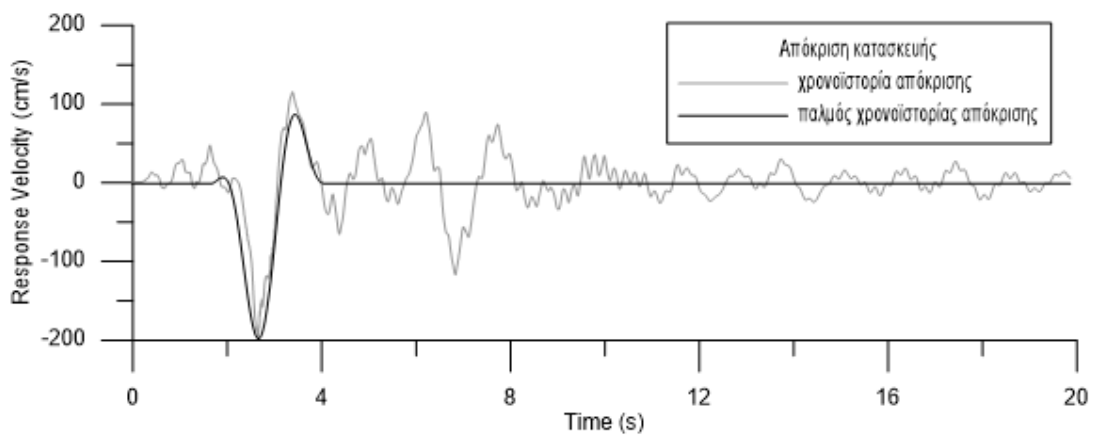
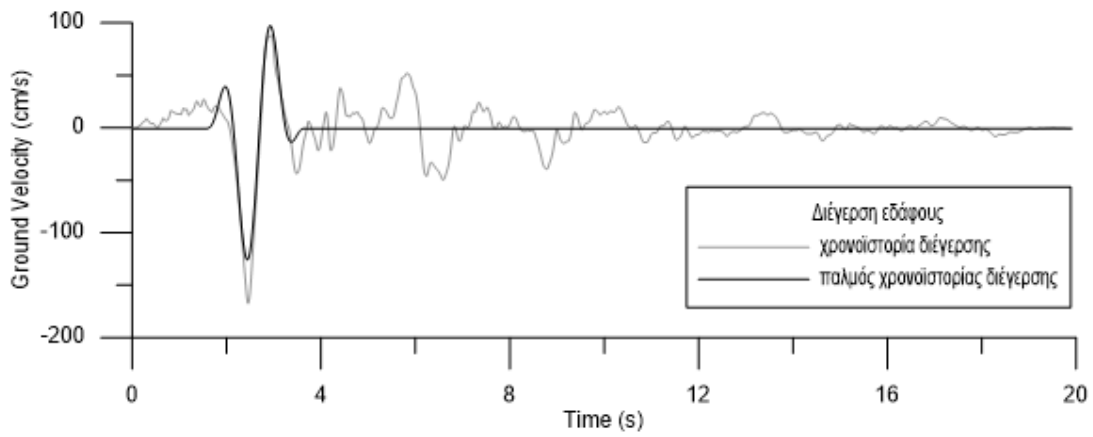
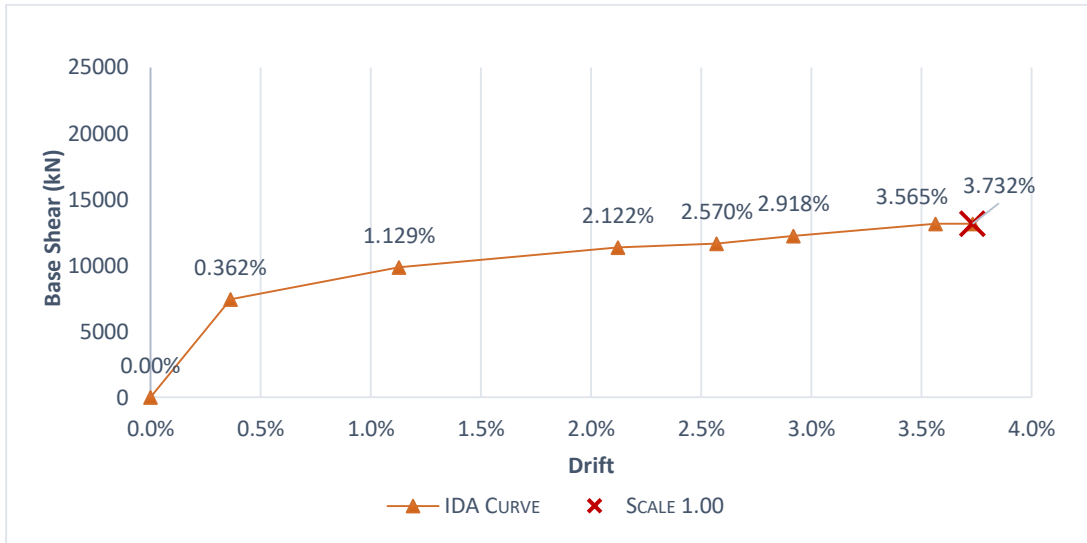
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
2.17	2.24	0.753

#46



Περίοδος παλμού δέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
2.39	2.67	0.782

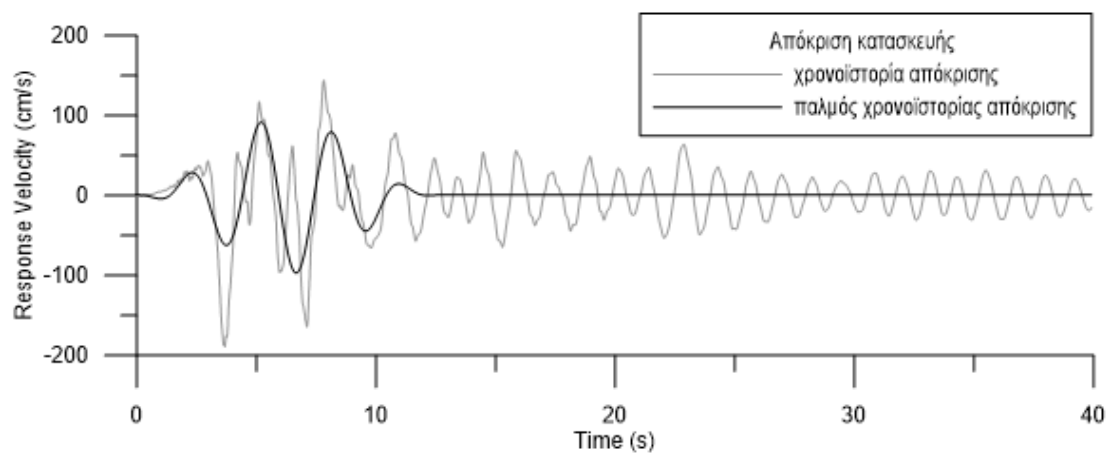
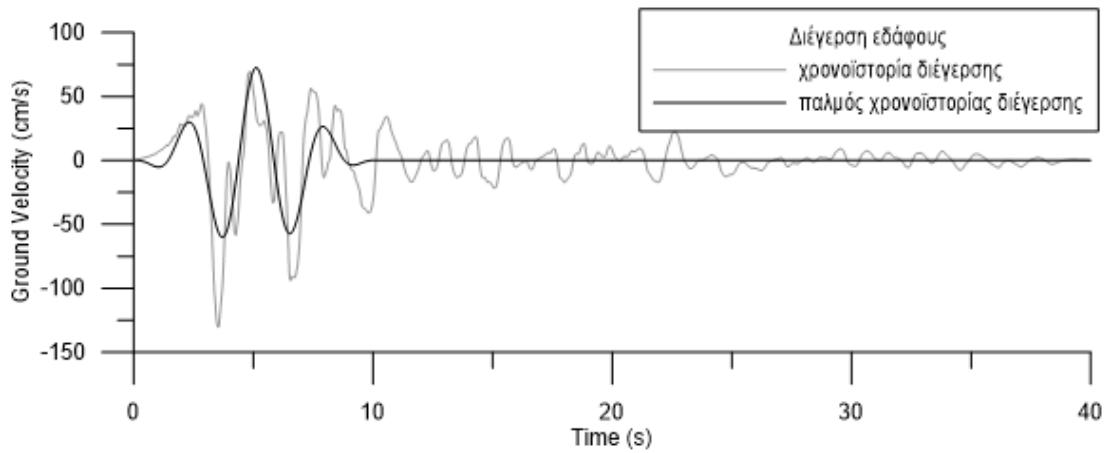
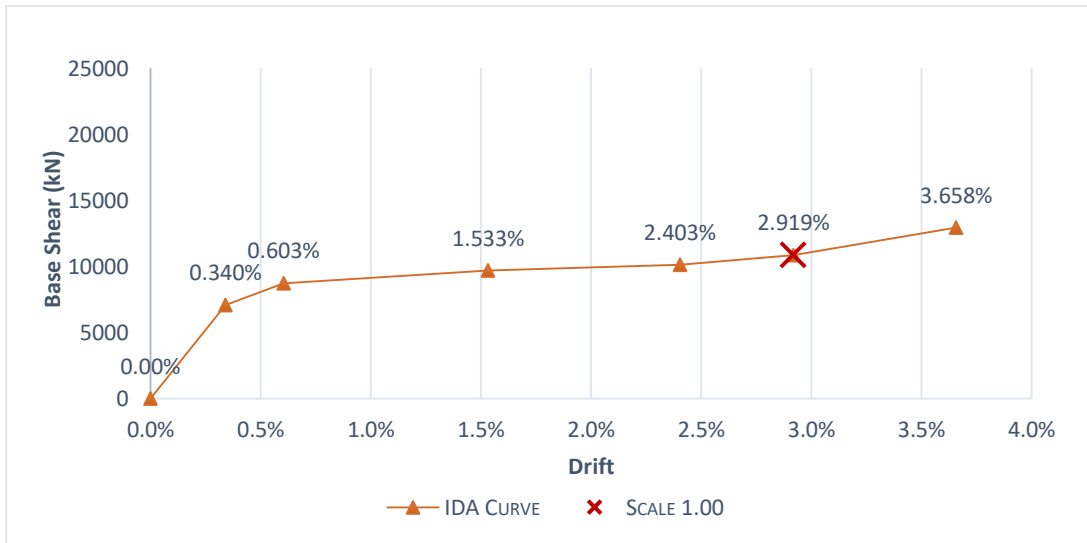
#49



Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
1.11	2.20	0.709

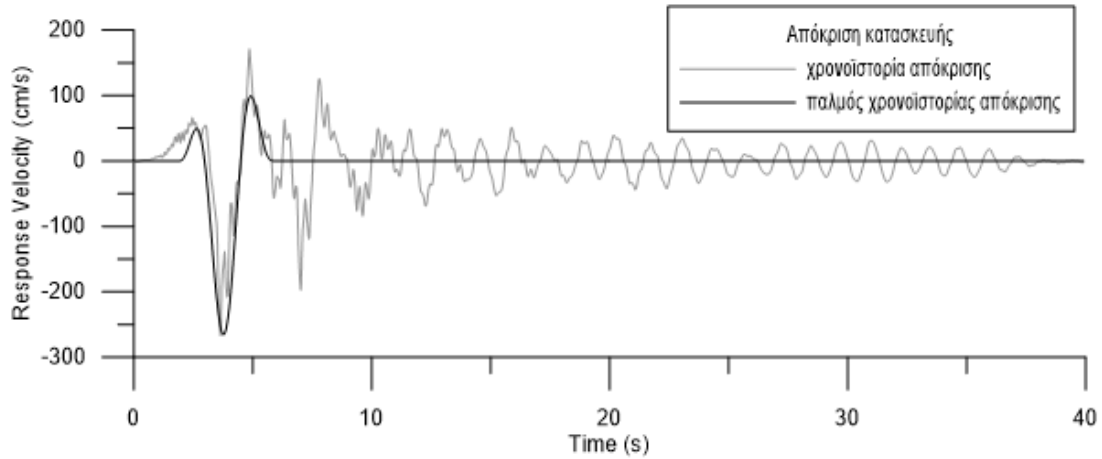
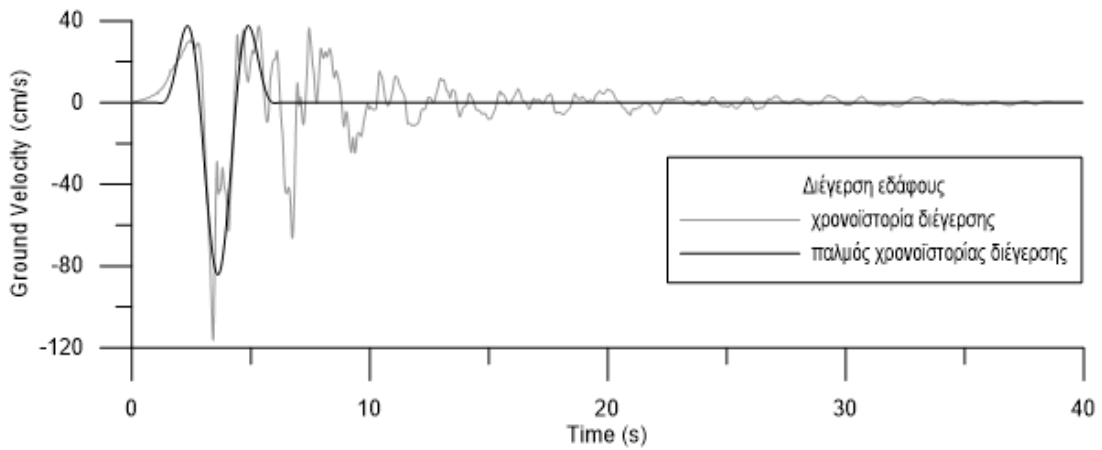
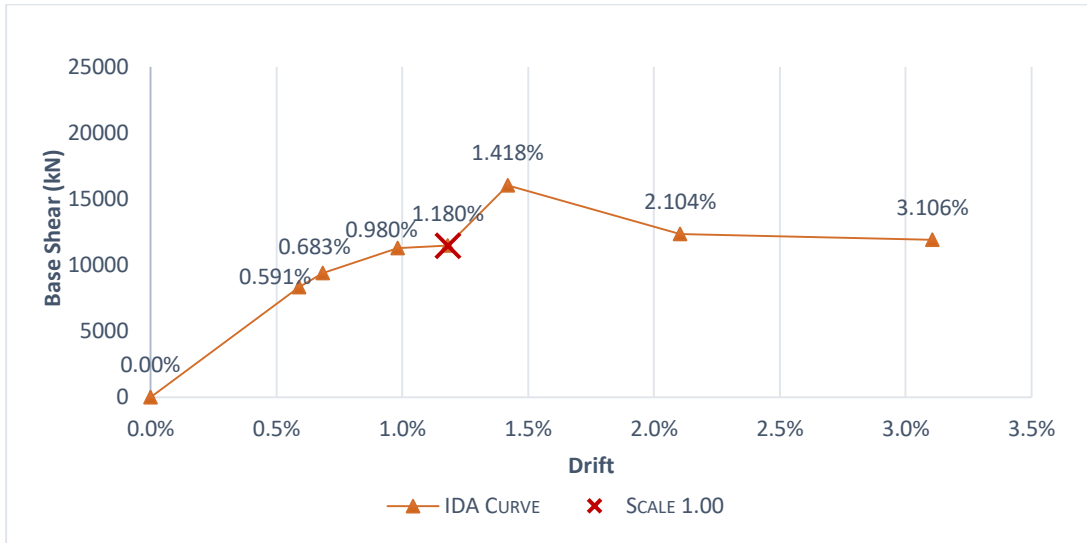


#50



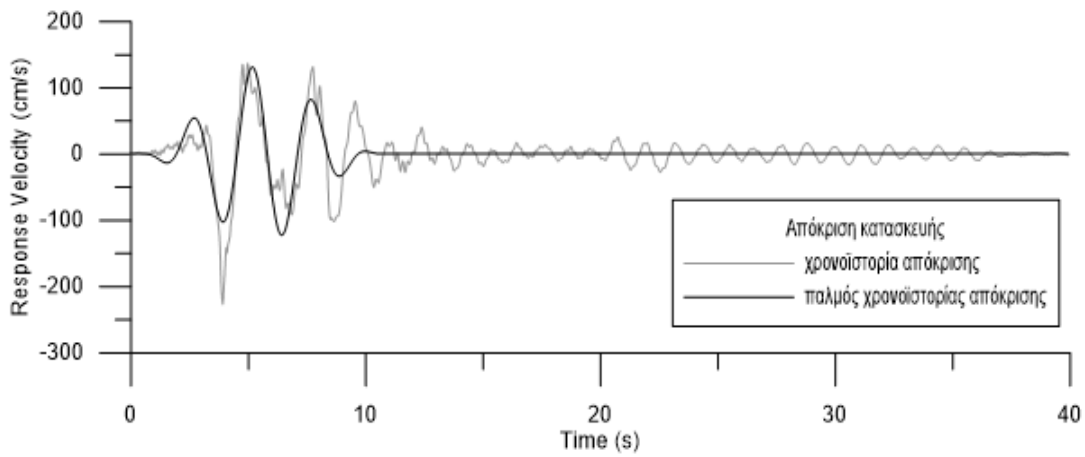
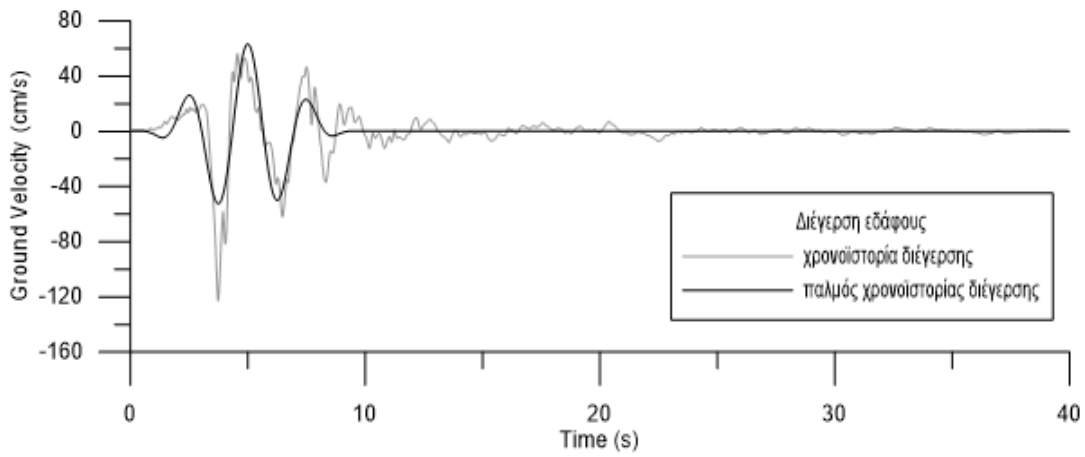
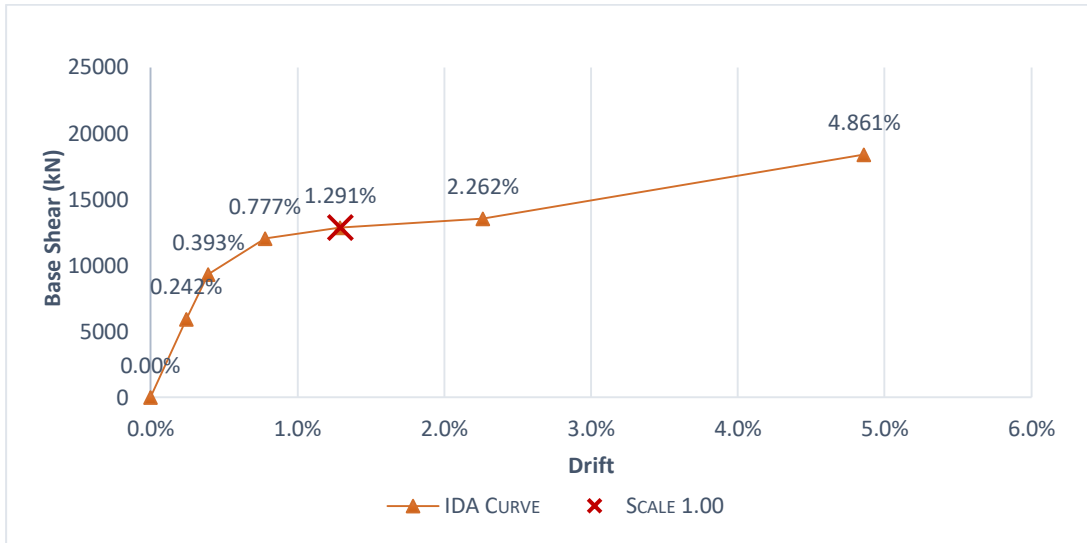
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
2.95	3.01	0.556

#51



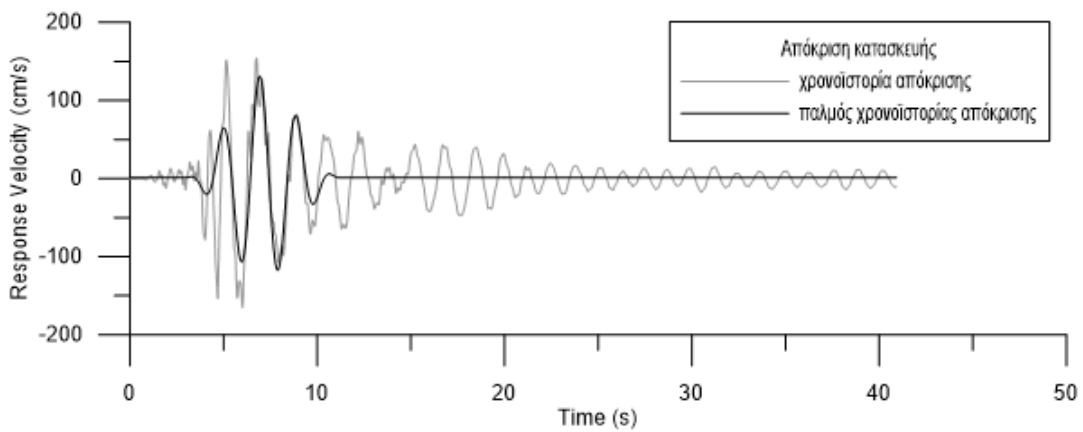
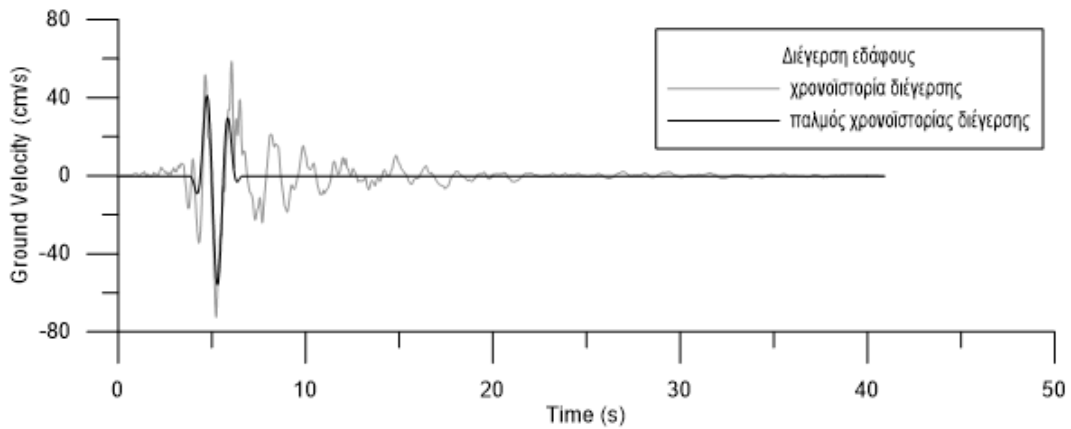
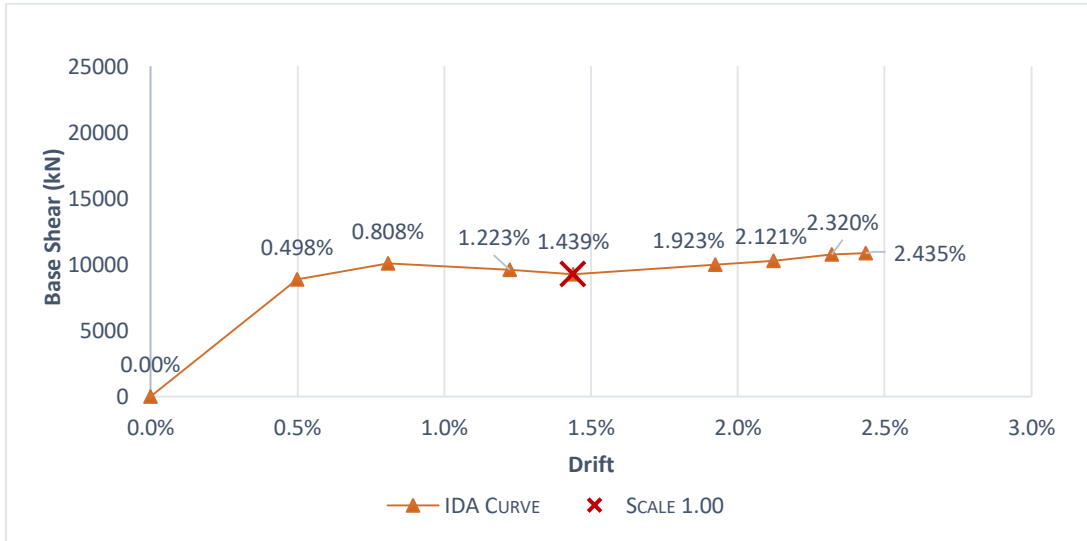
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
3.06	3.03	0.651

#52



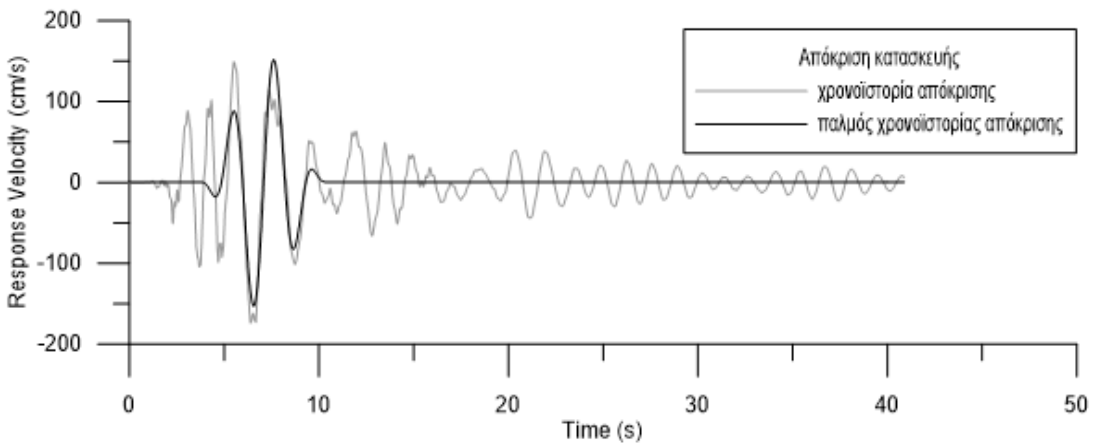
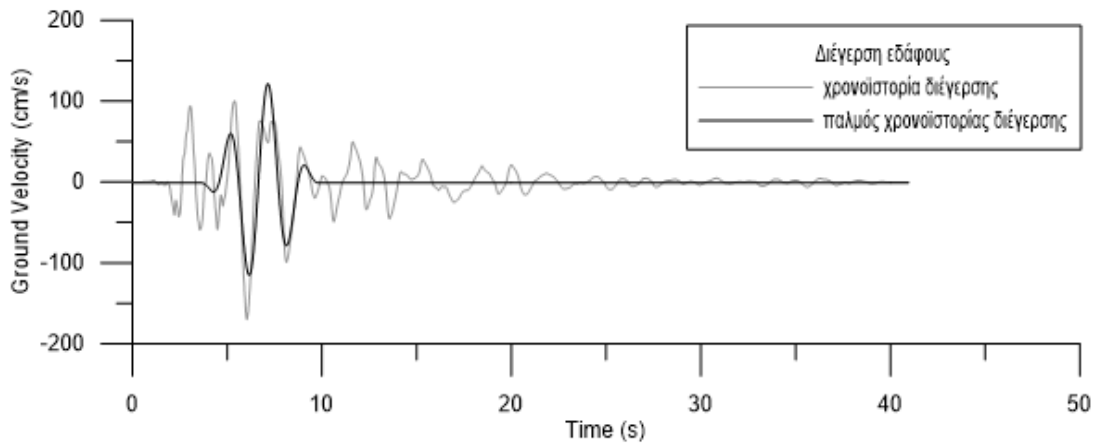
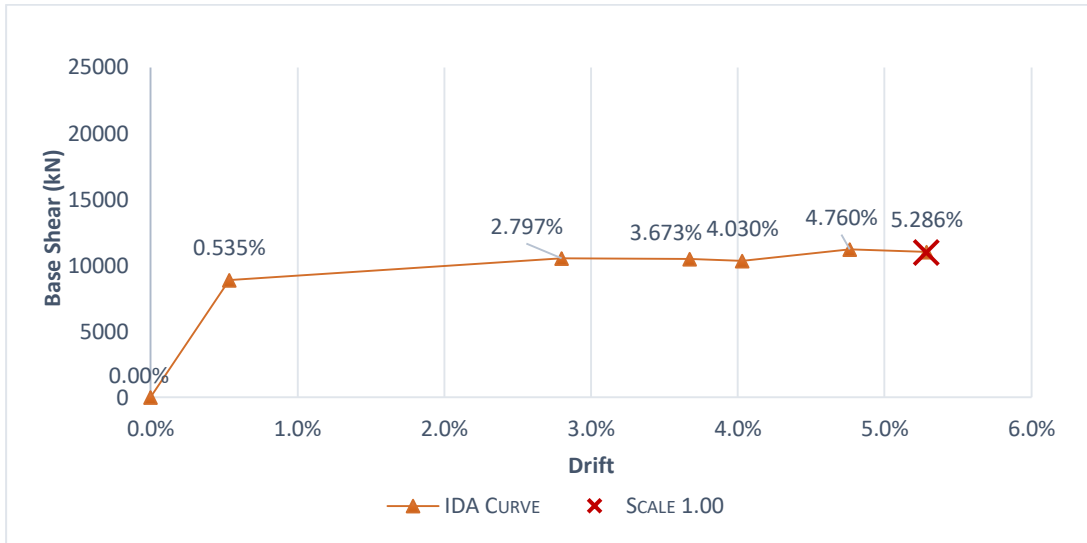
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
2.56	2.58	0.781

#53



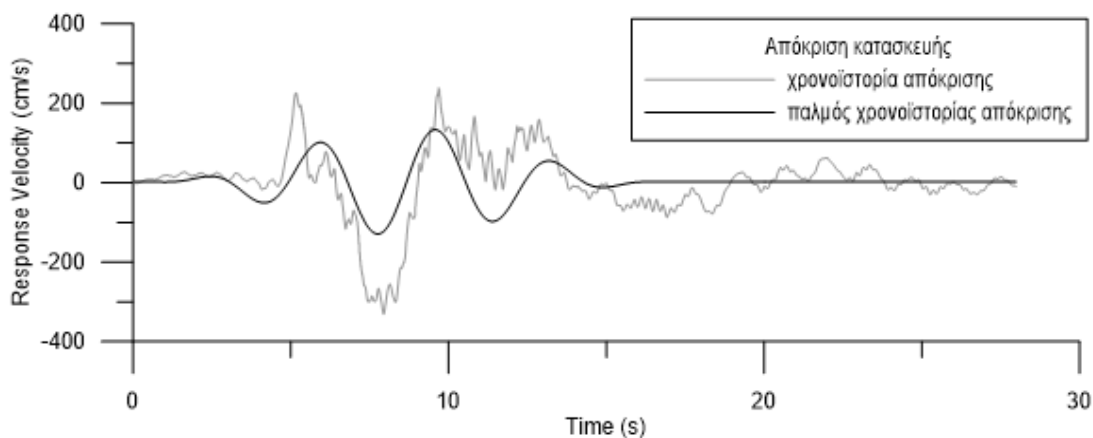
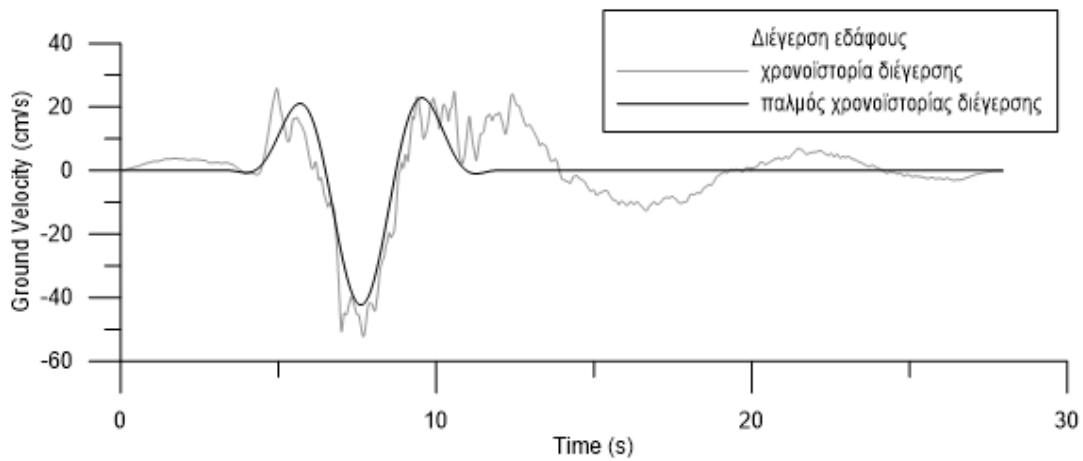
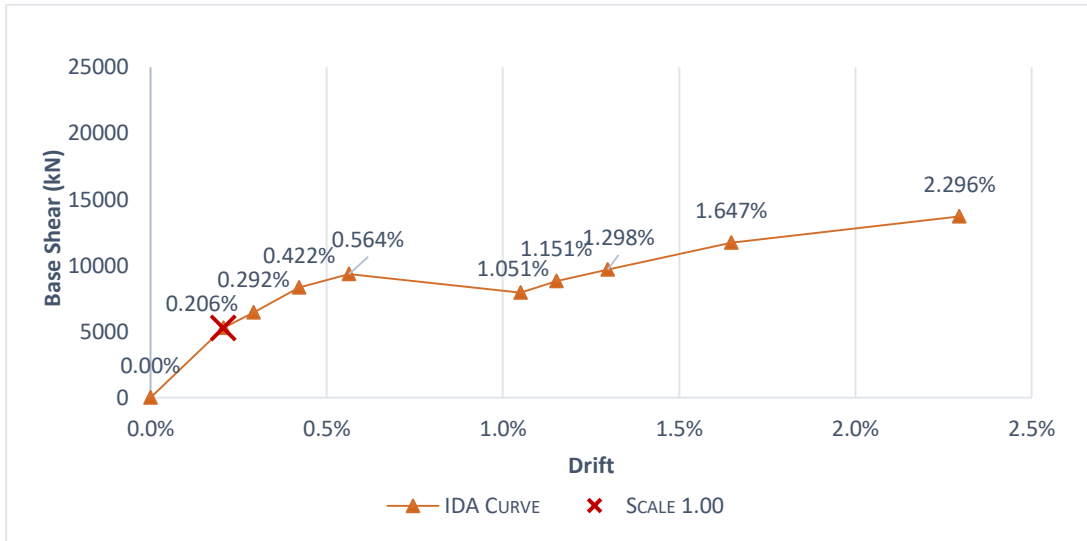
Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
1.23	1.98	0.714

#54



Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
2.08	2.23	0.731

#55



Περίοδος παλμού διέγερσης (s)	Περίοδος παλμού απόκρισης (s)	Συσχέτιση
4.88	3.74	0.587

---

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

---





Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της συσχέτισης των παλμών που προκύπτουν από τις χρονοϊστορίες ταχύτητας της διέγερσης του εδάφους και της απόκρισης της κατασκευής για σεισμούς κοντινού πεδίου. Αρχικά, είδαμε ότι μία περιοχή στην οποία επικεντρώνονται οι βλάβες κατά την διάρκεια ενός σεισμού είναι συνήθως συγκεντρωμένη γύρω από το ρήγμα και έχει διαστάσεις ανάλογες με την επιφάνεια ρηγμάτωσης. Η περιοχή αυτή ονομάζεται *κοντινό πεδίο (near fault area)* και κοντά της η εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται από το *φαινόμενο της κατευθυντικότητας (rupture directivity)*. Στην συνέχεια παρουσιάστηκε η μέθοδος του Baker που περιγράφει την ποσοτική ταξινόμηση των σεισμών κοντινού πεδίου και τον διαχωρισμό των χρονοϊστοριών σε παλμικές ή μη αλλά και η μέθοδος προσομοίωσης εδαφικών κινήσεων με παλμό κατευθυντικότητας όπως δίνεται από τους (George P. Manroeidis & Papageorgiou, 2003) με την χρήση *κυματομορφών (wavelets)*. Παρουσιάστηκε ακόμη η μεθοδολογία των (Mimoglou et al., 2014) η οποία επιτρέπει την αναγνώριση του κυρίαρχου παλμού, μέσω ενός συνδυασμού των φασμάτων απόκρισης ταχυτήτων και μετακινήσεων. Τέλος, μελετήθηκε η μέθοδος IDA (Incremental Dynamic Analysis), σύμφωνα με την οποία υποβάλλεται το μοντέλο κάποιας κατασκευής σε μία (ή περισσότερες) καταγραφές εδαφικής κίνησης, η καθεμία από τις οποίες κλιμακώνεται σε διάφορα επίπεδα έντασης, παράγοντας έτσι μία (ή περισσότερες) καμπύλες απόκρισης ως προς κάποιο επίπεδο έντασης.

Το σύνολο των κινήσεων που μελετήθηκαν, περιλαμβάνει 42 από τις 91 καταγραφές της βάσης δεδομένων *NGA (Next Generation Attenuation)*, που χαρακτηρίστηκαν από τον (Baker, 2007) ως *παλμικές*. Προκειμένου μια καταγραφή να θεωρείται παλμική πρέπει ο παλμός να μην φτάνει στο τέλος στη χρονοϊστορία ταχύτητας, η μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV να ξεπερνά τα 30cm/sec και οι τιμές του δείκτη πρόβλεψης παλμού P.I. του (Baker, 2007) να είναι μεγαλύτερες του 0.85s.

Σε πρώτο στάδιο, έγινε αξιοποίηση των ως άνω καταγραφών με μη-γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας σταδιακώς επαυξανόμενες. Κάθε επιταχυνσιογράφημα κλιμακώθηκε καταλλήλως (με μεγέθυνση ή σμικρύνση), χρησιμοποιώντας το λογισμικό *SeismoStruct*, έτσι ώστε η μη-γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας της κάθε κλιμάκωσης να καλύπτει πλήρως (και περαιτέρω) όλο το φάσμα της παραμορφωσιακής ικανότητας του φορέα. Κάθε κλιμάκωση μιας καταγραφής έδωσε και από ένα ζεύγος «μέγιστης τέμνουσας- μέγιστης σχετικής μετακίνησης». Όλες οι κλιμακώσεις της καταγραφής έδωσαν μία σειρά από βαθμονομημένες τιμές. Η τοποθέτηση αυτών των διατεταγμένων ζευγών τιμών σε γράφημα σχημάτισε μία καμπύλη, την καμπύλη *IDA*. Με άλλα λόγια, κάθε κλιμακωμένη καταγραφή έδωσε μία καμπύλη *IDA*, το σύνολο των οποίων για όλες τις καταγραφές επεξεργάστηκε για την εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω στην ανελαστική συμπεριφορά του υπό εξέταση φορέα, όταν αυτός υπόκειται σε καταγραφές με παλμό κατευθυντικότητας.

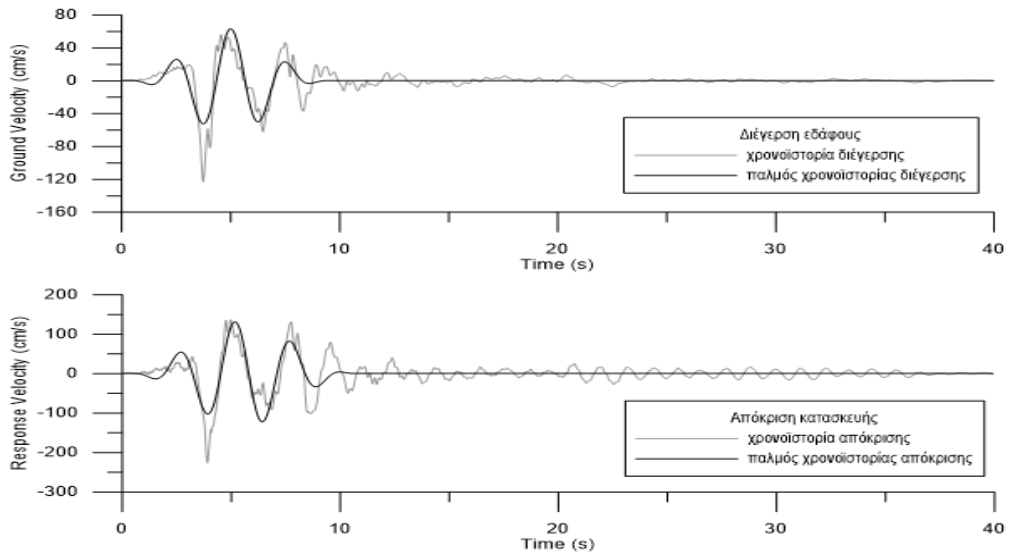
Από την παραπάνω διαδικασία αποτύπωσης της *IDA* καμπύλης, έγινε διακριτή η κλιμάκωση η οποία αντιστοιχεί στις εκτεταμένες βλάβες της κατασκευής έως και την

κατάρρευση. Για αυτή την στάθμη κάθε καταγραφής, εξήχθησαν από το SeismoStruct οι χρονοϊστορίες ταχύτητας της απόκρισης της κατασκευής, θέτοντας κάθε εδαφική κίνηση ως διέγερση στην βάση του υπό εξέταση φορέα. Για τη μαθηματική αναπαράσταση των παλμών, χρησιμοποιήθηκε το κυματίδιο που πρότειναν οι (Manroeidis et al, 2003), ενώ οι παράμετροί του προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τη μέθοδο των (Mimoglou et al, 2014). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ο υπολογιστικός κώδικας CROSS5NEW-5 για τον προσδιορισμό της περιόδου του παλμού,  $T_p$ , η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του φάσματος συνέλιξης για απόσβεση 5%. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει την αναγνώριση και αναπαράσταση των έξι μεμονωμένων παλμών που διακρίνονται στη χρονοϊστορία της ταχύτητας κάθε καταγραφής. Οι εν λόγω καταγραφές αφορούσαν τόσο στην χρονοϊστορία ταχύτητας της διέγερσης του εδάφους, αλλά και σε αυτή της απόκρισης της κατασκευής. Με υπέρθεση όλων των εξαγόμενων παλμών, μπορεί να παραχθεί μια προσομοίωση ολόκληρης της εδαφικής κίνησης. Με τον ίδιο αλγόριθμο, προσδιορίστηκαν επίσης το πλάτος  $A$  και το πλήθος κύκλων  $\gamma$  του αναγνωριζόμενου από το πρόγραμμα “παλμού”, καθώς και ο συντελεστής συσχέτισης  $cc$  του μοντέλου προσομοίωσης με την πραγματική καταγραφή. Ως δεσπόζων παλμός, εκ των έξι που διακρίνονται στην χρονοϊστορία ταχύτητας για κάθε καταγραφή, θεωρήθηκε αυτός που έδωσε τον μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης  $cc$ , καθώς αυτός αποτελεί δείκτη παλμικότητας. Έτσι, η περίοδος που αντιστοιχούσε σε αυτόν τον παλμό, όριζε και την περίοδο του παλμού  $T_p$ .

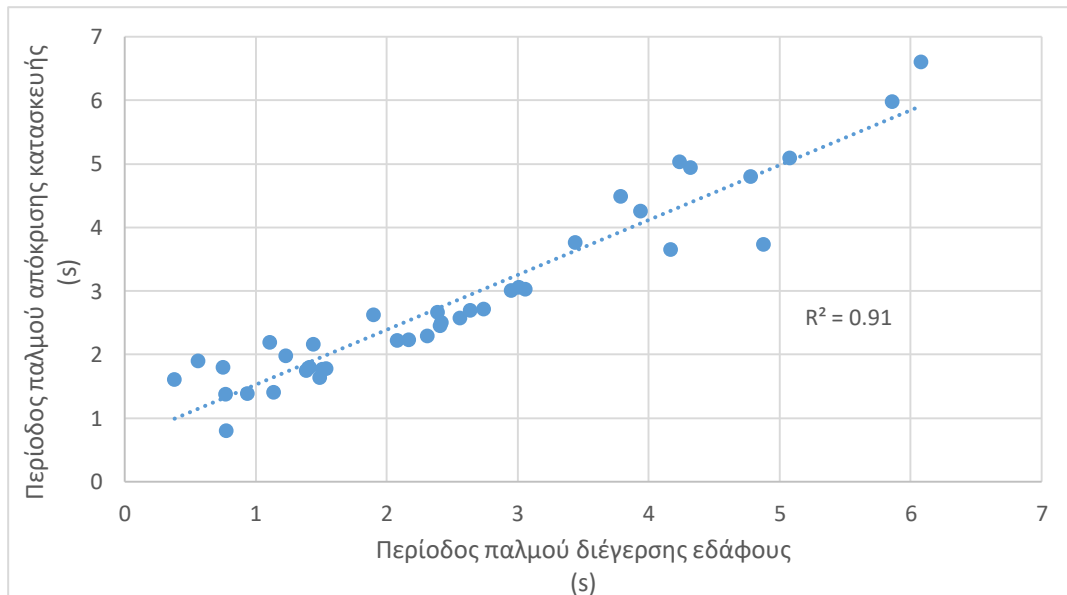
Μετά το πέρας των αναλύσεων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, καταλήξαμε στα κάτωθι συμπεράσματα, συνοδευόμενα από χαρακτηριστικά σχήματα.

- Σε στάθμες επιτελεστικότητας που αναφέρονται σε εκτεταμένες βλάβες, σχεδόν κατάρρευση, φαίνεται ότι η απόκριση της κατασκευής καθορίζεται πλήρως από την περίοδο του παλμού της διέγερσης. Δηλαδή, στην διάρκεια της ισχυρής δόνησης της καταγραφής, η κατασκευή αποκρίνεται με περίοδο περίπου ίση με την περίοδο του παλμού. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες ταχύτητας της διέγερσης του εδάφους και της απόκρισης της κατασκευής μαζί με τους παλμούς τους, για την καταγραφή #52 (Πίνακας 2.1) του σταθμού Sylmar - Olive View Med FF για τον σεισμό του Northridge-01. Συγκεκριμένα, η περίοδος παλμού της διέγερσης είναι 2.56s (Mimoglou et al, 2014), ενώ η περίοδος παλμού της απόκρισης της κατασκευής στην στάθμη εκτεταμένων βλαβών προέκυψε 2.58s.

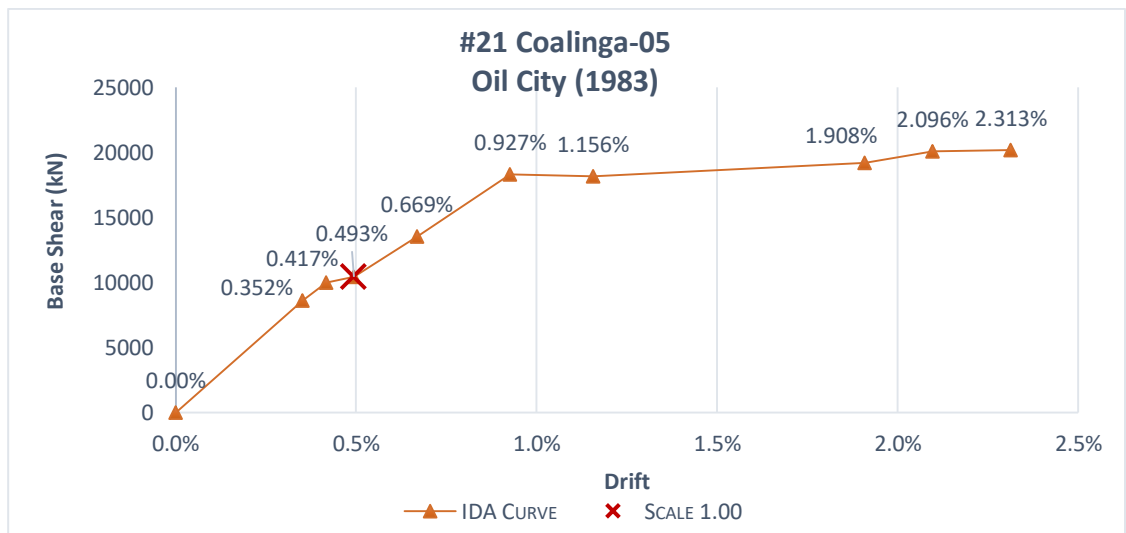
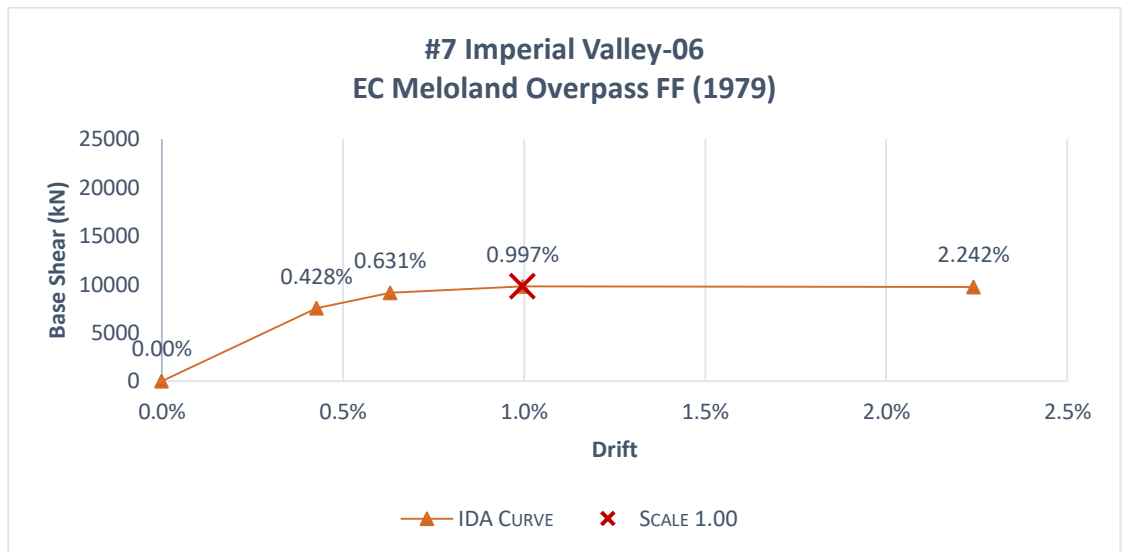
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ



Απεικονίζοντας 39 ζεύγη «περίοδος παλμού διέγερσης εδάφους – περίοδος παλμού απόκρισης κατασκευής» εκ των 42 καταγραφών που μελετήθηκαν (οι καταγραφές #20, #26 και #38 εξαιρέθηκαν ως μη αντιπροσωπευτικές), παρατηρείται μία έντονα γραμμική σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$ , ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ μηδέν και ένα, είναι ένα ποσοτικό μέτρο για το πόσο καλά προσαρμόζεται η ευθεία παλινδρόμησης στα δεδομένα, και είναι ίσος με 0.91. Οι τιμές κοντά στην μονάδα δείχνουν και καλύτερη γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών.

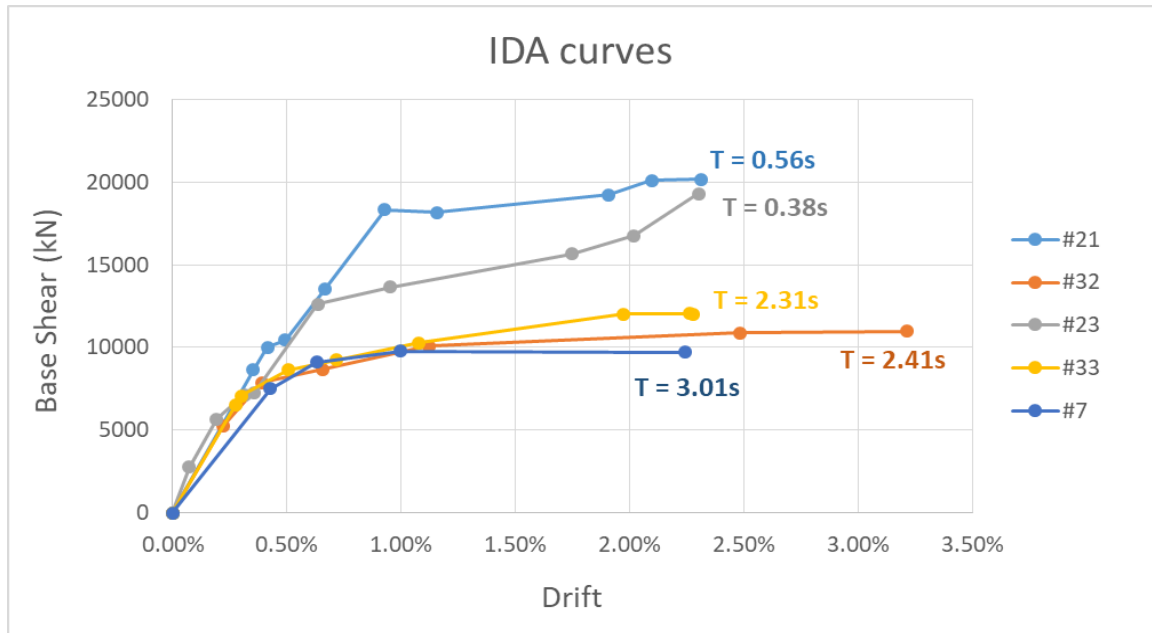


- Παραπάνω ειπώθηκε ότι στην διάρκεια της ισχυρής δόνησης της καταγραφής, η κατασκευή αποκρίνεται με περίοδο περίπου ίση με την περίοδο του παλμού. Αυτό, καθορίζει και την δρώσα ακαμψία της κατασκευής σε εκείνο το επίπεδο διέγερσης. Έτσι παρατηρούμε, ότι σε διεγέρσεις με μικρές περιόδους παλμού, η κατασκευή παρουσιάζει χαρακτηριστικά ενισχυμένης ακαμψίας, ενώ σε μεγάλες περιόδους παλμού ελαττωμένης ακαμψίας. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται οι καμπύλες IDA των καταγραφών #7 και #21 (Πίνακας 2.1), με περιόδους παλμών 3.01s και 0.56s, αντίστοιχα.

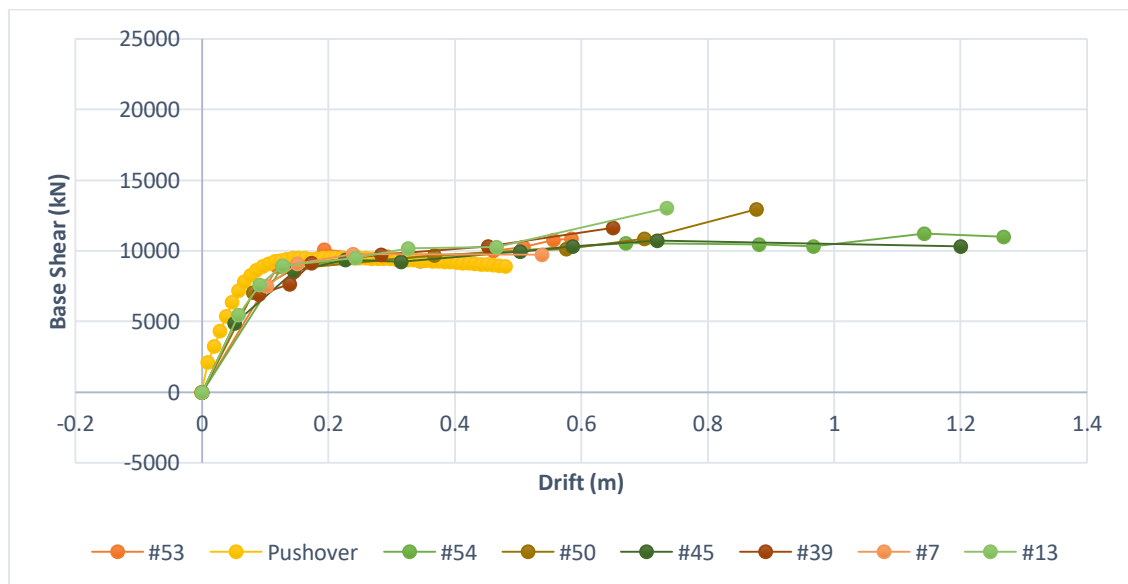


Παρατηρούμε ότι στην καμπύλη IDA της καταγραφής #7, με περίοδο παλμού 3.01s, η μέγιστη τέμνουσα ισούται περίπου με 10,000 kN. Αντίθετα, σε αυτή της καταγραφής #21, με περίοδο παλμού αρκετά μικρότερη και ίση με 0.56s, η μέγιστη τέμνουσα ισούται περίπου με 20,000 kN.

Οι προαναφερθείσες καταγραφές, παρουσιάζονται συγκριτικά και με άλλες στο παρακάτω Σχήμα.



- Όταν η κατασκευή παρουσιάζει χαρακτηριστικά ελαττωμένης ακαμψίας ("Softening"), η καμπύλη IDA προσεγγίζει την Pushover καμπύλη.



- Γνωρίζοντας το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος που αναμένεται, καθίσταται δυνατό να επιλεγεί και το κατάλληλο δείγμα των καμπυλών IDA για την συμπεριφορά του κτιρίου.

Στο πρώτο κεφάλαιο, έγινε αναφορά σε διαφορετικούς προτεινόμενους ορισμούς εκτίμησης της περιόδου του παλμού κατευθυντικότητας συναρτήσει του μεγέθους σεισμικού γεγονότος  $M_w$  (Papageorgiou & Aki, 1983), (Somerville, 1998), (Alavi & Krawinkler, 2000), (Rodriguez-Marek, 2000) και κοινό χαρακτηριστικό τους αποτελεί ότι με την αύξηση του μεγέθους  $M_w$ , αυξάνεται και η περίοδος του παλμού. Σύμφωνα με τα προηγούμενα συμπεράσματα, αυτό συνεπάγεται και αύξηση της αντίστοιχης δρώσας περιόδου και άρα η κατασκευή παρουσιάζει χαρακτηριστικά ελαττωμένης ακαμψίας (softening). Αντίθετα, σε σεισμούς μικρού μεγέθους, αναμένεται να παρουσιαστούν χαρακτηριστικά ενισχυμένης ακαμψίας (hardening).

---

---

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

---

---





- Alavi, B., & Krawinkler, H. (2000). Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design. In *12th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 1–8). Retrieved from <http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/2665.pdf>
- Ang, A. H.-S., & De Leon, D. (1997). Determination of optimal target reliabilities for design and upgrading of structures. *Structural Safety*, *19*(1), 91–103. [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(96\)00029-X](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(96)00029-X)
- Baker, J. W. (2007). Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *97*(5), 1486–1501. <https://doi.org/10.1785/0120060255>
- Bazzurro, P., & Cornell, C. A. (1994). Seismic hazard analysis of nonlinear structures. II: Applications. *Journal of Structural Engineering*, *120*(11), 3345–3365. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1994\)120:11\(3345\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:11(3345))
- Benioff, H. (1955). Mechanism and strain characteristics of the White Wolf fault as indicated by the aftershock sequence. *Calif. Div. Mines Bull*, *171*, 199–202.
- Bray, J. D., & Rodriguez-Marek, A. (2004). Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *24*(11), 815–828. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.05.001>
- Commission, C. S. E. I., Lawson, A. C., & Reid, H. F. (1910). *The California Earthquake of April 18, 1906: Report of the State Earthquake Investigation Commission ...* Carnegie Institution of Washington. Retrieved from <https://books.google.gr/books?id=w7oQAAAIAAJ>
- De Matteis, G., Landolfo, R., Dubina, D., & Stratan, A. (2000). Influence of the structural typology on the seismic performance of steel framed buildings. *Moment Resistant Connections of Steel Frames in Seismic Areas*, 513–538.
- Dubina, D., Ciutina, A., Stratan, A., & Dinu, F. (2000). Ductility demand for semi-rigid joint frames. *Moment Resistant Connections of Steel Frames in Seismic Areas*, 371–408.
- Fu, Q., & Menun, C. (2004). Seismic-Environment-Based Simulation of near-fault ground motions. In *13 th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Krawinkler, H., & Alavi, B. (1998). Development of improved design procedures for near-fault ground motions. In *SMIP98, seminar on utilization of strong motion data, Oakland, CA*.
- Li, S., & Xie, L. L. (2007). Progress and trend on near-field problems in civil engineering. *Acta Seismologica Sinica English Edition*, *20*(1), 105–114. <https://doi.org/10.1007/s11589-007-0105-0>
- Luco, N., & Cornell, C. A. (2000). Effects of Connection Fractures on SMRF Seismic Drift Demands. *Journal of Structural Engineering*, *126*(1), 127–136. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:1\(127\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:1(127))
- Makris, N., & Black, C. J. (2004). Evaluation of peak ground velocity as a “good” intensity measure for near-source ground motions. *Journal of Engineering Mechanics*, *130*(9), 1032–1044.
- Mallat, S. (2009). *A Wavelet Tour of Signal Processing. A Wavelet Tour of Signal Processing*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374370-1.X0001-8>

- Mavroeidis, G. P., Dong, G., & Papageorgiou, A. S. (2004). Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33(9), 1023–1049. <https://doi.org/10.1002/eqe.391>
- Mavroeidis, G. P., & Papageorgiou, A. S. (2003). A mathematical representation of near-fault ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(3), 1099–1131. <https://doi.org/10.1785/0120020100>
- Mehanny, S., & Deirlein, G. (2000). *Modeling of Assessment of Seismic Performance of Composite Frames With Reinforced Concrete Columns and Steel Beams*. The John A. Blume Earthquake Engineering Center.
- Mimoglou, P., Psycharis, I. N., & Taflampas, I. M. (2014). Explicit determination of the pulse inherent in pulse-like ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(15), 2261–2281. <https://doi.org/10.1002/eqe.2446>
- Nassar, A. A., & Krawinkler, H. (1991). Seismic Demands for SDOF and MDOF systems. *Engineering*, (95), 204.
- Papageorgiou, A. S., & Aki, K. (1983). A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. I. Description of the model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(3), 693–722. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(84\)90498-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(84)90498-4)
- Psycharis, I. N., Papastamatiou, D. Y., & Alexandris, a. P. (2000). Parametric investigation of the stability of classical columns under harmonic and earthquake excitations. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 29(8), 1093–1109. [https://doi.org/10.1002/1096-9845\(200008\)29:8<1093::AID-EQE953>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/1096-9845(200008)29:8<1093::AID-EQE953>3.0.CO;2-S)
- Rodriguez-Marek, A. (2000). *Near-fault seismic site response* (Vol. 1). University of California, Berkeley.
- Rossetto, T., & Elnashai, A. (2003). Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data. *Engineering Structures*, 25(10), 1241–1263. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00060-9)
- Sasani, M., & Bertero, V. V. (2000). Importance of severe pulse-type ground motions in performance-based engineering: historical and critical review. WORD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING.
- Somerville, P. G. (1998). Development of an improved representation of near fault ground motions. In *SMIP98 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data* (Vol. 15).
- Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R. W., & Abrahamson, N. A. (1997). Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity. *Seismological Research Letters*, 68(1), 199–222. <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.199>
- Taflampas, I. M., Spyrakos, C. C., & Koutromanos, I. A. (2009). A new definition of strong motion duration and related parameters affecting the response of medium-long period structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(4), 752–763. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.08.005>
- Yun, S.-Y., Hamburger, R. O., Cornell, C. A., & Foutch, D. A. (2002). Seismic performance evaluation for steel moment frames. *Journal of Structural Engineering*, 128(4), 534–

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

545. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:4\(534\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:4(534))

Zhai, C., Chang, Z., Li, S., & Xie, L. (2013). Selection of the most unfavorable real ground motions for low- and mid-rise rc frame structures. *Journal of Earthquake Engineering*, 17(8), 1233–1251. <https://doi.org/10.1080/13632469.2013.837415>