



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

Συμπεριφορά τοιχωματικών κατασκευών από Ω.Σ. υπό  
τεχνητές σεισμικές καταγραφές με παλμικό περιεχόμενο

---

ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ Δ. ΚΩΣΤΟΠΟΥΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ι. Ν. Ψυχάρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ι. Μ. Ταφλαμπάς, Επιστημονικός Συνεργάτης Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2018





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

Συμπεριφορά τοιχωματικών κατασκευών από Ω.Σ. υπό  
τεχνητές σεισμικές καταγραφές με παλμικό περιεχόμενο

---

ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ Δ. ΚΩΣΤΟΠΟΥΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ι. Ν. Ψυχάρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ι. Μ. Ταφλαμπάς, Επιστημονικός Συνεργάτης Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2018



Στον πατέρα μου Δημήτρη,

Στη μητέρα μου Ελένη.



# Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τον κύκλο των μεταπτυχιακών μου σπουδών θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Πρώτο από όλους τον κ. Ιωάννη Ψυχάρη, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό, Καθηγητή Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας αυτής. Αρχικά για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, και έπειτα για την ουσιαστική βοήθεια και καθοδήγησή του. Ο κ. Ψυχάρης, από τον καιρό της προπτυχιακής μου εργασίας μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με πεδία της Αντισεισμικής Τεχνολογίας, της Τεχνικής Σεισμολογίας και των μη-γραμμικών αναλύσεων που τα θεωρώ θεμελιώδη, και με ενδιαφέρουν ιδιαίτερος. Για το λόγο αυτό, τον ευχαριστώ θερμά.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου οφείλω στον κ. Ιωάννη Ταφλαμπά, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό και Επιστημονικό Συνεργάτη Ε.Μ.Π., για την συνεχή συνεργασία και επίβλεψη της εργασίας μου. Ο κ. Ταφλαμπάς, με τις ευρείες γνώσεις του για τους σεισμούς κοντινού πεδίου, αλλά και με το αμέριστο ενδιαφέρον του συνέβαλε καταλυτικά στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στην Βασιλική Καρδούτσου, φίλη και Υποψήφια Διδάκτορα Ε.Μ.Π. και τον Βαγγέλη Αυγενάκη, Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π., για την ουσιαστική τους βοήθεια, τις παρατηρήσεις και το άμεσο ενδιαφέρον τους.

Ευχαριστώ ακόμα τους συναδέλφους μου, για την συνεχή κατανόηση και υποστήριξη κατά τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Δεν θα μπορούσα να παραλείψω τον Αστέρη και τη Βίκυ που ήταν δίπλα μου και με υποστήριζαν όλο αυτό το διάστημα. Ιδιαίτερος και ξεχωριστά τον καθέναν τους, τους ευχαριστώ.

Τέλος, δεν θα είχα φτάσει μέχρι εδώ χωρίς την ηθική και την υλική υποστήριξη αλλά και τη συμπαράσταση των γονιών μου από την πρώτη στιγμή, έως και τώρα που ολοκληρώνω τις Μεταπτυχιακές μου σπουδές. Το μεγαλύτερο ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου ανήκει σε αυτούς.

Αικατερίνη Κωστοπούλου

Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2018







ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Συμπεριφορά τοιχωματικών κατασκευών από Ω.Σ. υπό τεχνητές  
σεισμικές καταγραφές με παλμικό περιεχόμενο**

Αικατερίνη Δ. Κωστοπούλου

Επιβλέπων: Ψυχάρης Ν. Ιωάννης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Ταφλαμπάς Μ. Ιωάννης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Επιστημονικός  
Συνεργάτης Ε.Μ.Π.

## Περίληψη

Οι εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου αποτελούν μια ιδιαίτερη κατηγορία εδαφικών διεγέρσεων, που έχουν απασχολήσει σοβαρά του μελετητές, αφού επηρεάζουν σημαντικά τα έργα πολιτικού μηχανικού. Πρόκειται για σεισμικές καταγραφές που εμφανίζουν έναν σημαντικό παλμό στη χρονοϊστορία ταχυτήτων, διότι τα χαρακτηριστικά τους επηρεάζονται από το μηχανισμό διάρρηξης και από τα φαινόμενα κατευθυντικότητας.

Στη παρούσα εργασία μελετάται η εκτίμηση της σύγκλιση των μετακινήσεων οροφής και των σχετικών μετακινήσεων των ορόφων όταν υποβάλλονται σε παλμικές διεγέρσεις με το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο. Στο πλαίσιο αυτό, επιλέχθηκαν 14 καταγραφές της βάσης δεδομένων NGA (Next Generation Attenuation), που χαρακτηρίστηκαν από τον Baker (2007) ως παλμικές, καθώς και 3 επιπλέον παλμικές καταγραφές από το σεισμό της Norcia στην Ιταλία το 2016.

Για κάθε μία από τις καταγραφές αυτές, δημιουργήθηκαν επτά τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα συμβατά με την αρχική καταγραφή. Για την εξαγωγή και την προσομοίωση του παλμού επιλέχθηκαν η μέθοδος των *Mimoglou et al.* (2014), η οποία βασίζεται στο μαθηματικό μοντέλο κυματιδίου που προτάθηκε από τους *Mavroeidis & Papageorgiou* (2003). Βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου που ακολουθήθηκε είναι η θεώρηση του δείκτη *δρώσας εδαφικής ταχύτητας* (*effective peak velocity*).

Στη συνέχεια εξετάστηκε η απόκριση μιας οκταώροφης τοιχωματικής κατασκευής από ωπλισμένο σκυρόδεμα μέσω μη-γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας. Πιο συγκεκριμένα, η προσομοίωση έγινε με το λογισμικό OpenSees και εξετάστηκε η μετακίνηση οροφής, το *interstorey drift* όλων των ορόφων, καθώς και η τέμνουσα βάσης. Συνολικά, προκύπτει ότι τα αποτελέσματα της απόκρισης της κατασκευής της πραγματικής καταγραφής βρίσκονται μέσα στο διάστημα εμπιστοσύνης των αποτελεσμάτων των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων. Τέλος, η δρώσα εδαφική ταχύτητα αποτελεί έναν ικανοποιητικό δείκτη για το εύρος και την ένταση του υψίσυχνου τμήματος του μη σταθμισμένου σήματος της καταγραφής, και παρουσιάζει μικρή διακύμανση στις τιμές για τον ίδιο παλμό.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
LABORATORY FOR EARTHQUAKE ENGINEERING  
POSTGRADUATE THESIS

**Behaviour of R.C. wall structures under artificial pulse-like seismic records**

Aikaterini D. Kostopoulou

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

Co-supervisor: Taflampas M. Ioannis, Dr. Civil Engineer, Research Associate  
NTUA

## Abstract

Near field pulse-like ground motions constitute a special category of seismic records, about which civil engineers are seriously interested in, as they have a significant impact on their projects. It is about seismic records, which appear to have an important pulse in velocity time history, because their characteristics are affected by both the rupture mechanism and directivity effects.

In the present thesis the evaluation of structure's top displacement and floor drifts convergence are examined, when subjected to motions with the same energy content. In this context, 14 records of the NGA (Next Generation Attenuation) database, characterized by Baker (2007) as pulse-like ground motions, as well as 3 pulse-like records from the 2016 earthquake of Norcia in Italy, were considered.

For each one of the aforementioned records, seven artificial accelerograms were calculated, compatible with the original record. The conduct and simulation of the pulses was achieved through the method of *Mimoglou et al.* (2014), which is based on the mathematical wavelet model suggested by *Mavroeidis & Papageorgiou* (2003). Basic characteristic of the method followed by the current thesis, is the effective peak velocity indicator.

Then, an eight-storey reinforced concrete building consisted mainly of walls was examined through non linear time history analyses. More specifically, a model was created via OpenSees and then, the top displacement, the floor drifts and the base shear force of the structure were evaluated. The results of the building's response for the original record appear to be within the confidence interval of the results of the artificial accelerograms. Finally, the effective peak velocity is a very good indicator for the amplitude and the intensity of the high-frequency part of the record's non-coherent signal, and appears to have small deviation for the same pulse.

# Περιεχόμενα

<b>1 Σεισμοί κοντινού πεδίου</b> .....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Ρήγματα.....	2
1.2.1 Γενικά .....	2
1.2.2 Γεωμετρία και χαρακτηριστικά ρήγματος.....	3
1.2.3 Κατηγορίες ρηγμάτων.....	5
1.3 Φαινόμενο κατευθυντικότητας .....	7
1.3.1 Έμπροσθεν κατευθυντικότητα.....	9
1.3.2 Όπισθεν κατευθυντικότητα .....	11
1.3.3 Ουδέτερη κατευθυντικότητα .....	11
1.4 Φαινόμενα μόνιμης μετατόπισης .....	12
1.5 Παράμετροι που χαρακτηρίζουν τις σεισμικές κινήσεις κοντινού πεδίου .....	14
1.5.1 Αριθμός σημαντικών παλμών.....	15
1.5.2 Περίοδος παλμών.....	17
1.5.3 Μέγιστη οριζόντια εδαφική ταχύτητα .....	20
1.6 Μαθηματική αναπαράσταση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου .....	22
1.6.1 Συνήθη αναλυτικά κύματα της Σεισμολογίας.....	23
1.7 Κατάταξη εδαφικών κινήσεων ως παλμικές ή μη παλμικές με τη μέθοδο του Baker.....	25
1.7.1 Γενικά .....	25
1.7.2 Απομόνωση του παλμού ταχύτητας .....	26
1.7.3 Σημαντικότητα αφαιρούμενου παλμού .....	28
1.7.4 Παλμοί που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία ταχυτήτων .....	29
1.7.5 Εδαφικές κινήσεις με $PGV < 30 \text{ cm/sec}$ .....	31
1.7.6 Εύρος προσανατολισμού παλμών.....	32
1.7.7 Περίοδος παλμού.....	34
<b>2 Κυματίδιο Mavroeidis &amp; Papageorgiou</b> .....	41
2.1 Γενικά.....	41
2.2 Κυματίδιο προσομοίωσης του παλμού.....	43
2.3 Προσαρμογή του μοντέλου στις καταγραφές της βάσης δεδομένων. 47	

2.4 Επίδραση του αναλυτικού μοντέλου στα ελαστικά φάσματα απόκρισης.....	52
<b>3 Προσδιορισμός του περιεχόμενου παλμού με χρήση του φάσματος συνέλιξης</b> .....	55
3.1 Γενικά.....	55
3.2 Προτεινόμενη μεθοδολογία.....	56
3.2.1 Μαθηματική έκφραση του παλμού ταχυτήτων .....	57
3.2.2 CAD και μέγιστο φασματικό εύρος.....	57
3.2.3 Προσδιορισμός των παραμέτρων παλμού .....	59
3.2.3.1 Περίοδος παλμού $T_p$ .....	59
3.2.3.2 Εύρος, διάρκεια, διαφορά φάσης, χρόνος έναρξης του παλμού .....	63
<b>4 Διαδικασία που ακολουθήθηκε</b> .....	67
4.1 Γενικά.....	67
4.2 Σταθμισμένο και αστάθμητο σήμα εδαφικής καταγραφής .....	67
4.3 Εξαγωγή τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων.....	68
<b>5 Περιγραφή εξεταζόμενου φορέα</b> .....	73
5.1 Γενικά.....	73
5.2 Χαρακτηριστικά εξεταζόμενου φορέα .....	75
5.3 Φορτία μελέτης.....	76
5.4 Κανονικότητα καθ' ύψος .....	76
5.5 Έδαφος θεμελίωσης .....	78
5.6 Σεισμικότητα .....	79
5.7 Δεσπόζουσα ιδιομορφή.....	81
5.8 Προσομοίωση κατασκευής.....	81
<b>6 Προσομοίωση φορέα</b> .....	83
6.1 Λογισμικό OpenSees .....	83
6.2 Ελαστική και ανελαστική συμπεριφορά .....	84
6.3 Προσομοίωση φορέα .....	86
6.3.1 Γενικά .....	86
6.3.2 Κόμβοι προσομοιώματος .....	87
6.3.3 Μέλη προσομοιώματος .....	88
6.3.3.1 Τοιχώματα/υποστυλώματα .....	88

6.3.3.2 Δοκοί.....	89
6.3.4 Διατομές.....	94
6.3.5 Δεσμεύσεις κόμβων.....	95
6.3.6 Συνδυασμός δράσεων.....	98
6.3.7 Υπολογισμός φορτίων.....	99
6.3.8 Χρησιμοποιούμενα Υλικά.....	103
6.3.8.1 Σκυρόδεμα.....	103
6.3.8.2 Χάλυβας.....	107
6.4 Προσομοίωση φορέα με άλλο λογισμικό.....	109
6.4.1 Γενικά.....	109
6.4.2 Προσομοίωμα λογισμικού Sofistik.....	110
6.4.3 Προσομοίωμα λογισμικού Seismobuild.....	110
<b>7 Αναλύσεις.....</b>	<b>113</b>
7.1 Στατική ανάλυση.....	113
7.2 Ανάλυση Pushover.....	113
7.3 Ανάλυση Χρονοϊστορίας.....	117
7.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων.....	119
<b>8 Αποτελέσματα αναλύσεων.....</b>	<b>121</b>
8.1 Γενικά.....	121
8.2 Μετακίνηση οροφής.....	121
8.3 Τέμνουσα βάσης.....	124
8.4 Drift ορόφων.....	126
<b>9 Συμπεράσματα.....</b>	<b>137</b>
<b>10 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....</b>	<b>139</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>141</b>
<b>Παράρτημα Α.....</b>	<b>145</b>
<b>Παράρτημα Β.....</b>	<b>163</b>





# Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας (Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ), 2000).....	3
1.2	Γεωμετρικές παράμετροι ενός ρήγματος (NGA Database Documentation File).....	5
1.3	Κατηγορίες ρηγμάτων (Guidebook to the Geology of Travis Country, M.A. Jordan 1977).....	6
1.4	Φαινόμενο κατευθυντικότητας (Kramer, 1996).....	7
1.5	Έμπροσθεν, όπισθεν και ουδέτερη κατευθυντικότητα (Shuang – Li-li, 2007).....	8
1.6	Επίδραση των φαινομένων κατευθυντικότητας στις καταγραφείσες χρονοϊστορίες μετακινήσεων, στο σεισμό Loma Prieta 1989, για τις διευθύνσεις κάθετα και παράλληλα στο ρήγμα (EERI, 1995).....	9
1.7	Παράμετροι που έχουν σχέση με τις συνθήκες του φαινομένου της έμπροσθεν κατευθυντικότητας (Somerville et al., 1997a)	10
1.8	Επίπτωση των παραμέτρων της διάρρηξης στη φασματική μεγέθυνση σε σχέση με τις συνήθειες καταγραφές (Somerville et al., 1997a).....	10
1.9	Καταγραφές έμπροσθεν και όπισθεν κατευθυντικότητας (Somerville et al., 1997a).....	11
1.10	Διευθύνσεις εκδήλωσης των φαινομένων κατευθυντικότητας και μόνιμης μετακίνησης για την περίπτωση ρήγματος οριζόντιας και μη οριζόντιας διάρρηξης αντίστοιχα (Steward et al, 2001).....	13
1.11	Σχηματική απεικόνιση της χρονοϊστορίας μετακινήσεων για ρήγμα οριζόντιας και μη οριζόντιας διάρρηξης, στις διευθύνσεις κάθετα και παράλληλα στο ίχνος του ρήγματος. Απεικονίζεται η συμβολή των φαινομένων μόνιμης μετατόπισης και κατευθυντικότητας τόσο μαζί, όσο και ξεχωριστά.....	13
1.12	Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των συνθηκών του φαινομένου της κατευθυντικότητας (Somerville et al. 1997a, τροποποίηση από Steward et al, 2001).....	15
1.13	Απλοποιημένοι παλμοί που χρησιμοποιήθηκαν από τους ερευνητές (Steward et al, 2001).....	16
1.14	Παράμετροι ημιτονοειδών παλμών στις διευθύνσεις κάθετα και παράλληλα στο ρήγμα (Rodriguez-Marek, 2000).....	18
1.15	Σύγκριση του μοντέλου Rodriguez-Marek(2000) με αυτά των Somerville(1998) για $T_v$ , και των Alavi and Krawinkler (2000) για $T_{v-p}$ (Rodriguez-Marek, 2000).....	19

1.16	Μοντέλο των Rodriguez-Marek(2000) για την $T_p$ , για έδαφος και για βράχο. Οι έντονες γραμμές αντιπροσωπεύουν τη μέση τιμή, ενώ οι πιο λεπτές τη μέση τιμή συν μία τυπική απόκλιση (Rodriguez-Marek, 2000).....	20
1.17	Σύγκριση των τριών μοντέλων υπολογισμού της μέγιστης οριζόντιας ταχύτητας (Rodriguez-Marek, 2000).....	22
1.18	Παραδείγματα παλμικών και μη παλμικών εδαφικών κινήσεων για κανονικά ρήγματα (Baker, 2007).....	26
1.19	Περιγραφή της διαδικασίας αφαίρεσης παλμού. (Baker, 2007)	27
1.20	Κατηγοριοποίηση ως παλμικών ή μη παλμικών εδαφικών κινήσεων (Baker, 2007).....	29
1.21	Παλμός στην αρχή της χρονοϊστορίας. (a), (b) χρονοϊστορία ταχύτητας και παλμού, (c) CSV (Baker, 2007).....	30
1.22	Εκτίμηση χρόνου άφιξης παλμού. (Baker, 2007).....	31
1.23	Εδαφική κίνηση με μικρή PGV που εμφανίζεται ως παλμική και αποκλείεται (Baker, 2007).....	32
1.24	Τιμές του παλμικού δείκτη συναρτήσει του προσανατολισμού για την καταγραφή EC Country Center από το σεισμό στο Imperial Valley του 1979. Οι σκιασμένες επιφάνειες υποδεικνύουν τις διευθύνσεις στις οποίες παρατηρήθηκε ένας σημαντικός παλμός (Baker, 2007).....	34
1.25	Κυματίδιο Daubechies και ημιτονικό κύμα με περίοδο ίση με τη μέγιστη της κυματομορφής από το φάσμα Fourier (Baker, 2007).....	35
1.26	Περίοδος παλμού ( $T_p$ ) από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος της ταχύτητας σε σχέση με την περίοδο παλμού ( $T_p$ ) από την ψευδο-περίοδο του κυματιδίου για τις 91 εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου (Baker, 2007).....	36
1.27	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 (Baker, 2007).....	37
2.1	Σύγκριση του μοντέλου Gabor με την πρόταση των Mavroeidis and Papageorgiou (Mavroeidis and Papageorgiou, 2003).....	46
2.2	Χρονοϊστορία επιταχύνσεων και φάσμα ταχυτήτων προσομοίωσης (Loma Prieta 1989 Station STG).....	51
2.3	Προσομοίωση παλμού (Loma Prieta 1989 Station STG).....	51
2.4	Εφαρμογή του μοντέλου στην καταγραφή του σταθμού Yarimca (YPT, Izmit, Turkey (1999)) και στην καταγραφή του	

σταθμού Kobe (KOB, Kobe, Japan (1995)).....	51
2.5 Μεταβολή του κανονικοποιημένου ως προς $\omega$ και $A$ μετασχηματισμού Fourier του παλμού συναρτήσει της κανονικοποιημένης συχνότητας $\tilde{\omega}$ (Mavroeidis and Papageorgiou, 2003).....	52
2.6 Μεταβολή του κανονικοποιημένου φάσματος απόκρισης γραμμικού μονοβάθμιου συστήματος για χαρακτηριστικές τιμές των $\gamma$ και $\nu$ (Mavroeidis and Papageorgiou, 2003).....	53
2.7 Φάσμα Fourier παλμού και φάσματα μετακινήσεων και ταχυτήτων με παράμετρο $\gamma=1$ (Mavroeidis and Papageorgiou, 2003).....	54
3.1 Σχέση μεταξύ μέγιστης φασματικής μετακίνησης $S_{d,max}$ και της απόλυτης αθροιστικής μετακίνησης (CAD) για το κυματίδιο M&P, για διάφορες τιμές $\nu$ και $\gamma$ . (a) μηδενική απόσβεση (b) 5% απόσβεση (P. Mimoglou, I.N. Psycharis and I.M. Taflampas, 2014).....	59
3.2 Καταγραφή #38 από τη λίστα του Baker. (a) Φάσμα ψευδοταχυτήτων για 5% απόσβεση (b) σύγκριση του κυματιδίου M&P με την μέθοδο των P. Mimoglou, I.N. Psycharis and I.M. Taflampas (διακεκομμένη γραμμή) με την χρονοϊστορία ταχυτήτων της καταγραφής (P. Mimoglou, I.N. Psycharis and I.M. Taflampas, 2014).....	60
3.3 Καταγραφή #20 από τη λίστα του Baker. (a) Φάσμα μετακινήσεων για 5% απόσβεση (b) Φάσμα ψευδοταχυτήτων για 5% απόσβεση (P. Mimoglou, I.N. Psycharis and I.M. Taflampas, 2014).....	61
3.4 Καταγραφές #20 και #38. Επάνω, υπολογισμός της περιόδου του παλμού $T_p$ από το φάσμα $S_{d,5} \times S_{v,5}$ (συγκριτικά απεικονίζονται επίσης τα φάσματα μηδενικής απόσβεσης). Κάτω, σύγκριση των χρονοϊστοριών ταχυτήτων των εξαγόμενων M&P κυματιδίων (διακεκομμένη γραμμή) με της πραγματικής καταγραφής.....	63
4.1 Φάσμα ταχυτήτων και περιβάλλουσα φάσματος Fourier.....	69
4.2 Συνάρτηση σχήματος που χρησιμοποιήθηκε.....	70
4.3 Προτεινόμενες συναρτήσεις σχήματος από τη βιβλιογραφία....	70
5.1 Τυπική κάτοψη του υπό μελέτη κτηρίου.....	74
5.2 Τυπική τομή του υπό μελέτη κτηρίου.....	74
5.3 Κριτήρια για την κανονικότητα κτηρίων με εσοχές. (EN1998.01.01).....	78
5.4 Ελαστικό και ανελαστικό φάσμα της κατασκευής (EN1998.01.01).....	80

5.5	Καμπύλη ικανότητας του φορέα.....	81
6.1	Δευτερεύοντες κόμβοι στην παρειά των τοιχωμάτων για τη δημιουργία μελών δοκού.....	90
6.2	Θεωρητικό άνοιγμα ( $l_{eff}$ ) για διαφορετικές συνθήκες στήριξης (EN1992.01.01).....	91
6.3	Ορισμός του $l_0$ για τον υπολογισμό του συνεργαζόμενου πλάτους πλακοδοκού (EN1992.01.01).....	92
6.4	Παράμετροι του συνεργαζόμενου πλάτους πλακοδοκού (EN1992.01.01).....	92
6.5	Συνεργαζόμενο πλάτος πέλματος $b_{eff}$ για δοκούς που εδράζονται σε υποστυλώματα (EN1998.01.01).....	93
6.6	Βασικά μέλη για την προσομοίωση της διαφραγματικής λειτουργίας.....	96
6.7	Μέλη προσομοίωσης διαφραγμάτων οροφής Pilotis.....	97
6.8	Μέλη προσομοίωσης διαφραγμάτων οροφής τυπικού ορόφου...	97
6.9	Κατανομή του φορτίου τετραέρειστων πλακών για τον υπολογισμό των αντιδράσεων των στηρίξεων (Ελληνικός κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος, 2000).....	100
6.10	Επιφάνειες κατανομής φορτίων οροφής Pilotis.....	101
6.11	Επιφάνειες κατανομής φορτίων οροφής τυπικού ορόφου.....	102
6.12	Υλικό Concete01. (OpenSees wiki).....	104
6.13	Νόμος σκυροδέματος σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 (EN1992.01.01).....	104
6.14	Υλικό Steel01 (OpenSees wiki).....	107
6.15	Διάγραμμα τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων τυπικού κάλυβα οπλισμού κατεργασμένου εν θερμώ (δίνονται οι απόλυτες τιμές της εφελκυστικής τάσης και της ανηγμένης παραμόρφωσης) σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 (EN1992.01.01).....	108
6.16	Προσομοίωμα Προσομοίωμα κατασκευής με το λογισμικό Sofistik.....	110
6.17	Προσομοίωμα Προσομοίωμα κατασκευής με το λογισμικό Sofistik.....	110
6.18	Προσομοίωμα κατασκευής με το λογισμικό Seismobuild.....	110
6.19	Προσομοίωμα οροφής Pilotis με το λογισμικό Seismobuild.....	110
6.20	Προσομοίωμα οροφής τυπικού ορόφου με το λογισμικό Seismobuild.....	110
7.1	Τυπική καμπύλη ικανότητας συνήθους κατασκευής.....	116
8.1	Μετακίνηση οροφής σεισμών 2, 3, 18, 19, 25 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	122
8.2	Μετακίνηση οροφής σεισμών 26, 27, 32, 33, 38 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	122

8.3	Μετακίνηση οροφής σεισμών 42, 43, 44, 45 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	123
8.4	Μετακίνηση οροφής σεισμών NRC, NRC1, T1213 στη Norcia, Ιταλία, 2016.....	123
8.5	Σύγκριση μέσης τιμής μετακίνησης οροφής τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και μετακίνησης οροφής πραγματικής καταγραφής.....	123
8.6	Τέμνουσα βάσης σεισμών 2, 3, 18, 19, 25 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	124
8.7	Τέμνουσα βάσης σεισμών 26, 27, 32, 33, 38 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	124
8.8	Τέμνουσα βάσης σεισμών 42, 43, 44, 45 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	125
8.9	Τέμνουσα βάσης σεισμών NRC, NRC1, T1213 στη Norcia, Ιταλία, 2016.....	125
8.10	Σύγκριση μέσης τιμής τέμνουσας βάσης τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής.....	125
8.11	Drift ορόφων σεισμού 2 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	126
8.12	Drift ορόφων σεισμού 3 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	126
8.13	Drift ορόφων σεισμού 18 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	126
8.14	Drift ορόφων σεισμού 19 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	126
8.15	Drift ορόφων σεισμού 25 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	127
8.16	Drift ορόφων σεισμού 26 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	127
8.17	Drift ορόφων σεισμού 27 σύμφωνα με τη λίστα του Baker....	127
8.18	Drift ορόφων σεισμού 32 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	127
8.19	Drift ορόφων σεισμού 33 σύμφωνα με τη λίστα του Baker....	128
8.20	Drift ορόφων σεισμού 38 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	128
8.21	Drift ορόφων σεισμού 42 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	128
8.22	Drift ορόφων σεισμού 43 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	128
8.23	Drift ορόφων σεισμού 44 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	129
8.24	Drift ορόφων σεισμού 45 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.....	129
8.25	Drift ορόφων σεισμού NRC στη Norcia, Ιταλία, 2016.....	129
8.26	Drift ορόφων σεισμού NRC1 στη Norcia, Ιταλία, 2016.....	129
8.27	Drift ορόφων σεισμού T1213 στη Norcia, Ιταλία, 2016.....	130
8.28	Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 2 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).....	130
8.29	Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 3 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).....	131
8.30	Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 18 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).....	131

8.31	Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 19 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).....	131
8.32	Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 25 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).....	132
8.33	Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 26 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).....	132
8.34	Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 27 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).....	132
8.35	Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 32 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).....	133
8.36	Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 33 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).....	133
8.37	Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 38 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).....	133
8.38	Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 42 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).....	134
8.39	Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 43 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).....	134
8.40	Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 44 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).....	134
8.41	Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 45 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).....	135
8.42	Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού NRC σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).....	135
8.43	Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού NRC1 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).....	135
8.44	Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού T1213 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).....	136
A1	Κάτοψη θεμελίωσης.....	147

A2	Ενδεικτική λεπτομέρεια πεδίου τοιχείου υπογείου.....	148
A3	Ενδεικτική λεπτομέρεια πεδίου.....	148
A4	Κάτοψη οροφής υπογείου.....	149
A5	Κάτοψη οροφής Pilotis.....	150
A6	Κάτοψη οροφής Α' ορόφου.....	151
A7	Κάτοψη οροφής Β', Γ' ορόφου.....	152
A8	Κάτοψη οροφής Δ' ορόφου.....	153
A9	Κάτοψη οροφής Ε' ορόφου.....	154
A10	Κάτοψη οροφής ΣΤ', Ζ' ορόφου.....	155
A11	Κάτοψη δώματος .....	156
A12	Λεπτομέρεια Α.....	156
A13	Λεπτομέρεια όπλισης μεσαίου και ακραίου κόμβου.....	157
A14	Οπλισμοί υποστυλωμάτων υπογείου και Pilotis.....	158
A15	Οπλισμοί υποστυλωμάτων υπογείου και Pilotis.....	158
A16	Οπλισμοί υποστυλωμάτων υπογείου και Pilotis.....	159
A17	Οπλισμοί υποστυλωμάτων υπογείου και Pilotis.....	159
A18	Οπλισμοί υποστυλωμάτων τυπικού ορόφου.....	160
A19	Οπλισμοί υποστυλωμάτων τυπικού ορόφου.....	160
A20	Οπλισμοί υποστυλωμάτων τυπικού ορόφου.....	161
A21	Οπλισμοί υποστυλωμάτων τυπικού ορόφου.....	161
B1	Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 2 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.....	165
B2	Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 3 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.....	166
B3	Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 18 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.....	168
B4	Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 19 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.....	169
B5	Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 25 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.....	170
B6	Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 26 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών	





Norcia, Ιταλία το 2016, και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των  
τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή..... 187



# Κατάλογος Πινάκων

1.1	Συνήθη κύματα που χρησιμοποιούνται στη Σεισμολογία (Μανροειδής and Παπαγεωργίου, 2003).....	24
1.2	Πίνακας της βάσης δεδομένων NGA, με τις καταγραφές που χαρακτηρίζονται ως παλμικές σύμφωνα με την μέθοδο του Baker (Baker, 2007).....	37
2.1	Καταγραφές κοντινού πεδίου με διακριτό παλμό ταχύτητας (Μανροειδής & Παπαγεωργίου, 2003).....	42
2.2	Παράμετροι για την εφαρμογή του μοντέλου στις καταγραφές κοντινού πεδίου (Μανροειδής and Παπαγεωργίου, 2003).....	48
5.1	Τιμές $agR/g$ (ΕΛΟΤ EN1998-1).....	79
5.2	Κατηγορίες οπουδιαιότητας για κτήρια (ΕΛΟΤ EN1998-1).....	79
5.3	Τιμές χαρακτηριστικών περιόδων και συντελεστή εδάφους για την οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης. (ΕΛΟΤ EN1998-1).....	80
6.1	Συνιστώμενες τιμές των συντελεστών $\psi$ για τα κτήρια (Παράρτημα Α, EN1990).....	98
6.2	Χαρακτηριστικά αντοχής και παραμορφώσεις σκυροδέματος (EN1992.01.01).....	105



# Κεφάλαιο 1

## Σεισμοί κοντινού πεδίου

### 1.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα φαινόμενα τα οποία χαρακτηρίζουν μία εδαφική κίνηση ως παλμική κίνηση κοντινού πεδίου, καθώς και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά της. Αρχικά, αναλύονται οι διαφορετικές μορφές μηχανισμών διάρρηξης, μέσω των οποίων γίνεται η γένεση των ρηγμάτων και στη συνέχεια περιγράφονται τα διάφορα φαινόμενα που προκύπτουν από τη μετάδοση τους.

Οι σεισμικές κινήσεις σε μία περιοχή η οποία βρίσκεται κοντά στο ρήγμα, διαφέρουν σημαντικά αυτές που βρίσκονται μακριά από τη σεισμική πηγή<sup>1</sup>. Αυτές οι περιοχές αποτελούν το κοντινό πεδίο. Η ζώνη κοντινού πεδίου ορίζεται τυπικά σε μία ακτίνα 20-60 χιλιομέτρων από τη σειсмоγενή διάρρηξη. Μέσα σε αυτή τη ζώνη η εδαφική κίνηση επηρεάζεται σημαντικά από το μηχανισμό διάρρηξης, από τη διεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης σε σχέση με τη θέση της καταγραφής και από τις πιθανές παραμένουσες εδαφικές μετακινήσεις που προκαλούνται από την ολίσθηση του ρήγματος. Οι παράμετροι που αναφέρθηκαν προηγουμένως επιδρούν στα φαινόμενα κατευθυντικότητας της διάρρηξης και στο φαινόμενο της μόνιμης μετατόπισης (fling step). Συνεπώς, για την εκτίμηση της εδαφικής κίνησης σε περιοχές που βρίσκονται κοντά σε κάποιο ενεργό ρήγμα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη τα φαινόμενα κοντινού πεδίου.

Τα φαινόμενα αυτά, έχουν απασχολήσει σοβαρά όχι μόνο τους σεισμολόγους αλλά και τους πολιτικούς μηχανικούς, αφού αρκετοί σεισμοί

---

<sup>1</sup> Stewart, J.P., Chiou, S.J., Bray, J.D., Graves, R.W., Somerville, P.G., Abrahamson, N.A.. Ground motion evaluation procedures for performance based design, PEER Report-2001/09, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, 2001, p.63.

παγκοσμίως εμφανίζουν αυτά τα χαρακτηριστικά. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα είναι οι σεισμοί του Northridge (1994), του Kobe (1995), του Chi Chi (1999), αλλά και στον ελλαδικό χώρο οι σεισμοί του Αιγίου (1995), της Πάρνηθας (1999) και πιο πρόσφατα της Κεφαλονιάς (2014). Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των ρηγμάτων και των φαινομένων που αναπτύσσονται μέσα σε αυτή τη ζώνη.

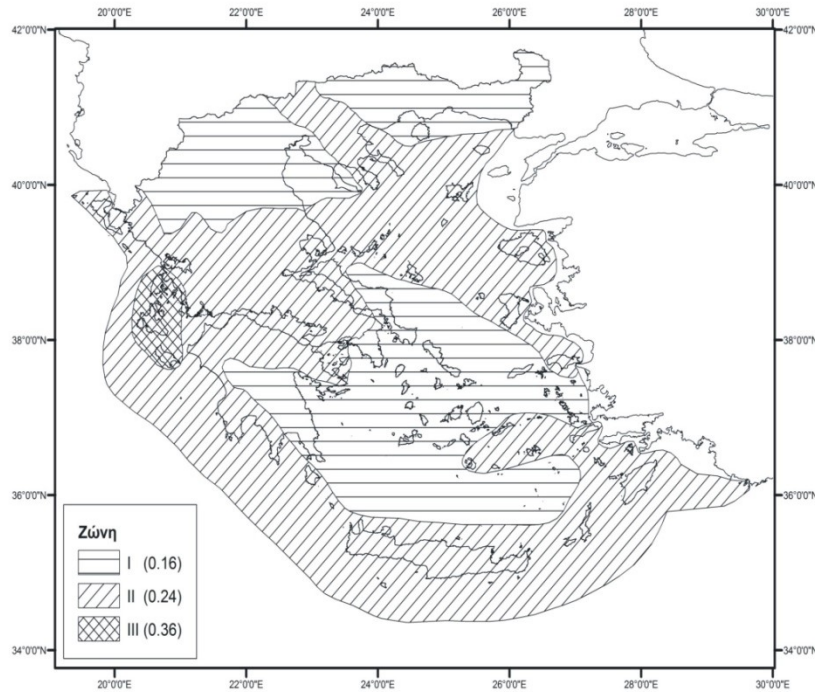
## 1.2 Ρήγματα

### 1.2.1 Γενικά

Ως ρήγματα χαρακτηρίζονται περιοχές του φλοιού της Γης που έχουν ρηγματωθεί στο παρελθόν κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων και στις οποίες αναμένεται στο μέλλον να εμφανισθούν και πάλι σεισμοί. Αποτελούν ασυνέχειες του φλοιού της Γης συνυφασμένες με την εμφάνιση σεισμικών γεγονότων.

Η σεισμικότητα του Ελληνικού χώρου καθορίζεται από τη σχετική κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών της περιοχής, που είναι από τα πλέον ενεργά τμήματα της ζώνης ορογένεσης και εκτείνεται από τις Άλπεις μέχρι τα Ιμαλάια. Ο Ελληνικός χώρος βρίσκεται επάνω στην Αιγαιακή πλάκα, που ορίζεται από τη δυτική προέκταση του ρήγματος της Ανατολίας και την Ελληνική τάφρο, η οποία σχηματίζει τόξο εκτεινόμενο δυτικά των Ιονίων νήσων και νότια της Κρήτης και της Ρόδου. Οι σχετικές κινήσεις στην περιοχή είναι η δυτική μετακίνηση της πλάκας της Ανατολίας κατά 25 χιλιοστά σε ετήσια βάση, και η νοτιοδυτική ετήσια μετακίνηση της Αιγαιακής πλάκας στην περιοχή της Ελληνικής τάφρου κατά 50 χιλιοστά (βύθιση της Αφροαραβικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική). Αυτές οι σχετικές μετακινήσεις προκαλούν διάταση στην Αιγαιακή πλάκα με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση ρηγμάτων, που σχετίζονται με την υψηλή σεισμικότητα περιοχών, όπως τα νησιά του Ιονίου και ο Κορινθιακός

κόλπος<sup>2</sup>. Στο χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας που ακολουθεί απεικονίζεται η υψηλή σεισμικότητα των περιοχών αυτών. Να σημειωθεί, ότι ο χάρτης αυτός έχει αναθεωρηθεί ανά διαστήματα, λόγω σημαντικών σεισμικών γεγονότων που έχουν συμβεί.



Σχήμα 1.1: Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας (Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, 2000).

### 1.2.2 Γεωμετρία και χαρακτηριστικά ρήγματος

Η επιφάνεια της ασυνέχειας που καλείται ρήγμα, αν και συνήθως στην πραγματικότητα είναι μη επίπεδη σε μεγάλη κλίμακα, προσομοιάζεται με ένα επίπεδο, το οποίο ονομάζεται επίπεδο του ρήγματος. Σε συνέχεια των παραπάνω, στον εστιακό χώρο, η τομή του επιπέδου του ρήγματος με το οριζόντιο, λέγεται ίχνος του ρήγματος (fault trace) και η θετική του φορά είναι προς τα δεξιά, με τη θεώρηση ότι κάποιος βρίσκεται στο άνω μέρος του ρήγματος.

Το επίπεδο του ρήγματος χωρίζει τον φλοιό της περιοχής στο υπερκείμενο του επιπέδου άνω τμήμα του ρήγματος (hanging wall), και

<sup>2</sup> Ιωάννης Ταφλαμπάς, Σημειώσεις από το μάθημα Ειδικά Θέματα Τεχνικής Σεισμολογίας, Αθήνα 2017.

στο κάτω τμήμα (footwall). Το άνω τμήμα του ρήγματος είναι αυτό που επηρεάζεται κατά κύριο λόγο κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος και υφίσταται την εντονότερη εδαφική κίνηση. Χαρακτηριστικά σημεία στην περιοχή του ρήγματος είναι η εστία ή υπόκεντρο (focus) και το επίκεντρο (epicenter). Ως εστία, ορίζεται το σημείο μέσα στον φλοιό από το οποίο αρχίζει η διάρρηξη στην περιοχή του ρήγματος, ενώ το επίκεντρο αποτελεί την προβολή της εστίας στο οριζόντιο επίπεδο. Ειδικότερα, το επίκεντρο ορίζεται ως μικροσεισμικό, όταν προκύπτει από τον προσδιορισμό της εστίας μέσω ενόργανων σεισμολογικών μετρήσεων, ενώ ως μακροσεισμικό όταν προκύπτει από μακροσεισμικές παρατηρήσεις, όπως για παράδειγμα το κέντρο της περιοχής στην οποία παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες καταστροφές. Η επιφάνεια που αντιστοιχεί στο άνω μέρος του ρήγματος ορίζεται ως το τμήμα που βρίσκεται στην πλευρά του ίχνους του ρήγματος προς την οποία εντοπίζεται το επίκεντρο. Η απέναντι πλευρά αποτελεί την περιοχή που αντιστοιχεί στο κάτω τμήμα του ρήγματος.

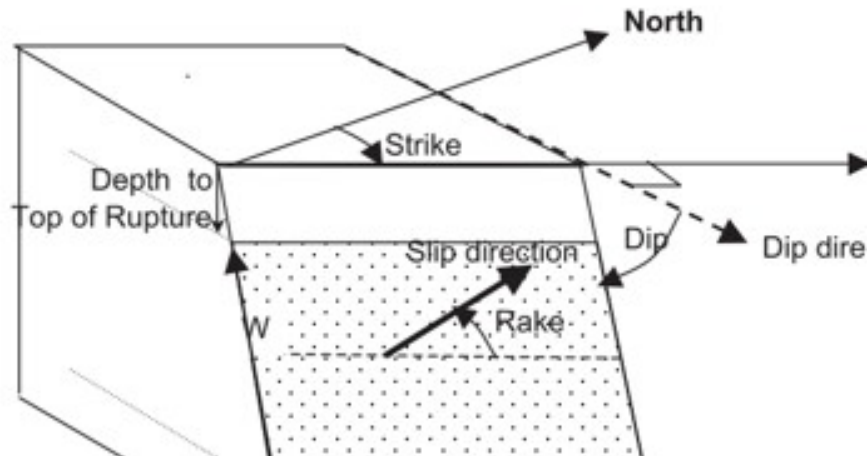
Η κατακόρυφη απόσταση της εστίας από το επίκεντρο ονομάζεται εστιακό βάθος. Λόγω της τεκτονικής δομής του ελλαδικού χώρου, τα μεγάλα ρήγματα βρίσκονται στον υποθαλάσσιο χώρο, ενώ άλλα μικρότερα άγνωστα ή νέα, βρίσκονται στις χερσαίες περιοχές. Με τη δεύτερη κατηγορία ρηγμάτων σχετίζονται οι επιφανειακοί σεισμοί, που είναι και οι πλέον καταστροφικοί, με εστιακό βάθος μικρότερο από 35 χιλιόμετρα και τις περισσότερες φορές σημαντικά μικρότερο, προσεγγιστικά της τάξης των 5-10 χιλιομέτρων.

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) και λαμβάνει τιμές από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$ . Η γωνία  $\theta$  ανάμεσα στο οριζόντιο επίπεδο και το επίπεδο του ρήγματος είναι η «γωνία βύθισης» ή κλίση (dip angle), και είναι πάντα μικρότερη από  $90^\circ$ .

Για την αναγνώριση του μηχανισμού διάρρηξης χρησιμοποιείται γωνία, η οποία μετράται πάνω στο επίπεδο του ρήγματος και σχηματίζεται



μετρώντας αντιωρολογιακά από τη γωνία διεύθυνσης μέχρι τη διεύθυνση μέσης ολίσθησης της επιφάνειας διάρρηξης, λαμβάνοντας τιμές μεταξύ  $-180^\circ$  και  $180^\circ$ . Οι διαστάσεις του ρήγματος μετρώνται επί της επιφάνειας διάρρηξης, και είναι γνωστές ως μήκος  $L$  και πλάτος  $W$ . Τα παραπάνω χαρακτηριστικά φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



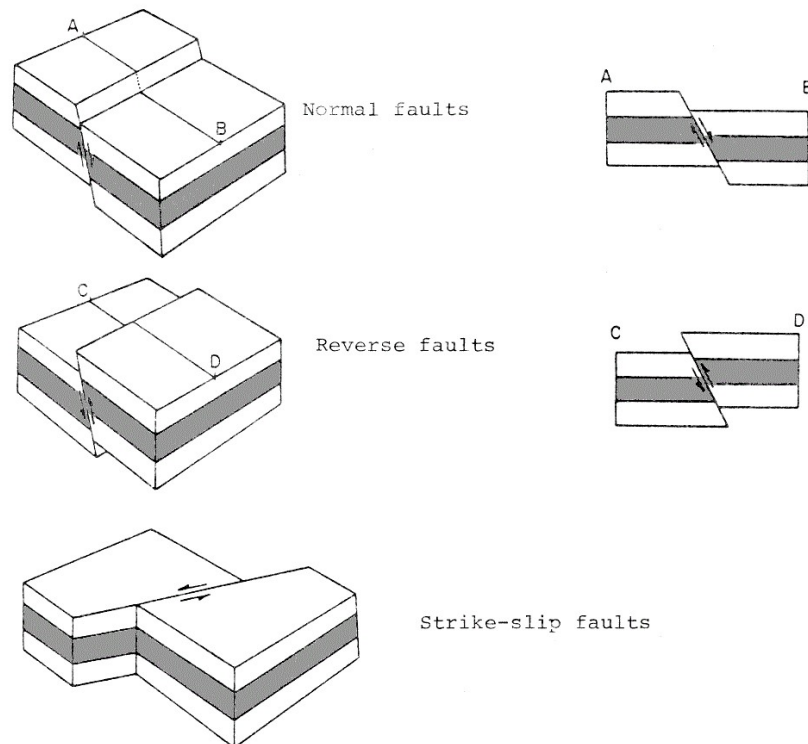
Σχήμα 1.2: Γεωμετρικές παράμετροι ενός ρήγματος (NGA Database Documentation File).

### 1.2.3 Κατηγορίες ρηγμάτων

Τα ρήγματα διακρίνονται ανάλογα με τη διεύθυνση και τη φορά της σχετικής κίνησης των τεμαχών κατά την διάρρηξη σε Οριζόντιας ολίσθησης (strike-slip fault) και σε Κεκλιμένης ολίσθησης ή Κατακόρυφης βύθισης (dip-slip faults). Η διάκριση αυτή γίνεται με βάση την ολίσθηση του ρήγματος, η οποία χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα πάνω στο επίπεδό του, το οποίο δείχνει την σχετική μετακίνηση του άνω σε σχέση με το κάτω τμήμα του.

Στα πρώτα παρατηρείται οριζόντια μετατόπιση των τεμαχών επί της ρηξιγενούς επιφάνειας με συμπιεστικές κυρίως τάσεις. Διακρίνονται σε Δεξιόστροφα (Dextral strike-slip faults) και Αριστερόστροφα (Sinistral strike-slip faults) ανάλογα με τη φορά με την οποία ολισθαίνουν τα επιμέρους τεμάχια.

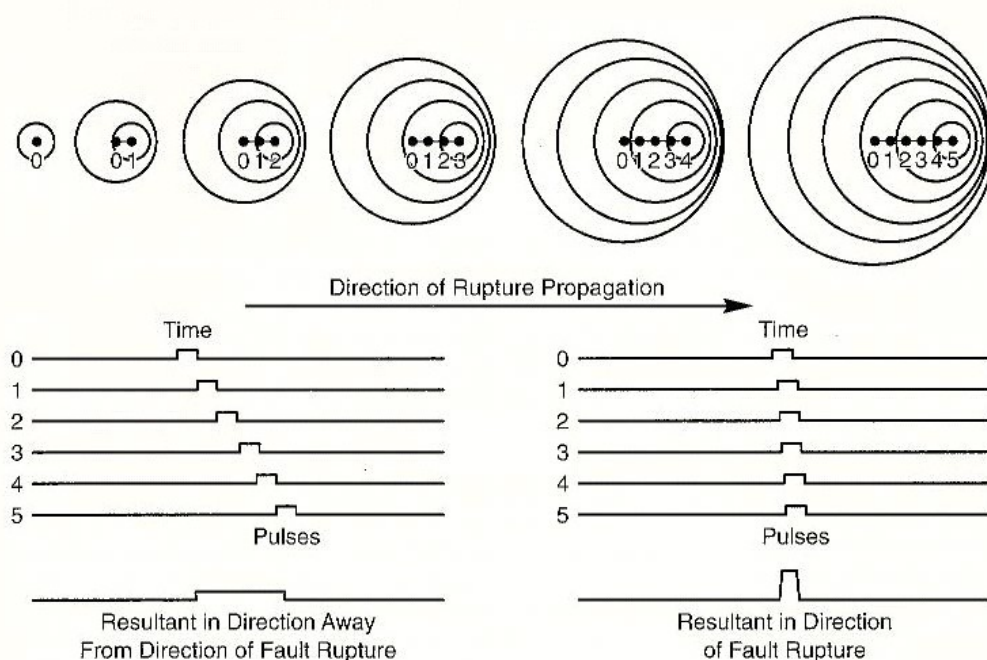
Τα ρήγματα Κατακόρυφης βύθισης χαρακτηρίζονται από την κίνηση του άνω τεμάχους ως Κανονικά ή Ανάστροφα. Στα Κανονικά (normal faults) το υπερκείμενο τμήμα κινείται προς τα κάτω, δηλαδή τα δύο τεμάχη απομακρύνονται το ένα από το άλλο (αποτέλεσμα εφελκυστικών δυνάμεων). Αντίθετα στα Ανάστροφα (reverse faults), το άνω τεμάχος κινείται προς τα πάνω, επομένως τα δύο τεμάχη πλησιάζουν το ένα στο άλλο και ως αποτέλεσμα, αναπτύσσονται θλιπτικές δυνάμεις. Στη βιβλιογραφία γίνεται διαχωρισμός αυτού του τύπου ρηγμάτων, ανάλογα με την γωνία κλίσης του ρήγματος. Έτσι ανάστροφα θεωρούνται όσα έχουν κλίση μεγαλύτερη των  $45^\circ$ , ενώ αν η κλίση είναι μικρότερη των  $45^\circ$  χαρακτηρίζονται ως Εφιππεύσεις (thrust faults).



Σχήμα 1.3: Κατηγορίες ρηγμάτων (Guidebook to the Geology of Travis Country, M.A. Jordan 1977).

### 1.3 Φαινόμενο κατευθυντικότητας

Προκειμένου να γίνει κατανοητό το φαινόμενο της κατευθυντικότητας, πρέπει να γίνει αναφορά στο μηχανισμό με τον οποίο γεννάται ένα σεισμικό γεγονός. Κάθε σεισμικό γεγονός αποτελείται από περισσότερα επιμέρους γεγονότα, τα οποία έχουν άμεση σχέση με τα κλείθρα του ρήγματος. Σε κάθε κλείθρο σχηματίζεται ένας παλμός ταχύτητας με διάρκεια ίση με το χρόνο ανόδου του κλείθρου και εύρος την ταχύτητα ολίσθησης με μέση τιμή περί το  $1.5\text{m/sec}^3$ . Το παραπάνω φαινόμενο, παριστάνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 1.4: Φαινόμενο κατευθυντικότητας (Kramer, 1996).

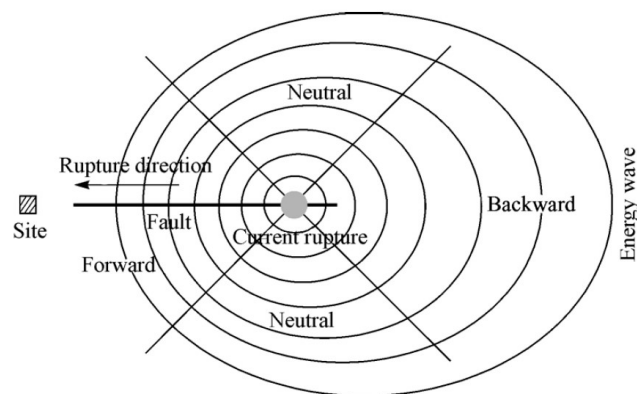
Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας παρατηρείται σε όλα τα είδη ρηγμάτων. Τόσο στα κανονικά όσο και στα οριζόντια και στα ανάστροφα, εμφανίζονται τέτοιου είδους φαινόμενα. Ανάλογα όμως με το είδος του ρήγματος τα χαρακτηριστικά που εμφανίζονται έχουν κάποιες διαφορές. Στην περίπτωση των κανονικών ή ανάστροφων ρηγμάτων, καταγράφεται μία

<sup>3</sup> Stewart, J.P., Chiou, S.J., Bray, J.D., Graves, R.W., Somerville, P.G., Abrahamson, N.A., *op. cit.*, p.71.

εδαφική κίνηση που είναι αποτέλεσμα της σύνθεσης του παλμού κατευθυντικότητας και της ολίσθησης του ρήγματος, κάθετα στη διεύθυνση του ρήγματος. Στα οριζόντια ρήγματα, λόγω πόλωσης, η εδαφική κίνηση κάθετα στο ίχνος του ρήγματος εμφανίζει ισχυρούς παλμούς κατευθυντικότητας. Όμως, στην διεύθυνση που είναι παράλληλα προς το ρήγμα παρατηρείται μια παραμένουσα μετακίνηση που οφείλεται στην ολίσθηση του ρήγματος.

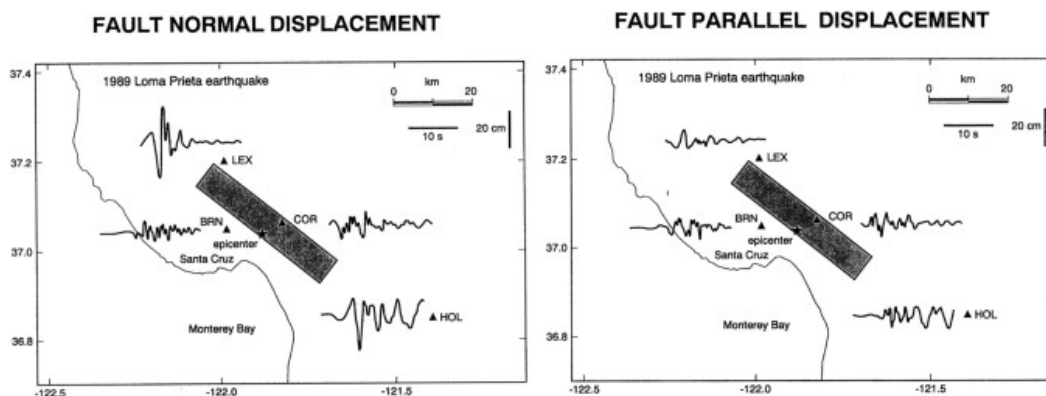
Συνεπώς, μία γενικότερη παρατήρηση είναι ότι το φαινόμενο της κατευθυντικότητας παρουσιάζεται κυρίως στη διεύθυνση που είναι κάθετη στο ρήγμα. Στην κάθετη διεύθυνση λοιπόν, οι χρονοϊστορίες των ταχυτήτων εμφανίζουν μεγαλύτερα μέγιστα αλλά και μεγαλύτερα πλάτη από ότι στην οριζόντια<sup>4</sup>.

Η κατευθυντικότητα μπορεί να διακριθεί σε έμπροσθεν, όπισθεν και ουδέτερη. Η πιο σημαντική και καταστροφική μορφή κατευθυντικότητας που επηρεάζει έντονα τις κατασκευές είναι η έμπροσθεν. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται τα τμήματα της περιοχής του κοντινού πεδίου που επηρεάζονται από το κάθε είδος κατευθυντικότητας.



Σχήμα 1.5: Έμπροσθεν, όπισθεν και ουδέτερη κατευθυντικότητα (Shuang – Li-li, 2007).

<sup>4</sup> Ralph J. Archuleta, Stephen H. Hartzell. Effects of fault finiteness on near source ground motion. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981. Somerville, P.G. and R.W. Graves. Conditions that give rise to usually large long period ground motions. 1993.



Σχήμα 1.6: Επίδραση των φαινομένων κατευθυντικότητας στις καταγραφείσες χρονοϊστορίες μετακινήσεων, στο σεισμό Loma Prieta 1989, για τις διευθύνσεις κάθετα και παράλληλα στο ρήγμα (EERI, 1995).

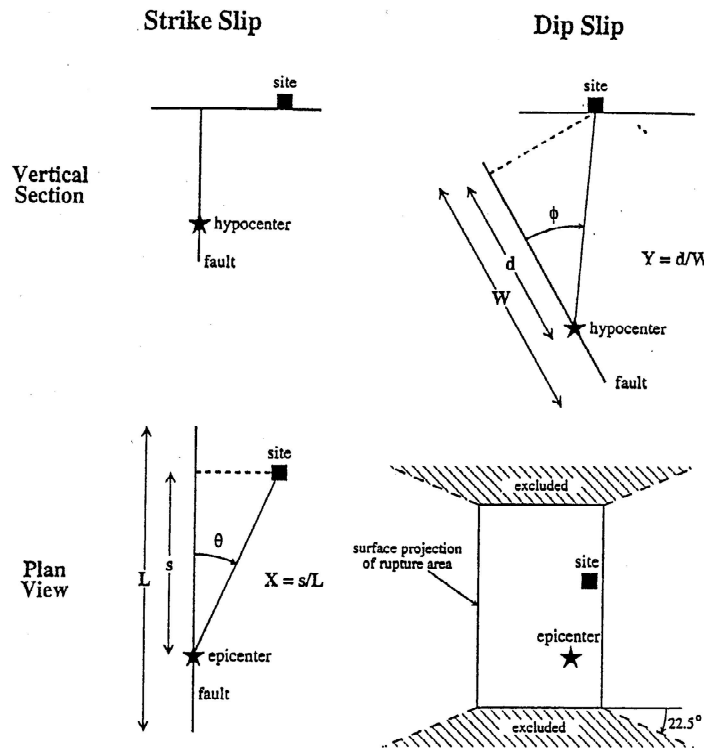
### 1.3.1 Έμπροσθεν κατευθυντικότητα

Το φαινόμενο της έμπροσθεν κατευθυντικότητας (forward directivity) συμβαίνει όταν η διεύθυνση της διάρρηξης και η διεύθυνση της ολίσθησης στο ρήγμα είναι προς τη θέση της καταγραφής. Αυτό συμβαίνει γιατί η τιμή της ταχύτητας της διάρρηξης είναι πολύ κοντά, και γενικά λίγο μικρότερη, από την τιμή της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων της βραχόμαζας κοντά στην πηγή. Ουσιαστικά, αυτό που συμβαίνει είναι ότι η ενέργεια που εκλύεται από τις επιμέρους ολισθήσεις αθροίζεται στο μέτωπο του κύματος.

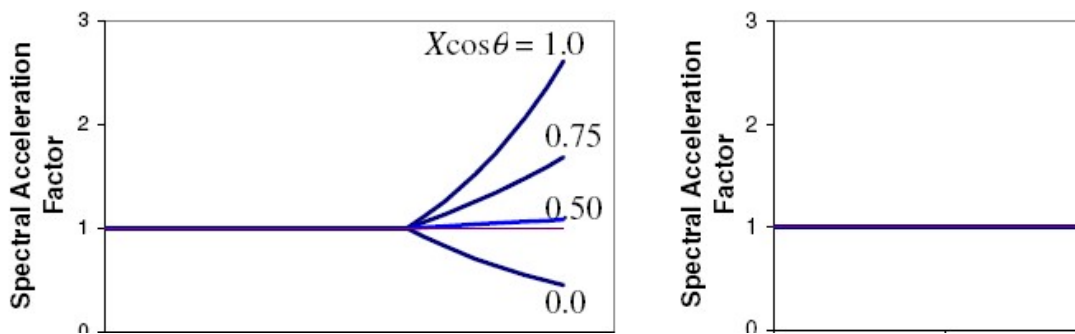
Στην περιοχή του κοντινού πεδίου, οι καταγραφές που επηρεάζονται από το φαινόμενο της έμπροσθεν κατευθυντικότητας, για μεσαίες και μεγάλες περιόδους, παρουσιάζουν ενίσχυση των φασματικών τιμών<sup>5</sup>. Το μέγεθος αυτής της ενίσχυσης σχετίζεται άμεσα με το μέγεθος του τμήματος της ρηγμάτωσης που μεσολαβεί μεταξύ της εστίας του σεισμού και της θέσης της καταγραφής. Όσο μεγαλύτερη είναι η ρηγμάτωση, τόσο εντονότερη είναι η ενίσχυση του φαινομένου. Ακόμα, σημαντικό ρόλο παίζει η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του ρήγματος και της επικεντρικής

<sup>5</sup> Somerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W., Abrahamson, N.A. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity, *Seismological Research Letters*, 1997.

απόστασης της θέσης που εξετάζεται. Όσο πιο μεγάλη είναι η εν λόγω γωνία, η εξεταζόμενη θέση βρίσκεται πιο μακριά από τη ρηγμάτωση και για το λόγο αυτό μειώνεται η φασματική επαύξηση λόγω της κατευθυντικότητας.



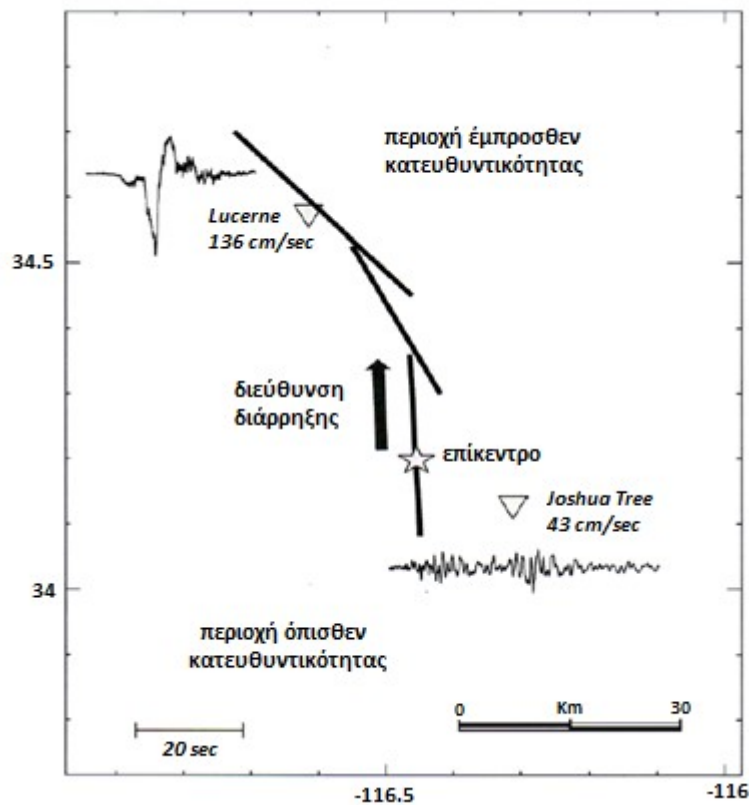
Σχήμα 1.7: Παράμετροι που έχουν σχέση με τις συνθήκες του φαινομένου της εμπροσθεν κατευθυντικότητας (Somerville et al., 1997a).



Σχήμα 1.8: Επίπτωση των παραμέτρων της διάρρηξης στη φασματική μεγέθυνση σε σχέση με τις συνθήκες καταγραφές (Somerville et al., 1997a).

### 1.3.2 Όπισθεν κατευθυντικότητα

Εάν η θέση της καταγραφής βρίσκεται κοντά στο επίκεντρο του σεισμικού γεγονότος, αλλά η διεύθυνση της διάρρηξης απομακρύνεται από αυτήν, η άφιξη των σεισμικών κυμάτων κατανέμεται στο χρόνο. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται όπισθεν κατευθυντικότητα (Backward directivity) και χαρακτηρίζεται από εδαφικές κινήσεις με σχετικά μεγάλη διάρκεια και παλμούς μικρού εύρους.



Σχήμα 1.9: Καταγραφές έμπροσθεν και όπισθεν κατευθυντικότητας (Somerville et al., 1997a).

### 1.3.3 Ουδέτερη κατευθυντικότητα

Η ουδέτερη κατευθυντικότητα (Neutral Directivity), παρατηρείται στις περιοχές της ζώνης κοντινού πεδίου που δεν βρίσκονται ούτε προς τη διεύθυνση της διάρρηξης, αλλά και ούτε αντίθετα από αυτή. Είναι ουσιαστικά οι ενδιάμεσες περιοχές που δεν συμβαίνει ούτε έμπροσθεν ούτε όπισθεν κατευθυντικότητα.

## 1.4 Φαινόμενα μόνιμης μετατόπισης

Σύγχρονοι ηλεκτρονικοί καταγραφείς για εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου, όπως για παράδειγμα από το σεισμό της Τουρκίας το 1999 και από της Ταιβάν, έδειξαν ότι σε ορισμένες περιπτώσεις συμβαίνουν μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις λόγω της στατικής παραμόρφωσης του πεδίου του σεισμού. Αυτές οι στατικές μετατοπίσεις είναι γνωστές με τον αγγλικό όρο «fling step» και εκδηλώνονται παράλληλα στο ίχνος του ρήγματος, για ρήγματα οριζόντιας διάρρηξης, και προς τη φορά της βύθισης για ρήγματα μη οριζόντιας διάρρηξης. Για το λόγο αυτό, δεν συνδέονται άμεσα με τις δυναμικές μετατοπίσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι οποίες σχετίζονται με τον παλμό κατευθυντικότητας<sup>6</sup>.

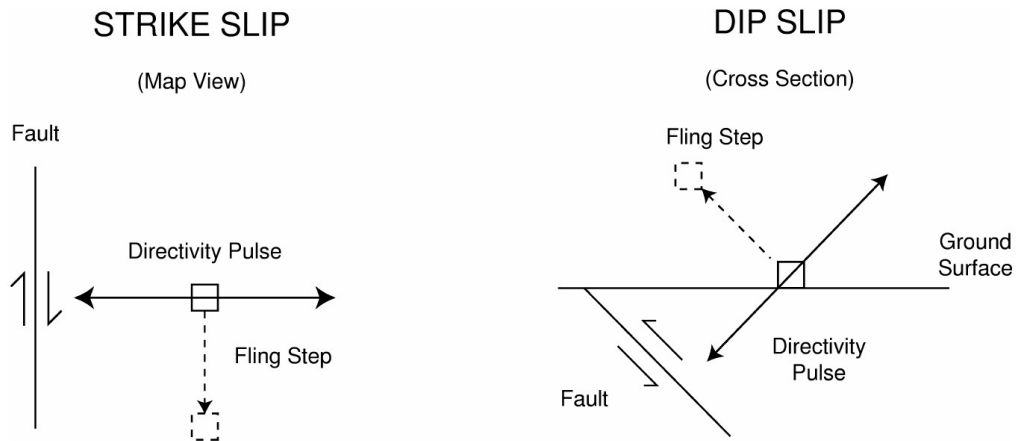
Συνοψίζοντας, στα ρήγματα οριζόντιας διάρρηξης τα φαινόμενα κατευθυντικότητας εκδηλώνονται παράλληλα στη διεύθυνση του ρήγματος, ενώ τα φαινόμενα μόνιμης μετατόπισης εκδηλώνονται κάθετα προς τη διεύθυνση του ρήγματος. Αντιθέτως, στα ρήγματα μη οριζόντιας διάρρηξης τόσο τα φαινόμενα μόνιμης μετατόπισης, όσο και τα φαινόμενα κατευθυντικότητας εκδηλώνονται παράλληλα με τη διεύθυνση του ρήγματος. Με μία γενικότερη διατύπωση, η έμπροσθεν κατευθυντικότητα και η μόνιμη μετατόπιση είναι οι δύο κύριες αιτίες που προκαλούν τους παλμούς ταχύτητας κοντινού πεδίου<sup>7</sup>. Όσα περιγράφηκαν προηγουμένως φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.

---

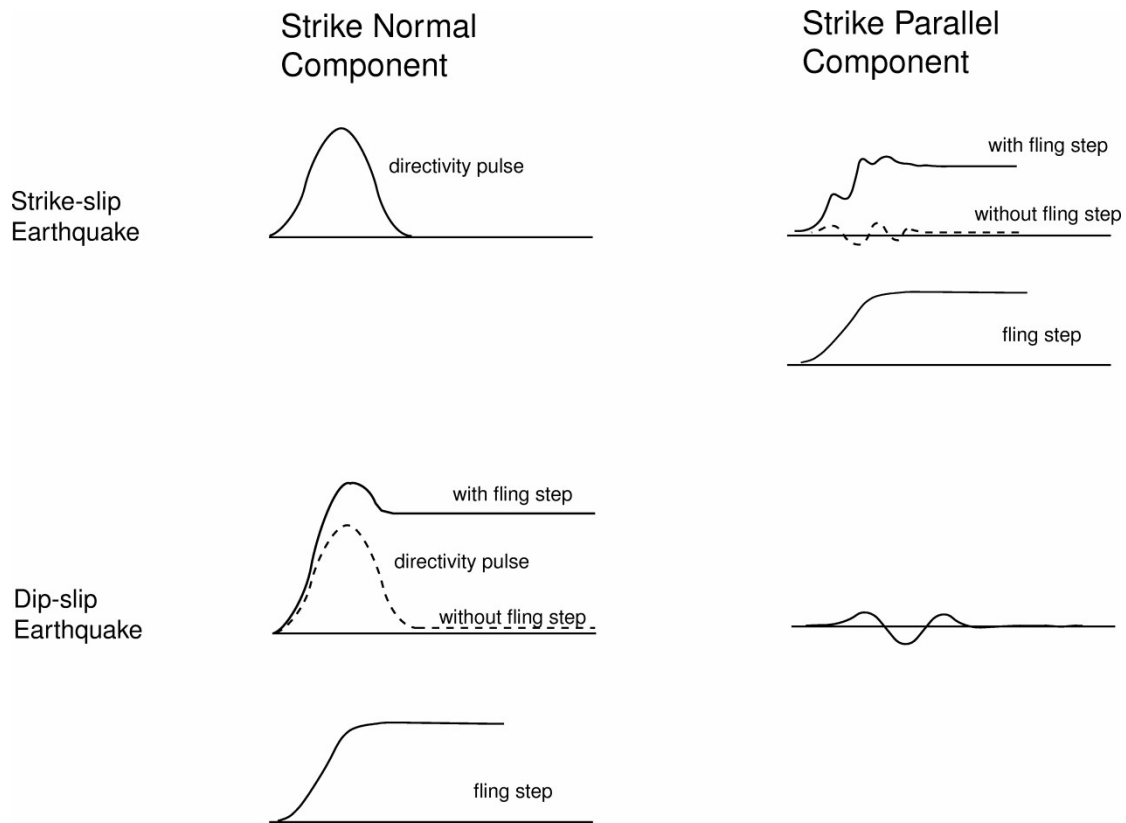
<sup>6</sup> Stewart, J.P., Chiou, S.J., Bray, J.D., Graves, R.W., Somerville, P.G., Abrahamson, N.A., op. cit., p.75.

<sup>7</sup> Abrahamson, N.A. Near-fault ground motions from the 1999 Chi-Chi earthquake, San Francisco, California, 2000.





Σχήμα 1.10: Διευθύνσεις εκδήλωσης των φαινομένων κατευθυντικότητας και μόνιμης μετακίνησης για την περίπτωση ρήγματος οριζόντιας και μη οριζόντιας διάρρηξης αντίστοιχα (Steward et al,2001).



Σχήμα 1.11: Σχηματική απεικόνιση της χρονοϊστορίας μετακινήσεων για ρήγμα οριζόντιας και μη οριζόντιας διάρρηξης, στις διευθύνσεις κάθετα και παράλληλα στο ίχνος του ρήγματος. Απεικονίζεται η συμβολή των φαινομένων μόνιμης μετατόπισης και κατευθυντικότητας τόσο μαζί, όσο και ξεχωριστά (Stewart, J.P., Chiou, S.J., Bray, J.D., Graves, R.W., Somerville, P.G., Abrahamson, N.A., 2001).

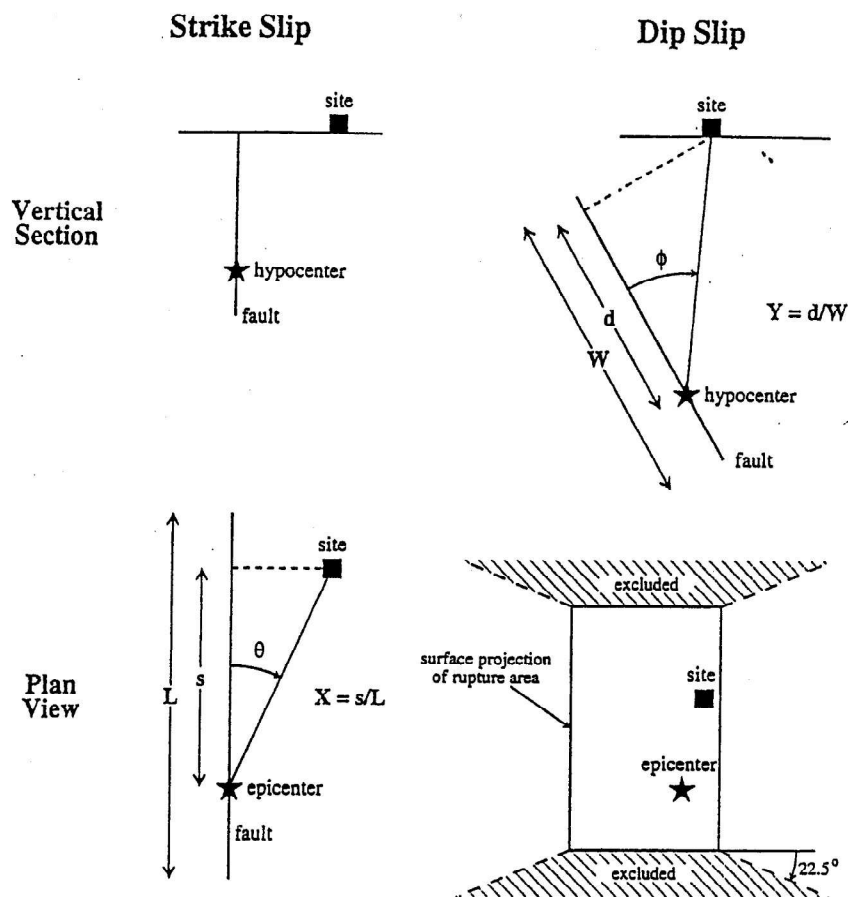
Γενικά, οι διαθέσιμες πληροφορίες για ισχυρές εδαφικές κινήσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ποσοτικοποίηση αυτών των φαινομένων είναι περιορισμένες. Παρόλα αυτά, οι σεισμοί της Τουρκίας και της Ταιβάν εμπλούτιζαν σημαντικά τη βάση δεδομένων των σεισμών κοντινού πεδίου.

### 1.5 Παράμετροι που χαρακτηρίζουν τις σεισμικές κινήσεις κοντινού πεδίου

Η ένταση του φαινομένου της κατευθυντικότητας εξαρτάται από δύο παραμέτρους. Πρώτον από την γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της διεύθυνσης διάρρηξης και της διεύθυνσης διάδοσης των κυμάτων από το ρήγμα προς την εξεταζόμενη θέση<sup>8</sup>. Η γωνία αυτή συμβολίζεται με «θ» για ρήγματα οριζόντιας διάρρηξης, και με «φ» για τα κανονικά ή ανάστροφα ρήγματα. Δεύτερον, από τον λόγο της επιφάνειας διάρρηξης μεταξύ της εστίας και της εξεταζόμενης θέσης προς τη συνολική επιφάνεια του ρήματος. Ο λόγος αυτός συμβολίζεται με X για τα ρήγματα οριζόντιας διάρρηξης και με Y για τα κανονικά ή ανάστροφα ρήγματα. Το φαινόμενο της έμπροσθεν κατευθυντικότητας είναι εντονότερο για μικρότερες γωνίες «θ» ή «φ», και για μεγαλύτερο λόγο X ή Y. Όσα περιγράφηκαν παραπάνω φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.

---

<sup>8</sup> Somerville, P. G., N. F. Smith, R. W. Graves, and N. A. Abrahamson, op. cit.



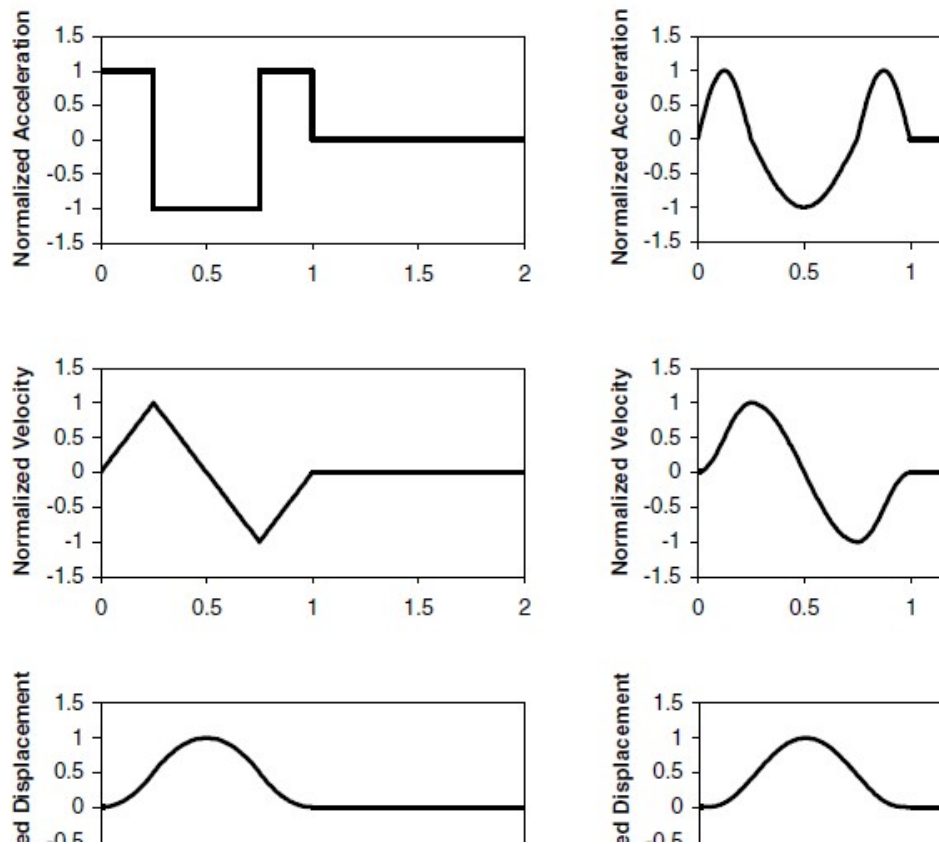
Σχήμα 1.12: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των συνθηκών του φαινομένου της κατευθυντικότητας (Somerville et al. 1997a, τροποποίηση από Steward et al, 2001).

Πιο συγκεκριμένα οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να προσδιορισθεί η ένταση του φαινομένου της κατευθυντικότητας είναι ο αριθμός των σημαντικών παλμών, η περίοδος των παλμών και η μέγιστη οριζόντια εδαφική ταχύτητα (PGV). Αυτές οι παράμετροι εξηγούνται στις παραγράφους που ακολουθούν αναλυτικότερα.

### 1.5.1 Αριθμός σημαντικών παλμών

Σύμφωνα με μελέτες, έχει παρατηρηθεί ότι απλουστευμένες προσεγγίσεις του παλμού της ταχύτητας μπορούν να συνδεθούν εμφανώς με την απόκριση των κατασκευών που υπόκεινται σε φαινόμενα κοντινού

πεδίου<sup>9</sup>. Ορισμένοι απλουστευμένοι παλμοί φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.13: Απλοποιημένοι παλμοί που χρησιμοποιήθηκαν από τους ερευνητές (Steward et al, 2001).

Επιπλέον, σύμφωνα με τους Somerville, Krawinkler and Alavi, Sasani and Bertero, Rodriguez-Marek είναι προτιμότερη η απεικόνιση των εδαφικών κινήσεων με μορφή χρονοϊστορίας σε σχέση με μια απεικόνιση της μορφής φάσματος απόκρισης<sup>10</sup>. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η

<sup>9</sup> Somerville, P. Development of an improved representation of near-fault ground motions, SMIP98-CDMG, Oakland, California, 1998.

Alavi P., H. Krawinkler. Effects of near-fault ground motion on building structures, CUREE-Kajima Joint Research Program Report, Richmond California, 1998.

Sasani, M., and V. V. Bertero. Importance of severe pulse-type ground motions in performance-based engineering: historical and critical review, 12WCEE, Auckland, New Zealand, 2000.

<sup>10</sup>Somerville, P., op. cit.

Krawinkler and Alavi, op. cit.

Sasani, M., and V. V. Bertero, op. cit.

Rodriguez-Marek, A.. Near-fault Seismic Site Response, Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley, 2000.

μελέτη μιας εδαφικής κίνησης σε ένα χώρο συχνοτήτων, όπως είναι ένα φάσμα απόκρισης, ενέχει μια στοχαστική διαδικασία κατά την οποία υπάρχει σχετικά ομοιόμορφη κατανομή της ενέργειας σε όλη τη διάρκεια της κίνησης. Όμως, στις εδαφικές κινήσεις που επηρεάζονται από φαινόμενα κατευθυντικότητας, η ενέργεια συγκεντρώνεται σε μερικούς παλμούς στη χρονοϊστορία των ταχυτήτων, με αποτέλεσμα ένα φάσμα απόκρισης να μην μπορεί να απεικονίσει το φαινόμενο αντιπροσωπευτικά.

Ο αριθμός των σημαντικών παλμών συμβολίζεται με  $N$  και ορίζεται ως ο αριθμός των παλμών μισού ημιτόνου της χρονοϊστορίας των ταχυτήτων, που έχουν μέγιστο πλάτος ίσο τουλάχιστον με το 50% της τιμής της μέγιστης ταχύτητας της καταγραφής (PGV)<sup>11</sup>.

### 1.5.2 Περίοδος παλμών

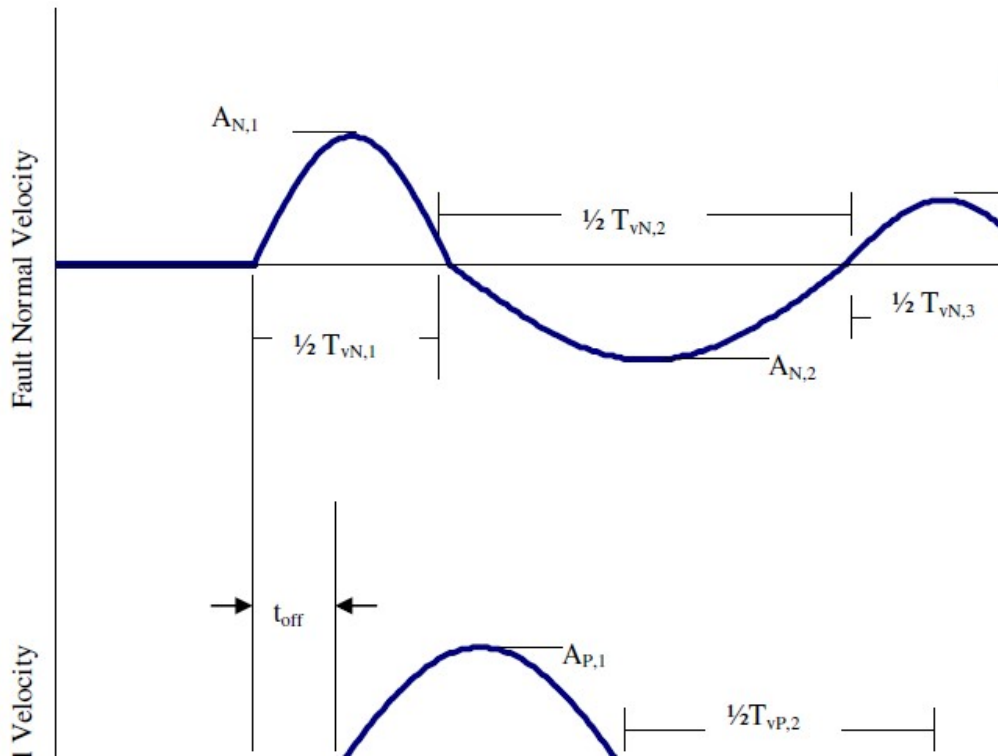
Η περίοδος παλμού ορίζεται ως το διπλάσιο του χρονικού διαστήματος, στα άκρα του οποίου η ταχύτητα μηδενίζεται ή αλλιώς το χρονικό διάστημα τα άκρα του οποίου έχουν τιμή το 10% της μέγιστης ταχύτητας του παλμού. Η περίοδος παλμού συμβολίζεται με  $T_v$ . Σημειώνεται ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος, τόσο αυξάνεται και η περίοδος των παλμών<sup>12</sup>. Φυσικά ο παραπάνω ορισμός είναι ως ένα βαθμό υποκειμενικός, και για το λόγο αυτό μπορεί να υπάρχουν διαφοροποιήσεις στην εκτίμηση της. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται οι παράμετροι των ημιτονοειδών παλμών στις διευθύνσεις κάθετα και παράλληλα στο ρήγμα σύμφωνα με τους Rodriguez-Marek, 2000<sup>13</sup>. Οι τιμές για τον αριθμό των σημαντικών παλμών που φαίνονται στο σχήμα,  $N=2$  και  $N=3$  είναι συνήθεις τιμές.

---

<sup>11</sup> Rodriguez-Marek, A., *ibid.*

<sup>12</sup> Mavroeidis, G.P., and A. S. Papageorgiou. Near-source strong ground motion: characteristics and design issues, 7NCEE, Boston, Massachusetts, 2002.

<sup>13</sup> Rodriguez-Marek, A., *op. cit.*



Σχήμα 1.14: Παράμετροι ημιτονοειδών παλμών στις διευθύνσεις κάθετα και παράλληλα στο ρήγμα (Rodriguez-Marek,2000).

Όμως οι αβεβαιότητες στην πρόβλεψη της  $T_v$ , λόγω σεισμολογικών παραμέτρων είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που προκύπτουν από τον ορισμό της. Για το λόγο αυτό οι Krawinkler and Alavi<sup>14</sup> θεώρησαν τον παλμό της ταχύτητας ως ένα ξεκάθαρο και καθολικό μέγιστο στο φάσμα απόκρισης ταχυτήτων της εδαφικής κίνησης. Συνεπώς, φαίνεται χαρακτηριστικά η εκτίμηση μιας ισοδύναμης περιόδου παλμού, της  $T_{v-p}$ . Για εδαφικές κινήσεις ενός παλμού οι δύο αυτές περίοδοι δίνουν παρόμοια αποτελέσματα, όμως για πιο περίπλοκες καταγραφές μπορεί να διαφέρουν σημαντικά. Γενικά ο λόγος  $\frac{T_v}{T_{v-p}}$  έχει μέση τιμή 0.84 και τυπική απόκλιση 0.28<sup>15</sup>.

Διάφοροι ερευνητές έχουν διατυπώσει σχέσεις για την εκτίμηση της περιόδου του παλμού, που είναι συνάρτηση του μεγέθους του παλμού.

<sup>14</sup> Krawinkler and Alavi, op. cit.

<sup>15</sup> Rodriguez-Marek, A., ibid.

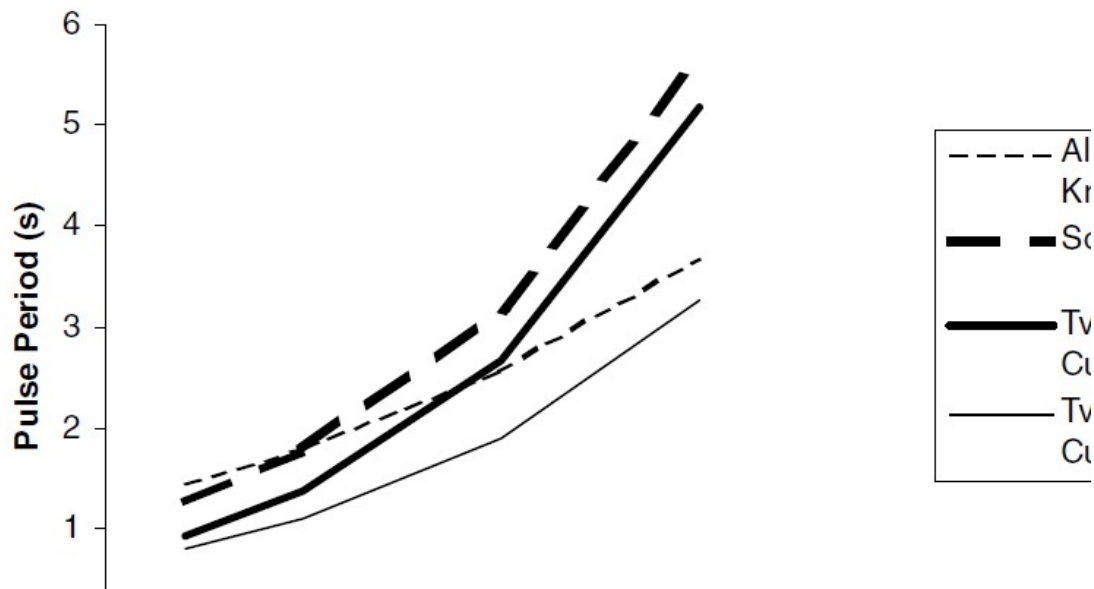
Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι σχέσεις που διατύπωσαν ο Somerville και οι Alavi and Krawinkler για την  $T_v$ . Οι σχέσεις αυτές αναφέρονται για λόγους πληρότητας παρακάτω, ενώ στη συνέχεια δίνεται το διάγραμμα όπου φαίνεται η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών μοντέλων.

Το μοντέλο που πρότεινε ο Somerville<sup>16</sup> είναι

$$\log_{10} T_v = -2.5 + 0.425m \quad (1.1)$$

Ενώ το μοντέλο των Alavi and Krawinkler<sup>17</sup> είναι

$$\log_{10} T_{v-p} = -1.76 + 0.31m \quad (1.2)$$



Σχήμα 1.15: Σύγκριση του μοντέλου Rodriguez-Marek(2000) με αυτά των Somerville(1998) για  $T_v$ , και των Alavi and Krawinkler (2000) για  $T_{v-p}$  (Rodriguez-Marek, 2000).

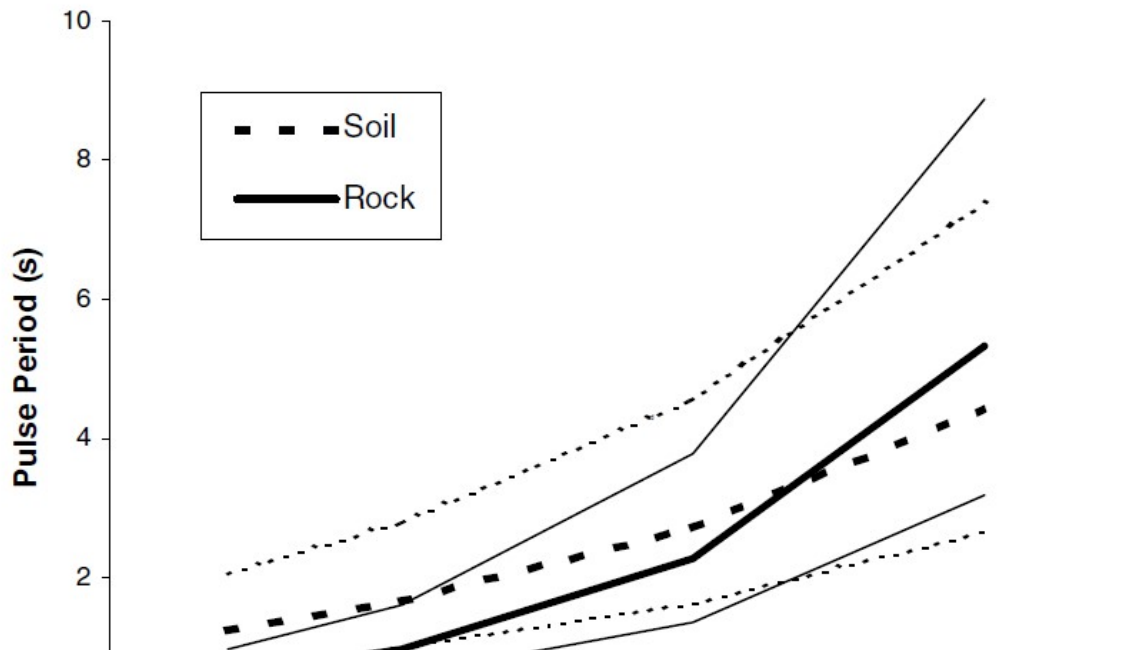
Τέλος, σύμφωνα με τους Rodriguez-Marek<sup>18</sup> οι εδαφικές συνθήκες επηρεάζουν την περίοδο παλμού. Έτσι, διατύπωσαν σχέσεις που υπολογίζουν την περίοδο παλμού συναρτήσει του αν πρόκειται για έδαφος

<sup>16</sup> Somerville, P. , op. cit.

<sup>17</sup> Krawinkler and Alavi, op. cit.

<sup>18</sup> Rodriguez-Marek, A., op. cit.

ή βράχο, καθώς και του μεγέθους του σεισμού. Οι σχηματική απεικόνιση αυτών των σχέσεων φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 1.16: Μοντέλο των Rodriguez-Marek(2000) για την  $T_p$ , για έδαφος και για βράχο. Οι έντονες γραμμές αντιπροσωπεύουν τη μέση τιμή, ενώ οι πιο λεπτές τη μέση τιμή συν μία τυπική απόκλιση (Rodriguez-Marek, 2000).

### 1.5.3 Μέγιστη οριζόντια εδαφική ταχύτητα

Πρόκειται για την μέγιστη ταχύτητα, που ορίζεται από τη μέγιστη τιμή του εύρους του παλμού  $A$ . Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι σε πολύ λίγες περιπτώσεις που αποτελούν εξαίρεση, η μέγιστη τιμή του  $A$  στη διεύθυνση παράλληλα στο ίχνος του ρήγματος, δεν συμβαίνει ταυτόχρονα με τον παλμό του κανονικού ρήγματος<sup>19</sup>.

Η μέγιστη οριζόντια εδαφική ταχύτητα (PHV) επηρεάζεται άμεσα από το μέγεθος του σεισμού, την απόσταση της εξεταζόμενης θέσης από το επίκεντρο του γεγονότος, καθώς και από τις εδαφικές συνθήκες. Για τον

<sup>19</sup> Rodriguez-Marek, A., *ibid.*



υπολογισμό της PHV έχουν διατυπωθεί διαφορετικές σχέσεις από τους Somerville<sup>20</sup>, Alavi and Krawinkler<sup>21</sup> και Rodriguez-Marek<sup>22</sup>.

Το μοντέλο του Somerville<sup>23</sup> διατύπωσε μία διγραμμική σχέση που συσχετίζει το λογάριθμο της PHV με το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος και το λογάριθμο της απόστασης. Η σχέση είναι

$$\ln(PHV) = -2.31 + 1.15m - 0.5\ln(r) \quad (1.3)$$

Η σχέση που προτείνουν οι Alavi and Krawinkler<sup>24</sup> είναι

$$\ln(PHV) = -5.11 + 1.59m - 0.58\ln(r) \quad (1.4)$$

Τέλος το μοντέλο των Rodriguez-Marek<sup>25</sup> είναι αρκετά πιο πολύπλοκο, αφού περιέχει αρκετές παραμέτρους οι οποίες λαμβάνονται από πίνακες. Η σχέση που προτείνουν είναι

$$\ln(PHV) = \alpha + bm + c\ln(r^2 + d^2) + \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad (1.5)$$

Στο σχήμα που ακολουθεί συγκρίνονται τα τρία μοντέλα. Σε ότι αφορά το μοντέλο των Rodriguez-Marek, για τις παραμέτρους έχουν ληφθεί οι τιμές  $\alpha=2.44$ ,  $b=0.5$ ,  $c=-0.41$  και  $d=3.93$ .

<sup>20</sup> Somerville, P. , op. cit.

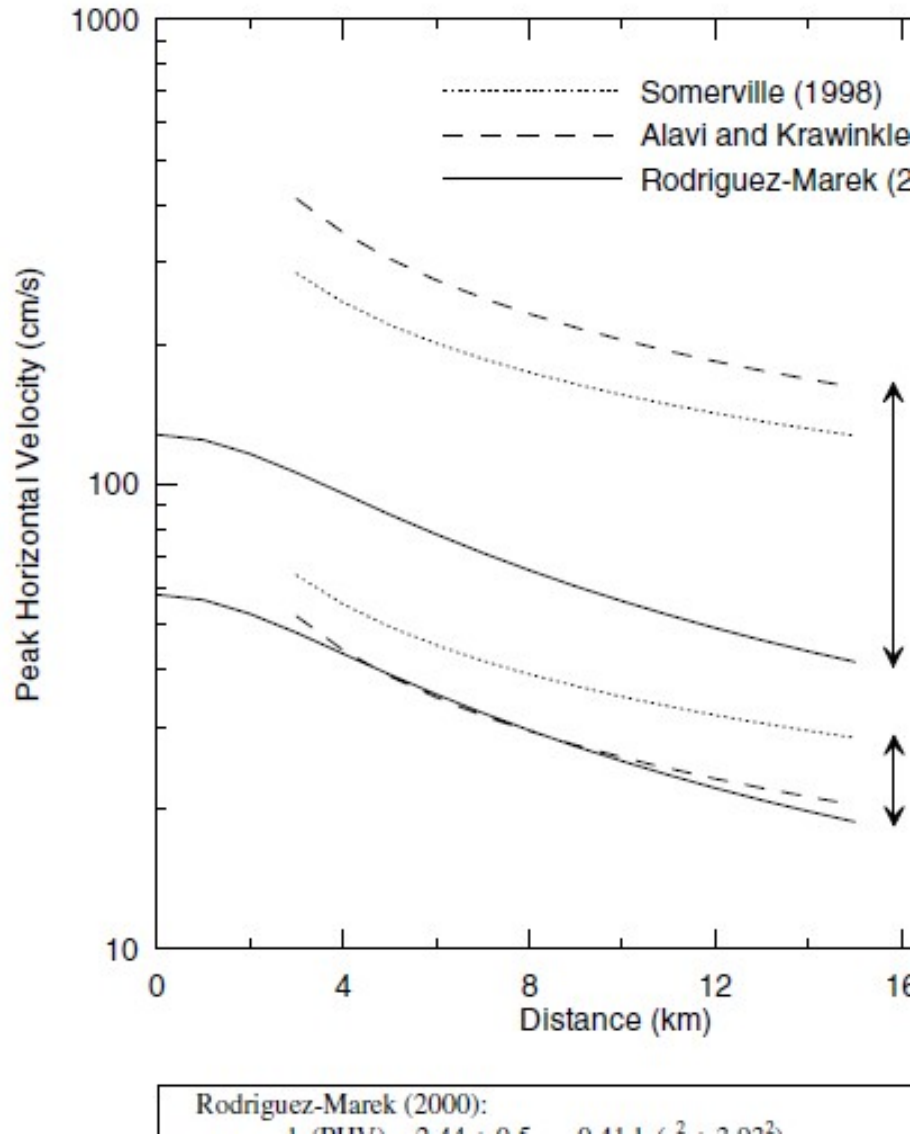
<sup>21</sup> Krawinkler and Alavi, op. cit.

<sup>22</sup> Rodriguez-Marek, A., op. cit.

<sup>23</sup> Somerville, P. , op. cit.

<sup>24</sup> Krawinkler and Alavi, op. cit.

<sup>25</sup> Rodriguez-Marek, A., op. cit.



Σχήμα 1.17: Σύγκριση των τριών μοντέλων υπολογισμού της μέγιστης οριζόντιας ταχύτητας (Rodriguez-Marek, 2000).

## 1.6 Μαθηματική αναπαράσταση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου

Η προοδευτική αύξηση των καταγραφών σεισμικών γεγονότων κοντινού πεδίου, έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον των σεισμολόγων και των μηχανικών σχετικά με την μαθηματική αναπαράσταση αυτών των εδαφικών κινήσεων. Οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά ενός σεισμικού γεγονότος κοντινού πεδίου, είναι ο αριθμός

και η φάση των σημαντικών παλμών, η περίοδος του παλμού και η μέγιστη οριζόντια εδαφική ταχύτητα. Συνεπώς, αρκεί ένα αναλυτικό μοντέλο με τέσσερις βασικές παραμέτρους για να περιγράψει όλο το φαινόμενο δημιουργίας των παλμών ταχύτητας που παράγονται λόγω της έμπροσθεν κατευθυντικότητας και του φαινομένου της μόνιμης μετακίνησης. Οι πιο συνηθισμένοι όροι που χρησιμοποιούνται από τους σεισμολόγους είναι οι κύματα, σήματα και παλμοί.

### 1.6.1 Συνήθη αναλυτικά κύματα της Σεισμολογίας

Από διάφορους μελετητές, έχουν γίνει πολλές διαφορετικές προτάσεις για κύματα τα οποία προσεγγίζουν τα σεισμικά γεγονότα κοντινού πεδίου. Το μοντέλο που επιλέγεται κάθε φορά όμως, θα πρέπει να περιγράφει τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά το σεισμικό γεγονός με καλή προσέγγιση. Ωστόσο για να συμβεί αυτό, θα πρέπει το μοντέλο να ικανοποιεί ορισμένες προϋποθέσεις. Πρώτον, θα πρέπει το συνθετικό κύμα του μοντέλου να είναι κατάλληλα παραμετροποιημένο με μία απλή μαθηματική έκφραση, έτσι ώστε με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό παραμέτρων ως δεδομένα εισόδου, να προκύπτει ένα ικανοποιητικά φυσικό αποτέλεσμα. Το αποτέλεσμα που προκύπτει, θα πρέπει προφανώς να έχει την ευελιξία που απαιτείται προκειμένου να παριστάνονται με ακρίβεια και λογική οι παλμοί κοντινού πεδίου. Δεύτερον, το συνθετικό κύμα θα πρέπει να μπορεί να προσομοιώσει αν όχι όλες, όσο το δυνατόν περισσότερες από τις καταγραφές κοντινού πεδίου. Τέλος, η μαθηματική έκφραση του κύματος θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να διευκολύνει την παραγωγή εκφράσεων κλειστού τύπου για τα φασματικά χαρακτηριστικά, με τη μορφή μετασχηματισμού Fourier και φάσματος απόκρισης<sup>26</sup>.

Τα πιο κοινά κύματα που έχουν προταθεί είναι το κύμα Gabor, Berlanga, Generalized Rayleigh, Küpper, Ricker. Στον παρακάτω πίνακα

---

<sup>26</sup> Mavroeidis GP, Papageorgiou AS. A mathematical representation of near-fault ground motions, Bulletin of Seismological Society of America, 2003.

φαίνονται τα κύματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, με την αναλυτική τους έκφραση, τις παραμέτρους που απαιτούνται να εισαχθούν καθώς και με τις σχετικές πηγές.

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

Πίνακας 1.1: Συνήθη κύματα που χρησιμοποιούνται στη Σεισμολογία. (Mavroeidis and Papageorgiou, 2003)

Ένα μοντέλο το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι αυτό των Mavroeidis and Papageorgiou<sup>27</sup>, το οποίο παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 2 που ακολουθεί.

<sup>27</sup> Mavroeidis GP, Papageorgiou AS, *ibid.*

## 1.7 Κατάταξη εδαφικών κινήσεων ως παλμικές ή μη παλμικές με τη μέθοδο του Baker

### 1.7.1 Γενικά

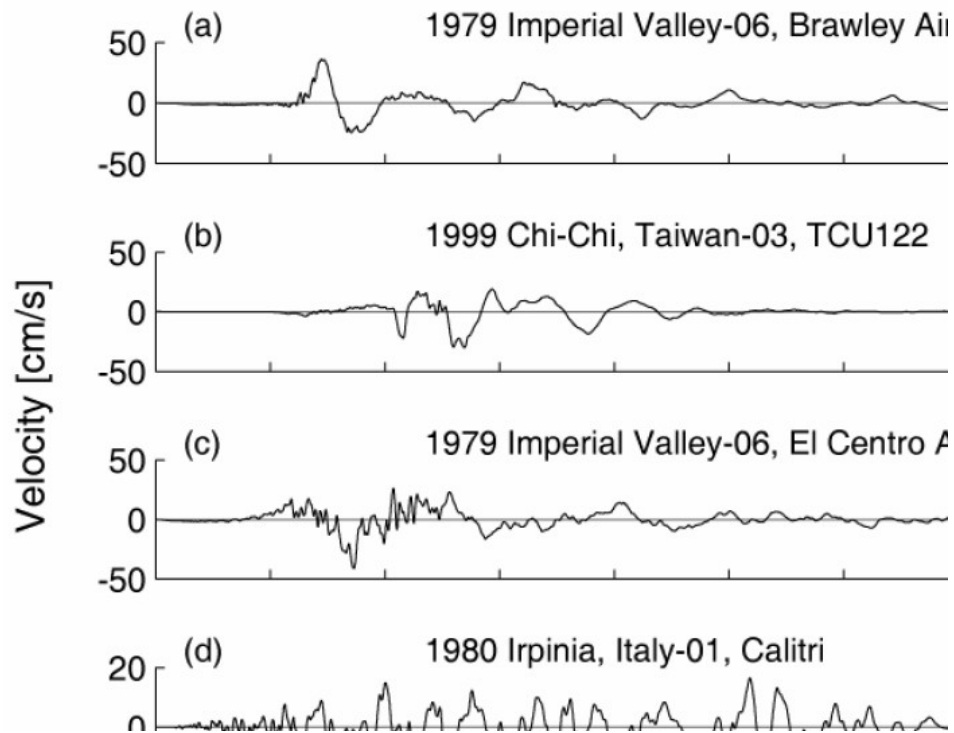
Η αναγκαιότητα της κατάταξης των εδαφικών κινήσεων ως παλμικές ή μη παλμικές, προκύπτει από το γεγονός ότι οι σεισμοί κοντινού πεδίου, ή αλλιώς παλμικές εδαφικές κινήσεις, επιβάλλουν στις κατασκευές πολύ μεγάλες απαιτήσεις. Για το λόγο αυτό πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με το συγκεκριμένο θέμα όπως οι Akkar et al. (2005), Fu and Menun (2004), Mavroeidis and Papageorgiou<sup>28</sup>, Somerville<sup>29</sup>, και άλλοι.

Οι δύο βασικές προϋποθέσεις για να χαρακτηριστεί μία εδαφική κίνηση ως παλμική, είναι η εμφάνιση ενός μεγάλου και χαρακτηριστικά ξεκάθਾਰου παλμού, ο οποίος είναι εύκολα ορατός στην χρονοϊστορία των ταχυτήτων, καθώς και η γεωμετρία της περιοχής της θέσης που εξετάζεται, η οποία μπορεί να υποδεικνύει ότι επιδρούν φαινόμενα κατευθυντικότητας. Φυσικά, υπάρχουν περιπτώσεις που δεν είναι τόσο εύκολη η διάκριση ενός γεγονότος ως παλμικού ή μη παλμικού.

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. Στους σεισμούς αυτούς μπορεί ο χαρακτηριστικός μεγάλος παλμός να είναι εύκολα διακριτός ακόμα και με οπτικό έλεγχο, όμως αντιθέτως μπορεί να είναι δύσκολο να καταταγεί ο σεισμός ως παλμικός ή μη. Στη συνέχεια, φαίνονται τέσσερα διαφορετικά παραδείγματα. Στις περιπτώσεις (a) και (b) είναι εμφανής η ύπαρξη ή μη παλμού στην χρονοϊστορία των ταχυτήτων. Οι περιπτώσεις (c) και (d) ταξινομούνται ως ασαφείς και αντιμετωπίζονται κατάλληλα.

<sup>28</sup> Mavroeidis GP, Papageorgiou AS, ibid.

<sup>29</sup> Somerville PG.. Magnitude scaling of the near-fault rupture directivity pulse, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2003.



Σχήμα 1.18: Παραδείγματα παλμικών και μη παλμικών εδαφικών κινήσεων για κανονικά ρήγματα (Baker, 2007).

### 1.7.2 Απομόνωση του παλμού ταχύτητας

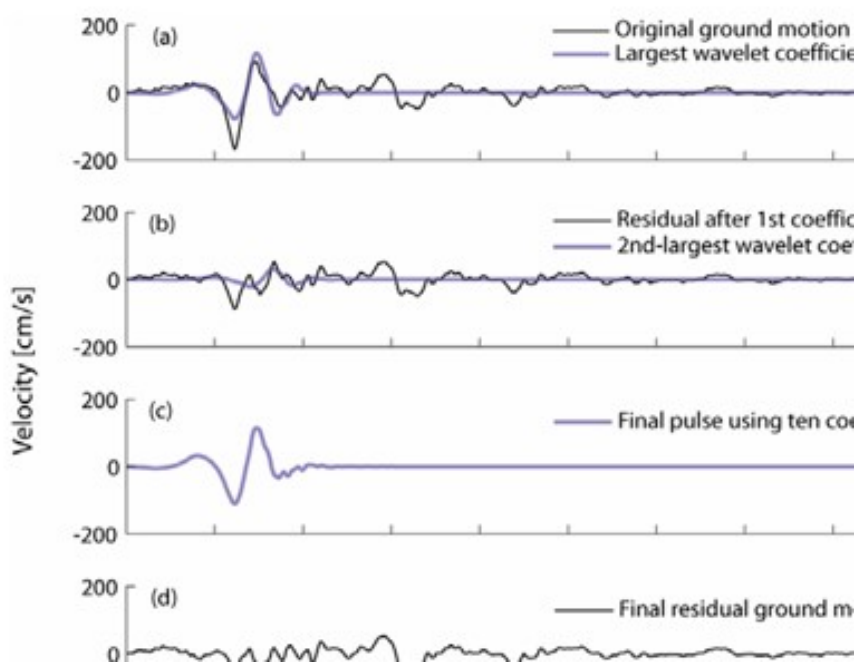
Σύμφωνα με τον Baker<sup>30</sup>, και με αποσύνθεση του σήματος σε κυματίδια μέσω κυματικής ανάλυσης, εντοπίζεται και αφαιρείται ο μεγαλύτερος παλμός ταχύτητας της εδαφικής κίνησης. Εάν αυτός ο παλμός είναι μεγάλος αρκετά σε σχέση με τα χαρακτηριστικά της χρονοϊστορίας που απομένουν, τότε η εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται ως παλμική. Στόχος του Baker λοιπόν είναι η δημιουργία ενός αλγορίθμου, ο οποίος λαμβάνοντας υπ' όψη τις απαραίτητες παραμέτρους, θα χαρακτηρίζει τελικά αν μία κίνηση είναι παλμική ή μη παλμική.

Ως μητρικό κυματίδιο, ο Baker επιλέγει το κυματίδιο Daubechies τέταρτης τάξης, καθώς προσεγγίζει ικανοποιητικά πολλούς παλμούς

<sup>30</sup> Baker, J.W.. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, 2007.

ταχύτητας σε καταγραφές σεισμών κοντινού πεδίου. Για την αξιολόγηση μιας εδαφική κίνησης, αρχικά υπολογίζεται ο συνεχής κυματικός μετασχηματισμός από τη χρονοϊστορία της ταχύτητας και αναγνωρίζεται ο συντελεστής με τη μεγαλύτερη κατ' απόλυτο τιμή. Το κυματίδιο που σχετίζεται με το συντελεστή αυτό καθορίζει την περίοδο και τη θέση του παλμού.

Στη συνέχεια, το συγκεκριμένο κυματίδιο αφαιρείται από την εδαφική κίνηση και συνεχίζεται η διαδικασία της συνέλιξης με το εναπομένον σήμα (residual ground motion). Στη δεδομένη στιγμή της διαδικασίας, επιλέγονται μόνο τα κυματίδια που έχουν παρεμφερή περίοδο και χρόνο άφιξης με το κυματίδιο που έδωσε το μεγαλύτερο συντελεστή. Ο μεγαλύτερος από τους συντελεστές αυτούς αναγνωρίζεται, όπως απεικονίζεται στο σχήμα, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για την εναπομένουσα εδαφική κίνηση. Για τη βέλτιστη αναλυτική αναπαράσταση του παλμού εξάγονται δέκα συντελεστές για τη συγκεκριμένη περίοδο και θέση. Ένας απομονωμένος παλμός που έχει προκύψει με χρήση δέκα συντελεστών απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 1.19: Περιγραφή της διαδικασίας αφαίρεσης παλμού (Baker, 2007).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, εάν ένα σημαντικό μέρος της χρονοϊστορίας της εδαφικής κίνησης περιγράφεται από ένα ή από λίγα κύματα με μεγάλο συντελεστή, τότε αυτό θα είναι το κύμα ή τα κύματα που θα χρησιμοποιηθούν για να υποδείξουν την ύπαρξη παλμού. Με την παραπάνω διαδικασία λοιπόν εξάγεται ο μέγιστος παλμός ταχύτητας της εδαφικής κίνησης.

Η κυματική ανάλυση αποσυνθέτει ένα σήμα, στην προκειμένη περίπτωση τη χρονοϊστορία ταχυτήτων της εδαφικής κίνησης, σε κύματα τα οποία εντοπίζονται στο χρόνο, και αντιπροσωπεύουν ένα μικρό εύρος συχνοτήτων. Για σήματα τα οποία δεν είναι στάσιμα, όπως οι εδαφικές κινήσεις, αποτελεί πλεονέκτημα η αναπαράσταση του σήματος με κύματα τέτοιου είδους, από ότι με στάσιμα ημιτονικά κύματα. Τα κύματα που χρησιμοποιεί είναι δύο διαφορετικών τύπων: συνεχή και διακριτά. Βέβαια, αυτή η μέθοδος ανάλυσης έχει εξ' ορισμού μηδενική παραμένουσα μετακίνηση, και έτσι φαινόμενα μόνιμης μετακίνησης δεν είναι δυνατόν να εντοπιστούν<sup>31</sup>.

### 1.7.3 Σημαντικότητα αφαιρούμενου παλμού

Σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν παραπάνω, οποιοσδήποτε παλμός μπορεί να αφαιρεθεί από μία εδαφική κίνηση είτε πρόκειται για παλμό κατευθυντικότητας είτε όχι. Συνεπώς, αφού εντοπιστεί ο μέγιστος παλμός, πρέπει να υπάρχει κάποια μεταβλητή σύμφωνα με την οποία θα προκύπτει αν πρόκειται για παλμική ή μη παλμική κίνηση. Έτσι ο Baker εισάγει τον δείκτη παλμού, ο τύπος του οποίου είναι

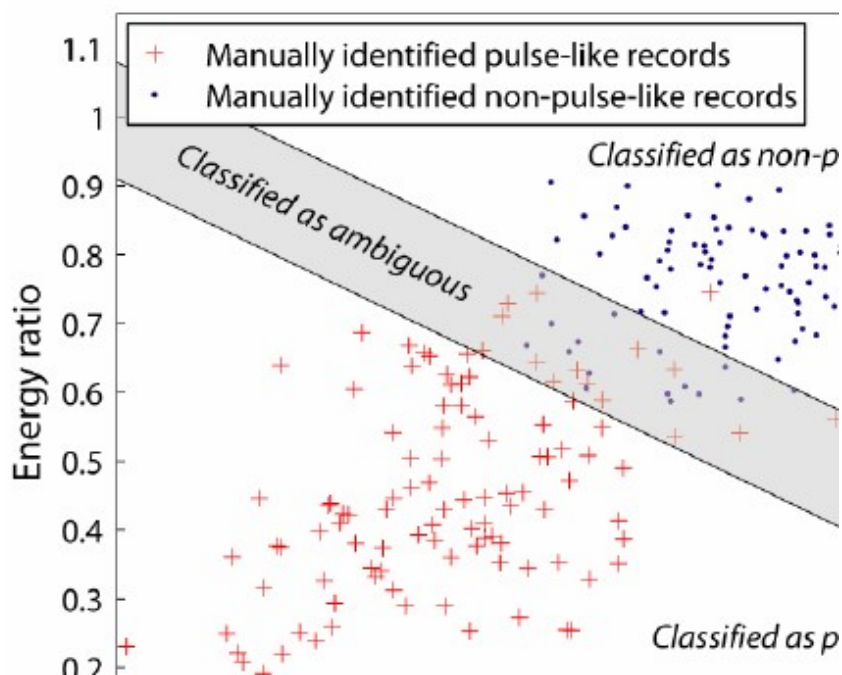
$$PulseIndicator = \frac{1}{1 + e^{-23.3 + 14.6(PGVratio) + 20.5(Energyratio)}} \quad (1.6)$$

Ως *PGV ratio* ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ταχύτητας της παραμένουσας καταγραφής προς την μέγιστη ταχύτητα της αρχικής καταγραφής. Ομοίως ως *Energy ratio* ορίζεται ο λόγος της ενέργειας της

<sup>31</sup> Baker, J.W., op. cit.



παραμένουσας καταγραφής προς την ενέργεια της αρχικής καταγραφής. Ο δείκτης παλμού λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Για τιμές από 0.85 και πάνω και 0.15 και κάτω, η εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται ως παλμική και μη παλμική αντίστοιχα. Τα παραπάνω παριστάνονται διαγραμματικά στο σχήμα που ακολουθεί.



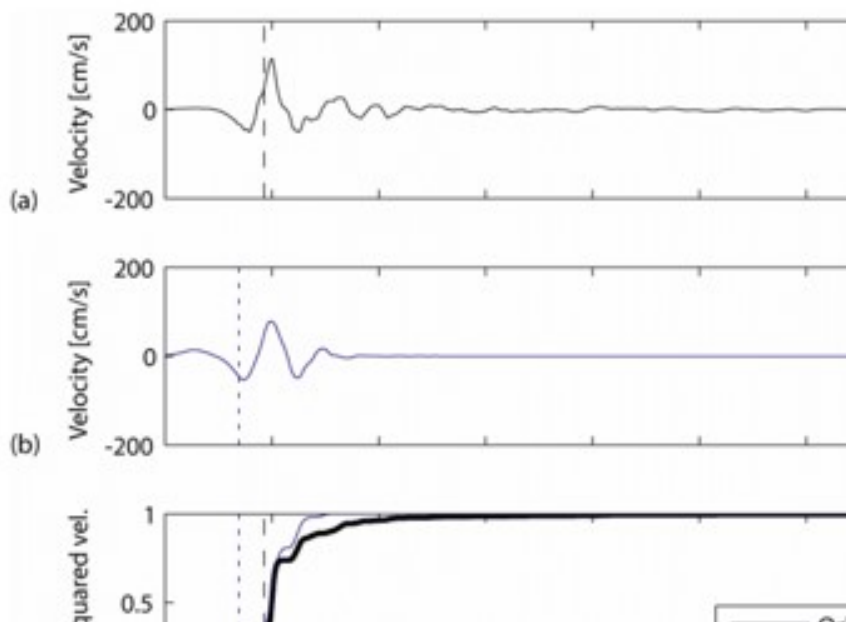
Σχήμα 1.20: Κατηγοριοποίηση ως παλμικών ή μη παλμικών εδαφικών κινήσεων (Baker, 2007).

#### 1.7.4 Παλμοί που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία ταχυτήτων

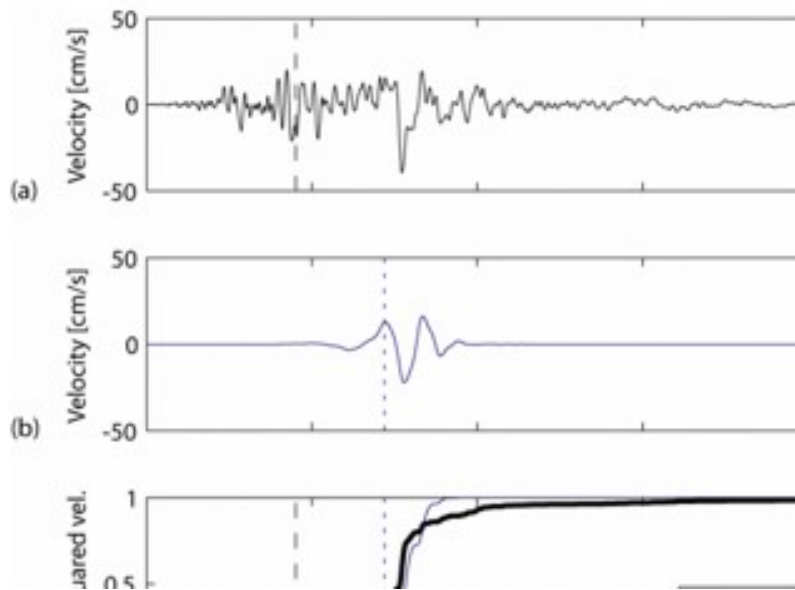
Σεισμολογικές μελέτες έχουν δείξει ότι οι παλμοί που οφείλονται στην κατευθυντικότητα, φτάνουν νωρίς στη χρονοϊστορία των ταχυτήτων. Επομένως, πρέπει να υπάρξει ένα κριτήριο σύμφωνα με το οποίο θα εντοπίζονται οι παλμοί που φτάνουν αργά, και θα αποκλείονται. Αυτό επιτυγχάνεται υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας (Cumulative Squared Velocity ή CSV) με τη βοήθεια της σχέσης:

$$CSV(t) = \int_0^t V^2(u) du \quad (1.7)$$

Όπου  $V(u)$  είναι η ταχύτητα της εδαφικής κίνησης τη χρονική στιγμή  $u$ . Υπολογίζοντας το παραπάνω ολοκλήρωμα για την αρχική καταγραφή και για τον εξαγόμενο παλμό, καθορίζονται οι χρονικές στιγμές για τις οποίες καθένα φτάνει το  $x\%$  του συνολικού του CSV. Οι χρονικές αυτές στιγμές συμβολίζονται ως  $t_{x\%,orig}$  και  $t_{x\%,pulse}$  για την αρχική εδαφική κίνηση και για τον παλμό αντίστοιχα. Μετά την εξέταση των αρχικών και των εναπομενουσών εδαφικών κινήσεων για κάθε καταγραφή, εκτελείται μία βαθμονόμηση της διαδικασίας που δείχνει ότι οι παλμοί που φτάνουν νωρίς στη χρονοϊστορία της ταχύτητας έχουν τιμές μεγαλύτερες από το χρόνο . Δηλαδή για να θεωρείται ότι ο παλμός βρίσκεται στην αρχή της εδαφικής κίνησης, θα πρέπει να φτάνει το 10% του συνολικού του CSV, πριν η εδαφική κίνηση φτάνει το 20% του συνολικού της CSV. Το κριτήριο αυτό διασφαλίζει ότι ένα σημαντικό ποσοστό της ενέργειας του παλμού έχει εκδηλωθεί πριν ακόμα αναπτυχθεί σημαντικό μέρος της ενέργειας της αρχικής χρονοϊστορίας. Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται παραδείγματα παλμών που φτάνουν νωρίς και αργά στη χρονοϊστορία της εδαφικής κίνησης.



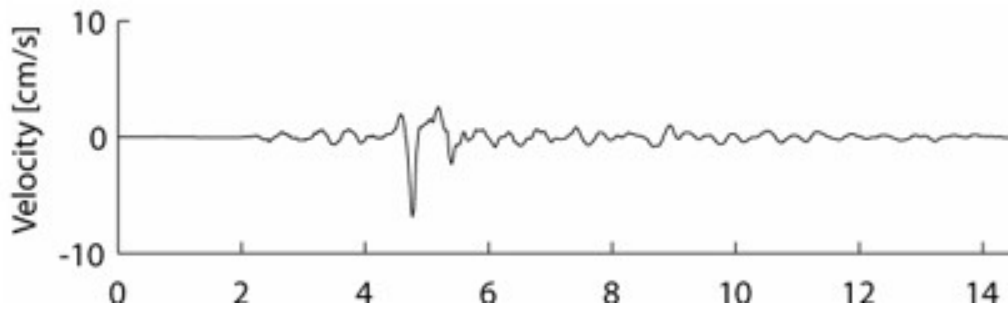
Σχήμα 1.21 : Παλμός στην αρχή της χρονοϊστορίας. (a), (b) χρονοϊστορία ταχύτητας και παλμού, (c) CSV (Baker, 2007).



Σχήμα 1.22: Εκτίμηση χρόνου άφιξης παλμού (Baker, 2007).

### 1.7.5 Εδαφικές κινήσεις με $PGV < 30 \text{ cm/sec}$

Τέλος, παλμοί στη χρονοϊστορία των ταχυτήτων μπορούν να εμφανιστούν και σε εδαφικές κινήσεις μικρής έντασης. Οι παλμοί αυτοί όμως δεν οφείλονται στο φαινόμενο της κατευθυντικότητας αλλά σε κινήσεις σύντομης διάρκειας και μικρού μεγέθους που εμφανίζουν ανακλάσεις κατά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων. Αντιπροσωπευτικά, στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται μια τέτοια εδαφική κίνηση μεγέθους 5.1. Για τον αποκλεισμό των καταγραφών αυτών επομένως, δεν λαμβάνονται υπόψη σεισμικές κινήσεις με μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV) μικρότερη των 30cm/sec. Το κριτήριο αυτό αποκλείει αυτόματα και τις καταγραφές μακρινού πεδίου.



Σχήμα 1.23: Εδαφική κίνηση με μικρή PGV που εμφανίζεται ως παλμική και αποκλείεται (Baker, 2007).

Ανακεφαλιώνοντας, ο Baker εξέτασε όλες τις καταγραφές της βάσης δεδομένων NGA στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση και κατέληξε σε 91 παλμικές κινήσεις που πληρούν και τα τρία κριτήρια που αναφέρθηκαν, δηλαδή πιο συγκεκριμένα:

- i. Ο Παλμικός Δείκτης (Pulse Indicator) λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από 0,85.
- ii. Ο παλμός φτάνει νωρίς στη χρονοϊστορία της κίνησης ( $t_{20\%,orig} > t_{10\%,pulse}$ ).
- iii. Η αρχική εδαφική κίνηση έχει  $PGV > 30\text{cm/sec}$ .
- iv.

#### 1.7.6 Εύρος προσανατολισμού παλμών

Οι παλμοί ταχύτητας που οφείλονται στα φαινόμενα κατευθυντικότητας αναμένεται να εμφανίζονται στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της εδαφικής κίνησης<sup>32</sup>. Παρόλα αυτά, πολλές επιφάνειες διάρρηξης έχουν μη κανονική γεωμετρία, γεγονός που καθιστά τον καθορισμό της ακριβούς κάθετης στο ρήγμα διεύθυνσης δύσκολο και εν τέλει παλμοί κατευθυντικότητας εντοπίζονται σε καταγραφές με γωνία

<sup>32</sup> Somerville et al., op. cit.

προσανατολισμού, σε σχέση με το ίκνος του ρήγματος, σημαντικά διαφορετική από τις  $90^{\circ}$ <sup>33</sup>.

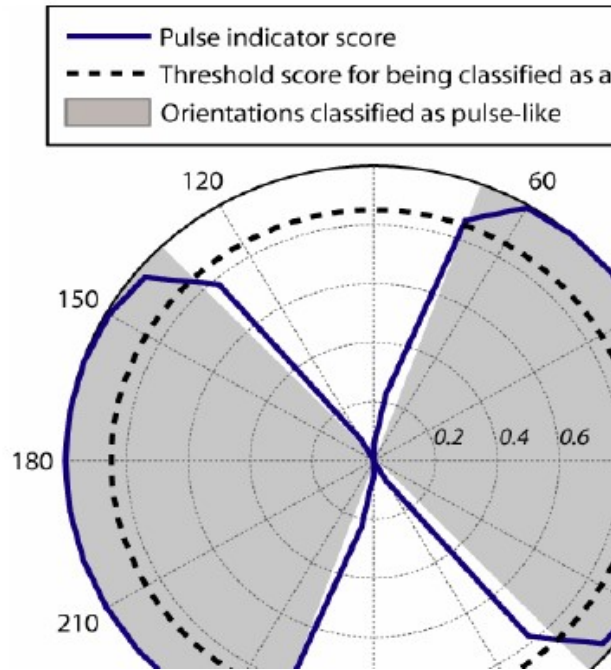
Είναι ενδεικτικό, όπως εμφανίζεται και στο σχήμα 2.24, ότι η περιοχή των γωνιών όπου, σύμφωνα με τον προτεινόμενο δείκτη από τον Baker<sup>34</sup>, εμφανίζονται παλμοί κατευθυντικότητας είναι ευρύτατη. Ακόμα, χαρακτηριστικά παλμού διαθέτουν και οι καταγραφές που είναι παράλληλες προς το ρήγμα, αν και ο παλμός αυτός σχετίζεται περισσότερο με την παραμένουσα ολίσθηση του ρήγματος και έχει συνήθως χαμηλότερα εύρη από τους χαρακτηριστικούς παλμούς κατευθυντικότητας. Για τη μελέτη των διευθύνσεων στις οποίες παρατηρούνται παλμικές κινήσεις, οι καταγραφές περιστρέφονται από τους Shahi and Baker<sup>35</sup> σε όλες τις δυνατές διευθύνσεις και η εδαφική κίνηση που προκύπτει σε κάθε διεύθυνση ταξινομείται ως παλμική ή μη. Έτσι, μια περιοχή θεωρείται ότι έχει υποβληθεί σε μια παλμική κίνηση όταν η εδαφική κίνηση κατατάσσεται ως παλμική τουλάχιστον σε μια διεύθυνση.

---

<sup>33</sup> Howard et al., 2005.

<sup>34</sup> Baker J.W., op. cit.

<sup>35</sup> Shahi S. K., Baker J. W., An Empirically Calibrated Framework for Including the Effects of Near-Fault Directivity in Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Bulletin of the seismological society of America, 2011.



Σχήμα 1.24: Τιμές του παλμικού δείκτη συναρτήσει του προσανατολισμού για την καταγραφή EC Country Center από το σεισμό στο Imperial Valley του 1979. Οι σκιασμένες επιφάνειες υποδεικνύουν τις διευθύνσεις στις οποίες παρατηρήθηκε ένας σημαντικός παλμός (Baker, 2007).

### 1.7.7 Περίοδος παλμού

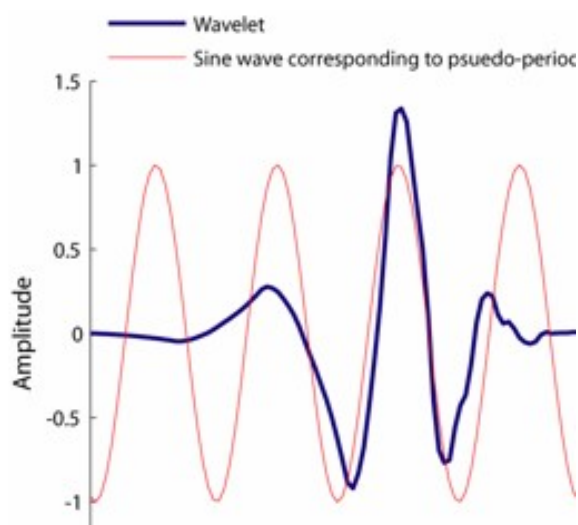
Η περίοδος του παλμού ταχυτήτων αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο για τα έργα πολιτικού μηχανικού, αφού ο λόγος της περιόδου του παλμού προς την ιδιοπερίοδο της κατασκευής επιδρά πολύ σοβαρά στην απόκριση της ίδιας της κατασκευής<sup>36</sup>. Η έννοια της περιόδου ενός κυματιδίου δεν είναι ξεκάθαρα 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 που ακολουθεί, φαίνεται 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

<sup>36</sup> Alavi P. and H. Krawinkler, *op. cit.*

Anderson J.C. and V.V. Bertero. *Uncertainties in establishing design earthquakes*, 1987.

Mavroeidis et al., 2004.

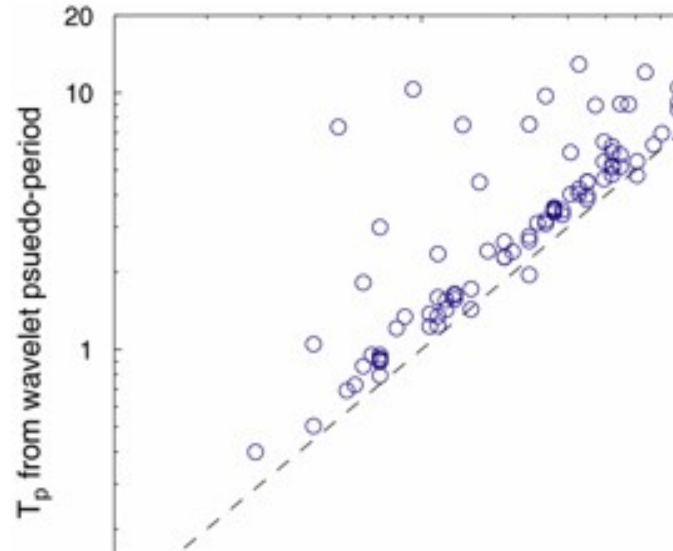
μεγαλύτερης συνιστώσας του κυματιδίου χρησιμοποιείται ως η περίοδος παλμού της εδαφικής κίνησης.



Σχήμα 1.25: Κυματίδιο Daubechies και ημιτονικό κύμα με περίοδο ίση με τη μέγιστη της κυματομορφής από το φάσμα Fourier (Baker, 2007).

Εναλλακτικά, για τον προσδιορισμό της περιόδου ενός παλμού επιλέγεται η περίοδος στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη αιχμή του φάσματος ταχύτητας της εδαφικής κίνησης. Στο σχήμα 1.26 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<sup>37</sup>. 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 που υπολογίζονται από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος της ταχύτητας.

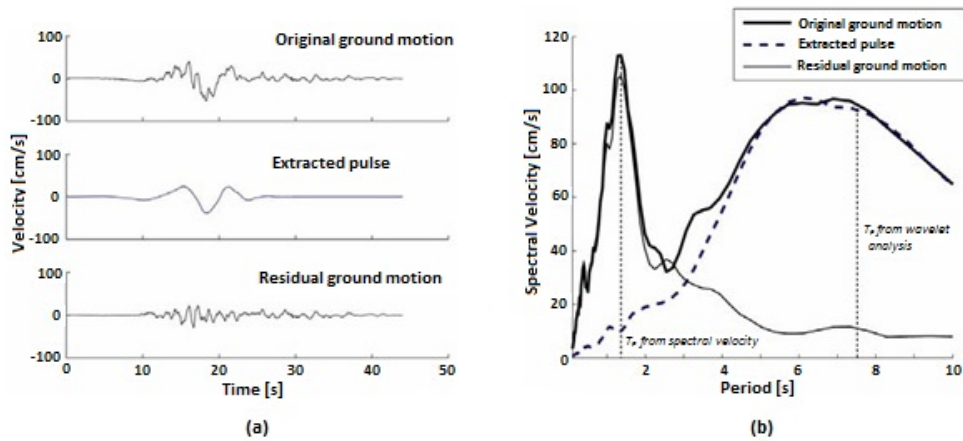
<sup>37</sup> Baker J.W., op. cit.



Σχήμα 1.26 : Περίοδος παλμού ( $T_p$ ) από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος της ταχύτητας σε σχέση με την περίοδο παλμού ( $T_p$ ) από την ψευδο-περίοδο του κυματιδίου για τις 91 εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου (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 παρακάτω σχήμα, 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 1.27 : 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 (Baker, 2007).

Στη συνέχεια δίνεται ο πίνακας της βάσης δεδομένων NGA, με τις καταγραφές που χαρακτηρίζονται ως παλμικές σύμφωνα με τον Baker.

#	Event	Year	Station	$T_p$	PGV	$M_w^a$	Closest Dist. <sup>b</sup>	Epi. Dist. <sup>c</sup>
1	San Fernando	1971	Pacoima Dam (upper left abut)	1.6	116.5	6.6	1.8	11.9
2	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #6	1.2	51.5	5.7	3.1	4.4
3	Imperial Valley-06	1979	Aeropuerto Mexicali	2.4	44.3	6.5	0.3	2.5
4	Imperial Valley-06	1979	Agrarias	2.3	54.4	6.5	0.7	2.6
5	Imperial Valley-06	1979	Brawley Airport	4.0	36.1	6.5	10.4	43.2
6	Imperial Valley-06	1979	EC County Center FF	4.5	54.5	6.5	7.3	29.1
7	Imperial Valley-06	1979	EC Meloland Overpass FF	3.3	115.0	6.5	0.1	19.4
8	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #10	4.5	46.9	6.5	6.2	26.3
9	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #11	7.4	41.1	6.5	12.5	29.4
10	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #3	5.2	41.1	6.5	12.9	28.7
11	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #4	4.6	77.9	6.5	7.1	27.1
12	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #5	4.0	91.5	6.5	4.0	27.8
13	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #6	3.8	111.9	6.5	1.4	27.5
14	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #7	4.2	108.8	6.5	0.6	27.6

15	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #8	5.4	48.6	6.5	3.9	28.1
16	Imperial Valley-06	1979	El Centro Differential Array	5.9	59.6	6.5	5.1	27.2
17	Imperial Valley-06	1979	Holtville Post Office	4.8	55.1	6.5	7.7	19.8
18	Mammoth Lakes-06	1980	Long Valley Dam (Upr L Abut)	1.1	33.1	#	5.9	14.0
19	Irpinia, Italy-01	1980	Sturno	3.1	41.5	6.9	10.8	30.4
20	Westmorland	1981	Parachute Test Site	3.6	35.8	5.9	16.7	20.5
21	Coalinga-05	1983	Oil City	0.7	41.2	#	5.8	4.6
22	Coalinga-05	1983	Transmitter Hill	0.9	46.1	#	5.8	6.0
23	Coalinga-07	1983	Coalinga-14th & Elm (Old CHP)	0.4	36.1	#	5.2	9.6
24	Morgan Hill	1984	Coyote Lake Dam (SW Abut)	1.0	62.3	6.2	0.5	24.6
25	Morgan Hill	1984	Gilroy Array #6	1.2	35.4	6.2	9.9	36.3
26	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 C00	1.6	31.2	1.2	6.3	68.2
27	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 M07	1.6	36.1	6.1	6.3	67.2
28	N. Palm Springs	1986	North Palm Springs	1.4	73.6	6.1	4.0	10.6
29	San Salvador	1986	Geotech Investig Center	0.9	62.3	5.8	6.3	7.9
30	Whittier Narrows-01	1987	Downey - Co Maint Bldg	0.8	30.4	6.0	20.8	16.0
31	Whittier Narrows-01	1987	LB - Orange Ave	1.0	32.9	6.0	24.5	20.7
32	Superstition Hills-02	1987	Parachute Test Site	2.3	106.8	6.5	1.0	16.0
33	Loma Prieta	1989	Alameda Naval Air Stn Hanger	2.0	32.2	6.9	71.0	90.8
34	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #2	1.7	45.7	6.9	11.1	29.8
35	Loma Prieta	1989	Oakland - Outer Harbor Wharf	1.8	49.2	6.9	74.3	94.0
36	Loma Prieta	1989	Saratoga - Aloha Ave	4.5	55.6	6.9	8.5	27.2
37	Erzican, Turkey	1992	Erzincan	2.7	95.4	6.7	4.4	9.0
38	Cape Mendocino	1992	Petrolia	3.0	82.1	7.0	8.2	4.5
39	Landers	1992	Barstow	8.9	30.4	7.3	34.9	94.8
40	Landers	1992	Lucerne	5.1	140.3	7.3	2.2	44.0
41	Landers	1992	Yermo Fire Station	7.5	53.2	7.3	23.6	86.0
42	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant	3.5	67.4	6.7	5.4	13.0
43	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant Generator	3.5	67.4	6.7	5.4	13.0
44	Northridge-01	1994	LA - Wadsworth VA Hospital North	2.4	32.4	6.7	23.6	19.6
45	Northridge-01	1994	LA Dam	1.7	77.1	6.7	5.9	11.8
46	Northridge-01	1994	Newhall - W Pico Canyon Rd.	2.4	87.8	6.7	5.5	21.6
47	Northridge-01	1994	Pacoima Dam (downstr)	0.5	50.4	6.7	7.0	20.4
48	Northridge-01	1994	Pacoima Dam (upper left)	0.9	107.1	6.7	7.0	20.4
49	Northridge-01	1994	Rinaldi Receiving Sta	1.2	167.2	6.7	6.5	10.9
50	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta	3.5	130.3	6.7	5.4	13.1
51	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta East	3.5	116.6	6.7	5.2	13.6
52	Northridge-01	1994	Sylmar - Olive View Med FF	3.1	122.7	6.7	5.3	16.8
53	Kobe, Japan	1995	Takarazuka	1.4	72.6	6.9	0.3	38.6

ΣΕΙΣΜΟΙ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

54	Kobe, Japan	1995	Takatori	1.6	169.6	6.9	1.5	13.1
55	Kocaeli, Turkey	1999	Gebze	5.9	52.0	7.5	10.9	47.0
56	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY006	2.6	64.7	7.6	9.8	40.5
57	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY035	1.4	42.0	7.6	12.7	43.9
58	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY101	4.8	85.4	7.6	10.0	32.0
59	Chi-Chi, Taiwan	1999	TAP003	3.4	33.0	7.6	102.4	151.7
60	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU029	6.4	62.3	7.6	28.1	79.2
61	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU031	6.2	59.9	7.6	30.2	80.1
62	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU034	8.6	42.8	7.6	35.7	87.9
63	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU036	5.4	62.4	7.6	19.8	67.8
64	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU038	7.0	50.9	7.6	25.4	73.1
65	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU040	6.3	53.0	7.6	22.1	69.0
66	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU042	9.1	47.3	7.6	26.3	78.4
67	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU046	8.6	44.0	7.6	16.7	68.9
68	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU049	11.8	44.8	7.6	3.8	38.9
69	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU053	12.9	41.9	7.6	6.0	41.2
70	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU054	10.5	60.9	7.6	5.3	37.6
71	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU056	12.9	43.5	7.6	10.5	39.7
72	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU060	12.0	33.7	7.6	8.5	45.4
73	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU065	5.7	127.7	7.6	0.6	26.7
74	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU068	12.2	191.1	7.6	0.3	47.9
75	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU075	5.1	88.4	7.6	0.9	20.7
76	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU076	4.0	63.7	7.6	2.8	16.0
77	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU082	9.2	56.1	7.6	5.2	36.2
78	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU087	9.0	53.7	7.6	7.0	55.6
79	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU098	7.5	32.7	7.6	47.7	99.7
80	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU101	10.0	68.4	7.6	2.1	45.1
81	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU102	9.7	106.6	7.6	1.5	45.6
82	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU103	8.3	62.2	7.6	6.1	52.4
83	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU104	12.0	31.4	7.6	12.9	49.3
84	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU128	9.0	78.7	7.6	13.2	63.3
85	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU136	10.3	51.8	7.6	8.3	48.8
86	Northwest China-03	1997	Jiashi	1.3	37.0	6.1	#	19.1
87	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY024	3.2	33.1	6.2	19.7	25.5
88	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY080	1.4	69.9	6.2	22.4	29.5
89	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	TCU076	0.9	59.4	6.2	14.7	20.8
90	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY101	2.8	36.3	6.3	36.0	50.0
91	Yountville	2000	Napa Fire Station #3	0.7	43.0	5.0	#	9.9

*a:* Μέγεθος της ροπής.

*b:* Κοντινότερη απόσταση του καταγραφικού σταθμού από την επιφάνεια διάρρηξης.

*c:* Απόσταση του καταγραφικού σταθμού από το επίκεντρο.

Πίνακας 1.2: Πίνακας της βάσης δεδομένων NGA, με τις καταγραφές που χαρακτηρίζονται ως παλμικές σύμφωνα με την μέθοδο του Baker (Baker, 2007).



## Κεφάλαιο 2

### Κυματίδιο Mavroeidis & Papageorgiou

#### 2.1 Γενικά

Μία ιδιαίτερα σημαντική πρόταση περιγραφής της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου είναι αυτή των *Mavroeidis & Papageorgiou*<sup>38</sup>. Σε άρθρο τους, παρουσιάζεται ένα μοντέλο που στηρίζεται στη διαμόρφωση ενός σύνθετου κυματιδίου (στο εξής θα συμβολίζεται ως *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.

Για τη μελέτη τους χρησιμοποιήθηκε βάση δεδομένων αποτελούμενη από 165 καταγραφές πραγματικών χρονοϊστοριών για διάφορους τύπους ρηγμάτων. Η ένταση των σεισμικών γεγονότων που χρησιμοποιήθηκαν κυμαίνεται μεταξύ 5.6 και 8.1, και τα γεγονότα αυτά προέρχονται από πολλές διαφορετικές περιοχές του πλανήτη, με την προϋπόθεση όμως ότι οι σταθμοί στους οποίους έγιναν οι καταγραφές βρίσκονται εντός ακτίνας 20 χιλιομέτρων από το ρήγμα. Παρά το γεγονός ότι όλοι σχεδόν οι σταθμοί, με εξαίρεση πέντε, βρίσκονται κοντά στα αντίστοιχα γενεσιουργά ρήγματα, οι μισοί μόνο περίπου παρουσιάζουν διακριτό παλμό στη χρονοϊστορία της ταχύτητας. Η λίστα των χρησιμοποιούμενων καταγραφών δίνεται στη συνέχεια.

---

<sup>38</sup> Mavroeidis, G.P., Papageorgiou, A.S.. A mathematical representation of near-fault ground motions, Bulletin of the Seismological Society of America, 2003.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

#	Location	Date	Fault Mechanism*	M <sub>w</sub>	Station	Site Code†	Closest Fault Distance (km)	Component‡	Recorded PGV (cm/sec)	Effect§
1	Parkfield, CA, USA	27-Jun-66	SS	6.20	C02	SL	0.1	SN	75.1	FD
2	San Fernando, CA, USA	09-Feb-71	RV	6.55	PCD	HR	3.0	SN	120.0	FD
3	Gazli, USSR	17-May-76	RV	6.80	KAR	SR	3.0	Rad	60.0	FD
4	Bucharest, Romania	04-Mar-77	RV	7.27	BRI	SL	190.0	SN	74.9	FD
5	Tabas, Iran	16-Sep-78	RV	7.11	TAB	SL	1.2	SP	122.0	FD
6	Coyote Lake, CA, USA	8-Jun-79	SS	5.63	GA6	SR	1.2	SN	47.5	FD
7	Imperial Valley, CA, USA	15-Oct-79	SS	6.50	E04	SL	6.0	SN	78.3	FD
					E05	SL	2.7	SN	91.8	FD
					E06	SL	0.3	SN	112.0	FD
					E07	SL	1.8	SN	109.0	FD
					EMO	SL	1.2	SN	115.0	FD
8	Mexicali Valley, Mexico	9-Jun-80	SS	6.37	VCT	SL	3.0	SN	76.7	FD
9	Morgan Hill, CA, USA	24-Apr-84	SS	6.15	HAL	SL	2.0	SN	39.8	FD
10	Palm Springs, CA, USA	8-Jul-86	OB	6.09	NPS	SL or SR	4.0	SN	73.6	FD
					DSP	SL	6.4	SN	29.2	FD
11	Whittier Narrows, CA, USA	10-Oct-87	RV	5.93	DOW	SL	16.4	SN	30.7	FD
					NWK	SL	15.7	SN	20.0	FD
12	Superstition Hills, CA, USA	24-Nov-87	SS	6.40	PTS	?	0.7	SN	109.0	FD
					ELC	SL	13.6	SN	52.0	FD
13	Loma Prieta, CA, USA	17-Oct-89	OB	6.90	LGP	HR	3.0	SN	102.0	FD
					STG	SL	8.3	SN	56.4	FD
14	Sierra Madre, CA, USA	28-Jun-91	RV	5.56	COG	?	9.4	Rad (filt)	15.3	FD
15	Erzincan, Turkey	13-Mar-92	SS	6.63	ERZ	SL	2.0	SN	95.2	FD
16	Landers, CA, USA	28-Jun-92	SS	7.20	LUC	SL	1.1	SN	114.0	FD
17	Northridge, CA, USA	17-Jan-94	RV	6.70	JFA	SL	5.2	SN	105.0	FD
					RRS	SL	6.0	SN	173.0	FD
					SCG	SL	5.1	SN	134.0	FD
					SCH	SL	5.0	SN	122.0	FD
					NWS	SL	5.3	SN	117.0	FD
18	Aigion, Greece	15-Jun-95	NM	6.33	AEG	SL or SR	6.0	Long	40.9	FD
					AEG	SL or SR	6.0	Tran	52.0	FD
19	Izmit, Turkey	17-Aug-99	SS	7.40	ARC	SR	14.0	SN	44.3	FD
					SKR	SR	3.1	SP	80.3	PT
					YPT	SL	2.6	SP	87.8	PT
					GBZ	SR	11.0	SN	41.4	FD
					GBZ	SR	11.0	SP	28.7	PT
20	Chi-Chi, Taiwan	20-Sep-99	OB	7.60	TCU052	SL	0.8	SN	270.0	PT
					TCU068	SL	0.2	SN	380.0	PT
					TCU075	SL	0.6	SN	115.0	FD
					TCU076	SL	2.3	SN	88.0	FD
					TCU129	SL	1.5	SN	68.0	FD

\*SS, strike-slip; RV, reverse; OB, oblique; NM, normal.

†HR, hard rock; SR, sedimentary and conglomerate rock; SL, soil and alluvium.

‡SN, strike-normal; SP, strike-parallel; Rad, radial; Long, longitudinal; Tran, transverse.

§FD, forward directivity; PT, permanent translation.

Πίνακας 2.1: Καταγραφές κοντινού πεδίου με διακριτό παλμό ταχύτητας (Mavroeidis & Papageorgiou, 2003)

## 2.2 Κυματίδιο προσομοίωσης του παλμού

Για την προσομοίωση της εδαφικής κίνησης στην οποία περιέχεται παλμός, κατά καιρούς στη σεισμολογία έχουν προταθεί διάφορες μαθηματικές εκφράσεις όπως δόθηκαν στον Πίνακα 1.1, κεφάλαιο 1, παράγραφος 1.6.1. Μια διαφορετική προσέγγιση έγινε από τους Mavroeidis & Papageorgiou<sup>39</sup>, η πρόταση των οποίων βασίζεται στη χρήση των κυματομορφών. Το μοντέλο το οποίο επιλέγεται, από τους προαναφερθέντες, πρέπει να πληροί τις ακόλουθες προϋποθέσεις. Αρχικά, το σύνθετο κυματίδιο πρέπει να έχει μία απλή μαθηματική έκφραση, με τον ελάχιστο αριθμό απαιτούμενων παραμέτρων, που έχουν φυσικό νόημα, για την κατά το δυνατόν ακριβέστερη αναπαράσταση των παλμών. Στη συνέχεια, το σύνθετο κυματίδιο πρέπει να μπορεί να προσομοιάσει τις περισσότερες, ή ιδανικά όλες, τις παλμικές καταγραφές κοντινού πεδίου της βάσης δεδομένων που δίνεται παραπάνω στον πίνακα 2.2. Τέλος, η μαθηματική έκφραση του κυματιδίου είναι απαραίτητο να επιτρέπει την ανάπτυξη κλειστών λύσεων για την εκτίμηση φασμάτων απόκρισης και τον προσδιορισμό των φασματικών χαρακτηριστικών σε μορφή Fourier. Ο λόγος είναι ότι τέτοιες κλειστές λύσεις διευκολύνουν την παραμετρική εκτίμηση της απόκρισης των κατασκευών σε παλμούς κοντινού πεδίου.

Από τις κυματομορφές που έχουν προταθεί και δίνονται στον πίνακα 1.1, του αντίστοιχου κεφαλαίου 1 στην παράγραφο 1.6.1, τις ανάγκες αναπαράστασης ενός σεισμικού γεγονότος κοντινού πεδίου, ικανοποιεί στον μεγαλύτερο βαθμό το κύμα Gabor. Όμως, με το κύμα Gabor δεν υπάρχει

---

<sup>39</sup> Mavroeides, G.P., Papageorgiou, *ibid.*

λύση κλειστού τύπου υπό ορισμένες συνθήκες, όπως είναι επιθυμητό. Αυτή η δυσκολία συναντάται επειδή ένα μέρος της μαθηματικής έκφρασης είναι εκθετικό. Για το λόγο αυτό οι Mavroeidis and Parageorgiou αντικατέστησαν το εκθετικό μέρος της μαθηματικής έκφρασης με μια άλλη συμμετρική κωδωνοειδούς μορφής συνάρτηση, που έχει απλούστερη έκφραση. Συνεπώς, το μοντέλο που προτείνουν φαίνεται παρακάτω.

$$f(t) = A \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma} t\right) \right] \cos(2\pi f_p t + \nu) \quad (2.1)$$

Σε ότι αφορά το προτεινόμενο μοντέλο πρέπει να επισημανθούν τα εξής:

- Ο μετατοπισμένος κύκλος συνημιτόνου είναι μία περιοδική συνάρτηση και δεν παρουσιάζει μόνο μία κορυφή, όπως η περιβάλλουσα Gauss του κυματιδίου Gabor. Επομένως, λαμβάνεται σαν πεδίο ορισμού του σήματος το παρακάτω χρονικό διάστημα

$$\frac{-\gamma}{2f_p} \leq t \leq \frac{\gamma}{2f_p} \quad (2.2)$$

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

$$\frac{1}{f_p} < \frac{\gamma}{f_p} \rightarrow \gamma > 1 \quad (2.3)$$

- Για την ανάπτυξη του μοντέλου, είναι χρηστική η εισαγωγή μιας χρονικής στιγμής  $t_0$  στην εξίσωση (2.1) για τον προσδιορισμό της περιοχής του μέγιστου της περιβάλλουσας. Η παράμετρος αυτή εισάγεται συχνά στα διάφορα μοντέλα κυματιδίων που χρησιμοποιούνται στη σεισμολογία, επιτρέποντας έτσι τη μετάθεση του σήματος κατά μήκος του χρονικού άξονα. Δηλαδή,

$$t \rightarrow t - t_0 \quad (2.4)$$

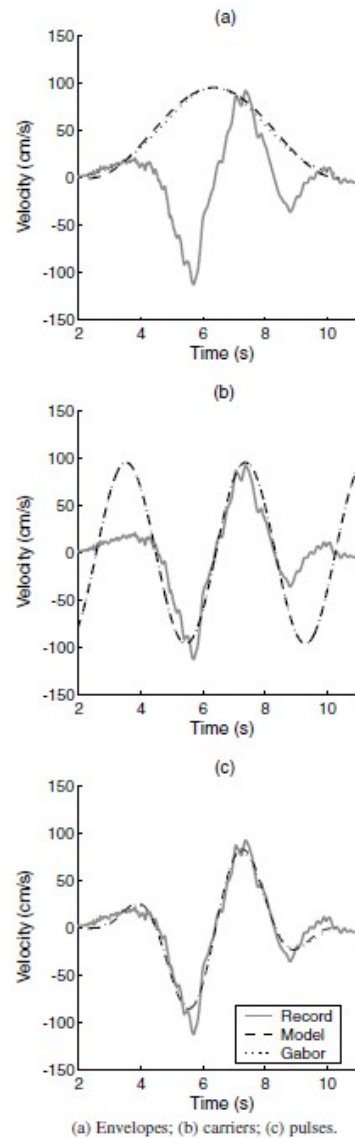


Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει η τελική εξίσωση του προτεινόμενου μοντέλου για τους παλμούς ταχύτητας των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου.

$$v(t) = \begin{cases} A \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_0)\right) \right] \cos[2\pi f_p(t-t_0) + \nu], & t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_p} \text{ with } \gamma > 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.5)$$

Η παράμετρος  $A$  ελέγχει το εύρος της εδαφικής ταχύτητας.  $f_p$  είναι η συχνότητα του σήματος,  $\nu$  η διαφορά φάσης της ημιτονικής συνιστώσας ( $\nu=0$  και  $\nu=\pm\pi/2$ , για συμμετρικό και αντισυμμετρικό σήμα αντίστοιχα),  $\gamma$  το γινόμενο της διάρκειας της εδαφικής ταχύτητας επί την συχνότητα  $f_p$  και  $t_0$  η περιοχή της κορυφής της περιβάλλουσας.

Προκειμένου να αποδειχθεί ότι το προτεινόμενο μοντέλο παράγει παλμούς οι οποίοι αποτελούν μια καλή προσέγγιση του κυματιδίου Gabor, καθώς επίσης και για να επιβεβαιωθεί η αντικατάσταση της περιβάλλουσας Gauss με τη μετατοπισμένη συνημιτονική συνάρτηση, παρήχθησαν σήματα και με τις δύο μεθόδους. Πιο συγκεκριμένα, προσομοιάστηκε ο παλμός ταχύτητας της καταγραφής του σεισμού στο Imperial Valley το 1979, όπως καταγράφηκε από το σταθμό E06. Στη συνέχεια φαίνεται η πολύ καλή προσέγγιση μεταξύ των δύο παλμών και του ημιτονικού σήματος, καθώς επίσης και η σχεδόν ταύτιση των δύο κωδωνοειδών περιβαλλουσών.



Σχήμα 2.1: Σύγκριση του μοντέλου Gabor με την πρόταση των Mavroeidis and Papageorgiou (Mavroeidis and Papageorgiou, 2003).

Στη συγκεκριμένη μέθοδο, ο καθορισμός της διάρκειας του παλμού γίνεται βάσει των παραμέτρων που εισάγονται στο μοντέλο. Η περίοδος του παλμού  $T_p$ , ορίζεται ως το αντίστροφο της συχνότητας  $f_p$ , έτσι ώστε να υπάρχει σύμπτωση μεταξύ της δεσπόζουσας περιόδου του φάσματος ταχυτήτων της πραγματικής καταγραφής και της δεσπόζουσας περιόδου του φάσματος που προκύπτει από την απλοποιημένη μαθηματική προσομοίωση.

Οι αναλυτικές σχέσεις από τις οποίες προκύπτουν η εδαφική επιτάχυνση και η μετακίνηση είναι:

$$\alpha(t) = \begin{cases} -\frac{A\pi f_p}{\gamma} \left[ \begin{array}{l} \sin\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_0)\right) \cos[2\pi f_p(t-t_0)+v] \\ +\gamma \cdot \sin[2\pi f_p(t-t_0)+v] \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_0)\right)\right] \end{array} \right], & t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_p} \text{ με } \gamma > 1 \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (2.6)$$

$$d(t) = \begin{cases} \left[ \begin{array}{l} \frac{A}{4\pi f_p} \left[ \sin[2\pi f_p(t-t_0)+v] + \frac{1}{2} \frac{\gamma}{\gamma-1} \sin\left[\frac{2\pi f_p(\gamma-1)}{\gamma}(t-t_0)+v\right] \right] \\ + \frac{1}{2} \frac{\gamma}{\gamma+1} \sin\left[\frac{2\pi f_p(\gamma+1)}{\gamma}(t-t_0)+v\right] \end{array} \right] + C, & t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_p} \text{ with } \gamma > 1 \\ \frac{A}{4\pi f_p} \frac{1}{(1-\gamma^2)} \sin(v-\pi\gamma) + C, & t < t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \\ \frac{A}{4\pi f_p} \frac{1}{(1-\gamma^2)} \sin(v+\pi\gamma) + C, & t > t_0 + \frac{\gamma}{2f_p} \end{cases} \quad (2.7)$$

Είναι απαραίτητο να ικανοποιούνται οι συνθήκες συνέχειας για  $t = t_0 - \gamma/2f_p$  και  $t = t_0 + \gamma/2f_p$ , και με τη συνθήκη αυτή προσδιορίζονται οι σταθερές τιμές της μετακίνησης για  $t < t_0 - \gamma/2f_p$  και για  $t > t_0 + \gamma/2f_p$ . Προκειμένου να προσδιοριστεί η μετακίνηση, ολοκληρώνεται η ταχύτητα με αποτέλεσμα να προκύψει μια σταθερά C, η οποία απλοποιητικά μπορεί να θεωρηθεί ίση με το μηδέν.

### 2.3 Προσαρμογή του μοντέλου στις καταγραφές της βάσης δεδομένων

Το προτεινόμενο μοντέλο εφαρμόζεται στις χρονοϊστορίες μετακινήσεων, ταχυτήτων και επιταχύνσεων, όπως επίσης και στα ελαστικά φάσματα απόκρισης για τις πραγματικές καταγραφές του Πίνακα 2.1. Οι τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

#	Location	Station	Component*	A	$\gamma$	$\nu$ ( $^\circ$ )	$f_P$ (Hz)	$t_0$ (sec)
1	Parkfield, CA, USA	C02	SN	60.0	1.700	100.0	0.500	4.100
2	San Fernando, CA, USA	PCD	SN	115. 0	1.600	180.0	0.680	3.000
3	Gazli, USSR	KAR	Rad	45.0	2.900	70.0	0.238	8.400
4	Bucharest, Romania	BRI	SN	62.0	2.400	200.0	0.470	3.830
5	Tabas, Iran	TAB	SP	104. 0	2.200	180.0	0.190	12.400
6	Coyote Lake, CA, USA	GA6	SN	48.0	1.550	315.0	1.000	2.600
7	Imperial Valley, CA, USA	E04	SN	71.0	1.900	305.0	0.225	6.100
		E05	SN	84.0	1.900	300.0	0.255	6.600
		E06	SN	96.0	2.100	265.0	0.260	6.350
		E07	SN	79.0	2.100	25.0	0.275	6.100
		EMO	SN	78.0	2.300	0.0	0.340	4.950
8	Mexicali Valley, Mexico	VCT	SN	80.0	1.500	270.0	0.270	11.550
9	Morgan Hill, CA, USA	HAL	SN	38.0	1.750	130.0	1.150	10.450
10	Palm Springs, CA, USA	NPS	SN	60.0	1.700	170.0	0.800	2.890
		DSP	SN	21.0	2.000	80.0	0.600	2.520
11	Whittier Narrows, CA, USA	DOW	SN	29.0	2.200	220.0	1.200	5.350
		NWK	SN	20.0	2.100	200.0	1.350	4.300
12	Superstition Hills, CA, USA	PTS	SN	112. 0	1.800	237.0	0.445	12.295
		ELC	SN	46.0	1.650	210.0	0.430	13.180
13	Loma Prieta, CA, USA	LGP	SN	60.0	3.000	280.0	0.310	7.600
		STG	SN	47.0	1.900	150.0	0.270	6.500
14	Sierra Madre, CA, USA	COG	Rad (filt)	9.2	2.300	260.0	1.100	2.190
15	Erzincan, Turkey	ERZ	SN	67.0	2.500	210.0	0.410	3.700
16	Landers, CA, USA	LUC	SN	100. 0	1.210	55.0	0.170	10.500
17	Northridge, CA, USA	JFA	SN	87.0	2.300	100.0	0.330	4.120
		RRS	SN	142. 0	1.700	20.0	0.800	2.430
		SCG	SN	93.0	2.500	0.0	0.340	3.650
		SCH	SN	80.0	2.300	0.0	0.330	3.770
		NWS	SN	94.0	1.700	200.0	0.370	4.770
18	Aigion, Greece	AEG	Long	44.5	1.450	75.0	1.400	3.840
		AEG	Tran	61.0	1.200	205.0	1.480	4.340
19	Izmit, Turkey	ARC	SN	41.0	1.380	225.0	0.140	14.700
		SKR	SP	67.0	1.023	5.0	0.105	9.000
		YPT	SP (first pulse)	35.0	1.550	90.0	0.190	9.150
			SP (second pulse)	91.5	1.050	10.0	0.137	12.050
		GBZ	SN	34.5	2.200	220.0	0.210	6.600
		GBZ	SP	28.0	1.800	85.0	0.165	4.900
20	Chi-Chi, Taiwan	TCU05 2	SN	225. 0	1.048	190.0	0.079	35.400
		TCU06 8	SN	332. 0	1.055	190.0	0.082	36.300
		TCU07 5	SN	105. 0	1.200	220.0	0.170	28.500
		TCU07 6	SN	70.0	1.088	200.0	0.175	27.280
		TCU12 9	SN	52.0	1.090	200.0	0.130	27.100
21	Kobe, Japan†	KOB	SN (first pulse)	85.0	1.550	270.0	1.000	7.600
			SN (second pulse)	75.0	1.700	270.0	1.100	8.400
			SN (third pulse)	45.0	2.000	70.0	0.500	9.300

\*Component abbreviations are as in Table 1.

†Not characterized by a distinct near-fault ground velocity pulse (i.e., thus, not included in Table 1).

Πίνακας 2.2: Παράμετροι για την εφαρμογή του μοντέλου στις καταγραφές κοντινού πεδίου (Mavroeidis and Papageorgiou, 2003).

Για την εκτίμηση των παραμέτρων  $T_p$ ,  $A$ ,  $\nu$  και  $\gamma$  ακολουθείται η μέθοδος βήμα-προς-βήμα και όχι η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων. Η περίοδος  $T_p$  καθορίζεται σύμφωνα με την παραδοχή της συσχέτισης ανάμεσα στην περίοδο του παλμού κατευθυντικότητας και στη δεσπόζουσα περίοδο της φασματικής ταχύτητας. Η περίοδος  $T_p$ , σύμφωνα με τους μελετητές, δε συμπίπτει απαραίτητα με τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος, αν και η τιμή της είναι συνήθως κοντά. Οι παράμετροι  $A$ ,  $\nu$  και  $\gamma$  προσεγγίζονται με σειρά δοκιμών προκειμένου να επιτευχθεί καλή σύμπτωση του προσομοιώματος με την πραγματική χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας και 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.

Η εκτίμηση των παραμέτρων προσομοίωσης του παλμού θα μπορούσε να γίνει μέσω της προσαρμογής του μοντέλου στις πραγματικές χρονοϊστορίες ταχύτητας των καταγραφών και στη συνέχεια να γίνει χρήση αυτών για τη σύνθεση των χρονοϊστοριών επιτάχυνσης και μετακίνησης καθώς και των φασμάτων απόκρισης. Ωστόσο, παρόλο που με τη διαδικασία αυτή οι παραγόμενοι παλμοί ταχύτητας θα προσέγγιζαν επαρκώς τις αντίστοιχες καταγραφές, η ικανοποιητική αναπαράσταση των χρονοϊστοριών μετακίνησης και των φασμάτων απόκρισης δε θα ήταν δεδομένη. Έτσι, οι *Mavroeidis & Papageorgiou*<sup>40</sup> επέλεξαν να προσαρμόσουν το μαθηματικό μοντέλο ταυτόχρονα στις χρονοϊστορίες και στα φάσματα απόκρισης για την καλύτερη διακρίβωση των χαρακτηριστικών του παλμού.

Ως αποτέλεσμα της έρευνας, προκύπτει ότι το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο προσομοιάζει επαρκώς όλες τις χρονοϊστορίες μετακίνησης, ταχύτητας και πολλές φορές και επιτάχυνσης των

<sup>40</sup> Mavroeidis, G.P., Papageorgiou, *ibid*.

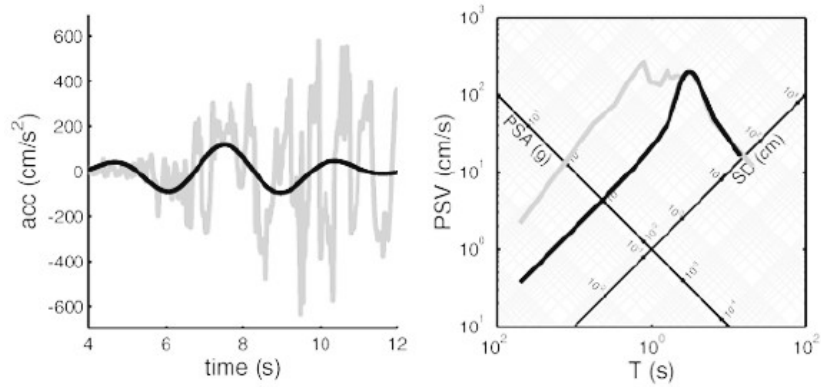
καταγραφών, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά (Σχήμα 2.2 και 2.3). Σημειώνεται ότι η εν λόγω μέθοδος αποσκοπεί στην καλή αναπαράσταση των εδαφικών κινήσεων στις μεσαίες και μεγάλες περιόδους. Συνεπώς, οι υψίσυχνες περιοχές των επιταχυνσιογραφημάτων, δεν μπορούν να προσομοιωθούν με το παρόν μοντέλο. Επίσης, τα ελαστικά φάσματα απόκρισης που προκύπτουν συνάδουν με τα πραγματικά στην περιοχή της δεσπόζουσας συχνότητας του παλμού. Για σεισμούς μεσαίας έντασης, όπου οι παλμοί ταχυτήτων χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρή διάρκεια, υπάρχει συμφωνία μεταξύ παραγόμενου και πραγματικού φάσματος, σε όλο το εύρος συχνοτήτων. Αντίθετα, για σεισμούς μεγάλης έντασης, οι παλμοί έχουν μεγάλη διάρκεια και τα φάσματα συμπίπτουν μόνο στην περιοχή των μεγάλων περιόδων.

Οι πραγματικές καταγραφές είναι δυνατό να αποτελούνται από περισσότερους από έναν διακριτούς παλμούς που οφείλονται σε σχετική ολίσθηση τεμαχών στη ρηξιγενή περιοχή. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μπορεί να γίνει χρήση μιας αλληλουχίας παλμών για την ακριβή προσομοίωση της εδαφικής κίνησης. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα της καταγραφής του σταθμού Yarımca<sup>41</sup>, καθώς και η κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της καταγραφής του σταθμού Kobe<sup>42</sup>. Οι ιδιότητες των διακριτών παλμών φαίνονται στον Πίνακα 2.2. Μία σύντομη εξέταση των τιμών των παραμέτρων του Πίνακα 2.2, δείχνει ότι το  $\gamma$  κυμαίνεται μεταξύ 1÷3. Όταν το  $\gamma$  πλησιάζει τη μονάδα, το  $\nu$  παίρνει τιμές κοντά στις 0° ή 180° και ο παλμός είναι συμμετρικός. Αντίθετα, σε περιπτώσεις κυματομορφών με πολλές αρμονικές, το  $\gamma$  παίρνει μεγαλύτερες τιμές. Τέλος, οι τιμές του εύρους  $A$  (Πίνακας 2.2) είναι ελάχιστα μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας  $PGV$ .

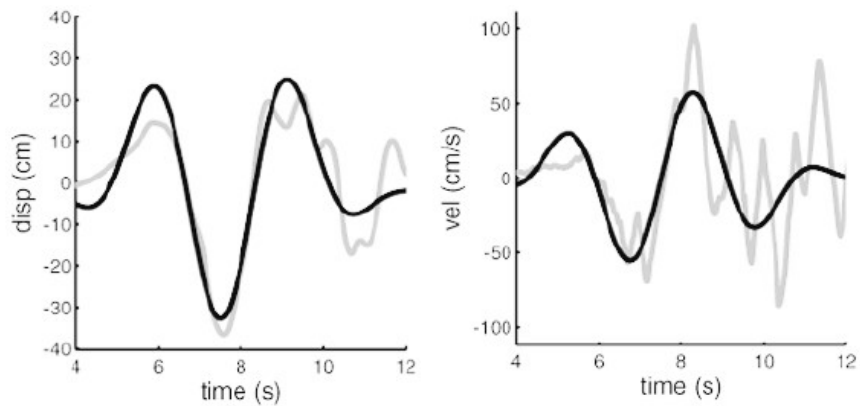
---

<sup>41</sup> YPT, Izmit, Turkey, 1999.

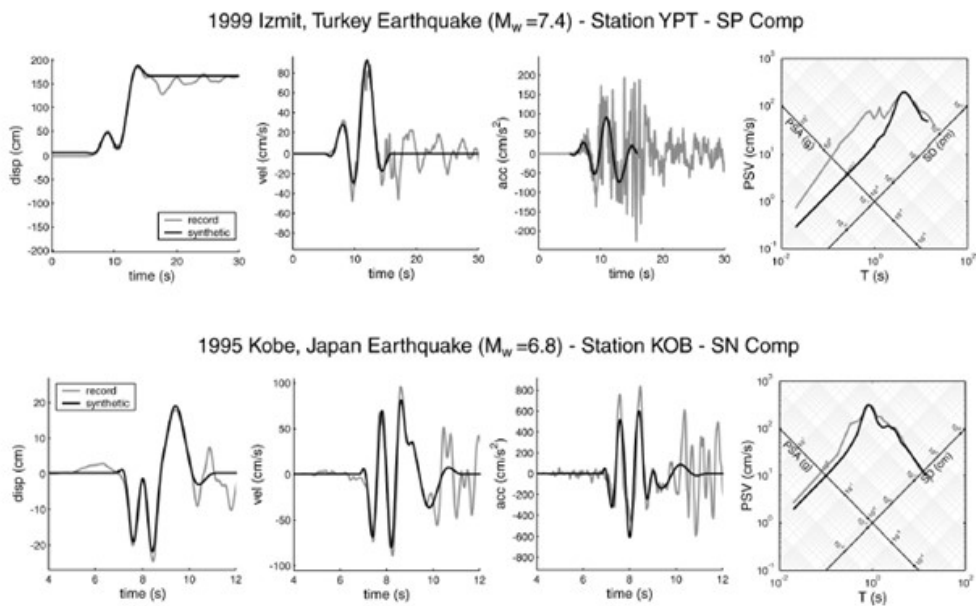
<sup>42</sup> KOB, Kobe, Japan 1995.



Σχήμα 2.2: Χρονοϊστορία επιταχύνσεων και φάσμα ταχυτήτων προσομοίωσης (Loma Prieta 1989 Station STG).



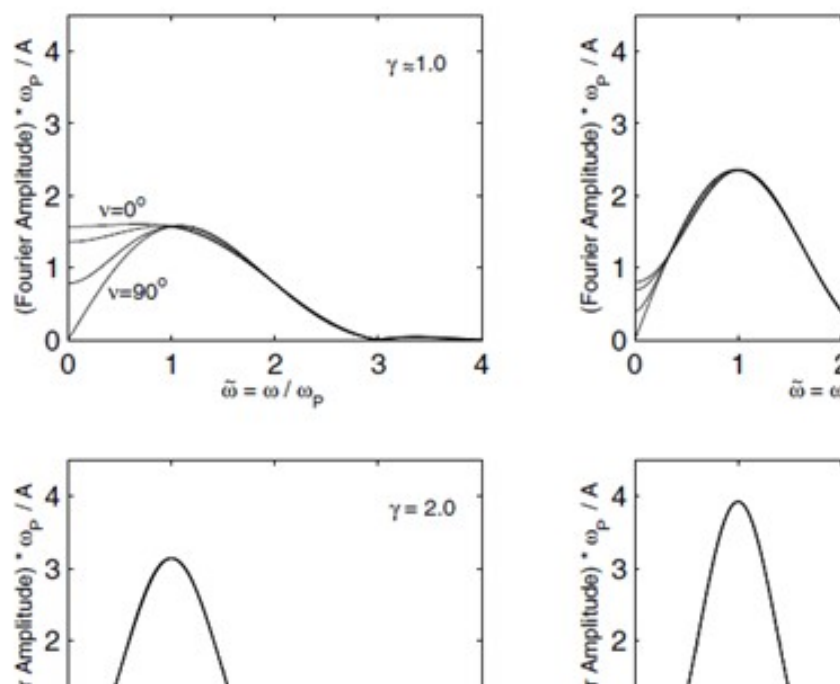
Σχήμα 2.3: Προσομοίωση παλμού (Loma Prieta 1989 Station STG).



Σχήμα 2.4: Εφαρμογή του μοντέλου στην καταγραφή του σταθμού Yarımca (YPT, Izmit, Turkey (1999)) και στην καταγραφή του σταθμού Kobe (KOB, Kobe, Japan (1995)).

## 2.4 Επίδραση του αναλυτικού μοντέλου στα ελαστικά φάσματα απόκρισης

Η αναλυτική μορφή της προσομοίωσης του παλμού από τους *Mavroeidis & Papageorgiou*<sup>43</sup>, επιτρέπει την διατύπωση κλειστών σχέσεων για το φάσμα *Fourier* της εδαφικής ταχύτητας. Ορίζοντας ως κανονικοποιημένη συχνότητα (Normalized frequency)  $\tilde{\omega} = \omega / \omega_p$ , έγινε παραμετρική μελέτη του κανονικοποιημένου ως προς  $\omega_p$  και  $A$  μετασχηματισμού *Fourier* του παλμού. Στο Σχήμα 2.5 φαίνεται η μεταβολή του, συναρτήσει του  $\tilde{\omega}$  για χαρακτηριστικές τιμές των παραμέτρων  $\gamma$  και  $\nu$ . Είναι φανερό ότι για σταθερές τιμές των  $\omega_p$  και  $A$ , το φάσμα *Fourier* είναι συνάρτηση της παραμέτρου  $\gamma$ , ενώ η διαφορά φάσης  $\nu$  το επηρεάζει μόνο για τιμές του  $\gamma$  κοντά στη μονάδα και περιόδους μεγαλύτερες της  $T_p$ .

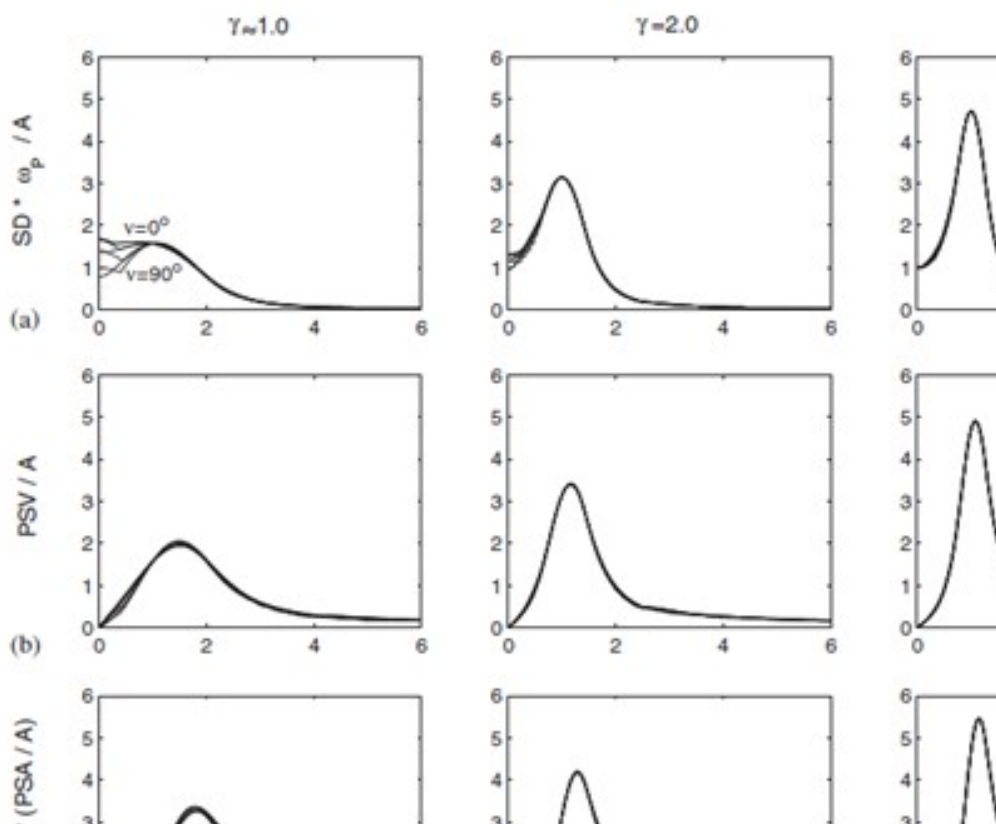


Σχήμα 2.5: Μεταβολή του κανονικοποιημένου ως προς  $\omega_p$  και  $A$  μετασχηματισμού *Fourier* του παλμού συναρτήσει της κανονικοποιημένης συχνότητας  $\tilde{\omega}$  (Mavroeidis and Papageorgiou, 2003).

<sup>43</sup> Mavroeidis, G.P., Papageorgiou, *ibid*.



Αντίστοιχα, θεωρώντας ως κανονικοποιημένη συχνότητα  $\tilde{\omega} = \omega_n / \omega_p = \omega_n / 2\pi f_p$ , σε επόμενη δημοσίευση τους<sup>44</sup>, εξέτασαν την μεταβολή του κανονικοποιημένου φάσματος απόκρισης γραμμικού μονοβάθμιου συστήματος για χαρακτηριστικές τιμές των  $\gamma$  και  $\nu$ . Από το Σχήμα 2.6 **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** φαίνεται ότι η μεταβολή του  $\nu$  δεν επηρεάζει σημαντικά το φάσμα απόκρισης, ειδικά για μεγάλες τιμές του  $\gamma$ . Αντίθετα, όσο αυξάνεται η τιμή του  $\gamma$ , αυξάνονται και οι τιμές του φάσματος.

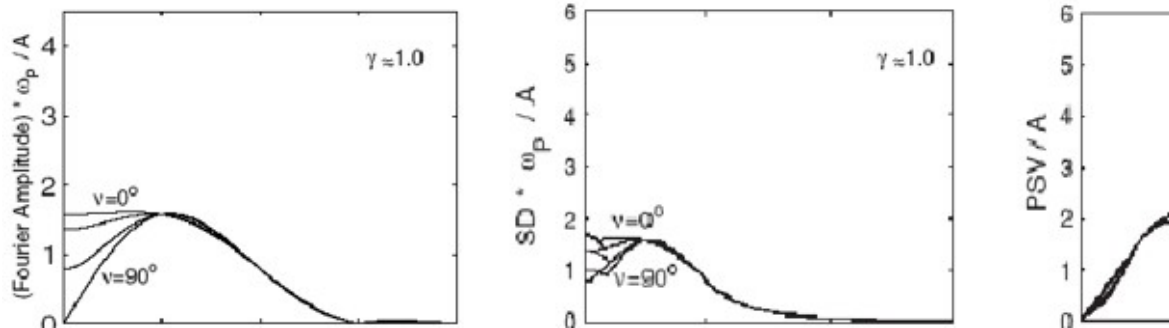


Σχήμα 2.6: Μεταβολή του κανονικοποιημένου φάσματος απόκρισης γραμμικού μονοβάθμιου συστήματος για χαρακτηριστικές τιμές των  $\gamma$  και  $\nu$  (Μαυροειδής και Παπαγεωργίου, 2003).

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί η συσχέτιση που υπάρχει ανάμεσα στο φάσμα μετακινήσεων και στο φάσμα *Fourier* του παλμού κατευθυντικότητας στην περίπτωση όπου η παράμετρος  $\gamma$  ισούται με 1.

<sup>44</sup> Μavroeidis et al., 2004.

Στην περίπτωση αυτή, οι μέγιστες τιμές των δύο φασμάτων αντιστοιχούν στη συχνότητα του παλμού, ενώ η μέγιστη τιμή του φάσματος ταχυτήτων αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη συχνότητα (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7: Φάσμα Fourier παλμού και φάσματα μετακινήσεων και ταχυτήτων με παράμετρο  $\gamma=1$  (Μανροειδής and Παπαγεωργίου, 2003).

## Κεφάλαιο 3

### Προσδιορισμός του περιεχόμενου παλμού με χρήση του φάσματος συνέλιξης

#### 3.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, εντοπίζονται σημαντικοί παλμοί στις χρονοϊστορίες ταχυτήτων, οι οποίοι συσχετίζονται κυρίως με τη διεύθυνση κάθετα στη διεύθυνση του ρήγματος, ενισχύοντας την μεγαλοπερίοδη σταθμισμένη συνιστώσα της εδαφικής κίνησης στις χρονοϊστορίες ταχυτήτων, μετακινήσεων και στα αντίστοιχα φάσματα. Στόχος λοιπόν, είναι ο προσδιορισμός των παραμέτρων που σχετίζονται με τον περιεχόμενο παλμό ταχυτήτων που περιέχεται στην παλμική εδαφική κίνηση. Ιδιαιτερότητα αυτής της μεθοδολογίας, αποτελεί το γεγονός ότι μπορεί να εφαρμοσθεί σε οποιαδήποτε χρονοϊστορία έχει χαρακτηριστεί ως παλμική, ανεξαρτήτως εάν προκαλείται λόγω κατευθυντικότητας ή όχι.

Ο προσδιορισμός του παλμού ταχυτήτων που περιέχεται σε μία παλμική εδαφική κίνηση είναι πολύ σημαντικός για δύο λόγους. Πρώτον, επιτρέπει τη δημιουργία τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων, αποτελούμενα από τις πραγματικές συνθήκες και χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης που έχουν καταγραφεί. Αυτά τα επιταχυνσιογραφήματα είναι απαραίτητα για τις μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας κατασκευών, όπου προκειμένου να εκτιμηθεί η συμπεριφορά τους απαιτείται μεγάλος αριθμός εδαφικών διεγέρσεων, ενώ αντιθέτως το πλήθος των πραγματικών καταγεγραμμένων εδαφικών κινήσεων είναι περιορισμένο.

Εν γένει, σύμφωνα με την μεθοδολογία που ακολουθείται συνήθως για τη δημιουργία συνθετικών παλμικών εδαφικών κινήσεων, το συχνотικό περιεχόμενο της πραγματικής εδαφικής κίνησης μπορεί να διαχωριστεί σε δύο συνιστώσες. Η πρώτη είναι η υψίσυχνη μη σταθμισμένη συνιστώσα, που παράγεται με στοχαστικές διαδικασίες λαμβάνοντας υπόψη την

κατανομή της σεισμικής ροπής στο επίπεδο του ρήγματος, όπως έχει προταθεί από τους Bereznev and Atkinson<sup>45</sup>, Boore<sup>46</sup>, Motazedian and Atkinson<sup>47</sup> και άλλους. Η δεύτερη συνιστώσα είναι σταθμισμένη, χαμηλού συχνοτικού περιεχομένου και συνδέεται με τον παλμό που περιέχεται στην εδαφική κίνηση. Μέθοδοι συνδυασμού των δύο αυτών συνιστωσών έχουν προταθεί από διάφορους μελετητές μεταξύ των οποίων και οι Mavroeidis and Papageorgiou<sup>48</sup>.

Δεύτερον, δίνει τη δυνατότητα να επιλέγονται καταλληλότερες χρονοϊστορίες και να πολλαπλασιάζονται με επαυξητικό ή μειωτικό συντελεστή για την εκτέλεση των γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων. Λόγω της σπουδαιότητας όλων των παραπάνω, έχουν προταθεί πολλές μαθηματικές εκφράσεις, άλλες απλούστερες και άλλες αποτελούμενες από συνθετότερα κυματίδια. Ένα ικανοποιητικά επαρκές κυματίδιο προτάθηκε από τους Mavroeidis and Papageorgiou<sup>49</sup>, το οποίο εισήγαγε πρόσθετες παραμέτρους που αφορούν τη συνολική διάρκεια και τη διαφορά φάσης του παλμού. Στη μεθοδολογία που αναπτύσσεται στη συνέχεια χρησιμοποιείται το κυματίδιο αυτό, αφού η μέθοδος είναι φασματικά προσανατολισμένη.

### 3.2 Προτεινόμενη μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που προτείνεται, βασίζεται κυρίως στο φάσμα μετακινήσεων - ταχυτήτων ( $S_d \times S_v$ ) που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της περιόδου του παλμού, και σε μία νέα σχέση μεταξύ της αθροιστικής απόλυτης μετακίνησης (CAD) της εδαφικής κίνησης και της μέγιστης τιμής του φάσματος μετακινήσεων, βάσει της οποίας προσδιορίζονται οι εναπομένουσες παράμετροι του κυματιδίου<sup>50</sup>.

<sup>45</sup> Bereznev and Atkinson, 1998.

<sup>46</sup> Boore DM. Simulation of ground motion using the stochastic method, 2003.

<sup>47</sup> Motazedian and Atkinson, 2005.

<sup>48</sup> Mavroeidis, G.P., Papageorgiou, op. cit.

<sup>49</sup> Mavroeidis, G.P., Papageorgiou, ibid.

<sup>50</sup> Mimoglou P, Psycharis I., Taflampas I.. Explicit determination of the pulse inherent in pulse like ground motions, IAEE, Athens, 2014.

### 3.2.1 Μαθηματική έκφραση του παλμού ταχυτήτων

Στη συγκεκριμένη μέθοδο, επιλέγεται η έκφραση του κυματιδίου με την εξίσωση που προτάθηκε από τους Mavroeidis and Papageorgiou<sup>51</sup>. Για το εν λόγω κυματίδιο, απαιτούνται τέσσερις παράμετροι για τον προσδιορισμό του παλμού, η περίοδος  $T_p$  της αρμονικής ταλάντωσης του κυματιδίου, το εύρος της  $A$ , το πλήθος  $\gamma$  των κύκλων της αρμονικής ταλάντωσης του κυματιδίου και  $\nu$  η διαφορά φάσης. Προφανώς ισχύει,  $\gamma = t_p/T_p > 1$ . Με βάση τη διάρκεια του κυματιδίου προκύπτει η σωστή φασματική ενίσχυση, η διαφορά φάσης ελέγχει το σχήμα του κυματιδίου προκειμένου να ταυτίζεται κατά το βέλτιστο τρόπο με τη χρονοϊστορία των ταχυτήτων, και ο αριθμός κύκλων  $\gamma$  επηρεάζει την ικανότητα του κυματιδίου να ταιριάζει επαρκώς με παλμική εδαφική κίνηση<sup>52</sup>.

### 3.2.2 CAD και μέγιστο φασματικό εύρος

Όπως εξηγήθηκε παραπάνω το εύρος του κυματιδίου υπολογίζεται με σκοπό το φάσμα μετακινήσεων του παλμού να ταυτίζεται με το φάσμα της καταγραφής. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, χρησιμοποιείται η απόλυτη αθροιστική μετακίνηση της εδαφικής κίνησης (CAD)<sup>53</sup>, που σχετίζεται με τη φασματική μετακίνηση. Η CAD ορίζεται από τη σχέση

$$CAD = \int_0^{t_{tot}} |v_g| dt \quad (3.1)$$

Παλαιότερα, από τους Baker, Zamora, Riddell<sup>54</sup> έχουν χρησιμοποιηθεί παρόμοιες σχέσεις, ολοκληρώνοντας στο χρόνο το τετράγωνο της επιτάχυνσης ή της ταχύτητας, ως μέτρο έντασης του παλμικού περιεχομένου της εδαφικής κίνησης.

---

<sup>51</sup> Mavroeides, G.P., Papageorgiou, op. cit.

<sup>52</sup> Vassiliou MF, Makris N.. Estimating time scales and length scales in pulselike earthquake acceleration records with wavelet analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, 2011.

<sup>53</sup> Mimoglou P, Psycharis I., Taflampas I., op. cit.

<sup>54</sup> Baker J.W., op. cit.

Zamora M., Riddell R.. Elastic and inelastic response spectra considering near-fault effects, Journal of Earthquake Engineering, 2011.

Στη συνέχεια γίνεται η θεώρηση μίας αρμονικής εδαφικής κίνησης με εύρος  $d_{g,max}$ , που εφαρμόζεται ως διέγερση βάσης σε μονοβάθμιο ταλαντωτή χωρίς απόσβεση. Στο συντονισμό, το εύρος απόκρισης του ταλαντωτή αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με το πλήθος κύκλων. Συνεπώς, για διέγερση  $\gamma$  κύκλων, η μέγιστη απόκριση είναι

$$S_{d,0}(T_{res}) = \pi \cdot \gamma \cdot d_{g,max} \quad (3.2)$$

Όπου  $S_{d,0}(T_{res})$  είναι η φασματική μετακίνηση σε συντονισμό για μηδενική απόσβεση. Κατά το τέλος του  $\gamma$  κύκλου της αρμονικής διέγερσης ισχύει

$$CAD = 4 \cdot \gamma \cdot d_{g,max} \quad (3.3)$$

Συνεπώς, για αρμονική διέγερση  $\gamma$  κύκλων, ισχύει μία σταθερή σχέση μεταξύ της φασματικής μετακίνησης για μηδενική απόσβεση σε συντονισμό και της CAD που ισούται με

$$\frac{S_{d,0}(T_{res})}{CAD} = \frac{\pi}{4} \quad (3.4)$$

Εάν αντί για την αρμονική διέγερση, εφαρμοστεί το κυματίδιο M&P, η προηγούμενη σχέση εξακολουθεί να ισχύει με ικανοποιητική ακρίβεια, παρά το γεγονός ότι η κωδωνοειδής περιβάλλουσα εφαρμόζεται στο εύρος της διέγερσης. Είναι προφανές ότι ο λόγος  $S_{d,0,max}/CAD$  ισούται περίπου με  $\pi/4$ , κυρίως για παλμούς μεγάλης διάρκειας, δηλαδή μεγάλες τιμές  $\gamma$ . Η μεγαλύτερη απόκλιση εμφανίζεται για  $\gamma=1.5$  και  $\nu=30^\circ$ , αλλά ακόμα και σε αυτή την περίπτωση είναι λιγότερο από 6%.

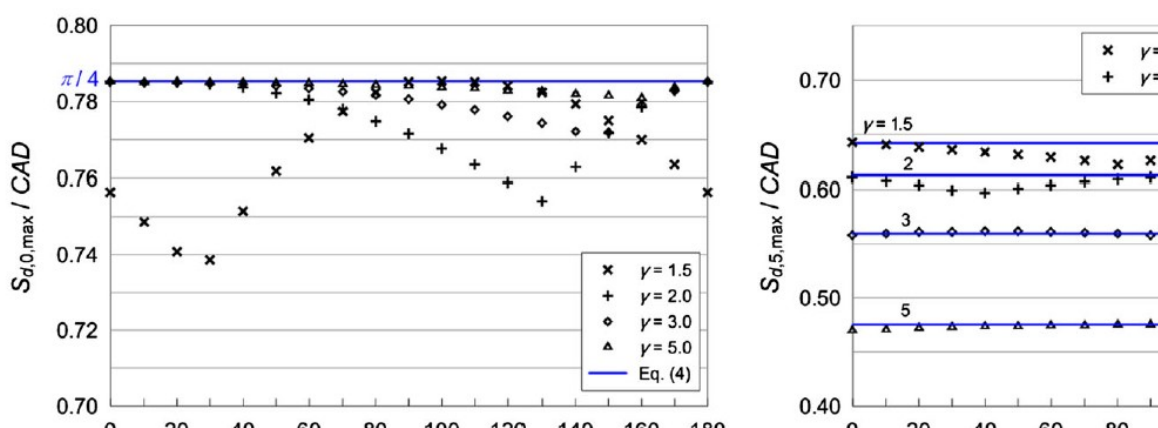
Τα ανωτέρω μπορούν να γενικευτούν αντίστοιχα και για την περίπτωση απόσβεσης διάφορης του μηδενός. Συνεπώς για αρμονική ταλάντωση ισχύει

$$\frac{S_{d,\xi}(T_{res})}{CAD} = \frac{1-e^{-2\pi\gamma\xi}}{8\gamma\xi} \quad (3.5)$$

Στην περίπτωση εφαρμογής του κυματιδίου M&P, παρατηρείται σφάλμα για μεγάλες τιμές του  $\gamma$ . Έπειτα από παραμετρική διερεύνηση προέκυψε ένας διορθωτικός συντελεστής, καταλήγοντας στη σχέση

$$\frac{S_{d,\xi,max}}{CAD} = \frac{1-e^{-2\pi\gamma\xi}}{8\gamma\xi} [1 + (\gamma - 1)\xi] \quad (3.6)$$

Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η ακρίβεια που επιτυγχάνεται μεταξύ της σύγκρισης της ανωτέρω σχέσης με το λόγο  $S_{d,max}/CAD$  για διάφορες τιμές  $\nu$  και  $\gamma$ .



Σχήμα 3.1: Σχέση μεταξύ μέγιστης φασματικής μετακίνησης  $S_{d,max}$  και της απόλυτης αθροιστικής μετακίνησης (CAD) για το κυματίδιο M&P, για διάφορες τιμές  $\nu$  και  $\gamma$ . (a) μηδενική απόσβεση (b) 5% απόσβεση (P. Mimoglou et al., 2014).

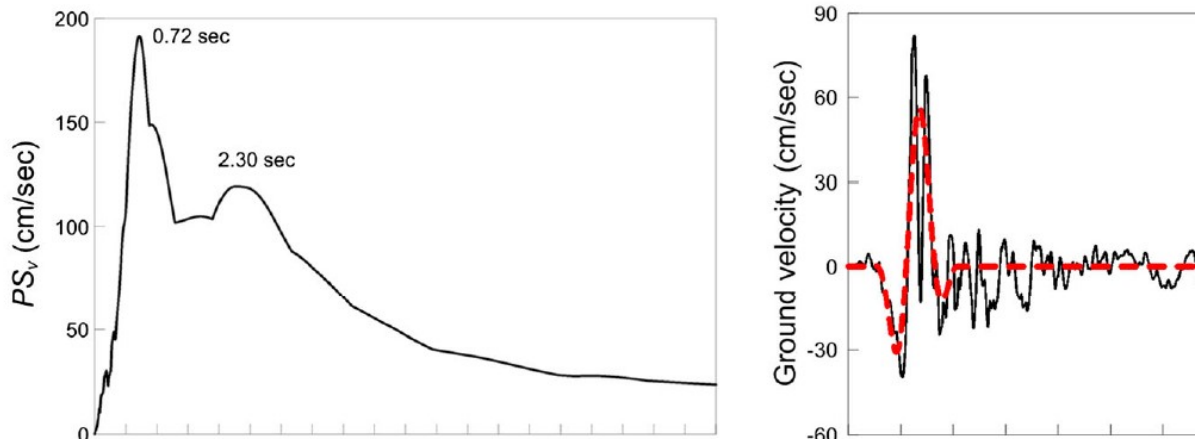
### 3.2.3 Προσδιορισμός των παραμέτρων παλμού

#### 3.2.3.1 Περίοδος παλμού $T_p$

Συνήθως, η περίοδος  $T_p$  του παλμού ταχυτήτων προσδιορίζεται από το μέγιστο του φάσματος ψευδοταχυτήτων για απόσβεση 5%. Ωστόσο, αυτή η θεώρηση έχει αμφισβητηθεί πολλές φορές, αφού υπάρχουν περιπτώσεις όπου το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι λανθασμένο, όπως στο παράδειγμα που ακολουθεί. Σύμφωνα με τη θεώρηση που μόλις αναφέρθηκε θα έπρεπε να ισχύει  $T_p=0.72\text{sec}$ , ενώ σύμφωνα με τον Baker<sup>55</sup> προκύπτει  $T_p=3.00\text{sec}$ . Με τη μέθοδο των P. Mimoglou et al.<sup>56</sup>, προκύπτει  $T_p=2.74\text{sec}$ , τιμή πολύ κοντά σε αυτή του Baker.

<sup>55</sup> Baker J.W., op. cit.

<sup>56</sup> Mimoglou P, Psycharis I., Taflampas I., op. cit.



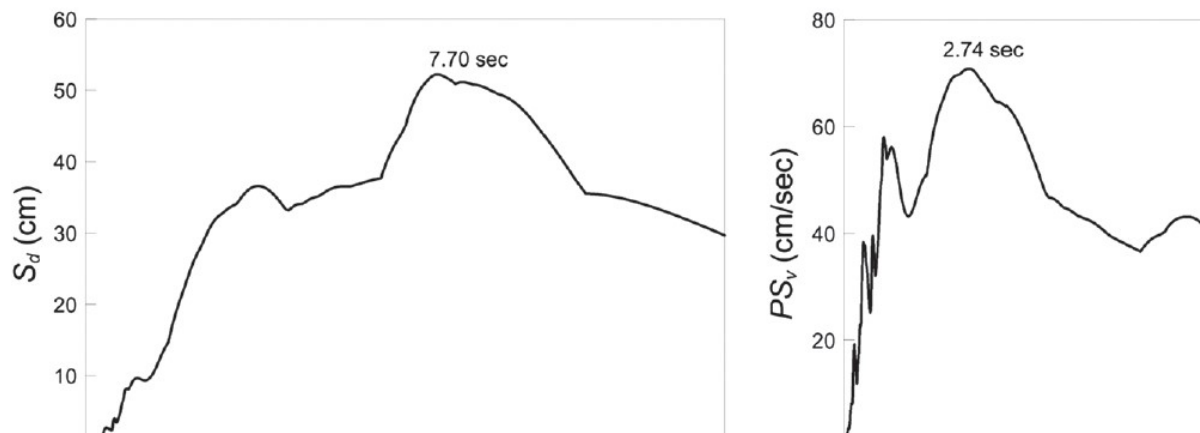
Σχήμα 3.2: Καταγραφή #38 από τη λίστα του Baker. (a) Φάσμα ψευδοταχυτήτων για 5% απόσβεση (b) σύγκριση του κυματιδίου M&P με την μέθοδο των P. Mimoglou, I.N. Psycharis and I.M. Taflampas (διακεκομμένη γραμμή) με την χρονοϊστορία ταχυτήτων της καταγραφής (P. Mimoglou et al., 2014).

Συνεπώς, προτείνεται ένας εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού της περιόδου  $T_p$ , με βάση το φάσμα μετακινήσεων. Η θεώρηση αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι το φάσμα μετακινήσεων είναι μία επαρκής περιβάλλουσα του φάσματος του εύρους εδαφικής ταχύτητας κατά Fourier. Παρομοίως, το φάσμα ταχυτήτων χωρίς απόσβεση είναι περιβάλλουσα του φάσματος του εύρους εδαφικής επιτάχυνσης κατά Fourier.

Η χρήση του φάσματος ταχυτήτων ενέχει ορισμένα προβλήματα, αφού το μέγιστο του φάσματος ενδέχεται να επηρεαστεί από την παρουσία λαθών μεγαλοπεριόδων στην καταγραφή της εδαφικής επιτάχυνσης. Επιπλέον, το μέγιστο αυτό ενδέχεται να αντιστοιχεί σε παλμό ταχυτήτων μεγάλης έκτασης αλλά μικρού εύρους. Η εναλλακτική αυτή θεώρηση της περιόδου  $T_p$ , μέσω της δεσπόζουσας περιόδου δεν μπορεί να γενικευτεί, καθώς υπάρχουν περιπτώσεις όπου δεν μπορεί να εφαρμοσθεί. Για παράδειγμα, στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η καταγραφή #20 από τη λίστα του Baker, που αφορά την παράλληλη συνιστώσα στο ρήγμα της εδαφικής καταγραφής από το σεισμό Westmorland 1981. Στην περίπτωση αυτή, η δεσπόζουσα περίοδος από το φάσμα μετακινήσεων προκύπτει



7.7sec, σύμφωνα με τον Baker είναι 3.00sec, ενώ σύμφωνα με τους P. Mimoglou et al.<sup>57</sup> είναι 2.74sec.



Σχήμα 3.3: Καταγραφή #20 από τη λίστα του Baker. (a) Φάσμα μετακινήσεων για 5% απόσβεση (b) Φάσμα ψευδοταχυτήτων για 5% απόσβεση (P. Mimoglou et al.,2014).

Ως συμπέρασμα από τα ανωτέρω, προκύπτει ότι τόσο το φάσμα μετακινήσεων όσο και το φάσμα των ψευδοταχυτήτων δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί γενικευμένα, γιατί υπάρχουν περιπτώσεις όπου και οι δύο προσεγγίσεις οδηγούν σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει διότι πολλές παλμικές καταγραφές επηρεάζονται από περισσότερους από έναν παλμούς διαφορετικής περιόδου.

Για το λόγο αυτό προτείνεται ένας νέος τρόπος υπολογισμού της περιόδου  $T_p$ , που αποτελεί συνδυασμό των φασμάτων ταχυτήτων και μετακινήσεων<sup>58</sup>. Η νέα προσέγγιση βασίζεται στο ότι ο περιεχόμενος παλμός επηρεάζει τόσο την εδαφική επιτάχυνση όσο και την εδαφική ταχύτητα, σε διαφορετικό βαθμό βέβαια την κάθε μία. Συνεπώς, η περίοδος  $T_p$  πρέπει να προκύψει από τη συνέλιξη του ολοκληρώματος των δύο αυτών χρονοϊστοριών. Επιπλέον, συνιστώσες με πολύ χαμηλό ή υψηλό συχνοτικό περιεχόμενο περιορίζονται. Άρα, το μέγιστο του εύρους του φάσματος συνέλιξης επιτάχυνσης-ταχύτητας κατά Fourier, οφείλει να αντιστοιχεί στη δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο που περιέχεται στην εδαφική κίνηση.

---

<sup>57</sup> Mimoglou P, Psycharis I., Taflampas I., *ibid.*

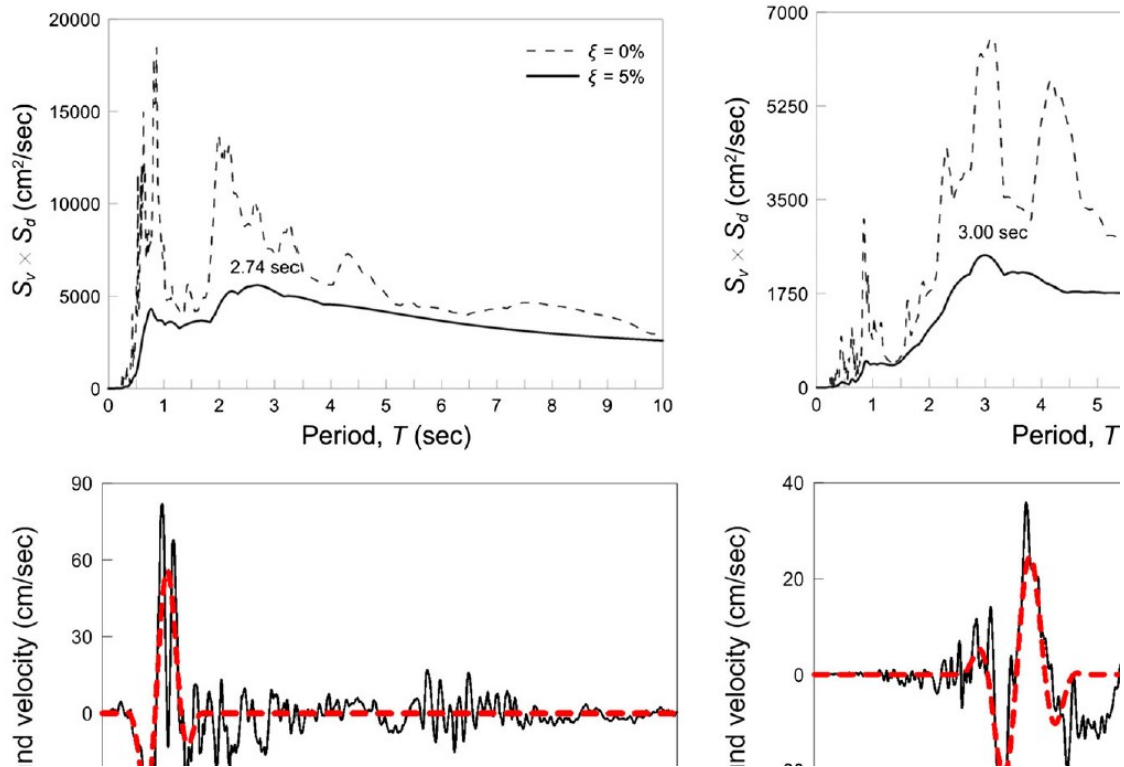
<sup>58</sup> Mimoglou P, Psycharis I., Taflampas I., *ibid.*

Είναι γνωστό ότι το εύρος του φάσματος συνέλιξης κατά Fourier, ισούται με το αποτέλεσμα των φασμάτων κατά Fourier των σημάτων που συνελίσσονται. Από την άλλη πλευρά, το φάσμα ταχυτήτων μηδενικής απόσβεσης  $S_{v,0}$ , είναι μία περιβάλλουσα του μέγιστου του εύρους του φάσματος επιτάχυνσης κατά Fourier, και το αντίστοιχο φάσμα μετακινήσεων μηδενικής απόσβεσης  $S_{d,0}$ , είναι μία περιβάλλουσα του μέγιστου του εύρους του φάσματος ταχύτητας κατά Fourier.

Με τη χρήση των παραπάνω ιδιοτήτων από τη συνέλιξη των δύο φασμάτων προκύπτει το φάσμα μηδενικής απόσβεσης  $S_d \times S_v$ . Η δεσπόζουσα περίοδος προκύπτει από το μέγιστο αυτού του φάσματος. Αν και η μεθοδολογία αναπτύχθηκε για μηδενική απόσβεση, είναι προτιμότερο να εφαρμόζεται για απόσβεση 5%, με τη χρήση του φάσματος  $S_{d,5} \times S_{v,5}$ , δεδομένου ότι τα αποτελέσματα των δύο αυτών περιπτώσεων δεν ταυτίζονται. Η χρήση των φασμάτων απόσβεσης 5%, συστήνεται για δύο λόγους. Αρχικά, οι περίοδοι που προκύπτουν ταυτίζονται καλύτερα με αυτές που προκύπτουν από τη μεθοδολογία του Baker. Επιπλέον, η απόσβεση 5% είναι πιο ρεαλιστική και συνεπώς χρησιμότερη στο πεδίο εφαρμογής του μηχανικού. Τέλος, το φάσμα  $S_{d,5} \times S_{v,5}$  οδηγεί σε ασφαλέστερα αποτελέσματα με καλύτερη προσέγγιση του φάσματος του εξαγόμενου παλμού. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν, για την προσέγγιση του περιεχόμενου παλμού των καταγραφών #20 και #38 της λίστας του Baker<sup>59</sup>.

---

<sup>59</sup> Baker J.W., op. cit.



Σχήμα 3.4: Καταγραφές #20 και #38. Επάνω, υπολογισμός της περιόδου του παλμού  $T_p$  από το φάσμα  $S_{d,5} \times S_{v,5}$  (συγκριτικά απεικονίζονται επίσης τα φάσματα μηδενικής απόσβεσης). Κάτω, σύγκριση των χρονοϊστοριών ταχυτήτων των εξαγόμενων M&P κυματιδίων (διακεκομμένη γραμμή) με της πραγματικής καταγραφής (P. Mimoglou et al.,2014).

### 3.2.3.2 Εύρος, διάρκεια, διαφορά φάσης, χρόνος έναρξης του παλμού

Αφού οριστεί η περίοδος  $T_p$  του παλμού, απομένει να οριστούν οι παράμετροι του κυματιδίου M&P, δηλαδή του εύρος  $A$ , η διάρκεια  $\gamma$  και η διαφορά φάσης  $\nu$ . Ο υπολογισμός γίνεται έτσι ώστε το φάσμα μετακινήσεων του παλμού για απόσβεση 5% να ταυτίζεται κατά το βέλτιστο δυνατό με το αντίστοιχο φάσμα της καταγραφής. Ωστόσο, επειδή το φάσμα των ψευδοταχυτήτων σχετίζεται άμεσα με το φάσμα μετακινήσεων μέσω της σχέσης  $PS_v = \omega \cdot S_d$ , θα ταυτίζεται αυτόματα και με αυτό.

Οι τρεις υπόλοιπες παράμετροι  $A$ ,  $\gamma$ ,  $\nu$ , προσδιορίζονται με τη χρήση της ποσότητας CAD, που όπως έχει αναφερθεί σχετίζεται με το μέγιστο φασματικό εύρος του παλμού. Για το κυματίδιο M&P, ισχύει η σχέση

$$CAD = \gamma \cdot A \cdot T_p / \pi \quad (3.7)$$

Για το εύρος του παλμού ισχύει η σχέση

$$A = \frac{4\xi PS_{v,\xi}(T_p)}{(1-e^{-2\pi\gamma\xi}) \cdot [1+(\gamma-1)\xi]} \quad (3.8)$$

Σημειώνεται ότι αντί για το φάσμα των ψευδοταχυτήτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί το φάσμα των μετακινήσεων, μιας και ισχύει η ισότητα

$$PS_v(T_p) = (2\pi/T_p) \cdot S_d(T_p) \quad (3.9)$$

Για να είναι εφικτός ο προσδιορισμός του εύρους του κυματιδίου από τη σχέση (3.8) είναι απαραίτητο να διερευνηθεί η τιμή της παραμέτρου  $\gamma$ . Όμως, πρόκειται για μία παράμετρο που είναι άγνωστη, και συνεπώς πρέπει να γίνει επίλυση για ένα εύρος τιμών της. Από τα ζεύγη τιμών  $(A, \gamma)$  που προκύπτουν, αυτά που οδηγούν σε τιμές επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακινήσεων του κυματιδίου μεγαλύτερες από τα μέγιστα της εδαφικής καταγραφής  $pga$ ,  $pgv$ ,  $pgd$  αντίστοιχα, απορρίπτονται. Για τα εναπομείναντα αποδεκτά ζεύγη, και για όλες τις τιμές διαφοράς φάσης  $\nu$ , από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$  υπολογίζονται τα αντίστοιχα κυματίδια. Για καθένα από αυτά, εξετάζονται διάφορες τιμές  $t_d$  χρονικής έναρξης του παλμού. Συνεπώς, προκύπτουν διαφορετικά ζεύγη  $(A, \gamma, \nu, t_d, t)$  και κατ' επέκταση διαφορετικές παλμικές χρονοϊστορίες,  $u_p(A, \gamma, \nu, t_d, t)$ . Τελικά, το ζεύγος που επιλέγεται είναι αυτό που έχει καλύτερη συσχέτιση με την χρονοϊστορία ταχυτήτων της εδαφικής καταγραφής  $v_g(t)$ . Ο συντελεστής συσχέτισης  $r$  υπολογίζεται για κάθε ζεύγος χρονοϊστοριών  $(u_p, v_p)$  και επιλέγεται αυτό με τη μεγαλύτερη τιμή. Με τον τρόπο αυτό, η μέθοδος συσχέτισης χρησιμοποιείται για να ταυτοποιηθεί όχι μόνο ο παλμός που ταυτίζεται καλύτερα με τη χρονοϊστορία ταχυτήτων της εδαφικής κίνησης αλλά και το χρόνο έναρξης του παλμού  $t_d$ . Σημειώνεται ότι στο Mavroeidis and Papageorgiou<sup>60</sup> αντί για τη χρονική καθυστέρηση  $t_d$ , χρησιμοποιείται η χρονική στιγμή  $t_0$  για να προσδιοριστεί ο παλμός μέσω της χρονικής στιγμής της περιβάλλουσας των μεγίστων του κυματιδίου. Η τιμή αυτή

<sup>60</sup> Mavroeides, G.P., Papageorgiou, A.S., op.cit.

μπορεί να προσδιοριστεί μέσω των τιμών  $t_d$ ,  $\gamma$ ,  $T_p$  με χρήση της σχέσης

$$t_0 = t_d + \gamma \cdot T_p / 2 \quad (3.10)$$

Σημειώνεται ότι η μέθοδος εφαρμόστηκε και στις 91 καταγραφές που έχουν ταξινομηθεί από τον Baker<sup>61</sup>, η λίστα των οποίων δίνεται στο κεφάλαιο 1, παράγραφος 1.7.1, και παρατηρήθηκε ασυμφωνία των αποτελεσμάτων σχετικά με τον παραγόμενο παλμό μόνο σε μία περίπτωση. Συμπερασματικά, η μέθοδος συνοψίζεται σε τρία βασικά βήματα:

- Εισάγεται το φάσμα  $S_d \times S_v$ , που ορίζεται ως το αποτέλεσμα της συνέλιξης των φασμάτων ταχυτήτων και μετακινήσεων. Αποδεδειγμένα, το φάσμα  $S_d \times S_v$  με μηδενική απόσβεση αποτελεί επαρκή περιβάλλουσα του εύρους του φάσματος κατά Fourier της συνέλιξης των δύο προαναφερθέντων φασμάτων.
- Ο προσδιορισμός της περιόδου του παλμού γίνεται βάσει του μέγιστου του φάσματος  $S_d \times S_v$  για απόσβεση 5%, αντί για το χρησιμοποιούμενο έως τώρα φάσμα απόκρισης των ψευδοταχυτήτων, το οποίο έχει αμφισβητηθεί από αρκετούς ερευνητές.
- Ορίστηκε η νέα σχέση μεταξύ της CAD του κυματιδίου M&P, και του φασματικού του εύρους, η οποία χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των υπόλοιπων παραμέτρων του κυματιδίου μέσω των στοχευόμενων φασματικών ευρών της εδαφικής κίνησης.

---

<sup>61</sup> Baker, J.W., op.cit.



## Κεφάλαιο 4

### Διαδικασία που ακολουθήθηκε

#### 4.1 Γενικά

Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της σύγκλισης των μετακινήσεων οροφής, των σχετικών μετακινήσεων των ορόφων γνωστό ως *interstorey drift*, και της τέμνουσας βάσης της κατασκευής όταν υποβάλλονται σε διεγέρσεις με το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο.

Πρώτον, επιλέγονται οι αρχικές καταγραφές παλμικού περιεχομένου, πολλές από τις οποίες έχουν περίοδο παλμού περίπου ίση με το διπλάσιο της περιόδου της κατασκευής, δηλαδή  $T_p \cong 2 \cdot T_{str}$ . Η επιλογή αυτή έγινε, λόγω της παρατήρησης από διάφορους μελετητές ότι σε αυτές τις περιπτώσεις παρουσιάζονται μεγαλύτερες απαιτήσεις πλαστιμότητας στην κατασκευή. Οι καταγραφές αυτές προέρχονται ως επί το πλείστον από τη βάση δεδομένων NGA<sup>62</sup> που χαρακτηρίστηκαν από τον Baker<sup>63</sup> ως παλμικές, και τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους δίνονται στο Κεφάλαιο 1, Πίνακας 1.2. Επιπλέον, εξετάστηκαν 3 καταγραφές από το σεισμό της Norcia στην Ιταλία το 2016, όπου στο εξής αντιστοιχούν στους κωδικούς NRC, NRC1, T1213. Η περίοδος παλμού αυτών των καταγραφών είναι  $T_p=1.40s$ ,  $T_p=1.50s$ ,  $T_p=2.06s$  αντίστοιχα. Για την κάθε καταγραφή εδαφικής κίνησης ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία.

#### 4.2 Σταθμισμένο και αστάθμητο σήμα εδαφικής καταγραφής

Αρχικά, πρέπει να αναφερθεί ότι το σήμα των καταγραφών που χαρακτηρίζονται ως παλμικές μπορεί να διαχωριστεί στο σταθμισμένο και

---

<sup>62</sup> Αρχικά του Next Generation Attenuation.

<sup>63</sup> Baker, J.W., op.cit.

στο εναπομένον αστάθμητο σήμα<sup>64</sup>. Ο παλμός της καταγραφής αποτελεί το σταθμισμένο μέρος του σήματος, του οποίου τα χαρακτηριστικά και οι παράμετροι μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα. Αντιθέτως, το μη σταθμισμένο εναπομένον σήμα ακολουθεί πιθανοτική κατανομή και σχετίζεται με το υψίσυκνο μέρος της καταγραφής το οποίο προκύπτει μετά την αφαίρεση του παλμού.

### 4.3 Εξαγωγή τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, από την εδαφική καταγραφή αφαιρείται ο περιεχόμενος παλμός με σταθερή φασματική ταχύτητα από 0.5 έως 2.5 δευτερόλεπτα, με την μέθοδο που προτείνεται από τους Mimglou et al.<sup>65</sup>. Το διάστημα αυτό αποτελεί την περιοχή όπου κατά κύριο λόγο ανήκουν οι ιδιοπερίοδοι των κατασκευών.

Στη συνέχεια, στόχος είναι να ληφθούν υπόψη τα βασικά χαρακτηριστικά του μη σταθμισμένου σήματος της καταγραφής που επηρεάζουν την απόκριση των κατασκευών. Βασική διαφοροποίηση της εν λόγω εργασίας είναι ότι δεν έγινε θεώρηση σταθερής φασματικής επιτάχυνσης, η οποία αντιστοιχεί περίπου σε περιόδους έως 0.5~0.6 sec. Η έννοια που χρησιμοποιήθηκε είναι η δρώσα ταχύτητα που ορίζεται ως

$$Effective\ peak\ velocity = \frac{1}{2.5} \frac{\int PSV dT}{\int dT} \quad (4.1)$$

Αναλυτικότερα, ο όρος  $\int PSV dT$  εκφράζει το εμβαδόν των φασματικών ταχυτήτων, και διαιρούμενο με  $\int dT$  προκύπτει το μέσο φάσμα ταχυτήτων. Το χρονικό διάστημα για το οποίο υπολογίστηκε είναι 0.5 έως 2.5 δευτερόλεπτα. Τέλος, εφαρμόζεται συντελεστής φασματικής επαύξησης ίσος με 2.5, προκειμένου η μέση φασματική ταχύτητα να εκφραστεί ως δρώσα ταχύτητα. Συνεπώς, για τη συγκεκριμένη μελέτη προκύπτει

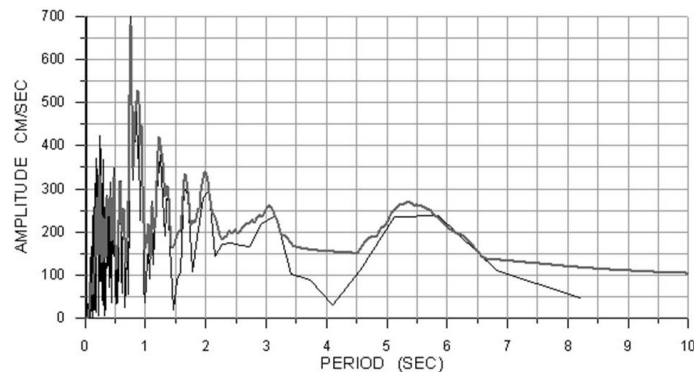
<sup>64</sup> Το σταθμισμένο σήμα ορίζεται ως coherent στα αγγλικά, ενώ το εναπομένον αστάθμητο σήμα ως residual, non coherent.

<sup>65</sup> Mimglou P, Psycharis I., Taflampas I., op. cit.



$$Effective\ peak\ velocity = \frac{\int PSV\ dT}{5} \quad (4.2)$$

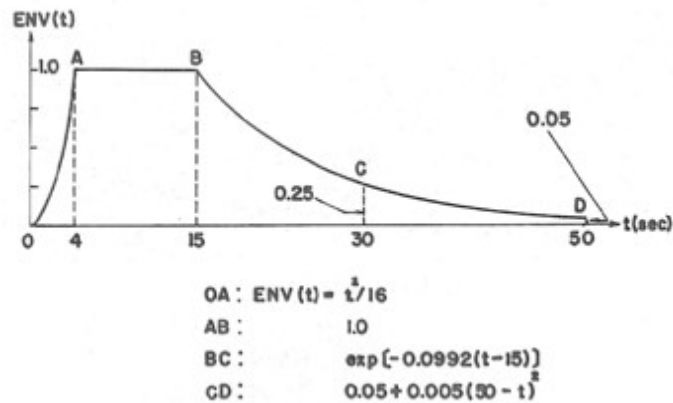
Τέλος, αφού έχει υπολογιστεί η μέση φασματική ταχύτητα του εναπομένου αστάθμητου σήματος, και με τη θεώρηση ότι αυτή παραμένει σταθερή, κατασκευάζεται το φάσμα επιταχύνσεων του Ευρωκώδικα, το οποίο μετατρέπεται σε φάσμα ταχυτήτων για απόσβεση 5%. Μέσω του λογισμικού QUAKE υπολογίζεται η περιβάλλουσα ταχυτήτων του φάσματος Fourier για μηδενική απόσβεση. Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αυτού του βήματος της διαδικασίας δίνεται στο σχήμα 4.1 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.1: Φάσμα ταχυτήτων και περιβάλλουσα φάσματος Fourier.

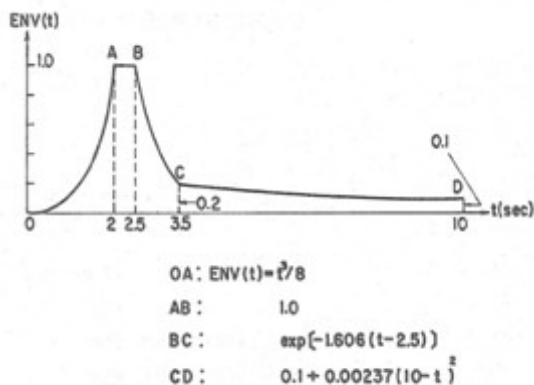
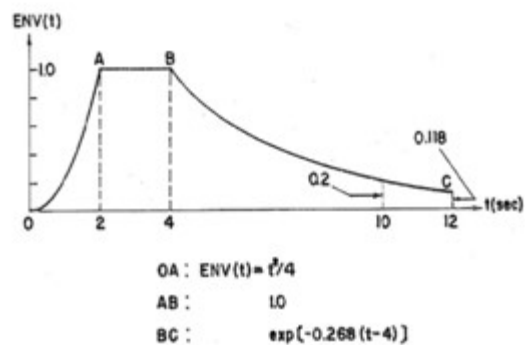
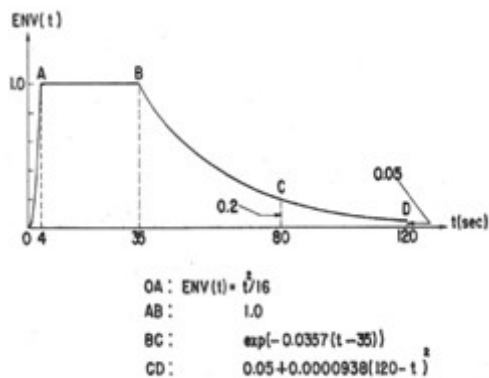
Στη συνέχεια, με το φάσμα μηδενικής απόσβεσης που προέκυψε, και με το ίδιο λογισμικό κατασκευάζονται τυχαίες διαφορετικές φάσεις για τις διάφορες συχνότητες με τη βοήθεια γεννήτριας τυχαίων αριθμών. Οι διαφορετικές τυχαίες φάσεις που προκύπτουν διαμορφώνουν το τυχαίο μέρος της νέας τεχνητής καταγραφής. Μέσω της διαδικασίας αυτής, προκύπτει ένα σήμα ουσιαστικά άπειρης διάρκειας και με ομοιόμορφο εύρος. Συνεπώς το σήμα αυτό πρέπει να πολλαπλασιαστεί με κατάλληλη συνάρτηση σχήματος προκειμένου να αποκτήσει τα χαρακτηριστικά ενός επιταχυνσιογραφήματος. Η συνάρτηση σχήματος που χρησιμοποιήθηκε είναι για γεγονότα μεγέθους  $M \sim 7$ . Από τη βιβλιογραφία προτείνονται κι άλλες συναρτήσεις, αλλά επιλέχτηκε η συγκεκριμένη ως αυτή με μεγάλη διάρκεια και πιο συμβατική. Η συνάρτηση αυτή φαίνεται στο σχήμα που

ακολουθεί και έχει προκύψει από στατιστική επεξεργασία επιταχυνσιογραφημάτων.



Σχήμα 4.2: Συνάρτηση σχήματος που χρησιμοποιήθηκε.

Άλλες συναρτήσεις που προτείνονται από τη βιβλιογραφία φαίνονται στο σχήμα 4.3 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.3: Προτεινόμενες συναρτήσεις σχήματος από τη βιβλιογραφία.

Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την παραπάνω συνάρτηση σχήματος είναι συνολική διάρκεια σήματος 30 δευτερόλεπτα, ενώ η αρχή και το τέλος της χρονικής διάρκειας του παλμού καθορίζονται από τα σημεία Α και Β αντίστοιχα. Η καμπύλη που προσδιορίζει το τμήμα ΟΑ είναι συνάρτηση του τετραγώνου της χρονικής διάρκειας  $t$ . Αφού ολοκληρωθεί αυτό το βήμα, το σήμα έχει μορφή επιταχυνσιογραφήματος και τελικά προστίθεται και ο παλμός που είχε αφαιρεθεί από την αρχική καταγραφή. Συνεπώς, το αποτέλεσμα είναι μία νέα τεχνητή παλμική καταγραφή που περιέχει τον παλμό της αρχικής εδαφικής καταγραφής, ενώ παράλληλα έχουν το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο. Προφανώς, τα διάφορα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα που προκύπτουν από την ίδια εδαφική καταγραφή διαφέρουν μεταξύ τους λόγω της γεννήτριας τυχαίων αριθμών. Για κάθε αρχική καταγραφή κατασκευάζονται επτά νέα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα. Τα παραγόμενα επιταχυνσιογραφήματα οφείλουν να τηρούν τις απαιτήσεις του Ευρωκώδικα 8, οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Πιο συγκεκριμένα, με βάση το Ελληνικό Πρότυπο, τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα πρέπει να είναι συμβατά με τα φάσματα ελαστικής απόκρισης που ορίζει και να έχουν υπολογιστεί για 5% ιζώδη απόσβεση. Επιπλέον, η διάρκεια τους οφείλει να είναι συμβατή με το μέγεθος αλλά και τα σχετικά χαρακτηριστικά του σεισμικού γεγονότος που υπεισέρχονται ουσιαστικά στον καθορισμό της εδαφικής επιτάχυνσης. Επιπλέον, το στάσιμο μέρος του επιταχυνσιογραφήματος δεν πρέπει να έχει διάρκεια μικρότερη από 10 δευτερόλεπτα. Τέλος, ο ελάχιστος αριθμός επιταχυνσιογραφήματων που απαιτείται είναι τρία<sup>66</sup>. Στην περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη τρία τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα, τα αποτελέσματα πρέπει να εξαχθούν σύμφωνα με τη μέγιστη τιμή τους. Προκειμένου όμως να εξαχθούν ασφαλέστερα αποτελέσματα και να μπορέσει να γίνει ανάλυση με βάση την κανονική κατανομή επιλέχθηκε για κάθε πραγματική καταγραφή να παραχθούν περισσότερα από τρία τεχνητά

<sup>66</sup> ΕΛΟΤ EN 1198-1, Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός των κατασκευών-Μέρος 1:Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτήρια, Ελληνική Έκδοση, Αθήνα, 2004, σ.47.

---

επιταχυνσιογραφήματα, και πιο συγκεκριμένα επτά, όπου σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα εξάγονται σύμφωνα με τη μέση τιμή.

Αφού γίνουν όσα περιγράφηκαν παραπάνω, συγκρίνονται οι μετακινήσεις, καθώς επίσης και η τέμνουσα βάσης μεταξύ της αρχικής καταγραφής και των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων. Επιδιώκεται να υπάρχει κατά το δυνατόν η καλύτερη δυνατή ταύτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της πραγματικής καταγραφής και του μέσου όρου των αποτελεσμάτων των επτά επιταχυνσιογραφημάτων. Επιπλέον, επιδιώκεται η απόκριση της κατασκευής στην πραγματική εδαφική καταγραφή να βρίσκεται μέσα στο διάστημα εμπιστοσύνης του συνόλου των αποτελεσμάτων των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων.

# Κεφάλαιο 5

## Περιγραφή εξεταζόμενου φορέα

### 5.1 Γενικά

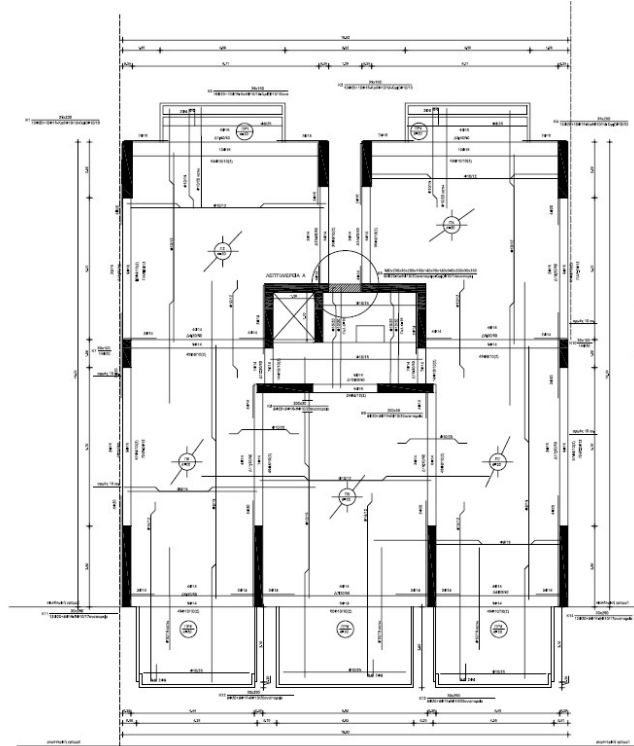
Στην εν λόγω εργασία εξετάζεται η σεισμική συμπεριφορά τοιχωματικών κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα σε σεισμούς κοντινού πεδίου. Για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκε μια πραγματική επτάοροφη τοιχωματική κατασκευή επί Pilotis με υπόγειο και δώμα. Το γεγονός ότι το κύριο χαρακτηριστικό της κατασκευής είναι τα τοιχώματα, καθιστά μη καθοριστικό παράγοντα την ύπαρξη και την προσομοίωση των τοικοπληρώσεων. Πιο συγκεκριμένα, το κτήριο που εξετάζεται έχει κάτοψη που μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν τετραγωνική, αφού ουσιαστικά εγγράφεται σε ορθογώνιο διαστάσεων περίπου 16 x 17m. Η κατασκευή διαθέτει επτά ορόφους, υπόγειο και η στάθμη του ισογείου είναι της μορφής Pilotis, αφού δεν διαθέτει καθόλου τοικοπληρώσεις. Το συνολικό ύψος του φορέα είναι 24.55m, συμπεριλαμβανομένου του δώματος, με ύψος ορόφου 2.75m εκτός της Pilotis που είναι 2.50m. Περίπου κεντρικά της κάτοψης υπάρχει ο «πυρήνας» της κατασκευής που αποτελείται από ένα επίμηκες τοίχωμα μορφής E, στις εσοχές του οποίου έχουν τοποθετηθεί ο ανελκυστήρας και το κλιμακοστάσιο. Τέλος, σε κάθε όροφο υπάρχουν συνολικά πέντε εξώστες.

Ο φέρων οργανισμός της κατασκευής αποτελείται κυρίως από τοιχώματα<sup>67</sup>, ελάχιστα υποστυλώματα, για την ακρίβεια μόνο δύο, δοκούς και πλάκες. Οι τελευταίες εξασφαλίζουν τη διαφραγματική λειτουργία της κατασκευής, δεδομένου ότι το πάχος όλων των πλακών είναι 20cm. Όλες οι στάθμες, με εξαίρεση την πρώτη, είναι τυπικές δηλαδή έχουν την ίδια ακριβώς κάτοψη. Σε ότι αφορά την πρώτη στάθμη, δηλαδή την οροφή Pilotis, διαφοροποιείται μόνο ως προς τις διαστάσεις μερικών δοκών,

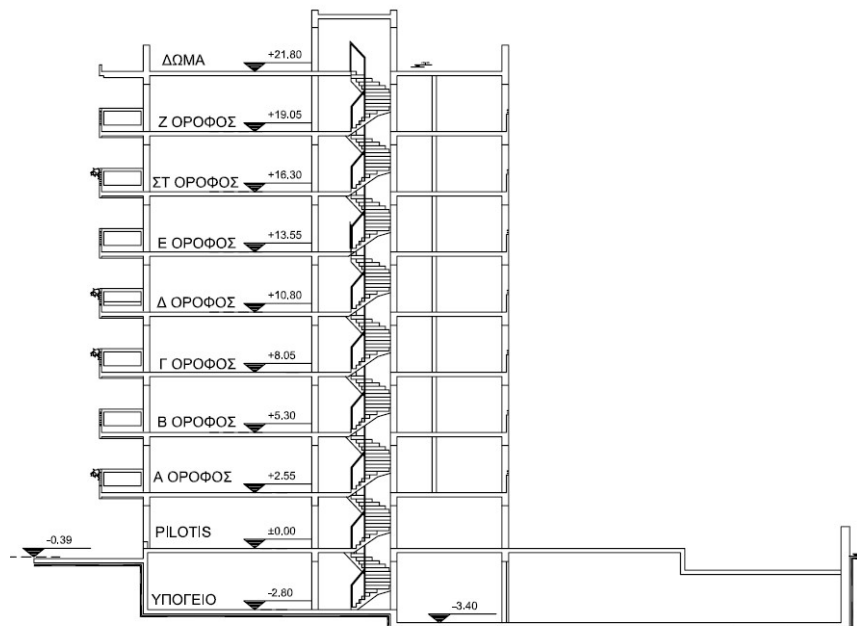
---

<sup>67</sup> Ένα κατακόρυφο στοιχείο θεωρείται τοίχωμα όταν το μήκος του,  $l_w$  είναι τουλάχιστον τετραπλάσιο του πλάτους  $b$ . Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000, Κεφάλαιο 18, Παράγραφος 18.5.1, σ.391.

καθώς επίσης έχει επιπλέον μία δοκό και ένα διάφραγμα. Στο Σχήμα 5.1 και Σχήμα 5.2 που ακολουθούν φαίνεται μία τυπική τομή και κάτοψη του υπό μελέτη φορέα.



Σχήμα 5.1: Τυπική κάτοψη του υπό μελέτη κτηρίου.



Σχήμα 5.2: Τυπική τομή του υπό μελέτη κτηρίου.

Η θεμελίωση της κατασκευής αποτελείται από μία περιμετρική πεδιλοδοκό, και από μεμονωμένα πέδιλα που συνδέονται μεταξύ τους με συνδετήριες δοκούς. Κατά την προσομοίωση του κτηρίου, οι συνθήκες στήριξης του στο έδαφος θεωρούνται εξιδανικευμένα ως πλήρεις πακτώσεις, δεδομένου ότι η προσομοίωση του εδάφους και η αλληλεπίδραση του με την κατασκευή δεν αποτελεί μέρος της μελέτης της παρούσας εργασίας. Βέβαια, η παραπάνω θεώρηση γίνεται λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν επηρεάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Λεπτομερέστερα, στο Παράρτημα Α δίδονται όλα τα απαραίτητα σχέδια της κατασκευής, της θεμελίωσης και των οπλισμών της.

## 5.2 Χαρακτηριστικά εξεταζόμενου φορέα

Το πολυώροφο κτήριο που εξετάζεται, αποτελεί μία σχετικά νέα κατασκευή, αφού κατασκευάστηκε το 2007 και η μελέτη έχει γίνει σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς. Ειδικότερα, εφαρμόστηκαν:

- Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000 (ΕΚΩΣ 2000, ΦΕΚ 1329 Β/2000)
- Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000 (ΕΑΚ 2000, ΦΕΚ 2184 Β/2000)
- Κανονισμός τεχνολογίας σκυροδέματος (ΦΕΚ 226 Β/1995)
- Κανονισμός φορτίσεων (ΦΕΚ 325 Α/45 – ΦΕΚ 171 Α/46).

Σε ότι αφορά τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, το σκυρόδεμα είναι ποιότητας C20/25 και ο χάλυβας τόσο του διαμήκους όσο και του εγκάρσιου οπλισμού είναι ποιότητας S500. Ειδικότερα, για τους συνδετήρες δεδομένου ότι τα σκέλη τους αγκυρώνουν με γωνία 135°, θεωρείται ότι συμβάλλουν κανονικά στην περίσφιγξη του σκυροδέματος. Επιπλέον, αφού πρόκειται για μια σύγχρονη κατασκευή δεν θα χρησιμοποιηθούν απομειωμένες τιμές ως διαπιστωμένες χαρακτηριστικές τιμές για τα υλικά.

### 5.3 Φορτία μελέτης

Τα φορτία σύμφωνα με τα οποία πραγματοποιήθηκε η μελέτη, αλλά και ο υπολογισμός των μαζών και των φορτίων για τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας είναι τα ακόλουθα:

- Ιδιο βάρος σκυροδέματος  $25 \text{ kN/m}^3$
- Τοίχοι μπατικοί  $9.0 \text{ kN/m}$
- Τοίχοι δρομικοί  $5.0 \text{ kN/m}$
- Επιστρώσεις γενικώς  $2.0 \text{ kN/m}^2$
- Κινητά φορτία πλακών  $2.0 \text{ kN/m}^2$
- Κινητά φορτία εξωστών  $5.0 \text{ kN/m}^2$
- Κινητά φορτία κλιμάκων  $3.5 \text{ kN/m}^2$
- Κινητά φορτία ισογείου  $5.0 \text{ kN/m}^2$

### 5.4 Κανονικότητα καθ' ύψος

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8<sup>68</sup>, για να ταξινομηθεί ένα κτήριο ως κανονικό καθ' ύψος, πρέπει να ικανοποιεί όλους τους όρους που απαριθμούνται στις ακόλουθες παραγράφους.

(2) Όλα τα συστήματα ανάληψης οριζόντιων φορτίων, όπως πυρήνες, φέροντα τοιχώματα ή πλαίσια, πρέπει να είναι συνεχή χωρίς διακοπή από τα θεμέλια έως και την άνω επιφάνεια του κτηρίου, ή, εάν υπάρχουν ζώνες εσοκών με διαφορετικά ύψη, έως την άνω επιφάνεια της σχετικής ζώνης του κτηρίου.

(3) Η πλευρική δυσκαμψία και η μάζα των επιμέρους ορόφων πρέπει να παραμένουν σταθερές ή να μειώνονται βαθμιαία, χωρίς απότομες αλλαγές, από τη βάση προς την κορυφή ενός κτηρίου.

---

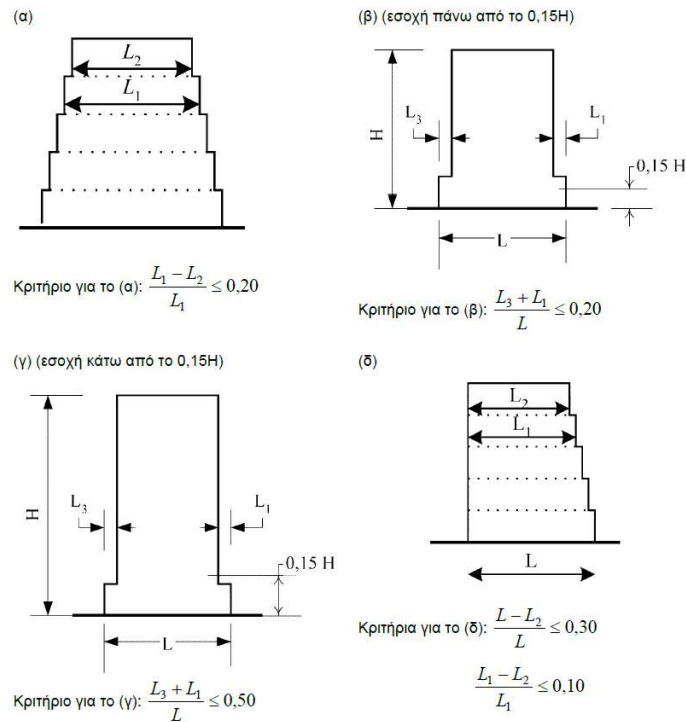
<sup>68</sup> ΕΛΟΤ EN 1998-1:2005, op.cit., σ.52.



(4) Σε κτήρια με πλαισιωτό σύστημα ο λόγος της πραγματικής αντοχής ορόφων προς την αντοχή που απαιτείται από την ανάλυση δεν θα πρέπει να διαφέρει δυσανάλογα μεταξύ συνεχόμενων ορόφων. Σχετικά με αυτή τη συνθήκη τα ειδικά θέματα που αφορούν πλαίσια με τοιχοπληρώσεις εξετάζονται στην παράγραφο 4.3.6.3.2.

(5) Όταν υπάρχουν εσοχές, ισχύουν οι ακόλουθες πρόσθετες συνθήκες:

- a) Για βαθμιδωτές εσοχές που διατηρούν την αξονική συμμετρία του φορέα, η εσοχή σε οποιονδήποτε όροφο δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 20% της προηγούμενης διάστασης σε κάτοψη στη διεύθυνση της εσοχής. Σχήμα 5.3α και 5.3β).
- b) Για μία μεμονωμένη εσοχή μέσα σε ύψος μικρότερο από 15% του συνολικού ύψους του κύριου στατικού συστήματος, η εσοχή δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 50% της προηγούμενης διάστασης σε κάτοψη (Σχήμα 5.3γ). Σε τέτοια περίπτωση το κάτω μέρος του φορέα που περιλαμβάνεται μέσα στην κατακόρυφη προβολή της περιμέτρου των ανώτερων ορόφων θα πρέπει να μελετηθεί ώστε να αναλαμβάνει τουλάχιστον 75% των οριζόντιων τεμνουσών δυνάμεων που θα αναπτύσσονταν στην ίδια ζώνη σε παρόμοιο κτήριο χωρίς τη διεύρυνση του κάτω μέρους
- c) Εάν οι εσοχές δεν διατηρούν τη συμμετρία του φορέα, το άθροισμα των εσοχών όλων των ορόφων σε κάθε όψη δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το 30% της διάστασης της κάτοψης στο ισόγειο επάνω από τη θεμελίωση ή επάνω από την άνω επιφάνεια άκαμπτου υπογείου και κάθε επιμέρους εσοχή δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 10% της προηγούμενης διάστασης κάτοψης (Σχήμα 5.3δ)



Σχήμα 5.3: Κριτήρια για την κανονικότητα κτηρίων με εσοχές (ΕΛΟΤ EN 1998-1:2005).

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, το κτήριο της παρούσας εργασίας είναι κανονικό καθ' ύψος και δεν χρειάζεται να ληφθεί υπόψη κάποια ιδιαίτερη διάταξη κατά τη διάρκεια των αναλύσεων.

### 5.5 Έδαφος θεμελίωσης

Για το έδαφος στο οποίο θεμελιώνεται η κατασκευή δίνεται από την στατική μελέτη επιτρεπόμενη τάση εδάφους 0.25 MPa, και δείκτης εδάφους 50000 kN/m<sup>3</sup>. Συνολικά, θεωρείται ένα πολύ καλό έδαφος, με αρκετά μεγάλο δείκτη που μπορεί να προσομοιωθεί με βράχο δεδομένου ότι η προσομοίωση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής δεν απασχολεί την παρούσα εργασία.

## 5.6 Σεισμικότητα

Σε ότι αφορά τη σεισμικότητα της κατασκευής, κατατάσσεται στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας I<sup>69</sup> και στην κατηγορία σπουδαιότητας κτηρίου II<sup>70</sup>. Ως κατηγορία εδάφους λαμβάνεται Β, ως ένα έδαφος με αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλίκων, ή πολύ σκληρής αργίλου, πάχους τουλάχιστον αρκετών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος<sup>71</sup>. Σύμφωνα με τον πίνακα 5.1 η επιτάχυνση εδάφους για το κτήριο που μελετάται είναι  $\alpha_{gR}(g) = 0.16$  και προφανώς  $\alpha_g = \gamma_i \cdot \alpha_{gR} = 1.00 \cdot 0.16 = 0.16g$ , δεδομένου ότι σύμφωνα με τον Πίνακα 5.2 είναι  $\gamma_i = 1.00$ .

Ζώνη	$\alpha_{gR}/g$
Z1	0.16
Z2	0.24
Z3	0.36

Πίνακας 5.1: Τιμές  $\alpha_{gR}/g$  (ΕΛΟΤ EN1998-1).

Κατηγορία σπουδαιότητας	$\gamma_i$	Περιγραφή
I	0,80	Κτίρια δευτερεύουσας σημασίας για τη δημόσια ασφάλεια, π.χ. γεωργικά κτίρια, κλπ.
II	1,00	Συνήθη κτίρια, που δεν ανήκουν στις άλλες κατηγορίες.
III	1,20	Κτίρια των οποίων η σεισμική ασφάλεια είναι σημαντική, λαμβάνοντας υπόψη τις συνέπειες κατάρρευσης, π.χ. σχολεία, αίθουσες συνάθροισης, πολιτιστικά ιδρύματα κλπ.
IV	1,40	Κτίρια των οποίων η ακεραιότητα κατά τη διάρκεια σεισμών είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία των πολιτών, π.χ. νοσοκομεία, πυροσβεστικοί σταθμοί, σταθμοί παραγωγής ενέργειας, κλπ.

Πίνακας 5.2: Κατηγορίες σπουδαιότητας για κτίρια (ΕΛΟΤ EN1998-1).

<sup>69</sup> ΕΛΟΤ EN 1998-1:2005/NA, Εθνικό Προσάρτημα, Αθήνα 2005, Σχήμα 1, σ.13.

<sup>70</sup> ΕΛΟΤ EN 1998-1:2005, op. cit., Πίνακας 4.3, σ.55.

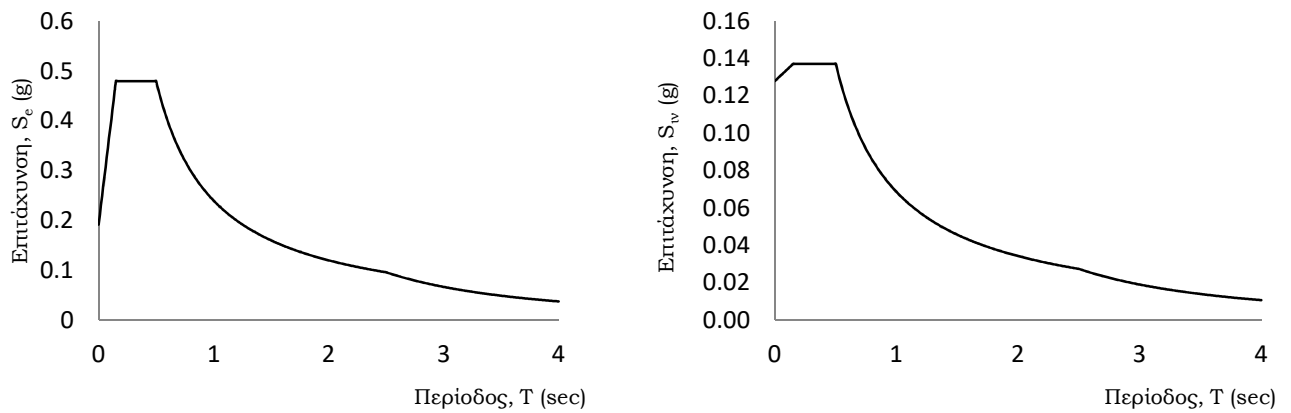
<sup>71</sup> ΕΛΟΤ EN 1998-1:2005, op. cit., Πίνακας 3.1, σ.38.

Σε ότι αφορά την κατηγορία εδάφους, από τον Πίνακα 5.3 προκύπτουν οι τιμές  $T_B = 0.15 \text{ sec}, T_C = 0.50 \text{ sec}, T_D = 2.50 \text{ sec}, S = 1.20 \text{ sec}$ .

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 5.3: Τιμές χαρακτηριστικών περιόδων και συντελεστή εδάφους για την οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης (ΕΛΟΤ EN1998-1).

Στη συνέχεια φαίνεται το ελαστικό και το ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού που προκύπτει με τις παραπάνω τιμές για  $\zeta=0.05$  και συντελεστή σεισμικής συμπεριφοράς  $q=3.5$ .



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

$$S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \left[ \frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left( \frac{2.5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right], \text{ για } 0 \leq T \leq T_B$$

$$S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5, \text{ για } T_B \leq T \leq T_C$$

$$S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q}, \text{ για } T_B \leq T \leq T_C$$

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

$$S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \frac{T_C}{T}, \text{ για } T_C \leq T \leq T_D$$

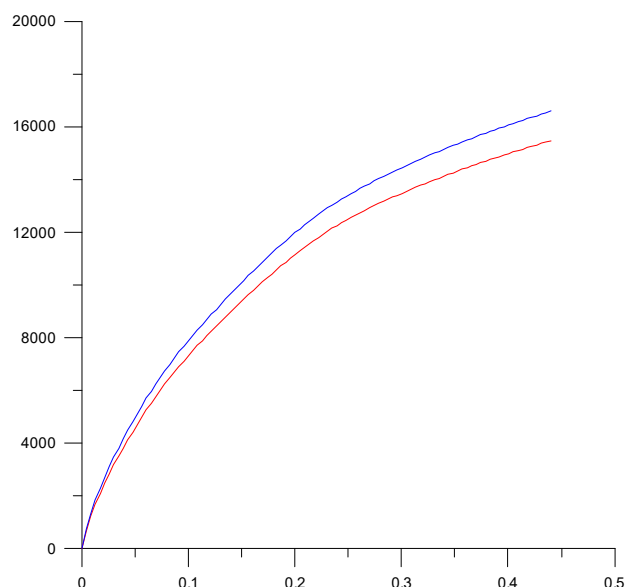
$$S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C T_D}{T^2}, \text{ για } T_D \leq T \leq 4 \text{ sec}$$

$$S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \frac{T_C T_D}{T^2} \geq \beta \cdot \alpha_g, \text{ για } T_D \leq T \leq 4 \text{ sec}$$

Σχήμα 5.4 : Ελαστικό και ανελαστικό φάσμα της κατασκευής (ΕΛΟΤ EN1998-1).

## 5.7 Δεσπόζουσα ιδιομορφή

Η κατασκευή της παρούσας εργασίας εξετάζεται στη διεύθυνση  $y$ , όπου όπως έχει ειπωθεί και προηγουμένως η τοιχωματική λειτουργία είναι σαφής. Σε αυτή τη διεύθυνση, πραγματοποιήθηκε ιδιομορφική ανάλυση από την οποία προκύπτει ότι δεσπόζουσα είναι η δεύτερη ιδιομορφή, με δρώσα μάζα  $U_y=70.11\%$ . Η αντίστοιχη ιδιοπερίοδος που προκύπτει είναι  $T_y=0.658$  sec. Από την ανάλυση Pushover, η καμπύλη της κατασκευής που προέκυψε για τη δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο και για την εξεταζόμενη διεύθυνση  $y$  φαίνεται στη συνέχεια. Με κόκκινη γραμμή συμβολίζεται η καμπύλη ικανότητας για ιδιομορφική κατανομή φορτίου, ενώ με μπλε για τριγωνική κατανομή.



Σχήμα 5.5: Καμπύλη ικανότητας του φορέα

## 5.8 Προσομοίωση κατασκευής

Η προσομοίωση της κατασκευής που περιγράφηκε παραπάνω, γίνεται σε τρεις διαστάσεις με τη δημιουργία χωρικού προσομοιώματος, με χρήση του λογισμικού OpenSees, έκδοση 2.5.0. Η ακριβής διαδικασία που ακολουθήθηκε και οι παραδοχές που έγιναν, παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.



# Κεφάλαιο 6

## Προσομοίωση φορέα

### 6.1 Λογισμικό OpenSees

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η προσομοίωση της κατασκευής στην εν λόγω εργασία γίνεται με το λογισμικό OpenSees, version 2.5.0. Το OpenSees, που αποτελεί τα αρχικά του Open System for Earthquake Engineering Simulation, είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα που αναπτύχθηκε με στόχο την προσομοίωση κατασκευών ώστε να μελετάται η σεισμική τους απόκριση. Η ανάπτυξή του ξεκίνησε το 1999 στο Pacific Earthquake Engineering Research center και είναι γραμμένο κυρίως σε γλώσσα C++. Βέβαια, να σημειωθεί ότι χρησιμοποιεί υπορουτίνες επίλυσης τόσο σε γλώσσα C, όσο και σε Fortran.

Το συγκεκριμένο λογισμικό δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα δημιουργίας γραμμικών και μη γραμμικών στατικών και γεωτεχνικών μοντέλων, με κατανεμημένη ή συγκεντρωμένη πλαστικότητα και πραγματοποιεί στατικές και δυναμικές αναλύσεις. Διαθέτει βιβλιοθήκες με ποικιλία υλικών, διαφορετικών ειδών μελών και αναλύσεων. Ωστόσο, ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει υλικά και στοιχεία καινούρια, με τα χαρακτηριστικά που επιθυμεί, προσομοιώνοντας με αυτό τον τρόπο την κατασκευή που επιθυμεί με το βέλτιστο δυνατό τρόπο.

Στο OpenSees μπορεί να περιγραφεί ένα στατικό ή γεωτεχνικό στοιχείο σε τρία διαφορετικά επίπεδα ως εξής. Πρώτον σε επίπεδο μέλους, με ένα μοντέλο δύναμης-παραμόρφωσης. Δεύτερον σε επίπεδο διατομής, με ένα μοντέλο ροπών-στροφών. Τρίτον σε επίπεδο ίνας, με ένα μοντέλο τάσεων υλικού-έντασης.

Οι δυνατότητες του συγκεκριμένου προγράμματος είναι πολύ υψηλές σε ότι αφορά την προσομοίωση και την ανάλυση συστημάτων με

ελαστική ή ανελαστική συμπεριφορά. Η προσομοίωση γίνεται συνήθως με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία, ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης με επιφανειακά και χωρικά πεπερασμένα στοιχεία, προκειμένου να προσομοιωθεί το εδαφικό προφίλ μίας κατασκευής.

Σημαντικό πλεονέκτημα του OpenSees αποτελεί η ακρίβεια και η ταχύτητα εκτέλεσης των αναλύσεων. Παρόλα αυτά, δεν διαθέτει κάποιο γραφικό περιβάλλον και με μία πρώτη ματιά το περιβάλλον λειτουργίας του δεν μοιάζει τόσο φιλικό προς το χρήστη. Στην ιστοσελίδα του πανεπιστημίου του Berkeley όπου είναι διαθέσιμο το λογισμικό, υπάρχει αναλυτικό εγχειρίδιο που εξηγεί αναλυτικά και με παραδείγματα όλες τις διαθέσιμες εντολές του προγράμματος. Ωστόσο, κάποιες από αυτές, που πιο συγκεκριμένα συμβολίζονται με κίτρινο χρώμα και όχι με πράσινο, ενδέχεται να εμφανίζουν σφάλμα κατά τη χρήση τους. Για το λόγο αυτό προτιμάται να χρησιμοποιούνται οι εντολές που θεωρούνται βασικές και χρησιμοποιούνται συνηθέστερα, ώστε να μην παρουσιάζονται προβλήματα.

## 6.2 Ελαστική και ανελαστική συμπεριφορά

Η ανάλυση ενός φορέα μπορεί να γίνει για διαφορετικές περιπτώσεις απόκρισης. Πιο συγκεκριμένα, διακρίνονται η ελαστική και η ανελαστική συμπεριφορά. Για την ελαστική προσομοίωση ενός φορέα, αρκούν τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά των διατομών για τον προσδιορισμό των ραβδόμορφων στοιχείων του. Όπως είναι αναμενόμενο για φορείς ωπλισμένου σκυροδέματος, από την ελαστική ανάλυση δεν προκύπτουν αξιόπιστα αποτελέσματα, αφού κατά τη διάρκεια ενός σεισμού είναι βέβαιο ότι ορισμένα, αν όχι όλα τα μέλη της κατασκευής, εισέρχονται στην πλαστική τους περιοχή, μέρος των διατομών ρηγματώνεται και δεν λειτουργεί, καθώς επίσης συνυπάρχουν φαινόμενα διάτμησης και εξόλκευσης οπλισμών. Εναλλακτικά, μπορεί να γίνει ελαστική ανάλυση με ενεργές δυσκαμψίες για γραμμικές μεθόδους και ελέγχους σε όρους δυνάμεων. Τα μέλη προσομοιώνονται όπως προτείνεται από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.,



αλλά και πάλι πρόκειται για μία αρκετά απλοποιητική μέθοδο αν και τα αποτελέσματα της είναι καλύτερα από αυτά της απλής ελαστικής ανάλυσης.

Σε ότι αφορά την ανελαστική συμπεριφορά ενός φορέα, διακρίνεται σε ανελαστική συμπεριφορά με συγκεντρωμένη πλαστικότητα και σε ανελαστική συμπεριφορά με κατανεμημένη πλαστικότητα. Στην περίπτωση της συγκεντρωμένης πλαστικότητας προσομοιώνονται κατάλληλα με στροφικά ελατήρια οι θέσεις των μελών όπου θα υπάρξει διαρροή και θα δημιουργηθεί πλαστική άρθρωση. Φυσικά, εάν γίνει η παραδοχή ότι τα κατακόρυφα φορτία είναι σχετικά μικρά σε σχέση με τα σεισμικά, οι θέσεις όπου αναμένεται διαρροή και προσομοιώνεται η συγκεντρωμένη πλαστικότητα είναι τα άκρα των μελών. Στο OpenSees οι περιοχές συγκεντρωμένης πλαστικότητας μπορούν να προσομοιωθούν με μέλη μηδενικού μήκους (zero length elements), τα οποία ουσιαστικά είναι στροφικά ελατήρια αφού τα διέπει συγκεκριμένος νόμος ροπής-στροφής.

Τέλος, στην περίπτωση της ανελαστικής συμπεριφοράς με κατανεμημένη πλαστικότητα η πλαστικοποίηση συμβαίνει σε μία ευρύτερη περιοχή του μέλους και όχι σημειακά σε μεμονωμένες θέσεις όπως συμβαίνει στην προηγούμενη περίπτωση της συγκεντρωμένης πλαστικότητας. Στο λογισμικό OpenSees η προσομοίωση με παραδοχή κατανεμημένης πλαστικότητας μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικά στοιχεία: τα displacement-based και τα force-based. Και στις δύο περιπτώσεις τα χαρακτηριστικά των στοιχείων μπορούν να εισαχθούν είτε ορίζοντας νόμους ροπής – καμπυλότητας είτε πολύ ευκολότερα εισάγοντας τη διατομή του σκυροδέματος με τους οπλισμούς του και φυσικά ορίζοντας τους νόμους των προαναφερθέντων υλικών. Η δεύτερη μεθοδολογία είναι σαφώς προτιμότερη, γιατί λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση μεταξύ αξονικής δύναμης και ροπής στις δύο διευθύνσεις, γεγονός που θα μπορούσε να επιτευχθεί πολύ δυσκολότερα με τον πρώτο τρόπο.

Για τα displacement-based στοιχεία θεωρείται ένα πεδίο μετακινήσεων στο μέλος για τη μόρφωση του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας. Προσφέρουν καλή ακρίβεια στις αναλύσεις, χωρίς μεγάλο

υπολογιστικό κόστος. Βέβαια, το υπολογιστικό κόστος αυξάνεται όταν απαιτείται περισσότερη ακρίβεια, γιατί ο μόνος τρόπος είναι η προσομοίωση του μέλους με περισσότερα στοιχεία.

Από την άλλη πλευρά, με τα force-based στοιχεία αρκεί μία πύκνωση των σημείων ολοκλήρωσης για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια. Φυσικά, τα εν λόγω στοιχεία έχουν μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος αλλά όχι τέτοιο ώστε να τα καθιστά δύσχρηστα. Αντιθέτως, είναι συνολικά προτιμότερα και επιτρέπουν την προσομοίωση του μέλους μόνο με ένα στοιχείο, με απαραίτητη προϋπόθεση την εφαρμογή μόνο επικόμβιων και όχι κατανεμημένων φορτίων<sup>72</sup>. Για την μόρφωση του εφαπτομενικού τους μητρώου δυσκαμψίας θεωρείται ένα πεδίο εντατικών μεγεθών. Τελικά, αποφασίστηκε η προσομοίωση να γίνει με force-based στοιχεία, τόσο για τις δοκούς όσο και για τα υποστυλώματα.

## 6.3 Προσομοίωση φορέα

### 6.3.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα βασικά φέροντα στοιχεία της κατασκευής είναι τα τοιχώματα, τα υποστυλώματα, οι δοκοί και οι πλάκες. Συνεπώς, αυτά είναι τα στοιχεία που πρέπει να προσομοιωθούν κατάλληλα προκειμένου να γίνει αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς του κτηρίου σε σεισμούς κοντινού πεδίου. Το προσομοίωμα που δημιουργείται αποτελείται μόνο από ραβδόμορφα στοιχεία και όχι από επίπεδα ή χωρικά πεπερασμένα στοιχεία. Η ακριβής μεθοδολογία προσομοίωσης των διαφόρων στοιχείων της κατασκευής περιγράφεται παρακάτω.

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να σημειωθεί ότι στο προσομοίωμα δεν συμπεριλαμβάνονται το υπόγειο και το δώμα καθώς δεν επηρεάζουν τη σεισμική συμπεριφορά του κτηρίου. Πιο συγκεκριμένα, η κατασκευή

---

<sup>72</sup> Fragiadakis M.. Nonlinear Analysis of Frame Structures under Seismic Loading, Lecture Notes, Athens, 2016, p. 99.

θεωρείται ότι πακτώνεται στη στάθμη που συναντά το φυσικό έδαφος. Από την άλλη πλευρά, το δώμα δεν προσομοιώνεται γιατί δεν αποτελεί μέρος του φέροντα οργανισμού, αλλά κατασκευάζεται για να εξυπηρετήσει κάποιες άλλες ανάγκες, και η συμμετοχή του στις αναλύσεις θα οδηγούσε σε πολύ μεγάλες μετακινήσεις οροφής οι οποίες δεν είναι πραγματικές ούτε αντιπροσωπευτικές της συμπεριφοράς του φορέα.

Όπως έχει αναφερθεί στην προηγούμενη ενότητα, το κλιμακοστάσιο είναι τοποθετημένο σε μία από τις δύο εσοχές του τοιχώματος που αποτελεί τον πυρήνα της κατασκευής. Δεν λαμβάνεται υπόψη κατά την προσομοίωση, αφού γενικά είναι σκόπιμο τα κλιμακοστάσια να μελετώνται και να κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε όσο το δυνατόν να είναι ανεξάρτητα και να μην επηρεάζουν την απόκριση του φέροντος οργανισμού<sup>73</sup>. Συνεπώς, λαμβάνεται υπόψη στο προσομοίωμα ως οπή.

Τέλος, οι εξώστες δεν προσομοιώθηκαν αφού πρόκειται για μέλη της κατασκευής που λόγω της ιδιαιτερότητας τους ως πρόβολοι, ενδεχομένως να οδηγούσαν σε προβλήματα σύγκλισης στις μη γραμμικές αναλύσεις. Φυσικά, οι μάζες τους συμπεριλήφθηκαν στη συνολική μάζα της κατασκευής δεδομένου ότι η μάζα είναι μία από τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν την ιδιοπερίοδο της κατασκευής.

### 6.3.2 Κόμβοι προσομοιώματος

Αρχικά, δημιουργούνται οι κύριοι κόμβοι του προσομοιώματος, που αντιστοιχούν στα άκρα των υποστυλωμάτων/τοιχωμάτων, ως προς τον άξονα  $z$ , και στο κέντρο βάρους των διατομών των υποστυλωμάτων/τοιχωμάτων, ως προς τους άξονες  $x$  και  $y$ . Σε ότι αφορά τα άκρα των υποστυλωμάτων, ορίζονται υψομετρικά στο μέσο της πλάκας της κάθε στάθμης και όχι στην άνω στάθμη του σκυροδέματος όπως δίνεται στα σχέδια της κατασκευής. Φυσικά ο άξονας  $z$  ορίζεται καθ' ύψος της κατασκευής, και η αρχή των αξόνων υψομετρικά ορίζεται στη στάθμη όπου το κτήριο συναντά το φυσικό έδαφος και θεωρείται ότι πακτώνεται.

<sup>73</sup> Μιχαήλ Ν. Φαρδής, Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος, Πάτρα 2007, σ.107.

Στη συνέχεια εισάγονται οι δευτερεύοντες κόμβοι, που δημιουργούνται για δύο διαφορετικούς σκοπούς. Πρώτον, αντιστοιχούν στην κεντροβαρική εισαγωγή των δοκών στο προσομοίωμα, όπου τελικά γίνεται μετατόπιση όλου του μέλους εγκάρσια στη διεύθυνσή του προκειμένου να τοποθετηθεί στη θέση που ορίζεται από την κάτοψη του φορέα. Δεύτερον, ορίζονται δευτερεύοντες κόμβοι στον άξονα αναφοράς κάθε δοκού στις θέσεις αλλαγής διατομής. Λεπτομερέστερη περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης των μελών και των παραδοχών που έγιναν δίνεται σε επόμενη ενότητα. Στις περιπτώσεις όπου απαιτείται η επιβολή ίδιων μετακινήσιων και στροφικών συνθηκών, κύριοι θεωρούνται οι κόμβοι στα άκρα των υποστυλωμάτων. Για την προσομοίωση όλων των προαναφερθέντων μελών, γίνεται η παραδοχή ότι η περιοχή στην οποία συντρέχουν δοκοί και υποστυλώματα είναι πλήρως άκαμπτη και συμπεριφέρεται συνολικά ως στερεό σώμα.

### 6.3.3 Μέλη προσομοιώματος

#### 6.3.3.1 Τοιχώματα/υποστυλώματα

Σε ότι αφορά τα υποστυλώματα/τοιχώματα, προσομοιώθηκαν με τα προαναφερθέντα force-based στοιχεία, και πιο συγκεκριμένα με ένα στοιχείο για κάθε μέλος. Για λόγους πληρότητας, έγινε επιπλέον προσομοίωση με δύο στοιχεία για κάθε μέλος όπως προτείνουν βιβλιογραφικές πηγές ότι είναι σκόπιμο, αλλά δεν παρατηρήθηκαν αποκλίσεις ή διαφορές στο πλαίσιο που εξετάζεται ο φορέας. Δεδομένου ότι πρόκειται για ανελαστικά στοιχεία, είναι προφανές ότι λαμβάνεται υπόψη η πλαστικοποίηση που συμβαίνει στα στοιχεία κατά τη διάρκεια του σεισμού. Ο γεωμετρικός μετασχηματισμός που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί είναι τέτοιος ώστε να λαμβάνει υπόψη φαινόμενα δευτέρας τάξης P-Delta. Για τοιχώματα που η γεωμετρία της διατομής τους ήταν διαφορετική της ορθογωνικής, η προσομοίωση έγινε με περισσότερες από μία ορθογωνικές διατομές και στη συνέχεια, τους επιβλήθηκαν ίδιες μετακινήσιες και στροφικές συνθήκες. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με τη σύνδεση των κόμβων αυτών με ελαστικά στοιχεία θεωρητικά άπειρης

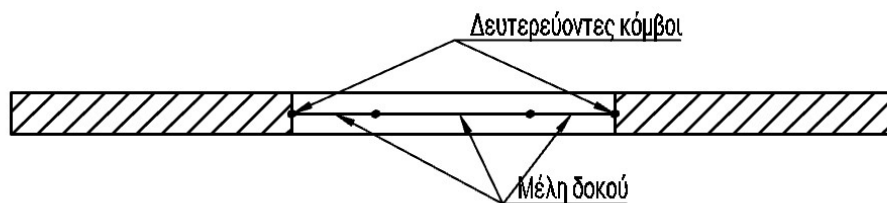
δυσκαμψίας, είτε με την άμεση επιβολή των ίδιων μετακινησιακών και στροφικών συνθηκών μέσω της εντολής EqualDOF. Σε αυτή την περίπτωση, λαμβάνεται ο ένας κόμβος ως κύριος (master) και ο άλλος ως δευτερεύων (slave). Είναι προφανές ότι οι συνθήκες που επιβάλλονται είναι αυτές του κύριου κόμβου.

#### 6.3.3.2 Δοκοί

Στη συνέχεια προσομοιώθηκαν οι δοκοί με τα προαναφερθέντα στοιχεία, για τους οποίους θα πρέπει να γίνει ιδιαίτερη αναφορά στον τρόπο προσομοίωσης τους, δεδομένου ότι έχουν ορισμένες ιδιαιτερότητες. Αρχικά, κατά μήκος της δοκού οι οπλισμοί μεταβάλλονται σημαντικά από το άνοιγμα στην στήριξη, όπου τοποθετείται πρόσθετος άνω οπλισμός λόγω διαφορετικών απαιτήσεων. Συνεπώς, το κάθε μέλος δοκού προσομοιώνεται με τρία διαφορετικά στοιχεία. Το μήκος του κάθε στοιχείου δεν είναι σταθερό ή συναρτήσει του μήκους του μέλους, αλλά μεταβάλλεται από μέλος σε μέλος ανάλογα με το μήκος των πρόσθετων οπλισμών της στήριξης. Δηλαδή, δημιουργούνται δύο στοιχεία, ένα για το κάθε άκρο της δοκού με μήκος ίσο με τη μήκος των πρόσθετων οπλισμών και ένα μέλος για το άνοιγμα.

Μία ακόμη ιδιαιτερότητα είναι ότι στο προσομοίωμα δεν τοποθετούνται οι πλάκες μέσω επιφανειακών ή πεπερασμένων στοιχείων. Κατ'επέκταση, πρέπει οι διατομές των δοκών να συμπεριλάβουν μέρος της πλάκας που συμβάλλει στην συμπεριφορά των δοκών έναντι κάμψης. Φυσικά, το τμήμα της πλάκας λαμβάνεται υπόψη μαζί με τους οπλισμούς του. Για να επιτευχθούν τα παραπάνω η κάθε πλακοδοκός προσομοιώνεται με δύο ή τρεις διαφορετικές γεωμετρίες, οι οποίες όμως εν τέλει συνθέτουν μία ενιαία διατομή. Η πρώτη αφορά την βασική διατομή και τους οπλισμούς της δοκού. Έπειτα, προσομοιώνονται μία ή δύο διατομές εκατέρωθεν την αρχικής διατομής της δοκού, ανάλογα με το αν η δοκός διαθέτει συνεργαζόμενο πλάτος από τη μία ή και από τις δύο πλευρές της. Στο σημείο αυτό, πρέπει να σημειωθεί ότι θα ήταν εντελώς λάθος η κάθε

πλακοδοκός να προσομοιωθεί με τρεις ανεξάρτητες διατομές συνδεδεμένες μεταξύ τους άκαμπτα γιατί με αυτόν τον τρόπο δεν εξασφαλίζεται η επιπεδότητα των διατομών. Τέλος, οι κόμβοι αρχής και τέλους της δοκού, δεν συμπίπτουν με τους κεντροβαρικούς κόμβους στις περιπτώσεις των τοιχωμάτων. Αντιθέτως, οι κόμβοι αυτοί αντιστοιχούν σε δευτερεύοντες κόμβους οι οποίοι βρίσκονται στην παρειά του τοιχώματος. Με τον τρόπο αυτό, δεν λαμβάνονται υπόψη στο προσομοίωμα μεγαλύτερες δυσκαμψίες μελών, οι οποίες δεν αντιστοιχούν στην πραγματικότητα. Βέβαια, στην περίπτωση του συγκεκριμένου φορέα που αποτελείται από τοιχώματα η διαφορά είναι αμελητέες, αλλά επιλέχθηκε να γίνει με την προαναφερθείσα θεώρηση. Στο σχήμα που ακολουθεί αποτυπώνεται η παραπάνω μεθοδολογία.



Σχήμα 6.1: Δευτερεύοντες κόμβοι στην παρειά των τοιχωμάτων για τη δημιουργία μελών δοκού.

Για τον υπολογισμό του συνεργαζόμενου πλάτους των πλακοδοκών, γίνεται αναφορά στους Ευρωκώδικες 2 (EC2) και 8(EC8). Πιο συγκεκριμένα, ο EC2<sup>74</sup> προσδιορίζει το συνεργαζόμενο πλάτος για την περιοχή της δοκού στο άνοιγμα, ενώ ο EC8<sup>75</sup> για τη περιοχή της στήριξης. Οι διατάξεις του EC2 για το άνοιγμα είναι:

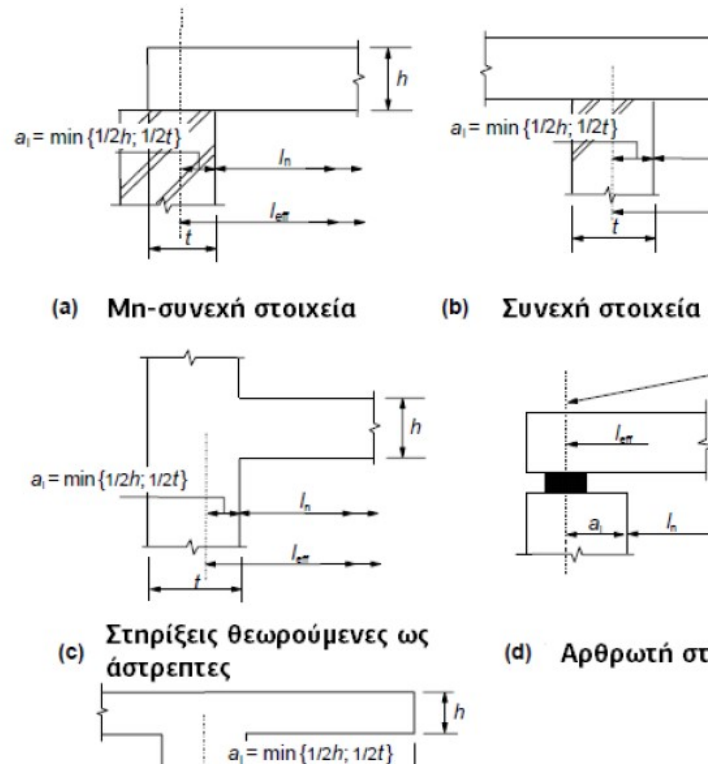
Το θεωρητικό άνοιγμα δοκών και πλακών σε κτήρια υπολογίζεται από τη σχέση

$$l_{eff} = l_n + \alpha_1 + \alpha_2 \quad (6.1)$$

<sup>74</sup> ΕΛΟΤ EN 1992-1-1. Ευρωκώδικας 2: Σχεδιασμός κατασκευών από σκυρόδεμα – Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτήρια, Αθήνα 2005, σ.67-68.

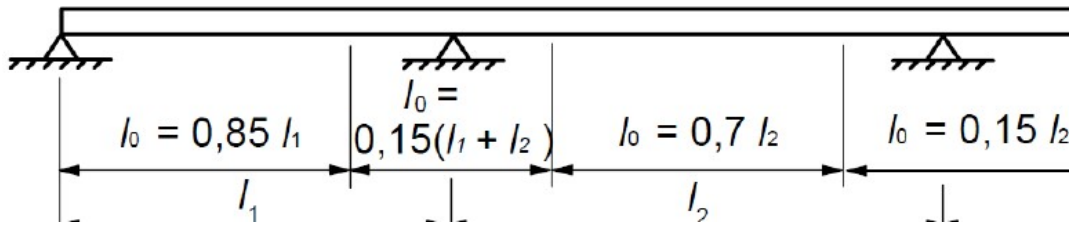
<sup>75</sup> ΕΛΟΤ EN 1998-1:2005, op.cit., σ.92.

όπου  $l_n$  είναι η καθαρή απόσταση ανάμεσα στις δύο παρειές των στηρίξεων, και οι τιμές  $\alpha_1$  και  $\alpha_2$  σε κάθε ένα από τα τμήματα μπορούν να λαμβάνονται από το Σχήμα 6.2 όπου  $t$  είναι το πλάτος της στήριξης όπως δείχνεται.



Σχήμα 6.2: Θεωρητικό άνοιγμα ( $l_{eff}$ ) για διαφορετικές συνθήκες στήριξης (ΕΛΟΤ EN 1992-1-1).

- (1) Για δοκούς μορφής T, το μήκος του συνεργαζόμενου πλάτους μέσο στο οποίο οι συνθήκες έντασης μπορούν να θεωρηθούν ομοιόμορφες, εξαρτάται από τις διαστάσεις του κορμού και του πέλματος, τον τύπο της φόρτισης, το άνοιγμα, τις συνθήκες στήριξης και τον εγκάρσιο οπλισμό.
- (2) Το συνεργαζόμενο πλάτος της πλακοδοκού θα πρέπει να προσδιορίζεται με βάση την απόσταση  $l_0$  μεταξύ των σημείων μηδενισμού των ροπών, η οποία μπορεί να λαμβάνεται από το Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3: Ορισμός του  $l_0$  για τον υπολογισμό του συνεργαζόμενου πλάτους πλακοδοκού (ΕΛΟΤ ΕΝ 1992-1-1).

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Το μήκος του προβόλου,  $l_3$ , θα πρέπει να είναι μικρότερο από το ήμισυ του διπλανού ανοίγματος και ο λόγος δύο διαδοχικών ανοιγμάτων θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ των  $\frac{2}{3}$  και 1,5.

(3) Το συνεργαζόμενο πλάτος  $b_{eff}$  πλακοδοκού T ή ακραίας πλακοδοκού L μπορεί να λαμβάνεται ως:

$$b_{eff} = \sum b_{eff,i} + b_w \leq b \quad (6.2)$$

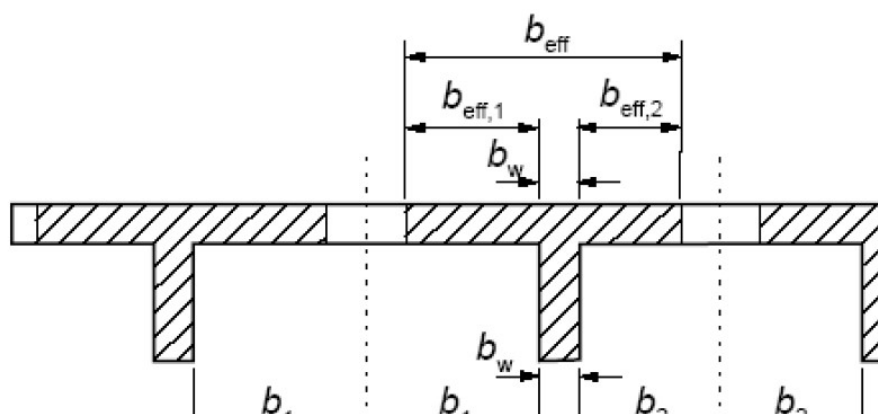
όπου

$$b_{eff} = 0,2b_i + 0,1l_0 \leq 0,2l_0 \quad (6.3)$$

και

$$b_{eff} \leq b_i \quad (6.4)$$

(για τους συμβολισμούς βλέπε Σχήματα 6.3 και 6.4).



Σχήμα 6.4: Παράμετροι του συνεργαζόμενου πλάτους πλακοδοκού (ΕΛΟΤ ΕΝ 1992-1-1).

(4) Για την περίπτωση που στη δομητική ανάλυση δεν απαιτείται ιδιαίτερη ακρίβεια, μπορεί να υποτεθεί ένα σταθερό πλάτος για όλο



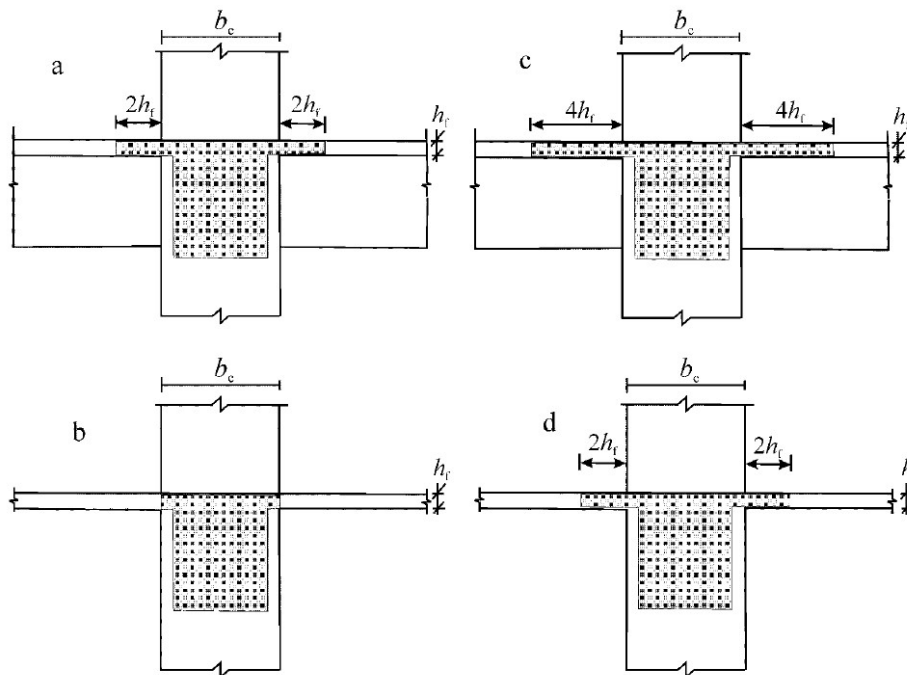
το άνοιγμα. Στην περίπτωση αυτή, θα πρέπει να υιοθετείται η τιμή που ισχύει για το άνοιγμα.

Οι διατάξεις του Ευρωκώδικα 8 (EC8) για τη στήριξη είναι:

Το συνεργαζόμενο πλάτος  $b_{eff}$  μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

α) για πρωτεύουσες σεισμικές δοκούς που εδράζονται σε εξωτερικά υποστυλώματα, το συνεργαζόμενο πλάτος πέλματος  $b_{eff}$  λαμβάνεται ίσο με το πλάτος  $b_c$  του υποστυλώματος, εάν δεν υπάρχει εγκάρσια δοκός (Σχήμα 6.5b), ή ίσο με το πλάτος αυτό αυξημένο κατά  $2h_f$  σε κάθε πλευρά της δοκού, εάν υπάρχει εγκάρσια δοκός παρόμοιου ύψους. (Σχήμα 6.5.a).

β) για πρωτεύουσες σεισμικές δοκούς που εδράζονται σε εσωτερικά υποστυλώματα, τα παραπάνω πλάτη μπορούν να αυξηθούν κατά  $2h_f$  σε κάθε πλευρά της δοκού (Σχήματα 6.5c και 6.5d).



Σχήμα 6.5: Συνεργαζόμενο πλάτος πέλματος  $b_{eff}$  για δοκούς που εδράζονται σε υποστυλώματα (ΕΛΟΤ EN 1998-1-1).

Σύμφωνα λοιπόν με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 2, παράγραφος 5.3.2.1, μπορεί να ληφθεί υπόψη ένα σταθερό συνεργαζόμενο πλάτος για

όλο το μέλος, που ισούται με αυτό του ανοίγματος. Έπειτα από δοκιμές, όπου παρατηρήθηκε ότι η ακριβέστερη προσομοίωση του συνεργαζόμενου πλάτους δεν οδηγεί σε σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα, αλλά αντιθέτως οι διαφοροποιήσεις είναι αμελητέες, αποφασίστηκε κάθε μέλος να διαθέτει ένα σταθερό συνεργαζόμενο πλάτος και ίσο με αυτό του ανοίγματος. Η επιλογή αυτή έγινε δεδομένου ότι η αναλυτικότερη προσομοίωση του συνεργαζόμενου πλάτους οδηγούσε σε μεγάλο υπολογιστικό κόστος, χωρίς τα αντίστοιχα αποτελέσματα να έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια.

Επιπλέον, λόγω της γεωμετρίας της κατασκευής υπάρχουν αρκετές εκκεντρότητες μεταξύ των κεντροβαρικών αξόνων των υποστυλωμάτων/τοιχωμάτων και των δοκών. Η φιλοσοφία που ακολουθήθηκε είναι η δημιουργία των στοιχείων με βάση τους κεντροβαρικούς τους άξονες, και στη συνέχεια η επιβολή ίδιων μετακινήσιμων και στροφικών συνθηκών στους κόμβους όπου απαιτείται, δηλαδή σε αυτούς που θα ταυτιζόνταν εάν τα μέλη συνδέονταν κεντρικά χωρίς καμία εκκεντρότητα.

#### 6.3.4 Διατομές

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μέσω των διάφορων διατομών εισάγονται ουσιαστικά τα αδρανειακά τους χαρακτηριστικά, αφού προσδιορίζεται η γεωμετρία, το υλικό και οι εκάστοτε οπλισμοί. Οι παραμορφώσεις της κάθε διατομής χρησιμοποιούνται προκειμένου να προσδιοριστούν οι μετακινήσεις του μέλους. Στη συνέχεια, οι διατομές διακριτοποιούνται σε πεπερασμένο αριθμό ινών σε κάθε διεύθυνση και προσδιορίζεται το πλήθος των σημείων ολοκλήρωσης κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Οι τάσεις που αναπτύσσονται στις προαναφερθείσες ίνες χρησιμοποιούνται προκειμένου να προσδιοριστούν οι παραμορφώσεις σε επίπεδο διατομής, μέσω της θεώρησης της επιπεδότητας των διατομών. Είναι φυσικό, να απαιτείται ένας ικανός αριθμός σημείων ολοκλήρωσης προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι ακριβή και αξιόπιστα, αλλά από την άλλη πλευρά ο υπερβολικά μεγάλος αριθμός σημείων έχει μεγάλο

υπολογιστικό κόστος χωρίς να αντικατοπτρίζεται σε αντίστοιχη ακρίβεια στα αποτελέσματα.

Για τα Force Based elements (FB) που έχουν επιλεγεί για την προσομοίωση του κτηρίου της παρούσας εργασίας, σε επίπεδο διατομής, αρκούν τουλάχιστον τέσσερα σημεία ολοκλήρωσης με προϋπόθεση να μην υπάρχει αρνητική κράτυνση, δηλαδή φθίνων κλάδος στο νόμο υλικού που χρησιμοποιείται. Σε αντίθετη περίπτωση, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι ανακριβή. Αντίστοιχα, σε επίπεδο ίνας, απαιτούνται τουλάχιστον 6x6 σημεία ολοκλήρωσης, δηλαδή 6 σημεία για κάθε μία από τις δύο διευθύνσεις της διατομής  $y$  και  $z$  αντίστοιχα<sup>76</sup>.

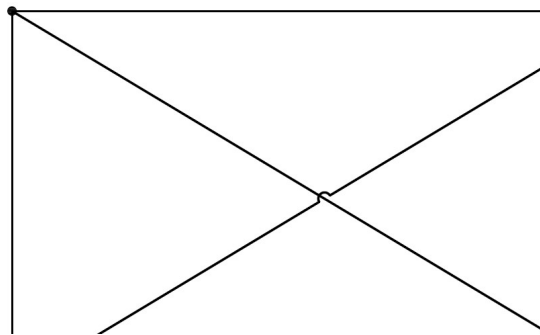
### 6.3.5 Δεσμεύσεις κόμβων

Απαραίτητη προϋπόθεση για την μόρφωση του προσομοιώματος είναι η εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών του συστήματος. Στην παρούσα εργασία, όπου δεν εξετάζεται η θεμελίωση, η βάση του κτηρίου θεωρείται πλήρως πακτωμένη στο έδαφος, αγνοώντας τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής. Συνεπώς, οι κόμβοι της βάσης πακτώνονται πλήρως, δηλαδή δεσμεύονται και οι έξι βαθμοί ελευθερίας τους.

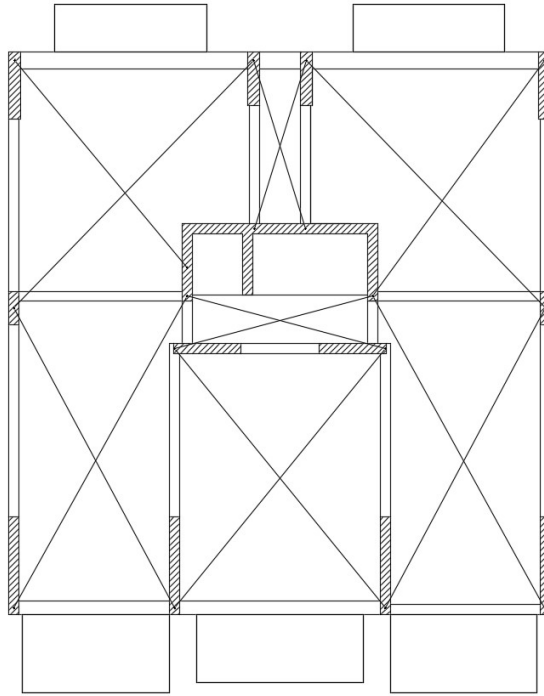
Τέλος, μία ακόμη μορφή δέσμευσης κόμβων είναι η προσομοίωση των πλακών προκειμένου να εξασφαλιστεί η διαφραγματική λειτουργία, δεδομένου ότι το πάχος των πλακών είναι 20cm, (πολύ μεγαλύτερο των 12cm) και προσφέρεται αυτή η ιδιότητα. Το OpenSees διαθέτει εντολή η οποία ορίζει με σχετικά απλό τρόπο το διάφραγμα. Η εντολή όμως αυτή, έχει σημαντικούς περιορισμούς ως προς τη θεώρηση κύριων και δευτερευόντων κόμβων, γεγονός που θα δυσκόλευε πολύ την προσομοίωση του φορέα στην προκειμένη περίπτωση, λόγω της ύπαρξης εκκεντροτήτων. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι μη ρεαλιστικά. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε να γίνει με διαφορετικό τρόπο η προσομοίωση των πλακών.

<sup>76</sup> Ke Du, Jingjiang Sun & Weixiao Xu, World Conference on Earthquake Engineering, WCEE, Lisboa 2012.

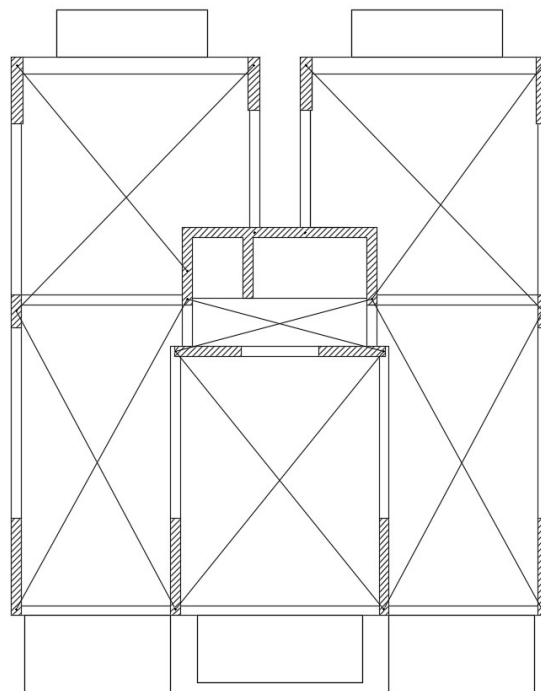
Ουσιαστικά, σκοπός είναι να μην μεταβάλλονται οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων του διαφράγματος στο επίπεδο της πλάκας, ενώ παράλληλα θα πρέπει να έχουν κοινή στροφή γύρω από τον κάθετο στην πλάκα άξονα. Δεδομένου ότι δεν γίνεται προσομοίωση με στοιχεία μηδενικού μήκους προκειμένου να προσομοιωθούν οι περιοχές πλαστικών αρθρώσεων, η προσομοίωση των διαφραγμάτων μπορεί να γίνει με την δημιουργία ελαστικών στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, κάθε διάφραγμα αντικαθίσταται από δύο διαγώνια μέλη τα οποία ενώνουν τους τέσσερις κύριους κόμβους που το ορίζουν. Πρόκειται για ελαστικά στοιχεία των οποίων τα αδρανειακά χαρακτηριστικά έχουν προσαυξηθεί 1000 φορές προκειμένου να διαθέτουν πρακτικά «άπειρη» δυστένεια και δυσκαμψία περί τον κάθετο στην πλάκα άξονα. Στο σχήμα που ακολουθεί, φαίνονται τα διαγώνια μέλη για την προσομοίωση ενός διαφράγματος.



Σχήμα 6.6: Βασικά μέλη για την προσομοίωση της διαφραγματικής λειτουργίας  
Στα επόμενα σχήματα φαίνονται τα διαφράγματα της οροφής Pilotis και της οροφής τυπικού ορόφου.



Σχήμα 6.7: Μέλη προσομοίωσης διαφραγμάτων οροφής Pilotis.



Σχήμα 6.8: Μέλη προσομοίωσης διαφραγμάτων οροφής τυπικού ορόφου.

### 6.3.6 Συνδυασμός δράσεων

Αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση του φέροντος οργανισμού, είναι απαραίτητο να υπολογισθούν τα φορτία που εφαρμόζονται. Από τις παραδοχές της μελέτης, είναι γνωστό ότι η διαστασιολόγηση του φορέα έγινε για τα φορτία που έχουν προσδιοριστεί στο Κεφάλαιο 5.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 0, κάθε συνδυασμός δράσεων που επιλέγεται πρέπει να περιλαμβάνει μία κύρια μεταβλητή δράση ή μια τυχηματική δράση. Οι συνδυασμοί δράσεων για τις καταστάσεις σεισμικού σχεδιασμού<sup>77</sup> είναι:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{ED} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.5)$$

Οι συντελεστές  $\psi$  που περιέχει η παραπάνω σχέση, καθορίζονται από το Παράρτημα A1, και πιο συγκεκριμένα από την παράγραφο A.1.2.2, Πίνακας A1.1 για τις πιο συνήθεις δράσεις.

Δράση	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Επιβαλλόμενα φορτία σε κτίρια, κατά κατηγορία (βλέπε EN 1991-1-1)			
Κατηγορία A: κατοικίες, συνήθης χώροι κατοικίας	0,7	0,5	0,3
Κατηγορία B: χώροι γραφείων	0,7	0,5	0,3
Κατηγορία C: χώροι συνάθροισης	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία D: χώροι καταστημάτων	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία E: χώροι αποθήκευσης	1,0	0,9	0,8
Κατηγορία F: χώροι κυκλοφορίας οχημάτων βάρος οχημάτων $\leq 30\text{kN}$	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία G: χώροι κυκλοφορίας οχημάτων $30\text{kN} < \text{βάρος οχημάτων} \leq 160\text{kN}$	0,7	0,5	0,3
Κατηγορία H: στέγες	0	0	0

Πίνακας 6.1: Συνιστώμενες τιμές των συντελεστών  $\psi$  για τα κτήρια, (Παράρτημα A, ΕΛΟΤ EN 1990).

<sup>77</sup> ΕΛΟΤ EN 1990. Ευρωκώδικας – Βάσεις σχεδιασμού δομημάτων, Αθήνα 2002, σ.44.

Από τα παραπάνω, δεδομένου ότι το κτήριο της παρούσας εργασίας εμπίπτει στην κατηγορία Α των κατοικιών ή συνήθων χώρων κατοικιών, είναι  $\psi_2 = 0,3$ .

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο συνδυασμός με τον οποίο υπολογίζονται τα τελικά φορτία του φορέα είναι ο σεισμικός συνδυασμός, όπου τα ίδια βάρη θεωρούνται με συντελεστή 1,0 και τα κινητά φορτία με 0,3.

### 6.3.7 Υπολογισμός φορτίων

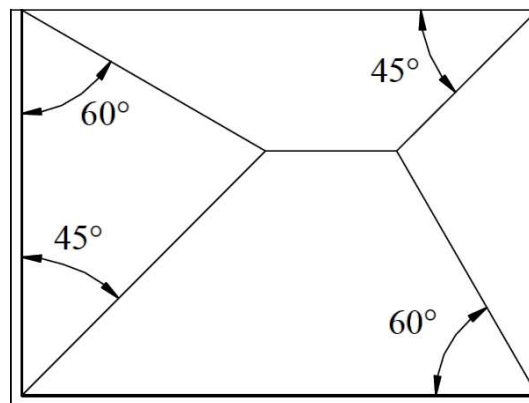
Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω το φορτία που θα εισαχθούν είναι επικόμβια. Συνεπώς, από τα φορτία που ορίζονται στις παραδοχές της μελέτης υπολογίζονται οι μάζες και τα φορτία των κόμβων. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι δεν απαιτείται να εφαρμοσθούν κατανεμημένα φορτία κατά μήκος των μελών, δεδομένου ότι στόχος δεν είναι η αποτίμηση της συμπεριφοράς μεμονωμένων θέσεων των μελών, όπως για παράδειγμα η θέση δημιουργίας πλαστικής άρθρωσης, αλλά η συνολική συμπεριφορά του κτηρίου και η τέμνουσα βάση που αναπτύσσεται.

Αρχικά, τα ίδια βάρη των πλακών, των υποστυλωμάτων/τοιχωμάτων και των δοκών υπολογίζονται βάση του εμβαδού της διατομής τους και του ειδικού βάρους του σκυροδέματος ( $\gamma_c = 25kN/m^3$ ). Προφανώς για τις πλακοδοκούς λαμβάνεται υπόψη μόνο η διατομή της δοκού και όχι του συνεργαζόμενου πλάτους, το οποίο υπολογίζεται μέσω του φορτίου των πλακών. Τα φορτία των δοκών κατανέμονται κατά το ήμισυ στους ακραίους κόμβους του μέλους, στην περίπτωση όμως που το μέλος καταλήγει σε δευτερεύοντα κόμβο, το φορτίο εφαρμόζεται στον αντίστοιχο κύριο κόμβο που τους έχουν επιβληθεί ίδιες μετακινησιακές και στρωφικές συνθήκες. Ομοίως, και για τα υποστυλώματα/τοιχώματα, τα φορτία ισομοιράζονται στους κόμβους τους.

Σε ότι αφορά τα φορτία των πλακών, χωρίζονται γεωμετρικά σε επιφάνειες επιρροής, και κατανέμονται αρχικά στις εκάστοτε φορτιζόμενες δοκούς και στη συνέχεια στους ακραίους κόμβους της δοκού με τη λογική

που εξηγήθηκε παραπάνω. Ο υπολογισμός των επιφανειών επιρροής γίνεται σύμφωνα με τον ΕΚΩΣ 2000<sup>78</sup>, και ισχύουν τα εξής:

Εφόσον σε μία γωνία συναντώνται δύο πλευρές ομοειδούς στήριξης, η γωνία μερισμού είναι  $45^\circ$ . Εφόσον συναντώνται πλήρως πακτωμένη με ελεύθερα εδραζόμενη πλευρά, η γωνία μερισμού προς την πλευρά της πάκτωσης είναι  $60^\circ$ . Για μερική πάκτωση λαμβάνονται γωνίες μεταξύ  $45^\circ$  και  $60^\circ$ . Επίσης επισημαίνεται ότι οι αντιδράσεις τετραέρειστων ομοιόμορφα φορτισμένων πλακών, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των δράσεων σχεδιασμού των δοκών, επιτρέπεται να υπολογίζονται από τις επιφάνειες φόρτισης που προκύπτουν από γεωμετρικό μερισμό της επιφάνειας της κάτοψης. Τα παραπάνω συνοψίζονται στο σχήμα που ακολουθεί.

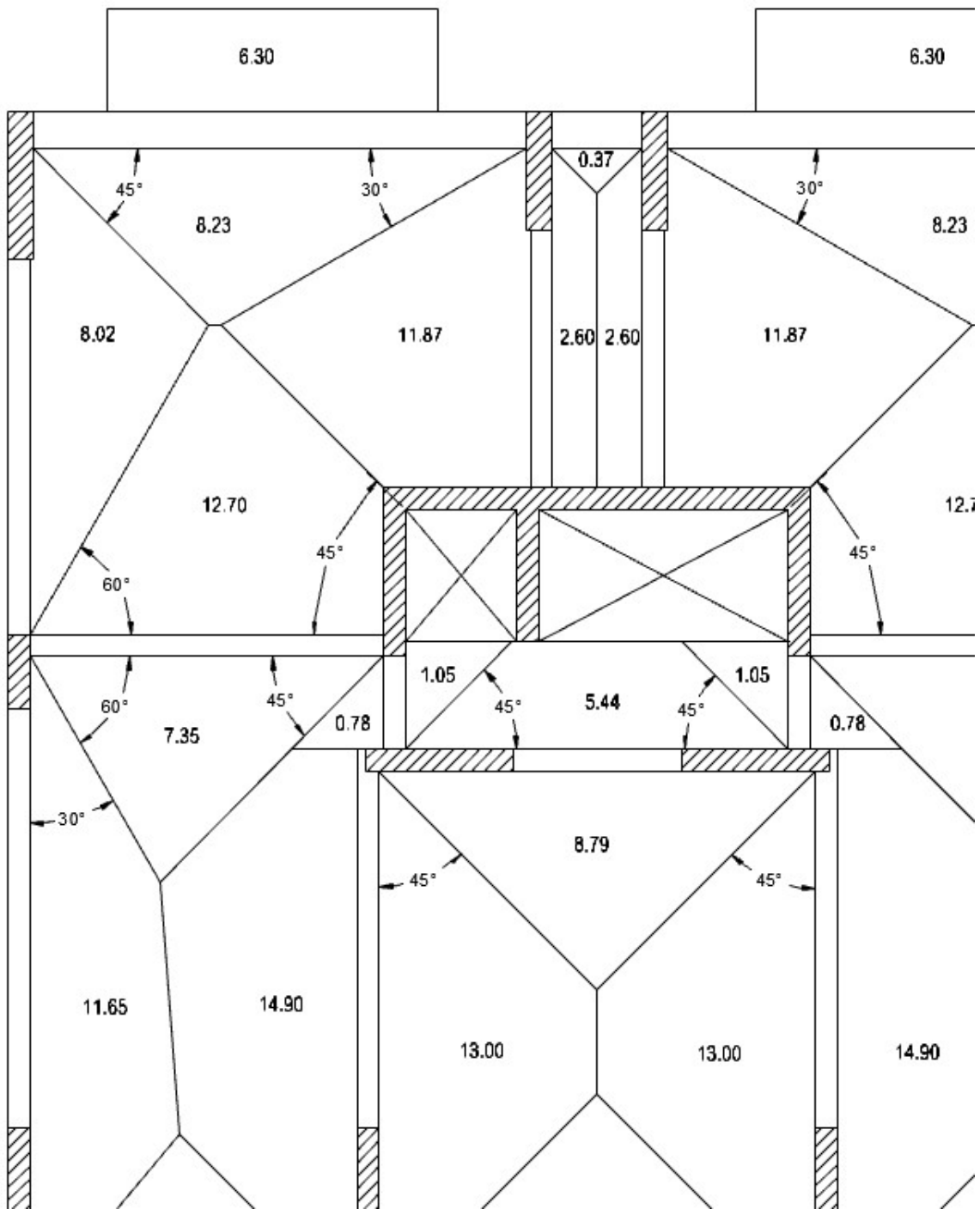


Σχήμα 6.9: Κατανομή του φορτίου τετραέρειστων πλακών για τον υπολογισμό των αντιδράσεων των στηρίξεων (Ελληνικός κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος, 2000).

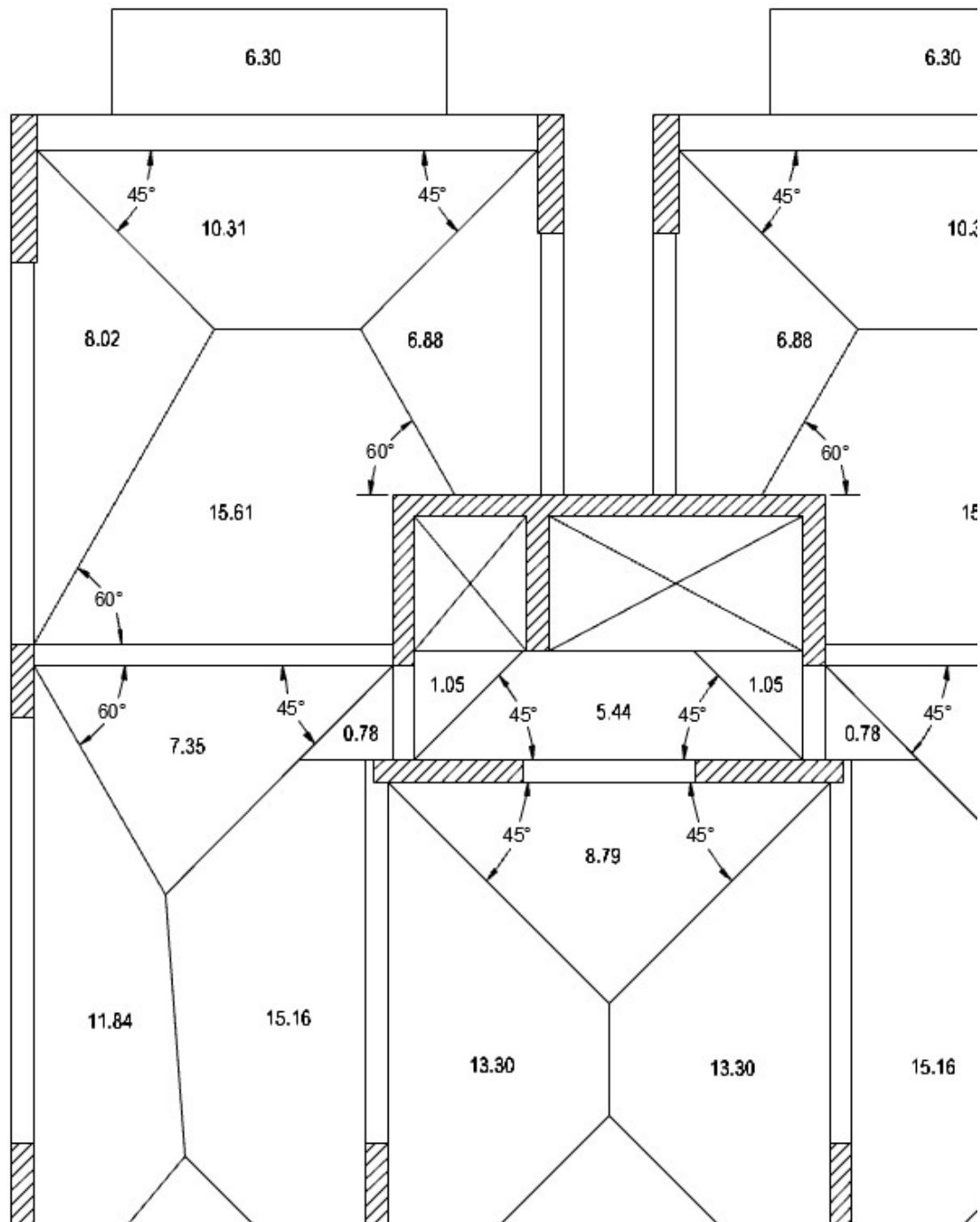
Εφαρμόζοντας τα παραπάνω, και κάνοντας την παραδοχή γωνίας  $50^\circ$  για τις γωνίες όπου συναντώνται δύο πλευρές εκ των οποίων η μία είναι πλήρως πακτωμένη και η άλλη μερικώς λόγω ύπαρξης εξώστη (οι εξώστες στην πάνω πλευρά του κτηρίου δεν λαμβάνονται υπόψη λόγω της μικρότερης διάστασής τους) προκύπτουν οι ακόλουθες επιφάνειες επιρροής:

<sup>78</sup> Ελληνικός κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Αθήνα 2006, σ.169.





Σχήμα 6.10: Επιφάνειες κατανομής φορτίων οροφής Pilotis.



Σχήμα 6.11: Επιφάνειες κατανομής φορτίων οροφής τυπικού ορόφου.

Στο σημείο αυτό, αφού έχουν υπολογιστεί οι επικόμβιες μάζες και φορτία εφαρμόζονται στον φορέα. Προφανώς, εισάγονται στο προσομοίωμα και οι μάζες και τα φορτία δεδομένου ότι και οι δύο τιμές είναι απαραίτητες σε διαφορετικά στάδια των αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα, οι μάζες χρειάζονται για τον προσδιορισμό του μητρώου μάζας το οποίο αργότερα χρειάζεται να αντιστραφεί, καθώς επίσης συμμετέχει και στον

υπολογισμό των ιδιομορφών. Από την άλλη πλευρά, τα επικόμβια φορτία είναι αυτά που εισάγουν τις φορτίσεις στην κατασκευή και αναπτύσσονται τα εντατικά μεγέθη.

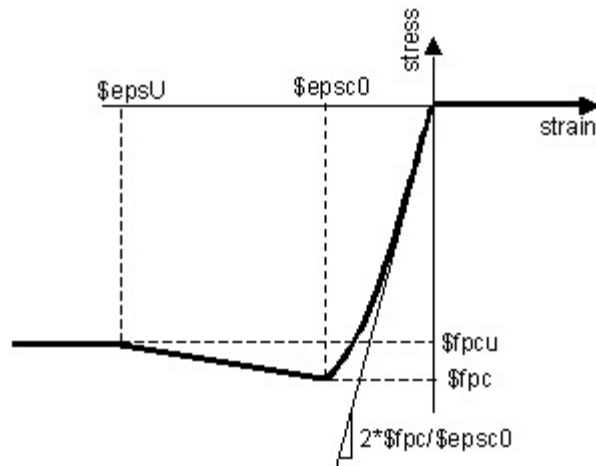
### 6.3.8 Χρησιμοποιούμενα Υλικά

Δεδομένου ότι στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιούνται μόνο ανελαστικές αναλύσεις, είναι απαραίτητο να καθοριστούν οι ανελαστικοί νόμοι που διέπουν τη συμπεριφορά των διαφόρων υλικών που χρησιμοποιούνται. Για το σκοπό αυτό, το OpenSees διαθέτει μία αρκετά πλούσια βιβλιοθήκη υλικών. Ωστόσο, δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα για δημιουργία νέου υλικού με νόμο συμπεριφοράς που ορίζει εκείνος. Στην εν λόγω εργασία τα υλικά που χρειάστηκε να προσομοιωθούν είναι το περισφιγμένο σκυρόδεμα, το απερίσφιγτο σκυρόδεμα και ο χάλυβας των οπλισμών. Για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκε η χρήση των υλικών Concrete01 και Steel01, η χρήση των οποίων είναι ενιαία σε όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά και οι νόμοι των παραπάνω υλικών περιγράφονται στη συνέχεια.

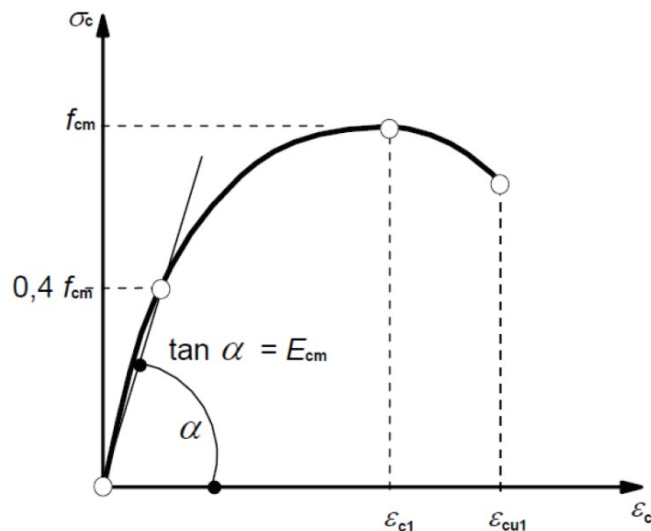
#### 6.3.8.1 Σκυρόδεμα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για το σκυρόδεμα επιλέχθηκε το υλικό Concrete01, το οποίο ακολουθεί το νόμο σκυροδέματος των Kent-Scott-Park. Πρόκειται για υλικό του οποίου ο νόμος συμπεριφοράς είναι συμβατός με τις υποδείξεις του Ευροκώδικα 2<sup>79</sup> και προσομοιώνει την ανελαστική συμπεριφορά του υλικού προσφέροντας κύκλους αποφόρτισης-επαναφόρτισης. Πολύ σημαντικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου υλικού είναι το γεγονός ότι είναι αριθμητικά ευσταθές σε αντίθεση με άλλα υλικά που δημιουργούν σοβαρά προβλήματα σύγκλισης. Στη συνέχεια δίνονται τα διαγράμματα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων του υλικού όπως ορίζεται στο OpenSees, καθώς και στον Ευρωκώδικα 2.

<sup>79</sup> ΕΛΟΤ EN 1992-1-1:2005, op. cit., σ.30-42.



Σχήμα 6.12: Υλικό Concrete01 (OpenSees wiki).



Σχήμα 6.13: Νόμος σκυροδέματος σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 (EN1992-1-1).

Αφού επιλέχθηκε το υλικό προσομοίωσης του σκυροδέματος, τα χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητο να εισαχθούν είναι η μέγιστη αντοχή, η αντοχή στην αστοχία και οι αντίστοιχες ανοιγμένες παραμορφώσεις. Στο αντίστοιχο διάγραμμα του Ευρωκώδικα, τα χαρακτηριστικά που προδιαγράφονται είναι η μέση τιμή αντοχής  $f_{cm}$ , η μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας περίπου στο 40% της αντοχής καθώς και η τιμή  $\epsilon_{c1}$  που είναι η ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση. Οι προαναφερθείσες τιμές, μπορούν να βρεθούν στον πίνακα 3.1 του EC2.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΟΡΕΑ

Κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος														Αναλυτική έκφραση/επεξήγηση	
$f_{ck}$ (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
$f_{cm}$ (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
$f_{ctm}$ (MPa)	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60$
$f_{ctk,0.05}$ (MPa)	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	2.2	2.5	2.7	2.9	3.0	3.1	3.2	3.4	3.5	$f_{ctk,0.05} = 0,7 \times f_{ctm}$ 5% ποσοστημόριο
$f_{ctk,0.95}$ (MPa)	2.0	2.5	2.9	3.3	3.8	4.2	4.6	4.9	5.3	5.5	5.7	6.0	6.3	6.6	$f_{ctk,0.95} = 1,3 \times f_{ctm}$ 95% ποσοστημόριο
$E_{cm}$ (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm}/10)]^{0.3}$ ( $f_{cm}$ in MPa)
$\epsilon_{c1}$ (‰)	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.25	2.3	2.4	2.45	2.5	2.6	2.7	2.8	2.8	Βλέπε Σχήμα 3.2 $\epsilon_{c1}(\%) = 0,7 f_{cm}^{0.31} < 2.8$
$\epsilon_{cu1}$ (‰)					3.5					3.2	3.0	2.8	2.8	2.8	Βλέπε Σχήμα 3.2 για $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu1}(\%) = 2,8 + 27[(98 - f_{cm})/100]^4$
$\epsilon_{c2}$ (‰)					2.0					2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	Βλέπε Σχήμα 3.3 για $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{c2}(\%) = 2,0 + 0,085(f_{ck} - 50)^{0.53}$
$\epsilon_{cu2}$ (‰)					3.5					3.1	2.9	2.7	2.6	2.6	Βλέπε Σχήμα 3.3 για $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu2}(\%) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$
$n$					2.0					1.75	1.6	1.45	1.4	1.4	για $f_{ck} \geq 50$ MPa $n = 1,4 + 23,4[(90 - f_{ck})/100]^4$
$\epsilon_{c3}$ (‰)					1.75					1.8	1.9	2.0	2.2	2.3	Βλέπε Σχήμα 3.4 για $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{c3}(\%) = 1,75 + 0,55[(f_{ck} - 50)/40]$
$\epsilon_{cu3}$ (‰)					3.5					3.1	2.9	2.7	2.6	2.6	Βλέπε Σχήμα 3.4 για $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu3}(\%) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$

Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά αντοχής και παραμορφώσεις σκυροδέματος (EN1992-1-1).

Αρχικά ορίζεται η τιμή  $k$  ως

$$k = 1.05 \cdot E_{cm} \cdot \frac{|\epsilon_{c1}|}{f_{cm}} \quad (6.6)$$

και στη συνέχεια ο λόγος  $\eta$

$$\eta = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \quad (6.7)$$

Η τιμή της τάσης που αντιστοιχεί στην παραπάνω ανηγμένη παραμόρφωση υπολογίζεται από τη σχέση

$$\sigma_c = f_{cm} \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \quad (6.8)$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει για όλες τις ποιότητες σκυροδέματος μέχρι την αντίστοιχη τιμή παραμόρφωσης  $\varepsilon_{cu1}$ . Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι επειδή σκοπός είναι η μελέτη της πραγματικής συμπεριφοράς της κατασκευής, το διάγραμμα θα συνεχιστεί πέραν της τιμής παραμόρφωσης  $\varepsilon_{cu1}$ , περίπου μέχρι την τιμή που αντιστοιχεί σε  $\sigma_c = 0.20f_{cm}$ . Εκτός αυτού, πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι το σκυρόδεμα είναι περισφιγμένο αφού οι συνδετήρες κλείνουν με γωνία  $135^\circ$ . Διαφορετικά δημιουργούνται σοβαρά προβλήματα σύγκλισης τόσο στις αναλύσεις χρονοϊστορίας όσο και στις αναλύσεις Pushover. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο το κτήριο που μελετάται έχει ποιότητα σκυροδέματος C20/25. Σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν παραπάνω και από τις τιμές του πίνακα του Ευρωκώδικα 2 που δίνεται παραπάνω, οι τιμές που αντιστοιχούν στην παραπάνω ποιότητα σκυροδέματος είναι  $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ ,  $f_{cm} = 28 \text{ MPa}$ ,  $\varepsilon_{c1} = 2.0\%$ ,  $\varepsilon_{cu1} = 3.5\%$ , και  $E_{cm} = 30 \text{ GPa}$ . Σύμφωνα με την παραδοχή που έγινε παραπάνω, ο φθίνων κλάδος μπορεί να επεκταθεί μέχρι την τιμή  $\sigma_c = 0.20f_{cm} = 0.20 \cdot 28 = 5.6 \text{ MPa}$ .

Συγκρίνοντας το διάγραμμα τάσεων ανηγμένης παραμόρφωσης του υλικού Concrete01 με αυτό του Ευρωκώδικα 2, παρατηρείται ότι στην πρώτη περίπτωση ο φθίνων κλάδος είναι γραμμικός σε αντίθεση με τη δεύτερη. Επιπλέον, το μοντέλο Kent-Scott-Park σύμφωνα με το οποίο έχει δημιουργηθεί το υλικό Concrete01 λαμβάνει υπόψη του διαφορετικό αρχικό μετρώ ελαστικότητας από αυτό του Ευρωκώδικα. Η τιμή αυτή υπολογίζεται από τη σχέση

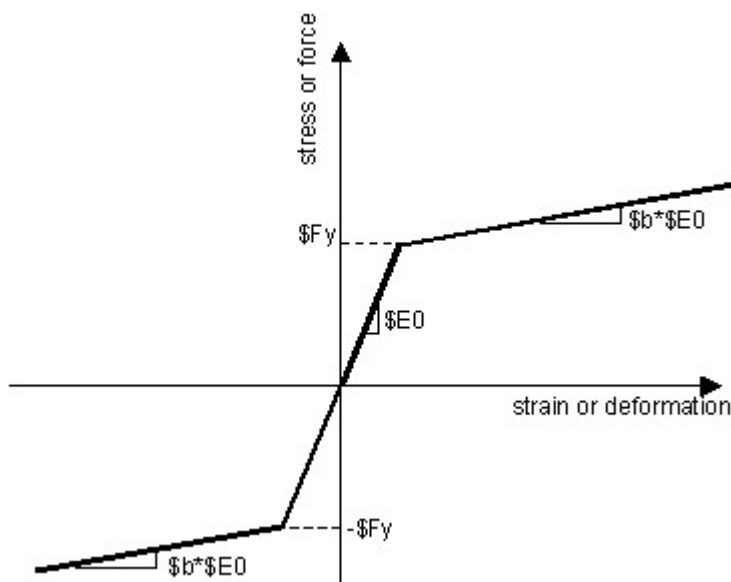
$$E_{c0} = \frac{2f_{cm}}{\varepsilon_{c1}} \quad (6.9)$$

και η τιμή που προκύπτει είναι  $28 \text{ GPa}$ , μικρότερη από τιμή που προδιαγράφεται από τον Ευρωκώδικα και αντιστοιχεί στο 40% της αντοχής. Για το λόγο αυτό, στον Ευρωκώδικα στο αρχικό τμήμα ισχύει  $k=2$  και δεν χρησιμοποιείται παραβολή, αλλά η καμπύλη προσαρμόζεται ώστε να δίνει το επιθυμητό αρχικό μέτρο ελαστικότητας με τον συντελεστή  $k$ . Συνολικά, η ταύτιση των δύο διαγραμμάτων είναι πολύ μεγάλη με μικρές αποκλίσεις στους επιμέρους κλάδους, που επιδρούν αμελητέα στην

απόκριση του φορέα. Συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το υλικό Concrete01 για την προσομοίωση του ωπλισμένου ή μη σκυροδέματος.

### 6.3.8.2 Χάλυβας

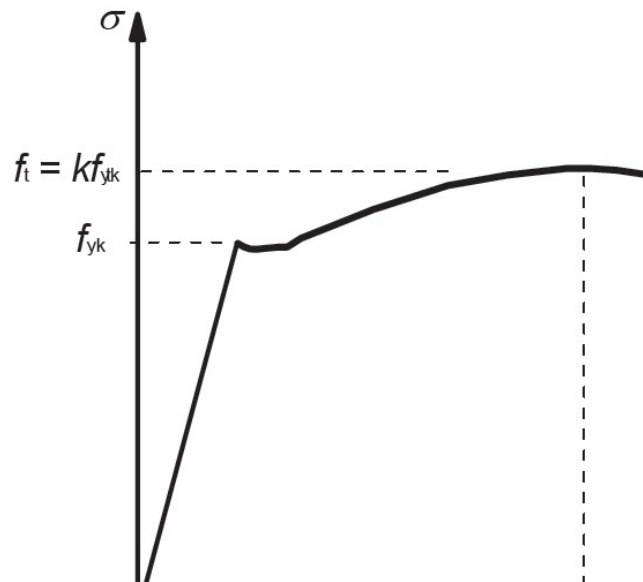
Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η χρησιμοποιούμενη ποιότητα χάλυβα τόσο για τον διαμήκη όσο και για τον εγκάρσιο οπλισμό είναι η ίδια. Το OpenSees διαθέτει και σε αυτή την περίπτωση διάφορα υλικά προσομοίωσης του χάλυβα, άλλα απλούστερα και άλλα πιο σύνθετα. Το απλούστερο προσφερόμενο μοντέλο είναι το Steel01, του οποίου το διάγραμμα φαίνεται στη συνέχεια.



Σχήμα 6.14: Υλικό Steel01 (OpenSees wiki).

Οι τιμές που πρέπει να προσδιοριστούν είναι η τάση διαρροής  $f_y$ , το μέτρο ελαστικότητας του αρχικού ελαστικού κλάδου  $E_0$ , καθώς επίσης και η τιμή  $b$  που αντιστοιχεί στο λόγο του μέτρου ελαστικότητας μετά και πριν τη διαρροή. Στον συγκεκριμένο νόμο υλικού δίνεται επίσης η δυνατότητα εισαγωγής παραμέτρων που προσδιορίζουν την κράτυνση του χάλυβα κατά τη διάρκεια των ανακυκλίσεων, αλλά η εισαγωγή των τιμών αυτών δεν είναι υποχρεωτική. Το μειονέκτημα που έχει το παραπάνω υλικό καθώς και άλλα υλικά χάλυβα που παρέχονται στη βιβλιοθήκη του OpenSees, είναι το γεγονός ότι ο κλάδος μετά τη διαρροή έχει σταθερή κλίση. Η

συμπεριφορά αυτή δεν περιγράφει επακριβώς την πραγματική συμπεριφορά των θερμά κατεργασμένων χαλύβων. Το διάγραμμα τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων τυπικού χάλυβα οπλισμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2<sup>80</sup> δίνεται στη συνέχεια.



Σχήμα 6.15: Διάγραμμα τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων τυπικού χάλυβα οπλισμού κατεργασμένου εν θερμώ (δίνονται οι απόλυτες τιμές της εφελκυστικής τάσης και της ανηγμένης παραμόρφωσης) σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 (EN1992-1-1).

Επιπλέον, το παραπάνω μοντέλο, για οποιαδήποτε τιμή παραμόρφωσης συνεχίζει να έχει τάση, δηλαδή ουσιαστικά δεν αστοχεί. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω μειονεκτήματα, υπάρχει μια πληθώρα υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα συνδυαστικά, ωστόσο δημιουργούνται σοβαρά προβλήματα σύγκλισης και τελικά η χρήση τους αποφεύγεται. Στα πλαίσια αναλύσεων συνήθων κατασκευών όπως είναι το κτήριο της εν λόγω εργασίας, η χρήση του μοντέλου Steel01 δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Η ποιότητα χάλυβα που έχει χρησιμοποιηθεί είναι S500. Συνεπώς προκύπτει μέση τιμή αντοχής  $f_y = 1.15 \cdot 500 = 575 \text{MPa}$ , και μέγιστη αντοχή

<sup>80</sup> ΕΛΟΤ EN 1992-1-1:2005, *ibid.*, σ.43-45.



χάλυβα  $f_{su} = 1.25 \cdot 575 = 719 \text{MPa}$ . Επιπλέον, για τους χάλυβες οπλισμού το μέτρο ελαστικότητας είναι  $200000 \text{MPa}$ . Σε ότι αφορά τις παραμορφώσεις, η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση του χάλυβα είναι  $\varepsilon_{su} = 0.075$ . Ως μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση λαμβάνεται η τιμή  $2 \cdot \varepsilon_{su} = 0.15$ . Τέλος, για το λόγο  $b$  επιλέγεται μια μικρή αλλά όχι μηδενική τιμή, για την αποφυγή προβλημάτων σύγκλισης, της τάξης του  $0.01$ .

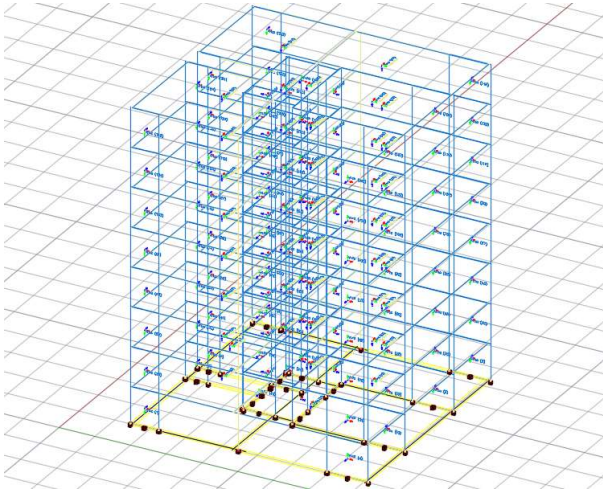
Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι οι εγκάρσιοι οπλισμοί τόσο των υποστυλωμάτων όσο και των δοκών, δεν εισάγονται στο προσομοίωμα, αλλά λαμβάνονται υπόψη έμμεσα, μέσω του διαχωρισμού του σκυροδέματος σε δύο ποιότητες, μία που αντιστοιχεί στο περισφιγμένο και μια στο απερίσφιγτο. Η θεώρηση αυτή έγινε δεδομένου του γεγονότος ότι οι συνδετήρες είναι τοποθετημένοι σε επαρκείς αποστάσεις, δηλαδή όχι πολύ αραιά, καθώς επίσης αγκυρώνουν σωστά, δηλαδή με γωνία  $135^\circ$ .

## 6.4 Προσομοίωση φορέα με άλλο λογισμικό

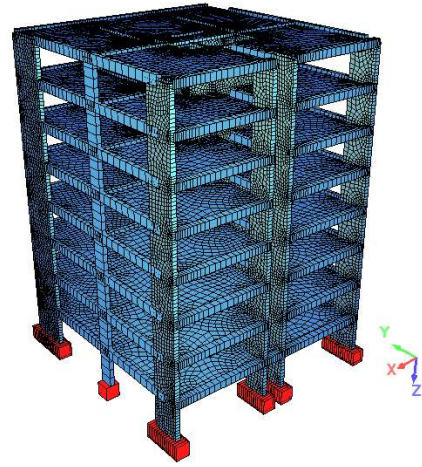
### 6.4.1 Γενικά

Για λόγους επαλήθευσης των αποτελεσμάτων και της απόκρισης της κατασκευής αλλά και για λόγους εποπτείας έγινε προσομοίωση της κατασκευής σε δύο επιπλέον λογισμικά. Πιο συγκεκριμένα, προσομοιώθηκε το κτήριο στα λογισμικά Sofistik 2016 της ομώνυμης εταιρίας, καθώς και στο SeisMobuild 2016, της εταιρίας Seismosoft. Και στις δύο περιπτώσεις προέκυψε ταύτιση των ιδιομορφών και των δρυσών ιδιομορφικών μαζών.

## 6.4.2 Προσομοίωμα λογισμικού Sofistik

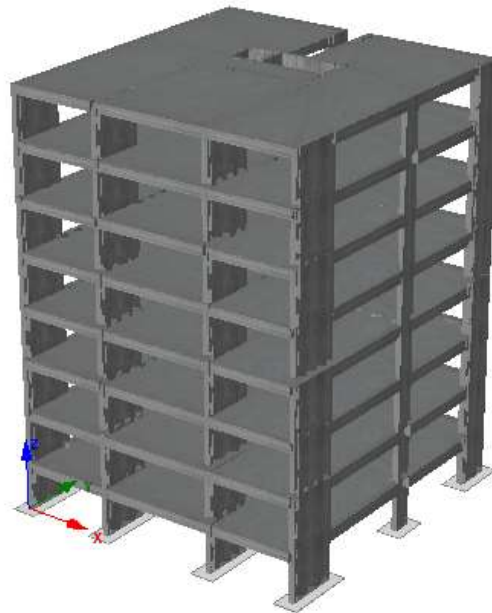


Σχήμα 6.16: Προσομοίωμα κατασκευής με το λογισμικό Sofistik.

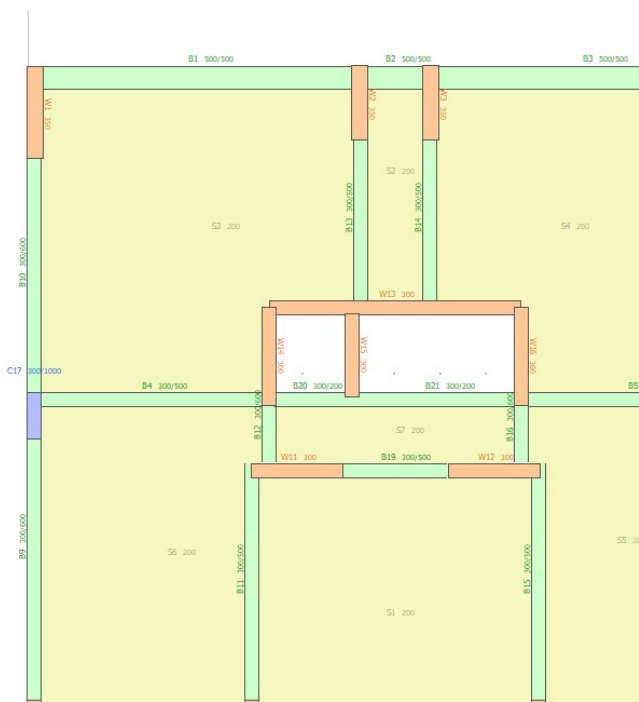


Σχήμα 6.17: Προσομοίωμα κατασκευής με το λογισμικό Sofistik.

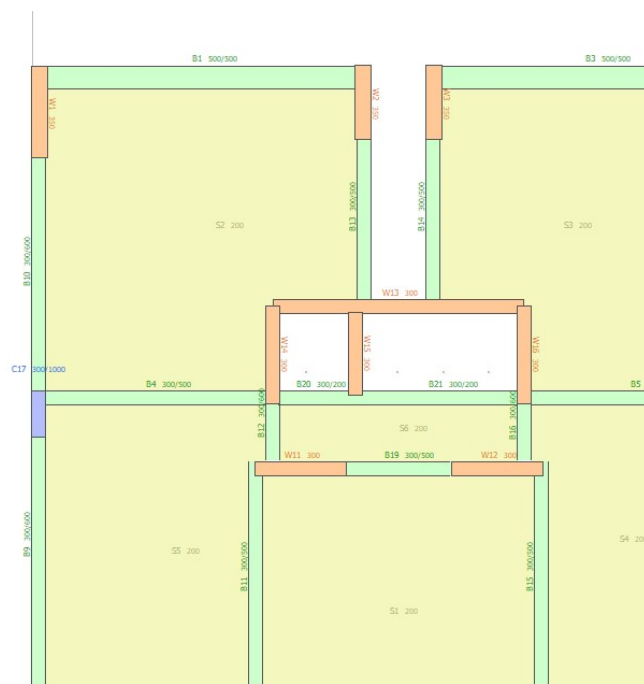
## 6.4.3 Προσομοίωμα λογισμικού Seisbuild



Σχήμα 6.18: Προσομοίωμα κατασκευής με το λογισμικό Seisbuild.



Σχήμα 6.19: Προσομοίωμα οροφής Pilotis με το λογισμικό Seismobuild.



Σχήμα 6.20: Προσομοίωμα οροφής τυπικού ορόφου με το λογισμικό Seismobuild.



# Κεφάλαιο 7

## Αναλύσεις

### 7.1 Στατική ανάλυση

Πριν πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε δυναμική ανάλυση είναι απαραίτητο να γίνει στατική ανάλυση του φορέα, προκειμένου να του εφαρμοσθούν οι μάζες, τα φορτία βαρύτητας, τα πρόσθετα μόνιμα και τα κινητά φορτία με τον κατάλληλο συνδυασμό. Τα παραπάνω φορτία και οι μάζες, διατηρούνται σταθερά κατά τη διάρκεια της ανάλυσης και τα επόμενα στάδια αναλύσεων συνεχίζουν την καταπόνηση των μελών του φορέα από το σημείο στο οποίο έχουν φτάσει λόγω των σταθερών φορτίων που έχουν ασκηθεί εξ' αρχής στην κατασκευή. Ο τρόπος υπολογισμού και εφαρμογής των φορτίων και των μαζών έχει παρουσιαστεί διεξοδικότερα στο κεφάλαιο 6, Προσομοίωση φορέα.

### 7.2 Ανάλυση Pushover

Το κτήριο της παρούσας εργασίας είναι πολυώροφο χωρίς μεγάλες ασυμμετρίες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η απόκριση του κτηρίου σε κάθε κύρια διεύθυνση επηρεάζεται κυρίως από την αντίστοιχη δεσπόζουσα ιδιομορφή που έχει προκύψει από την ιδιομορφική ανάλυση, ενώ η συμμετοχή των ανώτερων ιδιομορφών δεν είναι σημαντική. Τότε, μπορεί να εφαρμοστεί μία απλοποιημένη μέθοδος ανάλυσης, η οποία βασίζεται στη συμμετοχή μόνο της θεμελιώδους ιδιομορφής<sup>81</sup>. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8, η μέθοδος αυτή ονομάζεται μέθοδος ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης, ενώ στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ) αναφέρεται ως Απλοποιημένη φασματική μέθοδος.

---

<sup>81</sup> I.N. Ψυχάρης. Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Αθήνα, 2015, σ.3-24÷3-27.

Πρόκειται για μία ανάλυση κατά την οποία επιβάλλονται φορτία στην κατασκευή με συγκεκριμένη κατανομή, αυξανόμενα σταδιακά. Η κατανομή αυτή μπορεί να είναι σύμφωνα με την πρώτη ιδιομορφή, τριγωνική ή κανονική. Τα φορτία ασκούνται ιδανικά στον κόμβο που αντιστοιχεί στο κέντρο μάζας του κάθε ορόφου. Στην περίπτωση που δεν έχει προσομοιωθεί το διάφραγμα μέσω «master» και «slave» κόμβων, όπως στην προκειμένη περίπτωση, τα φορτία επιμερίζονται σε όλους τους κύριους κόμβους του κάθε ορόφου. Το κριτήριο για να σταματήσει η ανάλυση είναι η επίτευξη συγκεκριμένης μετακίνησης σε ένα συγκεκριμένο κόμβο που επιλέγεται. Αυξανόμενα τα φορτία κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, υπάρχει πιθανότητα να δημιουργηθούν πλαστικοποιήσεις σε κάποιες θέσεις του φορέα. Τελικά, προκύπτει το διάγραμμα τέμνουσας βάσης ( $V_b$ ) – μετακίνησης κόμβου αναφοράς ( $d_{node}$ ).

Στην περίπτωση της ανάλυσης Pushover με ιδιομορφική κατανομή, το επιβαλλόμενο φορτίο σε κάθε όροφο προσδιορίζεται με βάση την δεσπόζουσα ιδιομορφή του κτηρίου. Θεωρείται η ορθότερη μέθοδος υπολογισμού των φορτίων, αφού η θεμελιώδης ιδιομορφή προσδιορίζει ουσιαστικά την απόκριση της κατασκευής και επιπλέον, εάν ένα κτήριο διαθέτει υπόγειο, αυτό δεν πρέπει να συμμετέχει στη διέγερση από το σεισμό. Σε ότι αφορά τη διαδικασία υπολογισμού, πρέπει πρώτα να γίνει ιδιομορφική ανάλυση από όπου θα προκύψουν τα ιδιοδιανύσματα των κόμβων. Για κάθε κύριο κόμβο, έχει προσδιοριστεί κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης της κατασκευής η αντίστοιχη μάζα που τον φορτίζει. Συνεπώς, τα επιβαλλόμενα φορτία υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση

$$F_{k,i} = m_{k,i} \cdot \varphi_{k,i} \quad (7.1)$$

όπου  $i$  είναι η ιδιομορφή και  $k$  ο δείκτης που προσδιορίζει τον εκάστοτε κόμβο.

Στην περίπτωση που εφαρμόζεται τριγωνική κατανομή στα ασκούμενα φορτία, η θεμελιώδης ιδιομορφή προσεγγίζεται και προσομοιάζεται με ένα ανεστραμμένο τρίγωνο, όπου οι οριζόντιες

μετακινήσεις αυξάνονται γραμμικά καθ' ύψος. Σε αυτή την περίπτωση για τον υπολογισμό του φορτίου κάθε κόμβου, ισχύει και πάλι η σχέση

$$F_{k,i} = m_{k,i} \cdot \varphi_{k,i} \quad (7.2)$$

$$\varphi_{k,i} = z_i/H \quad (7.3)$$

όπου  $i$  είναι ο όροφος,  $z_i$  το ύψος κάθε ορόφου από τη στάθμη θεμελίωσης ή την άνω επιφάνεια άκαμπτου υπογείου,  $H$  το συνολικό ύψος του κτηρίου και  $k$  ο δείκτης που προσδιορίζει τον εκάστοτε κόμβο.

Τέλος, στην περίπτωση της ανάλυσης Pushover με ορθογωνική κατανομή, εφαρμόζεται σταθερό φορτίο σε όλες της στάθμες της κατασκευής. Το φορτίο αυτό, προκύπτει εμπειρικά και υπολογίζεται από τη σχέση

$$F_k = m_k \cdot 0.85 \quad (7.4)$$

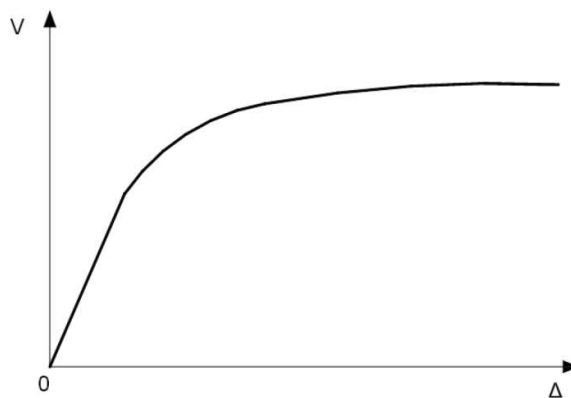
όπου ο δείκτης  $k$  προσδιορίζει τον κάθε κόμβο. Η ορθογωνική κατανομή είναι μία προσπάθεια προσέγγισης της δράσης όλων των ιδιομορφών της κατασκευής.

Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, η διεύθυνση που διερευνάται η συμπεριφορά της κατασκευής είναι η διεύθυνση  $y$ , όπου είναι σαφής η τοιχωματική της λειτουργία. Επιπρόσθετα, για λόγους πληρότητας και εποπτείας έγιναν και οι τρεις παραπάνω αναλύσεις και επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η ιδιομορφική κατανομή σύμφωνα με την δεσπόζουσα ιδιομορφή. Η καμπύλη ικανότητας για ορθογωνική κατανομή δεν προσεγγίζει πολύ καλά την απόκριση της κατασκευής και τελικά δεν λαμβάνεται υπόψη. Στο σημείο αυτό, να διευκρινιστεί ότι το OpenSees δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να υπολογίσει και να αποθηκεύσει σε αρχεία τα ιδιοδιανύσματα της κάθε ιδιομορφής που αντιστοιχούν σε κάθε κόμβο και να τα καλέσει και πάλι αργότερα προκειμένου να τα χρησιμοποιήσει. Ουσιαστικά, τα ιδιοδιανύσματα που χρησιμοποιούνται είναι αυτά των τριών μετακινήσιμων βαθμών ελευθερίας, αφού στο μητρώο μάζας τα στοιχεία των στροφικών βαθμών ελευθερίας είναι μηδενικά.

Στη συνέχεια με δεδομένη την κατανομή της φόρτισης, επιλέγεται ο κόμβος αναφοράς, στον οποίο θα πραγματοποιείται ο έλεγχος για την συνέχιση της ανάλυσης ή όχι, και ο βαθμός ελευθερίας στον οποίο γίνεται η εφαρμογή των φορτίων. Για να επιτευχθούν τα παραπάνω, απαιτείται έλεγχος μετακινήσεων (displacement control) και προσδιορισμός της αύξησης της μετακίνησης σε κάθε βήμα. Φυσικά, το πλήθος των βημάτων που εκτελούνται ορίζονται από το χρήστη. Τότε, σε κάθε βήμα ο αλγόριθμος υπολογίζει ένα φορτικό συντελεστή  $\lambda$ , ο οποίος πολλαπλασιαζόμενος με τις δυνάμεις αναφοράς που έχουν οριστεί στην αρχή της ανάλυσης, δίνει τη μετακίνηση του σημείου αναφοράς στον επιλεγμένο βαθμό ελευθερίας. Η μετακίνηση αυτή, ισούται με τη στοχευόμενη μετακίνηση του κάθε βήματος. Όλη η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$K_m^{*i} \Delta U_m^{i+1} = (\lambda_m^i + \Delta \lambda^{i+1}) F^{ref} - F(U_m^i) \quad (7.5)$$

Όπου  $m$  είναι το βήμα με το οποίο επιδιώκεται η αύξηση της μετακίνησης στον κόμβο αναφοράς στην τιμή  $U_{ref,m} = U_{ref,m-1} + d_{incr}$ ,  $i$  είναι το βήμα με το οποίο επιδιώκεται η ισορροπία εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων,  $U$  οι μετακινήσεις των κόμβων,  $K^*$  το επαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας,  $F^{ref}$  το διάνυσμα των δυνάμεων αναφοράς,  $F(U)$  οι εσωτερικές δυνάμεις που προκύπτουν από τις μετακινήσεις και  $\lambda$  ο φορτικός συντελεστής. Δεδομένου ότι στην παραπάνω σχέση υπάρχει ένας άγνωστος παραπάνω, πρέπει να προστεθεί η δέσμευση  $\Delta U_{ref,m}^{i+1} = U_{ref,m} - U_{ref,m}^i$ . Στο σχήμα που ακολουθεί δίνεται μία τυπική καμπύλη ικανότητας συνήθους κατασκευής.



Σχήμα 7.1: Τυπική καμπύλη ικανότητας συνήθους κατασκευής.



Στο σημείο αυτό, πρέπει να σημειωθεί ότι στις καμπύλες ικανότητας που προέκυψαν, ο οριζόντιος κλάδος δεν είναι τόσο εμφανής και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το προσομοίωμα είναι κατανεμημένης πλαστικότητας και όχι συγκεντρωμένης.

### 7.3 Ανάλυση Χρονοϊστορίας

Εκτελώντας αναλύσεις χρονοϊστορίας, μπορεί να γίνει αποτίμηση της συμπεριφοράς του φορέα σε διάφορες σεισμικές διεγέρσεις, είτε πραγματικές είτε τεχνητές. Προκειμένου να γίνει η ανάλυση είναι απαραίτητη η εισαγωγή της σεισμικής καταγραφής στην οποία είναι επιθυμητό να υποβληθεί ο φορέας, Συνηθέστερα, οι καταγραφές αυτές εισάγονται σε όρους επιταχύνσεων και μπορούν να εισαχθούν ταυτόχρονα έως τρεις χρονοϊστορίες. Αυτές αντιστοιχούν στις τρεις διευθύνσεις  $x, y$  και  $z$ , δηλαδή δύο οριζόντιες και μία κατακόρυφη συνιστώσα. Γενικά, η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού δεν λαμβάνεται υπόψη για συνήθεις κατασκευές, θεωρώντας ότι η επιρροή της στη συμπεριφορά του φορέα δεν είναι καθοριστική. Στην εν λόγω εργασία, οι χρονοϊστορίες εφαρμόζονται στη διεύθυνση  $y$  της κατασκευής που όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι η διεύθυνση στην οποία είναι ξεκάθαρη η τοιχωματική της λειτουργία.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η δυναμική ανάλυση απαιτούνται ορισμένα μητρώα για τη μόρφωση των εξισώσεων. Αρχικά, απαιτείται το μητρώο μάζας  $[M]$ , το οποίο δημιουργείται λαμβάνοντας υπόψη τις μάζες που έχουν οριστεί στους κόμβους. Στο μητρώο αυτό μη μηδενικές είναι οι τιμές των μετακινησιακών βαθμών ελευθερίας, ενώ μηδενικές είναι οι αντίστοιχες τιμές των στροφικών βαθμών ελευθερίας. Συνεπώς το μητρώο μάζας έχει μόνο διαγώνια στοιχεία.

Επιπλέον, απαιτείται το μητρώο απόσβεσης  $[C]$ , το οποίο δεν προκύπτει άμεσα από τα δεδομένα που εισάγονται αλλά είναι δυνατόν να υπολογιστεί με διάφορες μεθόδους που προσομοιώνουν την απόσβεση του

συστήματος. Στο OpenSees συνήθως χρησιμοποιείται η απόσβεση Reyleigh. Με την μέθοδο αυτή, απαιτούνται οι συντελεστές απόσβεσης δύο ιδιομορφών. Το μητρώο απόσβεσης υπολογίζεται από τη σχέση

$$[C] = \alpha_0[M] + \alpha_1[K] \quad (7.6)$$

Για τις δύο ιδιομορφές  $m$  και  $n$  που έχουν επιλεχθεί, για συντελεστές απόσβεσης  $\xi_m$  και  $\xi_n$ , γωνιακές συχνότητες  $\omega_m$  και  $\omega_n$  αντίστοιχα, οι συντελεστές των μητρώων υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\alpha_0 = \frac{2\omega_m\omega_n(\omega_n\xi_m - \omega_m\xi_n)}{\omega_n^2 - \omega_m^2} \quad (7.7)$$

$$\alpha_1 = \frac{2(\omega_n\xi_n - \omega_m\xi_m)}{\omega_n^2 - \omega_m^2} \quad (7.8)$$

Το μητρώο δυσκαμψίας που χρησιμοποιήθηκε είναι το αρχικό ελαστικό μητρώο δυσκαμψίας, μιας και η συμπεριφορά του μητρώου απόσβεσης σε φθίνοντες κλάδους των διαγραμμάτων ροπών-στροφών, δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς.

Ορισμένα ακόμη από τα στοιχεία που απαιτούνται είναι το διάνυσμα εσωτερικών δυνάμεων μελών και το διάνυσμα εξωτερικών δράσεων. Σε ότι αφορά το πρώτο, συμβολίζεται ως  $\{F^{int}(U)\}$  και εξαρτάται από τις μετακινήσεις των βαθμών ελευθερίας του συστήματος. Στην ειδική περίπτωση που η απόκριση είναι ελαστική ισχύει  $\{F^{int}(U)\} = [K]\{U\}$ . Σε ότι αφορά το δεύτερο, συμβολίζεται ως  $\{F^{ext}(\ddot{U}_g)\}$  και εξαρτάται από τις επιταχύνσεις του εδάφους σε κάθε διεύθυνση. Υποθέτοντας σταθερό μητρώο απόσβεσης, η δυναμική ισορροπία του συστήματος περιγράφεται από την μητρική εξίσωση:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + \{F^{int}(U)\} = \{F^{ext}(\ddot{U}_g)\} \quad (7.9)$$

Προκειμένου να επιλυθεί η παραπάνω εξίσωση ολοκληρώνεται η εξίσωση δυναμικής ισορροπίας μέσω της μεθόδου που επιλέγεται. Στην προκειμένη περίπτωση, και όντας η συνηθέστερη χρησιμοποιούμενη μέθοδος, επιλέγεται η μέθοδος Newmark. Με τη μέθοδο αυτή, στο μητρώο

μετακινήσεων και στο μητρώο ταχυτήτων στη χρονική στιγμή  $t+\Delta t$  ισχύουν τα εξής:

$$U_{t+\Delta} = U_t + \Delta t \dot{U}_t + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{U}_t + \beta \Delta t^3 \ddot{\ddot{U}}_t \quad (7.10)$$

$$\dot{U}_{t+\Delta t} = \dot{U}_t + \Delta t \ddot{U}_t + \gamma \Delta t^2 \ddot{\ddot{U}}_t \quad (7.11)$$

$$\text{όπου } \ddot{\ddot{U}}_t = \frac{\dot{U}_{t+\Delta t} - \dot{U}_t}{\Delta t} \quad (7.12)$$

Η τελική εξίσωση ισορροπίας που προκύπτει έπειτα από πράξεις επιλύεται με επαναληπτική μέθοδο όπως για παράδειγμα η Newton-Raphson. Σε περιπτώσεις που υπάρχουν προβλήματα σύγκλισης, έχει διαπιστωθεί ότι η επαναληπτική μέθοδος Krylov Newton είναι αποτελεσματικότερη. Ουσιαστικά στα υποδιαστήματα των επαναλήψεων επιτυγχάνει να επιταχύνει τη σύγκλιση της μεθόδου Modified Newton. Η εξίσωση που πρέπει να επιλυθεί είναι:

$$\hat{K}_{t+\Delta t}^i \Delta U_{t+\Delta t}^{i+1} = \hat{P}_{t+\Delta t}^i \text{ όπου} \quad (7.13)$$

$$\hat{K}_{t+\Delta t}^i = \Delta U_{t+\Delta t}^{*i} + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} C + \frac{1}{\beta \Delta t^2} M \quad (7.14)$$

$$\hat{P}_{t+\Delta t}^i = F_{t+\Delta t}^{ext} - F_{t+\Delta t}^{int}(U_{t+\Delta t}^i) - C \dot{U}_{t+\Delta t}^i - M \ddot{U}_{t+\Delta t}^i \quad (7.15)$$

Για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν επιλέχθηκε η μέθοδος της σταθερής επιτάχυνσης με παραμέτρους  $\gamma = \frac{1}{2}$  και  $\beta = \frac{1}{4}$ . Εναλλακτικά, υπάρχει και η μέθοδος της γραμμικά μεταβαλλόμενης επιτάχυνσης με τιμές παραμέτρων  $\gamma = \frac{1}{2}$  και  $\beta = \frac{1}{6}$ .

## 7.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Το OpenSees δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να καταγράψει μετακινήσεις, ταχύτητες, επιταχύνσεις, δυνάμεις που αναπτύσσονται στους κόμβους ή στα μέλη και διάφορα άλλα μεγέθη και να τα αποθηκεύσει στα αντίστοιχα αρχεία προκειμένου να τα επεξεργαστεί αργότερα. Αντίστοιχα,

---

μπορούν να αποθηκευτούν οι ιδιοπερίοδοι, οι ιδιομορφές για τις διάφορες χρονικές περιόδους. Φυσικά, τα αποτελέσματα αυτά προκειμένου να είναι χρήσιμα χρειάζονται επεξεργασία αφού το OpenSees τα αποθηκεύει να συγκεκριμένο τρόπο.

Στις αναλύσεις που έγιναν τα αποτελέσματα που ζητήθηκαν και αποθηκεύτηκαν αντίστοιχα σε αρχεία, είναι η τέμνουσα βάσης, η μετακίνηση οροφής και το interstorey drift όλων των ορόφων.

# Κεφάλαιο 8

## Αποτελέσματα αναλύσεων

### 8.1 Γενικά

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, τα αποτελέσματα που ζητήθηκαν κατά τη διάρκεια των αναλύσεων είναι η μετακίνηση οροφής του κτηρίου, τα *interstorey drift* των ορόφων καθώς και την τέμνουσα βάσης της κατασκευής. Προκειμένου να γίνει αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια.

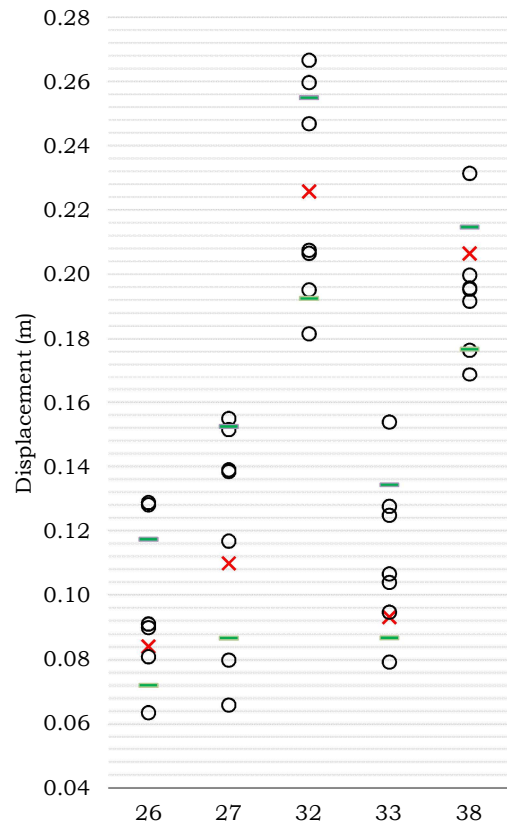
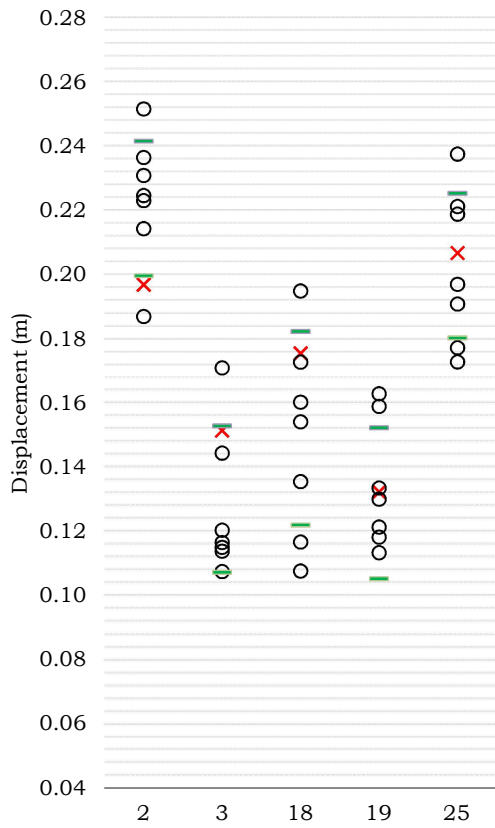
Αρχικά, για τα τρία προαναφερθέντα μεγέθη υπολογίστηκε η μέγιστη τιμή τους κατά τη διάρκεια κάθε χρονοϊστορίας τόσο για τις πραγματικές καταγραφές, όσο και για τις τεχνητές. Στη συνέχεια, για κάθε πραγματική εδαφική καταγραφή και για τις επτά τεχνητές που αντιστοιχούν σε αυτή, υπολογίζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση. Μέσω αυτών των μεγεθών προσδιορίζεται το διάστημα εμπιστοσύνης με άκρα μέση τιμή συν μία τυπική απόκλιση και μέση τιμή μείον μία τυπική απόκλιση. Κριτήριο ελέγχου είναι τα μεγέθη που προκύπτουν από τις αναλύσεις των πραγματικών καταγραφών να βρίσκονται εντός του διαστήματος αυτού. Όσα προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.

### 8.2 Μετακίνηση οροφής

Στα διαγράμματα που ακολουθούν, στον οριζόντιο άξονα αναγράφεται το όνομα του σεισμού σύμφωνα με τη λίστα του Baker, καθώς επίσης και τρεις σεισμοί από τη Norcia στην Ιταλία το 2006, ενώ στον κατακόρυφο η μετακίνηση οροφής. Με μαύρο χρώμα συμβολίζονται οι τιμές των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων, με κόκκινο χρώμα των

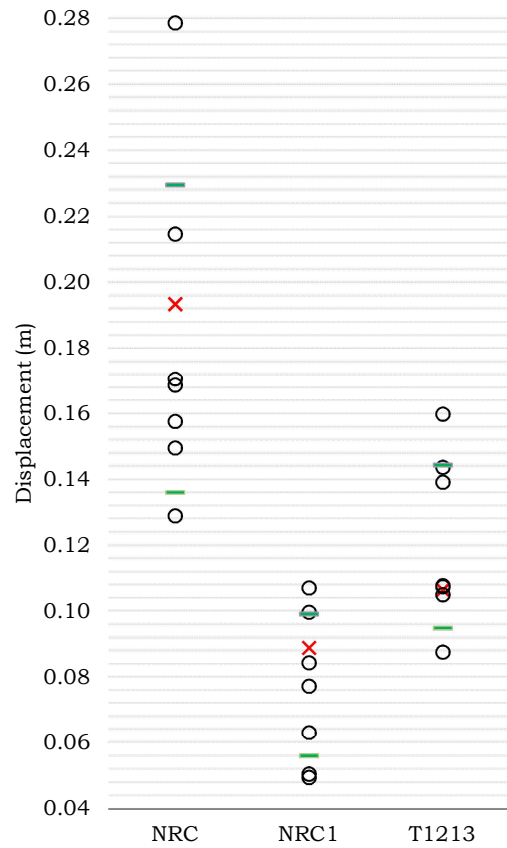
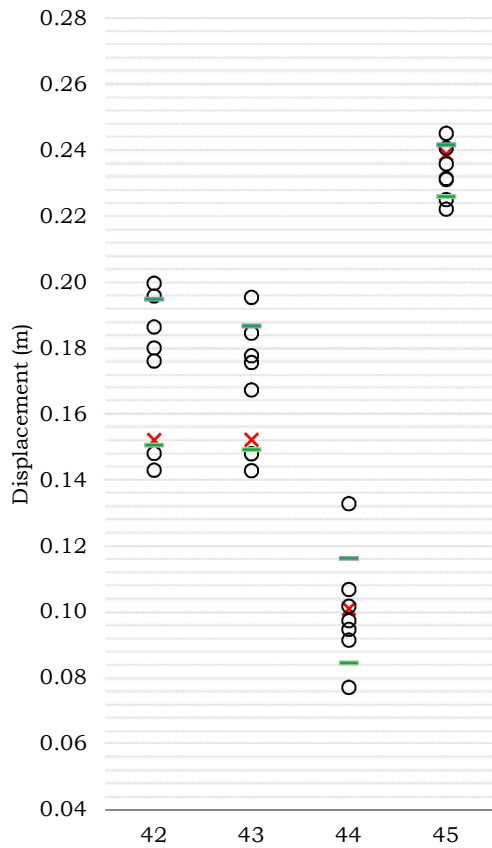
πραγματικών καταγραφών, και τέλος με πράσινο σημειώνονται τα όρια του διαστήματος εμπιστοσύνης.

- Τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα
- ✕ Πραγματική καταγραφή
- Όρια διαστήματος εμπιστοσύνης



Σχήμα 8.1: Μετακίνηση οροφής σεισμών 2, 3, 18, 19, 25 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.

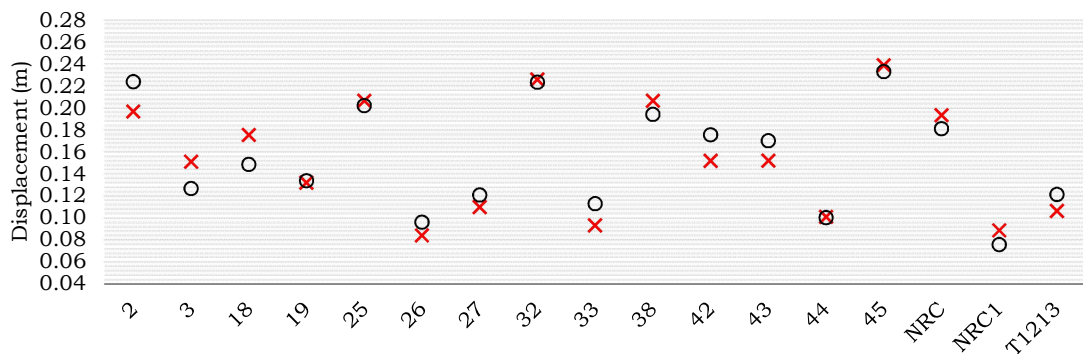
Σχήμα 8.2: Μετακίνηση οροφής σεισμών 26, 27, 32, 33, 38 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.



Σχήμα 8.3: Μετακίνηση οροφής σεισμών 42, 43, 44, 45 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.

Σχήμα 8.4: Μετακίνηση οροφής σεισμών NRC, NRC1, T1213 στη Norcia, Ιταλία, 2016.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των μετακινήσεων οροφής που προέκυψαν για τα επτά τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα, συγκρινόμενες με τη μετακίνηση οροφής της πραγματικής καταγραφής.



○ Μέση τιμή Τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων

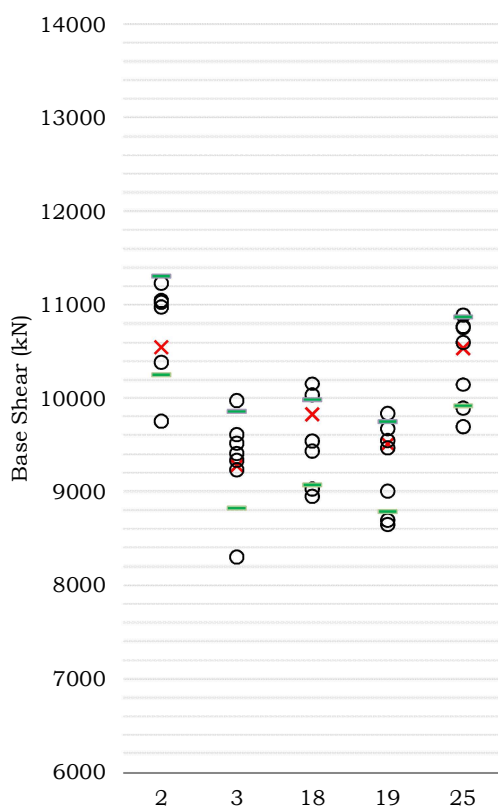
× Πραγματική καταγραφή

Σχήμα 8.5: Σύγκριση μέσης τιμής μετακίνησης οροφής τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και μετακίνησης οροφής πραγματικής καταγραφής.

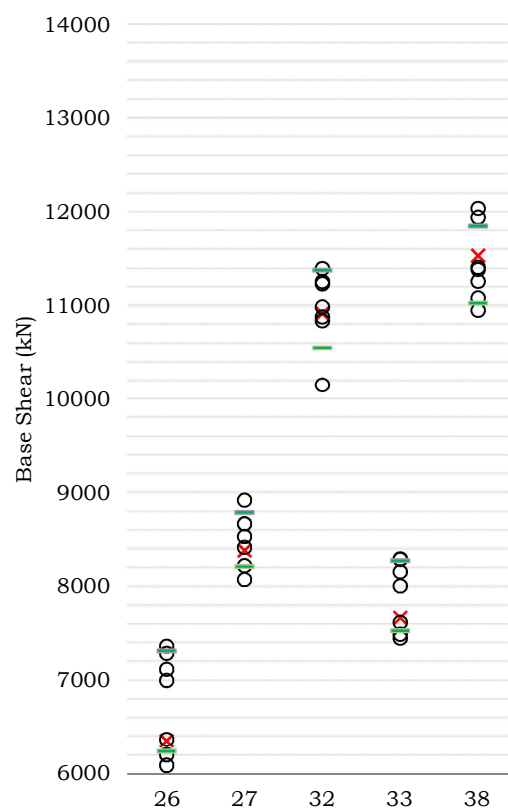
### 8.3 Τέμνουσα βάση

Τα αποτελέσματα για την τέμνουσα βάση των πραγματικών και των τεχνητών επιταχυνσιογραφήματων παρουσιάζονται με τον ίδιο συμβολισμό που ακολουθήθηκε παραπάνω. Στον οριζόντιο άξονα δίνονται τα σεισμικά γεγονότα, ενώ στον κατακόρυφο οι τιμές της τέμνουσας βάσης σε kN.

- Τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα
- × Πραγματική καταγραφή
- Όρια διαστήματος εμπιστοσύνης

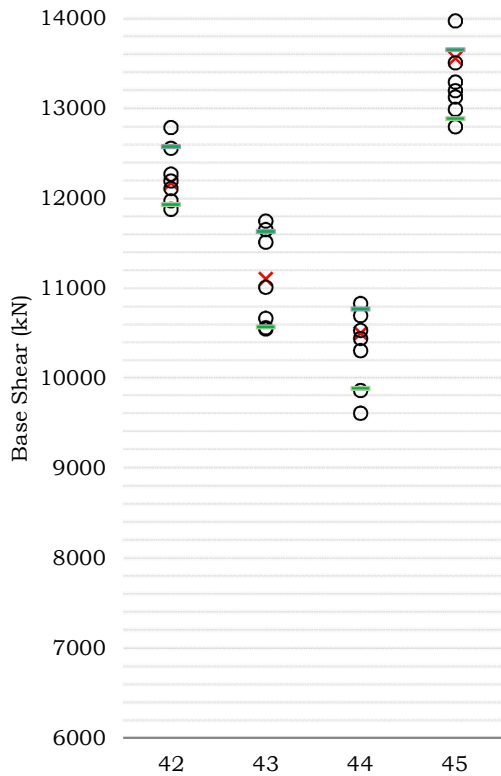


Σχήμα 8.6: Τέμνουσα βάσης σεισμών 2, 3, 18, 19, 25 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.

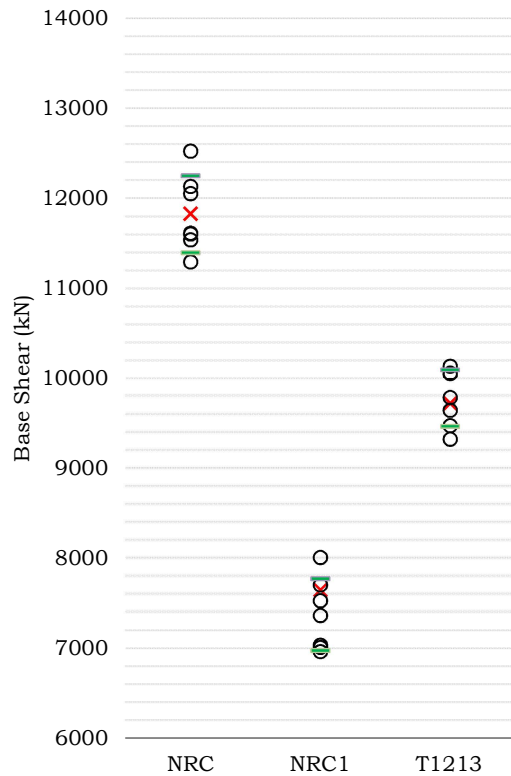


Σχήμα 8.7: Τέμνουσα βάσης σεισμών 26, 27, 32, 33, 38 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.



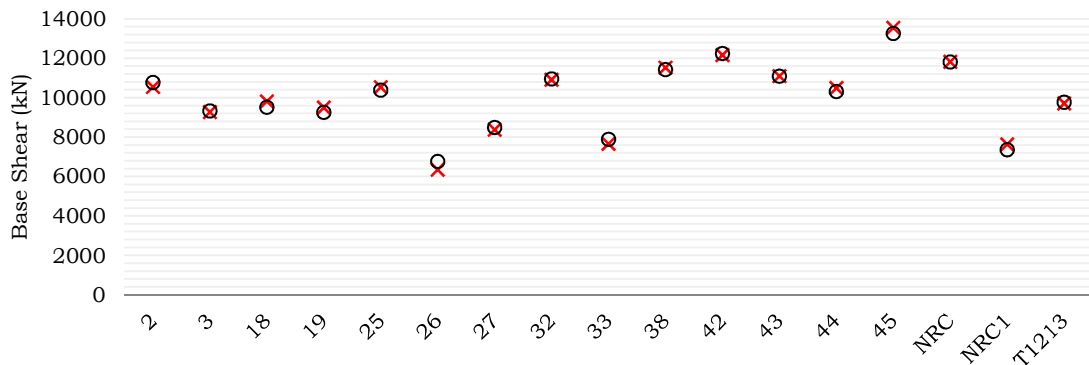


Σχήμα 8.8: Τέμνουσα βάσης σεισμών 42, 43, 44, 45 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.



Σχήμα 8.9: Τέμνουσα βάσης σεισμών NRC, NRC1, T1213 στη Norcia, Ιταλία, 2016.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι μέσες τιμές της τέμνουσας βάσης που προέκυψαν για τα επτά τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα, συγκρινόμενη με την τέμνουσα βάσης της πραγματικής καταγραφής. Ο συμβολισμός που υιοθετείται είναι ο εξής:

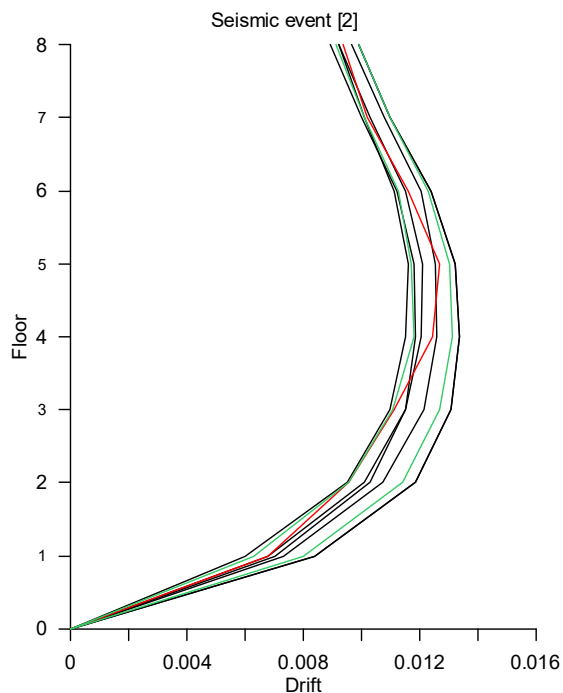


- Μέση τιμή Τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων
- × Πραγματική καταγραφή

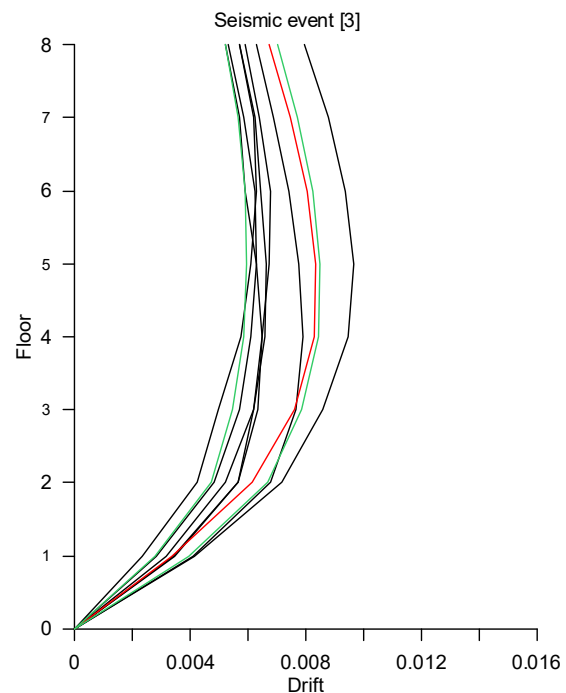
Σχήμα 8.10: Σύγκριση μέσης τιμής τέμνουσας βάσης τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής.

## 8.4 Drift ορόφων

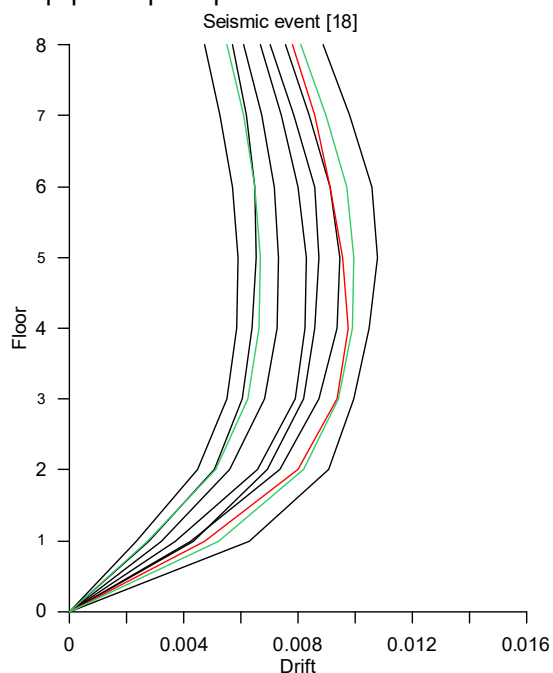
Όπως και παραπάνω, στα διαγράμματα που ακολουθούν, με μαύρο συμβολίζονται οι τιμές των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων, με κόκκινο των πραγματικών καταγραφών, και τέλος με πράσινο σημειώνονται τα όρια του διαστήματος εμπιστοσύνης.



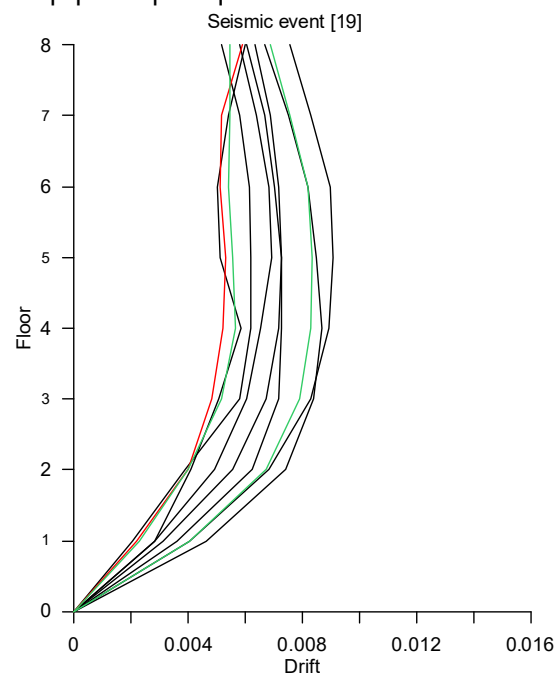
Σχήμα 8.11: Drift ορόφων σεισμού 2 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.



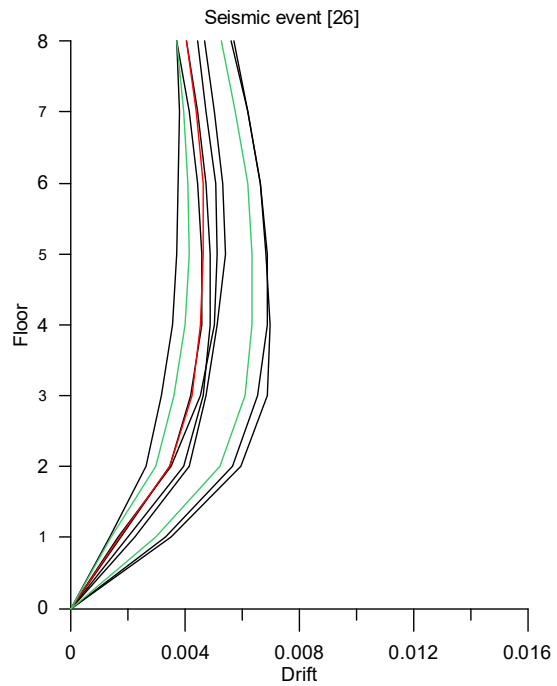
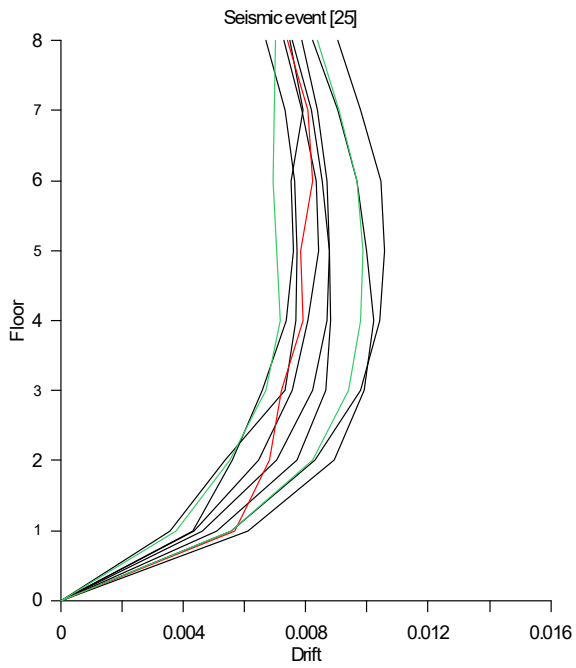
Σχήμα 8.12: Drift ορόφων σεισμού 3 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.



Σχήμα 8.13: Drift ορόφων σεισμού 18 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.

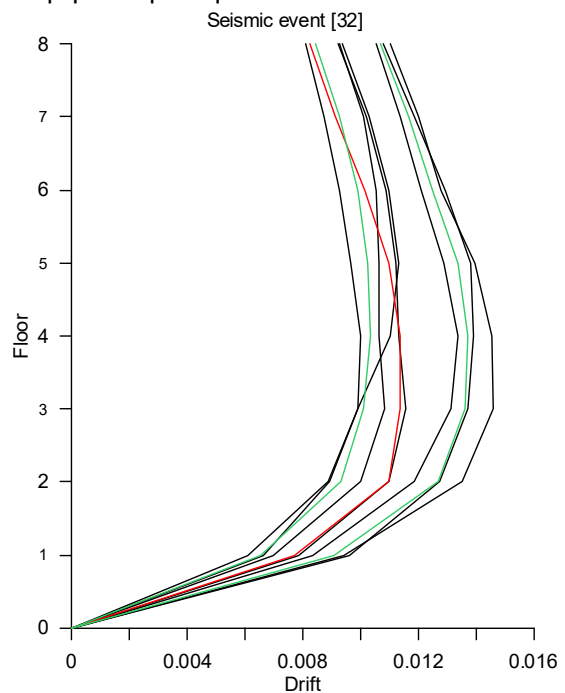
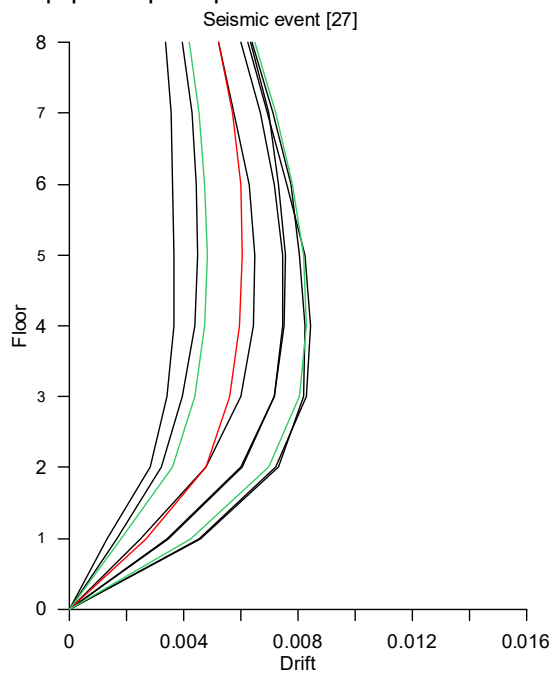


Σχήμα 8.14: Drift ορόφων σεισμού 19 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.



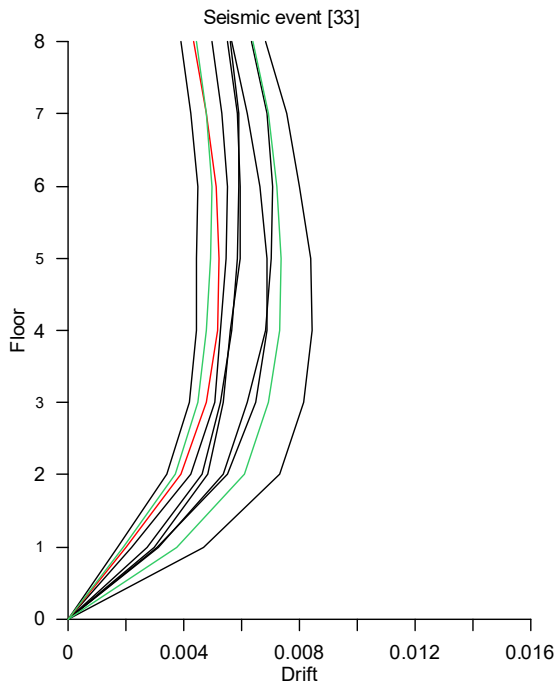
Σχήμα 8.15: Drift ορόφων σεισμού 25 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.

Σχήμα 8.16: Drift ορόφων σεισμού 26 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.

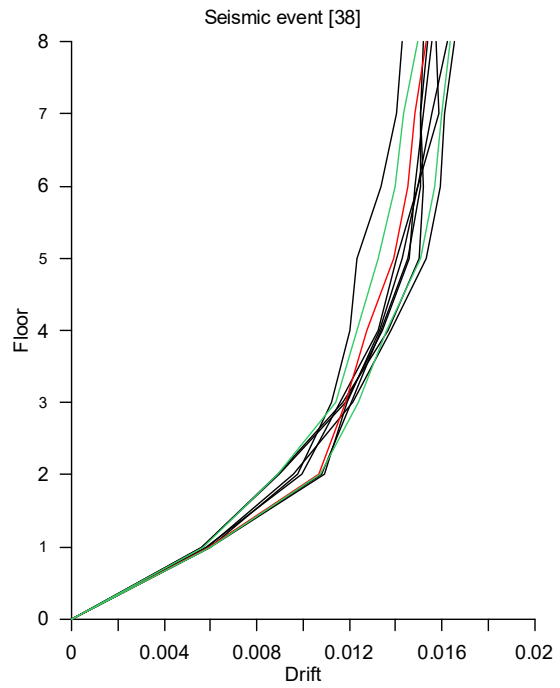


Σχήμα 8.17: Drift ορόφων σεισμού 27 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.

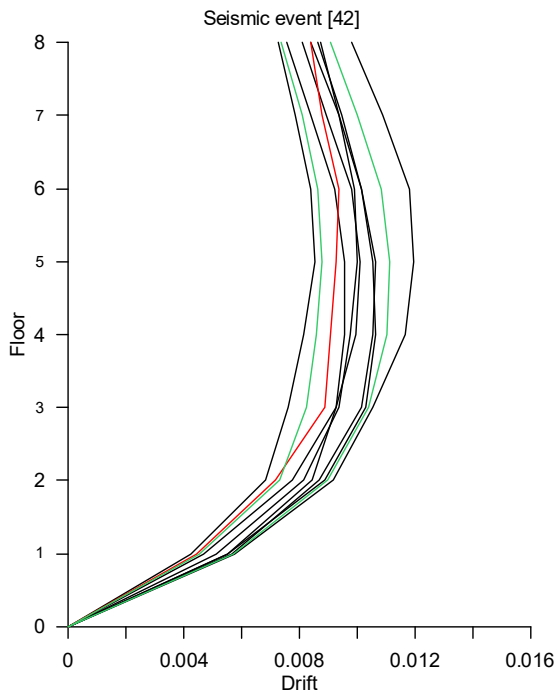
Σχήμα 8.18: Drift ορόφων σεισμού 32 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.



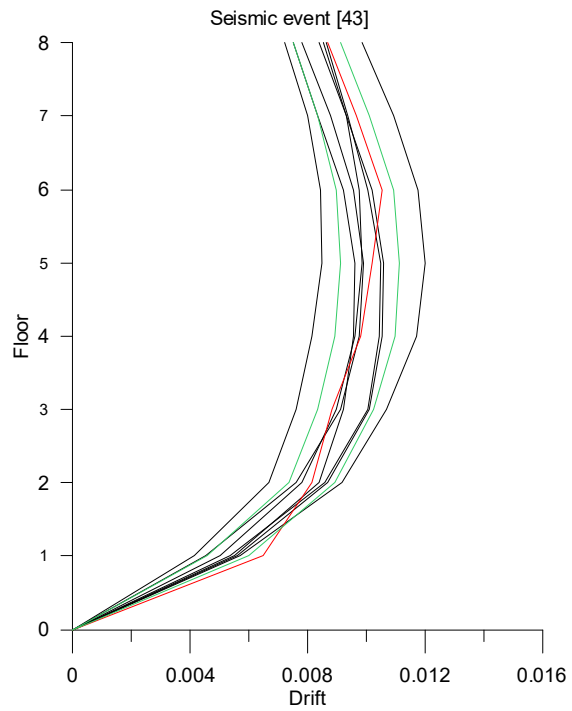
Σχήμα 8.19: Drift ορόφων σεισμού 33 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.



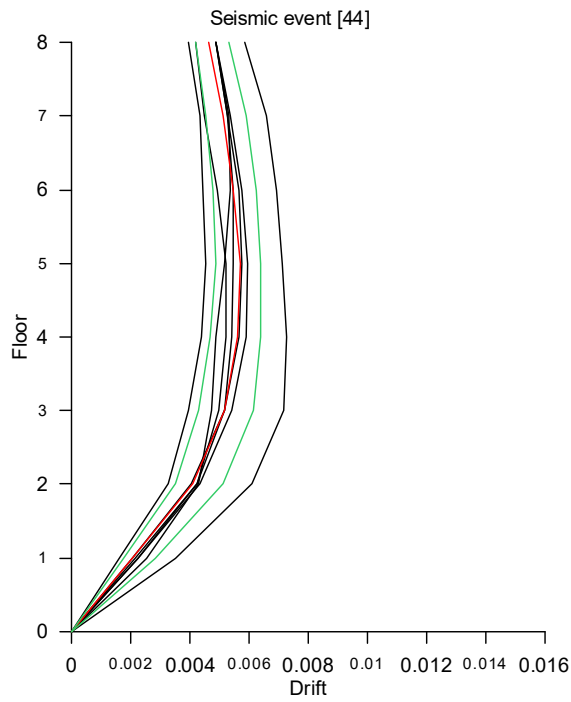
Σχήμα 8.20: Drift ορόφων σεισμού 38 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.



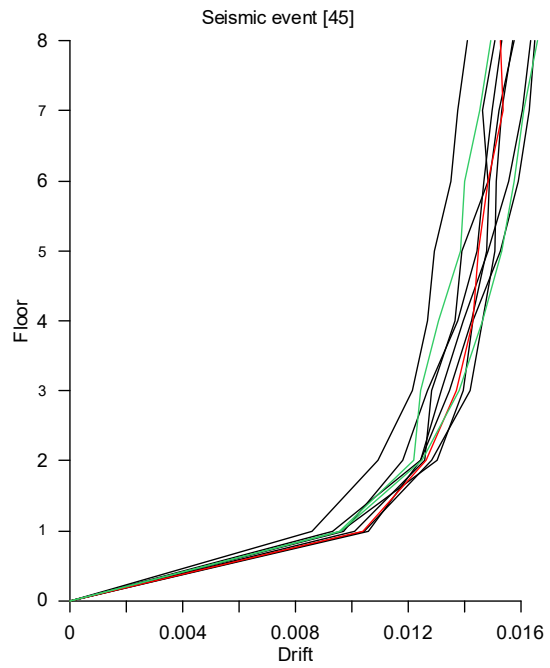
Σχήμα 8.21: Drift ορόφων σεισμού 42 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.



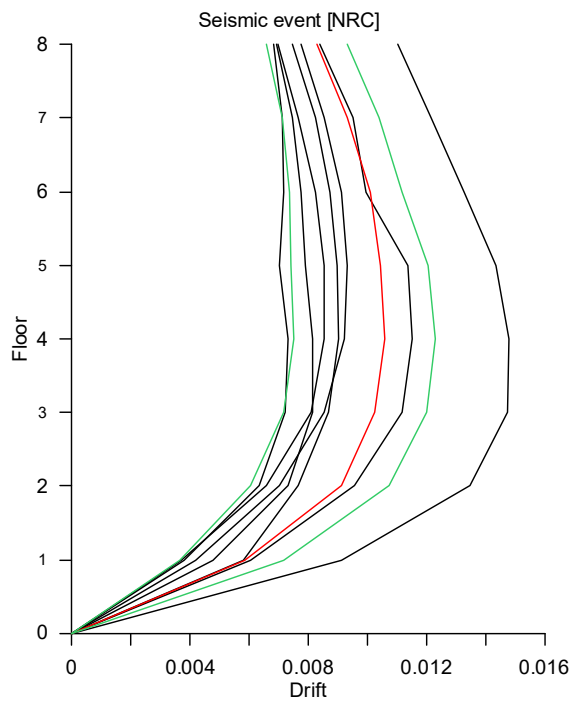
Σχήμα 8.22: Drift ορόφων σεισμού 43 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.



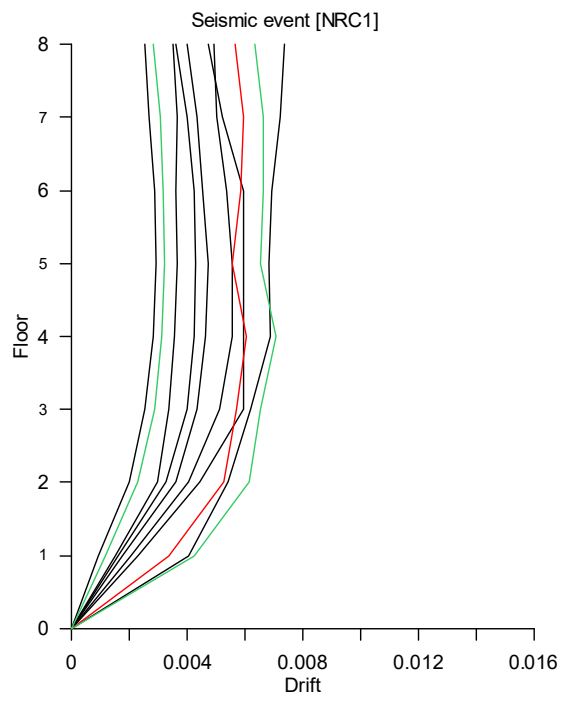
Σχήμα 8.23: Drift ορόφων σεισμού 44 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.



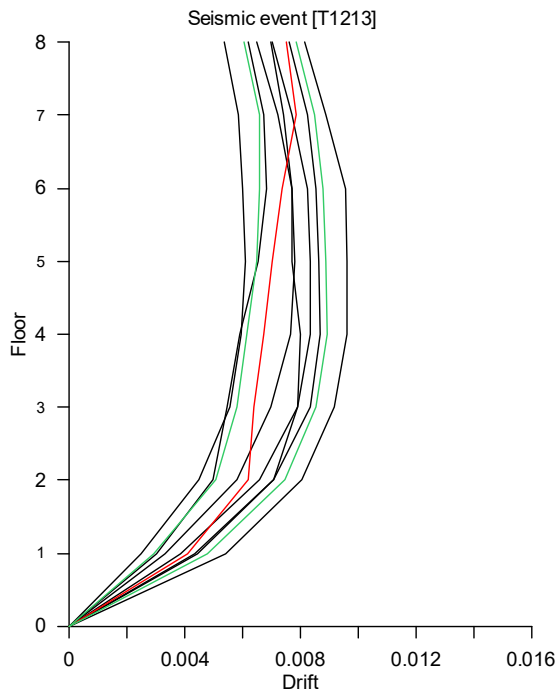
Σχήμα 8.24: Drift ορόφων σεισμού 45 σύμφωνα με τη λίστα του Baker.



Σχήμα 8.25: Drift ορόφων σεισμού NRC στη Norcia, Ιταλία, 2016.



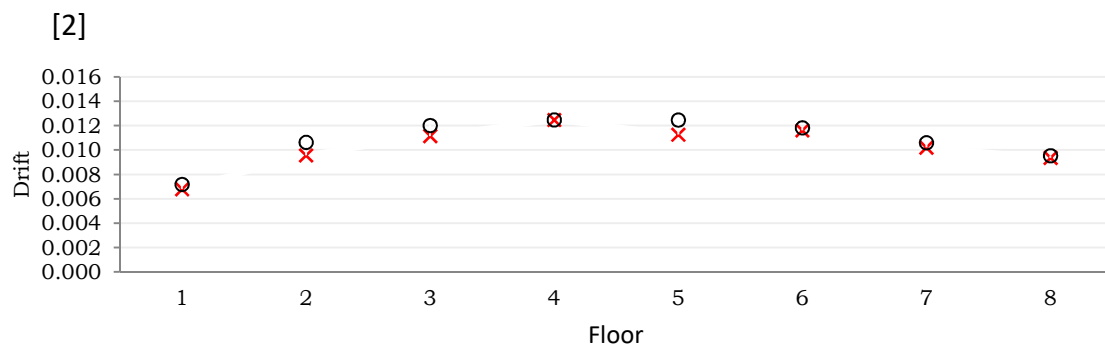
Σχήμα 8.26: Drift ορόφων σεισμού NRC1 στη Norcia, Ιταλία, 2016.



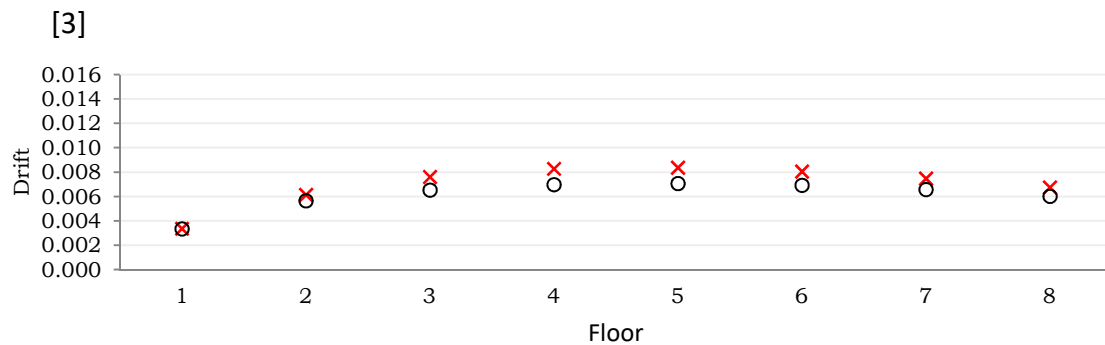
Σχήμα 8.27: Drift ορόφων σεισμού T1213 στη Norcia, Ιταλία, 2016.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι μέσες τιμές του drift των ορόφων που προέκυψαν για τα επτά τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα, συγκρινόμενο με το drift της πραγματικής καταγραφής. Ο συμβολισμός που υιοθετείται είναι ο εξής:

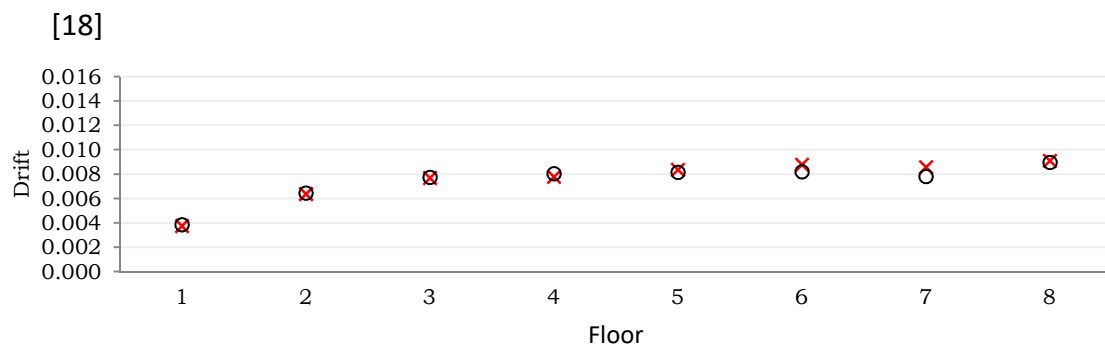
- Μέση τιμή Τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων
- × Πραγματική καταγραφή



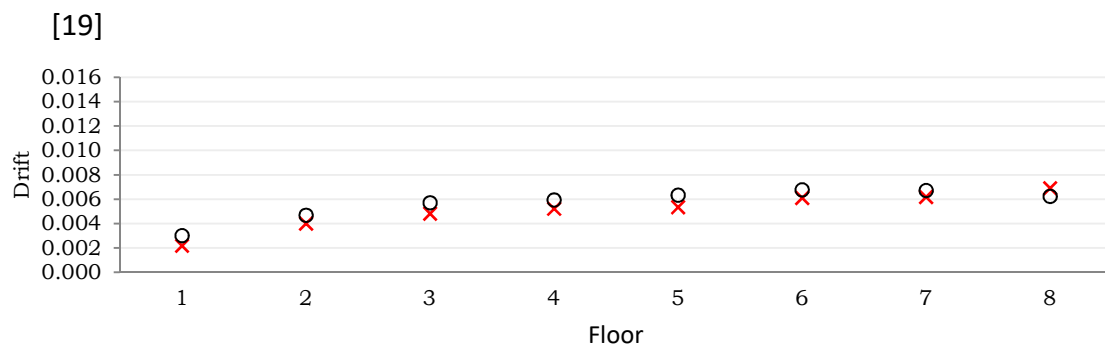
Σχήμα 8.28: Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 2 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).



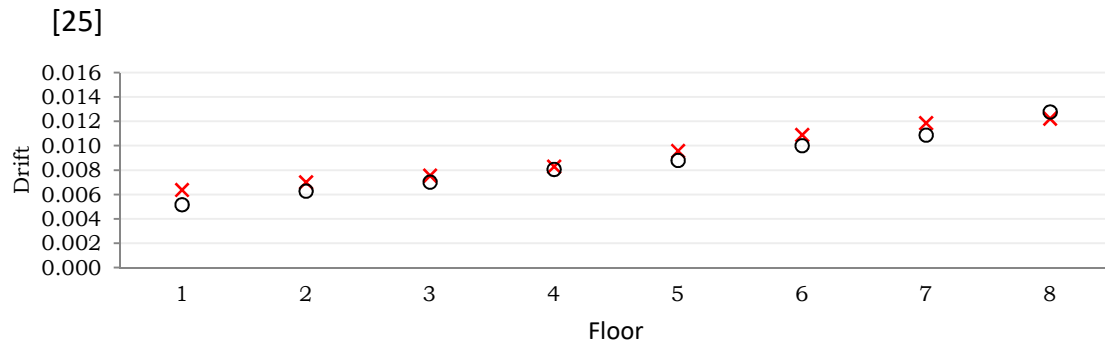
Σχήμα 8.29: Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 3 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).



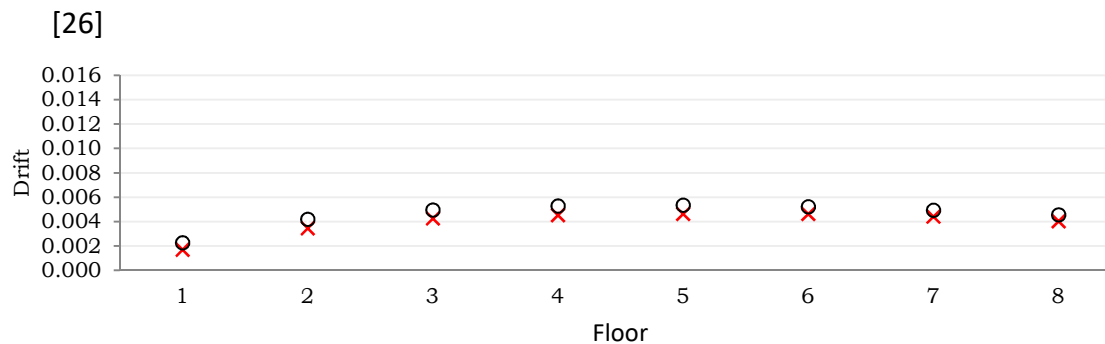
Σχήμα 8.30: Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 18 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).



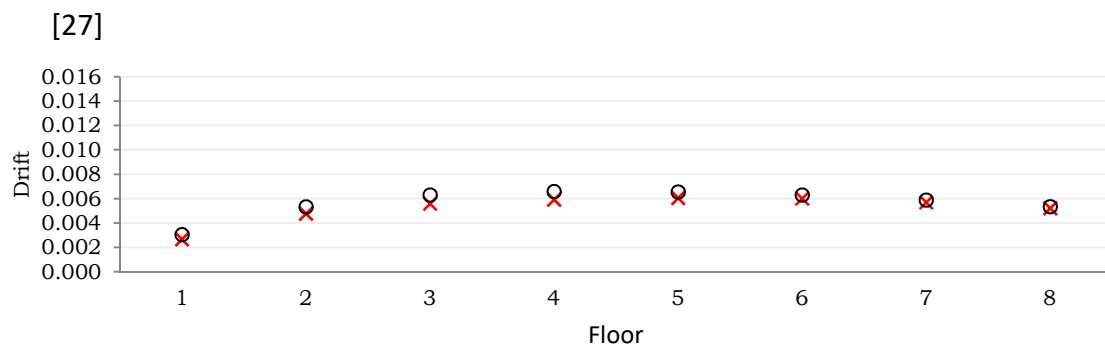
Σχήμα 8.31: Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 19 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).



Σχήμα 8.32: Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 25 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).

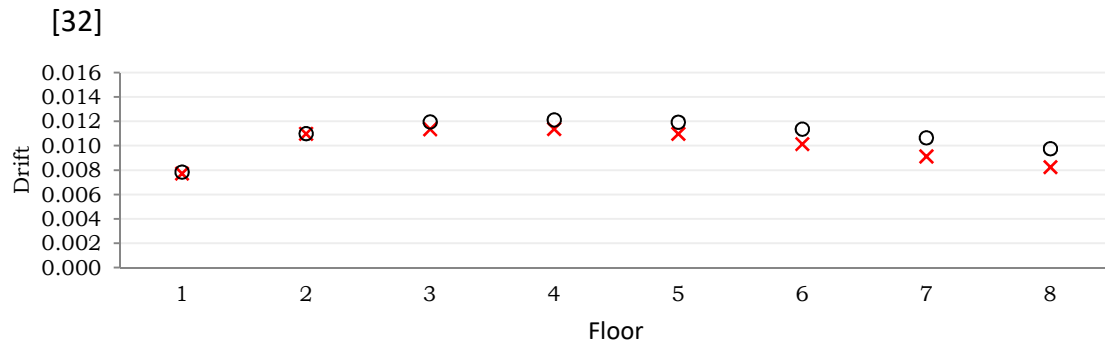


Σχήμα 8.33: Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 26 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).

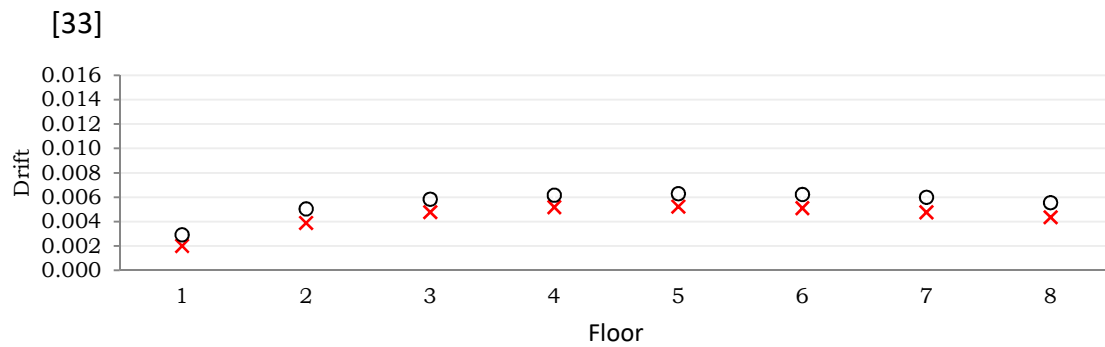


Σχήμα 8.34: Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 27 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).

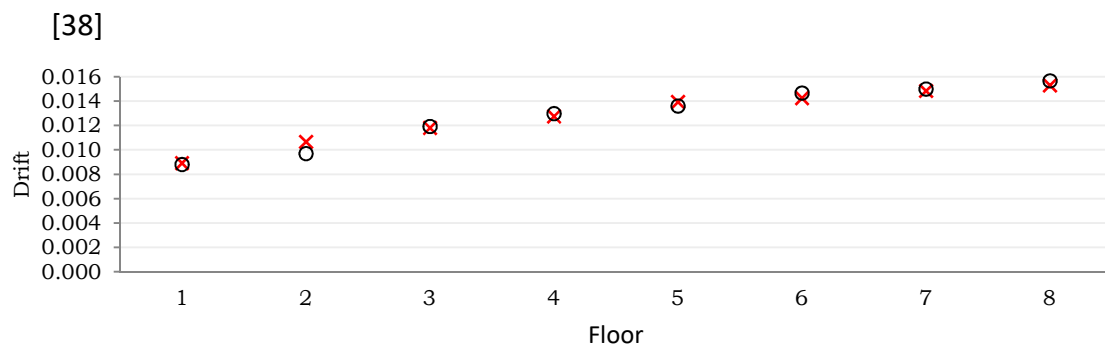




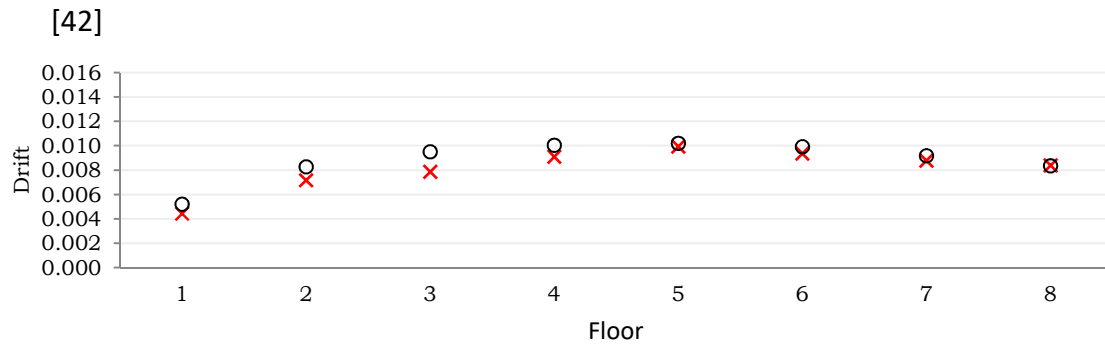
Σχήμα 8.35: Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 32 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).



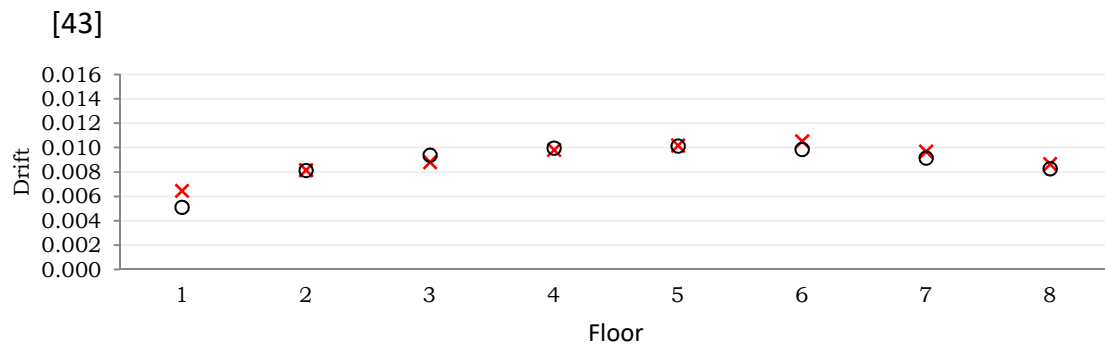
Σχήμα 8.36: Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 33 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).



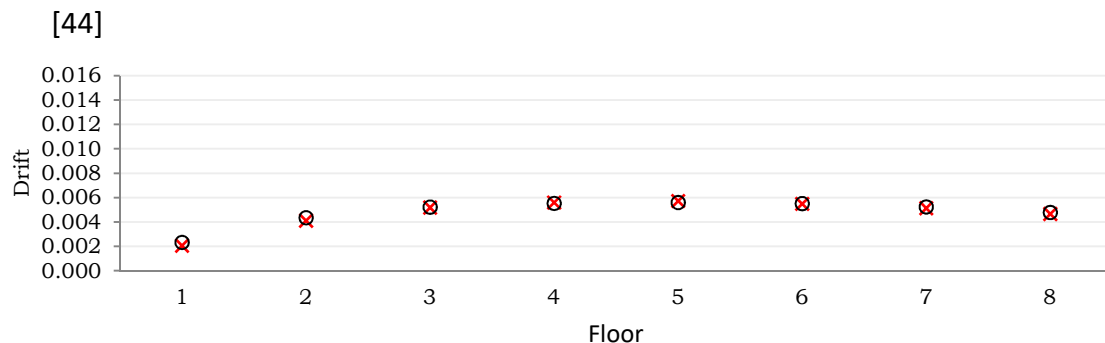
Σχήμα 8.37: Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 38 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).



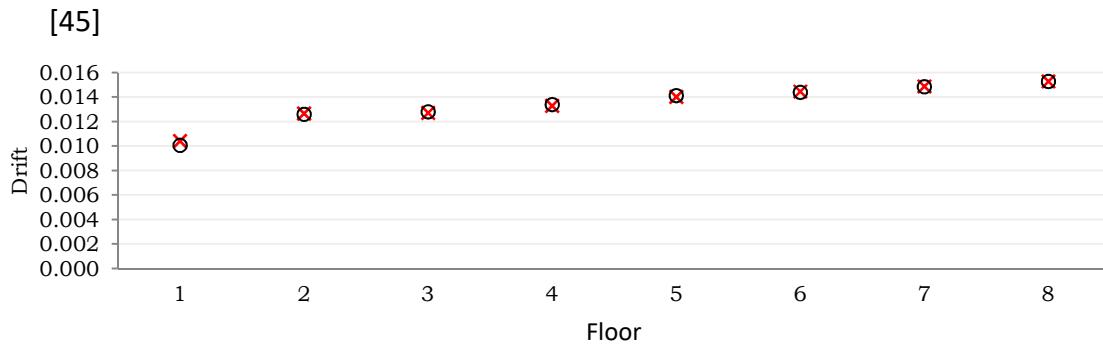
Σχήμα 8.38: Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 42 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).



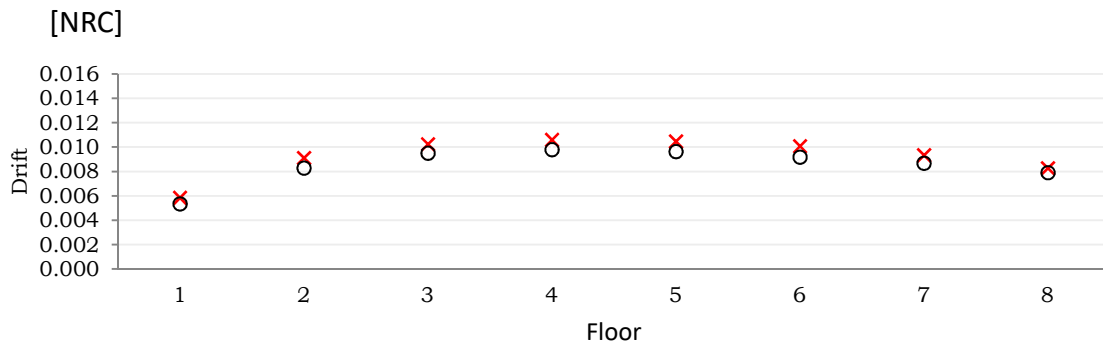
Σχήμα 8.39: Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 43 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).



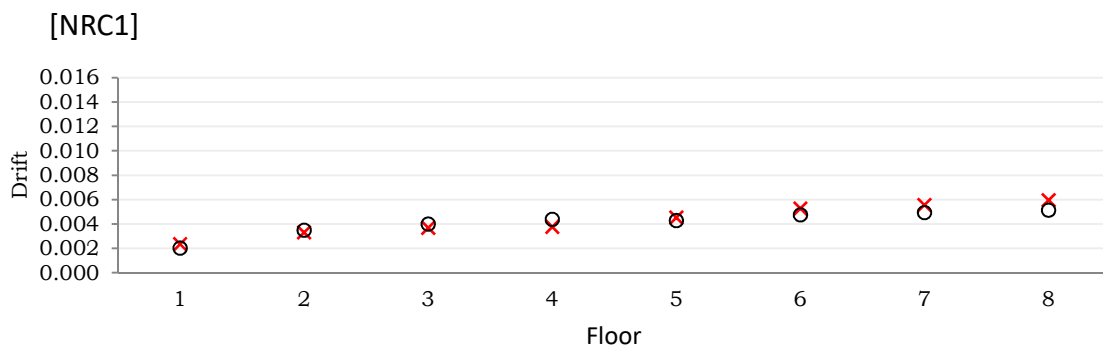
Σχήμα 8.40: Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 44 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).



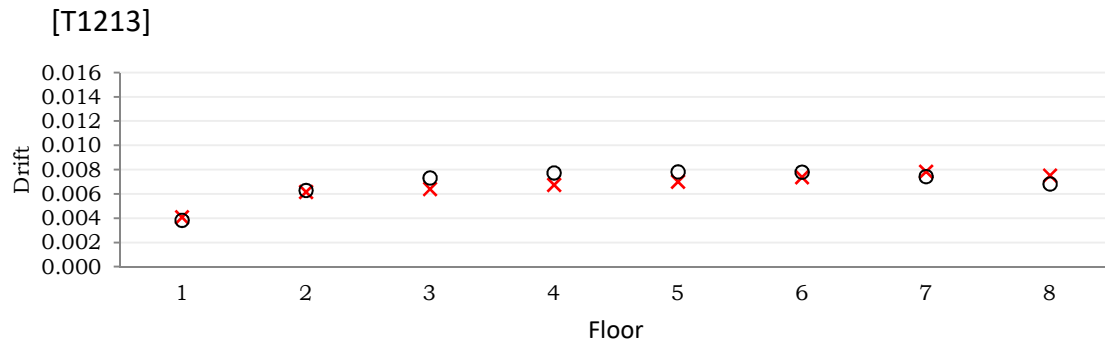
Σχήμα 8.41: Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού 45 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).



Σχήμα 8.42: Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού NRC σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).



Σχήμα 8.43: Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού NRC1 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).



Σχήμα 8.44: Σύγκριση μέσης τιμής drift ορόφων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων και πραγματικής καταγραφής σεισμού T1213 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007).

# Κεφάλαιο 9

## Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο υπολογισμός κατά κύριο λόγο της μετακίνησης οροφής, καθώς επίσης και της τέμνουσας βάσης και των drift των ορόφων μία κατασκευής μέσω τεχνητών σεισμικών καταγραφών με παλμικό περιεχόμενο όσο το δυνατόν ακριβέστερα.

Το σύνολο των καταγραφών που μελετήθηκαν περιλαμβάνει 14 καταγραφές από τη βάση δεδομένων NGA (Next Generation Attenuation), που χαρακτηρίστηκαν από τον Baker (2007) ως παλμικές, αλλά και 3 καταγραφές από το σεισμό της Norcia στην Ιταλία το 2016. Προκειμένου να γίνει η εξαγωγή των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων χρησιμοποιήθηκε το κυματίδιο των Mavroudis & Papageorgiou και το φάσμα συνέλιξης για την αναπαράσταση των παλμών.

Ο έλεγχος της μεθόδου έγινε μέσω της προσομοίωσης και της απόκρισης μίας οκταώροφης τοιχωματικής κατασκευής από ωπλισμένο σκυρόδεμα, η οποία υποβλήθηκε σε μη-γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας. Με την ολοκλήρωση των αναλύσεων, την εξαγωγή και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα.

- Η μετακίνηση οροφής της κατασκευής που προέκυψε από την ανάλυση χρονοϊστορίας της πραγματικής καταγραφής βρίσκεται σε όλες τις περιπτώσεις μέσα στο διάστημα εμπιστοσύνης που προκύπτει για τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα και για κανονική κατανομή.
- Η τέμνουσα βάσης της κατασκευής που προέκυψε από την ανάλυση χρονοϊστορίας της πραγματικής καταγραφής βρίσκεται σε όλες τις περιπτώσεις μέσα στο διάστημα εμπιστοσύνης που προκύπτει για τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα και για κανονική κατανομή.

- 
- Το drift των ορόφων της κατασκευής που προέκυψε από την ανάλυση χρονοϊστορίας της πραγματικής καταγραφής βρίσκεται σε όλες τις περιπτώσεις, πλην δύο μέσα στο διάστημα εμπιστοσύνης που προκύπτει για τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα και για κανονική κατανομή. Ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις, η απόκλιση από το διάστημα εμπιστοσύνης είναι μικρή.
  - Σε κάθε περίπτωση η μέση τιμή των παραπάνω τριών μεγεθών για τα επτά τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα παρουσιάζει μικρή απόκλιση με την τιμή που προέκυψε από την πραγματική καταγραφή.
  - Η τυπική απόκλιση αποτελεί αξιόπιστο μέτρο διασποράς δεδομένου ότι τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ομοιογένεια και δεν παρατηρούνται μεγάλες ακραίες τιμές.
  - Η effective peak velocity αποτελεί ικανοποιητικό δείκτη για το εύρος του μη σταθμισμένου σήματος της καταγραφής, αλλά και για την ένταση του υψίσυχνου τμήματός της.
  - Η effective peak velocity παρουσιάζει μικρή διακύμανση στις τιμές για τον ίδιο παλμό.

## Κεφάλαιο 10

### Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Όπως προκύπτει από το κεφάλαιο των αποτελεσμάτων, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε με τη χρήση του δείκτη effective peak velocity, οδηγεί σε αξιόπιστα αποτελέσματα με μικρή διακύμανση. Συνεπώς, πρόκειται για να πεδίο που χρίζει περαιτέρω έρευνας, ειδικά για τον ελλαδικό χώρο, όπου η σεισμική δραστηριότητα είναι πολύ έντονη.

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζει ενδιαφέρον η πραγματοποίηση παραμετρικής μελέτης προκειμένου να μελετηθούν διάφορα εύρη τόσο για τον δείκτη effective peak velocity, όσο και για τους παλμούς.





# Βιβλιογραφία

Abrahamson, N. A.. *Near-fault ground motions from the 1999 Chi-Chi earthquake*, in Proc. Of U.S.-Japan Workshop on the Effects of Near-Field Earthquake Shaking, San Francisco, California, 20-21 March 2000.

Alavi, P., and H. Krawinkler. *Effects of near-fault ground motion on building structures*, CUREE-Kajima Joint Research Program Report, Richmond, California, 2001.

Alavi, P., and H. Krawinkler. *Development of improved design procedures for near-fault ground motions*. SMIP98, seminar on utilization of strong motion data, Oakland, CA.1998, 1998.

Anderson, J. C., and V. V. Bertero. *Uncertainties in establishing design earthquakes*, J. Struct. Eng. ASCE 113, 1709-1724, 1987.

Baker, J.W. (2007). *Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis*. Bulletin of the Seismological Society of America, 97:1486-1501.

Boore DM. *Simulation of ground motion using the stochastic method*, Pure and Applied Geophysics, 160:635-675, 2003.

European Committee for Standardization (CEN). Eurocode 0, *Basis of Structural Design*, EN 1990:2002+A1, Brussels 2004.

European Committee for Standardization (CEN). Eurocode 2 , *Design of concrete structures, Part 1-1 General rules and rules for buildings*, EN 1992-1-1, Brussels 2004.

European Committee for Standardization (CEN). Eurocode 8 , *Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, EN 1998-1, Brussels 2004.

Fragiadakis M. *Nonlinear Analysis of Frame Structures under Seismic Loading*, Lecture notes, Athens, 2016.

Ke Du, Jingjiang Sun & Weixiao Xu, *Evaluation of Section and Fiber Integration Points in Fiber Model*, 15 WCEE, Lisboa, 2012.

Kramer, S. *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall International Series, New Jersey, 1996.

Mavroeidis G., Papageorgiou A., *Effect of Fault Rupture Characteristics on Near-Fault Strong Ground Motions*, 2010.

Mavroeidis, G.P., Papageorgiou, A.S. *A mathematical representation of near-fault ground motions*. Bulletin of the Seismological Society of America, 93:1099-1131, 2003.

Mavroeidis, G.P., Papageorgiou, A.S. *Near source strong ground motion: characteristics and design issues*, in Proc. of the Seventh U.S. National Conf. on Earthquake Engineering (7NCEE), Boston, Massachusetts, 21-25 July 2002.

Mimoglou P, Psycharis I., Taflampas I., *Explicit determination of the pulse inherent in pulse like ground motions*, 2014.

Rodriguez-Marek, A. (2000). *Near-fault Seismic Site Response*, Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.

Sasani, M., and V. V. Bertero. *Importance of severe pulse-type ground motions in performance-based engineering: historical and critical review*, in Proc. Of the Twelfth World Conf. on Earthquake Engineering (12WCEE), Auckland, New Zealand, 30 January -4 February 2000.

Shahi S. K., Baker J. W., *An Empirically Calibrated Framework for Including the Effects of Near-Fault Directivity in Probabilistic Seismic Hazard Analysis*, Bulletin of the seismological society of America, Vol.101No2, pp.742-755, April 2011.

Somerville P.G. *Magnitude scaling of the near-fault rupture directivity pulse*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 137:201-212, 2003.

Somerville, P.G.. *Development of an improved representation of near-fault ground motions*. Proc. SMIP98 Seminar on Utilization of Strong Motion Data, California Strong Instrumentation Program, Sacramento, California, 1-20, 1998

Somerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W., Abrahamson, N.A. *Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity*, Seismological Research Letters, 68:199-222, 1997.

Somerville P., and R. Graves. *Conditions that give rise to unusually large long period ground motions*, Struct. Design Tall Buildings 2, 211-232, 1993.

Stewart, J.P., Chiou, S.J., Bray, J.D., Graves, R.W., Somerville, P.G., Abrahamson, N.A. (2001). *Ground motion evaluation procedures for*

*performance based design*. PEER Report-2001/09. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California.

Taflampas IM, Spyrakos CC, Koutromanos LA. *A new definition of strong ground motion duration and related parameters affecting the response of medium-long period structures*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29(4):752-763, 2009.

Vassiliou MF, Makris N. *Estimation time scales and length scales in pulselike earthquake acceleration records with wavelet analysis*. Bulletin of the Seismological Society of America, 101(2):596-618, 2011.

Zamora M., Riddell R. *Elastic and inelastic response spectra considering near-fault effects*. Journal of Earthquake Engineering, 15:775-808, 2011.

Zhai C., Chang Z., Li S., Chen Z., Xie L. *Quantitative identification of near-fault pulse-like ground motions based on energy*, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 5:351-355.

ΕΑΚ 2000, *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000*, ΟΑΣΠ (Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας), ΣΠΜΕ (Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος).

ΕΚΩΣ 2000, *Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος 2000*, ΟΑΣΠ (Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας), ΣΠΜΕ (Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος).

Ταφλαμπάς Ιωάννης, *Σημειώσεις από το μάθημα Ειδικά Θέματα Τεχνικής Σεισμολογίας*, Αθήνα, 2017.

Φαρδής, Μ.Ν., *Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος*, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, 2007.

Ψυχάρης Ι. (2015). *Αντισεισμικός Σχεδιασμός με Στάθμες Επιτελεστικότητας*, Σημειώσεις του μαθήματος Αντισεισμική Τεχνολογία 2, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα 2015.

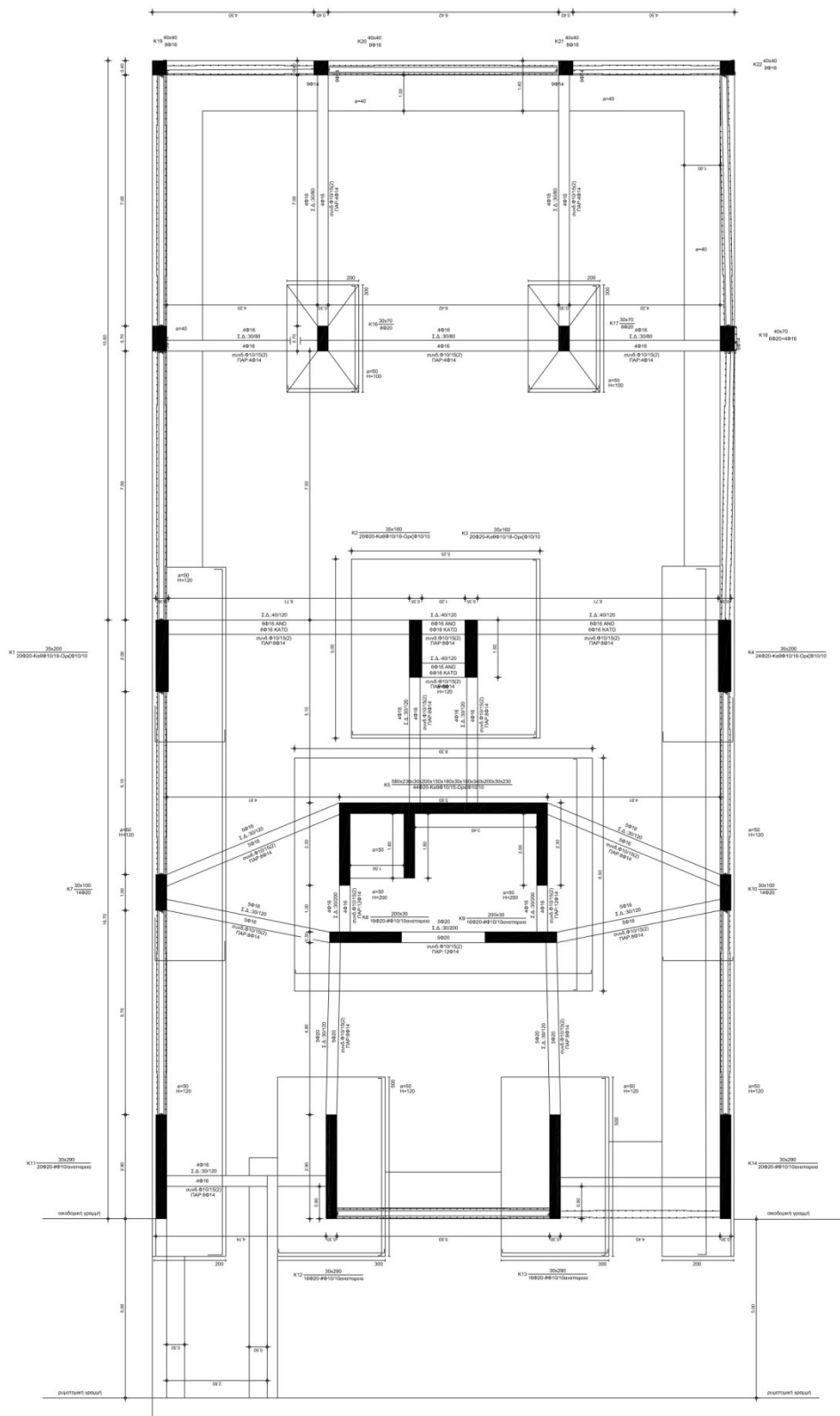
Ιστοσελίδες

OpenSees WebPage: <http://www.opensees.berkeley.edu/>

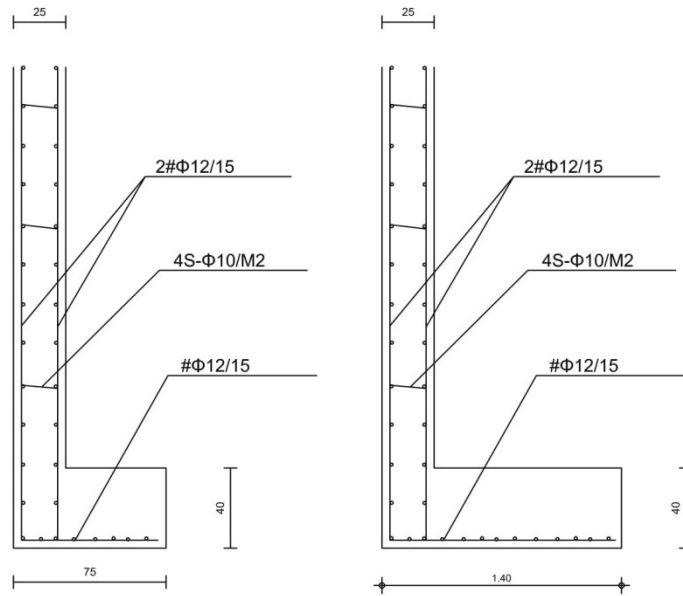


## Παράρτημα Α

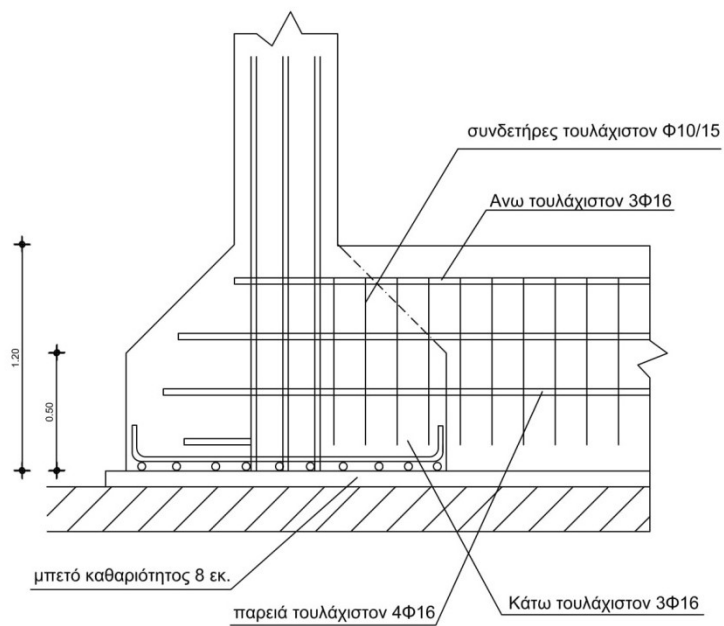




Σχήμα Α1: Κάτωψη θεμελίωσης

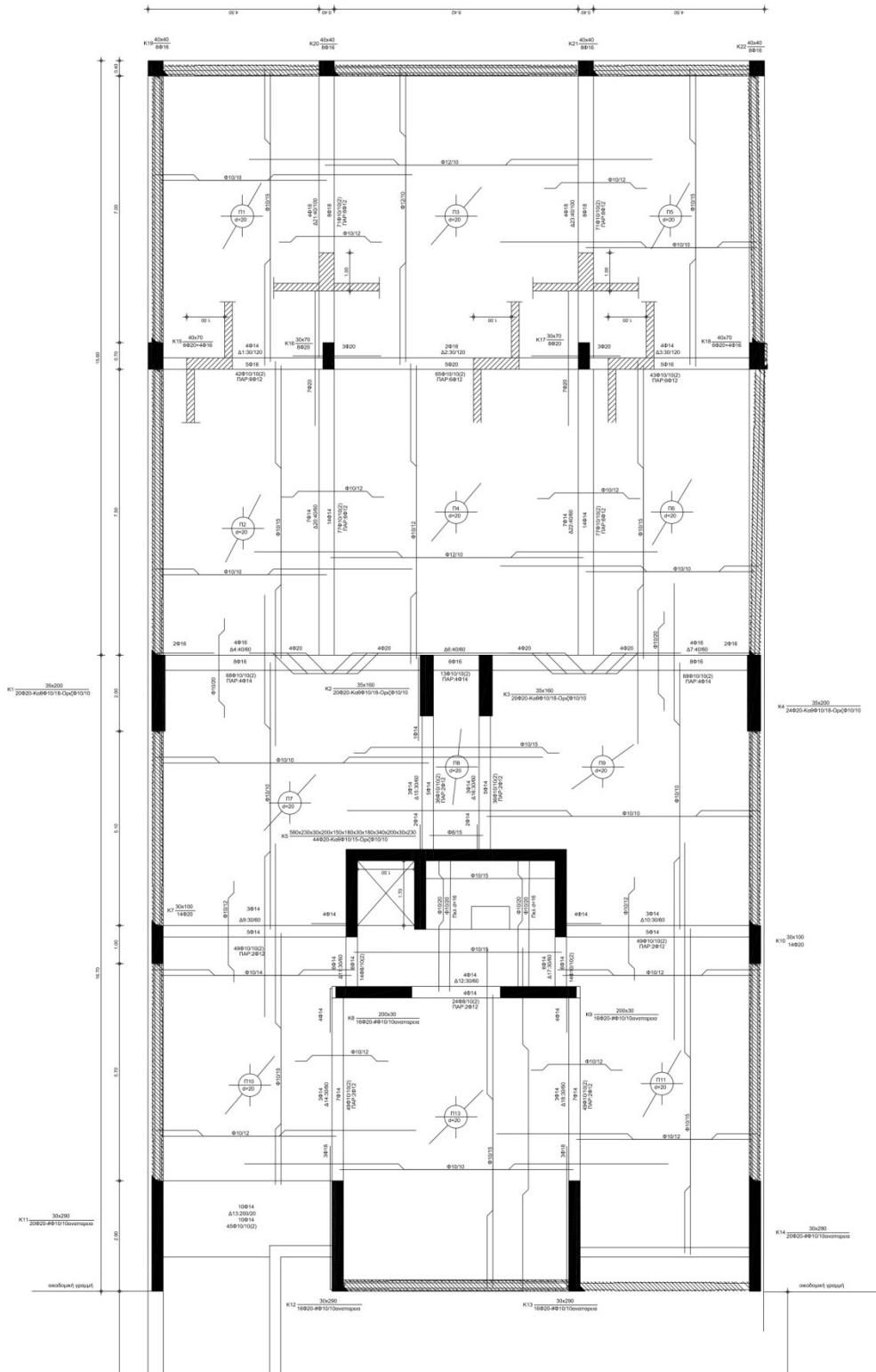


Σχήμα Α2: Ενδεικτική λεπτομέρεια πεδίου τοιχείου υπογείου

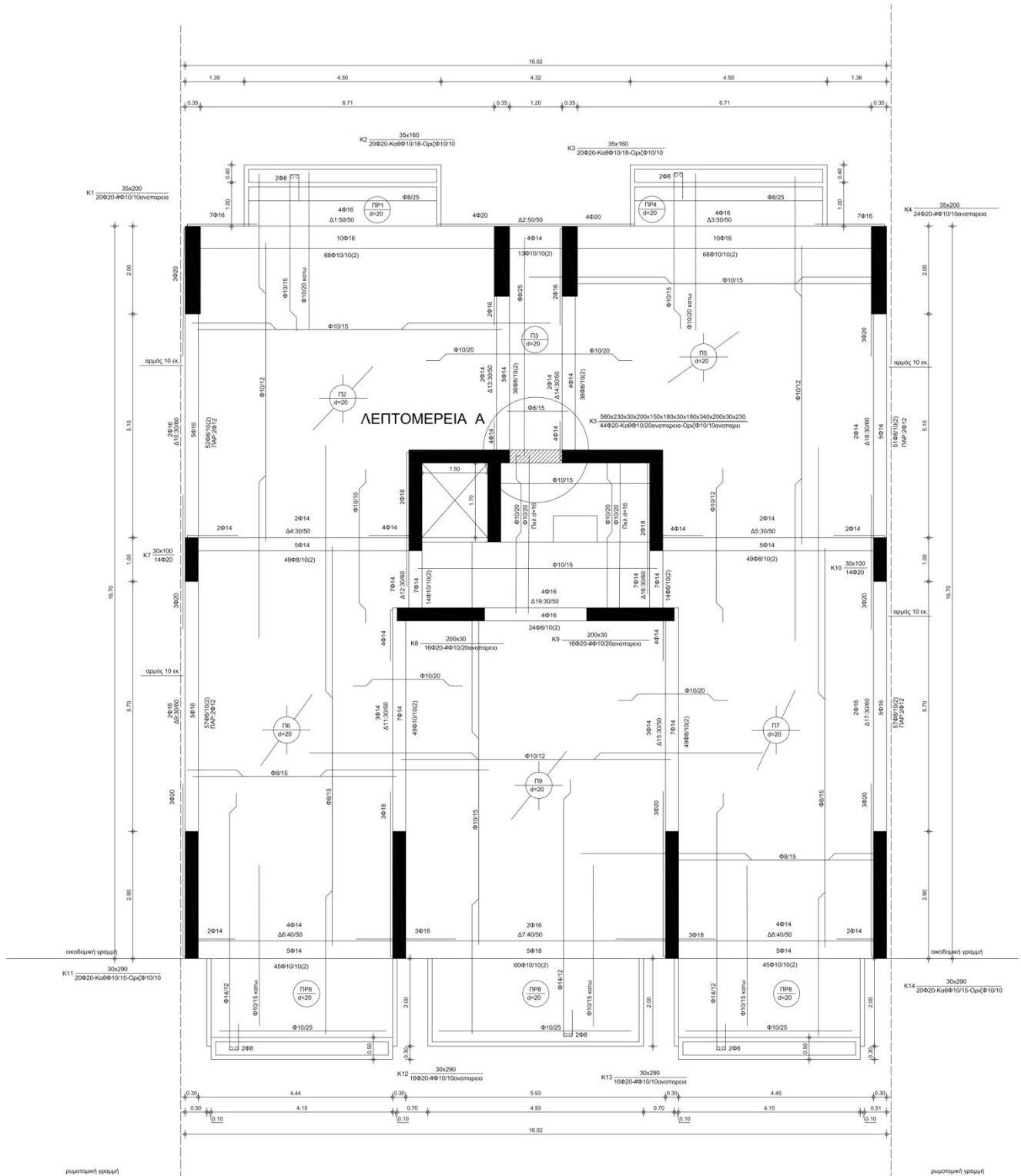


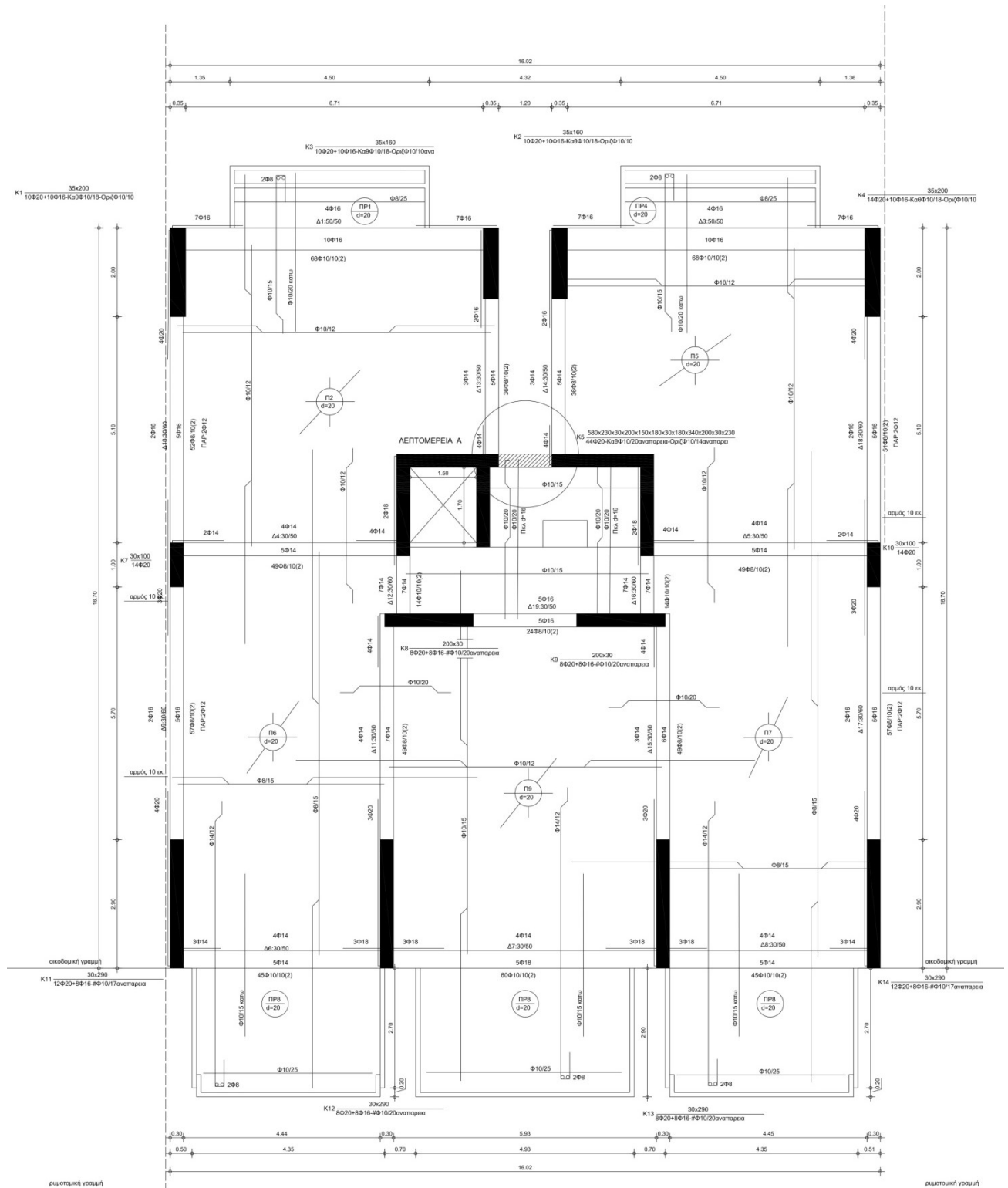
Σχήμα Α3: Ενδεικτική λεπτομέρεια πεδίου



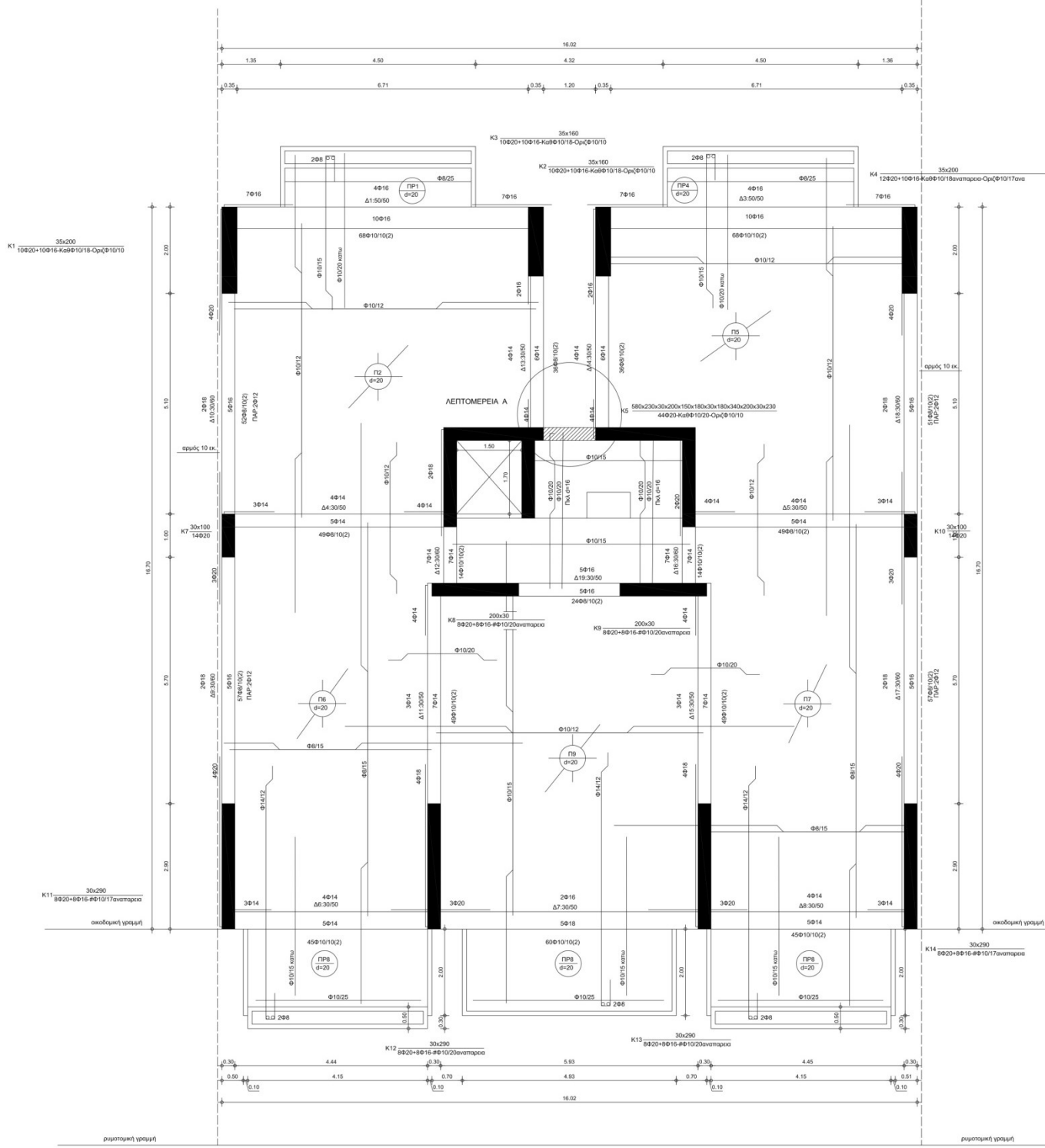


Σχήμα Α4: Κάτοψη οροφής υπογειού

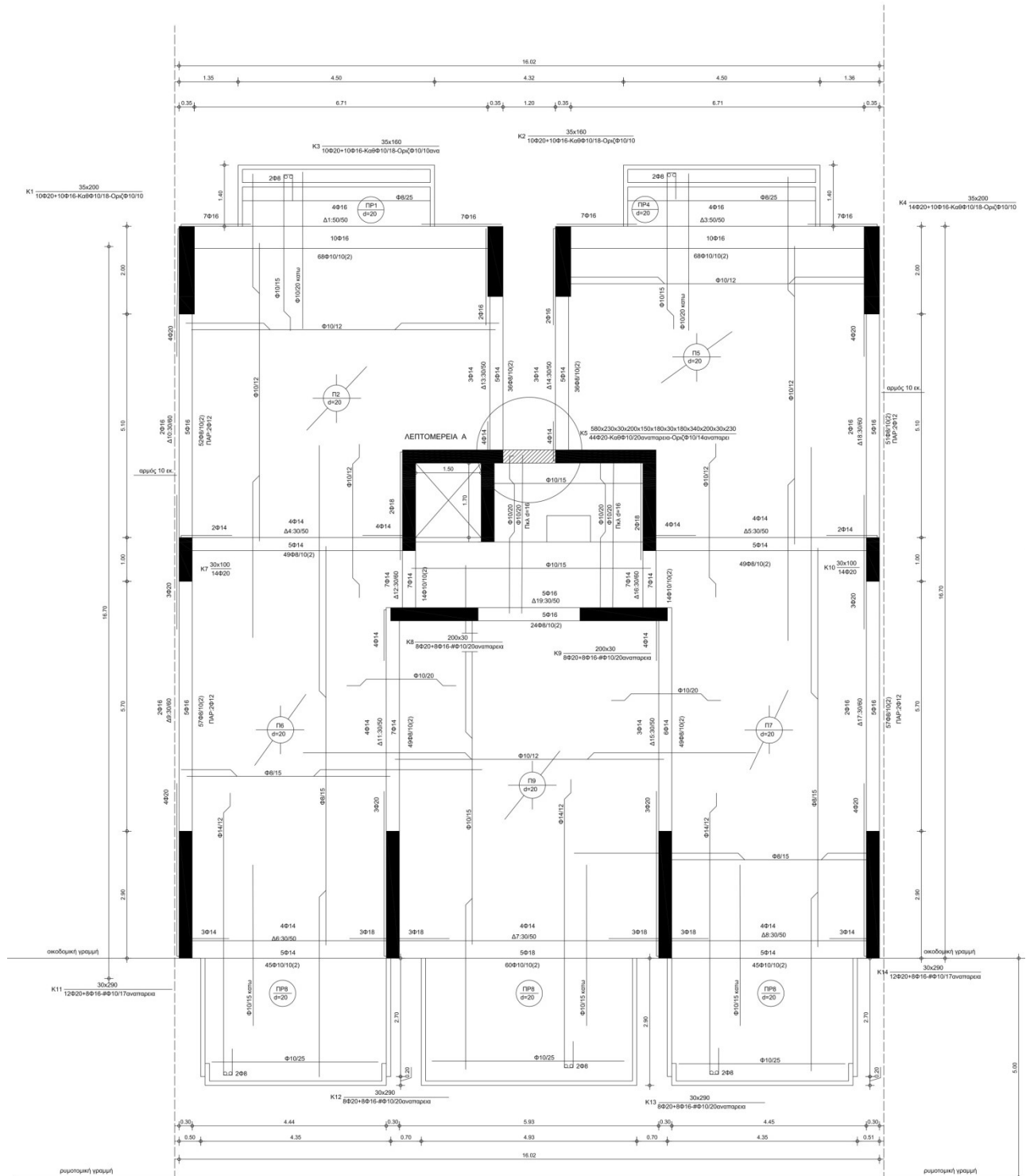




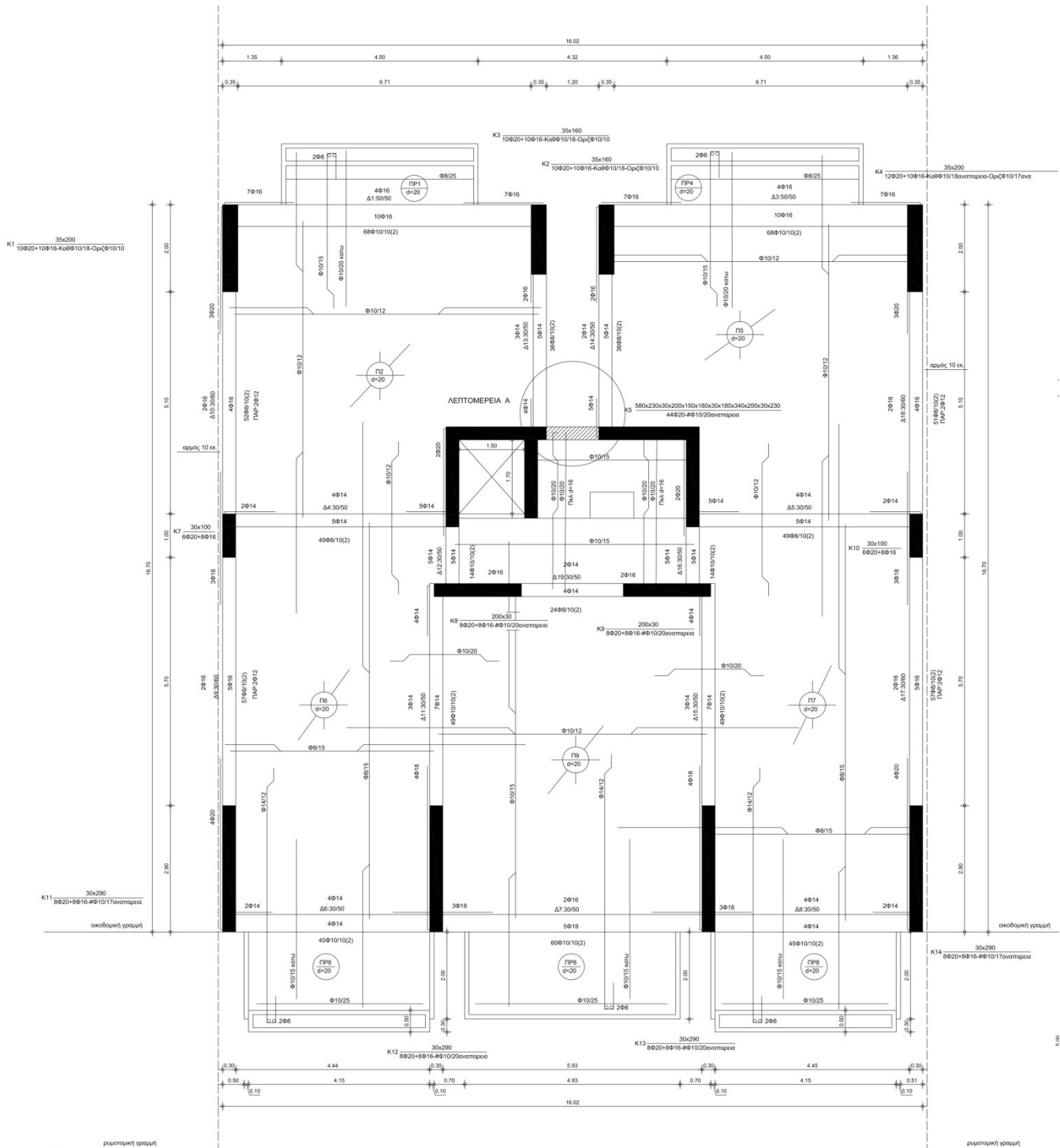
Σχήμα Α6: Κάτοψη οροφής Α' ορόφου



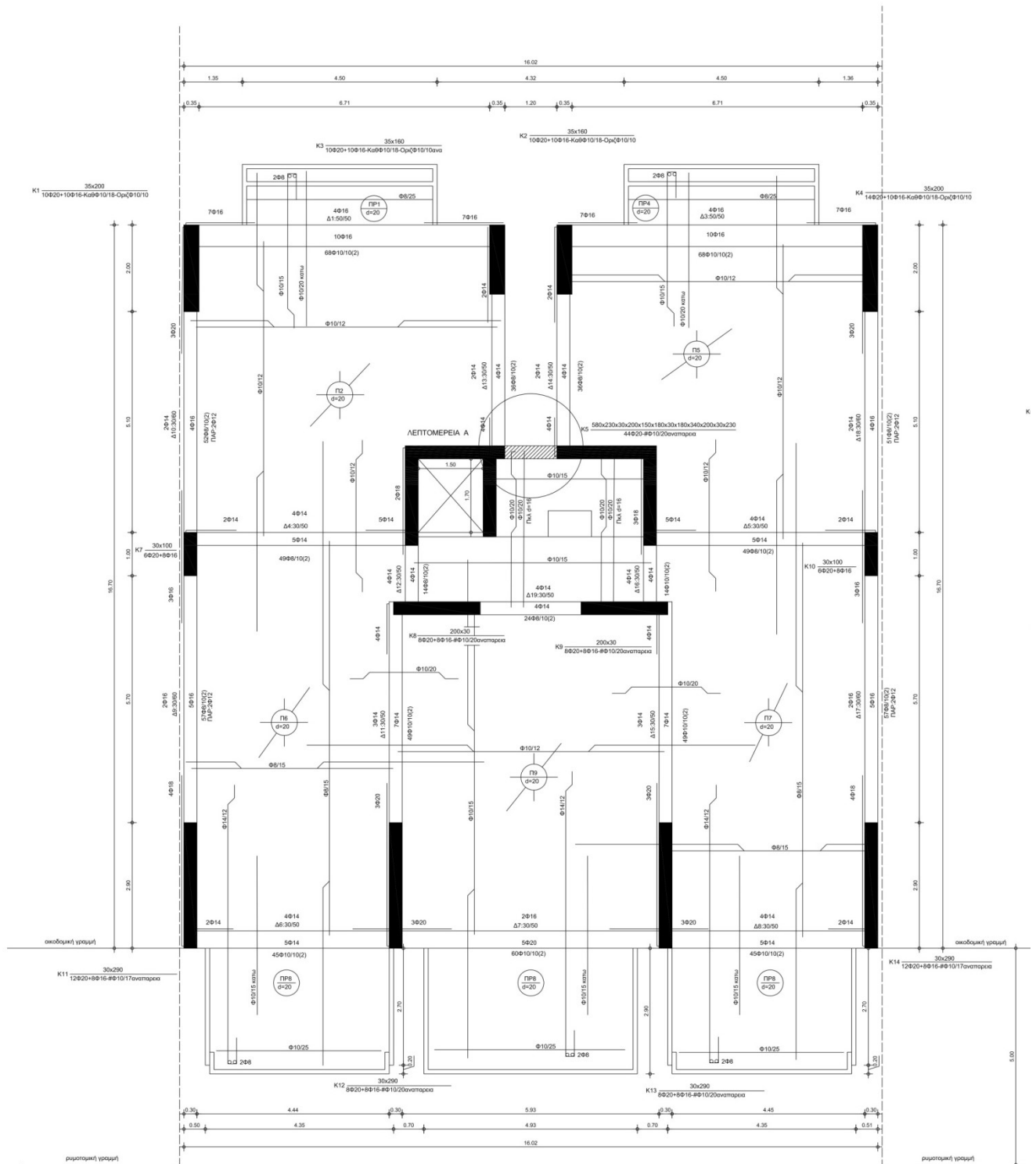
Σχήμα Α7: Κάτοψη οροφής Β', Γ' ορόφου



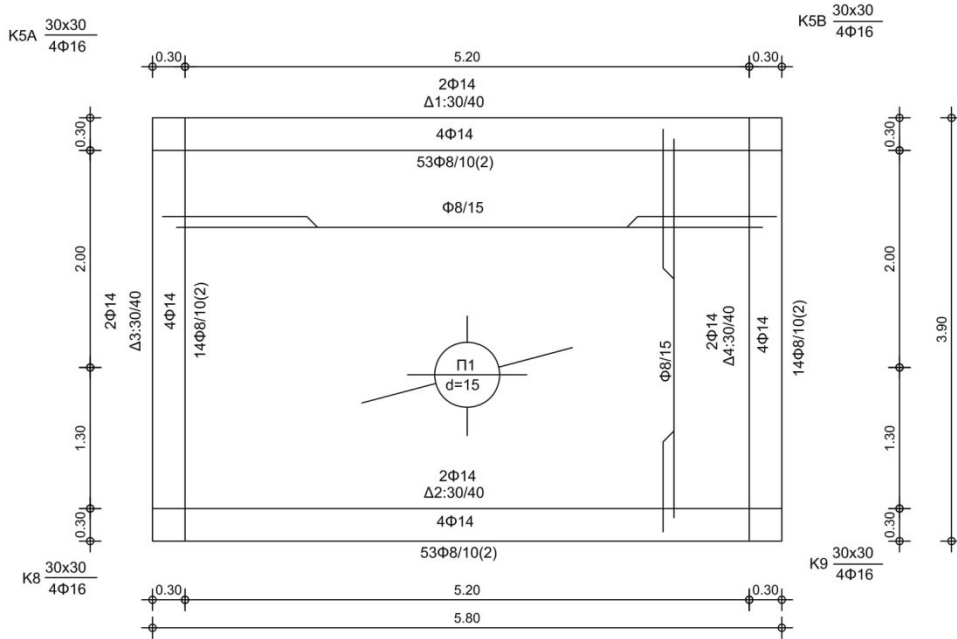
Σχήμα Α8: Κάτοψη οροφής Δ' ορόφου



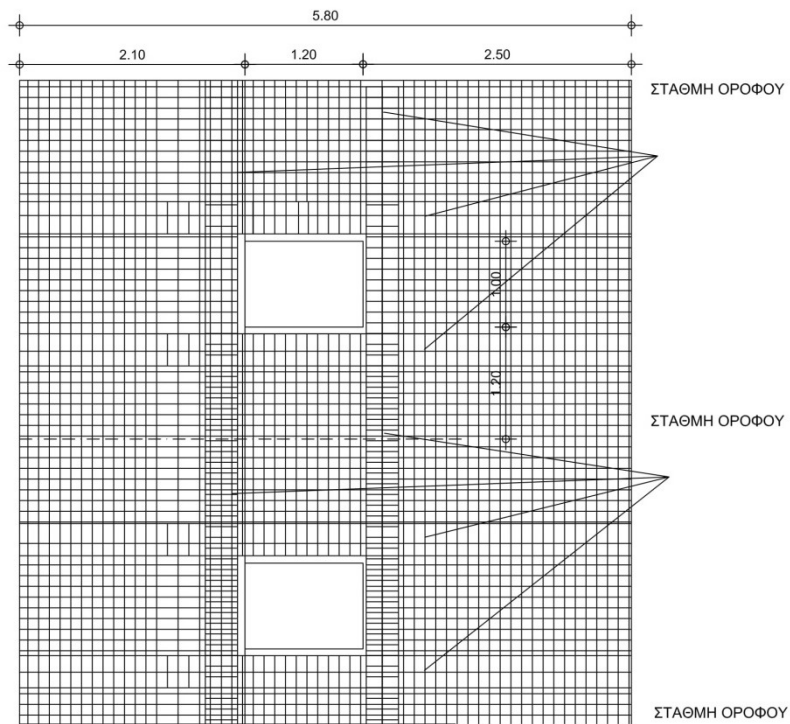
Σχήμα Α9: Κάτοψη οροφής Ε' ορόφου



Σχήμα Α10: Κάτοψη οροφής ΣΤ', Ζ' ορόφου



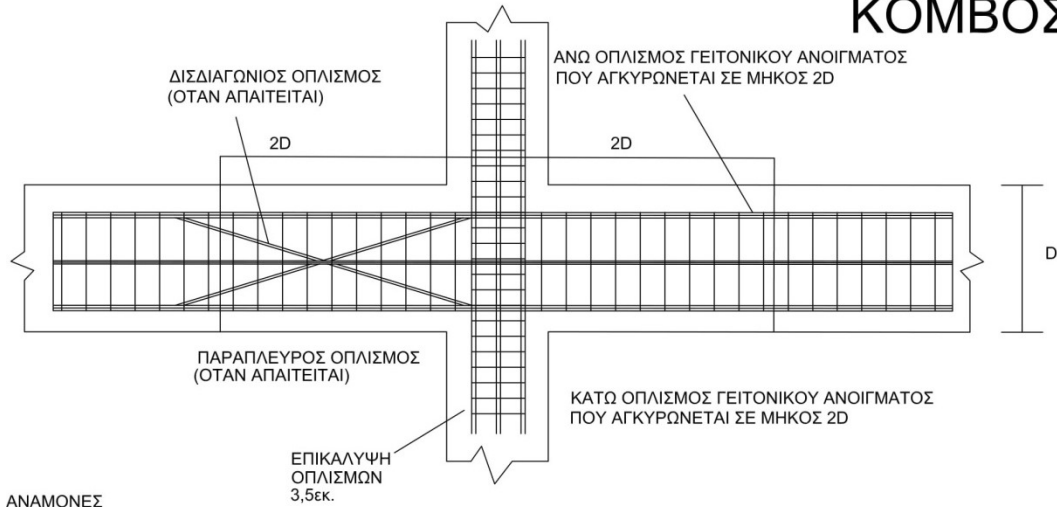
Σχήμα Α11: Κάτοψη δώματος



Σχήμα Α12: Λεπτομέρεια Α

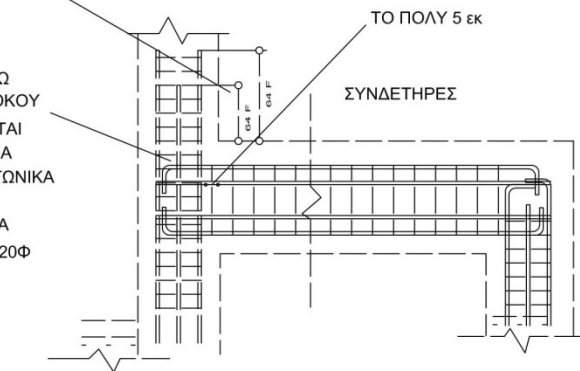


## ΜΕΣΑΙΟΣ ΚΟΜΒΟΣ

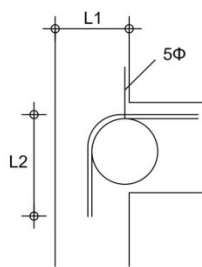


ΑΝΑΜΟΝΕΣ  
ΕΝΩΣΗ ΜΕ  
ΥΠΕΡΚΑΛΥΨΗ  
ΚΑΤΑ 64Φ<0.80  
(S400)

ΑΝΩ ΚΑΙ ΚΑΤΩ  
ΟΠΛΙΣΜΟΙ ΔΟΚΟΥ  
ΑΓΚΥΡΩΝΟΝΤΑΙ  
ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΑ  
Η ΜΕ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΑ  
ΑΓΚΙΣΤΡΑ Η  
ΜΕ ΤΥΜΠΑΝΑ  
ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ 20Φ



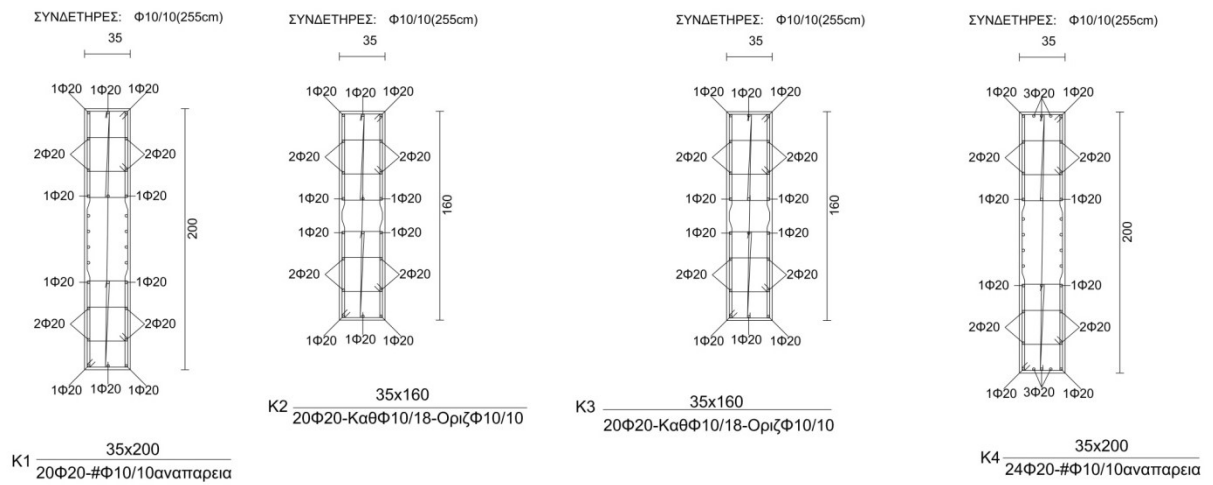
## ΑΚΡΑΙΟΣ ΚΟΜΒΟΣ



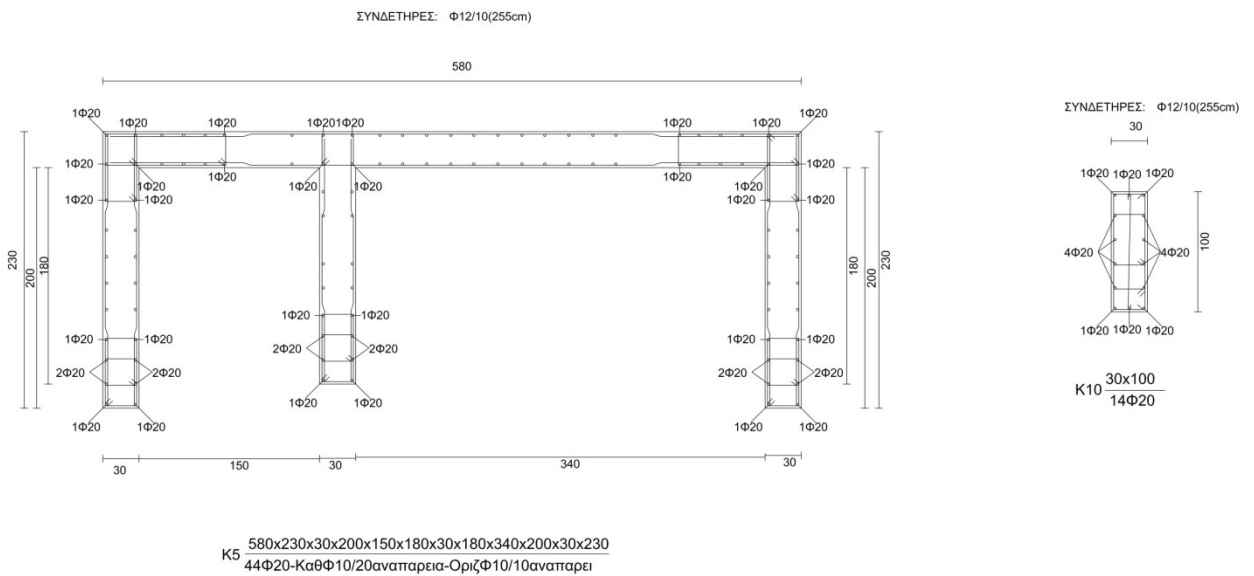
ΑΓΚΥΡΩΣΗ ΜΕ  
ΚΑΜΠΥΛΗ

Φ	ΑΜΕΣΗ ΣΤΗΡΙΞΗ		ΕΜΜΕΣΗ ΣΤΗΡΙΞΗ	
	L1	L2	L1	L2
12	24	38	19+b/3	38
14	27	44	21+b/3	44
16	30	49	23+b/3	49
18	33	55	25+b/3	55
20	37	61	28+b/3	61

Σχήμα Α13: Λεπτομέρεια όπλισης μεσαίου και ακραίου κόμβου.



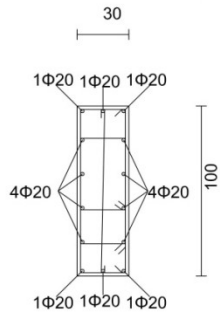
Σχήμα Α14: Οπλισμοί υποστυλωμάτων υπογείου και Pilotis



Σχήμα Α15: Οπλισμοί υποστυλωμάτων υπογείου και Pilotis

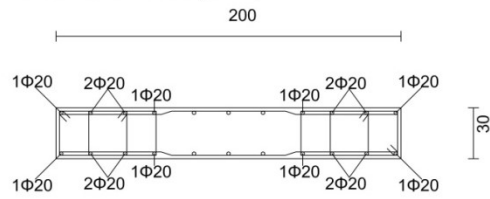
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ:  $\Phi 12/10(255\text{cm})$



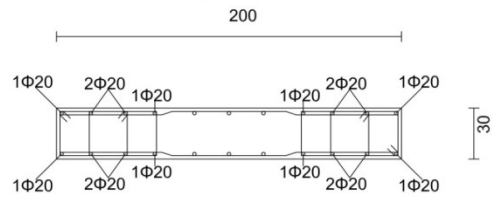
K7  $\frac{30 \times 100}{14\Phi 20}$

ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ:  $\Phi 10/10(255\text{cm})$



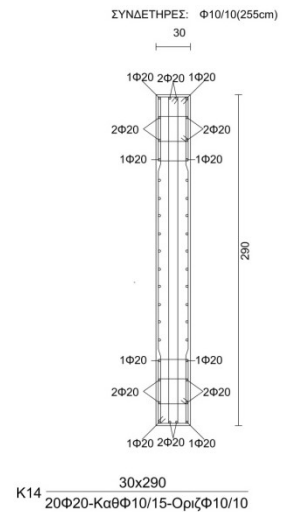
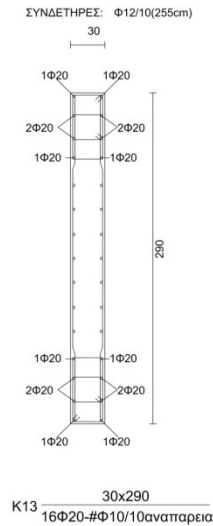
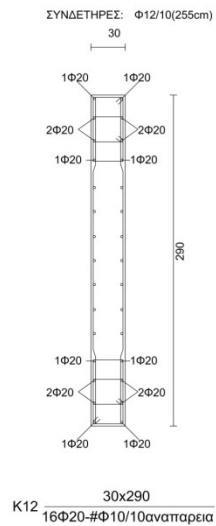
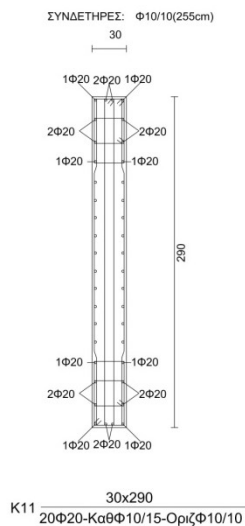
K8  $\frac{200 \times 30}{16\Phi 20 - \# \Phi 10/20 \text{ αναπαρεία}}$

ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ:  $\Phi 12/10(255\text{cm})$

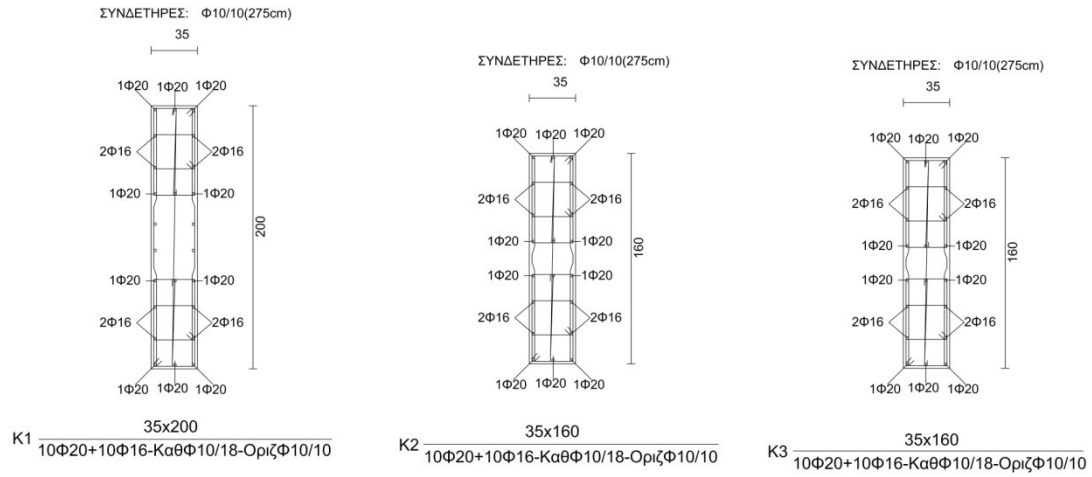


K9  $\frac{200 \times 30}{16\Phi 20 - \# \Phi 10/20 \text{ αναπαρεία}}$

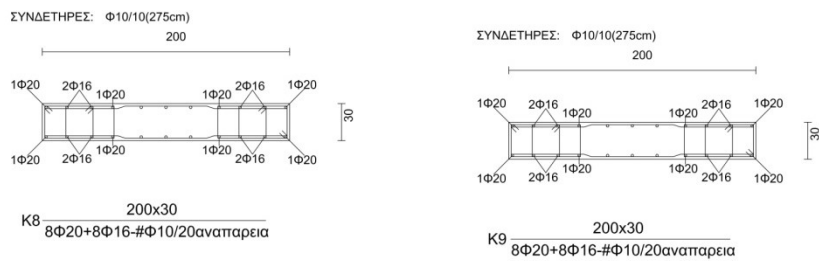
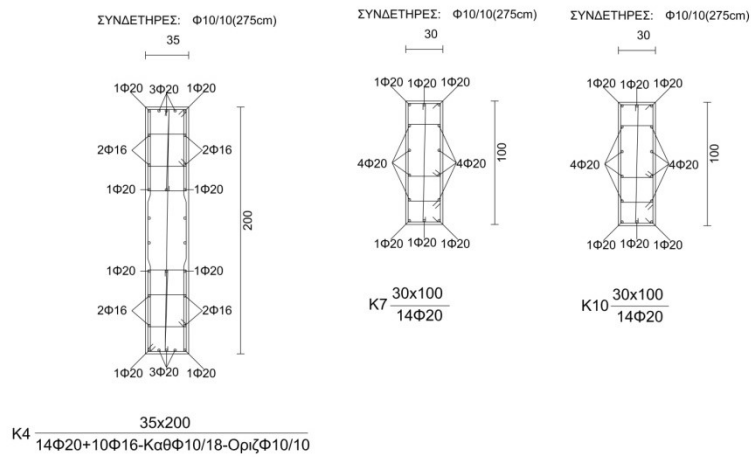
Σχήμα Α16: Οπλισμοί υποστυλωμάτων υπογείου και Pilotis



Σχήμα Α17: Οπλισμοί υποστυλωμάτων υπογείου και Pilotis



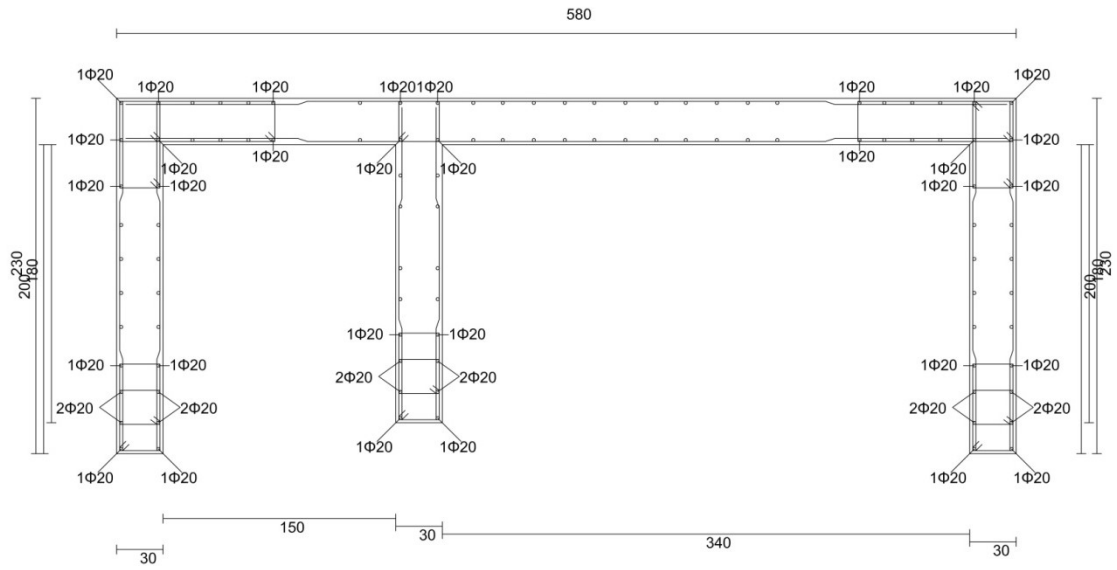
Σχήμα Α18: Οπλισμοί υποστυλωμάτων τυπικού ορόφου



Σχήμα Α19: Οπλισμοί υποστυλωμάτων τυπικού ορόφου

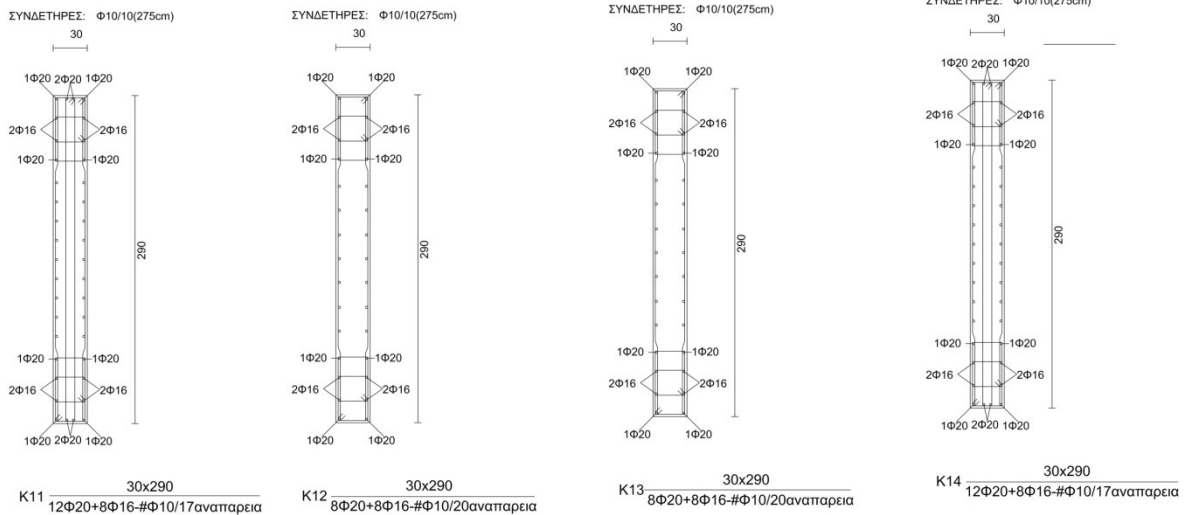
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ: Φ10/10(275cm)



K5 580x230x30x200x150x180x30x180x340x200x30x230  
44Φ20-ΚαθΦ10/20αναπαρεια-ΟριζΦ10/10αναπαρεια

Σχήμα Α20: Οπλισμοί υποστυλωμάτων τυπικού ορόφου



Σχήμα Α21: Οπλισμοί υποστυλωμάτων τυπικού ορόφου

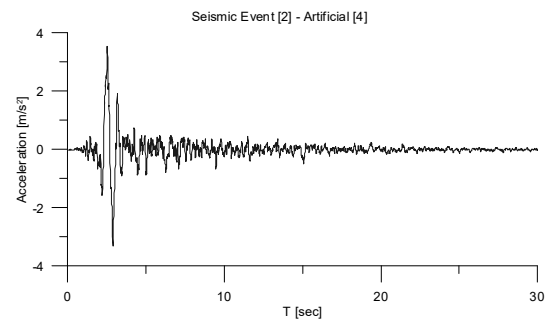
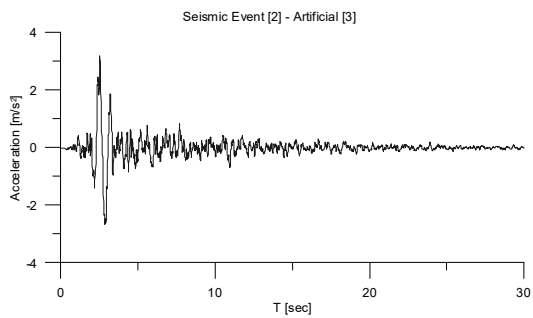
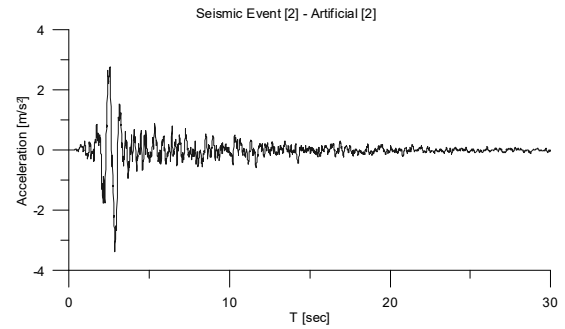
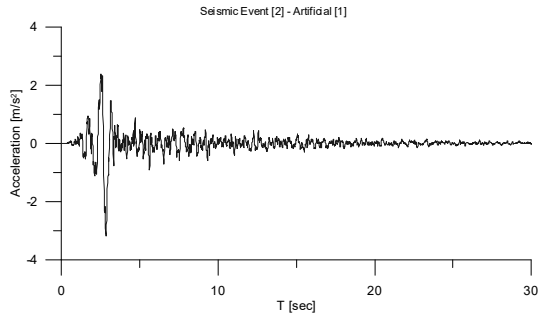
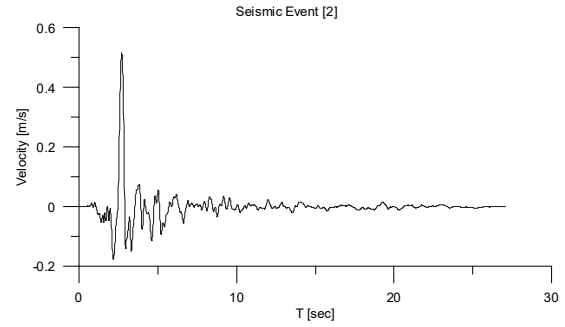
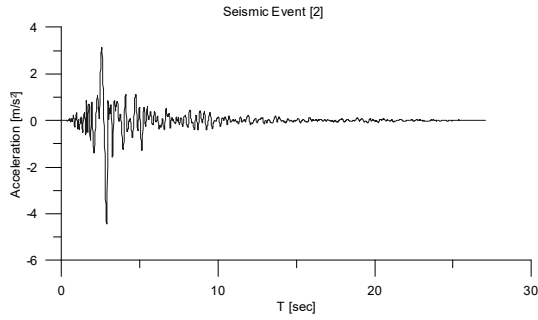


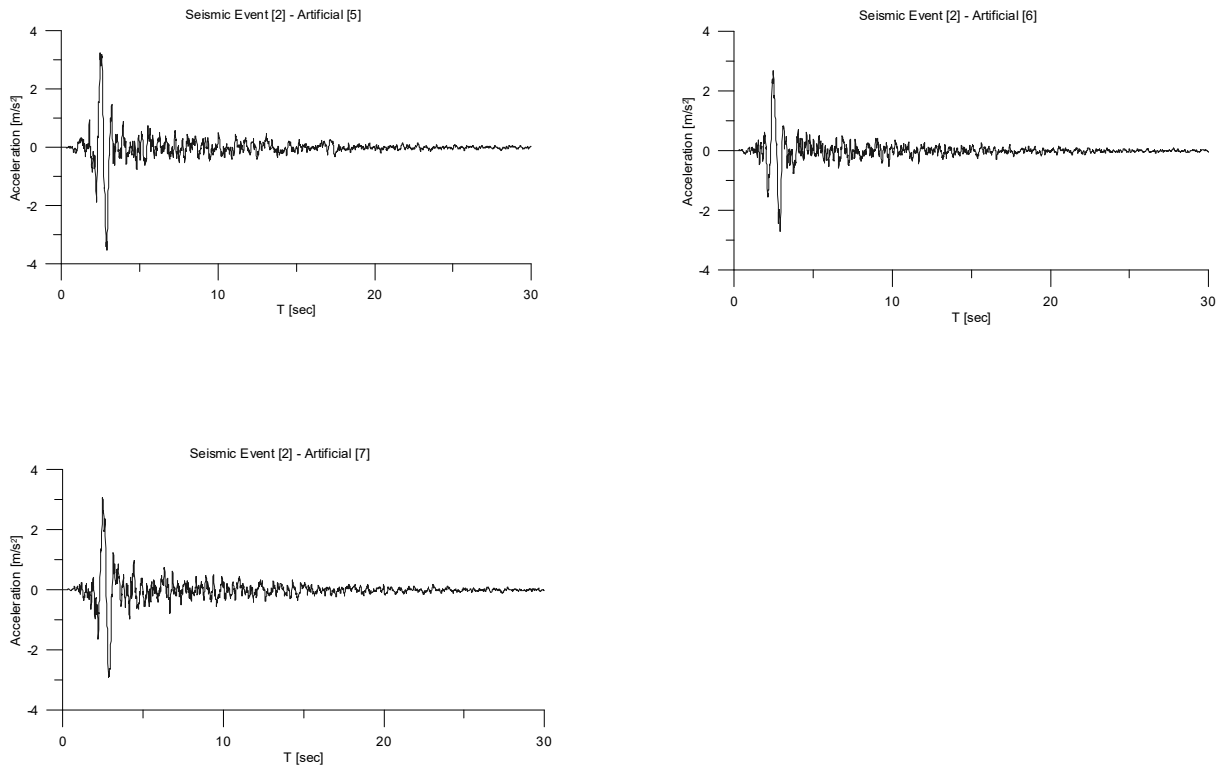
## Παράρτημα Β



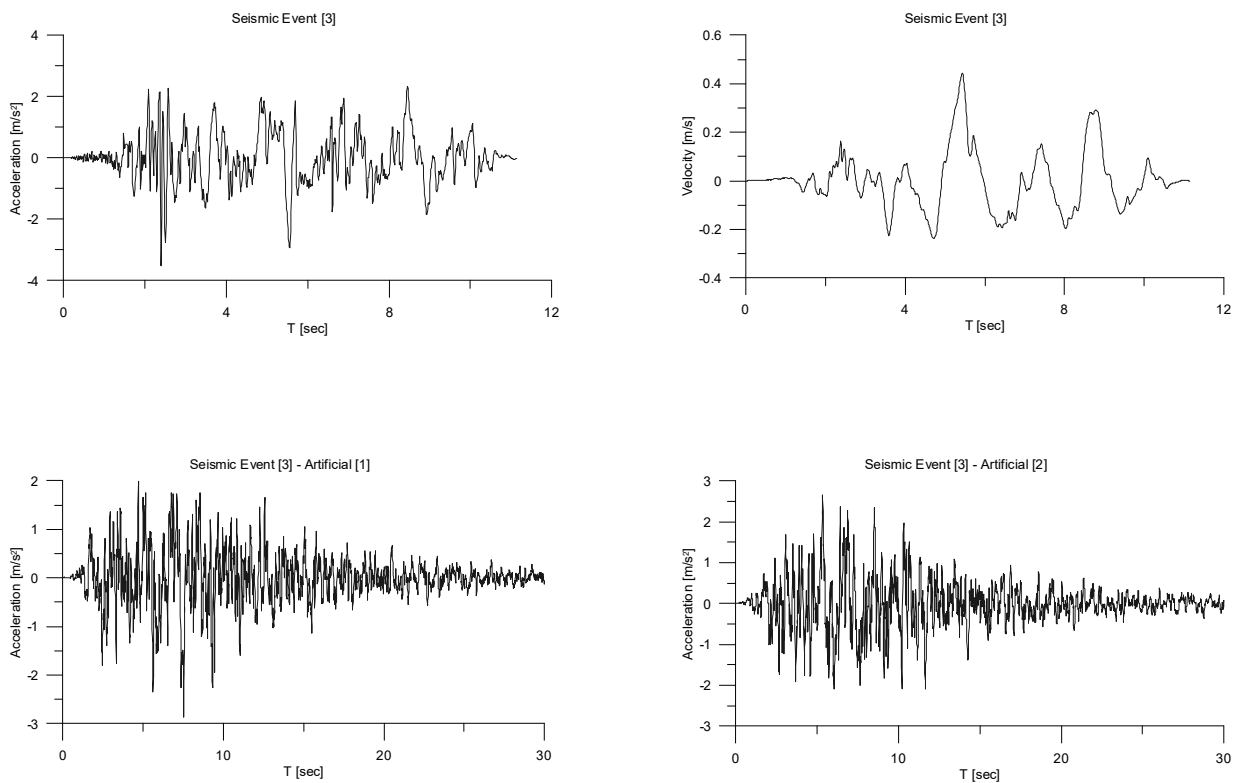


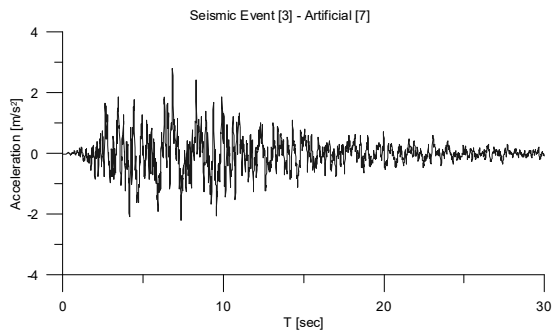
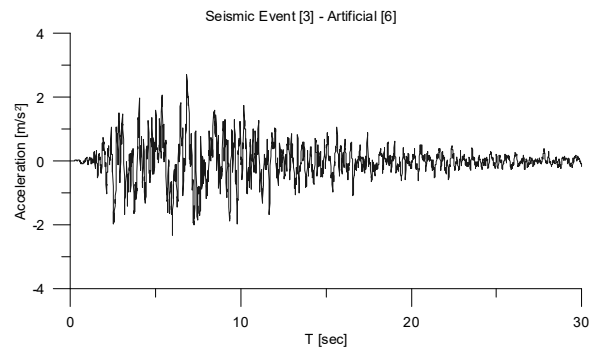
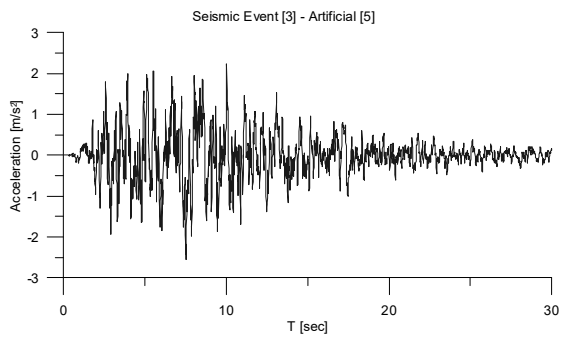
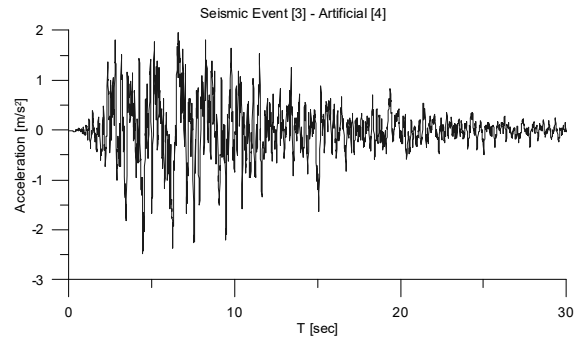
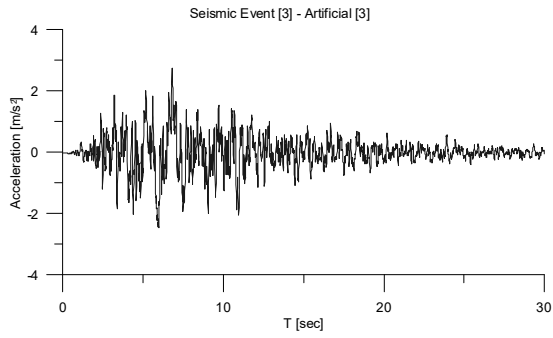
Στο παρόν Παράρτημα παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων των πραγματικών εδαφικών καταγραφών, καθώς και οι χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτές.



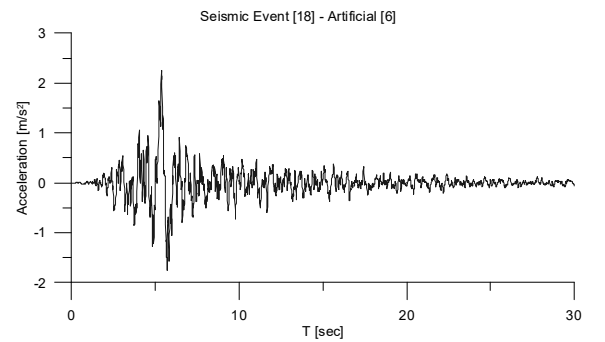
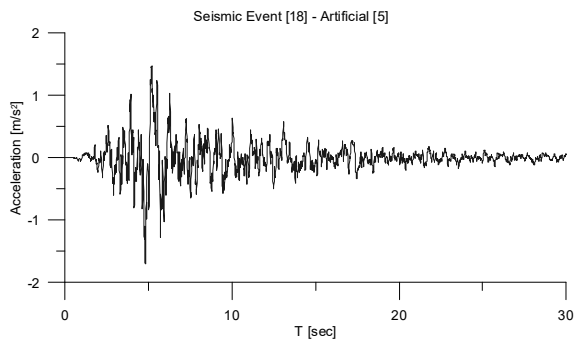
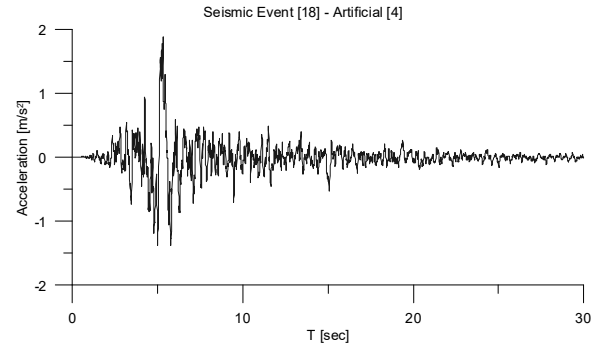
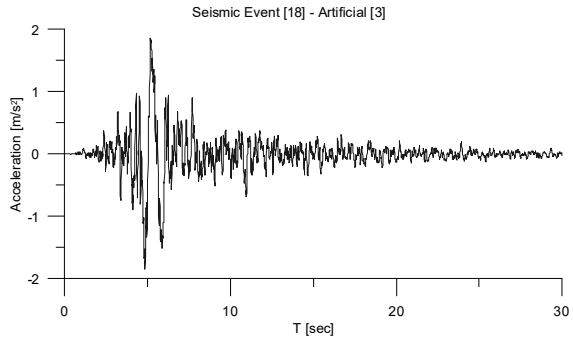
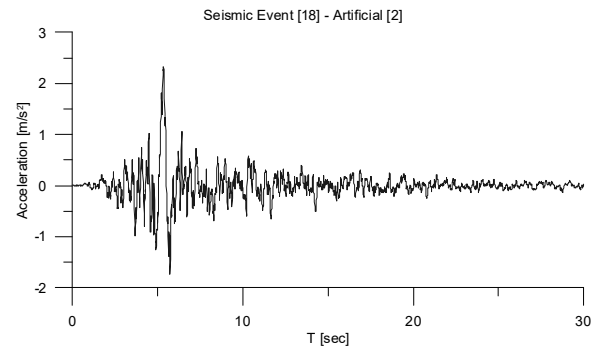
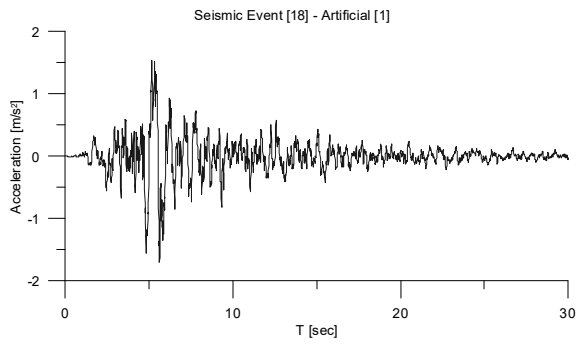
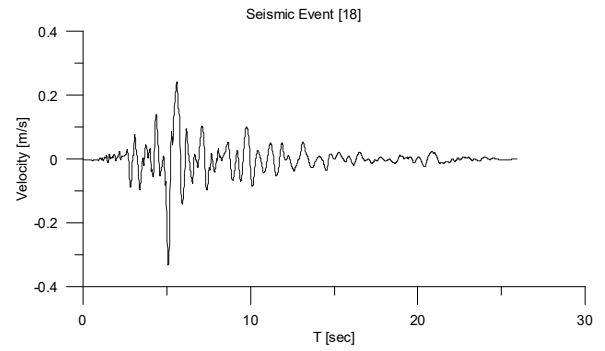
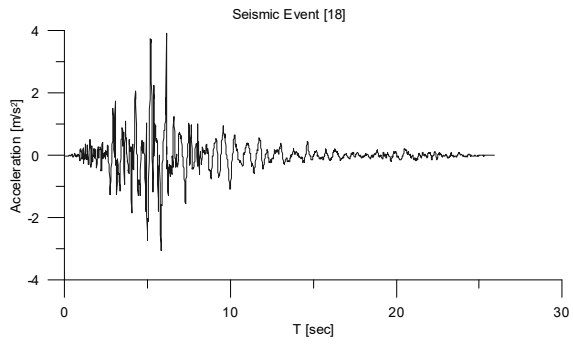


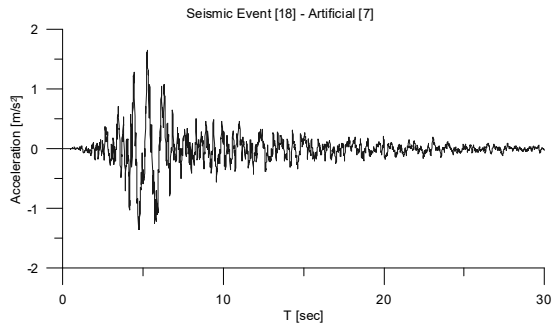
Σχήμα Β1: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 2 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.



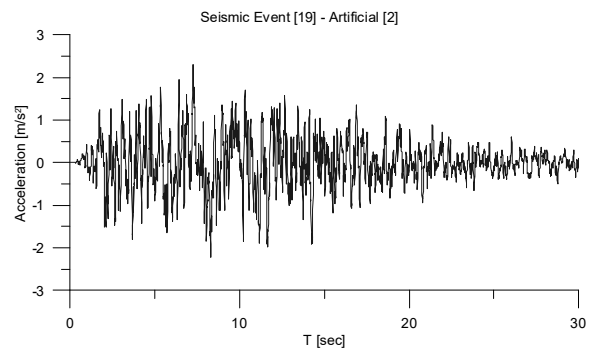
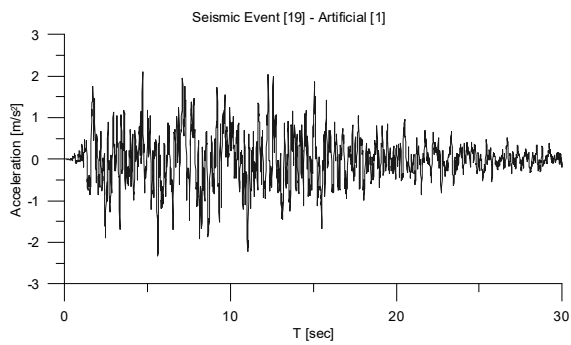
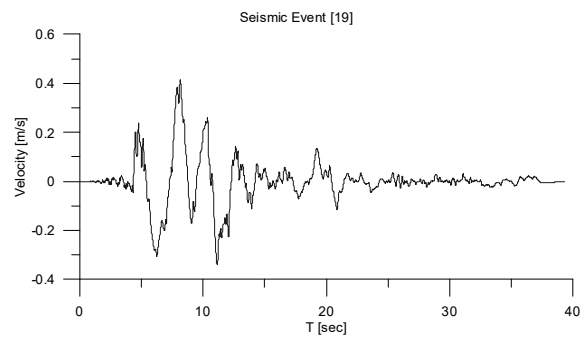
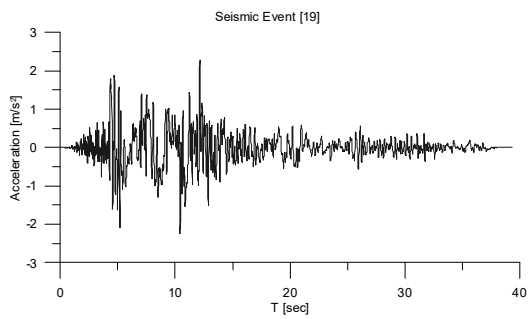


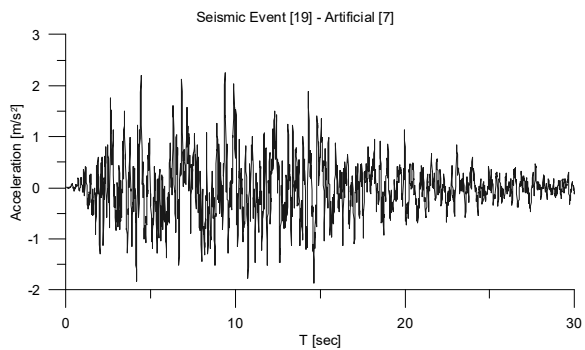
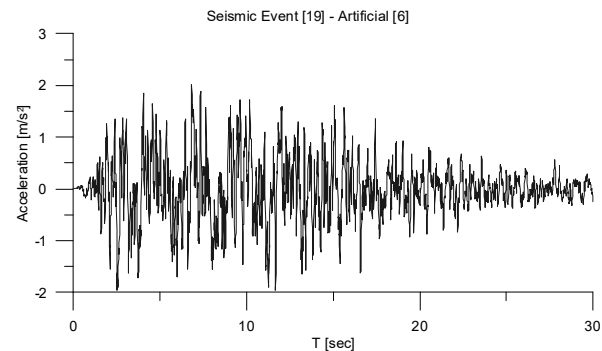
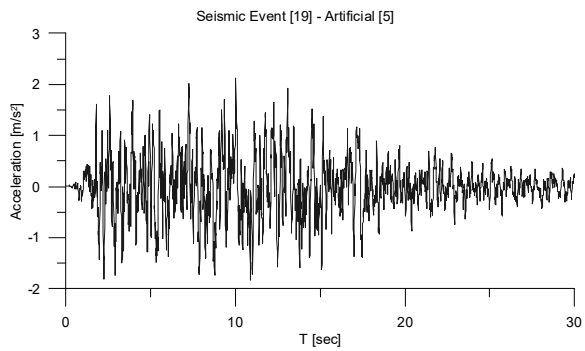
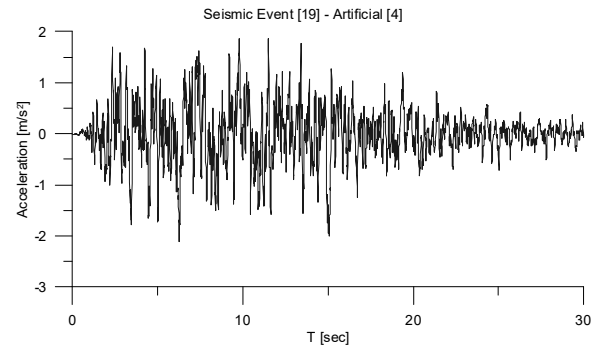
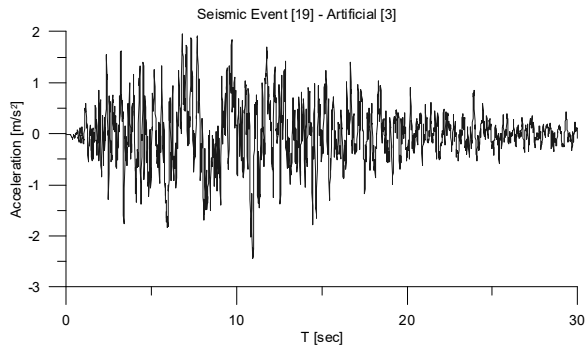
Σχήμα Β2: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 3 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.



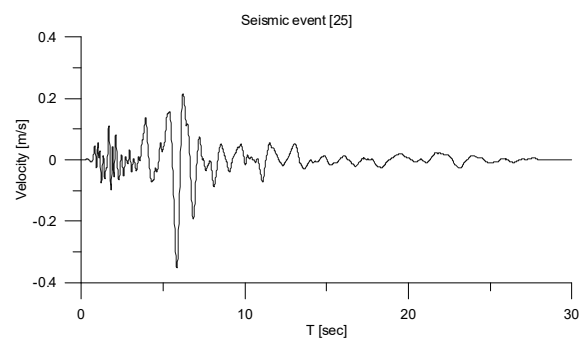
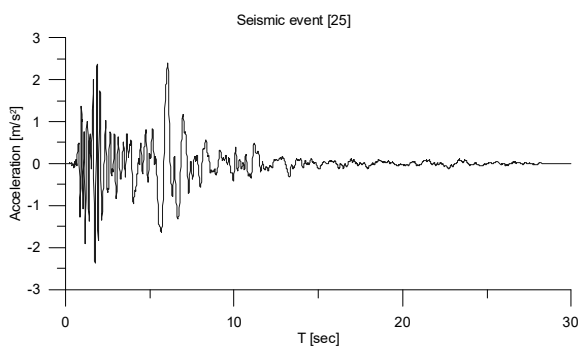


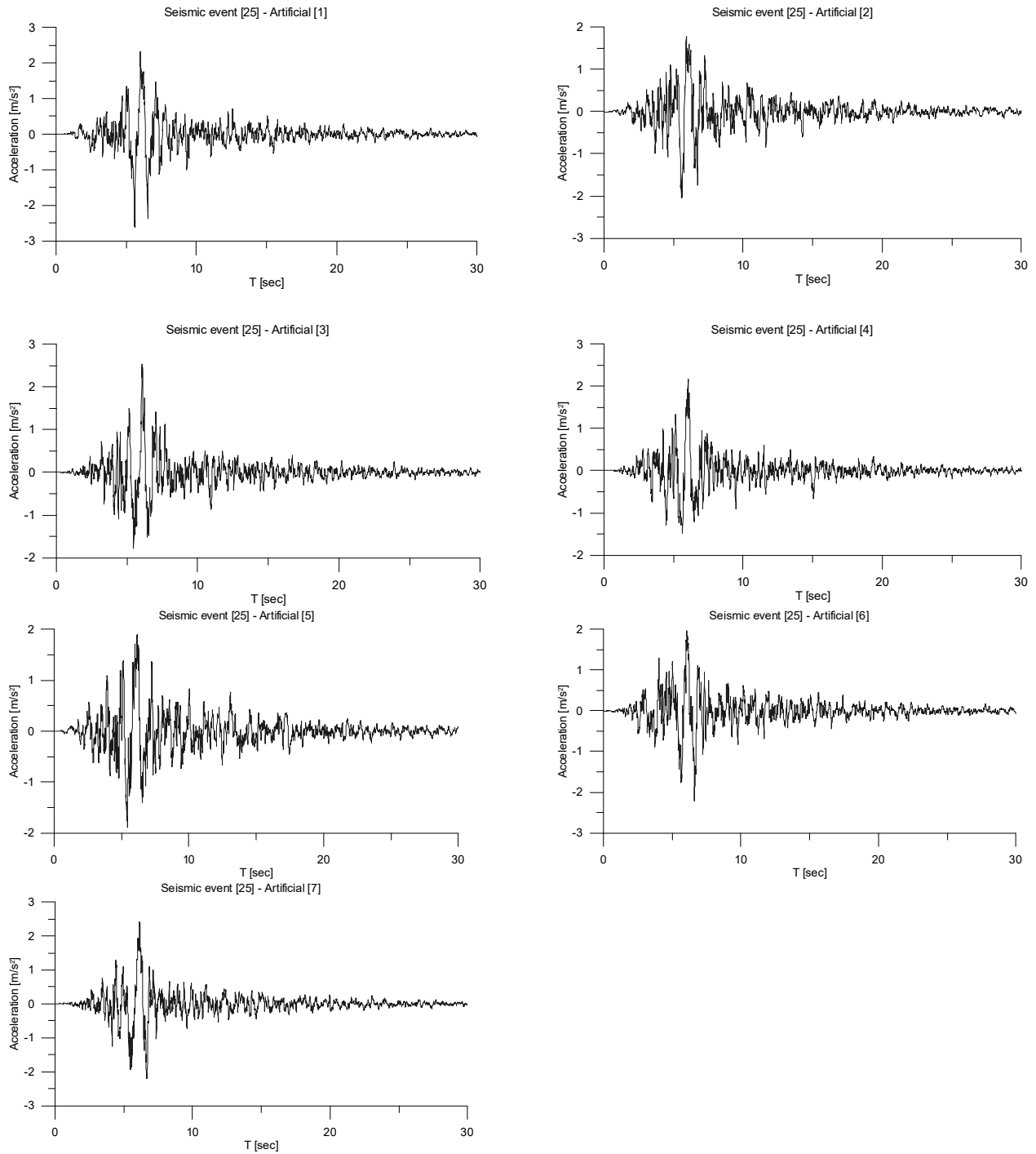
Σχήμα Β3: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 18 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.



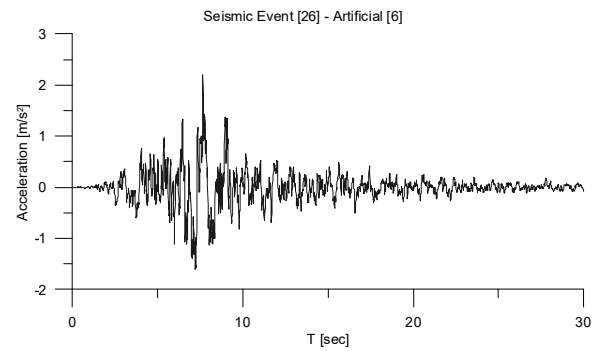
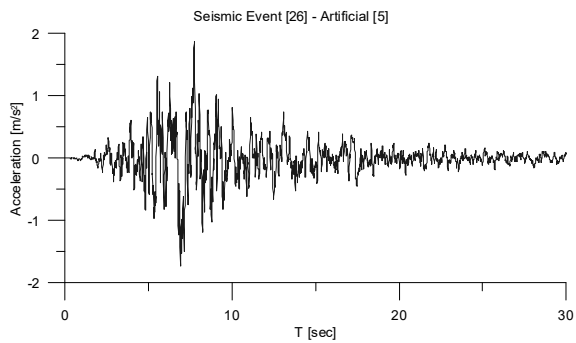
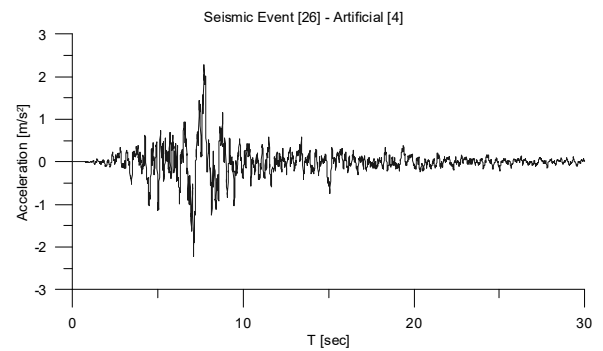
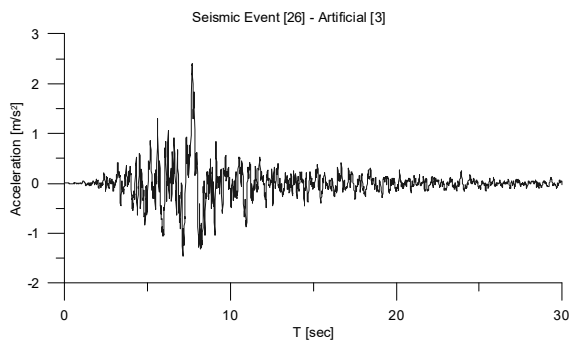
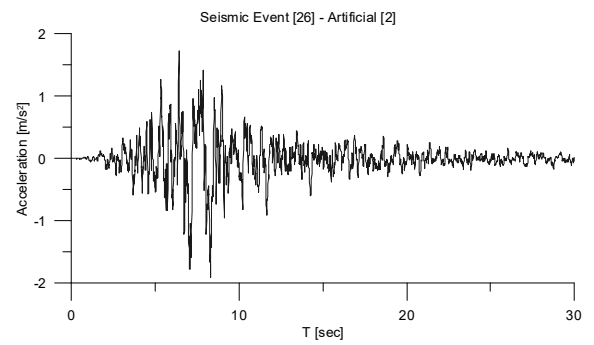
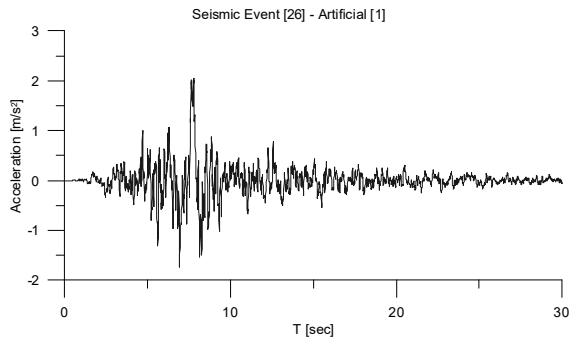
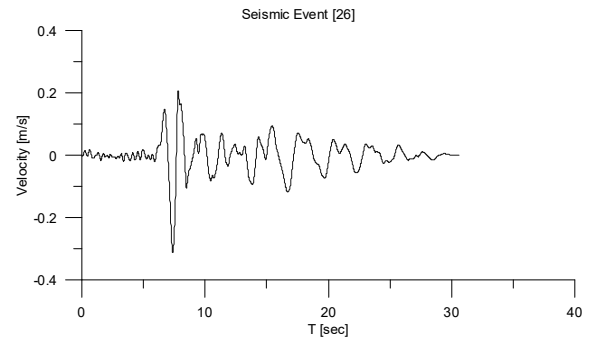
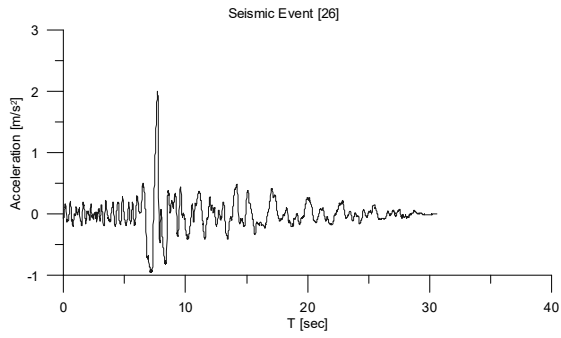


Σχήμα Β4: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 19 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.

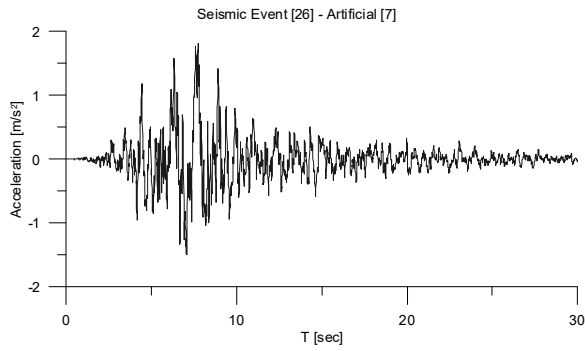




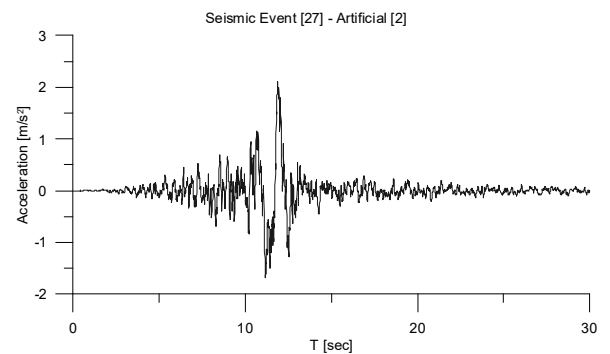
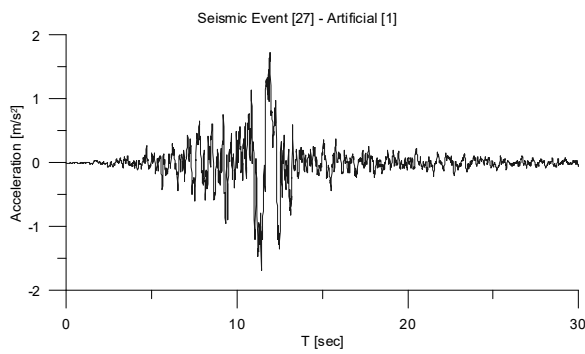
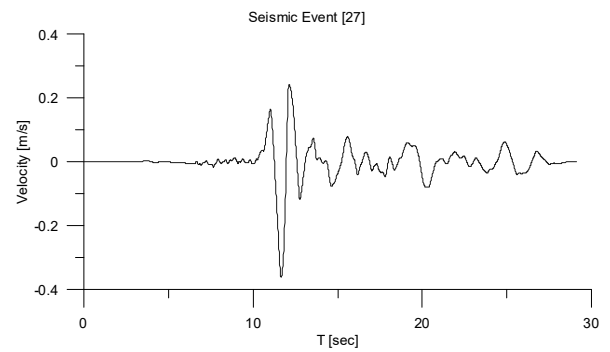
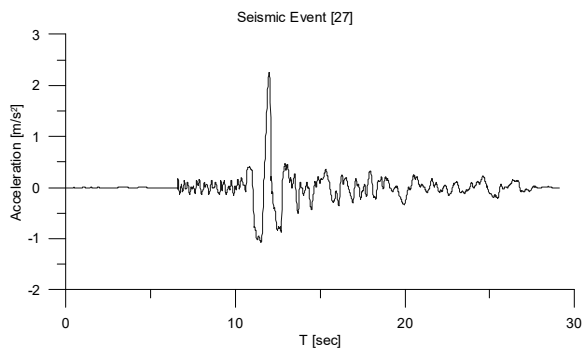
Σχήμα Β5: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 25 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.

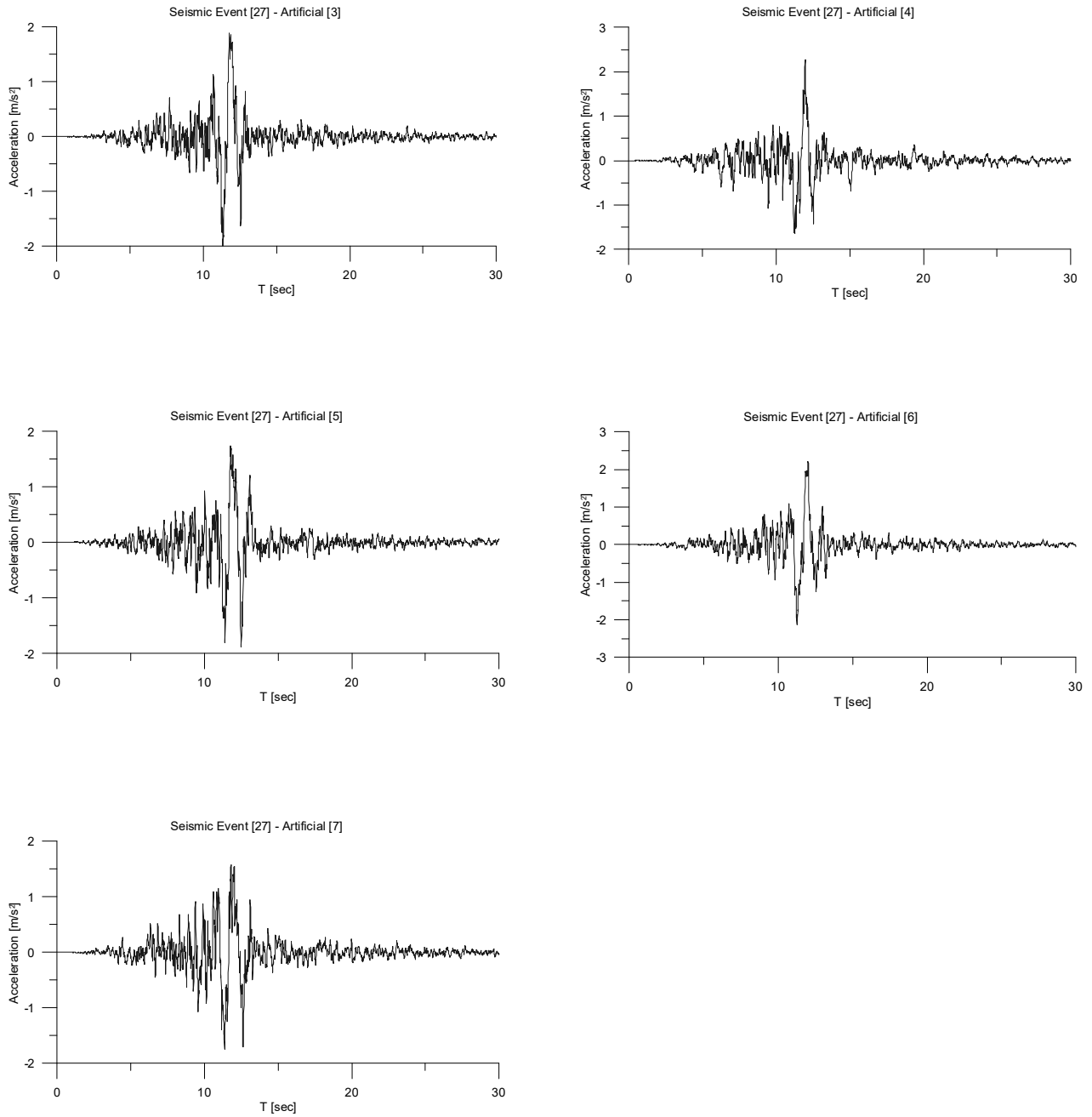






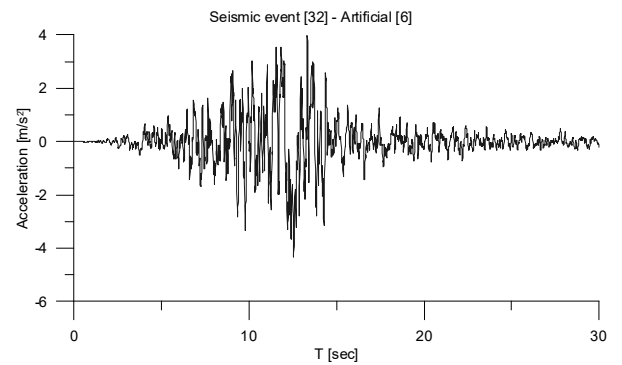
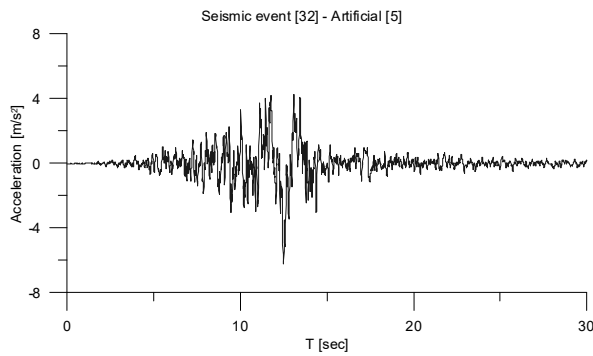
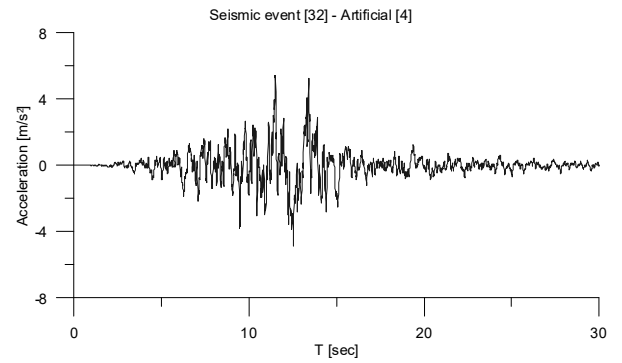
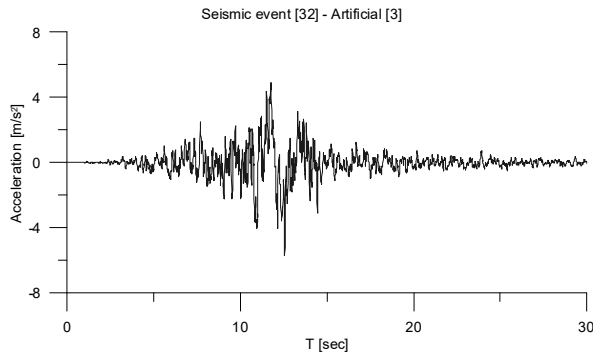
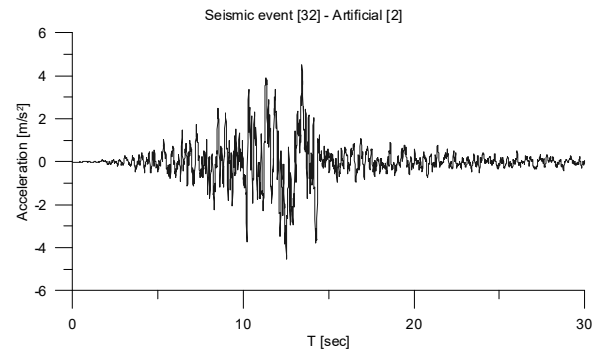
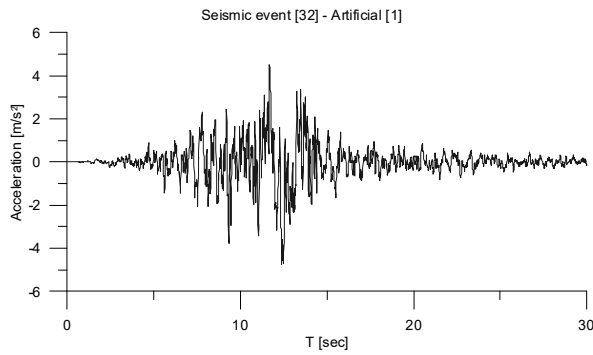
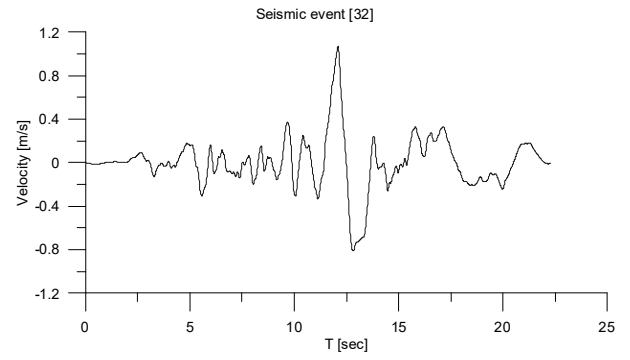
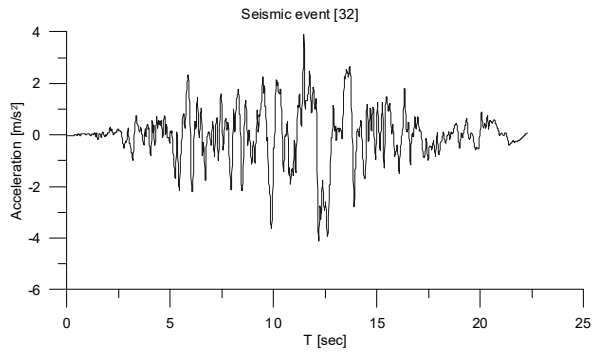
Σχήμα Β6: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 26 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.

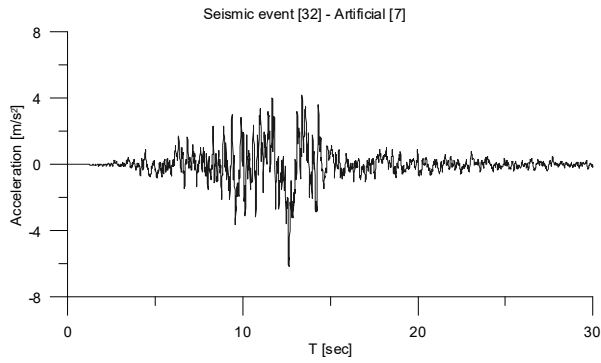




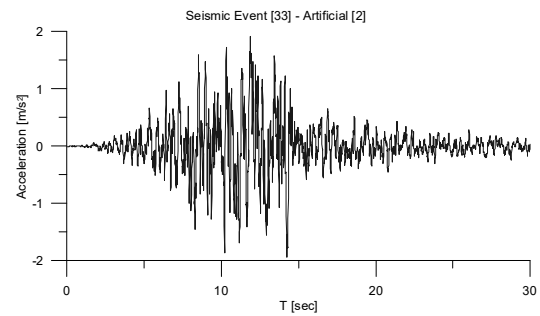
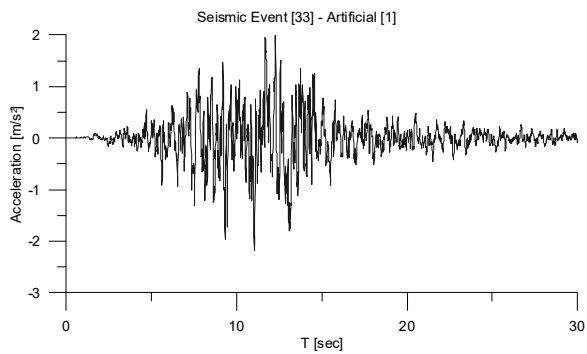
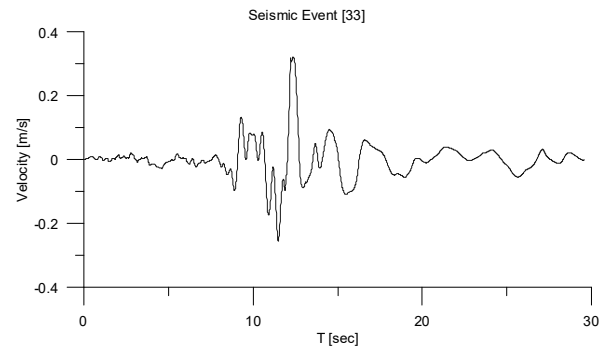
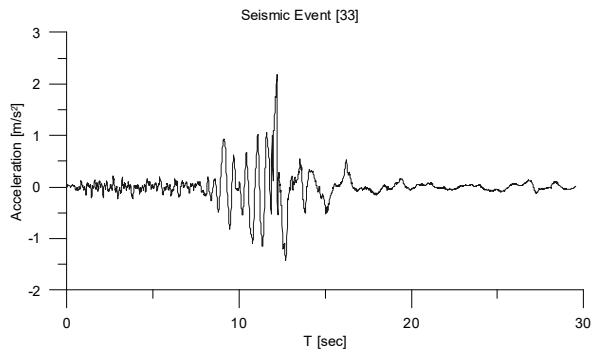
Σχήμα Β7: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 27 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.

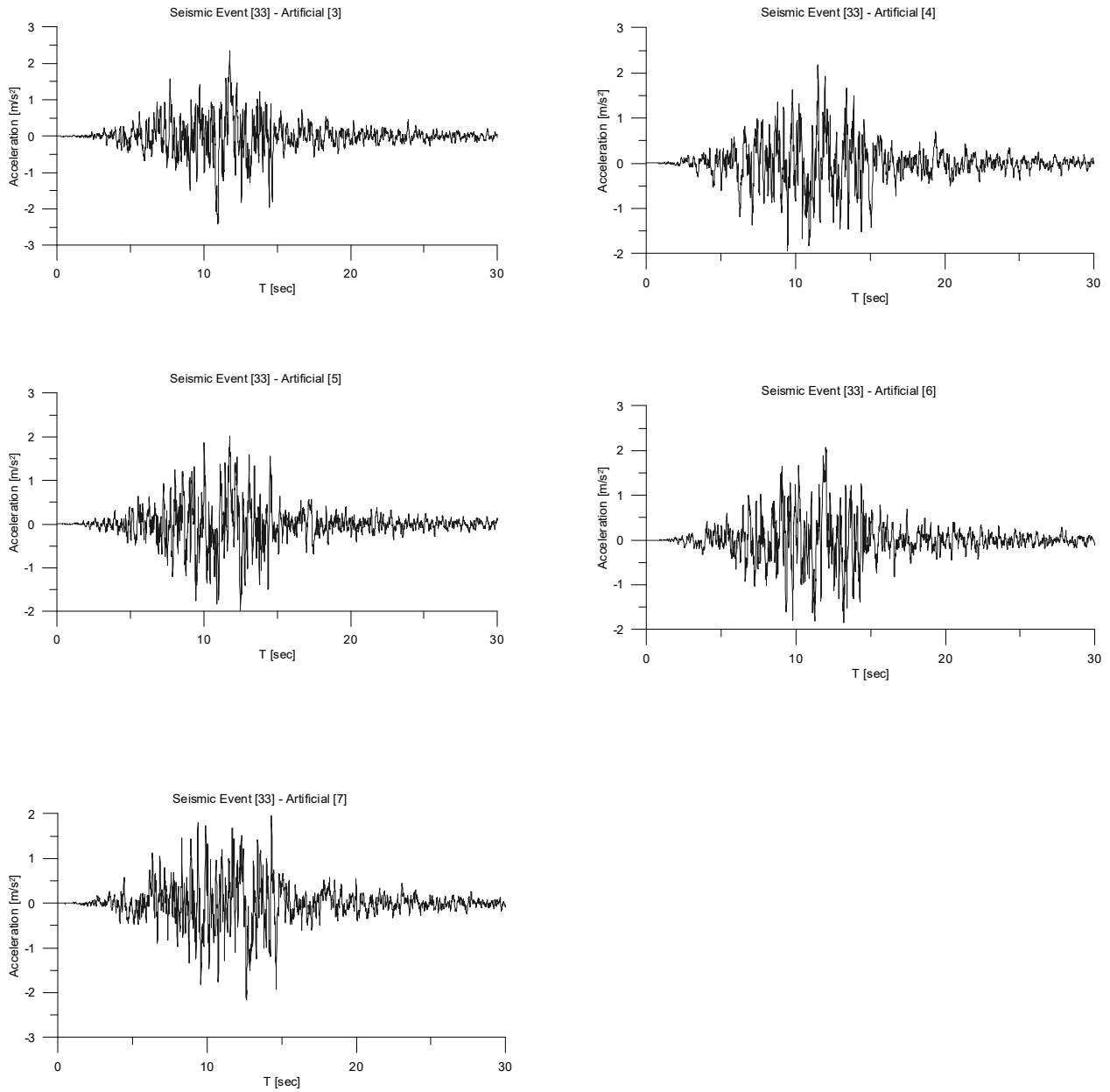
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β



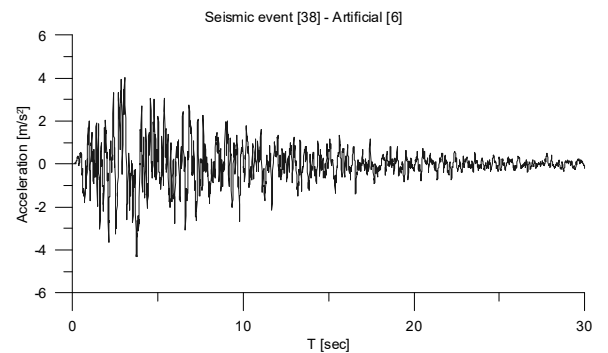
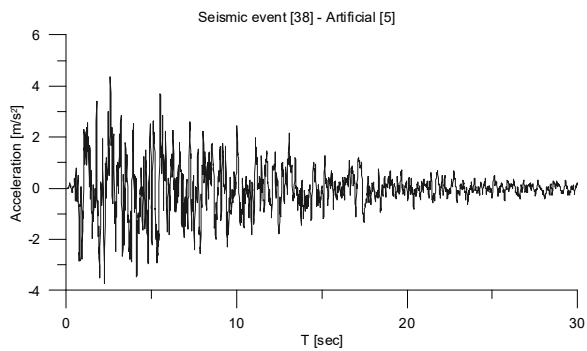
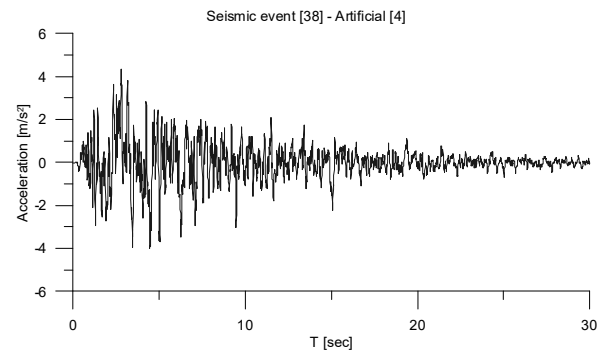
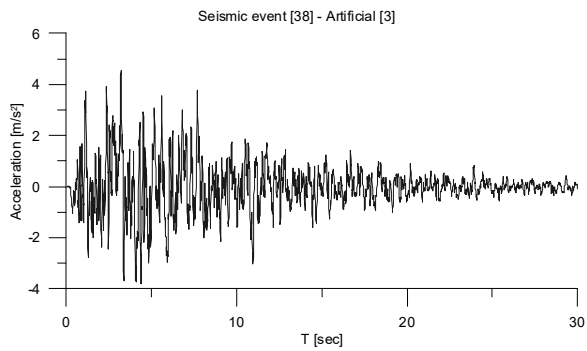
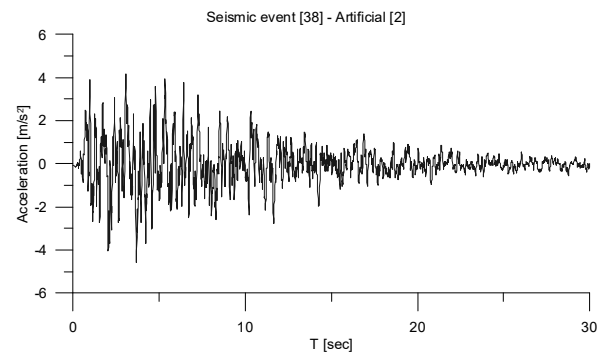
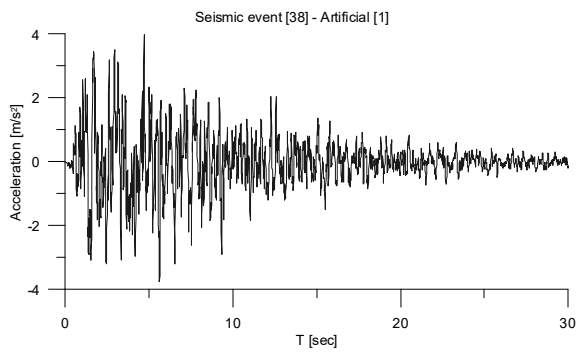
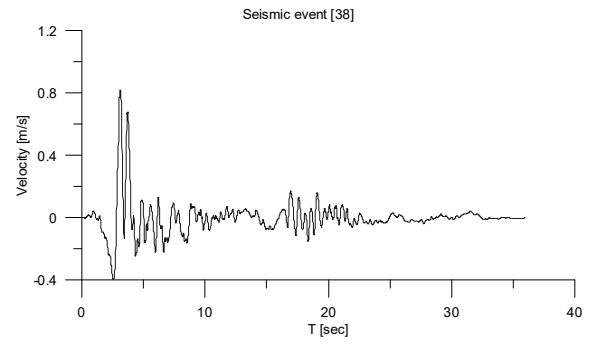
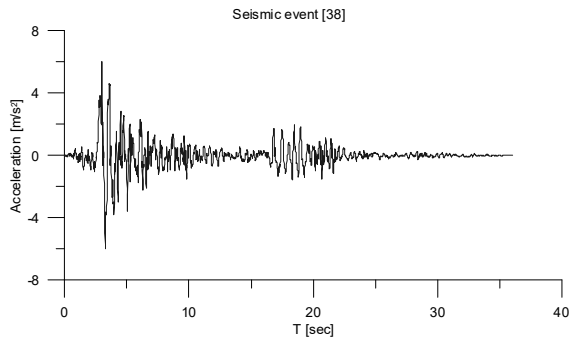


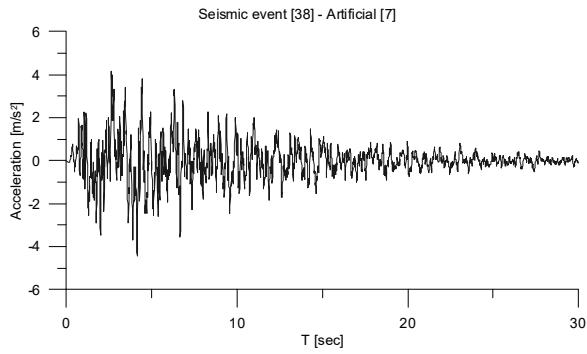
Σχήμα Β8: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 32 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.



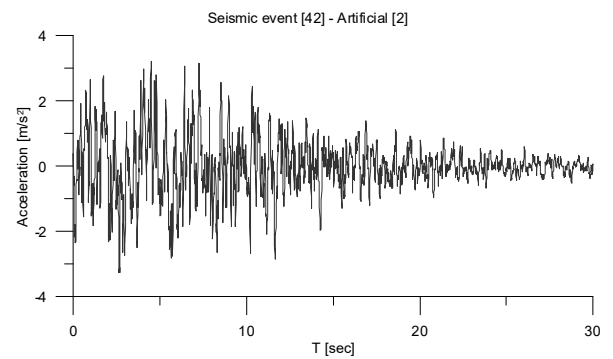
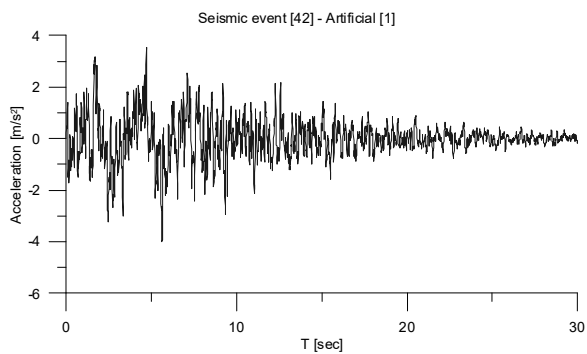
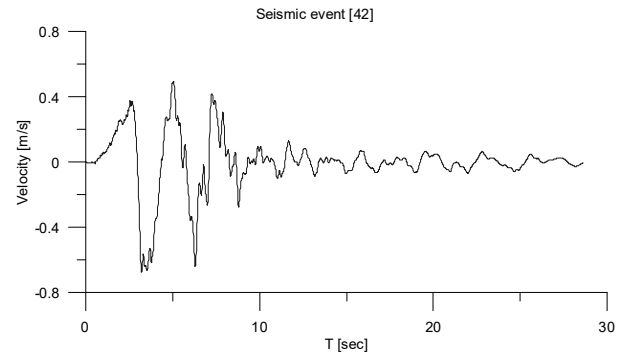
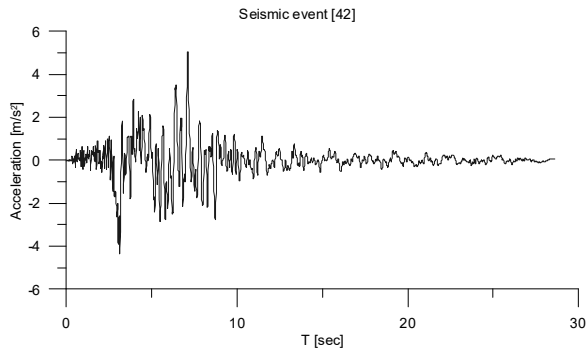


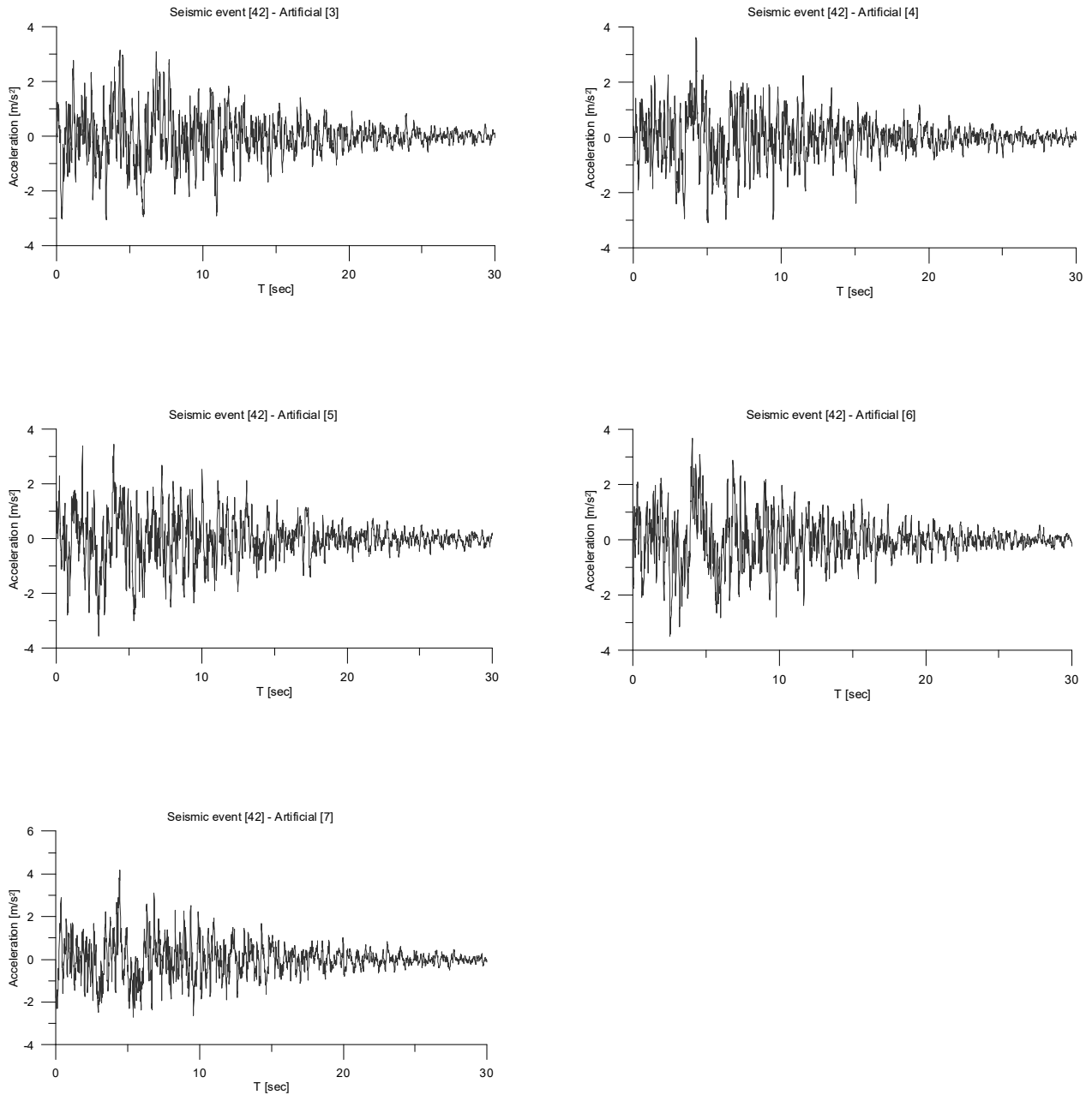
Σχήμα Β9: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 33 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.



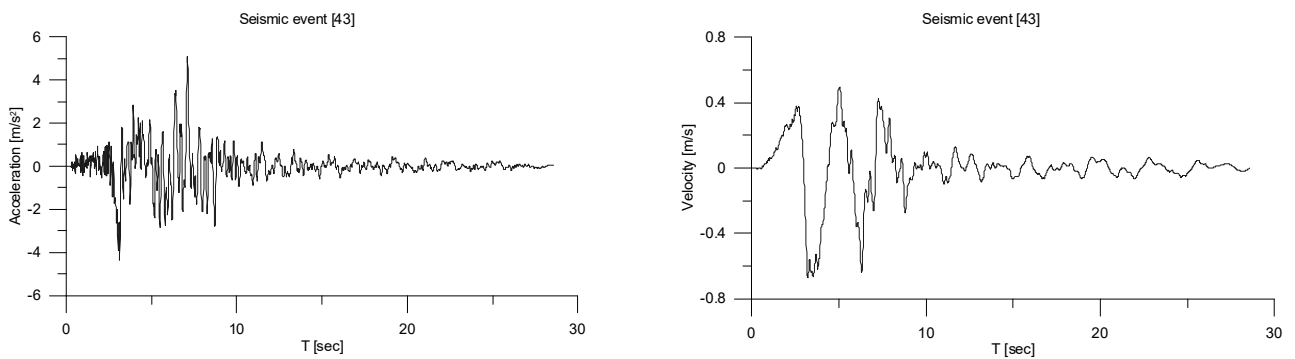


Σχήμα Β10: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 38 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.

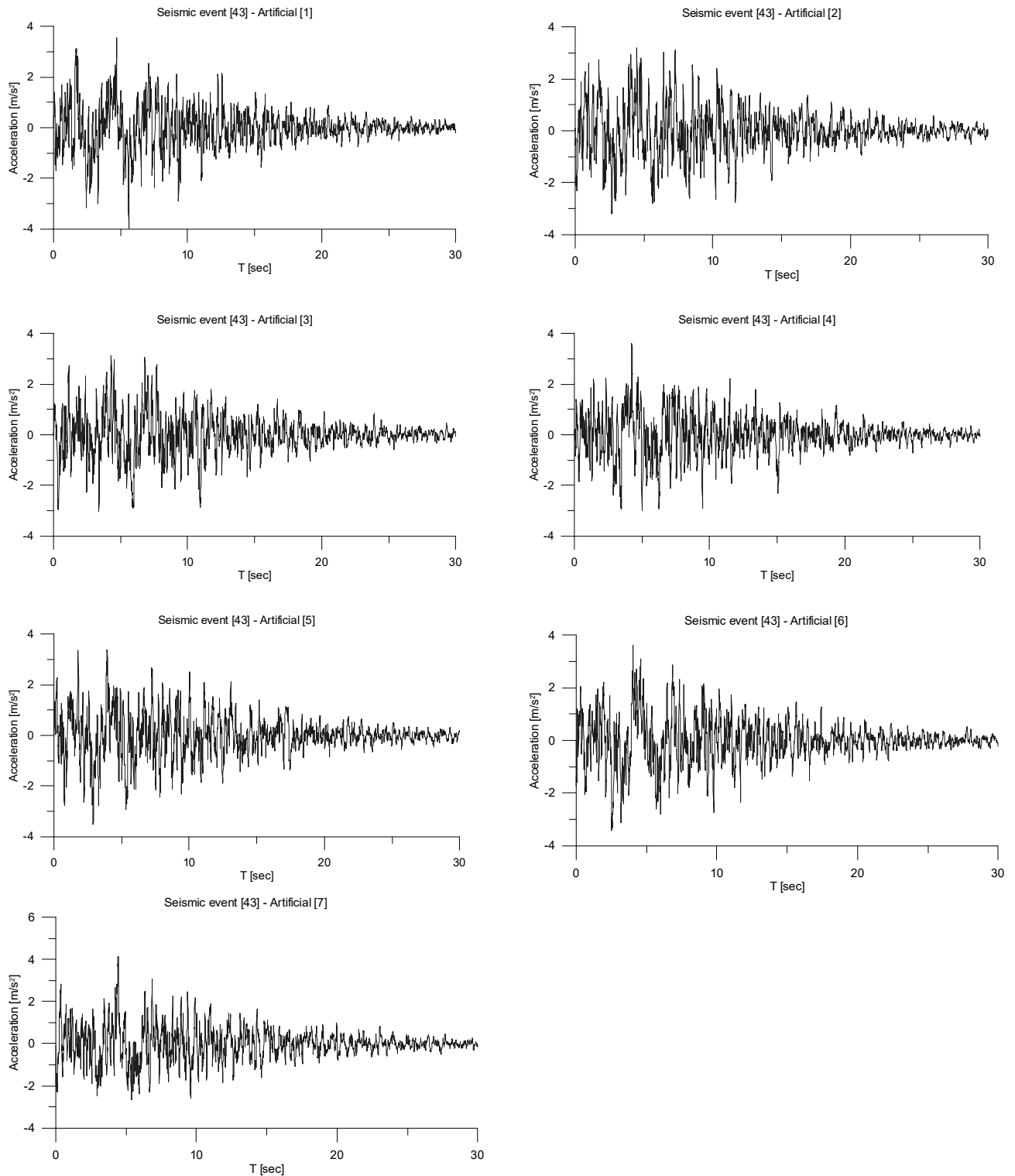




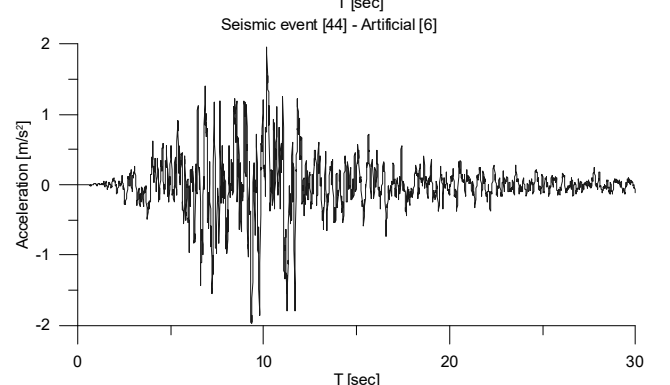
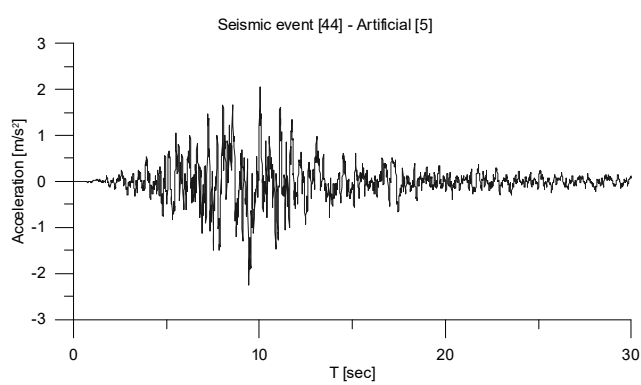
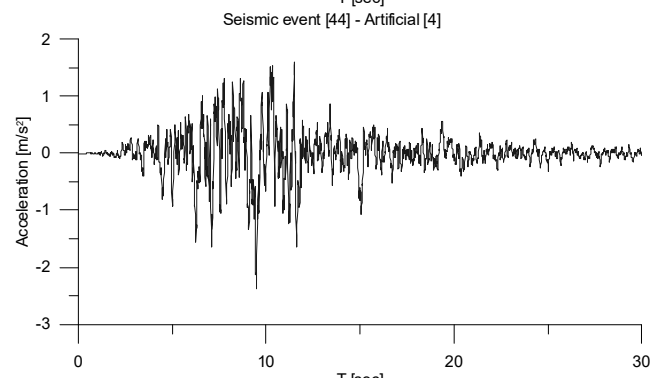
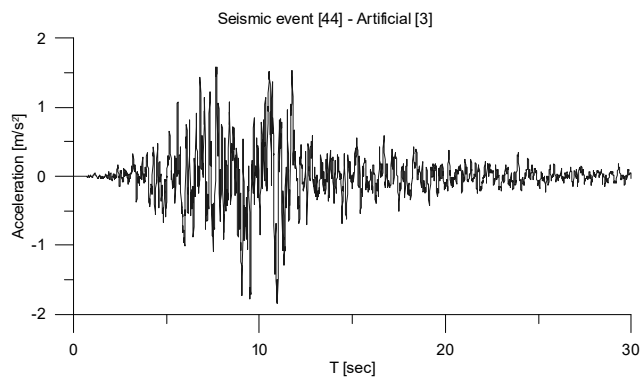
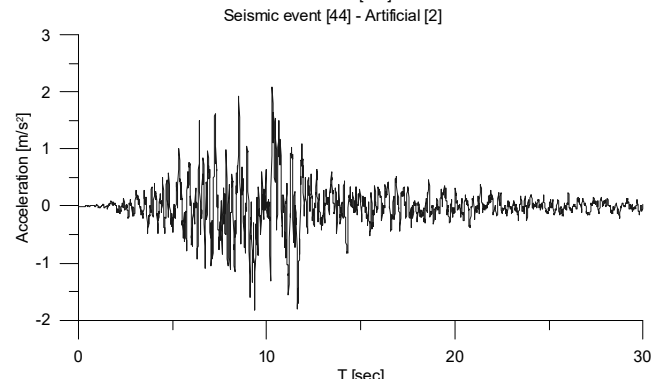
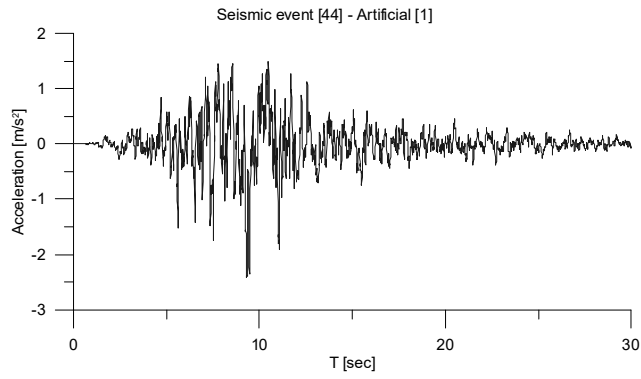
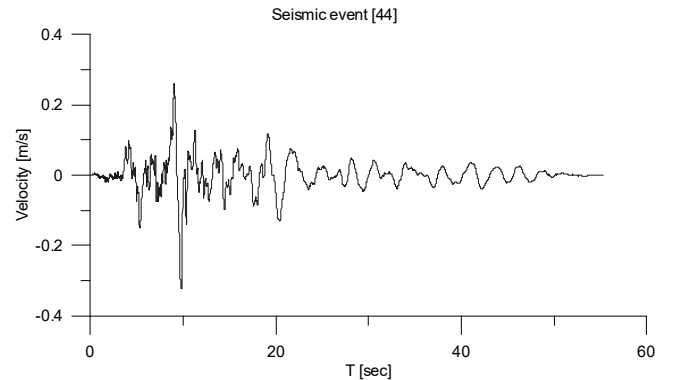
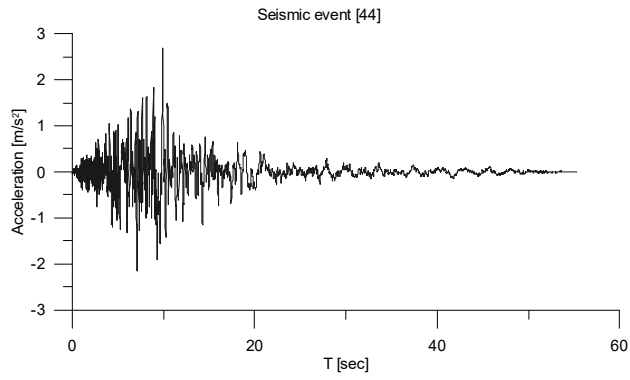
Σχήμα Β11: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 42 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.

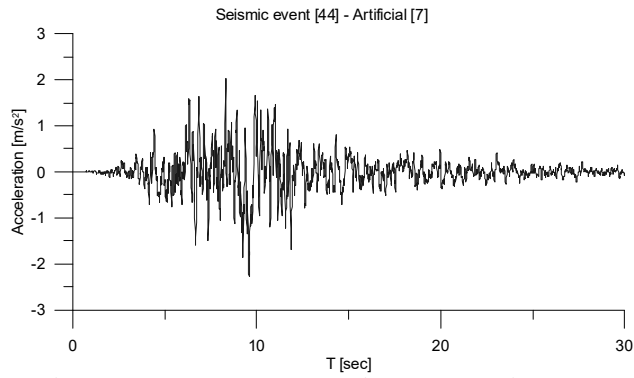




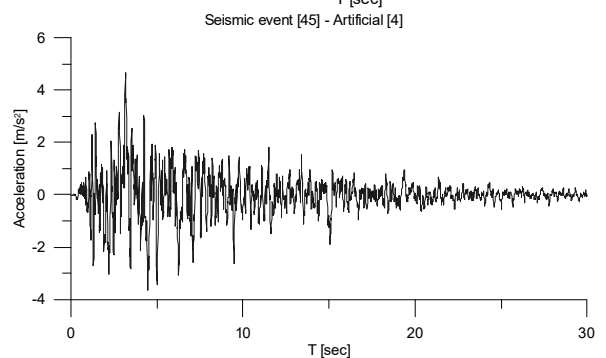
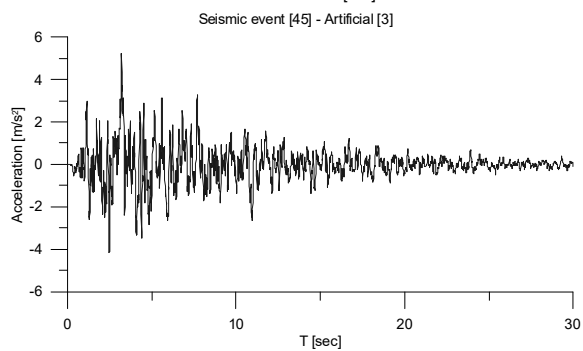
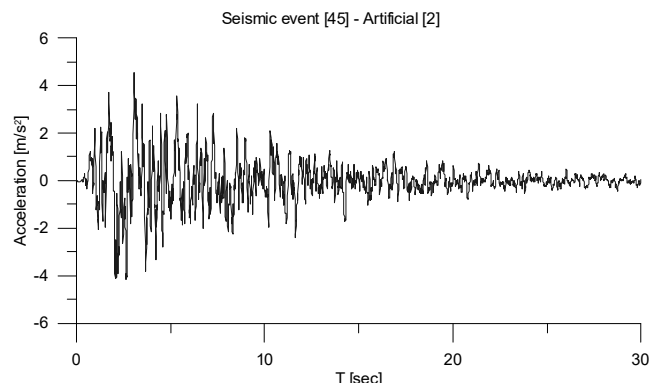
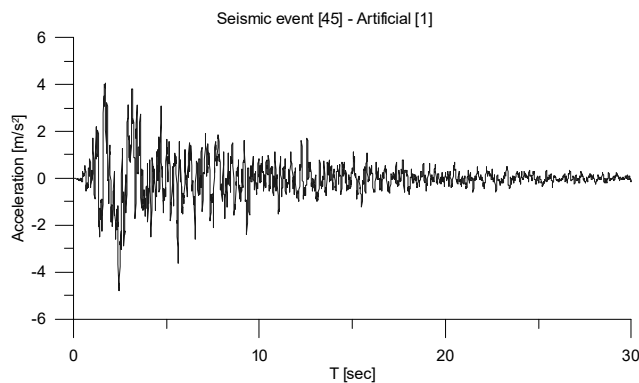
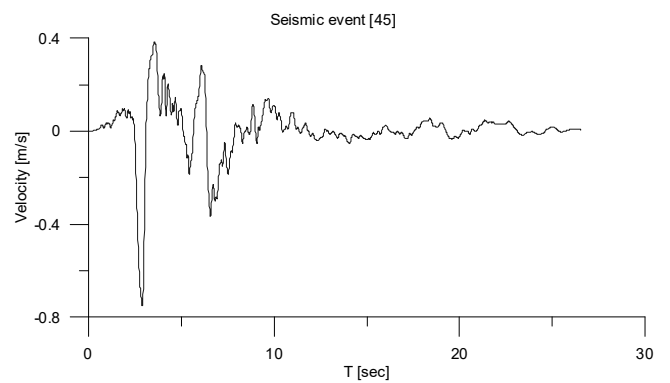
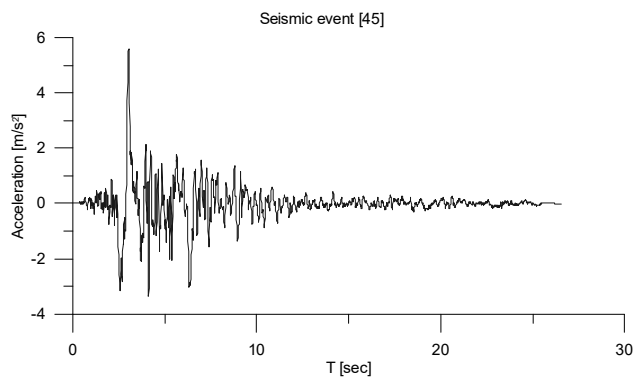


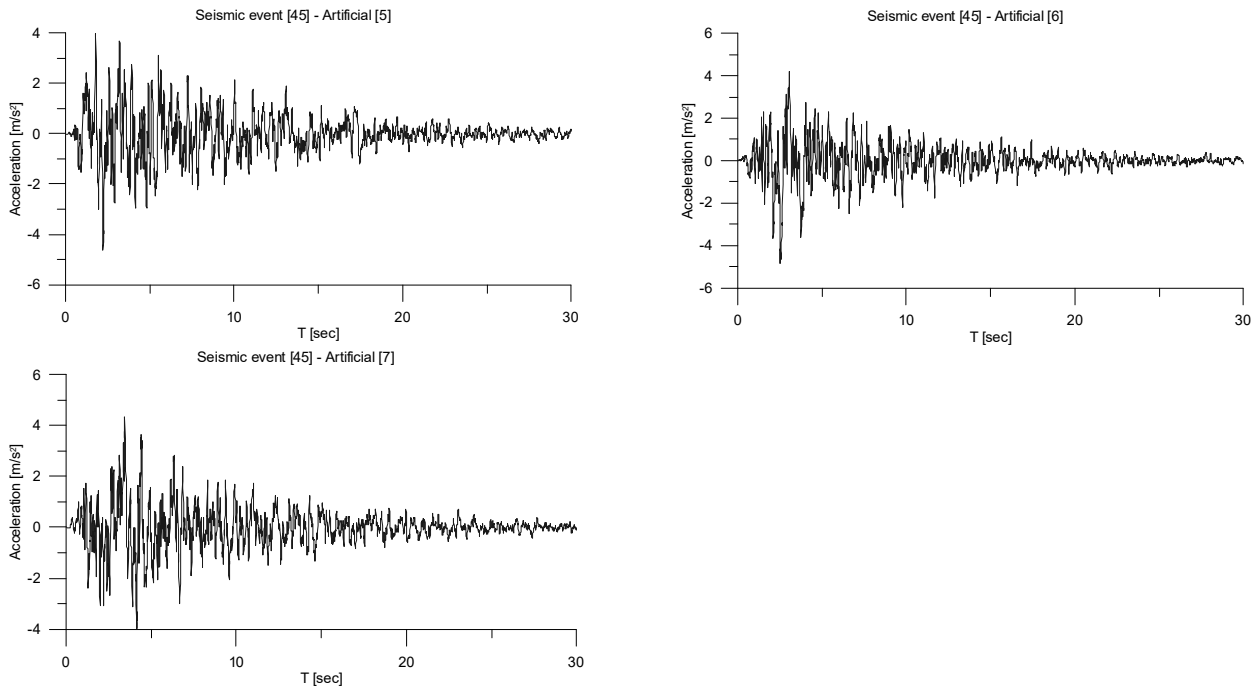
Σχήμα Β12: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 43 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.



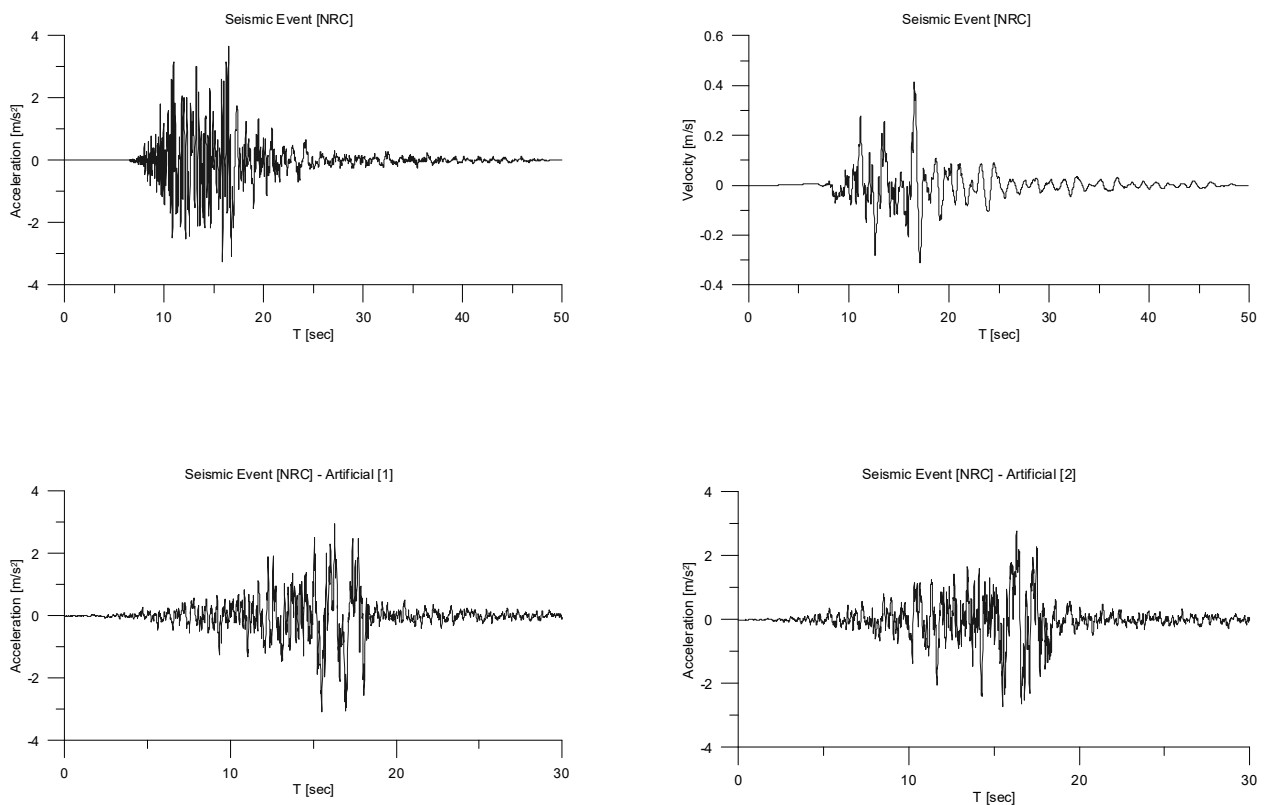


Σχήμα Β13: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 44 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.

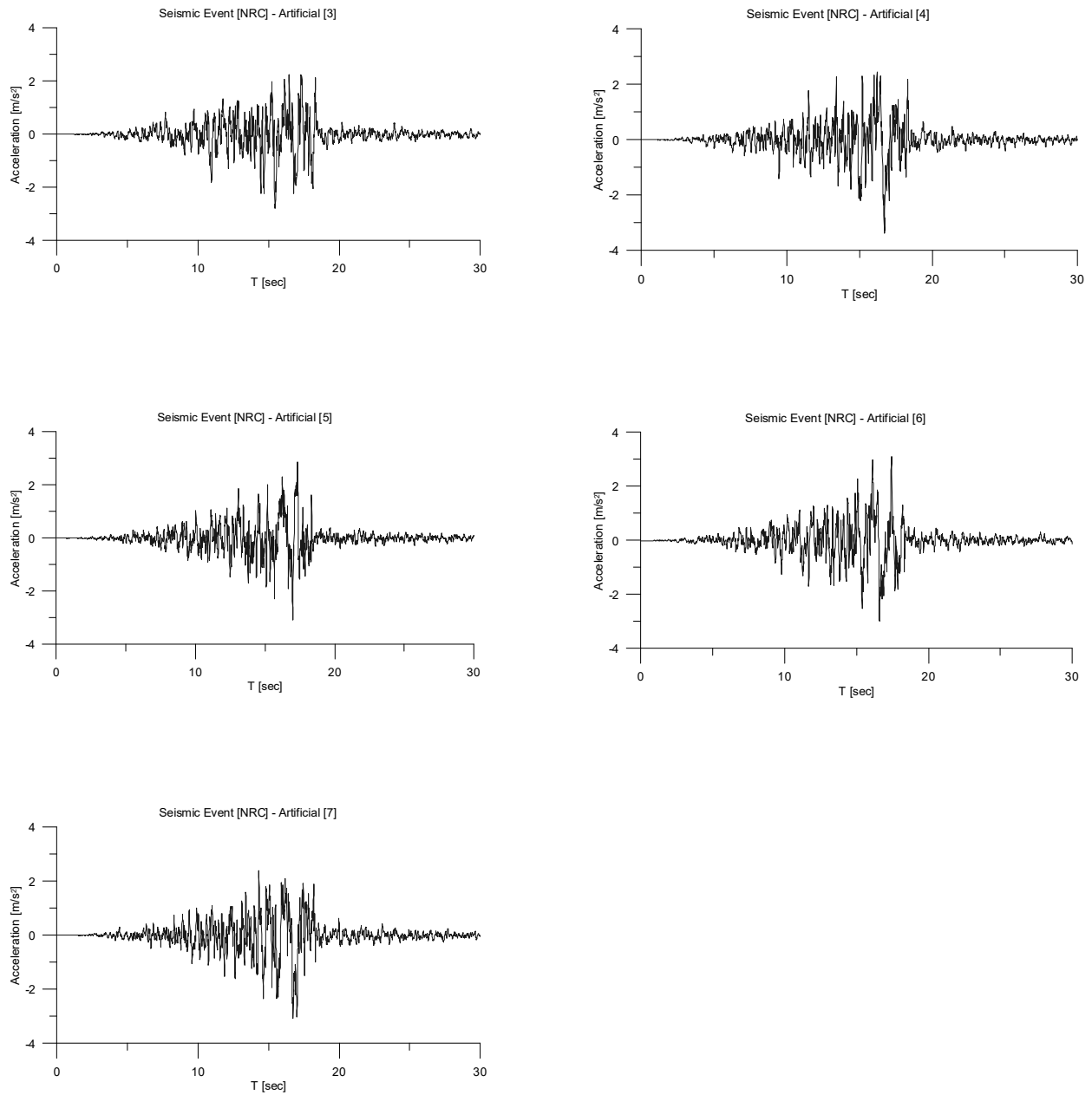




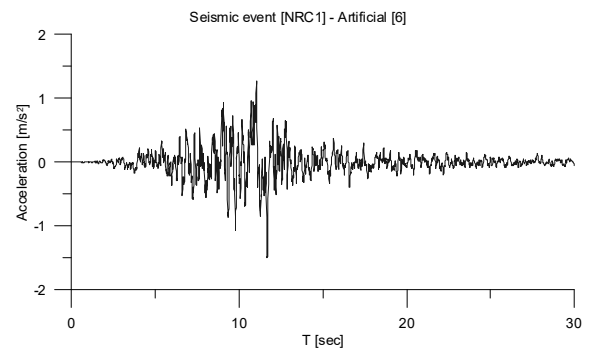
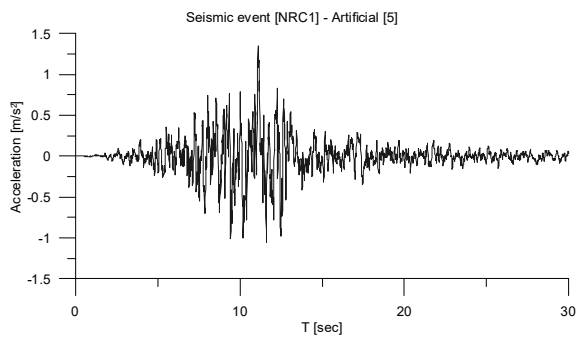
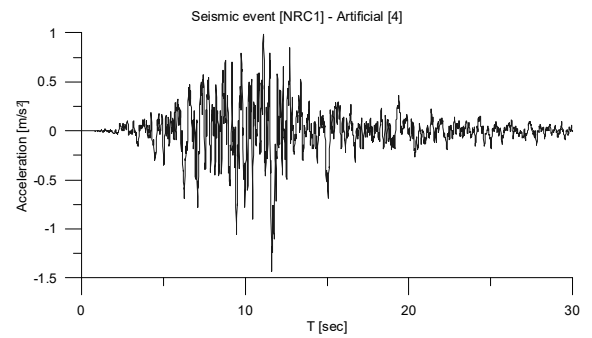
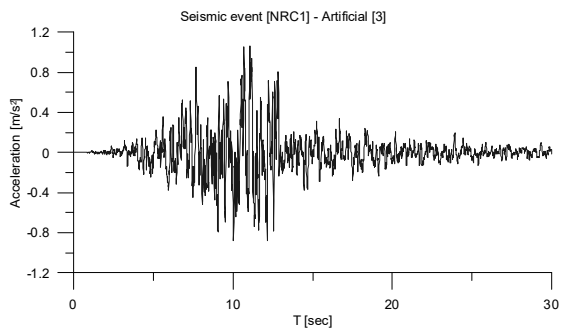
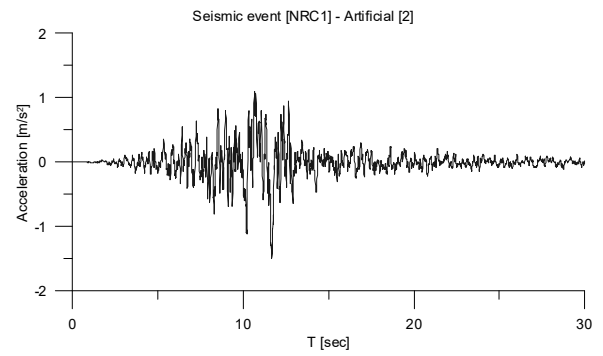
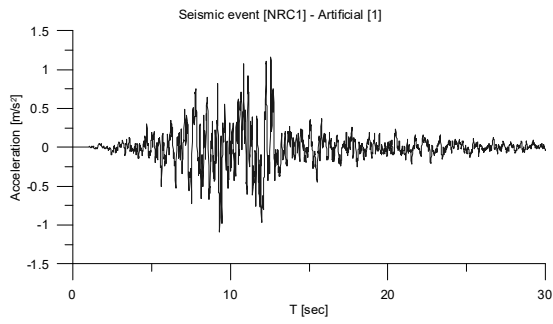
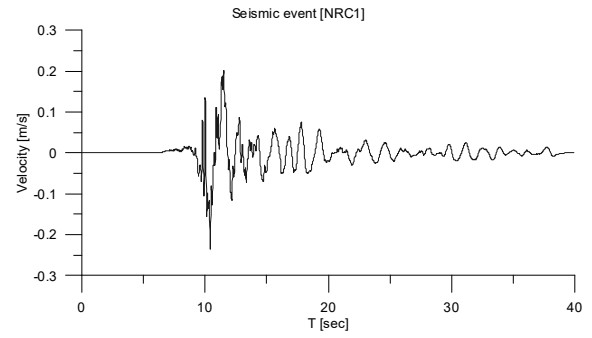
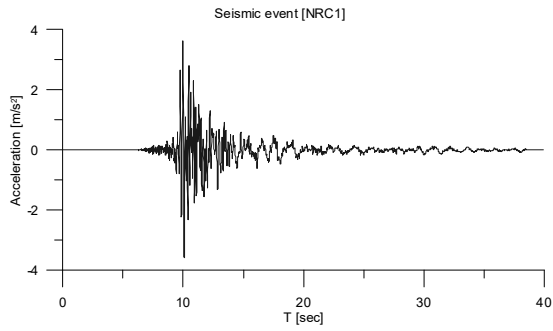
Σχήμα Β14: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού 45 σύμφωνα με τη λίστα του Baker (2007), και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.

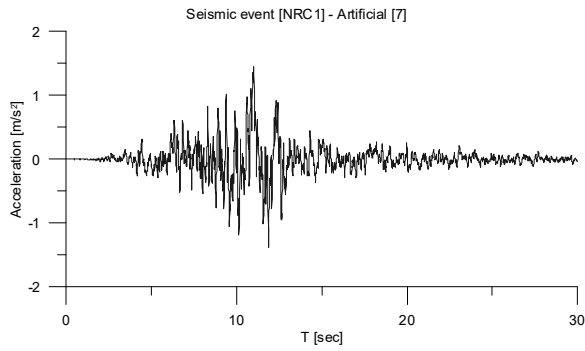


## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

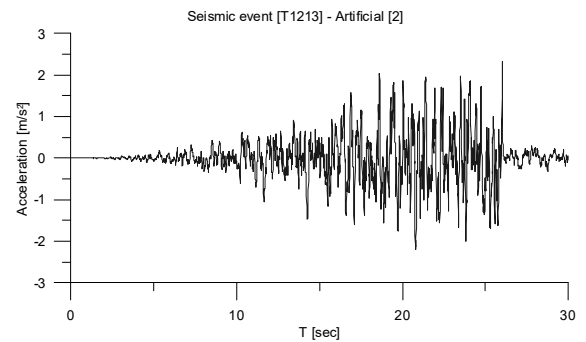
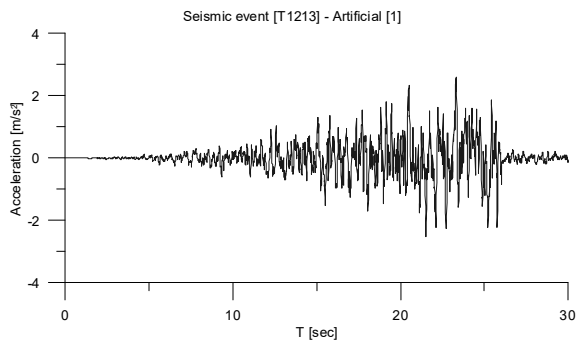
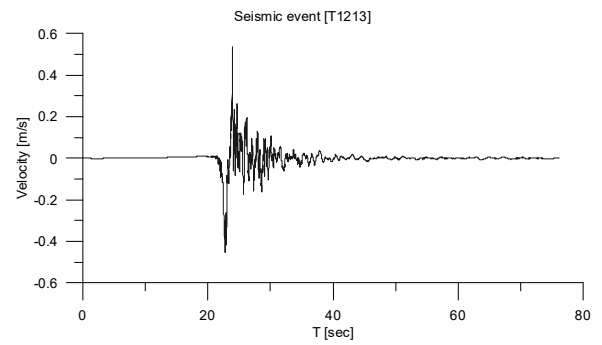
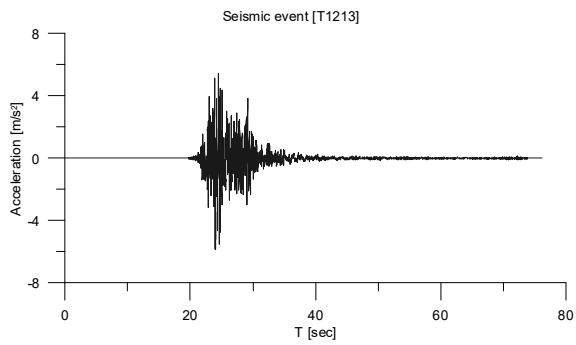


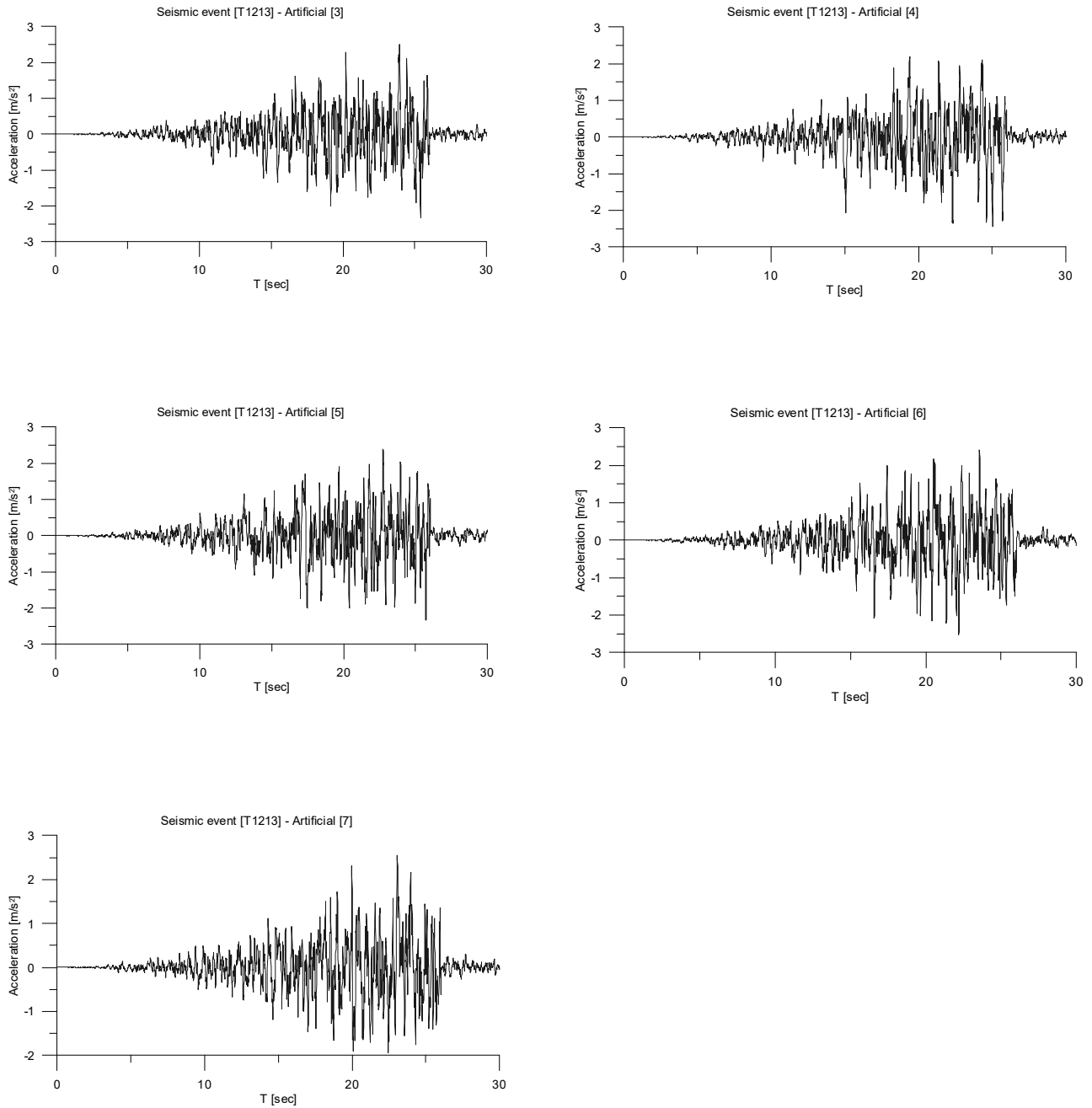
Σχήμα Β15: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού NRC από το σεισμό στη Norcia, Ιταλία το 2016, και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.





Σχήμα Β16: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού NRC1 από το σεισμό στη Norcia, Ιταλία το 2016, και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.





Σχήμα Β17: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων πραγματικής εδαφικής καταγραφής σεισμού T1213 από το σεισμό στη Norcia, Ιταλία το 2016, και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τεχνητών καταγραφών που προκύπτουν από αυτή.