

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ» ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΛΜΙΚΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΠΑΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ελευθερία Γεραμάνη

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

Αθήνα, Φεβρουάριος 2020

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τον κύκλο των μεταπτυχιακών μου σπουδών θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες της μεταπτυχιακής μου εργασίας, Καθηγητή κ. Ιωάννη Ψυχάρη και Δρ. Πολιτικό Μηχανικό κ. Ιωάννη Ταφλαμπά για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επιπλέον, τον κ. Κωνσταντίνο Ρεπαπή για τη βοήθειά του σε θέματα προσομοίωσης του φορέα και την παραχώρηση των δεδομένων που ήταν αναγκαία για την κατασκευή του.

Ακόμη, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και στην οικογένειά μου, για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ελευθερία Γεραμάνη

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει ως στόχο τη διερεύνηση του παλμικού περιεχομένου καταγραφών κοντινού πεδίου και την εξέταση της επιρροής αυτών στην απόκριση των κατασκευών.

Ως καταγραφές κοντινού πεδίου ορίζονται οι εδαφικές κινήσεις, οι οποίες βρίσκονται κοντά στην περιοχή ενός ρήγματος και επηρεάζονται κυρίως από το φαινόμενο της κατευθυντικότητας. Οι καταγραφές αυτές, περιέχουν στη χρονοϊστορία ταχύτητας παλμικές κινήσεις, των οποίων η κατάταξη έχει αποτελέσει θέμα στις έρευνες πολλών επιστημόνων, όπως ο Baker (2007). Σύμφωνα με τη θεωρία του, οι καταγραφές κατατάσσονται σε παλμικές και μη-παλμικές, με τη βοήθεια του δείκτη PI, ο οποίος πρόσφατα αναθεωρήθηκε από τους Kardoutsou et al. (2017).

Μέχρι σήμερα, οι παλμικές καταγραφές έχουν μονοπωλήσει το ενδιαφέρον των ερευνητών, καθώς η επικινδυνότητά τους σε σχέση με τις κατασκευές είναι κρίσιμη. Παρόλα αυτά, μία νέα θεωρία αναπτύσσεται όσων αφορά τις μη-παλμικές και ουδέτερες καταγραφές (PI<0.65 σύμφωνα με τους Kardoutsou et al. (2017)). Οι καταγραφές αυτές, βρέθηκε πως περιέχουν παλμούς, οι οποίοι περιλαμβάνουν αρκετά από τα χαρακτηριστικά της κίνησης και είναι σημαντικοί για την απόκριση των κατασκευών.

Η συγκεκριμένη εργασία ερευνά το περιεχόμενο τέτοιων καταγραφών (μη-παλμικών και ουδέτερων) και συγκρίνει τις τιμές πλαστιμότητας που απαιτούν από μία κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος για σχετικά μεγάλη τιμή της ιδιοπεριόδου. Το προσομοίωμα του κτιρίου δημιουργήθηκε μέσω του προγράμματος SeismoStruct και υποβλήθηκε σε Προσαυξητική Δυναμική Ανάλυση (IDA) 25 καταγραφών κοντινού πεδίου από τη βάση NGA. Ως αποτέλεσμα των αναλύσεων αυτών, δημιουργούνται οι καμπύλες IDA, αποδεικνύοντας πως καταγραφές, οι οποίες δεν είναι χαρακτηρισμένες ως παλμικές, έχουν εξίσου σημαντική επίδραση στην ανελαστική απόκριση των κατασκευών.

Abstract

The present thesis aims to investigate the pulse content of near-fault ground motions and examine their influence on the response of structures.

Near-fault ground motions are defined as the recordings, which are located near the area of a fault and are mainly affected by directivity effects. These recordings contain pulse-like motions in their velocity time history, the classification of which has been the subject of many scientists' research, such as Baker (2007). According to his theory, the recordings are classified into pulse-like and non-pulse-like, with the help of a pulse indicator (PI), recently revised by Kardoutsou et al. (2017).

Pulse-like recordings have monopolized the interest of researchers, as their risk to construction is critical. However, a new theory is being developed for non-pulse and ambiguous recordings (PI <0.65 according to Kardoutsou et al. (2017)). These recordings were found to contain pulses, which include several of the motion characteristics and are important for the response of structures.

This thesis investigates the content of such recordings (non-pulse-like and ambiguous) and compares the plasticity requirements they bring to a reinforced concrete construction for a relatively high price of the period of the structure. The simulation of the building was created through the SeismoStruct program and was subjected to Incremental Dynamic Analysis (IDA) of 25 near-fault ground motions from the NGA database. As a result of these analyzes, the IDA curves are generated, demonstrating that recordings, which are not characterized as pulse-like, have an equally significant effect on the inelastic response of structures as those characterized as pulse-like.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Χα	ρακτ	τηριστικά εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου	. 10
	1.1	Φαι	ινόμενα κοντινού πεδίου	. 10
	1.2	Ρήγ	νματα	. 10
	1.3	Φαι	ινόμενο κατευθυντικότητας	. 12
	1.4	Παρ	ραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου	. 15
2	Μέ	θοδα	οι εκτίμησης του συντελεστή συσχέτισης καταγραφών κοντινού πεδίοι) 19
	2.1	Μέ	θοδος ανάλυσης με κυματίδια κατά Baker	. 19
	2.1	.1	Αίτια των παλμών ταχύτητας	. 20
	2.1	.2	Μέθοδος ανάλυσης με κυματίδια	. 20
	2.1	.3	Κατάταξη σημάτων	. 23
	2.1	.4	Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού	. 30
	2.2	Μέ	θοδος περιστροφής των καταγραφών των Shahi και Baker	. 32
	2.2	.1	Προσδιορισμός παλμικών καταγραφών	. 32
	2.3 καταγ	Πρά γραφ	όταση για νέο Συντελεστή Συσχέτισης για την ταξινόμηση · ών κοντινού πεδίου	των . 36
	2.3	.1	Προσδιορισμός του κυρίαρχου παλμού	. 37
	2.3	.2	Νέα πρόταση για το δείκτη παλμικότητας	. 38
	2.3	.3	Επαλήθευση του προτεινόμενου Συντελεστή Συσχέτισης	. 40
3	Пр	οσομ	ιοίωση φορέα και αναλύσεις	. 43
	3.1	Περ	ριγραφή φορέα	. 43
	3.2	Про	οσομοίωση φορέα	. 47
	3.2	.1	Υλικά	. 48
	3.2	.2	Διατομές μελών	. 51
	3.2	.3	Φορτία	. 60

	3.2.4	Παραδοχές Σχεδιασμού61
3	.3 Ιδυ	ομορφική ανάλυση
3	.4 Пр	οσαυξητική Δυναμική Ανάλυση (Incremental Dynamic Analysis – IDA)
	67	
	3.4.1	Γενικά
	3.4.2	Βασικές έννοιες της μεθόδου IDA για μία καταγραφή67
	3.4.3	Η μέθοδος IDA με χρήση πολλών καταγραφών
	3.4.4	Σύγκριση της IDA με την στατική ανελαστική ανάλυση Pushover 71
	3.4.5	Εφαρμογή της IDA στο μοντέλο
4	Αποτελ	έσματα αναλύσεων
5	Συμπερ	ράσματα105
6	Βιβλιογ	γραφία108

Εγρετηρίο Πινακών

Πίνακας 3.1 Υποστυλώματα 1ου ορόφου
Πίνακας 3.2 Υποστυλώματα 2ου ορόφου
Πίνακας 3.3 Υποστυλώματα 3ου ορόφου
Πίνακας 3.4 Υποστυλώματα 4ου ορόφου
Πίνακας 3.5 Υποστυλώματα 5ου ορόφου
Πίνακας 3.6 Υποστυλώματα 6ου ορόφου
Πίνακας 3.7 Υποστυλώματα 7ου ορόφου
Πίνακας 3.8 Τιμές ενεργούς επιτάχυνσης σεισμικών ζωνών στην Ελλάδα61
Πίνακας 3.9 Τιμές συντελεστή σπουδαιότητας γΙ κατά ΕΚ8
Πίνακας 3.10 Συντελεστής εδάφους και χαρακτηριστικές περίοδοι φάσματος σχεδιασμού σύμφωνα με ΕΚ862
Πίνακας 3.11 Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης από το SeismoStruct
Πίνακας 3.12 Χαρακτηριστικά των πραγματικών καταγραφών που επιλέχθηκαν για την εφαρμογή της προσαυξητικής δυναμικής ανάλυσης από τη βάση PEER-NGA 74
Πίνακας 3.13 Επιταχυνσιογραφήματα και οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης και απαίτηση πλαστιμότητας
Πίνακας 4.1 Στοιχεία εξαχθέντων παλμών από την καταγραφή Η1-25
Πίνακας 4.2 Στοιχεία εξαχθέντων παλμών από την καταγραφή H1-51
Πίνακας 4.3 Στοιχεία εξαχθέντων παλμών από την καταγραφή 949
Πίνακας 4.4 Στοιχεία εξαχθέντων παλμών από την καταγραφή 1546
Πίνακας 4.5 Στοιχεία εξαχθέντων παλμών100
Πίνακας 4.6 Στοιγεία εξαγθέντων παλιιών από την καταγοαφή 1595

Εγρετήριο Σχηματών

Σχήμα 1.1 Τύποι ρηγμάτων και οι αντίστοιχες τάσεις που τα προκαλούν 11
Σχήμα 1.2 Σχηματικό διάγραμμα του φαινομένου της κατευθυντικότητας για ένα κάθετο ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης. Η διάρρηξη ξεκινά από το υπόκεντρο και εξαπλώνεται με ταχύτητα ίση με το 80% της ταχύτητας του διατμητικού κύματος. Το σχήμα παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο της διάρρηξης σε μια δεδομένη χρονική στιγμή (Somerville, Smith, Graves, & Abrahamson, 1997)
Σχήμα 1.3 Φαινόμενο κατευθυντικότητας στις καταγραφές χρονοϊστοριών μετατοπίσεων του σεισμού στο Loma Prieta το 1989, για την κάθετη (πάνω) και την οριζόντια (κάτω) συνιστώσα του ρήγματος
Σχήμα 1.4 Σχηματικό διάγραμμα με τον προσανατολισμό των παραμενουσών μετατοπίσεων (fling step) και ο παλμος κατευθυντικότητας (directivity pulse) για ρήγμα οριζόντιας και κάθετης ολίσθησης (Somerville P. G., 2005)
Σχήμα 1.5 Σχηματικό διάγραμμα των χρονοϊστοριών για οριζόντια ολίσθηση στην οποία το fling step και ο παλμός παρουσιάζονται μαζί και χωριστά (Somerville P. G., 2005)
Σχήμα 1.6 Παράμετροι προσδιορισμού των συνθηκών της κατευθυντικότητας (Somerville, Smith, Graves, & Abrahamson, 1997)
Σχήμα 1.7 Σχέσεις για διαφορετικές συνθήκες κατευθυντικότητας απο τον (Somerville, Smith, Graves, & Abrahamson, 1997)
Σχήμα 1.8 Απλοποιημένοι παλμοί οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί απο ερευνητές. (αριστερά Krawinkler and Alavi (1998), δεξιά Sasani and Bertero (2000)) 18
Σχήμα 2.1 Παραδείγματα καταγραφών κοντινού πεδίου κανονικών ρηγμάτων (Baker, 2007)
Σχήμα 2.2 Συνήθη μητρικά κυματίδια που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση με κυματίδια (Baker, 2007)
Σχήμα 2.3 a) Παράδειγμα χρονοϊστορίας ταχύτητας (η κάθετη συνιστώσα της καταγραφής του 1979 Imperial Valley) b) Συντελεστές διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίου c) Συντελεστές συνεχούς μετασχηματισμού κυματιδίου (Baker, 2007). 22

Σχήμα 2.8 Τρ από τη μέγιστη τιμή του φάσματος ταχύτητας και Τρ από την ψευδο περίοδο του κυματιδίου για τις 91 καταγραφές κοντινού πεδίου (Baker, 2007)...... 31

Σχήμα 2.13 Καταγραφή Erzincan (σεισμός στο Ezrincan, Τουρκία 1992). α) Φάσμα Sd x Sv για 5% απόσβεση b) χρονοϊστορία ταχύτητας και ο κυρίαρχος παλμός...... 38

Σχήμα 2.14 Προτεινόμενος δείκτης ΡΙ και σύγκριση των καταγραφών με την
ταξινόμηση του Baker (2007) (Kardoutsou, Taflampas, & Psycharis, 2017) 41
Σχήμα 2.15 Λόγος της ανελαστικής προς την ελαστική μετατόπιση για μονοβάθμια
συστήματα με περίοδο ίση με το μισό της περιόδου του παλμού σε σχέση με το ΡΙ
(Kardoutsou, Taflampas, & Psycharis, 2017)
Σχήμα 3.1 Κάτοψη 1ου ορόφου
Σχήμα 3.2 Κάτοψη 3ου ορόφου
Σχήμα 3.3 Κάτοψη 5ου ορόφου
Σχήμα 3.4 Κάτοψη 7ου ορόφου
Σχήμα 3.5 Ελαστικό μοντέλο υλικού σκυροδέματος el_mat
Σχήμα 3.6 Ανελαστικό μοντέλο υλικού σκυροδέματος con_ma
Σχήμα 3.7 Ελαστικό μοντέλο υλικού χάλυβα el_mat
Σχήμα 3.8 Ανελαστικό μοντέλο υλικού χάλυβα stl_mp
Σχήμα 3.9 Διατομή τύπου reles γωνιακού υποστυλώματος 1ου ορόφου με τις
λεπτομέρειες οπλισμού
Σχήμα 3.10 Διατομή τύπου rcrs περιμετρικού υποστυλώματος 1ου ορόδου με τις
λεπτομέρειες οπλισμού
Σχήμα 3.11 Διατομή τύπου τers εσωτερικού υποστυλώματος 1ου ορόφου με τις
λεπτομέρειες οπλισμού
Σχήμα 3.12 Διατομή δοκού τύπου rcts 2ου ορόφου με τις λεπτομέρειες οπλισμού 58
Σγήμα 3.13 Εισαγωγή δοκού στο Building Modeler με τις αλλαγές του οπλισμού
κατά μήκος της
Σχήμα 3.14 Εισαγωγή πλάκας στο Building Modeler
Σχήμα 3.15 Φορτιστικός συνδυασμός G+0.3Q61
Σχήμα 3.16 Κάτοψη τυπικού ορόφου του κτιρίου στο Building Modeler63
Σχήμα 3.17 Τελικό προσομοίωμα του κτιρίου στο SeismoStruct
Σχήμα 3.18 1η ιδιομορφή κατασκευής (κατά την Υ διεύθυνση)
Σχήμα 3.19 2η ιδιομορφή κατασκευής(κατά τη Χ διεύθυνση)

Σχήμα 3.20 3η ιδιομορφή κατασκευής (στροφική)
Σχήμα 3.21 Καμπύλη IDA μιας καταγραφής σε σύγκριση με την αντίστοιχη καμπύλη Pushover (Vamvatsikos & Cornell, 2002)
Σχήμα 3.22 Μέγιστα drifts ορόφων σε σχέση με το ύψος του κτιρίου που προκύπτουν από την ανάλυση IDA για μία καταγραφή (Vamvatsikos & Cornell, 2002)
Σχήμα 3.23 Παράδειγμα μελέτης IDA τριάντα καταγραφών ενός 5-όροφου κτιρίου με T ₁ =1.8s (Vamvatsikos & Cornell, 2002)
Σχήμα 3.24 Μέση καμπύλη IDA σε σύγκριση με τη στατική ανελαστική καμπύλη pushover για ένα 20-ώροφο κτίριο με T1=4s (Vamvatsikos & Cornell, 2002) 72
Σχήμα 3.25 Καμπύλη IDA σε σύγκριση με την καμπύλη pushover για ένα 5-ώροφο κτίριο με T1=1,8s (Vamvatsikos & Cornell, 2002)
Σχήμα 3.26 Διάγραμμα απαίτησης πλαστιμότητας - περιόδου για την καταγραφή Η1- 25, όπου με κόκκινη διαγράμμιση φαίνεται η απαίτηση πλασιμότητας που αντιστοιχεί στο εξεταζόμενο κτίριο (μ=2,9)
Σχήμα 3.27 Διάγραμμα απαίτησης πλαστιμότητας - περιόδου για την καταγραφή Η2- 68, όπου με κόκκινη διαγράμμιση φαίνεται η απαίτηση πλαστιμότητας που αντιστοιχεί στο εξεταζόμενο κτίριο (μ=11,9)
Σχήμα 4.1 Καμπύλη IDA καταγραφής 6
Σχήμα 4.2 Καμπύλη IDA καταγραφής 319
Σχήμα 4.3 Καμπύλη IDA καταγραφής 558
Σχήμα 4.4 Καμπύλη IDA καταγραφής 721
Σχήμα 4.5 Καμπύλη IDA καταγραφής 949
Σχήμα 4.6 Καμπύλη IDA καταγραφής 1003
Σχήμα 4.7 Καμπύλη IDA καταγραφής 1012
Σχήμα 4.8 Καμπύλη IDA καταγραφής 1194
Σχήμα 4.9 Καμπύλη IDA καταγραφής 1508
Σχήμα 4.10 Καμπύλη IDA καταγραφής 1540
Σχήμα 4.11 Καμπύλη IDA καταγραφής 1546

Σχήμα 4.12 Καμπύλη IDA καταγραφής 1595
Σχήμα 4.13 Καμπύλη IDA καταγραφής H1-51
Σχήμα 4.14 Καμπύλη IDA καταγραφής H1-25
Σχήμα 4.15 Καμπύλη IDA καταγραφής H2-68
Σχήμα 4.16 Καμπύλη IDA καταγραφής Η1-7
Σχήμα 4.17 Καμπύλη IDA καταγραφής H2-47
Σχήμα 4.18 Καμπύλη IDA καταγραφής H1-12
Σχήμα 4.19 Καμπύλη IDA καταγραφής H2-4
Σχήμα 4.20 Καμπύλη IDA καταγραφής H2-88
Σχήμα 4.21 Καμπύλη IDA καταγραφής Η1-76
Σχήμα 4.22 Καμπύλη IDA καταγραφής Η1-49
Σχήμα 4.23 Καμπύλη IDA καταγραφής H2-5
Σχήμα 4.24 Καμπύλη IDA καταγραφής H2-5190
Σχήμα 4.25 Καμπύλη IDA καταγραφής 864
Σχήμα 4.26 Συγκεντρωτικό διάγραμμα των καμπυλών IDA που προέκυψαν από τις αναλύσεις των καταγραφών
Σχήμα 4.27 Διάγραμμα των καμπυλών IDA και της Pushover
Σχήμα 4.28 Διάγραμμα ύψους ορόφου - διαφορικής μετακίνησης ορόφου για τις 4 καταγραφές και Sa = 0.2 g93
Σχήμα 4.29 Διάγραμμα ύψους ορόφου - διαφορικής μετακίνησης ορόφου για τις 4 καταγραφές και Sa=0.4g
Σχήμα 4.30 Διάγραμμα ύψους ορόφου - διαφορικής μετακίνησης ορόφου για τις 3 καταγραφές και Sa=0.3g
Σχήμα 4.31 Διάγραμμα πλαστιμότητας - περιόδου για την καταγραφή H1-25 95
Σχήμα 4.32 Διάγραμμα πλαστιμότητας - περιόδου της καταγραφής Η1-51
Σχήμα 4.33 Διάγραμμα φασματικών επιταχύνσεων καταγραγής Η1-51

Σχήμα 4.35 Διάγραμμα πλαστιμότητας - περιόδου της καταγραφής 154699
Σχήμα 4.36 Διάγραμμα πλαστιμότητας - περιόδου100
Σχήμα 4.37 Χρονοϊστορία ταχύτητας όπου φαίνετα το άθροισμα των 2 πρώτων παλμών
Σχήμα 4.38 Χρονοϊστορία ταχύτητας όπου φαίνεται ο 2ος παλμός102
Σχήμα 4.39 Φάσμα επιταχύνσεων της καταγραφής όπου φαίνεται η επαύξηση για T=3s
Σχήμα 4.40 Διάγραμμα πλαστιμότητας - περιόδου της καταγραφής 1595103

1 Χαρακτηριστικά εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου

1.1 Φαινόμενα κοντινού πεδίου

Οι εδαφικές κινήσεις που βρίσκονται κοντά σε ένα ρήγμα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές συγκριτικά με αυτές που βρίσκονται μακριά από την πηγή του σεισμού. Η ζώνη, στην οποία η εδαφική κίνηση συνήθως χαρακτηρίζεται «κοντινού πεδίου», θεωρείται πως είναι 20-60 χλμ. από το ρήγμα. Μέσα σε αυτή τη ζώνη, οι εδαφικές κινήσεις επηρεάζονται σημαντικά από το μηχανισμό της διάρρηξης, την κατεύθυνση της διάδοσης του ρήγματος σχετικά με το εξεταζόμενο σημείο και από τις πιθανές μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις από την ολίσθηση του ρήγματος. Οι παράγοντες αυτοί καταλήγουν στα φαινόμενα της κατευθυντικότητας (rupture-directivity) και των παραμενουσών μετακινήσεων (fling step).

1.2 Ρήγματα

Η δημιουργία των ρηγμάτων οφείλεται στις ενεργές τάσεις που επιδρούν σε μια περιοχή. Η ύπαρξη των τάσεων αυτών οφείλεται σε γεωτεκτονικά αίτια, δηλαδή σε σημαντικές μετακινήσεις και παραμορφώσεις του φλοιού της Γης. Η διάρρηξη των ρηγμάτων συμβαίνει όταν το έδαφος ξεπεράσει το όριο θραύσης του. Πιο αναλυτικά, καθώς οι τάσεις που ασκούνται σε αυτό αυξάνονται, προκαλούνται παραμορφώσεις και αποθηκεύεται μηχανική ενέργεια. Μόλις οι παραμορφώσεις σταματήσουν πια να είναι ελαστικές και οι τάσεις υπερβούν το όριο θραύσης ή η ανηγμένη παραμόρφωση υπερβεί μια ορισμένη τιμή, τότε προκαλείται διάρρηξη στο έδαφος, δημιουργώντας μια επιφάνεια ή μια ζώνη επιφανειών ασυνέχειας, η οποία ονομάζεται ρήγμα.

Τα ρήγματα μπορούν να διακριθούν σύμφωνα με τον τρόπο διάρρηξης τους και της διεύθυνσης και φοράς της κίνησης των τεμαχών σε κατηγορίες. Οι πιο συνήθεις από αυτές είναι οι εξής:

- 1. Κανονικά ρήγματα
- 2. Ανάστροφα ρήγματα
- 3. Ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης (αριστερόστροφο ή δεξιόστροφο)

Τα κανονικά ρήγματα χαρακτηρίζονται από την κίνηση του πάνω τεμάχους προς τα κάτω, καθώς τα δύο τεμάχη απομακρύνονται. Η διάρρηξη αυτή προκαλείται από εφελκυστικές τάσεις.

Σε αντίθεση με τα κανονικά ρήγματα, τα ανάστροφα ρήγματα χαρακτηρίζονται από ανωδική κίνηση του πάνω τεμάχους, αντίδραση η οποία οφείλεται σε θλιπτικές τάσεις με αποτέλεσμα τα τεμάχη να πλησιάζουν μεταξύ τους.

Τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης χαρακτηρίζονται από την οριζόντια κίνηση μεταξύ των δύο τεμαχών. Ανάλογα με τη φορά κατά την οποία μετακινείται το τέμαχος, διακρίνονται σε δεξιόστροφα και αριστερόστροφα. Τα συγκεκριμένα ρήγματα είναι αποτέλεσμα διατμητικών δυνάμεων.



Σχήμα 1.1 Τύποι ρηγμάτων και οι αντίστοιχες τάσεις που τα προκαλούν.

1.3 Φαινόμενο κατευθυντικότητας

Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας σε μια καταγραφή κίνησης κοντινού πεδίου έχει να κάνει με την περιοχή του εξεταζόμενου σημείου σε σχέση με το ρήγμα. Έτσι η κατευθυντικότητα μπορεί να χαρακτηρισθεί ως έμπροσθεν, όπισθεν ή ουδέτερη.

Η έμπροσθεν κατευθυντικότητα συμβαίνει όταν η διάρρηξη διαδίδεται προς το εξεταζόμενο σημείο, ενώ και η διεύθυνση του ρήγματος είναι και αυτή παράλληλη με το σημείο αυτό. Καθώς το μέτωπο του ρήγματος διαδίδεται μακριά από το υπόκεντρο και προς τη θέση, συσσωρεύεται ενέργεια κοντά στο μέτωπο της διάρρηξης, η οποία προέρχεται από τις διαδοχικές ζώνες ολίσθησης κατά μήκος του ρήγματος. Ο παλμός της κίνησης που παράγεται μετά τη διάρρηξη χαρακτηρίζεται από μεγάλο εύρος σε μεσαίες με μεγάλες περιόδους και μικρή διάρκεια.

Αντίθετα, αν το εξεταζόμενο σημείο βρίσκεται κοντά στο επίκεντρο της διάρρηξης, αλλά αυτή διαδίδεται μακριά από τη θέση, τότε η άφιξη των σεισμικών κυμάτων κατανέμεται στο χρόνο. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως όπισθεν κατευθυντικότητα και η κίνηση του χαρακτηρίζεται από μικρό εύρος και μεγάλη διάρκεια. Επίσης, τα σημεία που βρίσκονται εκατέρωθεν του ρήγματος θεωρείται ότι βρίσκονται σε ζώνη ουδέτερης κατευθυντικότητας και δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα.





Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα του φαινομένου της κατευθυντικότητας στις εδαφικές μετακινήσεις φαίνεται στο σεισμό του 1989 στο Loma Prieta. Το επίκεντρο του σεισμού είναι κοντά στο Corralitos and Branciforte Drive, όπου οι οριζόντιες μετακινήσεις καταγράφηκαν τόσο στην οριζόντια, όσο και στην κάθετη συνιστώσα του ρήγματος. Το φαινόμενο αυτό αποδόθηκε στην όπισθεν κατευθυντικότητα. Στο πέρας του ρήγματος, ωστόσο, στην περιοχή Lexington Dam and Holister, το φαινόμενο της έμπροσθεν κατευθυντικότητας προκάλεσε έντονες και αρκετά μεγαλύτερες οριζόντιες εδαφικές κινήσεις στην κάθετη διεύθυνση του ρήγματος από αυτές που καταγράφηκαν κοντά στο επίκεντρο του σεισμού. Οι μεγάλες ορμητικές κινήσεις συμβαίνουν μόνο στην κάθετη διεύθυνση του ρήγματος και μόνο μακριά από το επίκεντρο.

Οι επιδράσεις του φαινομένου της κατευθυντικότητας παρουσιάζονται τόσο σε περιπτώσεις οριζόντιας ολίσθησης, όσο και σε περιπτώσεις κάθετης ολίσθησης. Στις τελευταίες, η έμπροσθεν κατευθυντικότητα παρατηρείται σε σημεία που βρίσκονται κοντά στην προβολή του υπερκείμενου τεμάχους του ρήγματος. Όπως και με τους μηχανισμούς της οριζόντιας ολίσθησης, η ενέργεια που εξάγεται λόγω διάτμησης σε ένα ανάστροφο ρήγμα, προκαλεί τον κάθετο προσανατολισμό του παλμού σε σχέση με τη διάρρηξη του ρήγματος.



Σχήμα 1.3 Φαινόμενο κατευθυντικότητας στις καταγραφές χρονοϊστοριών μετατοπίσεων του σεισμού στο Loma Prieta το 1989, για την κάθετη (πάνω) και την οριζόντια (κάτω) συνιστώσα του ρήγματος.

Οι σύγχρονες ψηφιακές καταγραφές των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, όπως για παράδειγμα αυτές από τους σεισμούς του 1999 στην Τουρκία και την Ταϊβάν, περιέχουν μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις λόγω της παραμόρφωσης του πεδίου από τον σεισμό. Αυτές οι μετατοπίσεις, που ονομάζονται «fling step», συμβαίνουν μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα όταν δημιουργείται η διάρρηξη. Οι μετακινήσεις fling step παρουσιάζονται στη διεύθυνση της ολίσθησης του ρήγματος και δεν σχετίζονται με τις δυναμικές μετακινήσεις που ονομάζονται «παλμοί κατευθυντικότητας». Σε ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, ο παλμός κατευθυντικότητας παρουσιάζεται στην κάθετη συνιστώσα της διάρρηξης του ρήγματος, ενώ οι παραμένουσες μετακινήσεις (fling step) παρουσιάζονται στην οριζόντια συνιστώσα. Σε ρήγματα κάθετης ολίσθησης, τόσο οι παραμένουσες μετακινήσεις όσο και ο παλμός κατευθυντικότητας παρουντικότητας

Οι κατευθύνσεις των παραμενουσών μετακινήσεων και των παλμών κατευθυντικότητας για ρήγματα οριζόντιας και κάθετης ολίσθησης παρουσιάζονται σχηματικά (Σχήμα 1.4), καθώς και οι χρονοϊστορίες όπου εμφανίζονται μαζί και χωριστά (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.4 Σχηματικό διάγραμμα με τον προσανατολισμό των παραμενουσών μετατοπίσεων (fling step) και ο παλμος κατευθυντικότητας (directivity pulse) για ρήγμα οριζόντιας και κάθετης ολίσθησης (Somerville P. G., 2005)

14



Σχήμα 1.5 Σχηματικό διάγραμμα των χρονοϊστοριών για οριζόντια ολίσθηση στην οποία το fling step και ο παλμός παρουσιάζονται μαζί και χωριστά (Somerville P. G., 2005).

Οι διαθέσιμες καταγραφές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να ποσοτικοποιηθούν αυτά τα φαινόμενα, είναι περιορισμένες, ωστόσο οι σεισμοί στην Τουρκία και την Ταϊβάν έχουν ενισχύσει σημαντικά τα αρχεία με τις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου.

1.4 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου

Οι (Somerville, Smith, Graves, & Abrahamson, 1997) παραμετροποίησαν τις συνθήκες που οδηγούν σε έμπροσθεν και όπισθεν κατευθυντικότητα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.6, η χωρική μεταβολή των φαινομένων κατευθυντικότητας εξαρτάται από τη γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της διάδοσης της διάρρηξης και της κατεύθυνσης των κυμάτων από το ρήγμα μέχρι το εξεταζόμενο σημείο (θ για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και φ για ρήγματα κάθετης ολίσθησης) και από το λόγο της διάρρηξης της επιφάνειας του ρήγματος που βρίσκεται μεταξύ του

υπόκεντρου και του σημείου (Χ για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και Υ για ρήγματα κάθετης ολίσθησης). Σημαντικότερη επίδραση έχει η έμπροσθεν κατευθυντικότητα όταν προκαλείται από μικρότερες γωνίες μεταξύ του εξεταζόμενου σημείου και του ρήγματος και από μεγαλύτερο λόγο του ρήγματος μεταξύ της περιοχής και του υπόκεντρου. Θα πρέπει να σημειωθεί πως ακόμα και όταν οι γεωμετρικές συνθήκες για την έμπροσθεν κατευθυντικότητα ικανοποιούνται, τα αποτελέσματά της μπορεί να μην παρατηρηθούν. Αυτό μπορεί να συμβεί εάν ο σταθμός είναι στο πέρας του ρήγματος και η διάρρηξη λαμβάνει χώρα προς το σταθμό, αλλά η ολίσθηση είναι συγκεντρωμένη κοντά στο τέλος του ρήγματος όπου έχει τοποθετηθεί ο σταθμός.

Για να υπολογιστούν τα αποτελέσματα της κατευθυντικότητας, οι (Somerville, Smith, Graves, & Abrahamson, 1997) συσχέτισαν τις φασματικές τιμές (με απόσβεση 5%) με τις γεωμετρικές παραμέτρους που προσδιορίζονται στο Σχήμα 1.6, καταλήγοντας στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.7. Οι παράμετροι της εδαφικής κίνησης που τροποποιήθηκαν είναι το μέσο φάσμα απόκρισης και οι λόγοι των φασμάτων του κάθετου προς το οριζόντιο ρήγμα.



Σχήμα 1.6 Παράμετροι προσδιορισμού των συνθηκών της κατευθυντικότητας (Somerville, Smith, Graves, & Abrahamson, 1997)



 α) Μέση αναλογία φάσματος απόκρισης, εξαρτώμενη από την περίοδο και τις παραμέτρους κατευθυντικότητας.



β) Κάθετη ολίσθηση σε σχέση με τη μέση οριζόντια φασματική απόκριση για συνθήκες μέγιστης έμπροσθεν κατευθυντικότητας. (Xcosθ=1).

Σχήμα 1.7 Σχέσεις για διαφορετικές συνθήκες κατευθυντικότητας απο τον (Somerville, Smith, Graves, & Abrahamson, 1997)

Μετά από έρευνα πάνω στην απόκριση των κατασκευών σε καταγραφές κοντινού πεδίου, παρατηρήθηκε πως η χρήση της χρονοϊστορίας της καταγραφής είναι προτιμότερη από το φάσμα απόκρισης (Somerville P. G., 1998), (Alavi & Krawinkler, 2000), (Sasani & Bertero, 2000), (Rodriguez-Marek, 2000). Αυτό συμβαίνει επειδή ο χαρακτηρισμός του πεδίου συχνότητας της εδαφικής κίνησης αποτελεί μια στοχαστική διαδικασία έχοντας μία σχετικά ομοιόμορφη κατανομή της ενέργειας κατά τη διάρκεια της κίνησης. Όταν η ενέργεια συγκεντρώνεται σε μερικούς παλμούς κίνησης, το φαινόμενο του συντονισμού για το οποίο σχεδιάστηκε

να αντιπροσωπεύσει το φάσμα απόκρισης, δεν έχει τον επιθυμητό χρόνο να δημιουργηθεί.

Μελέτες από τους Krawinker and Alavi (1998) και Sasani and Bertero (2000), έχουν αποδείξει πως απλοποιημένες παρουσιάσεις του παλμού ταχύτητας μπορεί να αποτυπώσει τα χαρακτηριστικά απόκρισης της κατασκευής σε καταγραφές κοντινού πεδίου. Κάποιοι απλοποιημένοι παλμοί παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.8. Ένας απλός χαρακτηρισμός μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PHV), την περίοδο του κυρίαρχου παλμού (T_p) και τον αριθμό των σημαντικών ημίκυκλων της κίνησης στην κάθετη διεύθυνση του ρήγματος (N).



Σχήμα 1.8 Απλοποιημένοι παλμοί οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί απο ερευνητές. (αριστερά Krawinkler and Alavi (1998), δεζιά Sasani and Bertero (2000))

2 Μέθοδοι εκτίμησης του συντελεστή συσχέτισης καταγραφών κοντινού πεδίου

2.1 Μέθοδος ανάλυσης με κυματίδια κατά Baker

Οι καταγραφές κοντινού πεδίου που περιέχουν δυνατούς παλμούς ταχύτητας αποτελούν μεγάλο ενδιαφέρον για τους τομείς της σεισμολογίας και της σεισμικής μηχανικής. Μία ποσοτική προσέγγιση για την εξακρίβωση αυτών των καταγραφών προτείνεται από τον (Baker, 2007). Οι καταγραφές αναφέρονται ως «παλμικές» και έχει αναγνωριστεί πως έχουν μεγάλη επίδραση στις κατασκευές. Οι καταγραφές που έχουν βρεθεί σε προηγούμενες μελέτες, έχουν επιλεγεί χάρη στην ύπαρξη ενός μεγάλου παλμού στις χρονϊστορίες ταχύτητας και επειδή η γεωμετρία γύρω από την θέση της καταγραφής συνιστά πως πρόκειται για παλμό κατευθυντικότητας. Η επιλογή αυτών των παλμικών καταγραφών απαιτεί ένα επίπεδο κρίσης, και για πολλές καταγραφές, όπως αυτές που φαίνονται στο **Σχήμα 2.1** (b, c) η κατάταξη μπορεί να μην είναι εμφανής. Η ταυτοποίηση μη-παλμικών καταγραφών σε τοποθεσίες κοντά στο ρήγμα είναι επίσης πρόκληση, παρόλο που δεν της έχει δοθεί αρκετή σημασία.



Σχήμα 2.1 Παραδείγματα καταγραφών κοντινού πεδίου κανονικών ρηγμάτων (Baker, 2007).

Ο Baker παρουσιάζει μία μέθοδο για τον εντοπισμό των παλμών στις εδαφικές κινήσεις με μια διαδικασία η οποία χρησιμοποιεί σήματα βασισμένα σε κυματίδια για να εξακριβώσει και να εξάγει τον μεγαλύτερο παλμό της ταχύτητας από την καταγραφή. Εάν ο παλμός είναι μεγάλος σχετικά με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της κίνησης, τότε η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως παλμική. Επίσης, προσδιορίζεται και η περίοδος του παλμού, παράμετρος που έχει μεγάλο ενδιαφέρον για τους μηχανικούς. Παρόλο που μερικοί παλμοί μπορεί να μην προκαλούνται από φαινόμενα κατευθυντικότητας, η μέθοδος είναι ικανή να εντοπίσει καταγραφές οι οποίες μπορεί να οδηγούν σε τέτοια φαινόμενα, επομένως μπορεί μετά να δοθεί μεγαλύτερη προσοχή σε αυτές.

2.1.1 Αίτια των παλμών ταχύτητας

Μία παλμική κίνηση θεωρείται πως είναι μια καταγραφή με έναν, δύο ή τρεις παλμούς που εντοπίζονται νωρίς στη χρονοϊστορία ταχύτητας και έχουν μεγάλο εύρος. Ο κυρίαρχος λόγος για την ύπαρξη των παλμών αυτών είναι το φαινόμενο της έμπροσθεν κατευθυντικότητας στην περιοχή κοντά στο ρήγμα και οι παραμένουσες μετακινήσεις. Επίσης, άλλα φαινόμενα όπως η γεωλογία του εδάφους μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία τέτοιου είδους παλμών.

2.1.2 Μέθοδος ανάλυσης με κυματίδια

Η μέθοδος αυτή μπορεί να συγκριθεί με την ανάλυση Fourier, η οποία παρουσιάζει ένα σήμα χρησιμοποιώντας έναν γραμμικό συνδυασμό ημιτονοειδών κυμάτων, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει ένα σήμα απείρου μήκους και μίας συχνότητας. Σε αντίθεση, η ανάλυση με κυματίδια αναλύει ένα σήμα σε κυματίδια περιορισμένου χρόνου και που αντιπροσωπεύουν ένα μικρό εύρος συχνοτήτων. Για σήματα όπως αυτά των σεισμικών εδαφικών κινήσεων, αποτελεί πλεονέκτημα η αναπαράσταση του σήματος ως ένα άθροισμα μικρότερων κυματιδίων παρά ως άθροισμα στάσιμων ημιτονοειδών κυμάτων.

Πολλά πρωτότυπα κυματιδίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να αποσυνθέσουν ένα σήμα. Η πρωτότυπη συνάρτηση αναφέρεται ως μητρικό κυματίδιο και αυτή κλιμακώνεται και μεταφράζεται σε χρόνο ώστε να ορίσει ένα σετ από βασικές συναρτήσεις. Η βασική συνάρτηση του κυματιδίου στο χρόνο t προσδιορίζεται μαθηματικά από τη σχέση:

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

Όπου Φ() είναι η μητρική συνάρτηση κυματιδίου, s είναι η παράμετρος κλιμάκωσης που διαστέλλει το κυματίδιο και l είναι η παράμετρος που μετατρέπει το κυματίδιο σε χρόνο. Κάθε σήμα f(t) μπορεί να παρουσιαστεί σαν ένα γραμμικό συνδυασμό βασικών συναρτήσεων και οι συντελεστές για τον γραμμικό συνδυασμό προσδιορίζονται από την παρακάτω ολοκήρωση, η οποία είναι ίδιας λογικής με το μετασχηματισμό Fourier.

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



Σχήμα 2.2 Συνήθη μητρικά κυματίδια που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση με κυματίδια (Baker, 2007).

Υπάρχουν δύο ειδών μετατροπές κυματιδίων για την ανάλυση σημάτων, τα οποία εξαρτώνται από τον αριθμό των κλιμακώσεων και τοποθεσιών για τα οποία υπολογίζονται οι συντελεστές. Η μετατροπή συνεχούς κυματιδίου υπολογίζει τους συντελεστές που σχετίζονται με κάθε ακέραια τιμή των παραμέτρων κλίμακας και τοποθεσίας. Έτσι παρέχονται λεπτομερείς πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του σήματος. Αλλά ένα ψηφιακό κυματίδιο μήκους η μπορεί να περιγραφεί πλήρως χρησιμοποιώντας μειωμένο αριθμό συντελεστές περιγράφοντας το εύρος των η κυματίδια απαιτούνται για να το περιγράψουν. Η διακριτή μετατροπή του κυματιδίου παρέχει η συντελεστές περιγράφοντας το εύρος των η κυματιδίων σε διάφορες κλίμακες και τοποθεσίες. Οι συντελεστές από συνεχή και διακριτά κυματίδια ενός παραδείγματος μιας καταγραφής φαίνονται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3 a) Παράδειγμα χρονοϊστορίας ταχύτητας (η κάθετη συνιστώσα της καταγραφής του 1979 Imperial Valley) b) Συντελεστές διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίου c) Συντελεστές συνεχούς μετασχηματισμού κυματιδίου (Baker, 2007).

Επιπλέον, εάν το μητρικό κυματίδιο αντιπροσωπεύει αρκετά το σχήμα των χαρακτηριστικών που ενδιαφέρει, τότε ακόμα λιγότεροι n συντελεστές χρειάζονται για να απεικονίσουν το σήμα. Μερικοί συντελεστές θα είναι μεγάλοι και τα αντίστοιχα κυματίδια θα εκπροσωπούν αρκετά χαρακτηριστικά του σήματος. Πολλοί άλλοι συντελεστές θα είναι σχεδόν μηδενικοί και τα αντίστοιχα κυματίδια θα σχετίζονται με λίγα χαρακτηριστικά. Αυτή η διαδικασία συνέβαλε στον εντοπισμό της ύπαρξης παλμών στις καταγραφές, καθώς αυτοί περιγράφονται από ένα ή μερικά κυματίδια με μεγάλους συντελεστές. Και οι δύο μέθοδοι μετασχηματισμού είναι χρήσιμοι για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Ο συνεχής μετασχηματισμός έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος και παράγει πολύ περισσότερους συντελεστές από αυτούς που χρειάζονται για να περιγράψουν ένα σήμα, αυτό όμως τον καθιστά ικανό να εντοπίσει με μεγάλη ακρίβεια τον μεγαλύτερο συντελεστή που θα καθορίσει την περίοδο και τη θέση του παλμού κοντινού πεδίου. Επιπρόσθετα, σε αντίθεση με τον διακριτό μετασχηματισμό, οι συντελεστές που αποκτούνται από τον συνεχή δεν αλλάζουν εάν η αρχή ή το τέλος του σήματος είναι γεμισμένα με επιπλέον μηδενικά. Αυτό βοηθάει, καθώς δεν περιέχονται συντελεστές που δεν έχουν σχέση με το σήμα, όπως όταν το όργανο παρακολούθησης της εδαφικής κίνησης ξεκινάει ή σταματάει να καταγράφει.

2.1.3 Κατάταξη σημάτων

Η διαδικασία που περιγράφεται χρησιμοποιεί τη μέθοδο ανάλυσης με κυματίδια για να αναγνωρίσει καταγραφές κοντινού πεδίου που περιέχουν παλμούς. Ο μεγαλύτερος παλμός στην καταγραφή εξάγεται για να καθορίσει εάν αντιπροσωπεύει σημαντικό μέρος του σήματος. Δύο ακόμη κριτήρια για τον ορισμό των παλμικών καταγραφών οι οποίες έχουν οριστεί από φαινόμενα κατευθυντικότητας είναι πως ο παλμός πρέπει καταφθάνει (υποδεικνύοντας να νωρίς ότι οφείλεται σε φαινόμενα κατευθυντικότητας) και πως η καταγραφή έχει μεγάλη μέγιστη ταχύτητα (για να μειωθούν οι περιπτώσεις σεισμών που μπορεί να φαίνονται παλμικοί απλά και μόνο επειδή η χρονοϊστορία είναι απλής μορφής).

• Εξαγωγή του παλμού ταχύτητας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ο μεγαλύτερος παλμός εξάγεται χρησιμοποιώντας την διαδικασία αποσύνθεσης με τα κυματίδια. Το κυματίδιο Daubechies που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2(c), χρησιμοποιείται ως μητρικό κυματίδιο γιατί πλησιάζει το σχήμα πολλών παλμών ταχύτητας και έχει παρατηρηθεί πως λειτουργεί αρκετά καλά σε σχέση με άλλα υποψήφια μητρικά κυματίδια. Για την εκτίμηση μιας

εδαφικής καταγραφής, αρχικά υπολογίζεται το συνεχές κυματίδιο της χρονοϊστορίας της ταχύτητας και οι συντελεστές με τις μεγαλύτερες απόλυτες τιμές. Το κυματίδιο που σχετίζεται με το συντελεστή καθορίζει την περίοδο και τη θέση του παλμού, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.4**(a). Σημειώνεται πως ο συντελεστής ενός κυματιδίου ισούται με την ενέργεια του κυματιδίο, επομένως ο επιλεγμένος παλμός έχει επίσης τη μεγαλύτερη ενέργεια. Το κυματίδιο αυτό εξάγεται από την καταγραφή και υπολογίζεται ο συνεχής μετασχηματισμός για την εναπομένουσα καταγραφή. Για το λόγο ότι η περίοδος και η θέση του παλμού έχουν προσδιοριστεί, μόνο κυματίδια με παρόμοια περίοδο και θέση υπολογίζονται σε αυτό το σημείο. Αναγνωρίζεται ο μεγαλύτερος από τους συντελεστές, **Σχήμα 2.4**(b). Συνήθως μόνο ένας ή δύο συντελεστές χρειάζονται για την περιγραφή του παλμού, αλλά εξάγονται δέκα με την ίδια περίοδο και θέση για να σιγουρέψουν πως ο παλμός έχει περιγραφεί λεπτομερώς. Στο **Σχήμα 2.4**(c) παρουσιάζεται ο εξαγμένος παλμός με 10 συντελεστές και η εναπομένουσα καταγραφή μετά την αφαίρεση του παλμού φαίνεται στο **Σχήμα 2.4**(d).



Σχήμα 2.4 Απεικόνιση της διαδικασίας αποσύνθεσης για την εξαγωγή του παλμού από τις καταγραφές (Baker, 2007).

Με τη συγκεκριμένη μέθοδο, μπορούν να εξαχθούν παλμοί από οποιαδήποτε καταγραφή, είτε υπάρχει παλμός κατευθυντικότητας είτε όχι. Για μη-παλμικές

καταγραφές, ωστόσο, ο εξαγμένος παλμός συνήθως δεν έχει πολλά χαρακτηριστικά της κίνησης και η εναπομένουσα καταγραφή είναι σχεδόν ίδια με την αρχική. Επομένως, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν ιδιότητες για τους παλμούς, ώστε να είναι δυνατή η κατηγοριοποίηση των καταγραφών.

• Καθορισμός της σημαντικότητας του εξαγόμενου παλμού

Οι αρχικές καταγραφές καθώς και αυτές μετά την αφαίρεση του παλμού χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν εάν πρόκειται για παλμική κίνηση. Για να πραγματοποιηθεί η κατάταξη αυτή, υπολογίστηκαν διάφορες πιθανές μεταβλητές που θα βοηθούσαν πιθανώς στον προσδιορισμό ύπαρξης παλμού στην κίνηση. Αρχικά, κατηγοριοποιούνται χειροκίνητα κάποιες καταγραφές και στη συνέχεια, χτίζεται ένα στατιστικό μοντέλο πρόβλεψης, που είναι ικανό να κατηγοριοποιήσει τα αρχεία. Για την δημιουργία της κατηγοριοποίησης, επιλέχθηκαν όλες οι καταγραφές κανονικών ρηγμάτων από τη βιβλιοθήκη καταγραφών Next Generation Attenuation (NGA) με μέγεθος μεγαλύτερο από 5,5 και μέσα σε περιοχή 30 χλμ από το σεισμικό γεγονός. Οι 398 επιλεχθείσες καταγραφές κατηγοριοποιήθηκαν από τον Baker βασιζόμενες σε οπτικές εικασίες για την αναγνώριση παλμών στις χρονοϊστορίες ταχύτητας, όπως καταγραφές με εμφανή παλμική ή μη-παλμική συμπεριφορά, σαν αυτές στο Σχήμα 2.1 (a και d). Άλλες με όχι τόσο εμφανή χαρακτηριστικά, Σχήμα 2.1 (b, c), εξετάστηκαν ξεχωριστά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ανάλυσης με κυματίδια. Η χειροκίνητη κατηγοριοποίηση οδήγησε σε 124 πιθανώς παλμικών καταγραφών, 190 μη-παλμικών και 84 με όχι ξεκάθαρη εικόνα. Μετά τη χειροκίνητη κατηγοριοποίηση, έγινε ξανά η διαδικασία, χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά στατιστικά εργαλεία βασιζόμενα σε αποτελέσματα από την ανάλυση κυματιδίων.

Χρησιμοποιήθηκε γραμμική ανάλυση διακριτοποίησης για την εκτίμηση της ικανότητας των πιθανών μεταβλητών για τη διαχώριση μεταξύ των παλμικών καταγραφών με μεγάλους εξαγόμενους παλμούς και των μη-παλμικών με μικρούς εξαγόμενους παλμούς.

Θεωρήθηκε πλήθος μεταβλητών, περιλαμβάνοντας το μέγεθος των συντελεστών που παραλαμβάνεται από την αποσύνθεση των κυματιδίων, φασματικές τιμές απόκρισης, μέγιστες εδαφικές ταχύτητες και τιμές βασισμένες στην ενέργεια. Διαφορετικά σετ, ενός, δύο ή τριών μεταβλητών εφαρμόσθηκαν για την ακριβή κατηγοριοποίηση των καταγραφών. Δύο μεταβλητές οι οποίες ήταν εύκολο να προσδιορισθούν και

παρείχαν αρκετά μεγάλη ακρίβεια ήταν η μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV) της εναπομένουσας καταγραφής διαιρεμένη με την PGV της αρχικής καταγραφής και η ενέργεια της εναπομένουσας διαιρεμένη με την αρχική. Οι μεταβλητές αυτές αναφέρονται ως "PGV ratio" και "Energy ratio".

Ο δείκτης με τον οποίο ο Baker προβλέπει εάν η καταγραφή θεωρείται παλμική ή μηπαλμική ορίζεται από τη σχέση:

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

Ο συντελεστής αυτός ονομάζεται «δείκτης παλμικότητας» και παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1. Όσο μεγαλύτερη η τιμή του δείκτη παλμικότητας τόσο μεγαλύτερη η ένδειξη πως πρόκειται για παλμική καταγραφή. Στη συγκεκριμένη μελέτη, καταγραφές με δείκτη μεγαλύτερο από 0,85 είναι παλμικές και κάτω από 0,15 μη-παλμικές. Οι τιμές των λόγων PGV και της ενέργειας που αντιστοιχούν σε αυτή την κατάταξη φαίνονται στο Σχήμα 2.5. Οι καταγραφές που δεν είχαν ξεκάθαρο χαρακτηρισμό έχουν παραλειφθεί από το σχήμα.



Σχήμα 2.5 Διάγραμμα διασποράς του δείκτη παλμικότητας. Τα σημεία υποδηλώνουν τις καταγραφές και την κατάταζή τους (Baker, 2007).

Από τις καταγραφές που χειροκίνητα είχαν χαρακτηρισθεί ως παλμικές ή μηπαλμικές, το 88% παρέμεινε το ίδιο, το 11% ως ουδέτερες και το 1% είχε καταταχθεί λάθος. Το 1% που ήταν λάθος αποτελούταν από 2 καταγραφές των οποίων οι παλμοί δεν έγιναν αντιληπτοί από την αυτόματη διαδικασία. Ενώ η μέθοδος, θα μπορούσε να διορθωθεί ώστε να μπορούν να εντοπισθούν και αυτοί οι παλμοί, η διόρθωση αυτή θα την έκανε πιο περίπλοκη και το 1% που ήταν λάθος δεν κρίθηκε αρκετό για μια τόσο μεγάλη αλλαγή.

• Αποκλεισμός των παλμών με καθυστερημένη άφιξη

Οι καταγραφές που ταξινομήθηκαν στις παλμικές έχουν σημαντικά χαρακτηριστικά παλμών, τα οποία προκαλούνται από κάποια φαινόμενα. Τα φαινόμενα κατευθυντικότητας είναι πρωταρχικού ενδιαφέροντος, όμως ένα ακόμη κριτήριο πρέπει να προστεθεί ώστε να ξεχωρίζει του παλμούς που καταφθάνουν νωρίς στις χρονοϊστορίες ταχύτητας, καθώς αυτοί είναι εκείνοι που υποδεικνύουν την ύπαρξη φαινομένων κατευθυντικότητας.

Οι παλμοί που φτάνουν καθυστερημένα μπορούν αναγνωριστούν υπολογίζοντας το άθροισμα των τετραγώνων των ταχυτήτων της αρχικής καταγραφής και του εξαγμένου παλμού. Για χρόνο *t*, το άθροισμα των τετραγώνων των ταχυτήτων υπολογίζεται από τη σχέση:

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

Όπου CSV είναι το άθροισμα των τετραγώνων των ταχυτήτων σε χρόνο t και V(u) είναι η ταχύτητα του εδάφους σε χρόνο u. Αξιολογώντας τις συναρτήσεις CSV(t) για την αρχική καταγραφή και τον παλμό, καθορίζονται οι χρόνοι στους οποίους φθάνουν το x% της συνολικής CSV. Οι χρόνοι αυτοί είναι tx%, orig και tx%, pulse αντίστοιχα.

Παρατηρήθηκε ότι οι παλμοί που εμφανίζονται νωρίς έχουν τιμές του t_{20%,orig} μεγαλύτερες από t_{10%,pulse} (δηλαδή, για να βρίσκεται ο παλμός στην αρχή της καταγραφής θα πρέπει να φτάσει το 10% της συνολικής CSV πριν η αρχική καταγραφή φτάσει το 20% του CSV). Οι παλμοί που καταφθάνουν αργά μπορούν να αποκλειστούν εάν το ενδιαφέρον αποτελούν οι καταγραφές με φαινόμενα κατευθυντικότητας, ωστόσο μερικές εφαρμογές δεν απαιτούν κάτι τέτοιο.

Αποκλεισμός καταγραφών με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση μικρότερη των 30 cm/s

Ο αποκλεισμός αυτός γίνεται επειδή κάποιες μικρής έντασης καταγραφές παρουσιάζονται σαν παλμικές απλά και μόνο επειδή η χρονοϊστορία της ταχύτητάς τους είναι απλή. Για την αφαίρεση τέτοιων καταγραφών, εδαφικές κινήσεις με μέγιστη εδαφική ταχύτητα μικρότερη από μία τιμή αποκλείονται. Τα 30cm/s παρατηρήθηκε ότι ήταν μια τιμή που απέκλειε σχεδόν όλες τις μη επιθυμητές καταγραφές και διατηρούσε αυτές που ήταν παλμικές λόγω φαινομένων κατευθυντικότητας. Το κριτήριο αυτό αφαιρεί επίσης και παλμικές κινήσεις μεγάλης απόστασης.

Τα τρία κριτήρια που περιγράφηκαν οδηγούν στην αναγνώριση των παλμικών κινήσεων. Αναλύθηκαν όλες οι καταγραφές από κάθετα ρήγματα από τη βιβλιοθήκη του NGA και 91 από αυτές ικανοποιούν και τα τρία κριτήρια:

- 1. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι μεγαλύτερος από 0,85
- 2. Ο παλμός καταφθάνει νωρίς στη χρονοϊστορία
- 3. Η αρχική καταγραφή έχει μέγιστη εδαφική ταχύτητα μεγαλύτερη από 30 cm/s


Σχήμα 2.6 Παλμός που καταφθάνει νωρίς στην καταγραφή. α) αρχική καταγραφή β)εξαγμένος παλμός γ) Άθροισμα τετραγώνων των ταχυτήτων. Οι χρόνοι που αντιστοιχούν στους $t_{20\%, \text{orig}}$ και $t_{10\%, \text{pulse}}$ είναι χαραγμένοι με κάθετες γραμμές (Baker, 2007).



Σχήμα 2.7 Παλμός που καταφθάνει αργά στην καταγραφή. α) αρχική καταγραφή β)εξαγμένος παλμός γ) Άθροισμα τετραγώνων των ταχυτήτων. Οι χρόνοι που αντιστοιχούν στους $t_{20\%, \text{orig}}$ και $t_{10\%, \text{pulse}}$ είναι χαραγμένοι με κάθετες γραμμές (Baker, 2007)

2.1.4 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού

Η περίοδος του παλμού ταχύτητας είναι πολύ σημαντική παράμετρος για τους μηχανικούς, καθώς ο λόγος της περιόδου του παλμού προς τη δεσπόζουσα περίοδο της κατασκευής μπορεί να επηρεάσει την απόκριση της κατασκευής ((Alavi & Krawinkler, 2000), (Anderson & Bertero, 1987), Mavroeidis et al. (2004)). Εξετάζοντας την κυρίαρχη συχνότητα του κυματιδίου που χρησιμοποιείται για την εξακρίβωση του παμού, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί και η περίοδος του παλμού.

Ο πρωτεύον τρόπος για τον ορισμό της περιόδου του παλμού είναι να επιλεχθεί η περίοδος που αντιστοιχεί στη μέγιστη ταχύτητα του φάσματος ταχυτήτων. Ένα διάγραμμα με τις τιμές των περιόδων των παλμών από τα κυματίδια και τη φασματική ταχύτητα φαίνεται στο **Σχήμα 2.8** για τις 91 παλμικές καταγραφές. Οι περίοδοι που αποκτούνται από τις δύο μεθόδους είναι παρόμοιες, με την περίοδο που βασίζεται στο κυματίδιο T_p να είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από την περίοδο του φάσματος ταχυτήτων. Σε περίπτωση που οι δύο τιμές των περιόδων έχουν μεγάλη διαφορά, η περίοδος του κυματιδίου φαίνεται να είναι καλύτερο μέτρο της περιόδου του παλμού. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η περίοδος με τη μεγαλύτερη φασματική ταχύτητα είναι γενικά συνδεδεμένη με υψηλή συχνότητα του ταλαντούμενου τμήματος της κίνησης, ενώ η περίοδος του κυματιδίου είναι συνδεδεμένη με τον ορατό παλμό της ταχύτητας, **Σχήμα 2.9**. Η μέγιστη φασματική ταχύτητα της καταγραφής συμβαίνει σε περίοδο 1,4 δευτερολέπτων, ενώ η ψευδο-περίοδος του κυματιδίου των 7,5 δευτερολέπτων ταιριάζει με την περίοδο του παλμού.



Σχήμα 2.8 Τρ από τη μέγιστη τιμή του φάσματος ταχύτητας και Τρ από την ψευδο - περίοδο του κυματιδίου για τις 91 καταγραφές κοντινού πεδίου (Baker, 2007).



Σχήμα 2.9 Η αρχική καταγραφή, ο εξαγμένος παλμός και η εναπομένουσα καταγραφή για την εδαφική κίνηση του 1992 στο Landers. Α) Χρονοϊστορίες ταχύτητας, Β) Φάσμα ταχύτητας, με ετικέτες που υποδεικνύουν τις τιμές του Τρ από το φάσμα και από το κυματίδιο (Baker, 2007).

Η ψευδο- περίοδος του κυματιδίου ορίζεται αυτόματα και αποτελεί πιο συνεπή μέθοδο προσδιορισμού της περιόδου του παλμού από κάποια εναλλακτική αυτοματοποιημένη μέθοδο που βασίζεται στην περίοδο της μέγιστης τιμής του φάσματος ταχύτητας.

2.2 Μέθοδος περιστροφής των καταγραφών των Shahi και Baker

Ο Shahi σε συνεργασία με τον Baker, (Shahi & Baker, 2011), πρότειναν έναν ανανεωμένο τρόπο κατηγοριοποίησης των παλμικών καταγραφών, περιστρέφοντας την κίνηση και προσδιορίζοντας τους παλμούς για κάθε προσανατολισμό. Η μέθοδος βασίζεται στη σχέση που δημιούργησε ο Baker (2007), για την ταξινόμηση των καταγραφών. Η πλήρης δομή περιλαμβάνει μοντέλα για την πρόβλεψη της ύπαρξης παλμού σε μία συγκεκριμένη θέση, την πιθανότητα παρατήρησης του παλμού σε συγκεκριμένου προσανατολισμό, την κατανομή της περιόδου του παλμού, την διεύρυνση του φάσματος απόκρισης λόγω της απουσίας του παλμού σε σεισμούς κοντινού πεδίου.

2.2.1 Προσδιορισμός παλμικών καταγραφών

Υπάρχουν βιβλιοθήκες που περιέχουν παλμικές καταγραφές που έχουν ταξινομηθεί χρησιμοποιώντας οπτικές η ποσοτικές τεχνικές. Τα αρχεία αυτά δεν παρέχουν μηπαλμικές καταγραφές, αποτρέποντας τους αναλυτές από το να εντοπίσουν την πιθανή ύπαρξη παλμών σε αυτές.

Ο αλγόριθμος του Baker προτιμάται καθώς αποτελεί μια πλήρως ποσοτική μέθοδο και επιτρέπει την ταξινόμηση μεγάλου αριθμού αρχείων όπως αυτό από το NGA, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Η μέθοδος του Baker χρησιμοποιεί την ανάλυση με κυματίδια για να εξάγει τον παλμό από τη χρονοϊστορία της ταχύτητας της κάθετης συνιστώσας του ρήγματος. Παρόλο που για κάποιες καταγραφές η κατάταξη είναι δύσκολη, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι γενικά αποτελεσματικός.

Παρόλο που παλμοί ταχύτητας που προκαλούνται από φαινόμενα κατευθυντικότητας αναμένεται να βρεθούν στην κάθετη συνιστώσα της κίνησης στο ρήγμα, πολλές

διαρρήξεις έχουν ακανόνιστη γεωμετρία και γι αυτό ο προσδιορισμός της κάθετης διεύθυνσης του ρήγματος είναι δύσκολος. Παλμικές καταγραφές έχουν παρατηρηθεί και σε ένα εύρος προσανατολισμού. Στο **Σχήμα 2.10**, φαίνεται ο συντελεστής συσχέτισης όπως υπολογίστηκε από τον Baker (2007) σε ένα σημείο με διαφορετικό προσανατολισμό. Ο συντελεστής δείχνει ότι οι παλμικές κινήσεις συνέβησαν σε ένα συγκεκριμένο εύρος προσανατολισμού.



Σχήμα 2.10 Τιμές του δείκτη παλμικότητας συναρτήσει του προσανατολισμού για την καταγραφή του EC Country Center, το 1979 στο Imperial Valley. Οι σκιασμένες περιοχές αναφέρονται σε προσανατολισμούς όπου υπάρχουν σημαντικοί παλμοί (Shahi & Baker, 2011).

Με σκοπό τον έλεγχο των προσανατολισμών στους οποίους παρατηρούνται παλμικές κινήσεις, οι καταγραφές περιστράφηκαν σε όλους τους πιθανούς προσανατολισμούς και κατατάχθηκαν στις παλμικές ή μη-παλμικές. Έτσι, εντοπίσθηκαν 179 καταγραφές στο αρχείο του NGA που περιείχαν παλμικές κινήσεις. Η προηγούμενη μελέτη του Baker (2007) εντόπισε μόνο 91 καταγραφές από το ίδιο αρχείο. Οι περισσότερες από τις καταγραφές που προστέθηκαν από τη νέα μελέτη βρέθηκε πως είχαν οπτικά χαρακτηριστικά παλμού στην διεύθυνση του κανονικού ρήγματος. Αυτές οι καταγραφές δεν είχαν καταταχθεί στις παλμικές από τη μελέτη του Baker. Η ύπαρξη του παλμού στη χρονοϊστορία ταχύτητας της διεύθυνσης του κανονικού ρήγματος υποδεικνύει ότι τα φαινόμενα κατευθυντικότητας είναι το κυρίαρχο αίτιο για την παλμική συμπεριφορά της καταγραφής. Έχει εδραιωθεί πως η έμπροσθεν κατευθυντικότητα, η οποία πιστεύεται ότι προκαλεί τους παλμούς, εξαρτάται από τη γεωμετρία της θέσης της διάρρηξης, όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 1. Οι παράμετροι r, s και θ για τα κανονικά ρήγματα και r, d και φ για άλλου τύπου ρήγματα έχουν μεγαλύτερη ικανότητα να προβλέψουν τον παλμό από άλλες παραμέτρους. Γι αυτό το λόγο εφαρμόστηκαν οι ίδιες παράμετροι που επιλέχθηκαν από τους Iervollo and Cornell (2008) και χρησιμοποιήθηκαν πληροφορίες από όλες τις θέσεις στα αρχεία του NGA. Έγινε επαναπροσδιορισμός του μοντέλου ώστε να γίνεται πρόβλεψη του παλμού για κάθε προσανατολισμό. Οι Shahi και Baker κατάλαβαν πως μόνο οι παράμετροι r και s ήταν στατιστικά οι καλύτεροι παράμετροι r, d και φ ήταν στατιστικά σημαντικοί για άλλες περιπτώσεις ρηγμάτων. Η εξίσωση που περιγράφει το συντελεστή είναι:

$$P(pulse|r,s) = \frac{1}{1 + e^{(0.642 + 0.167 \cdot r - 0.074 \cdot s)}}$$

για κανονικά ρήγματα

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

για άλλου είδους ρήγματα

Το *r* έχει εύρος από 0,3 χλμ μέχρι 255 χλμ στην περίπτωση διαφορετικών ρηγμάτων και 0,07 χλμ με 472 χλμ στην περίπτωση κανονικών ρηγμάτων, το *d* έχει εύρος από 0 μέχρι 70 χλμ, το φ 0-90° και το *s* από 0,3 μέχρι 143 χλμ.

Στο Σχήμα 2.11a φαίνεται ένας χάρτης με τις πιθανότητες εμφάνισης παλμού για ένα κανονικό ρήγμα και στο Σχήμα 2.12b για άλλα ρήγματα. Το περίγραμμα στο χάρτη δείχνει την πιθανότητα ύπαρξης του παλμού όπως προβλέφθηκε γύρω από τη γεωμετρία της διάρρηξης στο σεισμό του Imperial Valley και του Northridge. Οι χάρτες συγκρίνονται με τους πραγματικούς χάρτες των μετώπων όπου παρατηρήθηκαν παλμικές καταγραφές κατά τη διάρκεια του σεισμού του Imperial Valley και του Northridge. Τα μοντέλα προβλέπουν υψηλή πιθανότητα εμφάνισης παλμών στις περιοχές όπου υπάρχουν φαινόμενα κατευθυντικότητας, το οποίο αποδεικνύεται και από το σχήμα του περιγράμματος.



Σχήμα 2.11 Χάρτης του σεισμού του Imperial Valley. a) περίγραμμα της πιθανότητας εμφάνισης του σεισμού για το δεδομένο ρήγμα και b) σημεία όπου παρατηρήθηκε παλμική καταγραφή (Shahi & Baker, 2011).



Σχήμα 2.12 Χάρτης του σεισμού στο Northridge. a) περίγραμμα της πιθανότητας εμφάνισης του παλμού και b) σημεία όπου παρατηρήθηκαν παλμικές καταγραφές (Shahi & Baker, 2011).

2.3 Πρόταση για νέο Συντελεστή Συσχέτισης για την ταξινόμηση των καταγραφών κοντινού πεδίου

Οι Kardoutsou, Taflampas and Psycharis (Kardoutsou, Taflampas, & Psycharis, 2017), προτείνουν ένα νέο δείκτη παλμικότητας για τον χαρακτηρισμό των σεισμικών καταγραφών ως παλμικές ή μη-παλμικές, ο οποίος είναι ίσος με τον συντελεστή συσχέτισης του σημαντικού παλμού και της αρχικής καταγραφής. Καταγραφές των οποίων ο δείκτης είναι μεγαλύτερος από 0,65 χαρακτηρίζονται ως παλμικές, ενώ οι καταγραφές των οποίων ο δείκτης είναι μικρότερος από 0,65 χαρακτηρίζονται ως μη-παλμικές. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε 221 καταγραφές οι οποίες έχουν ήδη καταταχθεί στις παλμικές, μη-παλμικές ή ουδέτερες και ο νέος δείκτης συγκρίνεται με προηγούμενους δείκτες. Αποδεικνύεται πως ο καινούριος δείκτης σχετίζεται με την ανελαστική απόκριση της κατασκευής, καθώς οι καταγραφές που είναι παλμικές. Χρησιμοποιείται το κυματίδιο των Mavroeidis and Papageorgiou (2003) για τη μαθηματική εκπροσώπηση του κυρίαρχου παλμού σε μια καταγραφή.

Όσον αφορά την ελαστική απόκριση, οι παλμοί κατευθυντικότητας παράγουν μία μορφή «καμπάνας» στο φάσμα απόκρισης γύρω από την περίοδο του παλμού T_p . Για την ανελαστική απόκριση, οι παλμοί κατευθυντικότητας παράγουν μεγάλες απαιτήσεις πλαστιμότητας μ στις κατασκευές με δεσπόζουσα περίοδο κοντά στο μισό της περιόδου του παλμού, λίγο μεγαλύτερες από το συντελεστή μείωσης R που θα αναμέναμε σύμφωνα με τον κανόνα ίσων μετακινήσεων. Ωστόσο, για κατασκευές με περίοδο ίση ή μεγαλύτερη από τον παλμό, ο λόγος μ/R κυμαίνεται κοντά στη μονάδα.

Παλμοί που υπάρχουν σε καταγραφές γίνονται ορατοί στις χρονοϊστορίες ταχύτητας. Όπως περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια η προσομοίωση τους γίνεται επιτυχώς με τη χρήση κυματιδίων. Οι Mavroeidis and Papageorgiou (2003) πρότειναν ένα αποτελεσματικό μοντέλο για τη μαθηματική αναπαράσταση των παλμών, βασιζόμενοι στο εύρος, την περίοδο, τη διάρκεια και την αλλαγή φάσης.

2.3.1 Προσδιορισμός του κυρίαρχου παλμού

Στη μελέτη αυτή, ο κυρίαρχος παλμός καθορίζεται εφαρμόζοντας τη μέθοδο των Mimoglou et al. (2014) στην οποία χρησιμοποιείται το κυματίδιο των M&P. Χρησιμοποιούνται τέσσερις παράμετροι για να περιγράψουν τον παλμό: η περίοδος T_p, το εύρος του A, η διάρκεια του γ και η διαφορά φάσης ν.

Όσον αφορά την περίοδο του παλμού T_p , προσδιορίζεται από τη μέγιστη τιμή του φάσματος $S_d x S_v$, S_d είναι η φασματική μετατόπιση και S_v η φασματική ταχύτητα, και οι δύο τιμές για απόσβεση 5%. Ο ορισμός αυτός βασίζεται στην παρατήρηση πως ο παλμός που εμπεριέχεται στην κίνηση επηρεάζει τόσο την εδαφική επιτάχυνση όσο και την ταχύτητα (σε διαφορετικό βαθμό), έτσι η περίοδος του παλμού T_p θα πρέπει να επικρατεί στη συνέλιξη των δύο χρονοϊστοριών και θα πρέπει να αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του φάσματος Fourier. Σημειώνεται πως η μέθοδος με τη χρήση του $S_d x$ S_v εφαρμόστηκε σε όλες τις 91 παλμικές καταγραφές του Baker (2007) με εξαιρετικά αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται στο Mimoglou et al. (2014).

Για τον καθορισμό του εύρους του κυματιδίου Α, χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση (Mimoglou, Psycharis, & Taflampas, 2014):

$$A = \frac{4\xi P S_{\nu,\xi}(T_p)}{(1 - e^{-2\pi\gamma\xi}) \times [1 + (\gamma - 1)\xi]}$$

το $PS_{v,\xi}(T_p)$ είναι η τιμή του φάσματος ψευδοταχύτητας της καταγραφής για περίοδο T_p και απόσβεση $\xi = 0,05$ και γ είναι η διάρκεια, η οποία δεν είναι γνωστή. Για το λόγο αυτό εξετάζεται ένα μεγάλο εύρος του γ (μέχρι $\gamma_{max} = 5$). Από το ζεύγος τιμών (Α, γ) εξαιρούνται αυτές που οδηγούν σε εύρη της επιτάχυνσης, ταχύτητας ή μετατόπισης του κυματιδίου μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές της καταγραφής. Για τα εναπομείναντα ζεύγη τιμών (Α, γ) και για όλες τις τιμές φάσης μεταξύ 0° και 360°, τα αντίστοιχα κυματίδια υπολογίζονται και επιλέγεται αυτό με τον μέγιστο συντελεστή συσχέτισης με την αρχική καταγραφή.

Για παράδειγμα, θεωρείται η κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της καταγραφής στο Ezrincan κατά τη διάρκεια του σεισμού στο Ezrincan, στην Τουρκία το 1992. Η εφαρμογή της μεθόδου των Mimoglou et al. (2014) οδηγεί σε περίοδο παλμού $T_p = 2.40$ s, Σχήμα 2.13a, τιμή πολύ κοντά σε αυτήν του Baker (Baker, 2007) των 2,65 s. Στο Σχήμα 2.13b, ο παλμός που προσδιορίσθηκε με τη μέθοδο Mimoglou et al.

(Mimoglou, Psycharis, & Taflampas, 2014) συγκρίνεται με τη χρονοϊστορία της ταχύτητας και φαίνεται πως προσομοιώνει αρκετά καλά τον κυρίαρχο παλμό που εμπεριέχεται στην καταγραφή.



Σχήμα 2.13 Καταγραφή Erzincan (σεισμός στο Ezrincan, Τουρκία 1992). α) Φάσμα Sd x Sv για 5% απόσβεση b) χρονοϊστορία ταχύτητας και ο κυρίαρχος παλμός.

2.3.2 Νέα πρόταση για το δείκτη παλμικότητας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στη μέθοδο των Mimoglou et al. (2014) ο κυρίαρχος παλμός επιλέγεται από ένα σετ παλμών που είναι βασισμένοι στο κριτήριο του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης της αρχικής καταγραφής, καθώς ο σημαντικός παλμός που περιέχεται στην καταγραφή θα πρέπει να παράγει μεγάλο συντελεστή συσχέτισης. Η συγκεκριμένη ιδέα αναλύθηκε ώστε να προσδιοριστεί ένας νέος PI για τον χαρακτηρισμό των καταγραφών ως παλμικές ή μη-παλμικές, βασισμένη στο συντελεστή συσχέτισης *r*. Ο νέος δείκτης θα είναι ίσος με το *r*, PI = *r*.

Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ δύο συναρτήσεων *f* και *g* με χρονοκαθυστέρηση *t_d* προσδιορίζεται από τη σχέση:

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

στην οποία f^* είναι συζυγής της f. Ο συντελεστής συσχέτισης r ορίζεται:

$$r = \frac{\sum_{i} (f(t_i) - \tilde{f}) \times (g(t_i - t_d) - \tilde{g})}{\sqrt{[\sum_{i} (f(t_i) - \tilde{f})^2] \times [\sum_{i} (g(t_i - t_d) - \tilde{g})^2]}}$$

όπου \widetilde{f} και \widetilde{g} οι μέσες τιμές των συναρτήσεων f και g.

Ο συντελεστής συσχέτισης r υπολογίζεται για τη χρονοϊστορία της ταχύτητας της αρχικής καταγραφής $v_{e}(t)$ και τη χρονοϊστορία ταχύτητας του παλμού $v_{p}(t)$, και για καθυστέρηση χρόνου t_d ίση με τη το χρόνο που ξεκινάει ο παλμός. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι η μέγιστη τιμή από την χρονοϊστορία ταχύτητας και του προσομοιωμένου παλμού για όλες τις πιθανές χρονικές υστερήσεις. Στην πραγματικότητα, η μέθοδος σπρώγνει τον προσομοιωμένο παλμό κατά μήκος της χρονοϊστορίας από την αρχή μέχρι το τέλος της διάρκειάς της και το σημείο στο οποίο ο συντελεστής συσχέτισης του παλμού και της εδαφικής ταχύτητας παρουσιάζουν μέγιστο, προσδιορίζει τη θέση του παλμού στη χρονοϊστορία.. Έπειτα, θέτοντας PI = r, δύο όρια πρέπει να οριστούν, $PI_{cr,max}$ και $PI_{cr,min}$, έτσι, εάν το PI είναι μεγαλύτερο του PI_{cr.max} τότε η καταγραφή χαρακτηρίζεται παλμική, ενώ εάν το PI είναι μικρότερο από PI_{cr.min} τότε η καταγραφή είναι μη-παλμική. Για να οριστούν οι κατάλληλες τιμές για τα δύο όρια πραγματοποιείται μία βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση τον χαρακτηρισμό του Baker (2007) για τις 221 καταγραφές και προτάθηκαν οι ακόλουθες τιμές: $PI_{cr,max} = 0.65$ και $PI_{cr,min} = 0.55$. Επομένως, καταγραφές με PI>0.65 είναι παλμικές, αυτές με PI<0.55 μη-παλμικές και καταγρφές με τιμές PI μεταξύ 0,55 και 0,65 είναι ουδέτερες. Η συγκεκριμένη ταξινόμηση σχετίζεται και με την ανελαστική απόκριση μίας μονοβάθμιας κατασκευής.

Πρέπει να τονιστεί πως, παρόλο που η πλειοψηφία των παλμικών καταγραφών μπορεί να οφείλεται σε φαινόμενα κοντινού πεδίου (κατευθυντικότητα), σημαντικοί παλμοί μπορεί να παραχθούν και από διαφορετικούς λόγους, όπως φαινόμενα λεκανών, εδαφικές συνθήκες, βαθύ ρήγμα, παραμένουσες μετατοπίσεις κλπ.

(Rodriguez-Marek, 2000), (Baker, 2007). Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, ο Baker (Baker, 2007) θεωρεί πως καταγραφές που έχουν χαρακτηριστικά παλμικότητας, αλλά δεν προκαλούνται από κατευθυντικότητα, δεν πρέπει να ταξινομούνται στις παλμικές από σεισμολογική άποψη, γι' αυτό αποκλείει καταγραφές των οποίων ο παλμός φθάνει αργά, παρόλο που μπορεί να έχουν μεγάλο δείκτη ΡΙ. Όμως, οι συγγραφείς στην περίπτωση αυτή, δίνουν έμφαση στην κατασκευαστική σκοπιά της μηχανικής, θεωρώντας πως οι επιπτώσεις πάνω στην κατασκευή από ένα μεγάλο παλμό μέσα σε μια καταγραφή στην ελαστική και ανελαστική απόκρισή της, δεν έχουν καμία σχέση με τη γένεση του παλμού, ούτε με το χρόνο στον οποίο παρατηρείται στην καταγραφή. Για το λόγο αυτό, όλες οι καταγραφές με PI > PI_{cr,max} θεωρούνται παλμικές.

Ο προτεινόμενος PI μπορεί να εφαρμοσθεί σε οποιαδήποτε καταγραφή για την οποία είναι γνωστή η μαθηματική έκφραση για τον κυρίαρχο παλμό. Οποιοδήποτε κυματίδιο θεωρείται κατάλληλο για την έκφραση του παλμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί, στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται, όπως αναφέρθηκε, το κυματίδιο των M&P. Η μεθοδολογία αυτή παράγει παλμό για οποιαδήποτε καταγραφή, ανεξάρτητα του εάν είναι παλμική ή μη.

2.3.3 Επαλήθευση του προτεινόμενου Συντελεστή Συσχέτισης

Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε 221 καταγραφές από το αρχείο του Pacific Earthquake Engineering Research Center – Next Generation Attenuation (PEER_NGA) με PGV > 30 cm/s. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του νέου PI φαίνονται στο **Σχήμα 2.14**. 132 καταγραφές είναι παλμικές (σημεία πάνω από την πάνω γραμμή), 48 μηπαλμικές (σημεία κάτω από την κάτω γραμμή) και 41 ουδέτερες (σημεία μεταξύ των δύο γραμμών). Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτής της ταξινόμησης με του Baker χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά σύμβολα. Παρατηρείται πως με την ταξινόμηση κατά Baker (2007) μόνο οι 91 καταγραφές θεωρούνται παλμικές (PI>0.85) ενώ οι υπόλοιπες 17 αφαιρέθηκαν καθώς αναφέρονταν σε καταγραφές με καθυστερημένους παλμούς. Είναι ενδιαφέρον το γεγονός πως με τη νέα μέθοδο κατάταξης η ζώνη των ουδέτερων καταγραφών μειώνεται σημαντικά σε σχέση με τη μέθοδο του Baker (Baker, 2007).



Σχήμα 2.14 Προτεινόμενος δείκτης PI και σύγκριση των καταγραφών με την ταζινόμηση του Baker (2007) (Kardoutsou, Taflampas, & Psycharis, 2017).

Η μέθοδος ελέγχθηκε και με την ανελαστική απόκριση των μονοβάθμιων κατασκευών. Σύμφωνα με τον Iervolino and Cornell (2008), όσον αφορά την ανελαστική απόκριση, καταγραφές με σημαντικό παλμό προκαλούν στις κατασκευές με δεσπόζουσα περίοδο κοντά στο μισό της περιόδου του παλμού απαίτηση πλαστιμότητας μ μεγαλύτερη από την τιμή που αντιστοιχεί στο συντελεστή μείωσης R, κάτι το οποίο δεν αναμένεται σύμφωνα με τον κανόνα ίσων μετακινήσεων ($\mu = R$). Εξετάστηκε επίσης, η ελαστική απόκριση των μονοβάθμιων συστημάτων με περίοδο ίση με το μισό της περιόδου του παλμού και με επιτάχυνση διαρροής που αντιστοιχεί στο συντελεστή μείωσης R = 4 για 124 καταγραφές. Ο λόγος της ανελαστικής προς την ελαστική απόκριση d_{in}/d_{el} σε σχέση με τον προτεινόμενο PI φαίνεται στο **Σχήμα 2.15**. Σημειώνεται ότι, $d_{in}/d_{el} = \mu/R$ και ότι ο λόγος $d_{in}/d_{el} = 1.0$ αντιστοιχεί στο κανόνα ίσων μετατοπίσεων. Οι καταγραφές με PI > 0.65 (παλμικές) προκαλούν ανελαστικές μετατοπίσεις που είναι 1.5 φορά μεγαλύτερες από τις ελαστικές και αυξάνονται αναλογικά με τον δείκτη PI. Επομένως, οι παλμικές καταγραφές

παράγουν μεγάλες απαιτήσεις πλαστιμότητας και ο νέος συντελεστής συσχέτισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο για την απαίτηση αυτή. Αντίθετα, καταγραφές με συντελεστή PI < 0.55 (μη-παλμικές) παρουσιάζουν λόγους $d_{\rm in}/d_{\rm el}$ μικρότερους του 1.5, με μέση τιμή γύρω στη μονάδα, επομένως ο κανόνας των ίσων μετατοπίσεων ισχύει για αυτές τις περιπτώσεις.



Σχήμα 2.15 Λόγος της ανελαστικής προς την ελαστική μετατόπιση για μονοβάθμια συστήματα με περίοδο ίση με το μισό της περιόδου του παλμού σε σχέση με το PI (Kardoutsou, Taflampas, & Psycharis, 2017).

3 Προσομοίωση φορέα και αναλύσεις

3.1 Περιγραφή φορέα

Το υπό μελέτη κτίριο είναι κατασκευασμένο τη δεκαετία του 1970 σύμφωνα με το B.Δ. 1959. Αποτελείται από 7 ορόφους ύψους 3 μέτρων, με φατνώματα ανοίγματος 6 μέτρων και στις 2 κατευθύνσεις. Οι διαστάσεις της κάτοψης του κτιρίου είναι 24m x 18m.

Ο φέρον οργανισμός του κτιρίου είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα και αποτελείται από δοκούς, υποστυλώματα και πλάκες, ενώ δεν διαθέτει υπόγειο. Πιο συγκεκριμένα, το κτίριο αποτελείται από εσωτερικά υποστυλώματα διαστάσεων 600 x 600 [mm] και 900 x 250 [mm] εξωτερικά στον όροφο του ισογείου, των οποίων οι διαστάσεις μειώνονται σταδιακά όσο αυξάνονται οι όροφοι μέχρι την κορυφή του κτιρίου. Περιμετρικά, ο φορέας αποτελείται από δοκούς 250 x 500 [mm], οι οποίες διατηρούν τις διαστάσεις τους καθ' ύψος. Ομοίως και οι εσωτερικές δοκοί με διαστάσεις 200 x 600 [mm]. Αναλυτικά φαίνονται οι διαστάσεις των υποστυλωμάτων και των δοκών στις κατόψεις των ορόφων που παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Σχήμα 3.1 Κάτοψη Ιου ορόφου.

Στον 3° και 4° όροφο οι διαστάσεις των υποστυλωμάτων αλλάζουν σε 700 x 250 [mm] εξωτερικά και 500 x 500 [mm] εσωτερικά.



Σχήμα 3.2 Κάτοψη 3ου ορόφου.

Στον 5° και 6° όροφο, τα εξωτερικά υποστυλώματα έχουν διαστάσεις 500 x 250 [mm], ενώ τα εσωτερικά 400 x 400 [mm], καθώς έχουν μειωθεί οι διαστάσεις και των γωνιακών υποστυλωμάτων.



Σχήμα 3.3 Κάτοψη 5ου ορόφου.



Τέλος, στο
ν $7^{\rm o}$ όροφο καταλήγουν σε εξωτερικά 350 x 250 [mm] και εσωτερικά 300 x 300 [mm].

Σχήμα 3.4 Κάτοψη 7ου ορόφου.

3.2 Προσομοίωση φορέα

Για την προσομοίωση του φορέα και την εφαρμογή των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, SeismoStruct 2018. Το SeismoStruct παρέχει τη δυνατότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς κτιριακών πλαισιακών μοντέλων υπό στατική ή δυναμική φόρτιση, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις γεωμετρικές μη γραμμικότητες, όσο και την ανελαστικότητα των υλικών.

Μερικά από τα χαρακτηριστικά ως προς την προσομοίωση και τις αναλύσεις που διαθέτει το SeismoStruct είναι:

- 8 διαφορετικοί τύποι αναλύσεων, όπως δυναμική και στατική ανάλυση χρονοϊστορίας, στατική υπερωθητική ανάλυση, προσαυξητική δυναμική, ιδιομορφική, κ.α.,
- Μεγάλο αρχείο μοντέλων προσομοίωσης υλικών, όπως μη γραμμικά μοντέλα σκυροδέματος, μη γραμμικά μοντέλα χάλυβα, κ.α.
- Η κατανομή της μη γραμμικότητας κατά μήκος του στοιχείου και σε επίπεδο διατομής, επιτρέποντας την ακριβή εκτίμηση βλάβης στο στοιχείο, καθώς και την αριθμητική ισορροπία και ακρίβεια σε πολύ υψηλά επίπεδα έντασης, καθιστώντας ικανό τον ακριβή υπολογισμό του φορτίου αστοχίας των κατασκευών.

Το SeismoStruct αποτελείται από τρεις βασικές λειτουργίες: Pre-Processor, στην οποία προσδιορίζονται τα απαραίτητα δεδομένα για τη δημιουργία του δομικού μοντέλου, Processor, στην οποία διεξάγεται η επιλεχθείσα ανάλυση και Post-Processor, στην οποία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής.

Μια ειδική εφαρμογή έχει εισαχθεί στο πρόγραμμα με σκοπό τη διευκόλυνση της δημιουργίας κτιριακών μοντέλων, το Building Modeller. Με τη χρήση του συγκεκριμένου υποπρογράμματος, έγινε η προσομοίωση κάθε ορόφου με βάση τους ξυλοτύπους των αρχιτεκτονικών σχεδίων.

Όσων αφορά τις δοκούς και τα υποστυλώματα, χρησιμοποιήθηκε ο ανελαστικός τύπος στοιχείου «Inelastic force-based plastic hinge frame element type – infrmFBPH» σε όλες τις αναλύσεις. Η ανελαστικότητα του στοιχείου συγκεντρώνεται

στις πλαστικές αρθρώσεις που βρίσκονται στις άκρες των μελών. Αυτό έχει ως πλεονέκτημα όχι μόνο το μειωμένο χρόνο ανάλυσης, δεδομένου ότι η διακριτοποίηση γίνεται μόνο στο μήκος της πλαστικής άρθρωσης, αλλά και τον εντοπισμό των θέσεων που εμφανίζεται. Για την επίτευξη επαρκούς διακριτοποίησης ορίζονται section fibres. Ο ιδανικός αριθμός των section fibres για τις δοκούς και τα υποστυλώματα, ο οποίος είναι ικανός να εξασφαλίσει τη σωστή κατανομή των τάσεων – παραμορφώσεων στις διατομές των στοιχείων, ποικίλει ανάλογα με το σχήμα και τα χαρακτηριστικά του υλικού της διατομής, αλλά και από το βαθμό της ανελαστικότητας στον οποίο θα υποβληθεί.

3.2.1 Υλικά

Κατά την ανάλυση του φορέα χρησιμοποιούνται μέσες τιμές για τα χαρακτηριστικά των υλικών, καθώς σκοπός της ανάλυσης είναι η σεισμική αποτίμηση και όχι ο σχεδιασμός.

• Σκυρόδεμα

Για την κατασκευή του κτιρίου χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα B225 (μέση αντοχή κύβου 22,5 MPa), το οποίο αντιστοιχεί σε σκυρόδεμα ποιότητας C16/20 κατά Ευρωκώδικα 2, με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή κυλίνδρου: f_{ck} = 16 MPa
- Μέση θλιπτική αντοχή: $f_{cm} = 24$ MPa (= $f_{ck} + 8$)
- Μέτρο Ελαστικότητας: Ε = 23 GPa

Για τη διεξαγωγή της **ιδιομορφικής ανάλυσης** κατά την οποία προσδιορίζονται τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε το ελαστικό μοντέλο υλικού για την προσομοίωση του σκυροδέματος «el_mat». Για την πλήρη περιγραφή των μηχανικών χαρακτηριστικών του συγκεκριμένου υλικού, είναι απαραίτητη η εισαγωγή δύο παραμέτρων:

- > Το μέτρο Ελαστικότητας,
-
 Το ειδικό βάρος του σκυροδέματος (για άοπλο σκυρόδεμ
α $\gamma = 24 \; {\rm KN/m^3})$



Σχήμα 3.5 Ελαστικό μοντέλο υλικού σκυροδέματος el_mat.

Για τη διεξαγωγή των ανελαστικών αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε το μονοαξονικό, μη γραμμικό μοντέλο σκυροδέματος «con_ma» του Mander et al. (1988). Η περίσφιγξη που προκαλείται από τον εγκάρσιο οπλισμό είναι ενσωματωμένη στο μοντέλο.



Σχήμα 3.6 Ανελαστικό μοντέλο υλικού σκυροδέματος con_ma.

Χάλυβας οπλισμού

Ο χάλυβας του διαμήκους οπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του κτιρίου είναι StIII (μέση τιμή τάσεως διαρροής 430 MPa και τάσεως αστοχίας 630 MPa).

Όπως και για το σκυρόδεμα, έτσι και για τον χάλυβα οπλισμού στην ιδιομορφική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το ελαστικό μοντέλο υλικού με μέτρο Ελαστικότητας 200 GPa και ειδικό βάρος 78 KN/m³.

Edit Material Properties												×
Material Name: 5400 Material Type: el_mat V	Vote: Go the Constitutive Mode menu to define which material m displayed here	Cancel Para els ' Settings nodels are	ameters for Code-b Existing_Material Mea	ased Checks ONew_Mate	erial	1.70 1.60 1.50 1.40 1.30 1.20 1.10))					
Elastic material model		Help	Lower-bound str	ength value, μ-σ	1e20	1.00)					
Sample Plot			Comple Dist			80) 70))				/	
Material Propercies	Modulus of elasticity (kPa)	2,0000E+008	(Pseudo)Time	Strain		60) 50))			/		
	Specific Weight (M/m3)	78.00	1	0,002		40						
	opeane weight (wynio)	10,00	2	-0,002		20 g	j			<i>_</i>		
			3	0,002		10 E			/	·		
			4	-0,002		9 -10	j					
			5	0,004		び -201 -301						
			6	-0,004		-40	j					
			7	0,004		-50	2	/	/			
			8	-0,004		-70	<u></u>					
			9	0,008		-80	2					
			10	-0,008		-1.00	í					
			11	0,008		-1.10		/				
			12	-0,008		-1.20	/					
			13	0,008		-1.40) /					
			14	-0,008		-1.50	31./					
			15	0,008		-1.70	j					
			16	-0,008			-0,008 -0,0	006 -0,004	-0,002 0 Strain [0,002 -]	3,004 O,C	06 0,008

Σχήμα 3.7 Ελαστικό μοντέλο υλικού χάλυβα el_mat.

Όσων αφορά τις ανελαστικές αναλύσεις, για το υλικό του χάλυβα οπλισμού χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο «stl_mp». Πρόκειται για ένα μονοαξονικό μοντέλο χαλυβα (Yassin [1994]), βασισμένο στη σχέση τάσεως – παραμορφώσεως που προτάθηκε από τους Menegotto and Pinto [1973]. Επιπλέον, έχει εισαχθεί ένας κανόνας μνήμης (Fragiadakis et al [2008]) για μεγαλύτερη αριθμητική ακρίβεια κάτω από παροδικές σεισμικές φορτίσεις. Η επιλογή του συγκεκριμένου μοντέλου είναι ιδανική για την προσομοίωση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, ιδιαίτερα αυτών που υπόκεινται σε πολύπλοκες ιστορίες φορτίσεων όπου συμβαίνουν σημαντικές εναλλαγές φορτίων.



Σχήμα 3.8 Ανελαστικό μοντέλο υλικού χάλυβα stl_mp.

3.2.2 Διατομές μελών

Τα δομικά στοιχεία της κατασκευής εισήχθησαν με την εντολή «insert» του κεντρικού μενού του Building Modeler. Σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια, επιλέχθηκαν οι κατάλληλες διατομές για τις δοκούς, τα υποστυλώματα και τις πλάκες και προσδιορίστηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, ο διαμήκης και εγκάρσιος οπλισμός και το υλικό.

• Υποστυλώματα

Για τα γωνιακά υποστυλώματα επιλέχθηκε ο τύπος διατομής «Reinforced concrete Lshaped column section - rclcs», ο οποίος αναφέρεται σε διατομές υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος μορφής L.



Σχήμα 3.9 Διατομή τύπου reles γωνιακού υποστυλώματος Ιου ορόφου με τις λεπτομέρειες οπλισμού.

Για τα περιμετρικά ορθογώνια υποστυλώματα και τα εσωτερικά τετραγωνικά επιλέχθηκε η διατομή «Reinforced concrete rectangular section – rcrs».



Σχήμα 3.10 Διατομή τύπου rcrs περιμετρικού υποστυλώματος 1ου ορόδου με τις λεπτομέρειες οπλισμού.



Σχήμα 3.11 Διατομή τύπου rcrs εσωτερικού υποστυλώματος Ιου ορόφου με τις λεπτομέρειες οπλισμού.

Αναλυτικά οι διαστάσεις, ο διαμήκης και ο εγκάρσιος οπλισμός των διατομών των υποστυλωμάτων σε κάθε όροφο παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

		1	I	
	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός
C1 (γωνιακό)	70	25	8Ø20	Ø8/40
C2	90	25	8Ø18+2Ø14	Ø8/12
C3	90	25	8Ø20	Ø8/12
C4	90	25	8Ø18+2Ø14	Ø8/12
C5 (γωνιακό)	70	25	8Ø20	Ø8/40
C6	25	90	8Ø18+2Ø14	Ø8/12
C7	60	60	16 Ø 20	Ø10/13
C8	60	60	16 Ø 20	Ø10/13
C9	60	60	16 Ø 20	Ø10/13
C10	25	90	8Ø18+2Ø14	Ø8/12
C11	25	90	8Ø18+2Ø14	Ø8/12
C12	60	60	16 Ø 20	Ø10/13
C13	60	60	16 Ø 20	Ø10/13
C14	60	60	16 Ø 20	Ø10/13
C15	25	90	8Ø18+2Ø14	Ø8/12
C16 (γωνιακό)	70	25	8Ø20	Ø8/40
C17	90	25	8Ø18+2Ø14	Ø8/12
C18	90	25	8Ø20	Ø8/12
C19	90	25	8Ø18+2Ø14	Ø8/12
C20 (γωνιακό)	70	25	8Ø20	Ø8/40

Πίνακας 3.1 Υποστυλώματα Ιου ορόφου.

Υποστυλώματα 2ου ορόφου	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός
C1 (γωνιακό)	70	25	8Ø20	Ø8/40
C2	90	25	8Ø18+2Ø14	Ø10/12
C3	90	25	8Ø20	Ø10/12
C4	90	25	8Ø18+2Ø14	Ø10/12
C5 (γωνιακό)	70	25	8Ø20	Ø8/40
C6	25	90	8Ø18+2Ø14	Ø10/12
C7	60	60	16 Ø 20	Ø10/13
C8	60	60	16 Ø 20	Ø10/13
С9	60	60	16 Ø 20	Ø10/13
C10	25	90	8Ø18+2Ø14	Ø10/12
C11	25	90	8Ø18+2Ø14	Ø10/12
C12	60	60	16 Ø 20	Ø10/13
C13	60	60	16 Ø 20	Ø10/13
C14	60	60	16 Ø 20	Ø10/13
C15	25	90	8Ø18+2Ø14	Ø10/12
C16 (γωνιακό)	70	25	8Ø20	Ø8/40
C17	90	25	8Ø18+2Ø14	Ø10/12
C18	90	25	8Ø20	Ø10/12
C19	90	25	8Ø18+2Ø14	Ø10/12
C20 (γωνιακό)	70	25	8Ø20	Ø8/40

Πίνακας 3.2 Υποστυλώματα 2ου ορόφου.

Πίνακας 3.3 Υποστυλώματα 3ου ορόφου.

Υποστυλώματα 3ου ορόφου	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός
C1 (γωνιακό)	70	25	12Ø16+2Ø14	Ø8/40
C2	70	25	8Ø16+2Ø14	Ø10/14
C3	70	25	4Ø20+4Ø16	Ø10/14
C4	70	25	8Ø16+2Ø14	Ø10/14
C5 (γωνιακό)	70	25	12Ø16+2Ø14	Ø8/40
C6	25	70	8Ø16+2Ø14	Ø10/15
C7	50	50	14 Ø1 8	Ø10/15
C8	50	50	4Ø20+8Ø16	Ø10/15
С9	50	50	14 Ø18	Ø10/15
C10	25	70	8Ø16+2Ø14	Ø10/15
C11	25	70	8Ø16+2Ø14	Ø10/15
C12	50	50	14 Ø18	Ø10/15

C13	50	50	4Ø20+8Ø16	Ø10/15
C14	50	50	14 Ø1 8	Ø10/15
C15	25	70	8Ø16+2Ø14	Ø10/15
C16 (γωνιακό)	70	25	12Ø16+2Ø14	Ø8/40
C17	70	25	8Ø16+2Ø14	Ø10/14
C18	70	25	4Ø20+4Ø16	Ø10/14
C19	70	25	8Ø16+2Ø14	Ø10/14
C20 (γωνιακό)	70	25	12Ø16+2 Ø 14	Ø8/40

Υποστυλώματα 4ου ορόφου	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός
C1 (γωνιακό)	70	25	12Ø16+2Ø14	Ø8/40
C2	70	25	8Ø16+2Ø14	Ø10/14
C3	70	25	4Ø20+4Ø16	Ø10/14
C4	70	25	8Ø16+2Ø14	Ø10/14
C5 (γωνιακό)	70	25	12Ø16+2Ø14	Ø8/40
C6	25	70	8Ø16+2Ø14	Ø10/15
C7	50	50	4Ø20+8Ø16	Ø8/10
C8	50	50	4Ø20+8Ø16	Ø8/10
C9	50	50	4Ø20+8Ø16	Ø8/10
C10	25	70	8Ø16+2Ø14	Ø10/15
C11	25	70	8Ø16+2Ø14	Ø10/15
C12	50	50	4Ø20+8Ø16	Ø8/10
C13	50	50	4Ø20+8Ø16	Ø8/10
C14	50	50	4Ø20+8Ø16	Ø8/10
C15	25	70	8Ø16+2Ø14	Ø10/15
C16 (γωνιακό)	70	25	12Ø16+2 Ø 14	Ø8/40
C17	70	25	8Ø16+2Ø14	Ø10/15
C18	70	25	4 Ø 20+4 Ø 16	Ø10/15
C19	70	25	8Ø16+2Ø14	Ø10/15
C20 (γωνιακό)	70	25	12Ø16+2 Ø 14	Ø8/40

Πίνακας 3.4 Υποστυλώματα 4ου ορόφου.

Υποστυλώματα 5ου ορόφου	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός
C1 (γωνιακό)	60	25	6Ø18+2 Ø20	Ø8/40
C2	50	25	4 Ø 20+2 Ø 14	Ø8/11
C3	50	25	4 Ø16 +4 Ø 14	Ø8/12
C4	50	25	4Ø20+4Ø16	Ø8/11
C5 (γωνιακό)	60	25	6Ø18+2 Ø20	Ø8/40
C6	25	50	4Ø20+2Ø14	Ø8/12
C7	40	40	4 Ø16 +4 Ø 18	Ø 8/14
C8	40	40	4Ø16+8Ø14	Ø 8/14
С9	40	40	4Ø16+4Ø18	Ø 8/14
C10	25	50	4Ø20+2Ø14	Ø8/12
C11	25	50	8Ø16+2Ø14	Ø8/12
C12	40	40	4Ø16+4Ø18	Ø 8/14
C13	40	40	4Ø16+4Ø18	Ø 8/14
C14	40	40	4Ø16+4Ø18	Ø 8/14
C15	25	50	8Ø16+2Ø14	Ø8/12
C16 (γωνιακό)	60	25	6Ø18+2 Ø20	Ø8/40
C17	50	25	4Ø20+2Ø14	Ø8/11
C18	50	25	4 Ø16 +4 Ø 14	Ø8/12
C19	50	25	4 Ø 20+2 Ø 14	Ø8/12
C20 (γωνιακό)	60	25	6Ø18+2 Ø20	Ø8/40

Πίνακας 3.5 Υποστυλώματα 5ου ορόφου.

Πίνακας 3.6 Υποστυλώματα 6ου ορόφου.

Υποστυλώματα 6ου ορόφου	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός
C1 (γωνιακό)	60	25	6Ø18+2 Ø20	Ø8/40
C2	50	25	4 Ø18 +2 Ø 14	Ø8/13
C3	50	25	4 Ø16 +4 Ø 14	Ø8/14
C4	50	25	4 Ø18 +2 Ø 14	Ø8/13
C5 (γωνιακό)	60	25	6Ø18+2 Ø20	Ø8/40
C6	25	50	4 Ø18 +2 Ø 14	Ø8/13
C7	40	40	4Ø18+4Ø14	Ø8/18
C8	40	40	4Ø16+4Ø18	Ø 8/18

C9	40	40	4Ø18+4Ø14	Ø8 /18
C10	25	50	4Ø18+2Ø14	Ø8/13
C11	25	50	4Ø20+2Ø14	Ø8/14
C12	40	40	4Ø16+4Ø18	Ø8 /19
C13	40	40	4Ø16+4Ø18	Ø8 /18
C14	40	40	4Ø16+4Ø18	Ø 8/19
C15	25	50	4Ø20+2Ø14	Ø8/14
C16 (γωνιακό)	60	25	6Ø20+2 Ø 14	Ø8/40
C17	50	25	4Ø18+2Ø14	Ø8/13
C18	50	25	4Ø16+4Ø14	Ø8/14
C19	50	25	4Ø18+2Ø14	Ø8/13
C20 (γωνιακό)	60	25	6Ø20+2 Ø 14	Ø8/40

Πίνακας 3.7 Υποστυλώματα 7ου ορόφου.

Υποστυλώματα 7ου ορόφου	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός
C1 (γωνιακό)	60	25	6Ø16+2 Ø 20	Ø8/40
C2	35	25	4Ø16	Ø8/18
C3	35	25	8 Ø 14	Ø8/19
C4	35	25	4Ø16	Ø8/18
C5 (γωνιακό)	55	25	6Ø18+2 Ø1 4	Ø8/40
C6	25	35	4Ø16	Ø8/19
C7	30	30	8 Ø 14	Ø 8/40
C8	30	30	8 Ø 14	Ø8/40
C9	30	30	8 Ø 14	Ø 8/40
C10	25	35	4Ø16	Ø8/19
C11	25	35	4Ø16	Ø8/19
C12	30	30	8 Ø 14	Ø 8/40
C13	30	30	8 Ø 14	Ø 8/40
C14	30	30	8 Ø 14	Ø8/40
C15	25	35	4Ø16	Ø8/19
C16 (γωνιακό)	55	25	6Ø16+2 Ø20	Ø8/40
C17	35	25	4Ø16	Ø8/19
C18	35	25	8 Ø 14	Ø8/19
C19	35	25	4Ø16	Ø8/19
C20 (γωνιακό)	55	25	6Ø16+2 Ø 20	Ø8/40

• Δοκοί

Όλες οι δοκοί προσομοιώθηκαν με τη διατομή «Reinforced concrete T-section – rcts», η οποία χρησιμοποιείται πιο συχνά για την προσομοίωση δοκών τύπου Τ, L ή ορθογωνικών.



Σχήμα 3.12 Διατομή δοκού τύπου rcts 2ου ορόφου με τις λεπτομέρειες οπλισμού.

Σημειώνεται πως οι δοκοί διατηρούν τις διαστάσεις τους σε όλους τους ορόφους του κτιρίου. Ο οπλισμός των δοκών διαφέρει κατά μήκος τους, για το λόγο αυτό για την προσομοίωση μιας δοκού από υποστύλωμα σε υποστύλωμα το Building Modeler δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής διαφορετικού οπλισμού στις άκρες και στη μέση του μήκους της.



Σχήμα 3.13 Εισαγωγή δοκού στο Building Modeler με τις αλλαγές του οπλισμού κατά μήκος της.

• Πλάκες

Οι πλάκες είναι τετραγωνικές, τετραεδρικές, πάχους 16 cm. Εισήχθησαν με τον ίδιο τρόπο με τις δοκούς και τα υποστυλώματα προσδιορίζοντας τις διαστάσεις, τον οπλισμό, τις στηρίξεις τους στις δοκούς και τα επιπρόσθετα κατανεμημένα φορτία (μόνιμα και κινητά). Ο οπλισμός τους είναι Ø8/20 cm και στις δύο διευθύνσεις. Με τον προσδιορισμό των πλακών, το πρόγραμμα υπολογίζει αυτόματα το συνεργαζόμενο πλάτος στις δοκούς. Η προσομοίωση των πλακών πραγματοποιείται θεωρώντας πως λειτουργούν ως διαφράγματα, δηλαδή είναι απαραμόρφωτες στο επίπεδό τους και μπορούν να κινούνται στο χώρο ως απαραμόρφωτοι δίσκοι. Εξάγοντας το μοντέλο στο περιβάλλον του SeismoStruct, τα φορτία των πλακών (ίδιο βάρος, πρόσθετα μόνιμα και κινητά φορτία) εφαρμόζονται αυτόματα στις δοκούς που τις στηρίζουν.

S 1 👔
Height 160
Support Conditions
Click on the beams to modify the support conditions
Reinforcement
Angle(°) betw. slab local axes X'-Y' and global axes X-Y
Lower reinforcement at midspan:
Along local X' axis: 8mm V / 20 🗭 cm
Along local Y' axis: 8mm \checkmark / 20 🚔 cm

Σχήμα 3.14 Εισαγωγή πλάκας στο Building Modeler.

3.2.3 Φορτία

Το εξεταζόμενο κτίριο θεωρείται ότι είναι σύνηθες κτίριο γραφείων. Το πρόγραμμα Seismostruct υπολογίζει αυτόματα το ίδιο βάρος των δομικών στοιχείων από τα οποία αποτελείται η κατασκευή, έχοντας εισάγει το ειδικό βάρος των υλικών, για τον προσδιορισμό των μόνιμων φορτίων. Επιπρόσθετα, τα φορτία που λαμβάνονται ως κατανεμημένα στις πλάκες είναι τα εξής:

- Επικάλυψη 1,5 KN/m²,
- Εσωτερική τοιχοποιία 1,0 KN/m²,
- Κινητό 2,0 KN/m²

Ακόμη, η εξωτερική τοιχοποιία λαμβάνεται ως επιπλέον φορτίο στις περιμετρικές δοκούς ανά m² όψεως και είναι ίσο με 3,6 KN/m².

Ο φορτιστικός συνδυασμός από τον οποίο προκύπτει η μάζα της κατασκευής προσδιορίζεται στις ρυθμίσεις στην καρτέλα Loading Combination Coefficients και είναι ο G + 0.3Q.

SeismoStruct Building	Modeller Settings			>	<
Analysis Type	Frame Elements Mo	delling	Slabs Modelling	Structural Configuration	
Loading Combination	on Coefficients	Perf	ormance Criteria	Code-based Checks	
Gravity and Live Loads Gravity Live Snow	/ Loads Coefficient Cg 1,0 e Loads Coefficient Cq 0,3 v Loads Coefficient Cs 0,0	00 30 00 requ	ired only by ASCE 41-17 an	d TBDY	
🖌 ок	Cancel		Help		

Σχήμα 3.15 Φορτιστικός συνδυασμός G+0.3Q.

3.2.4 Παραδοχές Σχεδιασμού

Το κτίριο μελετήθηκε για κατηγορία σεισμικής ζώνης Ι και τύπο εδάφους Α.

Πίνακας 3.8	Τιμές ενεργού	ς επιτάχυνσης	· σεισμικών ζωνών	στην Ελλάδα.
-------------	---------------	---------------	-------------------	--------------

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας	Εδαφική επιτάχυνση αναφοράς a _{gR} (g)
Z1	0.16
Z2	0.24
Z3	0.36

Πίνακας 3.9 Τιμές συντελεστή σπουδαιότητας γΙ κατά ΕΚ8.

Κατηγορία σπουδαιότητας		Συντελεστής σπουδαιότητας		
Ι	(μικρή σπουδαιότητα)	0.8		
II	(συνήθης σπουδαιότητα)	1.0		
III	(μεγάλη σπουδαιότητα)	1.2		
IV	(πολύ μεγάλη σπουδαιότητα)	1.4		

Επομένως, η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού ισούται με $\gamma_I \cdot \alpha_{gR}$, όπου $\gamma_I = 1$ (για συνήθης σπουδαιότητας κτίρια) και $\alpha_{gR} = 0.16g$.

Κατηγορία εδάφους	S	T_B (sec)	Tc (sec)	T _D (sec)
А	1.00	0.15	0.40	2.50
В	1.20	0.15	0.50	2.50
С	1.15	0.20	0.60	2.50
D	1.35	0.20	0.80	2.50
Е	1.40	0.15	0.50	2.50

Πίνακας 3.10 Συντελεστής εδάφους και χαρακτηριστικές περίοδοι φάσματος σχεδιασμού σύμφωνα με ΕΚ8.

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα για κατηγορία εδάφους A, ο συντελεστής εδάφους είναι S=1 και οι χαρακτηριστικές περίοδοι φάσματος σχεδιασμού είναι T_B=0,15s, T_C=0.4s και T_D=2.5s.

Ο συντελεστής απόσβεσης για κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ξ=5%.

Όσον αφορά το συντελεστή συμπεριφοράς q, ο οποίος εκφράζει γενικά την ικανότητα ενός δομικού συστήματος να απορροφά ενέργεια μέσω πλάστιμης συμπεριφοράς των δομικών του μελών, χωρίς να μειώνεται δραστικά η αντοχή τους σε τοπικό και καθολικό επίπεδο, αυτός αντιστοιχεί στην τιμή 4 για το εξεταζόμενο κτίριο. Ο συντελεστής συμπεριφοράς απομειώνει τις σεισμικές επιταχύνσεις της κατασκευής λόγω μετελαστικής συμπεριφοράς, σε σχέση με τις επιταχύνσεις που θα επιβαλλόταν σε ένα απεριόριστα ελαστικό σύστημα. Δηλαδή, είναι μια προσέγγιση του λόγου των σεισμικών δυνάμεων που η κατασκευή θα δεχόταν, αν η απόκρισή της ήταν πλήρως ελαστική με ποσοστό ιξώδους απόσβεσης 5%, ως προς τις σεισμικές δυνάμεις σχεδιασμού.

Η απεικόνιση του κτιρίου μετά την εισαγωγή όλων των μελών και των χαρακτηριστικών που απαιτούνται για την προσομοίωση φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 3.16 Κάτοψη τυπικού ορόφου του κτιρίου στο Building Modeler.



Σχήμα 3.17 Τελικό προσομοίωμα του κτιρίου στο SeismoStruct.

3.3 Ιδιομορφική ανάλυση

Ολοκληρώνοντας την προσομοίωση του κτιρίου όπως περιγράφηκε αναλυτικά προηγουμένως, πραγματοποιήθηκε ιδιομορφική ανάλυση με σκοπό τη διεξαγωγή των ιδιοπεριόδων, ιδιομορφών και των αντίστοιχων ποσοστών των ιδιομορφικών μαζών. Σύμφωνα με τον ΕΚ8, το άθροισμα των ενεργών ιδιομορφικών μαζών που λαμβάνονται υπόψη στον αντισεισμικό σχεδιασμό πρέπει να είναι ίσο με το 90% της συνολικής μάζας που αντιστοιχεί στην εξεταζόμενη διεύθυνση σεισμικής δράσης. Εξήχθησαν 10 ιδιομορφές από την ανάλυση. Η 1^η ιδιοπερίοδος του κτιρίου είναι ίση με $T_1=1.088$ και αντιστοιχεί στη διεύθυνση Y με ποσοστό ενεργοποίησης μάζας 75.3%, ενώ η 2^η ιδιοπερίοδος αντιστοιχεί στη διεύθυνση X με $T_2=1,048$ με ποσοστό ενεργοποίησης μάζας της κατασκευής συγκεντρώνεται στην 8^η ιδιομορφή.

		EECTIVE	MODAL	ΜΛΟΟ			
	C 1	FECTIVE			PERCENTA	4023	
			Individ	lual Mode			
Mode	Period	[Ux]	[Uy]	[Uz]	[Rx]	[Ry]	[Rz]
1	1,084897	0,00%	75,30%	0,00%	12,38%	0,00%	0,00%
2	1,041157	75,02%	0,00%	0,00%	0,00%	9,50%	0,00%
3	1,02438	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	75,62%
4	0,3964	0,00%	12,01%	0,00%	19,01%	0,00%	0,00%
5	0,382124	11,98%	0,00%	0,00%	0,00%	14,01%	0,00%
6	0,36024	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	11,64%
7	0,233384	0,00%	4,72%	0,00%	5,00%	0,00%	0,00%
8	0,225399	4,76%	0,00%	0,00%	0,00%	3,86%	0,00%
9	0,204332	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	4,82%
10	0,154412	0,00%	3,52%	0,00%	4,98%	0,00%	0,00%
	Cumulative Mass						
Mode	Period	[Ux]	[Uy]	[Uz]	[Rx]	[Ry]	[Rz]
1	1,084897	0,00%	75,30%	0,00%	12,38%	0,00%	0,00%
2	1,041157	75,02%	75,30%	0,00%	12,38%	9,50%	0,00%
3	1,02438	75,02%	75,30%	0,00%	12,38%	9,50%	75,62%
4	0,3964	75,02%	87,32%	0,00%	31,39%	9,50%	75,62%
5	0,382124	87,00%	87,32%	0,00%	31,39%	23,51%	75,62%
6	0,36024	87,00%	87,32%	0,00%	31,39%	23,51%	87,26%
7	0,233384	87,00%	92,04%	0,00%	36,39%	23,51%	87,26%
8	0,225399	91,76%	92,04%	0,00%	36,39%	27,37%	87,26%
9	0,204332	91,76%	92,04%	0,00%	36,39%	27,37%	92,09%
10	0,154412	91,76%	95,56%	0,00%	41,37%	27,37%	92,09%

Πίνακας 3.11 Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης από το SeismoStruct.


Σχήμα 3.18 Ιη ιδιομορφή κατασκευής (κατά την Υ διεύθυνση).



Σχήμα 3.19 2η ιδιομορφή κατασκευής(κατά τη Χδιεύθυνση).



Σχήμα 3.20 3η ιδιομορφή κατασκευής (στροφική).

3.4 Προσαυξητική Δυναμική Ανάλυση (Incremental Dynamic Analysis – IDA)

3.4.1 Γενικά

Η Προσαυξητική Δυναμική Ανάλυση (IDA) είναι μια παραμετρική μέθοδος ανάλυσης για την καλύτερη εκτίμηση της απόκρισης των κατασκευών υπό σεισμικές φορτίσεις. Πρόκειται για την υποβολή ενός κατασκευαστικού μοντέλου σε μία, ή περισσότερες σεισμικές καταγραφές η καθεμία από τις οποίες κλιμακώνεται σε διάφορα επίπεδα έντασης, παράγοντας έτσι μία, ή περισσότερες καμπύλες απόκρισης έναντι των επιπέδων έντασης.

Η δημιουργία της συγκεκριμένης μεθόδου είναι αποτέλεσμα της ανάπτυξης των υπολογιστικών αναλύσεων και της ανάγκης εφεύρεσης ακριβέστερων και πολυπλοκότερων μεθόδων ανάλυσης. Έτσι, οι αναλύσεις έχουν προχωρήσει από ελαστικές στατικές σε δυναμικές ελαστικές, από μη-γραμμικές στατικές σε, τέλος, μη-γραμμικές δυναμικές. Η IDA έχει εδραιωθεί ως η πρωταρχική μέθοδος προσδιορισμού κατάρρευσης των κατασκευών και περιλαμβάνει την κατανόηση του εύρους της απόκρισης έναντι του εύρους των πιθανών επιπέδων μιας σεισμικής καταγραφής, την καλύτερη κατανόηση των επιπλοκών σε κατασκευές που υποβάλλονται σε πιο σπάνιους ή σοβαρούς σεισμούς, την παρατήρηση των αλλαγών στην απόκριση των κατασκευών καθώς το μέγεθος του σεισμού αυξάνεται κ.α.

3.4.2 Βασικές έννοιες της μεθόδου IDA για μία καταγραφή

Η μεθοδολογία έχει να κάνει με την κλιμάκωση μιας δεδομένης χρονοϊστορίας επιταχύνσεων ενός σεισμού. Το αρχικό επιταχυνσιογράφημα α_I είναι διάνυσμα με στοιχεία $\alpha_I(t_i)$, $t_i = 0$, t_I , ..., t_{n-I} . Για να υπολογίσουμε μεγαλύτερες εδαφικές κινήσεις, κλιμακώνεται ομοιόμορφα το επιταχυνσιογράφημα αυξάνοντας ή μειώνοντας το εύρος του με ένα πολλαπλασιαστή $\lambda \in [0, +\infty)$: $\alpha_{\lambda} = \lambda \cdot \alpha_I$. Για $\lambda = 1$ το επιταχυνσιογράφημα είναι το αρχικό, για $\lambda < 1$ το επιταχυνσιογράφημα είναι κλιμακωμένο προς τα κάτω, ενώ για $\lambda > 1$ είναι κλιμακωμένο προς τα πάνω.

Παρόλο που ο συντελεστής κλιμάκωσης (SF) είναι πολύ απλός τρόπος να κλιμακωθεί το επιταχυνσιογράφημα, δεν αποφέρει καμία πληροφορία για τη «δύναμη» της

κλιμακωμένης καταγραφής και της επίδρασής της σε μια κατασκευή. Μία πιο πρακτική χρήση θα είχε ένα μέτρο που θα έδινε περισσότερες πληροφορίες για τις καταστροφικές επιπτώσεις των κλιμακωμένων καταγραφών. Το μέτρο αυτό είναι γνωστό ως «μέτρο έντασης» της μονοτονικά κλιμακωμένης καταγραφής (IM) και είναι ένα μη αρνητικό βαθμωτό μέγεθος που συνιστά μια συνάρτηση IM = f_{al} (λ) που εξαρτάται από το αρχικό επιταχυνσιογράφημα, α₁ και αυξάνεται μονοτονικά με τον συντελεστή κλιμάκωσης, λ. Παραδείγματα μέτρων έντασης είναι η Μέγιστη Εδαφική Γαχύτητα, κ.α.

Για να είναι δυνατός ο έλεγχος της κατάστασης της κατασκευής καθώς αυτή υποβάλλεται στη φόρτιση, ορίζεται το «μέτρο βλάβης» (DM). Το μέτρο βλάβης είναι μια ορατή ποσότητα που είναι μέρος του αποτελέσματος της εφαρμογής τη μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης. Πιθανές επιλογές για το μέτρο βλάβης μπορούν να αποτελέσουν η μέγιστη τέμνουσα βάσης, οι στροφές των κόμβων, μέγιστες παραμορφώσεις ορόφων κ.α.

Η ανάλυση IDA μιας καταγραφής είναι μια δυναμική ανάλυση ενός μοντέλου το οποίο παραμετροποιείται από το συντελεστή κλιμάκωσης της δεδομένης χρονοϊστορίας. Διεξάγονται δυναμικές μη γραμμικές αναλύσεις του κλιμακωμένου επιταχυνσιογραφήματος, του οποίου τα μέτρα έντασης επιλέγονται έτσι ώστε να καλύπτουν όλο το εύρος από την ελαστική κατάσταση, στην ανελαστική και τέλος στην κατάρρευση της κατασκευής. Ο σκοπός είναι να καταγραφούν τα μέτρα βλάβης της κατασκευής για κάθε επίπεδο του μέτρου εντάσεως. Οι τιμές της απόκρισης που εξάγονται από τις αναλύσεις σχεδιάζονται έναντι του μέτρου εντάσεως ως συνεχείς γραμμές. Επομένως, μια καμπύλη IDA είναι το διάγραμμα μιας μεταβλητής κατάστασης (DM) που έχει καταγραφεί σε μια προσαυξητική ανάλυση, έναντι ενός ή περισσότερων μέτρων εντάσεως (IM) που χαρακτηρίζουν τα εφαρμοσμένα κλιμακωμένα επιταχυνσιογραφήματα.

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα των αποτελεσμάτων που μπορεί να δώσει μια ανάλυση IDA μιας καταγραφής. Πρόκειται για μεταλλικό κτίριο, 20 ορόφων, με ιδιοπερίοδο T₁= 4 s, περιλαμβάνοντας στην ανάλυση τα φαινόμενα P – Δ, το οποίο υποβάλλεται στο σεισμό El Centro, του 1940.



Σχήμα 3.21 Καμπύλη IDA μιας καταγραφής σε σύγκριση με την αντίστοιχη καμπύλη Pushover (Vamvatsikos & Cornell, 2002).



Σχήμα 3.22 Μέγιστα drifts ορόφων σε σχέση με το ύψος του κτιρίου που προκύπτουν από την ανάλυση IDA για μία καταγραφή (Vamvatsikos & Cornell, 2002).

3.4.3 Η μέθοδος ΙDA με χρήση πολλών καταγραφών

Είναι προφανές, πως μια καταγραφή μόνη της δεν μπορεί να αποδώσει τη συμπεριφορά που θα εμφανίσει το κτίριο σε μελλοντικά γεγονότα. Η IDA εξαρτάται από την επιλεχθείσα καταγραφή, έτσι για την πλήρη κάλυψη του εύρους της απόκρισης μια κατασκευής θα χρειαστεί τη χρήση πολλών καταγραφών.

Μία μελέτη IDA πολλών καταγραφών είναι η συλλογή πολλών μελετών μιας μονής καταγραφής, του ίδιου κατασκευαστικού μοντέλου, υπό διαφορετικά επιταχυνσιογραφήματα. Με τον τρόπο αυτό, παράγεται ένα σετ καμπυλών IDA, οι οποίες μπορούν να σχεδιαστούν στο ίδιο διάγραμμα όταν έχουν κοινή επιλογή μέτρου εντάσεως (IM) και το ίδιο μέτρο βλάβης (DM).



Σχήμα 3.23 Παράδειγμα μελέτης IDA τριάντα καταγραφών ενός 5-όροφου κτιρίου με T_1 =1.8s (Vamvatsikos & Cornell, 2002).

3.4.4 Σύγκριση της IDA με την στατική ανελαστική ανάλυση Pushover

Η κοινή μέθοδος της επαυξητικής φόρτισης μεταξύ της IDA (Incremental Dynamic Analysis) και της υπερωθητικής ανελαστικής ανάλυσης (pushover), απαιτεί τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που διεξάγουν. Καθώς περιγράφουν το ίδιο κτίριο, θα περιμέναμε κάποια συσγέτιση μεταξύ των δύο καμπυλών, ακόμα περισσότερα όταν πρόκειται για την καμπύλη της pushover και της «μέσης» καμπύλης IDA, καθώς η τελευταία παρουσιάζει μικρότερη μεταβλητότητα από καταγραφή σε καταγραφή. Για να σχεδιάσουμε τις δύο καμπύλες στο ίδιο γράφημα, θα πρέπει να εκφράσουμε και την καμπύλη pushover στις ίδιες συντεταγμένες με την αντίστοιχη καμπύλη IDA (μέτρο έντασης IM και μέτρο βλάβης DM). Ενώ τα περισσότερα DMs μπορούν να αποκτηθούν εύκολα και για την στατική και για τη δυναμική ανάλυση, δεν ισχύει το ίδιο και για τα IMs, όπως η τέμνουσα βάσης να μετατραπεί σε φασματική επιτάγυνση. Η προτεινόμενη μέθοδος είναι να προσαρμοστεί η «ελαστική δυσκαμψία» της pushover ώστε να έχει την ίδια τιμή με της IDA, ταιριάζοντας τις ελαστικές περιοχές τους για παράδειγμα. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί, διαιρώντας την τέμνουσα βάσης με τη μάζα του κτιρίου, το οποίο αρκεί για τα μονοβάθμια συστήματα, ενώ για τα πολυβάθμια ο λόγος αυτός πολλαπλασιάζεται με κατάλληλο συντελεστή.

Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.24, όπου σχεδιάζεται η καμπύλη pushover, η οποία διεξήχθη χρησιμοποιώντας την κατανομή δυνάμεων ως προς την 1^η ιδιομορφή, σε σχέση με τη μέση καμπύλη IDA ενός 20ώροφου μεταλλικού κτιρίου με πλάστιμες συνδέσεις και για ένα 5-ώροφο μεταλλικό πλαίσιο με συνδέσμους δυσκαμψίας Σχήμα 3.25, θέτοντας ως συντεταγμένες τη φασματική επιτάχυνση S_a (T₁, 5%) και το θ_{max} . Είναι ξεκάθαρο πως και οι δύο καμπύλες έχουν παρόμοια εύρη τιμών του DM. Ωστόσο, η καμπύλη IDA ανεβαίνει στο διάγραμμα για πολύ μεγαλύτερες τιμές του IM, από την pushover. Παρόλο που, η ποσοτική συσχέτιση μεταξύ των δύο καμπυλών είναι δύσκολη και απαιτώντας περαιτέρω μελέτη, μπορούν να γίνουν κάποιες γενικές παρατηρήσεις που επιτρέπουν την εκτίμηση της μορφής της καμπύλης IDA παρατηρώντας απλά την καμπύλη pushover.

 Κατασκευαστικά, ο ελαστικός κλάδος της pushover προσεγγίζει ικανοποιητικά αυτόν της καμπύλης IDA, συμπεριλαμβανομένου του πρώτου σημείου ανελαστικότητας να εμφανίζεται στις ίδιες τιμές των ΙΜ και DM και για τις δύο καμπύλες.

- Η περιοχή μειωμένης, αλλά μη αρνητικής δυσκαμψίας της pushover σχετίζεται με την IDA με τον κανόνα των ίσων μετατοπίσεων (για κατασκευές μεσαίας περιόδου). Στην πραγματικότητα, το σχεδόν ελαστικό μέρος της IDA, συχνά προϋπάρχει ενός τμήματος αυξημένης δυσκαμψίας («κράτυνση»). Σε αντίθεση, κατασκευές μικρότερης περιόδου παρουσιάζουν συνήθως μείωση δυσκαμψίας («χαλάρωση»).
- Η αρνητική κλίση στην καμπύλη pushover οφείλεται σε μια περιοχή χαλάρωσης της IDA, που οδηγεί σε κατάρρευση, στην περίπτωση της IDA είναι οριζόντια γραμμή, εκτός κι αν σταματήσει πριν φτάσει σε μηδενικές τιμές των IM, σε ένα μη –αρνητικό σημείο της καμπύλης pushover.
- Η μη-αρνητική περιοχή της pushover που ακολουθεί μετά την αρνητική κλίση που έχει προκαλέσει σημαντική μείωση του ΙΜ, στην ΙDA παρουσιάζεται ως ένας νέος, τροποποιημένος κανόνας των «ίσων μετατοπίσεων», ο οποίος έχει μικρότερη δυσκαμψία, από τον κανόνα που ισχύει στην ελαστική περιοχή.



Σχήμα 3.24 Μέση καμπύλη IDA σε σύγκριση με τη στατική ανελαστική καμπύλη pushover για ένα 20-ώροφο κτίριο με TI=4s (Vamvatsikos & Cornell, 2002).



Σχήμα 3.25 Καμπύλη IDA σε σύγκριση με την καμπύλη pushover για ένα 5-ώροφο κτίριο με TI=1,8s (Vamvatsikos & Cornell, 2002).

3.4.5 Εφαρμογή της ΙDA στο μοντέλο

Η Προσαυξητική Δυναμική Ανάλυση εφαρμόσθηκε στο εξεταζόμενο κτίριο για 25 καταγραφές διαφορετικών σεισμών. Ο στόχος ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς της κατασκευής σε καταγραφές κοντινού πεδίου, μη παλμικές και ουδέτερες (συντελεστής συσχέτισης PI < 0.65).

Το κριτήριο για την επιλογή των επιταχυνσιογραφημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση, ήταν η τιμή της πλαστιμότητας που απαιτούν από την κατασκευή με δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο αυτή που προέκυψε από την ιδιομορφική ανάλυση (T = 1.04 s για τη X διεύθυνση όπου εφαρμόζονται οι χρονοϊστορίες). Η διάκριση αυτή έγινε εξετάζοντας το διάγραμμα της απαίτησης πλαστιμότητας (για συγκεκριμένο συντελεστή συμπεριφοράς, q=4) που δίνει η κάθε καταγραφή σε σχέση με διάφορες τιμές περιόδων που αντιστοιχούν στις κατασκευές. Επιλέγονται καταγραφές όπου δίνουν είτε σχετικά μικρή απαίτηση (μ≤4), είτε αρκετά μεγάλη (μ≥7). Στον **Πίνακας 3.12** παρουσιάζονται οι επιλεχθείσες καταγραφές με τα αναλυτικά στοιχεία τους.

	Name in our research	Record Sequence Number	EQID	Earthquake Name	YEAR	Station Name	Station ID No.	Earthquake Magnitude	PGV (cm/sec)
1	6	6	0006	Imperial Valley-02	1940	El Centro Array #9	117	6,95	3,1299E+01
2	319	319	0073	Westmorland	1981	Westmorland Fire Sta	11369	5,90	3,9750E+01
3	558	558	0103	Chalfant Valley-02	1986	Zack Brothers Ranch	54428	6,19	4,1409E+01
4	721	721	0116	Superstition Hills-02	1987	El Centro Imp. Co. Cent	1335	6,54	4,3670E+01
5	949	949	0127	Northridge-01	1994	Arleta - Nordhoff Fire Sta	24087	6,69	2,9289E+01
6	1003	1003	0127	Northridge-01	1994	LA - Saturn St	90091	6,69	3,9504E+01
7	1012	1012	0127	Northridge-01	1994	LA 00	-999	6,69	2,7644E+01
8	1508	1508	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU072	-999	7,62	5,7811E+01
9	1194	1194	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY025	-999	7,62	4,1621E+01
10	1595	1595	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU110	-999	7,62	5,2004E+01
11	1540	1540	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU116	-999	7,62	4,2122E+01
12	1546	1546	0137	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU122	-999	7,62	4,2605E+01
13	H1-25	86	1082	Northridge-01	1994	Sun Valley - Roscoe Blvd	90006	6,69	22,21198047
14	H2-47	107	1236	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY088	-999	7,62	20,48493751
15	H1-7	26	521	N. Palm Springs	1986	Hurkey Creek Park	5043	6,06	7,443024533
16	H1-51	162	1536	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU110	-999	7,62	67,5517713
17	H2-4	130	88	San Fernando	1971	Santa Felita Dam (Outlet)	285	6,61	6,49336375
18	H1-12	80	787	Loma Prieta	1989	Palo Alto - SLAC Lab	1601	6,93	37,45573369
19	H2-88	184	4865	Chuetsu-oki	2007	Tani Kozima Nagaoka	65038	6,8	35,36430101
20	H2-68	113	1545	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU120	-999	7,62	36,92943723
21	H1-76	59	4865	Chuetsu-oki	2007	Tani Kozima Nagaoka	65038	6,8	30,89765353
22	H1-49	58	1508	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU072	-999	7,62	71,79984563
23	H2-5	132	95	Managua, Nicaragua-01	1972	Managua, ESSO	3501	6,24	26,07645822
24	H2-51	72	1297	Chi-Chi, Taiwan	1999	HWA051	-999	7,62	18,47880652
25	864	864	0125	Landers	1992	Joshua Tree	22170	7,28	3,2238E+01

Πίνακας 3.12 Χαρακτηριστικά των πραγματικών καταγραφών που επιλέχθηκαν για την εφαρμογή της προσαυζητικής δυναμικής ανάλυσης από τη βάση PEER-NGA.

Για τις επιλεγθείσες σεισμικές καταγραφές είναι γνωστά τα διαγράμματα απαίτησης πλαστιμότητας – περιόδου κατασκευής, χρονοϊστορία ταχύτητας, φασματική απόκριση – περιόδου κατασκευής και τα στοιχεία των παλμών που έχουν εξαχθεί από γρονοϊστορίες ταχύτητας για την ταξινόμηση των καταγραφών, τις συμπεριλαμβανομένων των περιόδων των παλμών και του συντελεστή συσχέτισης. Στο Σχήμα 3.26 και Σχήμα 3.27, παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο διαγράμματα απαίτησης πλαστιμότητας σε σύγκριση με την περίοδο, μιας καταγραφής η οποία αντιστοιχεί σε μικρή απαίτηση πλαστιμότητας για την υπό μελέτη κατασκευή ($\mu \leq 4$) και μιας που αντιστοιχεί σε μεγάλη απαίτηση πλαστιμότητας ($\mu \ge 7$). Επίσης, στον συγκεντρωτικό Πίνακας 3.13 παρουσιάζονται οι συντελεστές συσχέτισης των καταγραφών.



Σχήμα 3.26 Διάγραμμα απαίτησης πλαστιμότητας - περιόδου για την καταγραφή H1-25, όπου με κόκκινη διαγράμμιση φαίνεται η απαίτηση πλασιμότητας που αντιστοιχεί στο εξεταζόμενο κτίριο (μ =2,9).



Σχήμα 3.27 Διάγραμμα απαίτησης πλαστιμότητας - περιόδου για την καταγραφή H2-68, όπου με κόκκινη διαγράμμιση φαίνεται η απαίτηση πλαστιμότητας που αντιστοιχεί στο εξεταζόμενο κτίριο (μ =11,9).

Πίνακας 3.13 Επιταχυνσιογραφήματα και οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης και απαίτηση πλαστιμότητας.

Name in our research	PI	μ
6	0,47	4
319	0,61	7
558	0,52	4
721	0,55	7,5
949	0,43	2,8
1003	0,56	2,5
1012	0,48	4
1508	0,4	1,8
1194	0,56	11,68
1595	0,56	3,5
1540	0,5	23
1546	0,6	8

111.25	0.27	2.0
HI-25	0,37	2,9
H2-47	0,46	8,6
H1-7	0,64	13,8
H1-51	0,54	9,8
H2-4	0,43	2,6
H1-12	0,52	2
H2-88	0,41	2,9
H2-68	0,53	11,9
H1-76	0,38	3,5
H1-49	0,422	3
H2-5	0,441	2,4
H2-51	0,509	2,9
864	0,404	3,7

4 Αποτελέσματα αναλύσεων

Εφαρμόζοντας την Προσαυξητική Δυναμική Ανάλυση στις παραπάνω καταγραφές, μέσω του προγράμματος SeismoStruct, προκύπτουν οι καμπύλες IDA, των οποίων ο τρόπος διεξαγωγής παρουσιάσθηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.4.2. Κάθε επιταχυνσιογράφημα από τις 25 καταγραφές, κλιμακώνεται καταλλήλως (μεγεθύνεται και σμικρύνεται), έτσι ώστε η μη-γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας να καλύπτει ικανοποιητικά το φάσμα της παραμορφωσιακής ικανότητας του φορέα. Σημειώνεται πως, ως μέτρο έντασης για όλες τις καμπύλες επιλέχθηκε η φασματική επιτάχυνση, που αντιστοιχεί στην περίοδο της κατασκευής (Sa) για κάθε επιταχυνσιογράφημα και ως μέτρο βλάβης η μέγιστη μετακίνηση οροφής (d).



Σχήμα 4.1 Καμπύλη IDA καταγραφής 6.



Σχήμα 4.2 Καμπύλη IDA καταγραφής 319.



Σχήμα 4.3 Καμπύλη IDA καταγραφής 558.



Σχήμα 4.4 Καμπύλη IDA καταγραφής 721.



Σχήμα 4.5 Καμπύλη IDA καταγραφής 949.



Σχήμα 4.6 Καμπύλη IDA καταγραφής 1003.



Σχήμα 4.7 Καμπύλη IDA καταγραφής 1012.



Σχήμα 4.8 Καμπύλη IDA καταγραφής 1194.



Σχήμα 4.9 Καμπύλη IDA καταγραφής 1508.



Σχήμα 4.10 Καμπύλη IDA καταγραφής 1540.



Σχήμα 4.11 Καμπύλη IDA καταγραφής 1546.



Σχήμα 4.12 Καμπύλη IDA καταγραφής 1595.



Σχήμα 4.13 Καμπύλη IDA καταγραφής Η1-51.

Αποτελέσματα αναλύσεων



Σχήμα 4.14 Καμπύλη IDA καταγραφής Η1-25.



Σχήμα 4.15 Καμπύλη IDA καταγραφής H2-68.



Σχήμα 4.16 Καμπύλη IDA καταγραφής Η1-7.



Σχήμα 4.17 Καμπύλη IDA καταγραφής Η2-47.



Σχήμα 4.18 Καμπύλη ΙDA καταγραφής Η1-12.



Σχήμα 4.19 Καμπύλη IDA καταγραφής Η2-4.



Σχήμα 4.20 Καμπύλη IDA καταγραφής H2-88.



Σχήμα 4.21 Καμπύλη IDA καταγραφής Η1-76.



Σχήμα 4.22 Καμπύλη IDA καταγραφής Η1-49.



Σχήμα 4.23 Καμπύλη IDA καταγραφής H2-5.



Σχήμα 4.24 Καμπύλη IDA καταγραφής H2-51.



Σχήμα 4.25 Καμπύλη IDA καταγραφής 864.

Το συγκεντρωτικό γράφημα με όλες τις καμπύλες IDA που προέκυψαν από τις αναλύσεις παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.26, το οποίο μπορεί να μας δώσει μια πιο ξεκάθαρη εικόνα για τα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.26 Συγκεντρωτικό διάγραμμα των καμπυλών IDA που προέκυψαν από τις αναλύσεις των καταγραφών.

Όπως παρατηρείται, το διάγραμμα χωρίζεται σε δύο περιοχές: η μία αποτελείται από τις καμπύλες οι οποίες έχουν ανοδική πορεία και φτάνουν σε μεγάλες τιμές της φασματικής επιτάχυνσης με σχετικά μικρές μετατοπίσεις οροφής και η δεύτερη περιοχή στο διάγραμμα, αποτελείται από καμπύλες οι οποίες καταλαμβάνουν το κάτω μέρος του γραφήματος, δε φτάνουν σε μεγάλες τιμές της φασματικής επιτάχυνσης και έχουν πολύ μεγαλύτερες μετατοπίσεις οροφής για μικρές φασματικές επιτάχυνσης και έχουν πολύ μεγαλύτερες μετατοπίσεις οροφής για μικρές φασματικές επιταχύνσεις. Οι καταγραφές που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία είναι αυτές των οποίων οι απαιτήσεις πλαστιμότητας της κατασκευής δεν ξεπερνούν την τιμή $\mu = 4$, ενώ στη δεύτερη κατηγορία, ανήκουν οι καταγραφές οι οποίες αντιστοιχούν σε μεγάλες απαιτήσεις πλαστιμότητας με $\mu > 7$. Με λίγα λόγια, οι καμπύλες IDA με αντίστοιχο $\mu > 7$ ακολουθούν σε γενικές γραμμές τη μορφή της καμπύλης pushover, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.27**, όπου είναι σχεδιασμένη και η καμπύλη pushover.



Σχήμα 4.27 Διάγραμμα των καμπυλών IDA και της Pushover.

Τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα της Προσαυξητικής Δυναμικής Ανάλυσης, φαίνονται συγκρίνοντας επίσης τα drifts των ορόφων καθ' ύψος του κτιρίου από καταγραφές που αντιστοιχούν στην ίδια φασματική επιτάχυνση.

Δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα ύψους ορόφου – μέγιστης διαφορικής μετακίνησης ορόφου για δύο ομάδες καταγραφών από τις 25 που μελετήθηκαν, ώστε να ταυτίζονται οι φασματικές επιταχύνσεις τους. Προκύπτουν και εδώ ανάλογα αποτελέσματα, δηλαδή οι διαφορικές μετακινήσεις των ορόφων για αυτές που έχουν υψηλή απαίτηση πλαστιμότητας είναι αρκετά μεγαλύτερες από αυτές των καταγραφών με χαμηλή απαίτηση πλαστιμότητας για τις ίδιες τιμές φασματικής επιτάχυνσης.

Οι καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν για τα συγκεκριμένα διαγράμματα είναι οι εξής:

- H1 25 με μ=2,9
- H2 68 με μ=11,9
- 949 με μ=2,8





Σχήμα 4.28 Διάγραμμα ύψους ορόφου - διαφορικής μετακίνησης ορόφου για τις 4 καταγραφές και Sa = 0.2 g.

Αποτελέσματα αναλύσεων



Σχήμα 4.29 Διάγραμμα ύψους ορόφου - διαφορικής μετακίνησης ορόφου για τις 4 καταγραφές και Sa=0.4g.

- 6 με μ=4
- 319 με μ=7,2
- 1003 με μ=2,5



Σχήμα 4.30 Διάγραμμα ύψους ορόφου - διαφορικής μετακίνησης ορόφου για τις 3 καταγραφές και Sa=0.3g.

Είναι ενδιαφέρον, επίσης, το γεγονός ότι μελετώντας τα διαγράμματα πλαστιμότητας – περιόδου από τις επιλεχθείσες καταγραφές, παρατηρήθηκε ότι το σημείο με τη μεγαλύτερη απαίτηση πλαστιμότητας (πέρα από τα κτίρια με μικρές περιόδους όπου εκ των πραγμάτων έχουν αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας στο σχεδιασμό τους), βρίσκεται σε περίοδο περίπου ίση με το μισό της περιόδου ενός από τους παλμούς.

Αναλυτικότερα, στα επόμενα σχήματα παρατίθενται κάποια από τα διαγράμματα πλαστιμότητας ορισμένων καταγραφών και ο πίνακας με τα στοιχεία των παλμών που εξήχθησαν από αυτές.

AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	Ν	CORRELATION
15.067	3.390	2.200	50.000	0.374
27.781	1.150	1.900	90.000	0.397
9.948	3.520	3.000	135.000	0.317
10.928	1.230	5.000	120.000	0.312
11.033	4.110	1.600	180.000	0.274
7.434	2.670	4.500	290.000	0.391

Πίνακας 4.1 Στοιχεία εξαχθέντων παλμών από την καταγραφή Η1-25.



Σχήμα 4.31 Διάγραμμα πλαστιμότητας - περιόδου για την καταγραφή Η1-25.

Στο **Σχήμα 4.31**, για την καταγραφή H1-25, οι υψηλές απαιτήσεις πλαστιμότητας παρατηρούνται μεταξύ των περιόδων 1,4 s και 1,8 s. Ο πρώτος παλμός που συναντάται στην καταγραφή με περίοδο μεγαλύτερη των περιόδων αυτών, είναι ο πρώτος με Tp = 3.39s, τιμή σχεδόν διπλάσια των αναφερθέντων τιμών.

AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	Ν	CORRELATION
54.365	2.410	4.300	285.000	0.541
20.464	5.730	7.100	245.000	0.397
12.249	4.430	12.500	335.000	0.287
32.429	2.760	3.100	160.000	0.200
12.837	8.430	4.500	30.000	0.181
37.488	3.580	1.700	155.000	0.424

Πίνακας 4.2 Στοιχεία εξαχθέντων παλμών από την καταγραφή ΗΙ-51.



Σχήμα 4.32 Διάγραμμα πλαστιμότητας - περιόδου της καταγραφής ΗΙ-51.

Για την καταγραφή H1-51, οι υψηλές απαιτήσεις πλαστιμότητας αφορούν την περιοχή περιόδων κοντά στο 1s. Ο παλμός με την αμέσως μεγαλύτερη περίοδο είναι ο πρώτος με Tp = 2.4s.

Παρατηρείται, επίσης, στο φάσμα ελαστικών επιταχύνσεων ότι για περιόδους κατασκευών γύρω από την περίοδο του παλμού, η καμπύλη του φάσματος παρουσιάζει αύξηση.



Σχήμα 4.33 Διάγραμμα φασματικών επιταχύνσεων καταγραγής H1-51.

AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	Ν	CORRELATION
18.113	3.220	2.300	105.000	0.434
17.727	1.040	4.500	240.000	0.355
7.032	2.330	13.000	270.000	0.394
6.989	8.470	2.000	130.000	0.140
7.586	1.850	8.100	180.000	0.319
4.793	12.320	2.100	115.000	0.027

Πίνακας 4.3 Στοιχεία εξαχθέντων παλμών από την καταγραφή 949.



Σχήμα 4.34 Διάγραμμα πλαστιμότητας - περιόδου της καταγραφής 949.

Στην καταγραφή 949, της βάσης NGA, οι απαιτήσεις πλαστιμότητας είναι αυξημένες για περιόδους κτιρίων γύρω στο 1.5s. Πάλι ο πρώτος παλμός είναι αυτός με τη διπλάσια περίοδο Tp = 3.22 s.

Πίνακας 4.4 Στοιχεία εξαχθέντων παλμών από την καταγραφή 1546.

AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
22.670	9.200	3.000	265.000	0.599
22.664	4.480	4.300	0.000	0.457
16.701	4.460	4.100	340.000	0.363
6.716	3.070	13.500	205.000	0.230
6.750	20.000	1.700	310.000	0.092
9.896	4.660	3.700	170.000	0.181



Σχήμα 4.35 Διάγραμμα πλαστιμότητας - περιόδου της καταγραφής 1546.

Όσον αφορά την καταγραφή 1546, οι πολύ μεγάλες πλαστιμότητες παρατηρούνται σε περιόδους γύρω από 2s. Όπως φαίνεται στον Πίνακα με τα στοιχεία των παλμών, ο δεύτερος έχει περίοδο Tp = 4.48s.

AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	Ν	CORRELATION
19 406	0 560	2 500	175 000	0 500
18.400	0.000	3.500	1/5.000	0.592
8.368	3.090	1.800	5.000	0.460
15.416	0.320	3.500	55.000	0.321
14.715	0.380	2.000	130.000	0.180
11.313	0.420	2.200	190.000	0.195
1.368	7.440	2.900	55.000	0.144
12 —				
	'		1	
_				_
		0		
10				
_				-
4 8				
Ê.				
μty μ				_
nctili				
Ā 6				
-				\sim 1
4	$\ \sim $			
		~		
_	L/			-
	V			
2	1	2	3 4	
0	I	Period T (s	sec)	

Πίνακας 4.5 Στοιχεία εξαχθέντων παλμών.

Σχήμα 4.36 Διάγραμμα πλαστιμότητας - περιόδου.

Στην καταγραφή με τα στοιχεία του Πίνακα 4.5 και τις απαιτήσεις πλαστιμότητας στο Σχήμα 4.36, παρατηρείται πως υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις για κατασκευές με δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο γύρω στο 1.5s. Από τον πίνακα με τα στοιχεία των εξαχθέντων παλμών φαίνεται πως ο δεύτερος παλμός έχει ακριβώς διπλάσια περίοδο Tp = 3.09s, που σημαίνει πως ο συγκεκριμένος παλμός είναι ο σημαντικός σε αυτήν
την καταγραφή και είναι υπεύθυνος για τις απαιτήσεις αυτές στην απόκριση των κτιρίων.

Ιδιαίτερα για τη συγκεκριμένη καταγραφή, ο παλμός είναι κρυμμένος μέσα στον πρώτο παλμό και παίζει σημαντικότερο ρόλο στην απόκριση των κατασκευών. Φαίνεται επίσης, από το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων παρουσιάζει μια κωδωνοειδή επαύξηση στο σημείο περιόδων που ταυτίζεται με την περίοδο του παλμού, δηλαδή για T=3s.



Σχήμα 4.37 Χρονοϊστορία ταχύτητας όπου φαίνετα το άθροισμα των 2 πρώτων παλμών.



Σχήμα 4.38 Χρονοϊστορία ταχύτητας όπου φαίνεται ο 2ος παλμός.



Σχήμα 4.39 Φάσμα επιταχύνσεων της καταγραφής όπου φαίνεται η επαύξηση για T=3s.

Πίνακας 4.6 Στοιχεία εξαχθέντων παλμών από την καταγραφή 1595.

AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N 105.000	CORRELATION
		2.900		
27.448	3.220	5.700	0.000	0.570
17.611	4.310	4.000	195.000	0.304
5.483	1.980	30.300	190.000	0.205
33.477	0.900	3.100	25.000	0.230
4.905	9.050	3.500	240.000	0.252



Σχήμα 4.40 Διάγραμμα πλαστιμότητας - περιόδου της καταγραφής 1595.

Τέλος, ένα ακόμη παράδειγμα είναι η καταγραφή 1595, η οποία παρουσιάζει αυζημένες αυζημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας για περιόδους κατασκευών γύρω στα 1.6s. Στον

Πίνακας 4.6 ο δεύτερος παλμός έχει περίοδο Tp = 3.22s, τον διπλάσιο από αυτήν στις κατασκευές.

Έχοντας παραθέσει, λοιπόν, αυτά τα παραδείγματα, είναι εύλογο να καταλήξουμε στο συμπέρασμα πως μέσα στις καταγραφές που μελετήθηκαν υπάρχουν κρυμμένοι παλμοί, οι οποίοι για συγκεκριμένες περιόδους κτιρίων κρίνονται κρίσιμοι, καθώς αυξάνουν τις απαιτήσεις στο σχεδιασμό τους.

Σύμφωνα με την ως τώρα ανεπτυγμένη θεωρία, το συμπέρασμα αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη φύση και την κατάταξη των συγκεκριμένων καταγραφών.

Συμπεράσματα

5 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση του παλμικού περιεχομένου καταγραφών κοντινού πεδίου, οι οποίες δεν κατατάσσονται στις παλμικές σύμφωνα με τη μέθοδο ταξινόμησης που έχει προταθεί μέχρι σήμερα, αλλά πρόκειται για καταγραφές με ουδέτερα ή μη-παλμικά χαρακτηριστικά, και την επίδρασή τους σε κατασκευές. Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο αναπτύχθηκε η θεωρία της γένεσης των καταγραφών κοντινού πεδίου. Η περιοχή στην οποία επικεντρώνονται οι βλάβες κατά τη διάρκεια ενός σεισμού είναι συγκεντρωμένη γύρω από το ρήγμα και έχει διαστάσεις ανάλογες με την επιφάνεια ρηγμάτωσης. Η περιοχή αυτή ονομάζεται κοντινό πεδίο και οι εδαφικές κινήσεις που ξεκινούν από αυτήν την περιοχή και μέσα σε ένα εύρος γύρω από το ρήγμα, χαρακτηρίζονται από το φαινόμενο της κατευθυντικότητας. Το φαινόμενο αυτό, έχει μεγάλες επιπτώσεις και θεωρείται περισσότερο επικίνδυνο όταν το εξεταζόμενο σημείο βρίσκεται στη φορά της διάρρηξης (έμπροσθεν κατευθυντικότητα). Στη συνέχεια, παρουσιάσθηκαν οι θεωρίες για την εκτίμηση του δείκτη παλμικότητας σε μια καταγραφή κοντινού πεδίου. Παρατηρήθηκε πως, οι σεισμοί κοντινού πεδίου κρύβουν στη χρονοϊστορία ταχύτητάς του ορισμένους παλμούς, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την πρόκληση μεγάλων μετατοπίσεων στις κατασκευές και γενικώς, χρήζουν προσοχής. Ο Baker (Baker, 2007) ανέλυσε αυτούς τους παλμούς χρησιμοποιώντας μία μέθοδο με κυματίδια και πρότεινε το διαχωρισμό των σεισμικών καταγραφών κοντινού πεδίου σε παλμικές, μη-παλμικές και ουδέτερες. Έπειτα, περιγράφηκε η μέθοδος των Shahi and Baker (Shahi & Baker, 2011), η οποία ήταν μια τροποποιημένη εκδοχή της μεθοδολογίας του Baker για την ταξινόμηση των παλμικών καταγραφών. Τέλος, περιγράφηκε μία νέα πρόταση για τον δείκτη παλμικότητας από τους Kardoutsou et al. (Kardoutsou, Taflampas, & Psycharis, 2017), η οποία ορίζει έναν νέο δείκτη που ταυτίζεται με το συντελεστή συσχέτισης του σημαντικού παλμού και της αρχικής καταγραφής. Για την εξαγωγή του κυρίαρχου παλμού από μία καταγραφή χρησιμοποιήθηκε το κυματίδιο των Mavroeidis and Papageorgiou (Mavroeidis & Papageorgiou, 2003). Η μέθοδος εφαρμόσθηκε σε 221 καταγραφές, οι οποίες είχαν ταξινομηθεί ήδη από προηγούμενες μελέτες και συγκρίθηκαν με παλαιότερους δείκτες, όπως αυτός του Baker. Η μελέτη κατέληξε στα εξής αποτελέσματα: όσες καταγραφές έχουν δείκτη PI > 0.65 θεωρούνται παλμικές, όσες PI < 0.55 μη-παλμικές και καταγραφές οι οποίες βρίσκονται μεταξύ των δύο τιμών, χαρακτηρίζονται ως ουδέτερες.

Τελικά, ως συμπέρασμα των μελετών αυτών οι παλμικές καταγραφές έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ο συντελεστής συσχέτισης είναι μεγαλύτερος από 0,85
- Ο παλμός καταφθάνει νωρίς στη χρονοϊστορία
- > Η αρχική καταγραφή έχει μέγιστη εδαφική ταχύτητα μεγαλύτερη από 30cm/s

Αυτά, όσων αφορά τις παλμικές κινήσεις καταγραφών, οι οποίες οφείλονται κυρίως σε φαινόμενα κατευθυντικότητας, αλλά σύμφωνα με τους Kardoutsou et al. (Kardoutsou, Taflampas, & Psycharis, 2017), η κατευθυντικότητα δεν πρέπει να θεωρείται ως κριτήριο για την κατηγοριοποίηση των καταγραφών ως παλμικές, καθώς, οποιαδήποτε παλμική κίνηση έχει σημαντικές επιπτώσεις στην απόκριση μιας κατασκευής.

Ως τώρα, οι μη-παλμικές καταγραφές θεωρούνταν δευτερεύουσας σημασίας και αντιμετωπίζονταν ως κοινές σεισμικές καταγραφές. Στην παρούσα εργασία, γίνεται μελέτη των καταγραφών αυτών, καθώς και των ουδέτερων και τα συμπεράσματα που διεξάγονται οδηγούν σε αναθεώρηση της εκτίμησής τους.

Το σύνολο των κινήσεων που μελετήθηκαν, περιλαμβάνει 25 καταγραφές της βάσης PEER – NGA, που χαρακτηρίστηκαν σύμφωνα με τις παραπάνω μελέτες ως μηπαλμικές και ουδέτερες. Προκειμένου μια καταγραφή να θεωρείται μη-παλμική, πρέπει ο παλμός να φτάνει πιο αργά στη χρονοϊστορία ταχύτητας. Επίσης, θεωρείται πως οι παλμοί που εξάγονται από την καταγραφή, δεν περιλαμβάνουν σημαντικά χαρακτηριστικά του σήματος και πως η καταγραφή με την αφαίρεση του παλμού παραμένει ίδια. Οι καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν, επιλέχθηκαν με βάση την απαίτηση πλαστιμότητας που προκαλούν στην κατασκευή με ιδιοπερίοδο αυτή που προέκυψε από την ιδιομορφική ανάλυση για τη διεύθυνση επιβολής της σεισμικής φόρτισης (T χ = 1,04s).

Εφαρμόσθηκε η Επαυξητική Δυναμική Ανάλυση, χρησιμοποιώντας το λογισμικό SeismoStruct, για κάθε μία από τις παραπάνω καταγραφές. Κάθε επιταχυνσιοφράφημα κλιμακώθηκε καταλλήλως (με μεγέθυνση ή σμίκρυνση), έτσι ώστε να καλύπτει πλήρως όλο το φάσμα της παραμορφωσιακής ικανότητας του φορέα. Ο σκοπός είναι να καταγραφούν τα μέτρα βλάβης της κατασκευής για κάθε επίπεδο του μέτρου εντάσεως. Οι τιμές της απόκρισης που εξάγονται από τις αναλύσεις σχεδιάζονται έναντι του μέτρου εντάσεως ως συνεχείς γραμμές. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει μία καμπύλη, η καμπύλη IDA. Το σύνολο των καμπυλών IDA που διεξήχθησαν από κάθε επιταχυνσιογράφημα, αποτυπώθηκε σε ένα διάγραμμα, το οποίο δείχνει την εικόνα της συμπεριφοράς της κατασκευής, όταν αυτή υποβάλλεται σε καταγραφές με PI<0.65.

Είναι φανερό, πως εδαφικές κινήσεις που έχουν ταξινομηθεί ως μη-παλμικές, περιέχουν παλμούς οι οποίοι είναι σημαντικοί στην απόκριση των κατασκευών και στη μέτρηση των βλαβών τους και χρήζουν προσοχής και μελέτης. Τα χαρακτηριστικά αυτών των παλμών έχουν ομοιότητες με αυτών που περιλαμβάνονται σε παλμικές καταγραφές. Στο **Σχήμα 4.26**, παρατηρούμε πως ορισμένες καταγραφές έχουν μεγάλες απαιτήσεις πλαστιμότητας για την κατασκευή και προσεγγίζουν τη μορφή της καμπύλης Pushover, ενώ αυτές που δεν έχουν υψηλές απαιτήσεις, απομακρύνονται από αυτήν σε υψηλότερες επιταχύνσεις με μικρότερες τιμές της μετακίνησης οροφής.

Το φαινόμενο αυτό, οφείλεται στους παλμούς οι οποίοι βρίσκονται μέσα στη χρονοϊστορία ταχύτητας, οι οποίοι μπορεί να είναι αρκετά σημαντικοί ώστε να προκαλέσουν αυτή τη συμπεριφορά. Σημειώνεται, πως το εύρος των περιόδων που αντιστοιχούν σε μεγάλες απαιτήσεις πλαστιμότητας, είναι σχεδόν το μισό ενός από τους παλμούς που περιέχονται στη χρονοϊστορία ταχύτητας, γεγονός που τον καθιστά τον υπεύθυνο παλμό για τη δημιουργία αυτής της συμπεριφοράς. Επιπλέον, οι ιδιαιτερότητες των παλμών σε αυτές τις καταγραφές, παρόλο που δεν θεωρούνται παλμικές, φαίνονται και στο φάσμα επιταχύνσεων των καταγραφών, όπου για περίοδο ίση με την περίοδο του παλμού, στον οποίο οφείλονται οι αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας, παρατηρείται και αύξηση των φασματικών επιταχύνσεων.

Εν κατακλείδι, οι μη-παλμικές ή ουδέτερες καταγραφές, έχουν εξίσου σημαντικές επιπτώσεις στις κατασκευές και σχετίζονται άμεσα με την ανελαστική απόκριση της κατασκευής.

107

Βιβλιογραφία

6 Βιβλιογραφία

- Alavi, B., & Krawinkler, H. (2000). Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design. *12th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Anderson, J. C., & Bertero, V. V. (1987, August). Uncertainties in Establishing Design Earthquakes. *Journal on Structural Engineering*.
- Baker, J. W. (2007, October). Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using. Bulletin of Seismological Society of America, σσ. 1486-1501.
- Bray, J. D., & Rodriguez-Marek, A. (2004, April). Characterization of Forwarddirectivity ground motions in the near-fault region. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Fragiadakis, M., & Papadrakakis, M. (2008). MODELING, ANALYSIS AND RELIABILITY OF SEISMICALLY EXCITED STRUCTURES: COMPUTATIONAL ISSUES. International Journal of Computational Methods.
- Kardoutsou, V., Taflampas, I., & Psycharis, I. N. (2017, June). A New Pulse Indicator for the Classification of Ground Motions. *Bulletin of the Seismological Society* of America.
- Krawinkler, H., & Alavi, B. (1998). Development of improved design procedures for near-fault ground mations. Oakland, CA: SMIP98 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data.
- Mavroeidis, G. P., & Papageorgiou. (2003, June). A mathematical representation of near-fault ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- Mavroeidis, G. P., Dong, G., & Papageorgiou, A. S. (2004, July). Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.
- Mimoglou, P., Psycharis, I. N., & Taflampas, I. (2014, December). Explicit determination of the pulse inherent in pulse-like ground motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*.

- Repapis, C. C., Mimoglou, P. P., Dimakopoulou, V. V., Psycharis, I. N., & Taflampas, I. M. (n.d.). *EFFICIENT STRONG MOTION DURATION OF PULSE-LIKE RECORDS FOR NONLINEAR STRUCTURAL ANALYSES.*
- Rodriguez-Marek, A. (2000). Near-fault seismic site response. University of California, Berkeley.
- Sasani, M., & Bertero, V. V. (2000, January). Importance of severe pulse-type ground motions in performance-based engineering: historical and critical review. *World Conference on Earthquake Engineering*.
- Seismosoft Ltd. (2018). SeismoStruct User Manual.
- Shahi, S. K., & Baker, J. W. (2011, April). An Empirically Calibrated Framework for Including the Effects of Near-Fault Directivity in Probabilistic Seismic Hazard Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, σσ. 742-755.
- Somerville, P. G. (1998). Development of an improved representation of near-fault ground mations. *SMIP98 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data*.
- Somerville, P. G. (2005, January). Engineering characterization of near fault ground.
- Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R. W., & Abrahamson, N. A. (1997, January). Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration. Seismological Research letters.
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental Dynamic Analysis. Earthquake Engineering and Structural Dynamics.