

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕΙΣΜΩΝ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΗΝ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΥΠΙΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΠΟ Ω.Σ.

Undergraduate Thesis EFFECT OF NEAR-FAULT DIRECTIVITY TO THE INELASTIC RESPONSE OF REINFORCED CONCRETE FRAMES

επιμελεία: ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Φ. ΑΓΓΕΛΙΔΑΚΗΣ

επιβλέπων: Ι.Ν. ΨΥΧΑΡΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2014





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕΙΣΜΩΝ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΗΝ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΥΠΙΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΠΟ Ω.Σ.

Undergraduate Thesis EFFECT OF NEAR-FAULT DIRECTIVITY TO THE INELASTIC RESPONSE OF REINFORCED CONCRETE FRAMES

επιμελεία: ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Φ. ΑΓΓΕΛΙΔΑΚΗΣ

επιβλέπων: Ι.Ν. ΨΥΧΑΡΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2014

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τον κύκλο των προπτυχιακών μου σπουδών θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους του συντελεστές που συνέβαλαν στην αποπεράτωση της εργασίας αυτής.

Αρχικά, τον κ. Ιωάννη Ν. Ψυχάρη, Καθηγητή Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της διπλωματικής αυτής εργασίας, για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και την πολύτιμη και ουσιαστική βοήθεια και καθοδήγησή του.

Την Υποψήφια Διδάκτωρ Ε.Μ.Π. Βασιλική Καρδούτσου για το ειλικρινές ενδιαφέρον, την άρτια επιστημονική κατάρτιση και τη συνεχή βοήθεια και στήριξη σε κάθε βήμα της εργασίας αυτής.

Την *LΗ Λογισμική* για την παροχή της άδειας χρήσης του λογισμικού ανάλυσης και διαστασιολόγησης *FESPA 10*.

Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένειά μου για την αγάπη και τη στήριξή τους, όπως και τους καλούς μου φίλους που ήταν εκεί σε κάθε βήμα.

Βασίλης Αγγελιδάκης Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα, Νοέμβριος 2014

Σύντομη περίληψη

Οι εδαφικές κινήσεις κοντά στην περιοχή ενός ρήγματος παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον για το μηχανικό, αφού μπορεί να τοποθετούν μεγάλες ανελαστικές απαιτήσεις στις κατασκευές. Κοντά στο ρήγμα, οι εδαφικές κινήσεις επηρεάζονται από το μηχανισμό διάρρηξης και τα φαινόμενα κατευθυντικότητας. Στη διπλωματική αυτή εργασία μελετάται η επιρροή της κατευθυντικότητας σεισμών κοντινού πεδίου στην ανελαστική απόκριση τυπικών πλαισίων από Ω.Σ.

Αρχικά περιγράφεται το φαινόμενο της κατευθυντικότητας και δίνονται γεωμετρικές παράμετροι του μηχανισμού διάρρηξης που έχουν συσχετιστεί με τις δεσπόζουσες περιόδους των σημαντικών παλμών της εδαφικής κίνησης. Τα χαρακτηριστικά των παλμών ταχύτητας που μπορεί να υπάρχουν σε μια εδαφική κίνηση παρουσιάζουν ενδιαφέρον, ώστε η μορφή τους να μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά και μια κίνηση να μπορεί να ταξινομηθεί ως «παλμική» ή «μη παλμική». Για το λόγο αυτό, περιγράφεται η ποσοτική μέθοδος ταξινόμησης του *Baker (2007)*, στην οποία οι σημαντικοί παλμοί μιας εδαφικής κίνησης.

Στη συνέχεια περιγράφεται η μέθοδος ταξινόμησης που χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή, όπως εισήχθη από τους ερευνητές *P. Mimoglou, I. Psycharis, I. Taflampas (2014),* στην οποία οι σημαντικοί παλμοί μιας εδαφικής κίνησης αναγνωρίζονται μέσω κυματικής ανάλυσης και οι περίοδοι των παλμών Τρ προσδιορίζονται από τις κορυφές του φάσματος συνέλιξης $S_d \times S_v$ για 5% απόσβεση, ενώ η μαθηματική περιγραφή του παλμού περιγράφεται από το κυματίδιο που χρησιμοποιούν στις έρευνές τους οι *Mavroeidis and Papageorgiou (2003).* Έπειτα, περιγράφεται μια μέθοδος ταξινόμησης των εδαφικών κυνήσεων σε παλμικές και μη παλμικές, όπως εισήχθη από τους ερευνητές V. Kardoutsou, I. Taflampas, I. Psycharis (2014), στην οποία το παλμικό περιεχόμενο μιας εδαφικής κίνησης συσχετίζεται με το λόγο $S_{d,0}(T_p)/CAD$, όπου το $S_{d,0}(T_p)$ αντιστοιχεί στην τιμή του ελαστικού φάσματος απόκρισης μετακίνησης για την περίοδο του παλμού Τρ και 5% απόσβεση, ενώ το *CAD* είναι η τιμή της Αθροιστικής Απόλυτης Μετακίνησης και η περίοδος του παλμού Τ_ρ προσδιορίζεται από την κορυφή του φάσματος αυολογίζεται από την κορυφή του φάσματος συνέλιξης.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η ταξινόμηση 314 σεισμικών καταγραφών, κάνοντας χρήση της μεθόδου των Mimoglou et al. (2014). Οι καταγραφές αυτές βρίσκονται στη βάση σεισμικών καταγραφών του προγράμματος NGA (Next Generation Attenuation project) και αντιστοιχούν στο σεισμό του Northridge (1994). Η ταξινόμηση πραγματοποιείται με βάση τον πρώτο παλμό κάθε καταγραφής και μια ταξινομείται ως παλμική, εάν ο συντελεστής συσχέτισης του παλμού με την εδαφική κίνηση είναι μεγαλύτερος του 0.65 και η αρχική εδαφική κίνηση έχει μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV>30cm/s. Παρατηρήσεις δίνονται όσον αφορά τις θέσεις και τις διευθύνσεις στις οποίες προκύπτουν παλμικές εδαφικές κινήσεις. Το παλμικό περιεχόμενο των παλμικών καταγραφών επιβεβαιώνεται και με τη μέθοδο των Kardoutsou et al. (2014).

Έπειτα, διαστασιολογούνται δύο πλαισιακές κατασκευές από Ω.Σ. σύμφωνα με τα κείμενα των Ευρωκωδίκων, χρησιμοποιώντας το λογισμικό *FESPA 10* της εταιρίας *LH* Λογισμική. Οι κατασκευές αυτές προσομοιώνονται στο λογισμικό γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων *SAP2000 v15.2.1* της εταιρίας *Computers and Structures, Inc. (CSI),* στο οποίο υποβάλλονται σε στατικές και δυναμικές μη γραμμικές αναλύσεις. Έπειτα, επιλέγονται δέκα παλμικές και πέντε μη παλμικές σεισμικές καταγραφές από το σεισμό στο *Northridge (1994),* οι οποίες επιβάλλονται ως διέγερση βάσης στις δύο κατασκευές σε μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας φόρτισης. Παρατηρήσεις δίνονται όσον αφορά τις γωνιακές παραμορφώσεις των ορόφων, την πλαστιμότητα και το λόγο πλαστιμότητας προς συντελεστή συμπεριφοράς (μ/q_y) για τις παλμικές καταγραφές και κάθε κατασκευή, ως προς προς το λόγο *T/T_p*, όπου T οι περίοδοι των μονοβάθμιων συστημάτων κάθε κατασκευής και *T_p* η οι δεσπόζουσες περίοδοι των παλμών ταχύτητας.

Abstract

The ground motions at near fault sites are of great interest for the structural engineer, as they may put extreme inelastic demands on structures. Near the fault, the ground motions are influenced by the rupture mechanism and the so called *directivity phenomena*. In this undergraduate thesis are investigated the effects of near fault directivity to the inelastic response of reinforced concrete frame structures. At first, the phenomenon of near fault directivity is described, along with geometric parameters of the rupture mechanism and the magnitude of the seismic event that have been correlated to the dominant periods of the significant pulses of the ground motion. The characteristics of the velocity pulses that may be inherent in a ground motion are of interest, so that one can describe their shape and classify the ground motion as "pulse like" or "non pulse like", accordingly to its "pulse like" content. For that purpose, the quantitative classification method of Baker (2007) is described, in which the significant pulses of a ground motion are identified and extracted through wavelet analysis. Next, is described the classification method that is used in this thesis, as it is introduced by the researchers P. Mimoglou, I. Psycharis, I. Taflampas (2014), in which the significant pulses of a ground motion are extracted through wavelet analysis and the pulse periods T_p are determined by the peaks of the convolution spectrum $S_d \times S_v$, for 5% damping, while the mathematical presentation of the pulse is described by the wavelet used by Mavroeidis and Papageorgiou (2003). Another method for the classification of near fault ground motions to "pulse like" and "non pulse like" is described, as it is introduced by the researchers V. Kardoutsou, I. Taflampas, I. Psycharis (2014), in which the "pulse like" content of a ground motion is correlated to the ratio $S_{d,0}(T_p)/CAD$, where $S_{d,0}(T_p)$ corresponds to the value of the elastic response spectrum of the displacement for the dominant pulse period T_{ρ} and 5% damping, while CAD corresponds to the recently introduced Cumulative Absolute Displacement (Taflampas et al. 2009), for a part of the ground motion and the pulse period T_p is determined by the peak of the convolution spectrum as well. Then, the classification of 314 records is implemented, using the aforementioned method of Mimoglou et al. (2014). This set of records is found in the NGA (Next Generation Attenuation project) database of strong ground motions and corresponds to the earthquake of Northridge (1994). The classification is performed using the first dominant pulse of each record and one is classified as "pulse like" if the correlation coefficient of the pulse with the original motion is over 0.65 and the peak ground velocity of the original motion is PGV > 30cm/s. Remarks are given concerning the sites and the directions at which "pulse like" motions occur. The "pulse like" content of the records that are categorized as "pulse like" is then confirmed using the method proposed by Kardoutsou et al. (2014). In sequel, two reinforced concrete 3D frames are designed according to the Eurocodes, using the software FESPA 10 by LH Logismiki. These structures are simulated using the software of linear and nonlinear analyses SAP2000 v15.2.1 by Computers and Structures, Inc. in which they are subjected to static and time history nonlinear analyses. Ten "pulse like" and five "non pulse like" seismic records from the Northridge earthquake (1994) are then chosen to be applied as base excitation to the aforementioned structures in non linear time history analyses. Remarks are given concerning the inter-storey drifts, the dactility and the ductility – reduction factor ratio (μ/q_{ν}) for the "pulse like" records and each structure, in comparison to the ratio of the equivalent SDOF systems periods of the structures, to the dominant pulse periods (T/T_{o}) .

Διάρθρωση εργασίας

Στην εργασία αυτή μελετάται η επιρροή της κατευθυντικότητας σεισμών κοντινού πεδίου στην ανελαστική απόκριση τυπικών πλαισίων από Ω.Σ.

Στο **Κεφάλαιο 1** δίνονται κάποια εισαγωγικά στοιχεία που αφορούν το Κανονιστικό Πλαίσιο που ακολουθείται και τα Μέσα ανάλυσης που χρησιμοποιούνται.

Στο **Κεφάλαιο 2** αναλύονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου, γεωμετρικές παράμετροι του ρήγματος που έχουν συσχετιστεί με χαρακτηριστικά του παλμού ταχύτητας και σχέσεις ερευνητών που αφορούν την αναγνώριση της περιόδου και της μορφής του δεσπόζοντος παλμού.

Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύεται μια μέθοδος εντοπισμού των πιο σημαντικών παλμών ταχύτητας μέσω κυματικής ανάλυσης και μια διαδικασία κατάταξης των εδαφικών κινήσεων σε «παλμικές» ή «μη παλμικές», όπως έχει εισαχθεί από τον *Baker (2007)*.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται η μέθοδος εντοπισμού των παλμών ταχύτητας που εφαρμόζεται στην εργασία αυτή, όπως έχει εισαχθεί από τους *P. Mimoglou, I. Psycharis, I. Taflampas (2014),* στην οποία οι σημαντικοί παλμοί εντοπίζονται μέσω κυματικής ανάλυσης και οι περίοδοί τους προκύπτουν από τις κορυφές του φάσματος συνέλιξης $S_d \times S_v$ για απόσβεση 5%.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται μια μέθοδος ταξινόμησης σεισμικών καταγραφών σε παλμικές και μη, όπως έχει εισαχθεί από τους *V. Kardoutsou, I. Taflampas, I. Psycharis* (2014), στην οποία το παλμικό περιεχόμενο συσχετίζεται με την τιμή του λόγου της τιμής του ελαστικού φάσματος μετακίνησης για την περίοδο του παλμού *T_p* και μηδενική απόσβεση, προς τη νεοεισαχθείσα έννοια *CAD* (*Taflampas et al. 2009*).

Στο **Κεφάλαιο 6** πραγματοποιείται η ταξινόμηση των καταγραφών του σεισμικού γεγονότος στο Northridge το 1994 σε παλμικές και μη και γίνονται παρατηρήσεις όσον αφορά τη θέση εμφάνισης των παλμικών καταγραφών και τις διευθύνσεις εμφάνισης των παλμών.

Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται στοιχεία από τη διαστασιολόγηση δύο κατασκευών από Ω.Σ. σύμφωνα με τα κείμενα των Ευρωκωδίκων στο λογισμικό *FESPA 10* της εταιρίας *LH Λογισμική*. Οι κατασκευές αυτές σχεδιάζονται ώστε να τους επιβληθούν ως διέγερση βάσης παλμικές και μη παλμικές καταγραφές σε μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας φόρτισης και να γίνουν συγκρίσεις.

Στο **Κεφάλαιο 8** περιγράφεται η διαδικασία με την οποία δημιουργείται το υπολογιστικό προσομοίωμα των κατασκευών που διαστασιολογήθηκαν στο Κεφάλαιο 7, στο λογισμικό γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων SAP2000 v15.2.1 της εταιρίας Computers and Structures, Inc.

Στο **Κεφάλαιο 9** γίνεται μια περιγραφή των στατικών και δυναμικών μη γραμμικών αναλύσεων που πραγματοποιούνται και ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αποτίμηση της ανελαστικής απόκρισης των κατασκευών στο λογισμικό *SAP2000 v15.2.1*.

Στο **Κεφάλαιο 10** δείχνονται οι χρονοϊστορίες επιτάχυνσης και ταχύτητας και τα ελαστικά φάσματα ψευδο-επιτάχυνσης και ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5% για δέκα παλμικές και πέντε μη παλμικές σεισμικές καταγραφές από το σεισμικό γεγονός στο Northridge (1994) που επιλέγονται ως διεγέρσεις βάσης που θα επιβληθούν στις δύο κατασκευές.

Στο **Κεφάλαιο 11** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ιδιομορφικών και των μη γραμμικών αναλύσεων και δίνονται παρατηρήσεις.

Στο Κεφάλαιο 12 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής.

Thesis Structure

This undergraduate thesis deals with the effects of near-fault directivity to the inelastic response of reinforced concrete frames.

In **Chapter 1** are given introductory information concerning the applied regulatory framework and the software being used.

In **Chapter 2** the basic characteristics of near-fault ground motions are described, along with, geometric parameters of the fault that have been correlated with characteristics of the velocity pulse, as well as relations, concerning the identification of the period T_p and the shape of the significant pulses.

In **Chapter 3** is analyzed a method for the identification of the significant velocity pulses that may be inherent in a ground motion, through wavelet analysis and a process for the classification of ground motions as "pulse like" or "non pulse like", as it is introduced by *Baker (2007)*.

In **Chapter 4** is described the method for the identification of the significant velocity pulses which is applied in this thesis, as it is introduced by the researchers *P. Mimoglou, I. Psycharis, I. Taflampas (2014),* in which the significant pulses are identified through wavelet analysis and their periods are determined by the peaks of the convolution spectrum $S_d \times S_v$ for 5% damping.

In **Chapter 5** is described a method for the classification of ground motions as "pulse like" or "non pulse like", as it is introduced by the researchers *V. Kardoutsou, I. Taflampas, I Psycharis (2014),* in which the "pulse like" content of a seismic record is correlated to the value of the ratio $S_{d,0}(T_p)/CAD$, where $S_{d,0}(T_p)$ corresponds to the value of the elastic response spectrum of the displacement for the pulse period T_p and 5% damping, while *CAD* corresponds to the recently introduced Cumulative Absolute Displacement (*Taflampas et al. 2009*), which is computed for a part of the ground motion.

In **Chapter 6** is presented the classification of 314 records from the Northridge earthquake (1994), as "*pulse like*" or "non pulse like" and remarks are given regarding the sites at which "*pulse like*" records are observed and the directions in which the velocity pulses occur, compared to the geometry of the fault.

In **Chapter 7** is presented the design of two reinforced concrete frames according to the Eurocodes, using the software *FESPA 10* by *LH Logismiki*. These structures are designed with the intention to be subjected to "pulse like" and "non pulse like" seismic records as base excitation, in nonlinear time history analyses.

In **Chapter 8** is described the procedure under which are created the computational models of the aforementioned structures using the software of linear and non linear analyses *SAP2000 v15.2.1* by *Computers and Structures, Inc.*

In **Chapter 9** a description is implemented concerning the theoretical background by which static and time history nonlinear analyses are performed, along with the procedure in which they are performed using the software *SAP2000 v15.2.1* by *Computers and Structures, Inc. (CSI).*

In **Chapter 10** are presented acceleration and velocity time histories of ten "pulse like" and five "non pulse like" ground motions from the Northridge earthquake (1994), along with the corresponding elastic spectra of pseudo-acceleration and pseudo-velocity for 5% damping. These ground motions are selected to be applied as base excitation in nonlinear time history analyses to the structures described in chapter 7, as they were described in chapter 9.

In **Chapter 11** are presented the results from the linear modal and non linear static & time history analyses and remarks are given.

In **Chapter 12** are presented the conclusions of this thesis.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	29
1.1 Κανονιστικό Πλαίσιο – Πηγές	29
1.2 Μέσα Ανάλυσης	29
Κεφάλαιο 2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ	31
2.1 Εισαγωγή	31
2.2 Ρήγματα	31
2.2.1 Ενεργά ρήγματα	31
2.2.2 Βασικοί τύπου ρηγμάτων	31
2.2.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός ρήγματος	32
2.3 Φαινόμενα Κατευθυντικότητας	33
2.4 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου	37
Κεφάλαιο 3 ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΙ	ΕΣΩ
ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ – Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ BAKER	43
3.1 Εισαγωγή	43
3.2 Αίτια δημιουργίας παλμών ταχύτητας	43
3.3 Επιλογή μιας διαδικασίας ταξινόμησης	44
3.4 Ανάλυση με κυματίδια	45
3.5 Ταξινόμηση των χρονοϊστοριών	48
3.5.1 Απομόνωση του παλμού ταχύτητας	48
3.5.2 Προσδιορισμός της σημαντικότητας του αφαιρούμενου παλμού	49
3.5.3 Αποκλεισμός των παλμών που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία ταχύτητας	51
3.5.4 Αποκλεισμός των εδαφικών κινήσεων με PGV<30cm/s	53
3.6 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού	54
3.7 Εντοπισμός παλμών σε ένα εύρος προσανατολισμών	56
Κεφάλαιο 4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ ΜΕΣΩ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟ	OY
ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΝΕΛΙΞΗΣ	65
4.1 Εισαγωγή	65
4.2 Προσδιορισμός των περιόδων των σημαντικών παλμών	67
4.3 Προσδιορισμός των παραμέτρων των κυματιδίων	72
4.4 Προτεινόμενη Μεθοδολογία σε Βήματα	76
Κεφάλαιο 5 ΤΟ <i>CAD</i> ΩΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΥΠΑΡΞΗΣ ΠΑΛΜΟΥ	81
5.1 Εισαγωγή	81
5.2 Διεγέρσεις κοντινού πεδίου και ανελαστική απαίτηση	82
5.3 Άλλες μέθοδοι ταξινόμησης των εδαφικών κινήσεων	83
5.4 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού	84
5.5 Νέα μέθοδος ταξινόμησης των εδαφικών κινήσεων	85
5.6 Σύγκριση με άλλες μεθόδους	87

Κεφάλαιο 6 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΟΥ NORTHRID	GE (1994) ΣΕ
6.1 Εισαγωγη	
6.2 Κριτηρια ταξινομησης των καταγραφων	
6.3 Διευθυνσεις στις οποιες αναμενονται οι παλμοι	
6.4 Διαθεσιμες καταγραφες - Η περιοχή του Northridge	
6.5 To ρηγμα.	100
6.6 Ταξινομηση των καταγραφων	101
6.7 καταγραφες με CISID > 60 km.	
6.8 Διευθυνσεις εμφανισης των παλμων	
6.8 επιβεβαίωση του παλμικου περιεχομένου με βάση την τιμή του λόγο	$0 S_{d,0}(T_p)/CAD$
Κεφάλαιο 7 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	119
7.1 Εισαγωγή	119
7.2 Παραδοχές Σχεδιασμού	119
7.3 Τριώροφη κατασκευή	132
7.3.1 Βάρος κατασκευής & Μάζες ορόφων	132
7.3.2 Ιδιομορφές κατασκευής	132
7.3.3 Κάτοψη τυπικού ορόφου	133
7.3.4 Συντεταγμένες του πλασματικού άξονα	134
7.3.5 Ακτίνες δυστρεψίας & Στατική εκκεντρότητα	134
7.3.6 Διατομές μελών	134
7.4 Εννιαώροφη κατασκευή	137
7.4.1 Βάρος κατασκευής & Μάζες ορόφων	138
7.4.2 Ιδιομορφές κατασκευής	138
7.4.3 Κάτοψη τυπικού ορόφου	139
7.4.4 Συντεταγμένες του πλασματικού άξονα	140
7.4.5 Ακτίνες δυστρεψίας & Στατική εκκεντρότητα	140
7.4.6 Διατομές μελών	140
Κεφάλαιο 8 ΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ Α	ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	145
8.1 Εισαγωγή	145
8.2 Μόρφωση του υπολογιστικού προσομοιώματος	145
Μονάδες	146
Στηρίξεις	146
Κατακόρυφα Φορτία	147
Μάζα	147
8.3 Προσομοιώματα Υλικών	148
8.3.1 Προσομοίωμα Χάλυβα Οπλισμού	148

8.3.2 Προσομοιώματα Σκυροδέματος	. 153
8.4 Πλάκες	. 159
8.5 Δοκοί	. 159
8.5.1 Εκκεντρότητες Δομικών Μελών	. 159
8.5.2 Άκαμπτες περιοχές κόμβων	. 160
8.6 Υποστυλώματα	. 161
8.7 Ανάλυση Διατομών	. 162
8.7.1 Διαγράμματα Ροπών Καμπυλοτήτων	. 162
8.7.2 Ενεργός Δυσκαμψία Διατομών	. 163
8.8 Πλαστικές Αρθρώσεις	. 164
8.8.1 Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων στις δοκούς	. 165
8.8.2 Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα	. 166
8.8.3 Hinge Overwrites	. 170
Κεφάλαιο 9 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗ	Σ
ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	. 171
9.1 Εισαγωγή	. 171
9.2 Αντισεισμικός Σχεδιασμός με Στάθμες Επιτελεστικότητας	. 171
9.2.1 Στάθμες επιτελεστικότητας φέροντος και μη-φέροντος οργανισμού	. 171
9.2.2 Καθορισμός σταθμών επιτελεστικότητας	. 173
9.3 Μη Γραμμική Στατική Ανάλυση (Pushover Analysis)	. 176
9.3.1 Μη γραμμική στατική ανάλυση στο λογισμικό SAP2000 v.15.2.1	. 177
9.4 Μη Γραμμική Ανάλυση Χρονοϊστορίας Φόρτισης Άμεσης Ολοκλήρωσης (Direct Integration Time History Analysis)	184
9.4.1 Μη γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας φόρτισης στο λογισμικό SAP2000 v15	2.1
	. 185
9.5 Ισοδύναμο Μονοβάθμιο Σύστημα & Φάσμα Ικανότητας	. 188
Κεφάλαιο 10 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ	. 193
10.1 Εισαγωγή	. 193
10.2 Παλμικές Καταγραφές	. 194
10.3 Μη παλμικές Καταγραφές	. 204
Κεφάλαιο 11 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΩΝ & ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	. 209
11.1 Εισαγωγή	. 209
11.2 Ιδιομορφές ταλάντωσης	. 209
11.2.1 Τριώροφη κατασκευή	. 209
11.2.2 Εννιαώροφη κατασκευή	. 210
11.3 Καμπύλες Ικανότητας	. 212
11.3.1 Τριώροφη κατασκευή	. 212
11.3.2 Εννιαώροφη κατασκευή	. 212
11.4 Ισοδύναμα Μονοβάθμια Συστήματα	. 213

11.4.1 Τριώροφη κατασκευή	. 213
11.4.2 Εννιαώροφη κατασκευή	. 215
11.5 Σημεία μέγιστης σεισμικής απόκρισης	. 217
11.5.1 Τριώροφη κατασκευή	. 217
11.5.2 Εννιαώροφη κατασκευή	. 221
11.6 Διαγράμματα "μ/q _y – T/T _p "	. 225
11.6.1 Τριώροφη κατασκευή	. 225
11.6.2 Εννιαώροφη κατασκευή	. 227
11.7 Διαγράμματα "μ – Τ/Τ _ρ "	. 228
11.7.1 Τριώροφη κατασκευή	. 229
11.7.2 Εννιαώροφη κατασκευή	. 230
11.8 Μέγιστες Σχετικές Μετακινήσεις Ορόφων	. 231
11.8.1 Τριώροφη κατασκευή	. 231
11.8.2 Εννιαώροφη κατασκευή	. 233
Κεφάλαιο 12 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	. 235
Βιβλιογραφικές αναφορές	. 237
Παράρτημα Α Ελαστικά Φάσματα Απόκρισης	. 239
Α1: Ελαστικά φάσματα ψευδο-επιτάχυνσης (<i>Elastic Pseudo Acceleration Spectra</i>) για	ξ=5%
	. 240
A2: Ελαστικά φάσματα ψευδο-ταχύτητας (Elastic Pseudo Velocity Spectra) για ξ=5%	. 251
Παράρτημα Β Ενεργές Δυσκαμψίες Μελών - (EI)eff	. 261
B1: Ενεργές Δυσκαμψίες Διατομών <i>(ΕΙ)_{eff} -</i> Τριώροφο	. 263
B2: Ενεργές Δυσκαμψίες Διατομών <i>(El)_{eff} -</i> Εννιαώροφο	. 265
Παράρτημα Γ Κατά μήκος τομές δοκών	. 267
Γ1: Κατά μήκος τομές δοκών - Τριώροφο	. 269
Γ2: Κατά μήκος τομές δοκών – Εννιαώροφο	. 279

Σχήματα

Σχήμα 2.1: Βασικοί τύποι ρηγμάτων (1) Κανονικό ρήγμα, (2) Ανάστροφο ρήγμα, (3) οριζόντιας ολίσθησης	Ρήγμα 31
Σχήμα 2.2: Γεωμετρικές παράμετροι ενός ρήγματος (NGA Database Documentation	1 File). 32
Σχήμα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα επίδρασης της κατευθυντικότητας της διάρρηξης οριζόντιο ρήγμα ολίσθησης. Η διάρρηξη αρχίζει στο υπόκεντρο και διαδίδεται με το περίπου ίση με το 80% της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Η εικόνα παρουσ στιγμιότυπο του μετώπου της ρήξης σε μία δεδομένη στιγμή (από Somerville et al 1	για xχύτητα τιάζει ένα ! <i>997α</i>).
Σχήμα 2.4: Αποτελέσματα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις καταγεγραμμ χρονοϊστορίες μετακινήσεων του σεισμού του Loma Prieta του 1989 για τις κάθετε και τις παράλληλες (κάτω) στο ρήγμα συνιστώσες. ΕΕRI, 1995	ένες ς (άνω) 35
Σχήμα 2.5: Σχηματικό διάγραμμα των προσανατολισμών της παραμένουσας μετακ και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και για ρήγμα κεκλιμένης ολίσθησης	ίνησης 36
Σχήμα 2.6: Χρονοϊστορίες για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα κεκλιμένης ολίσθησης, στο οποίο φαίνονται οι επιρροές της παραμένουσας μετακίνησης και τα παλμού κατευθυντικότητας μαζί και χωριστά	ວບ 36
Σχήμα 2.7: Παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να ερμηνεύσουν τις συνθήκες τι κατευθυντικότητας της διάρρηξης (Somerville et al. 1997α).	ης 37
Σχήμα 2.8: Προβλέψεις από τη σχέση των Somerville et al. (1997α) μεταξύ διαφορε συνθηκών κατευθυντικότητας	ετικών 38
Σχήμα 2.9: Απλοποιημένοι παλμοί που έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές	39
Σχήμα 2.10: Παράγοντες που χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις απλοποιημέ εδαφικές κινήσεις ημιτονικού παλμού (Rodriguez-Marek 2000)	ένες 40
Σχήμα 2.11: Παράγοντες που χρειάζονται για να καθορίσουν την παράλληλη και τη στο ρήγμα συνιστώσα για απλοποιημένους παλμούς ταχύτητας. Τα σύμβολα Ν, Ρ αντιστοιχούν στις κάθετες και παράλληλες κινήσεις ως προς τη διεύθυνση του ρήγμα αντίστοιχα (<i>Rodriguez-Marek 2000</i>).	ιν κάθετη ιατος 40
Σχήμα 2.12: Χρονοϊστορίες ταχύτητας και οριζόντια τροχιακά σχέδια της κάθετης (F της παράλληλης (FP) στο ρήγμα συνιστώσα για δύο καταγραφές κοντινού πεδίου	FN) και 42
Σχήμα 2.13: Απλοποιημένες αναπαραστάσεις ημιτονικού παλμού για εδαφικές κινη κοντινού πεδίου. Η <i>PHV</i> (μέγιστη οριζόντια ταχύτητα) για παράλληλη στο ρήγμα συ αντιστοιχεί στο 50% της <i>PHV</i> κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (Rodriguez-Marek 200	ήσεις νιστώσα)0) 42
Σχήμα 3.1: Πρότυπα μητρικά κυματίδια (<i>Baker 2007</i>)	46
Σχήμα 3.2: Μετασχηματισμοί κυματιδίων (Baker 2007).	47
Σχήμα 3.3: Περιγραφή της διαδικασίας αφαίρεσης παλμού (Baker 2007)	48
Σχήμα 3.4: Παραδείγματα καθέτων στο ρήγμα συνιστωσών σε σεισμούς κοντινού τ (Baker 2007).	τεδίου 50

Σχήμα 3.5: Περιγραφή της διαδικασίας αφαίρεσης παλμού (Baker 2007)
Σχήμα 3.6: Παλμός στην αρχή της χρονοϊστορίας: (a), (b) χρονοϊστορία ταχύτητας και παλμού, (c) <i>CSV (Baker 2007</i>)52
Σχήμα 3.7: Παλμός στο τέλος της χρονοϊστορίας. (a), (b) χρονοϊστορία ταχύτητας και παλμού, (c) <i>CSV (Baker 2007)</i> 53
Σχήμα 3.8: Εδαφική κίνηση με μικρή <i>PGV</i> που εμφανίζεται ως παλμική και αποκλείεται <i>(Baker 2007).</i>
Σχήμα 3.9: Κυματίδιο Daubechies και ημιτονικό κύμα με περίοδο ίση με τη μέγιστη της κυματομορφής από το φάσμα Fourier (Baker 2007)54
Σχήμα 3.10: Περίοδος παλμού (T_p) από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος της ταχύτητας σε σχέση με την περίοδο παλμού (T_p) από την ψευδο-περίοδο του κυματιδίου για τις 91 εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου
Σχήμα 3.11: Η αρχική κίνηση, ο εξαγόμενος παλμός και η εναπομένουσα εδαφική κίνηση για την εδαφική κίνηση Landers 1992, Yermo Fire Station. (a) Χρονοϊστορίες ταχύτητας b) Φάσματα ταχύτητας στα οποία φαίνεται ο προσδιορισμός της περιόδου του παλμού με τη χρήση του φάσματος ψευδο-ταχύτητας και μέσω κυματικής ανάλυσης
Σχήμα 3.12: Τιμές του παλμικού δείκτη συναρτήσει του προσανατολισμού για την καταγραφή EC Country Center από το σεισμό στο Imperial Valley του 1979. Οι σκιασμένες επιφάνειες υποδεικνύουν τις διευθύνσεις στις οποίες παρατηρήθηκε ένας σημαντικός παλμός
Σχήμα 3.13: Χρονοϊστορία ταχύτητας της καταγραφής Tsaotun (TCU075) από το σεισμό στο Chi-Chi της Ταϊβάν. (a) Χρονοϊστορίες στην κάθετη και στην παράλληλη στο ρήγμα διευθύνσεις. (b) Τροχιακό διάγραμμα της ταχύτητας στην κάθετη στο ρήγμα συνιστωσα ως προς την παράλλη
Σχήμα 3.14: Τιμές του Παλμικού δείκτη συναρτήσει του προσανατολισμού για την καταγραφή Tsaotun (TCU075) από το σεισμό στο Chi-Chi της Ταϊβάν
Σχήμα 3.15: Γεωμετρικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται στις σχέσεις γραμμικής παλινδρόμησης για μηχανισμό (a) οριζόντιας ολίσθησης και (b) κεκλιμένης ολίσθησης (Shahi and Baker, 2011)
Σχήμα 3.16: Χάρτης του σεισμικού γεγονότος στο Imperial Valley που δείχνει: (a) ισοπιθανοτικές καμπύλες εμφάνισης παλμού για τη δεδομένη διάρρηξη και (b) θέσεις όπου παρατηρήθηκε παρουσία παλμού <i>(Shahi and Baker, 2011)</i>
Σχήμα 3.17: Χάρτης του σεισμικού γεγονότος στο Northridge που δείχνει: (a) ισοπιθανοτικές καμπύλες εμφάνισης παλμού για τη δεδομένη διάρρηξη και (b) θέσεις όπου παρατηρήθηκε παρουσία παλμού <i>(Shahi and Baker 2011)</i> 60
Σχήμα 4.1: Καταγραφή G 06-320 (Coyote Lake) 1979 (a) χρονοϊστορία ταχύτητας, (b) <i>PSV 5%</i> <i>(Mimoglou et al. 2014).</i>
Σχήμα 4.2: Καταγραφή G06-320 (Coyote Lake) 1979: (a) σύγκριση του φάσματος ταχύτητας Fourier με το φάσμα μετακίνησης για μηδενική απόσβεση, (b) Sd 5% (Mimoglou et al. 2014). 68

Σχήμα 4.3: Καταγραφή PCD-164 από το σεισμό στο San Fernando, CA (1971): (a) φάσμα απόκρισης ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5%; (b) φάσμα απόκρισης μετακίνησης για απόσβεση 5% (Mimoglou et al. 2014)
Σχήμα 4.4: Φάσματα συνέλιξης και προσδιορισμός της περιόδου <i>Τ_i</i> για τις καταγραφές: (a) G06-320 (Coyote Lake), (b) PCD-164 San Fernando <i>(Mimoglou et al. 2014).</i>
Σχήμα 4.5: Σχέση μεταξύ της μέγιστης φασματικής μετακίνησης S _{d,max} και CAD για κυματίδιο M&P και διάφορες τιμές γ και ν. (a) μηδενική απόσβεση (b) απόσβεση 5% (Mimoglou et al. 2014)
Σχήμα 5.1: Λόγοι απαίτησης ανελαστικής προς ελαστικής μετακίνησης παλμικών καταγραφών (Tothong and Cornell, 2006)
Σχήμα 5.2: Καταγραφή Petrolia από το σεισμό στο Cape Mendocino, 1992: (a) Φάσμα συνέλιξης S _d x S _v ; (b) Φάσμα ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5%; (c) χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας και ο υπολογισμένος δεσπόζων παλμός (<i>Mimoglou 2014)</i> 84
Σχήμα 5.3: Σεισμός του Cape Mendocino, 1992: (a) χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας. Οι σκιασμένες επιφάνειες υποδεικνύουν το τμήμα της καταγραφής για το οποίο υπολογίζεται το <i>CAD</i> ; (b) Φάσμα συνέλιξης S _d xS _v για απόσβεση 5%. (c) Φάσμα μετατόπισης για μηδενική απόσβεση
Σχήμα 5.4: Καταγραφή CHY036 από το σεισμό στο Chi-Chi, 1999: (a) χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας; (b) Φάσμα συνέλιξης S _d xS _v για απόσβεση <i>5%</i> ; (c) φάσμα μετατόπισης για μηδενική απόσβεση
Σχήμα 5.5: S _{d,0} (T _p) ως προς το CAD για τις καταγραφές που έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές από τους (a) Baker (2007) και (b) Zhai et al. (2013). Οι μαύρες κουκίδες αντιστοιχούν σε παλμικές καταγραφές και οι γκρι σταυροί σε μη παλμικές σύμφωνα με την ταξινόμηση που έχει γίνει στις αρχικές δημοσιεύσεις
Σχήμα 5.6: Χρονοϊστορίες της εδαφικής ταχύτητας για τις καταγραφές: (a) Hollister City Hall και (b) Sunnyvale - Colton Ave. από το σεισμό στο Loma Prieta, 1989
Σχήμα 6.1: Χάρτης της περιοχής του Northridge. Με κόκκινο σημειώνονται οι θέσεις των καταγραφικών σταθμών που απέχουν αποστάσεις μικρότερες από 60 km από το ρήγμα 98
Σχήμα 6.2: Θέσεις και ονόματα των καταγραφικών σταθμών με ClstD<60km
Σχήμα 6.3: Το ρήγμα που προκάλεσε το σεισμικό γεγονός στο Northridge το 1994 (Northridge Blind Thrust)
Σχήμα 6.4: Αζιμούθια παράλληλης και κάθετης στο ρήγμα διεύθυνσης
Σχήμα 6.5: Παλμικές καταγραφές πάνω στο χάρτη της περιοχής του Northridge
Σχήμα 6.6: Ελαστικά φάσματα ψευδο-ταχύτητας για 10 παλμικές και 5 μη παλμικές καταγραφές
Σχήμα 6.7: Ελαστικά φάσματα ψευδο-επιτάχυνσης για 10 παλμικές και 5 μη παλμικές καταγραφές
Σχήμα 7.1: Ελαστικό φάσμα EC8 για <i>ξ=5%</i> και Φάσματα σχεδιασμού για q=5,85 και q = 5,40.
Σχήμα 7.2: Μέγιστη εκκεντρότητα δοκών – υποστυλωμάτων

Σχήμα	7.3: Τριώροφη κατασκευή - Τρισδιάστατη απεικόνιση	132
Σχήμα	7.4: Τριώροφη κατασκευή - Κάτοψη τυπικού ορόφου	133
Σχήμα	7.5: Διατομή μιας τυπικής δοκού και ανάπτυγμα του συνδετήρα	136
Σχήμα	7.6: Εννιαώροφη κατασκευή - Τρισδιάστατη απεικόνιση	137
Σχήμα	7.7: Εννιαώροφη κατασκευή - Κάτοψη τυπικού ορόφου	139
Σχήμα	8.1: Χαρακτηριστικές διατομές των δοκών που προσομοιώνονται	146
Σχήμα	8.2: Ορισμός των στηρίξεων	146
Σχήμα	8.3: Κατασκευή τύπων φόρτισης (Load Cases)	147
Σχήμα	8.4: Ορισμός της μάζας στο λογισμικό	148
Σχήμα	8.5: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού	148
Σχήμα	8.6: Ελάχιστα μηχανικά χαρακτηριστικά χαλύβων οπλισμού (ΚΤΧ 2008)	149
Σχήμα	8.7: Ορισμός των χαρακτηριστικών του χάλυβα οπλισμού στο λογισμικό	151
Σχήμα	8.8: Ορισμός των χαρακτηριστικών του χάλυβα οπλισμού στο λογισμικό	151
Σχήμα	8.9: Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού	152
Σχήμα	8.10: Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων μη περισφιγμένου σκυροδέματος	153
Σχήμα	8.11: Ορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος στο λογισμικά	5. 1 F 4
Σχήμα	8.12: Ορισμός των μαναγικών ναρακταριστικών του σκυροδέματος	154
Σχήμα	8.12. Optopol two $\mu_{1/2}$ average podetization to the propole attact and $\lambda_{1/2}$	155
Σχήμα	8.14. Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων του μη περιοφιγμένου σκυροσεματός	155
Σχήμα	8.14. Rupiton i tuben nupupopo se neptopi γ providento, se tuben γ and γ	150
2χημα Σχόμα	8.15. Ορισμός των σταφραγματών στα επιπεσά των πλακών	161
2χημα Σχάμα	8.16. $\Delta(u(0)\mu)$ a three we account three	101
Ζχήμα	8.17. Καμπύλη τασεών παραμορφώσεων περιοφιγμένου σκοροσεματος	161
Ζχήμα		102
2χημα στις γε	8.19: Επιβολή των ένεργων δυοκαμψιών ως μετωτικός πολλαπλαδιαδτικός λόγος ωμετρικές δυσκαμψίες	, 164
Σχήμα	8.20: Τυπική συμπεριφορά πλαστικής άρθρωσης	165
Σχήμα στάθμα	8.21: Χαρακτηριστικά σημεία της καμπύλης ροπής-στροφής χορδής διατομής κα ες επιτελεστικότητας (FEMA 356)	ι 167
Σχήμα	8.22: Εσωτερική διακριτοποίηση μέλους λόγω ορισμού της ιδιότητας Hinge	
Overw	rites.	170
Σχήμα	9.1: Κατασκευή της καμπύλης ικανότητας	173
Σχήμα	9.2: Περιγραφή της στροφής χορδής μέλους	174
Σχήμα συμπε	9.3: Καμπύλες F-δ δομικών στοιχείων (α) καμπτική συμπεριφορά, (β) διατμητική ριφορά.	174
Σχήμα	9.4: Ιδεατή καμπύλη F-δ δομικού στοιχείου	175

Σχήμα	9.5: Ορισμός σταθμών επιτελεστικότητας πάνω στην καμπύλη ικανότητας	176
Σχήμα	9.6: Ορισμός των παραμέτρων μιας μη γραμμικής στατικής ανάλυσης	178
Σχήμα	9.7: Ορισμός της ομοιόμορφης κατανομής φόρτισης	179
Σχήμα	9.8: Ορισμός της ιδιομορφικής κατανομής φόρτισης	179
Σχήμα	9.9: Ορισμός της Στοχευόμενης Μετακίνησης και του κόμβου ελέγχου	180
Σχήμα γραμμι	9.10: Ορισμός του αριθμού των ελάχιστον και των μέγιστων βημάτων μιας μη ικής στατικής ανάλυσης	181
Σχήμα	9.11: Ορισμός παραμέτρων σύγκλισης μιας μη γραμμικής στατικής ανάλυσης 3	182
Σχήμα	9.12: Εισαγωγή επιταχυνσιογραφήματος ως διέγερση βάσης	185
Σχήμα	9.13: Παράμετροι μη γραμμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας φόρτισης	186
Σχήμα	9.14: Ορισμός του μητρώου απόσβεσης	187
Σχήμα	9.15: Κατανομές φόρτισης; (a) Ομοιόμορφη, (b) ιδιομορφική (<i>LΗ Λογισμική</i>)	188
Σχήμα	9.16: Κατασκευή ιδεατού διγραμμικού φάσματος ικανότητας	191
Σχήμα	11.1: Τριώροφη κατασκευή - 1η ιδιομορφή - Μεταφορική κατά Υ	210
Σχήμα	11.2: Τριώροφη κατασκευή - 3η ιδιομορφή – Στρεπτική	210
Σχήμα	11.3: Σχήμα 11.1: Εννιαώροφη κατασκευή - 1η ιδιομορφή - Μεταφορική κατά Υ.	211
Σχήμα	11.4: Εννιαώροφη κατασκευή - 3η ιδιομορφή – Στρεπτική	211

Ελληνο-Αγγλικό Λεξικό Ορολογίας Εδαφικών Κινήσεων Κοντινού Πεδίου

Ελληνικά	Αγγλικά
Αζιμούθιο της διεύθυνσης παράλληλα στο ρήγμα	Fault-strike
Αθροιστική απόλυτη μετακίνηση	Cumulative absolute displacement (CAD)
Αθροιστική απόλυτη ταχύτητα	Cumulative absolute velocity (CAV)
Αιχμή; Κορυφή	Edge; Peak
Ανακύκλιση; Ανακυκλιζόμενη φόρτιση	Cycling; Cyclic loading
Ανάλυση Fourier	Fourier analysis
Ανάστροφο ρήγμα	Reverse fault
Ανάστροφο ρήγμα με <i>dip</i> ≤ 45°	Thrust
Ανελαστικό/ά φάσμα/φάσματα απόκρισης	Inelastic response spectrum/spectra
Απομάκρυνση θορύβου σήματος	Signal De-noising
Αρμονική διέγερση	Harmonic excitation
Αρμονικό σήμα	Harmonic signal
Αρχική εδαφική κίνηση	Original ground motion
Ασαφής εδαφική κίνηση	Ambiguous ground motion
Βαθειά διάρρηξη	Deep rupture
Βάση δεδομένων του προγράμματος NGA	Next generation attenuation database (NGA)
Βέλτιστη προσαρμογή	Best fitting
Γωνία κλίσης ρήγματος με το οριζόντιο επίπεδο	Dip angle
Δεσπόζουσα περίοδος παλμού	Dominant pulse period (T_p)
Δεσπόζων παλμός	Dominant pulse
Διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίου	Discrete wavelet transformation
Διαξονικά φαινόμενα	Bidirectional phenomena
Διάρκεια κυματιδίου	Wavelet duration (γ)
Διάρρηξη	Rupture
Διαφορά φάσης	Phase shift (v)
Διέγερση βάσης	Base excitation
Δόνηση	Vibration; Shaking
Εδαφική κίνηση	Ground motion
Ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης	Elastic acceleration spectrum (Sa)
Ελαστικό φάσμα μετακίνησης	Elastic displacement spectrum (Sd)
Ελαστικό φάσμα ταχύτητας	Elastic velocity spectrum (Sv)
Ελαστικό φάσμα ψευδο-επιτάχυνσης	Elastic pseudo-acceleration spectrum (PSa)
Ελαστικό φάσμα ψευδο-ταχύτητας	Elastic pseudo-velocity spectrum (PSv)

Ελαστικό/ά φάσμα/φάσματα απόκρισης Έμπροσθεν κατευθυντικότητα Εναπομένουσα εδαφική κίνηση Επίκεντρο Εφελκυστικό πεδίο Ημιτονικό σήμα Θλιπτικό πεδίο Κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα Κανονικό ρήγμα Κατευθυντικότητα Κοντινό πεδίο Κυματίδιο Κυματική ανάλυση Κωδωνοειδής; Καμπανοειδής Λόγος ενεργειών Λόγος ιξώδους απόσβεσης Λόγος μέγιστων εδαφικών ταχυτήτων Μέγεθος ροπής σεισμικού γεγονότος Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση Μέγιστη εδαφική μετακίνηση Μέγιστη εδαφική ταχύτητα Μετασχηματισμός Fourier Μη παλμική εδαφική κίνηση Μητρικό κυματίδιο Μηχανισμός διάρρηξης Μόνιμη στατική παραμόρφωση Μονοβάθμιος ταλαντωτής χωρίς απόσβεση Ολοκλήρωμα συνέλιξης Όπισθεν κατευθυντικότητα Ουδέτερη κατευθυντικότητα Παλμική εδαφική κίνηση Παλμικός δείκτης Παλμός κατευθυντικότητας Παλμός ταχύτητας Παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα Πεδίο συχνοτήτων Πεδίο χρόνου

Elastic response spectrum/spectra Forward directivity Residual ground motion Epicenter Tensile domain Sine signal Compressive domain Fault-normal component Normal fault Directivity Near Field; Near Fault Wavelet Wavelet analysis **Bell-shaped** Energy ratio Viscuous damping ratio $(\xi; \zeta)$ Peak ground velocity ratio (PGV ratio) Magnitude (M_w) Peak ground acceleration (PGA) Peak ground displacement (PGD) Peak ground velocity (PGV) Fourier transformation Non pulse-like ground motion Mother wavelet Rupture mechanism Fling step Undamped SDOF oscillator Convolution integral Backward directivity Neutral directivity Pulse-like ground motion Pulse indicator **Directivity** pulse Velocity pulse Fault-parallel component Frequency domain Time domain

Περιβάλλουσα	Envelope
Περιοδικότητα	Periodicity
Περίοδος παλμού	Pulse period (T_{ρ})
Περίοδος συντονισμού Πιθανοτική ανάλυση εκτίμησης σεισμικού	Resonance period (T _{res})
κινδύνου	Probabilistic seismic hazard analysis (PSHA)
Πλάτος	Amplitude <i>(A)</i>
Ρήγμα κεκλιμένης ολίσθησης	Dip-slip fault
Ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης	Strike-slip fault
Σεισμική καταγραφή	Seismic record
Συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου	Continuous wavelet transformation
Συνιστώσα	Component
Συντελεστής	Coefficient
Συντελεστής συσχέτισης	Cross correlation coefficient
Σχέσεις απομείωσης των εδαφικών κινήσεων	Ground motion attenuation relations
Τεχνητή χρονοϊστορία	Synthesized time history
Τυφλό ρήγμα	Blind fault
Υπέρθεση	Superposition
Υπόκεντρο; Εστία	Hypocenter; Source
Υστερητικός κύκλος	Hysteritical cycle
Φάσμα Fourier	Fourier spectrum
Φάσμα συνέλιξης	Convolution spectrum; Product spectrum
Χρονοϊστορία	Time History

English-Greek Terminology Dictionary of Near Fault Ground Motions

English	Greek
Ambiguous ground motion	Ασαφής εδαφική κίνηση
Amplitude <i>(A)</i>	Πλάτος
Backward directivity	Όπισθεν κατευθυντικότητα
Base excitation	Διέγερση βάσης
Bell-shaped	Κωδωνοειδής; Καμπανοειδής
Best fitting	Βέλτιστη προσαρμογή
Bidirectional phenomena	Διαξονικά φαινόμενα
Blind fault	Τυφλό ρήγμα
Coefficient	Συντελεστής
Component	Συνιστώσα
Compressive domain	Θλιπτικό πεδίο
Continuous wavelet transformation	Συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου
Convolution integral	Ολοκλήρωμα συνέλιξης
Convolution spectrum; Product spectrum	Φάσμα συνέλιξης
Cross correlation coefficient	Συντελεστής συσχέτισης
Cumulative absolute displacement (CAD)	Αθροιστική απόλυτη μετακίνηση
Cumulative absolute velocity (CAV)	Αθροιστική απόλυτη ταχύτητα
Cycling; Cyclic loading	Ανακύκλιση; Ανακυκλιζόμενη φόρτιση
Deep rupture	Βαθειά διάρρηξη
Dip angle	Γωνία κλίσης ρήγματος με το οριζόντιο επίπεδο
Dip-slip fault	Ρήγμα κεκλιμένης ολίσθησης
Directivity	Κατευθυντικότητα
Directivity pulse	Παλμός κατευθυντικότητας
Discrete wavelet transformation	Διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίου
Dominant pulse	Δεσπόζων παλμός
Dominant pulse period (T_p)	Δεσπόζουσα περίοδος παλμού
Edge; Peak	Αιχμή; Κορυφή
Elastic acceleration spectrum (Sa)	Ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης
Elastic displacement spectrum (Sd)	Ελαστικό φάσμα μετακίνησης
Elastic pseudo-acceleration spectrum (PSa)	Ελαστικό φάσμα ψευδο-επιτάχυνσης
Elastic pseudo-velocity spectrum (PSv)	Ελαστικό φάσμα ψευδο-ταχύτητας
Elastic response spectrum/spectra	Ελαστικό/ά φάσμα/φάσματα απόκρισης
Elastic velocity spectrum (Sv)	Ελαστικό φάσμα ταχύτητας

Energy ratio	Δάνος ενεονειών
Envelone	Πεοιβάλλουσα
Enicenter	Επίκευποο
Equit-normal component	
	Αζιμούθιο τος διεύθυνσης παράλληλα στο ρόγιμα
Forward directivity	
Cround motion	
Ground motion attenuation relations	2χεσεις απομειωσης των εσαφικών κινησεών
	Αρμονικη οιεγερση
Harmonic signal	Αρμονικό σημα
Hypocenter; Source	γποκεντρο; Εστια
Hysteritical cycle	Υστερητικος κυκλος
Inelastic response spectrum/spectra	Ανελαστικό/ά φάσμα/φάσματα απόκρισης
Magnitude (M _w)	Μέγεθος ροπής σεισμικού γεγονότος
Mother wavelet	Μητρικό κυματίδιο
Near Field; Near Fault	Κοντινό πεδίο
Neutral directivity	Ουδέτερη κατευθυντικότητα
Next generation attenuation database (NGA)	Βάση δεδομένων του προγράμματος NGA
Non pulse-like ground motion	Μη παλμική εδαφική κίνηση
Normal fault	Κανονικό ρήγμα
Original ground motion	Αρχική εδαφική κίνηση
Peak ground acceleration (PGA)	Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση
Peak ground displacement (PGD)	Μέγιστη εδαφική μετακίνηση
Peak ground velocity (PGV)	Μέγιστη εδαφική ταχύτητα
Peak ground velocity ratio (PGV ratio)	Λόγος μέγιστων εδαφικών ταχυτήτων
Periodicity	Περιοδικότητα
Phase shift (v)	Διαφορά φάσης Πιθανοτική ανάλυση εκτίμησης σεισμικού μυνδώσαν
Probabilistic seisific nazard analysis (PSHA)	
	παλμικός δεικτης
Puise period (I_p)	Περιοδος παλμου

Pulse-like ground motion Residual ground motion Resonance period (*T_{res}*) **Reverse fault** Rupture Rupture mechanism Seismic record Signal De-noising Sine signal Strike-slip fault Superposition Synthesized time history Tensile domain Thrust Time domain **Time History** Undamped SDOF oscillator Velocity pulse Vibration; Shaking Viscuous damping ratio ($\xi; \zeta$) Wavelet Wavelet analysis Wavelet duration (γ)

Παλμική εδαφική κίνηση Εναπομένουσα εδαφική κίνηση Περίοδος συντονισμού Ανάστροφο ρήγμα Διάρρηξη Μηχανισμός διάρρηξης Σεισμική καταγραφή Απομάκρυνση θορύβου σήματος Ημιτονικό σήμα Ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης Υπέρθεση Τεχνητή χρονοϊστορία Εφελκυστικό πεδίο Ανάστροφο ρήγμα με $dip ≤ 45^{\circ}$ Πεδίο χρόνου Χρονοϊστορία Μονοβάθμιος ταλαντωτής χωρίς απόσβεση Παλμός ταχύτητας Δόνηση Λόγος ιξώδους απόσβεσης Κυματίδιο Κυματική ανάλυση Διάρκεια κυματιδίου

<u>Κεφάλαιο 1</u> ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1 Κανονιστικό Πλαίσιο - Πηγές

Η διαστασιολόγηση και η αποτίμηση των κατασκευών από Ω.Σ. πραγματοποιείται σύμφωνα με τα κείμενα των Ευρωκωδίκων. Στη συνέχεια αναφέρονται τα σχετικά μέρη που χρησιμοποιούνται:

- Κανονισμός Σκυροδέματος: ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 2: "Σχεδιασμός φορέων από Σκυρόδεμα"
 Ευρωπαϊκό Πρότυπο ΕΝ 1992-1-1 : 2004.
 Μέρος 1-1: Γενικοί Κανόνες και κανόνες για κτίρια & Ελληνικό ΕΠ.
- Αντισεισμικός Κανονισμός: ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 8: "Αντισεισμικός Σχεδιασμός των Κατασκευών"
 Ευρωπαϊκό Πρότυπο ΕΝ 1998-1 : 2004.
 Μέρος 1: Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια & Ελληνικό ΕΠ.

Ευρωπαϊκό Πρότυπο ΕΝ 1998-3 : 2005 Μέρος 3: Αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας και ενισχύσεις κτιρίων & Ελληνικό Ε.Π.

Σημειώνεται ότι οι οδηγίες που δίνονται στα Εθνικά Προσαρτήματα (ΕΠ) κάθε χώρας εφαρμόζονται έναντι αντίστοιχων οδηγιών που υπάρχουν στα γενικά τεύχη του κανονισμού.

Για τη μη γραμμική συμπεριφορά των διατομών υιοθετούνται τα Αμερικάνικα πρότυπα της *FEMA 356 (Federal Emergency Management Agency),* έναντι των αντίστοιχων που προτείνονται στον Ευρωκώδικα 8 - Μέρος 3.

Κάποια στοιχεία σχετικά με τις ιδιότητες των υλικών έχουν αντληθεί από το Ευρωπαϊκό Πρότυπο ΕΝ 1998-2 : 2005

ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 8: "Αντισεισμικός Σχεδιασμός των Κατασκευών" - Μέρος 2: Γέφυρες

Τέλος, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα οπλισμού λαμβάνονται από το Ελληνικό Πρότυπο "Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων - ΚΤΧ 2008" - (ΦΕΚ 1416/Β/17-07-2008 και ΦΕΚ 2113/Β/13-10-2008).

1.2 Μέσα Ανάλυσης

Για την εξαγωγή των ελαστικών φασμάτων των σεισμικών καταγραφών αλλά και για τους οπτικούς ελέγχους που πραγματοποιούνται στις χρονοϊστορίες τους χρησιμοποιείται το λογισμικό SeismoSignal της εταιρίας Seismosoft.

Η διαστασιολόγηση των κατασκευών από Ω.Σ. πραγματοποιείται στο λογισμικό FESPA 10 της εταιρίας LH Λογισμική.

Η αποτίμηση της ανελαστικής απόκρισης των κατασκευών πραγματοποιείται στο λογισμικό SAP2000 v15.2.1 της εταιρίας Computers and Structures, Inc. (CSI).

<u>Κεφάλαιο 2</u>

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες και παράμετροι που διέπουν τις σεισμικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου. Αρχικά, περιγράφονται τρεις βασικοί μηχανισμοί διάρρηξης. Στη συνέχεια, αναλύεται ο τρόπος γένεσης των παλμών κατευθυντικότητας και η διαφοροποίηση της επιρροής του φαινομένου σε περιοχές με διαφορετικές σχετικές θέσεις ως προς την επιφάνεια του ρήγματος. Ακόμα, πραγματοποιείται μια περιγραφή των βασικότερων παραμέτρων που σχετίζονται με το φαινόμενο της κατευθυντικότητας, όπως έχουν διατυπωθεί από ερευνητές που έχουν ασχοληθεί εκτεταμένα με τις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου και αποτελούν πλέον παραδοσιακή βιβλιογραφία για την κατανόηση και αντιμετώπιση του εν λόγω φαινομένου.

2.2 Ρήγματα

Το ρήγμα αποτελεί μία διάρρηξη στο φλοιό της Γης, μια διακριτή δηλαδή ασυνέχεια, κατά μήκος της οποίας μπορεί να αναγνωριστεί σχετική κίνηση των εκατέρωθεν τεμαχών. Υπάρχουν τρία βασικά είδη ρηγμάτων, που διαφοροποιούνται ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζει η διάρρηξη ως προς το οριζόντιο επίπεδο και από τη μορφή της σχετικής ολίσθησης των τεμαχών εκατέρωθεν της διάρρηξης.

2.2.1 Ενεργά ρήγματα

Ένα σεισμοτεκτονικό ρήγμα θεωρείται *ενεργό* όταν εμφανίζει μέσο ιστορικό ρυθμό ολίσθησης τουλάχιστον 1 mm/έτος και υφιστάμενες τοπογραφικές μαρτυρίες σεισμογόνου δραστηριότητας εντός της *Ολόκαινης Περιόδου* (στα τελευταία 11000 χρόνια), όπως ορίζεται στην §3.2.2.3 του Ευρωκώδικα 8 - Μέρος 2.

2.2.2 Βασικοί τύπου ρηγμάτων

Τα ρήγματα μπορούν να χωριστούν σε τρείς βασικές κατηγορίες, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1: (1) κανονικά ρήγματα, (2) ανάστροφα ρήγματα και (3) ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης.



Σχήμα 2.1: Βασικοί τύποι ρηγμάτων (1) Κανονικό ρήγμα, (2) Ανάστροφο ρήγμα, (3) Ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης.

Στα κανονικά και στα ανάστροφα ρήγματα, που συχνά αναφέρονται στη βιβλιογραφία ενιαία ως ρήγματα κεκλιμένης ολίσθησης ή ρήγματα κατακόρυφης βύθισης (dip-slip faults), η διάρρηξη του πετρώματος κλίνει προς τα κάτω και το πέτρωμα μετακινείται προς τα πάνω ή προς τα κάτω κατά μήκος της διάρρηξης. Στο κανονικό ρήγμα (normal fault), το υπερκείμενο τέμαχος ολισθαίνει προς τα κάτω (εφελκυστικό πεδίο τάσεων). Στο ανάστροφο ρήγμα (reverse fault), το πέτρωμα και στις δύο πλευρές του ρήγματος συμπιέζεται ισχυρά. Οι συμπιεστικές δυνάμεις ωθούν το υπερκείμενο τέμαχος να ολισθήσει προς τα κάτω και το υποκείμενο τέμαχος ωθείται προς τα κάτω (θλιπτικό πεδίο τάσεων).

Στο ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης (strike-slip fault), η διάρρηξη εκτείνεται κατακόρυφα μέσα στο πέτρωμα και τα τεμάχη των πετρωμάτων κατά μήκος του ρήγματος ολισθαίνουν το ένα ως προς το άλλο οριζόντια (διατμητικό πεδίο τάσεων). Τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης χαρακτηρίζονται και ως προς τη φορά με την οποία ολισθαίνουν τα επιμέρους τεμάχη, ως δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα.

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

2.2.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός ρήγματος

Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται κάποιες βασικές γεωμετρικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη γεωμετρία και τον τύπο ενός ρήγματος.



Σχήμα 2.2: Γεωμετρικές παράμετροι ενός ρήγματος (NGA Database Documentation File).

Η τομή του επιπέδου ενός ρήγματος με ένα οριζόντιο επίπεδο σχηματίζει μια ευθεία. Το αζιμούθιο της διεύθυνσης της ευθείας αυτής, δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται μετρώντας ωρολογιακά από το βορρά προς αυτήν, ονομάζεται *Strike*, ενώ η γωνία που σχηματίζεται από την κλίση της επιφάνειας διάρρηξης, μετρώντας ωρολογιακά από το οριζόντιο επίπεδο, ονομάζεται *Dip*. Η γωνία Strike παίρνει τιμές εντός του εύρους $0^{\circ} \leq Strike \leq 360^{\circ}$, ενώ η γωνία Dip παίρνει τιμές εντός του εύρους $0^{\circ} \leq Dip \leq 90^{\circ}$. Τα ανάστροφα ρήγματα με γωνία *Dip* $\leq 45^{\circ}$ παίρνουν την ονομασία *Thrust*.
Η διάσταση *L* παράλληλα στη *Strike* διεύθυνση αποτελεί το μήκος του ρήγματος, ενώ η διάσταση *W* μετράται επί της επιφάνειας διάρρηξης από το ανώτερο τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης μέχρι το κατώτερο και αποτελεί το πλάτος του ρήγματος. Η γωνία *Rake* μετράται πάνω στο επίπεδο του ρήγματος και σχηματίζεται μετρώντας αντιωρολογιακά από τη Strike διεύθυνση μέχρι τη διεύθυνση μέσης ολίσθησης της επιφάνειας διάρρηξης και παίρνει τιμές εντός του εύρους -180° \leq Rake \leq 180°. Με βάση τη γωνία Rake αναγνωρίζεται ο τύπος του μηχανισμού διάρρηξης, αν δηλαδή το ρήγμα είναι κανονικό, ανάστροφο ή οριζόντιας ολίσθησης.

2.3 Φαινόμενα Κατευθυντικότητας

Οι εδαφικές κινήσεις κοντά στην περιοχή της διάρρηξης ενός ρήγματος μπορούν να είναι σημαντικά διαφορετικές από εκείνες μακριά από το ρήγμα. Η περιοχή κοντά στη σεισμική πηγή, η οποία καλείται Περιοχή Κοντινού Πεδίου (Near Fault Zone ή Near Field Zone) θεωρείται ότι βρίσκεται τυπικά σε απόσταση μικρότερη από 20-60 km μακριά από την περιοχή της επιφάνειας διάρρηξης. Εντός της περιοχής κοντινού πεδίου, οι σεισμικές κινήσεις επηρεάζονται σημαντικά από το μηχανισμό διάρρηξης, τη σχετική διεύθυνση μετάδοσης της διάρρηξης ως προς μια περιοχή και τις πιθανές μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις που οφείλονται στην ολίσθηση του ρήγματος. Οι παράμετροι αυτές παίζουν καθοριστικό ρόλο στα φαινόμενα που στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως *"Κατευθυντικότητα της Διάρρηξης"* (Rupture Directivity) & *"Στατική Μόνιμη Παραμόρφωση"* (Fling Step). Η εκτίμηση των σεισμικών κινήσεων κοντά σε ένα ενεργό ρήγμα θα πρέπει να γίνεται με εδαφικά προσομοιώματα που λαμβάνουν υπόψη τα παραπάνω χαρακτηριστικά των κινήσεων κοντινού πεδίου.

Ανάλογα με τη σχετική διεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης ως προς μια υπό μελέτη θέση, προκύπτουν διαφορετικές εκφάνσεις του φαινομένου της κατευθυντικότητας. Η Έμπροσθεν Κατευθυντικότητα (Forward Directivity) εμφανίζεται όταν η διάρρηξη διαδίδεται προς μια θέση και η διεύθυνση της ολίσθησης του ρήγματος πραγματοποιείται προς την ίδια διεύθυνση. Αυτό συμβαίνει, καθώς η ταχύτητα διάδοσης της διάρρηξης του ρήγματος είναι κοντά, συνήθως ελαφρώς μικρότερη, από την ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων του βράχου κοντά στην πηγή. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 για ένα μηχανισμό οριζόντιας ολίσθησης, κατά τη διάδοση της διάρρηξη από το υπόκεντρο προς μια θέση, συσσωρεύεται ενέργεια κοντά στο μέτωπο της διάρρηξης από κάθε διαδοχική ζώνη ολίσθησης κατά μήκος του ρήγματος. Το μέτωπο των κυμάτων φτάνει ως ένας μεγάλος παλμός κίνησης που χαρακτηρίζεται από μεγάλο πλάτος σε ενδιάμεσες και μεγάλες περιόδους και μικρή διάρκεια. Ο παλμός αυτός πολώνεται κυρίως την κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση (Strike Normal Direction).

Εάν μια θέση βρίσκεται κοντά στο επίκεντρο, δηλαδή η διάρρηξη διαδίδεται μακριά από τη θέση, η άφιξη των σεισμικών κυμάτων κατανέμεται στο χρόνο. Αυτή η κατάσταση, ονομάζεται Όπισθεν Κατευθυντικότητα (Backward Directivity) και χαρακτηρίζεται από κινήσεις με σχετικά μεγάλη διάρκεια και μικρό πλάτος. Η Ουδέτερη Κατευθυντικότητα (Neutral Directivity) συμβαίνει σε θέσεις που βρίσκονται στο πλάι της επιφάνειας διάρρηξης του ρήγματος και συνεπώς, η διάρρηξη δε διαδίδεται ούτε προς, ούτε μακριά από τη θέση.



Σχήμα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα επίδρασης της κατευθυντικότητας της διάρρηξης για οριζόντιο ρήγμα ολίσθησης. Η διάρρηξη αρχίζει στο υπόκεντρο και διαδίδεται με ταχύτητα περίπου ίση με το 80% της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Η εικόνα παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο του μετώπου της ρήξης σε μία δεδομένη στιγμή (από Somerville et al 1997α).

Οι επιπτώσεις του φαινομένου της κατευθυντικότητας στις εδαφικές μετακινήσεις φαίνονται στο σχήμα 2.4 που αφορά το σεισμό του 1989 στο Loma Prieta. Στο επίκεντρο του σεισμού οι οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις είναι μέτριες τόσο στην κάθετη (fault normal) όσο και στην παράλληλη (fault parallel) συνιστώσα του ρήγματος. Αυτό αποδίδεται στην όπισθεν κατευθυντικότητα. Παρ' όλα αυτά στα άκρα του ρήγματος, η έμπροσθεν κατευθυντικότητα προκαλεί έντονες οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις κατά την παράλληλη διεύθυνση της κάθετης συνιστώσας του ρήγματος, αλλά όχι τόσο μεγάλες κατά την παράλληλη διεύθυνση, όπου οι εδαφικές μετακινήσεις έχουν κοντινές τιμές με αυτές που βρίσκονται κοντά στο επίκεντρο. Οι μεγάλες και έντονες κινήσεις παρατηρούνται μόνο στη διεύθυνση της κάθετης συνιστώσας και μόνο μακριά από το επίκεντρο.

Τα φαινόμενα κατευθυντικότητας που προκαλούνται από τη διάρρηξη ενός ρήγματος μπορούν να εμφανιστούν τόσο για τις περιπτώσεις ρηγμάτων *α. οριζόντιας ολίσθησης* (strike slip) όσο και *β. κεκλιμένης ολίσθησης* (dip slip). Για την περίπτωση ρηγμάτων κεκλιμένης μετακίνησης, οι συνθήκες για την εμφάνιση φαινομένων έμπροσθεν κατευθυντικότητας συμβαίνουν σε θέσεις που βρίσκονται κοντά στην οριζόντιας ολίσθησης, η διάδοση της διατμητικής μετατόπισης σε ένα ανάστροφο ρήγμα προκαλεί τον παλμό της κίνησης στη διεύθυνση που είναι κάθετη στη διάρρηξη του ρήγματος (Somerville et al. 1997a).



Σχήμα 2.4: Αποτελέσματα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες μετακινήσεων του σεισμού του Loma Prieta του 1989 για τις κάθετες (άνω) και τις παράλληλες (κάτω) στο ρήγμα συνιστώσες. ΕΕRI, 1995.

Οι σύγχρονες ψηφιακές καταγραφές από κινήσεις κοντινού πεδίου περιέχουν μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις λόγω του στατικού πεδίου παραμόρφωσης του σεισμού. Αυτές οι στατικές μετακινήσεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως "Fling Step" συμβαίνουν σε ένα διακριτό χρονικό διάστημα αρκετών δευτερολέπτων, καθώς εκτυλίσσεται η ολίσθηση του ρήγματος. Οι μετακινήσεις που οφείλονται στη στατική αυτή μόνιμη παραμόρφωση συμβαίνουν κατά τη διεύθυνση της ολίσθησης του ρήγματος και δε συνδέονται ιδιαιτέρως με τις προαναφερθείσες δυναμικές μετατοπίσεις που οφείλονται στου ς παλμούς κατευθυντικότητας.

Στην περίπτωση ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης, οι παλμοί κατευθυντικότητας εκδηλώνονται στη διεύθυνση της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (strike-normal component), ενώ η μόνιμη στατική παραμόρφωση πραγματοποιείται στη διεύθυνση της παράλληλης στο ρήγμα συνιστώσας (strike-parallel component). Στην περίπτωση μηχανισμών κεκλιμένης ολίσθησης, τόσο η μόνιμη στατική παραμόρφωση, όσο και οι παλμοί κατευθυντικότητας συμβαίνουν στη διεύθυνση της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας. Οι διευθύνσεις στις οποίες εκδηλώνεται η μόνιμη στατική παραμόρφωση και η διάδοση των παλμών κατευθυντικότητας για μηχανισμούς οριζόντιας και κεκλιμένης ολίσθησης, δείχνονται στο σχήμα 2.5, ενώ στο σχήμα 2.6 παρουσιάζονται κάποιες χρονοϊστορίες στις οποίες φαίνονται οι συμβολές των παραπάνω για κάθε περίπτωση.







Σχήμα 2.6: Χρονοϊστορίες για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα κεκλιμένης ολίσθησης, στο οποίο φαίνονται οι επιρροές της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας μαζί και χωριστά.

2.4 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου

Οι Somerville et al. (1997a) ανέλυσαν τις συνθήκες υπό τις οποίες εμφανίζονται τα φαινόμενα της έμπροσθεν και της όπισθεν κατευθυντικότητας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7, η χωρική απόκλιση της επιρροής των φαινομένων κατευθυντικότητας από θέση σε θέση εξαρτάται αφενός από τη γωνία μεταξύ της διεύθυνσης στην οποία διαδίδεται η διάρρηξη και της διεύθυνσης στην οποία μεταφέρονται τα σεισμικά κύματα από το ρήγμα προς την εκάστοτε θέση ("ϑ" για μηχανισμούς οριζόντιας ολίσθησης και "φ" για μηχανισμούς κεκλιμένης ολίσθησης) και αφετέρου από το μέγεθος του τεμάχους της επιφάνειας διάρρηξης που βρίσκεται μεταξύ του υποκέντρου και της εκάστοτε θέσης ("Χ" για μηχανισμούς οριζόντιας ολίσθησης). Οι πιο σημαντικές επιπτώσεις της έμπροσθεν κατευθυντικότητας προκύπτουν για μικρές γωνίες μεταξύ της εξεταζόμενης θέσης και του ρήγματος και για μεγαλύτερα τμήματα της επιφάνειας διάρρηξης του ρήγματος μεταξύ της θέσης και του υποκέντρου.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμα και αν πληρούνται οι γεωμετρικές συνθήκες για την εμφάνιση των φαινομένων της έμπροσθεν κατευθυντικότητας, οι επιπτώσεις της μπορεί να μη συμβούν. Αυτό θα μπορούσε να συμβεί στην περίπτωση που ένας καταγραφικός σταθμός βρίσκεται στο τελευταίο τμήμα ενός ρήγματος και η διάρρηξη διαδίδεται προς το σταθμό, αλλά η ολίσθηση συγκεντρώνεται κοντά στο τέλος του ρήγματος όπου βρίσκεται ο σταθμός.

Για την αντιπροσώπευση των φαινομένων κατευθυντικότητας, οι Somerville et al. (1997a) συσχέτισαν τις εναπομένουσες συνιστώσες των φασμάτων απόκρισης για απόσβεση 5%, με τις γεωμετρικές παραμέτρους που φαίνονται στο σχήμα 2.7, εξάγοντας τα αποτελέσματα που φαίνονται στο σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.7: Παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να ερμηνεύσουν τις συνθήκες της κατευθυντικότητας της διάρρηξης (Somerville et al. 1997a).



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



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

Σχήμα 2.8: Προβλέψεις από τη σχέση των Somerville et al. (1997α) μεταξύ διαφορετικών συνθηκών κατευθυντικότητας.

Έρευνες σχετικά με την απόκριση των κατασκευών σε σεισμούς κοντινού πεδίου έχουν δείξει ότι η απεικόνιση των εδαφικών κινήσεων με τη μορφή χρονοϊστορίας είναι προτιμότερη από μια απεικόνιση με τη μορφή φάσματος απόκρισης (Somerville 1998; Alavi and Krawinkler 2000; Sasani and Bertero 2000; Rodriguez-Marek 2000). Η απεικόνιση με τη μορφή χρονοϊστορίας είναι προτιμότερη, αφού η μελέτη μιας εδαφικής κίνησης σε ένα χώρο συχνοτήτων, όπως σε ένα φάσμα απόκρισης, υπαινίσσεται μια στοχαστική διαδικασία κατά την οποία υπάρχει μια σχετικά ομοιόμορφη κατανομή της ενέργειας σε όλη τη διάρκεια της εδαφικής κίνησης. Συνεπώς στις εδαφικές κινήσεις που επηρεάζονται από φαινόμενα κατευθυντικότητας, όπου η ενέργεια συγκεντρώνεται σε μερικούς παλμούς στη χρονοϊστορία των ταχυτήτων, η απεικόνιση με ένα φάσμα απόκρισης δε απόκρισης δε μπορεί να απεικονίσει το φαινόμενο χαρακτηριστικά.

Μελέτες των Krawinkler and Alavi (1998) και Sasani and Bertero (2000) έχουν δείξει ότι κάποιες απλοποιημένες μορφές παλμών που βρίσκονται στη χρονοϊστορία ταχυτήτων μπορούν να απεικονίσουν τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της απόκρισης κατασκευών που υποβάλλονται σε εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζονται κάποιοι απλοποιημένοι παλμοί που έχουν προταθεί από ερευνητές και θεωρούνται αντιπροσωπευτικοί των παλμών ταχύτητας σε ένα σεισμό κοντινού πεδίου.



Σχήμα 2.9: Απλοποιημένοι παλμοί που έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές.

Οι απλοποιημένες ημιτονοειδείς απεικονίσεις των παλμών στη χρονοϊστορία των ταχυτήτων καθορίζονται από τον αριθμό των ισοδύναμων ημικυκλίων, την περίοδο κάθε ημικυκλίου και τα αντίστοιχα πλάτη τους.

Για την προσομοίωση διαξονικών φαινομένων είναι απαραίτητη μια ημιτονοειδής απεικόνιση της χρονοϊστορίας της κίνησης κατά τη διεύθυνση της παράλληλης στο ρήγμα συνιστώσας (fault parallel component), όπως απαραίτητη είναι και η χρονική καθυστέρηση μεταξύ της εκκίνησής της σε σχέση με την εκκίνηση της χρονοϊστορίας στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση (fault normal component).

Στο σχήμα 2.10 δίνονται ορισμοί των εδαφικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου, ενώ απεικονίζονται και γραφικά στο σχήμα 2.11. Ένας απλός χαρακτηρισμός είναι πιθανός με τη χρήση της *Μέγιστης Οριζόντιας Ταχύτητας (Peak Horizontal Velocity - PHV)*, της κατά προσέγγιση Δεσπόζουσας Περιόδου του παλμού (T_v) και τον αριθμό των σημαντικών ημικυκλίων της κίνησης στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση.

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







Ο προσδιορισμός της περιόδου του παλμού μπορεί να γίνει είτε χρησιμοποιώντας το χρονικό διάστημα στο οποίο πραγματοποιούνται δύο διαδοχικοί μηδενισμοί της ταχύτητας (zero crossing time), είτε το διάστημα στο οποίο η ταχύτητα είναι ίση με το 10 % της μέγιστης ταχύτητας του παλμού. Η εκτίμηση της περιόδου του παλμού ενέχει ένα μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας. Η αβεβαιότητα όμως που προκύπτει από την επεξεργασία των διαφόρων σεισμολογικών μεταβλητών είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτή.

Οι Krawinkler and Alavi (1998) προσδιορίζουν την παρουσία των παλμών ταχύτητας όταν υπάρχει μια καθαρή και σφαιρική αιχμή στο φάσμα απόκρισης ταχυτήτων μιας εδαφικής κίνησης. Όμως, αυτή η εκτίμηση της ισοδύναμης περιόδου του παλμού (*T_{v-p}*) είναι ασαφής.

Αυτοί οι διαφορετικοί ορισμοί δίνουν περίπου ισοδύναμα αποτελέσματα για σεισμικές κινήσεις που εμπεριέχουν ένα μόνο σημαντικό παλμό (single-pulse motions), όμως, για πιο πολύπλοκες καταγραφές, τα αποτελέσματα μπορεί να αποκλίνουν σημαντικά.

Εξέταση του φαινομένου σε δύο διευθύνσεις

Οι μελέτες που αφορούν την απόκριση κατασκευών σε σεισμικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου έχουν επικεντρωθεί στις συνέπειες της (μεγαλύτερης) κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (π.χ. Alavi and Krawinkler 2000). Υπάρχουν όμως εφαρμογές στις οποίες η παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα μπορεί να είναι επίσης σημαντική. Για παράδειγμα, η μείωση της δυσκαμψίας του εδάφους λόγω της απόκρισής του στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της εδαφικής κίνησης μπορεί να επιτρέψει την εκδήλωση μεγαλύτερων παραμορφώσεων κατά τη διεύθυνση της παράλληλης στο ρήγμα συνιστώσας, όπως το έδαφος αντιδρά και στην παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα του σεισμού. Μη γραμμικές διαξονικές αναλύσεις της απόκρισης του εδάφους των Rodriguez-Marek (2000) δείχνουν ότι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν τις τιμές της μέγιστης οριζόντιας ταχύτητας (PHV) και της περιόδου του παλμού (T_ν) και στις δύο προαναφερθείσες διευθύνσεις.

Στο σχήμα 2.12 παρουσιάζονται δύο σεισμικές κινήσεις κοντινού πεδίου με σημαντικά διαφορετικές κινήσεις στην παράλληλη στο ρήγμα διεύθυνση. Οι διαφορές αυτές απεικονίζονται με τη μορφή ενός τροχιακού διαγράμματος των ταχυτήτων στις δύο διευθύνσεις, που φαίνεται στο δεξί μισό του σχήματος 2.12. Επιπρόσθετη έρευνα επιτρέπει τη διάκριση των επιπτώσεων της διαξονικής καταπόνησης στην απόκριση του εδάφους και των κατασκευών εντός της ζώνης κοντινού πεδίου, όπου οι δύο οριζόντιες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης μπορούν να διαφέρουν σημαντικά. Οι *Rodriguez-Marek (2000)* σε μια έρευνα που έγινε σε σεισμικές καταγραφές στις οποίες εκδηλώνεται το φαινόμενο της έμπροσθεν κατευθυντικότητας, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι απλοποιημένες απεικονίσεις των εδαφικών κινήσεων που φαίνονται στο σχήμα 2.13 θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη διερεύνηση της σημασίας της διαξονικής καταπόνησης σε μελλοντικές μελέτες. Εάν είναι σημαντική για τη συμπεριφορά των κατασκευών, ίσως χρειάζεται να εκτιμηθεί και η κατακόρυφη συνιστώσα της εδαφικής δράσης.



Σχήμα 2.12: Χρονοϊστορίες ταχύτητας και οριζόντια τροχιακά σχέδια της κάθετης (FN) και της παράλληλης (FP) στο ρήγμα συνιστώσα για δύο καταγραφές κοντινού πεδίου.



Σχήμα 2.13: Απλοποιημένες αναπαραστάσεις ημιτονικού παλμού για εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Η PHV (μέγιστη οριζόντια ταχύτητα) για παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα αντιστοιχεί στο 50% της PHV κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (Rodriguez-Marek 2000).

<u>Κεφάλαιο 3</u>

ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕΣΩ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ – Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ BAKER

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια ποσοτική μέθοδος εντοπισμού των σημαντικών παλμών που εμπεριέχονται στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας εδαφικής κίνησης λόγω φαινομένων κατευθυντικότητας εντός μιας ζώνης κοντινού πεδίου, καθώς και μια μέθοδος ταξινόμησης των καταγραφών σε παλμικές και μη, όπως εισήχθη από τον *Baker (2007).* Το πρόβλημα προσεγγίζεται μέσω κυματικής ανάλυσης για την εξαγωγή του μεγαλύτερου παλμού ταχύτητας από μια δεδομένη εδαφική κίνηση. Το μέγεθος του εξαγόμενου παλμού συγκρίνεται με το μέγεθος της αρχικής καταγραφής για την εδραίωση ενός ποσοτικού κριτηρίου κατάταξης μιας εδαφικής κίνησης ως παλμικής ή μη.

Για τον προσδιορισμό του υποσυνόλου αυτών των παλμικών καταγραφών που πιθανώς οφείλονται σε φαινόμενα κατευθυντικότητας, ορίζονται δύο κριτήρια *i*. ο παλμός φτάνει νωρίς στη χρονοϊστορία της εδαφικής κίνησης και ii. το απόλυτο μέγεθος του παλμού ταχύτητας είναι μεγάλο. Για τις εδαφικές κινήσεις που χαρακτηρίζονται ως παλμικές διεξάγονται κάποιες επιπρόσθετες βασικές μελέτες. Η περίοδος του παλμού ταχύτητας, μια παράμετρος μεγάλου ενδιαφέροντος για τους μηχανικούς, υπολογίζεται εύκολα ως μέρος της διαδικασίας.

Αυτή η προσπάθεια κατάταξης των καταγραφών είναι χρήσιμη για ένα μεγάλο εύρος σεισμολογικών θεμάτων και θεμάτων μηχανικής που επηρεάζονται από τα φαινόμενα κατευθυντικότητας, όπως είναι η Πιθανοτική Ανάλυση Εκτίμησης Σεισμικού Κινδύνου (Probabilistic Seismic Hazard Analysis ή PSHA), η δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης απομείωσης των εδαφικών κινήσεων, και οι μη γραμμικές αναλύσεις σε κατασκευές.

Η μέθοδος του *Baker* θεωρείται αξιόπιστη και ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις επεξεργασίας μιας μεγάλης βάσης δεδομένων σεισμικών καταγραφών, αφού αποτελεί μια κλειστή μαθηματική διαδικασία, καθαρά ποσοτική, σε αντίθεση με παρωχημένες τεχνικές που έχουν εφαρμοστεί, σύμφωνα με τις οποίες η ανίχνευση των παραμέτρων του σημαντικού παλμού γίνεται με οπτικά κριτήρια και το αποτέλεσμα έγκειται στην υποκειμενική αντίληψη του φαινομένου από τον εκάστοτε ερευνητή.

3.2 Αίτια δημιουργίας παλμών ταχύτητας

Στις έρευνες του *Baker* (2007), μια εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται ως παλμική όταν εμφανίζονται στη χρονοϊστορία της εδαφικής της ταχύτητας ένας, δύο ή τρείς παλμοί, οι φτάνουν νωρίς στη χρονοϊστορία της ταχύτητας και χαρακτηρίζονται από μεγάλο πλάτος. Η εμφάνιση αυτών των παλμών οφείλεται κυρίως στο φαινόμενο της κατευθυντικότητας λόγω της διάρρηξης ενός ρήγματος, εντός μιας περιοχής κοντινού πεδίου.

Το φαινόμενο της Έμπροσθεν Κατευθυντικότητας (Forward Directivity) εμφανίζεται όταν η διάρρηξη κατευθύνεται προς μια θέση με μια ταχύτητα σχεδόν ίση με την ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων του εδάφους και η διεύθυνση ολίσθησης του ρήγματος είναι επίσης προς τη θέση αυτή. Το φαινόμενο περιγράφηκε πιο αναλυτικά στο κεφάλαιο 2 της εργασίας αυτής, όπως έχει διατυπωθεί από τους Somerville et al. (1997). Τόσο για ρήγματα *οριζόντιας ολίσθησης* (strike slip), όσο και για ρήγματα *κεκλιμένης ολίσθησης* (dip slip), η έμπροσθεν κατευθυντικότητα συναντάται τυπικά στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της εδαφικής κίνησης (strike normal component). Η επιρροή της μόνιμης στατικής εδαφικής μετακίνησης λόγω της ολίσθησης του ρήγματος που είναι γνωστή ως Fling Step δε θεωρείται σημαντική για τη μελέτη των παραμέτρων των φαινομένων κατευθυντικότητας και δε λαμβάνεται υπόψη σε κανένα σημείο της διαδικασίας που περιγράφεται στο κεφάλαιο αυτό.

Πέραν των φαινομένων κατευθυντικότητας, παλμοί στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας εδαφικής κίνησης μπορούν να εμφανιστούν και λόγω άλλων φαινομένων. Για παράδειγμα, εάν μια θέση βρίσκεται πάνω σε μια τραχεία διεπιφάνεια (*asperity*) επί της επιφάνειας ολίσθησης του ρήγματος, τα σεισμικά κύματα που οφείλονται στην τραχύτητα αυτή είναι πιθανό να δώσουν παλμούς ταχύτητας που ομοιάζουν με παλμούς κατευθυντικότητας. Ακόμα, όσον αφορά πολύπλοκους εδαφικούς σχηματισμούς, όπως είναι το άκρο μιας γεωλογικής λεκάνη, είναι πιθανή η παρέμβαση των σεισμικών κυμάτων στη δομή του εδάφους κατά τη διέλευσή τους από αυτό, και η δημιουργία παλμών ταχύτητας (basin effects).

3.3 Επιλογή μιας διαδικασίας ταξινόμησης

Για τη δόμηση μιας μεθόδου ταξινόμησης των καταγραφών, είναι απαραίτητος ο καθορισμός κάποιων καλώς ορισμένων κριτηρίων επιλογής, ώστε να διαχωρίζεται αν μια μορφή που εμπεριέχεται στη χρονοϊστορία της ταχύτητας είναι ή όχι παλμός. Όπως παρουσιάζεται παρακάτω, η μέθοδος εγγενώς δεν έχει δυαδικό χαρακτήρα, τα αποτελέσματά της δηλαδή για μια εδαφική κίνηση, δεν είναι εκ των προτέρων της μορφής "Παλμική" ή "Μη παλμική". Αντιθέτως, ο διαχωρισμός γίνεται με μια κατάταξη των καταγραφών μέσω δεικτών που εκφράζουν το κατά πόσο είναι ή όχι παλμικές και τον ορισμό ενός ορίου (threshold), με βάση το οποίο εξάγεται το συμπέρασμα δυαδικού τύπου που αναφέρθηκε παραπάνω, δηλαδή "Pulse Like" ή "Non Pulse Like".

Ακόμα, η μέθοδος θα πρέπει να είναι ικανή να διαχωρίζει τις καταγραφές χωρίς την απαίτηση κριτικής σκέψης από τον ερευνητή (πέραν του ορισμού των ορίων), ώστε να μην υπάρχουν περιθώρια λάθους ή αμφισβήτησης.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, είναι προτιμότερη η χρήση ενός σχετικά απλού μοντέλου για την περιγραφή της μορφής του παλμού. Αν και άλλοι ερευνητές έχουν αναπτύξει λεπτομερή μοντέλα για την περιγραφή του παλμού (*Fu and Menun 2004, Mavroeidis and Papageorgiou 2003*), στις μελέτες του *Baker (2007)* θεωρείται ικανοποιητική μια πιο απλή αναπαράστασή του, ώστε να είναι πιο εύκολα εφαρμόσιμη στην αυτόματη ταξινόμηση ενός μεγάλου αριθμού καταγραφών. Μια αναλογία όσον αφορά τη συσχέτιση του φαινομένου με τον εκάστοτε εδαφικό τύπο θα μπορούσε να είναι χρήσιμη, αφού από

θέση σε θέση υπάρχουν πολλές διαφορετικές και σύνθετες γεωλογικές συνθήκες, που μπορούν να περιγραφούν με αναλυτικά εδαφικά προσομοιώματα. Παρ' όλα αυτά, για την απλοποίηση της μεθόδου και τη χρήση της σε πρακτικές εφαρμογές, αλλά και για την ελαχιστοποίηση λαθών, επιλέγονται από τον *Baker (2007)* πέντε διαφορετικές κατηγορίες εδάφους.

Στο πνεύμα των παραπάνω αρχών, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η ανίχνευση των παλμών ταχύτητας μέσω κυματικής ανάλυσης είναι κατάλληλη για την ταξινόμηση των εδαφικών κινήσεων, αφού απαιτεί ελάχιστο υπολογιστικό χρόνο, διατηρεί ένα χαρακτήρα ποσοτικό και συνεπώς είναι αξιόπιστη. Οι παλμοί ταχύτητας μπορούν εύκολα να εντοπιστούν και να αφαιρεθούν, παρέχοντας έτσι δεδομένα για μια παραμετρική διερεύνηση των ιδιοτήτων τους.

3.4 Ανάλυση με κυματίδια

Η κυματική ανάλυση (wavelet analysis) έχει γνωρίσει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, τόσο σε θεωρητικό, όσο και σε πρακτικό επίπεδο, αφού έχει διερευνηθεί η χρηστικότητά της σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων. Είναι πλέον διαθέσιμη μια ευρεία βιβλιογραφία που αφορά θεωρητικά στοιχεία της μεθόδου, καθώς και προγραμματιστικές λεπτομέρειες (Mallat 1999). Μια βασική κατανόηση της μεθόδου μπορεί να επιτευχθεί μέσω της σύγκρισής της με την ανάλυση Fourier. Η ανάλυση Fourier αναπαριστά ένα σήμα κάνοντας χρήση ενός γραμμικού συνδυασμού από ημιτονικά κύματα, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει ένα σήμα άπειρου μήκους και μιας μόνο συχνότητας. Αντίθετα, η ανάλυση με κυματίδια αποσυνθέτει ένα σήμα σε κυματίδια, τα οποία είναι διακριτά τοποθετημένα στο χρόνο και αντιστοιχούν σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Για τα μη στάσιμα κύματα, όπως είναι οι σεισμικές εδαφικές κινήσεις, είναι προτιμότερη η απεικόνιση του σήματος ως ένα άθροισμα κυματιδίων, απ' ότι ένα άθροισμα στάσιμων ημιτονικών κυμάτων.

Τα κυματίδια είναι βασικές συναρτήσεις που ικανοποιούν συγκεκριμένες μαθηματικές απαιτήσεις. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρκετά πρότυπα κυματίδια για την αποσύνθεση ενός σήματος (σχήμα 3.1). Η πρότυπη συνάρτηση που εφεξής θα ονομάζεται μητρικό κυματίδιο (mother wavelet), κλιμακώνεται και μεταφέρεται στο χρόνο για το σχηματισμό μιας σειράς βασικών συναρτήσεων. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός θεωρητικών παραγόντων για την επιλογή ενός χρηστικού μητρικού κυματιδίου, όπως είναι η ορθογωνικότητα, η συμβατότητα, ο διαθέσιμος αριθμός παραγώγων, η συμμετρία κ.α. (Mallat 1999). Τα κυματίδια που απεικονίζονται στο σχήμα 3.1 χρησιμοποιούνται ευρέως και θεωρούνται κατάλληλα για το συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογών.



Σχήμα 3.1: Πρότυπα μητρικά κυματίδια (Baker 2007).

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

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

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

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

Για την ψηφιακή ανάλυση σημάτων, όπως η χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας εδαφικής κίνησης, η εξίσωση (3.2) εκφυλίζεται σε άθροισμα και δε χρησιμοποιείται ως ολοκλήρωμα, με τις αρχές όμως με τις οποίες ορίστηκε να είναι οι ίδιες.

Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις με τις οποίες πραγματοποιείται ο μετασχηματισμός κυματιδίων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ενός σήματος, ανάλογα με τον αριθμό των κλιμάκων και τον αριθμό των θέσεων για τους οποίους υπολογίζονται οι συντελεστές. Ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου (continuous wavelet transform) υπολογίζει τους συντελεστές του κυματιδίου που σχετίζονται με κάθε ακέραια τιμή των παραμέτρων κλίμακας και θέσης. Παρέχει έτσι λεπτομερείς πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά χρόνουσυχνοτήτων του σήματος. Ένα ψηφιακό όμως σήμα μήκους *n*, μπορεί να περιγραφεί πλήρως χρησιμοποιώντας έναν μειωμένο αριθμό συντελεστών. Αν τα κυματίδια είναι ορθογωνικά, τότε χρειάζονται *n* μόνο κυματίδια για την πλήρη περιγραφή οποιουδήποτε χρονικού σήματος μήκους *n*. Ο διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίου σε διάφορες κλίμακες και θέσεις. Εάν το *n* μπορεί να εκφραστεί ως δύναμη του 2, τότε υπάρχει ένας αποτελεσματικός αλγόριθμος για την εκτέλεση των υπολογισμών, ανάλογος

του μετασχηματισμού *Fourier*. Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζονται συνιστώσες από συνεχείς και διακριτούς μετασχηματισμούς κυματιδίων από ένα παράδειγμα μιας εδαφικής κίνησης, ώστε να γίνει αισθητή η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών προσεγγίσεων.



Σχήμα 3.2: Μετασχηματισμοί κυματιδίων (Baker 2007).

Ακόμα, στην περίπτωση που το μητρικό κυματίδιο αντιπροσωπεύει επαρκώς το επιθυμητό σχήμα των χαρακτηριστικών που εξετάζονται, τότε απαιτούνται ακόμα λιγότεροι από *n* συντελεστές για την επαρκή περιγραφή του σήματος. Κάποιοι από τους συντελεστές θα είναι μεγάλοι και τα κυματίδια που τους αντιστοιχούν θα αναπαριστούν τα σημαντικά χαρακτηριστικά του σήματος. Πολλοί από τους άλλους συντελεστές θα είναι κοντά στο μηδέν επειδή τα κυματίδια που τους αντιστοιχούν θα αναπαριστούν τα σημαντικά χαρακτηριστικά του σήματος. Πολλοί από τους άλλους συντελεστές θα είναι κοντά στο μηδέν επειδή τα κυματίδια που τους αντιστοιχούν θα αναπαριστούν σχετικά μικρά χαρακτηριστικά του σήματος. Αυτό το φαινόμενο διαμορφώνει τη βάση πολλών εφαρμογών απομάκρυνσης θορύβου από σήματα (*de-noising applications*) και συμπίεσης δεδομένων. Όσον αφορά την κυματική ανάλυση για την απομόνωση ενός παλμού από μια σεισμική καταγραφή, η χρηστικότητα της παραπάνω παρατήρησης έγκειται στο συμπέρασμα ότι εάν ένα σημαντικό ποσοστό της χρονοϊστορίας μιας εδαφικής κίνησης περιγράφεται από ένα ή λίγα κυματίδια ικανοποιητικά, δηλαδή με μεγάλες τιμές συντελεστών, τότε υποδεικνύεται η ύπαρξη παλμού στην καταγραφή.

Και οι δύο τύποι μετασχηματισμού κυματιδίων που περιγράφηκαν συνοπτικά παραπάνω έχουν χαρακτηριστικά που τους καθιστούν χρήσιμους για τη μέθοδο ταξινόμησης που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό. Ενώ ο συνεχής μετασχηματισμός έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος και παράγει πολλούς περισσότερους συντελεστές από αυτούς που απαιτούνται για την περιγραφή του σήματος, η υψηλότερη ανάλυση που παρέχει είναι χρήσιμη για τον ακριβή προσδιορισμό των μεγάλων συντελεστών της κίνησης, οι οποίες θα υποδείξουν την περίοδο και τη θέση του παλμού ταχύτητας σε μια καταγραφή κοντινού πεδίου.

Ακόμα, σε αντίθεση με το διακριτό μετασχηματισμό, οι συντελεστές που προκύπτουν από το συνεχή μετασχηματισμό δεν επηρεάζονται από το εάν περιέχονται πολλά μηδενικά στην αρχή ή το τέλος του σήματος. Αυτό είναι χρήσιμο, αφού δεν είναι επιθυμητή η επεξεργασία συντελεστών που εξαρτώνται από χαρακτηριστικά άσχετα με την εδαφική κίνηση, όπως μπορεί να είναι η στιγμή στην οποία το καταγραφικό όργανο άρχισε ή τέλειωσε την καταγραφή. Τόσο ο διακριτός, όσο και ο συνεχής μετασχηματισμός, χρησιμοποιούνται στο κριτήριο ταξινόμησης που περιγράφεται παρακάτω

3.5 Ταξινόμηση των χρονοϊστοριών

Η διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα αυτή κάνει χρήση της ανάλυσης με κυματίδια για την αναγνώριση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου που εμπεριέχουν παλμούς ταχύτητας, όπως έχει προταθεί από τον *Baker* (2007). Ο μεγαλύτερος παλμός που εμφανίζεται σε κάθε εδαφική κίνηση αφαιρείται και ελέγχεται το κατά πόσο αναπαριστά ένα σημαντικό μέρος του σήματος.

Για την αναγνώριση των παλμικών κινήσεων είναι σημαντικά δύο πρόσθετα κριτήρια, η χρήση των οποίων αποσκοπεί στον εντοπισμό παλμών που οφείλονται σε φαινόμενα κατευθυντικότητας. Ο παλμός θα πρέπει να φτάνει νωρίς στη χρονοϊστορία της κίνησης (ενδεικτικό χαρακτηριστικό των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου) και η μέγιστη εδαφική ταχύτητα *PGV* θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη.

3.5.1 Απομόνωση του παλμού ταχύτητας

Για κάθε εδαφική κίνηση που εξετάζεται, αφαιρείται ο μεγαλύτερος παλμός ταχύτητας χρησιμοποιώντας την αποσύνθεση του σήματος σε κυματίδια, όμως περιγράφηκε συνοπτικά παραπάνω. Για τη μορφή του μητρικού κυματιδίου ο Baker (2007) επιλέγει το κυματίδιο Daubechies 4 (προσδιορίζεται από τέσσερις παραμέτρους κλίμακας), το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα 3.1.c καθώς το σχήμα του προσεγγίζει ικανοποιητικά πολλούς παλμούς ταχύτητας σε καταγραφές σεισμών κοντινού πεδίου και συσχετίζεται καλύτερα με αυτές σε σχέση με άλλα μητρικά κυματίδια.

Για την αξιολόγηση μιας εδαφική κίνησης, αρχικά υπολογίζεται ο συνεχής κυματικός μετασχηματισμός από τη χρονοϊστορία της ταχύτητας και αναγνωρίζεται ο συντελεστής με τη μεγαλύτερη κατ' απόλυτο τιμή. Το κυματίδιο που σχετίζεται με το συντελεστή αυτό καθορίζει την περίοδο και τη θέση του παλμού, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.3: Περιγραφή της διαδικασίας αφαίρεσης παλμού (Baker 2007).

Σημειώνεται ότι ο συντελεστής ενός κυματιδίου είναι ανάλογος με την ενέργεια του κυματιδίου που του αντιστοιχεί, συνεπώς ο πρώτος παλμός που έχει το μεγαλύτερο συντελεστή, θα έχει εμπεριέχει και την περισσότερη ενέργεια. Στη συνέχεια το συγκεκριμένο κυματίδιο αφαιρείται από την εδαφική κίνηση και υπολογίζεται ο συνεχής μετασχηματισμός για την εναπομένουσα εδαφική κίνηση (residual ground motion). Επειδή η θέση και η περίοδος του σημαντικού παλμού έχουν ήδη εντοπιστεί, στο βήμα αυτό επιλέγονται μόνο τα κυματίδια που έχουν την ίδια περίοδο και έχουν θέση σχετικά κοντά (+/- μισό πλάτος του αρχικού κυματιδίου) με το κυματίδιο που έδωσε το μεγαλύτερο συντελεστή. Ο μεγαλύτερος από τους συντελεστές αυτούς αναγνωρίζεται, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.3b. Συχνά απαιτούνται μόνο ένας ή δύο συντελεστές για την περιγραφή του παλμού, όμως εξάγονται δέκα συντελεστές για τη συγκεκριμένη περίοδο και θέση για τη βέλτιστη αναλυτική αναπαράσταση του παλμού. Ένας απομονωμένος παλμός που έχει προκύψει με χρήση δέκα συντελεστών απεικονίζεται στο σχήμα 3.3c. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι βασικές συναρτήσεις των κυματιδίων που χρησιμοποιούνται για την απομόνωση του παλμού έχουν εξ' ορισμού μηδενική παραμένουσα μετακίνηση και συνεπώς οι επιπτώσεις της μόνιμης στατικής παραμόρφωσης (fling step) δε μπορούν να εκτιμηθούν με χρήση των κυματιδίων αυτών.

Κάνοντας χρήση της περιγραφόμενης διαδικασίας, ένας παλμός μπορεί να αφαιρεθεί από μια εδαφική κίνηση είτε σε αυτήν εμπεριέχεται ένας μεγάλος παλμός κατευθυντικότητας, είτε όχι. Ωστόσο, για μη παλμικές καταγραφές ο εξαγόμενος παλμός αποτελεί τυπικά ένα ασήμαντο χαρακτηριστικό της εδαφικής κίνησης και η εναπομένουσα εδαφική κίνηση είναι σχεδόν πανομοιότυπη με την αρχική. Συνεπώς για την ταξινόμηση των καταγραφών είναι απαραίτητος ο υπολογισμός ιδιοτήτων των εξαγόμενων παλμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια αυτοματοποιημένη ταξινόμηση, χωρίς καμία εξωτερική επιρροή.

Δέκα κυματίδια είναι ικανοποιητικά για την περιγραφή του παλμού. Χρησιμοποιώντας αυτή τη διαδικασία ένας παλμός μπορεί να αφαιρεθεί από οποιαδήποτε εδαφική κίνηση είτε υπάρχει, είτε όχι παλμός κατευθυντικότητας. Πρέπει να οριστεί ένα κριτήριο λοιπόν για το αν ο παλμός θα θεωρείται σημαντικός η όχι.

3.5.2 Προσδιορισμός της σημαντικότητας του αφαιρούμενου παλμού

Οι αρχικές εδαφικές κινήσεις και οι εναπομένουσες μετά την εξαγωγή του παλμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του αν μια δοθείσα εδαφική κίνηση είναι παλμική ή μη. Για την πραγματοποίηση της ταξινόμησης αυτής ο *Baker (2007)* υπολόγισε ένα πλήθος μεταβλητών και αξιολόγησε ποιοι είναι ικανοί να συνεισφέρουν στην ταξινόμηση, εκτιμούν δηλαδή ικανοποιητικά κάποια από τα χαρακτηριστικά της παλμικής κίνησης και μπορούν να αποτελέσουν δείκτες της σημαντικότητας του παλμού. Η προσέγγιση του προβλήματος πραγματοποιείται από τον *Baker* με την ταξινόμηση μιας μεγάλης ομάδας καταγραφών και στη συνέχεια την κατασκευή ενός στατιστικού μοντέλου πρόβλεψης που είναι ικανό να αναπαράγει αποτελέσματα που δίνουν κοντινές τιμές με τις αρχικές καταγραφές. Για τη μόρφωση μιας ομάδας ταξινομημένων καταγραφών επιλέγονται όλες οι συνιστώσες των καταγραφών, στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση, από τη βάση δεδομένων *Next Generation Attenuation* (*NGA*) για σεισμούς μεγέθους μεγαλύτερου από 5,5 και που είναι καταγεγραμμένες εντός 30 km από κάθε σεισμικό γεγονός.

Οι 398 επιλεχθείσες καταγραφές ταξινομούνται βάσει οπτικών ελέγχων και εντοπίζονται οι παλμοί στις χρονοϊστορίες ταχύτητας. Καταγραφές με εμφανή παλμικά ή μη παλμικά χαρακτηριστικά, όπως αυτές στα σχήματα 3.4a και 3.4d κατατάσσονται κατάληλα. Καταγραφές χωρίς διακριτά χαρακτηριστικά, όπως αυτές στα σχήματα 3.4a και 3.4d κατατάσσονται κατάληλα. Καταγραφές χωρίς διακριτά χαρακτηριστικά, όπως αυτές στα σχήματα 3.4a και 3.4d κατατάσσονται κατάληλα. Καταγραφές χωρίς διακριτά χαρακτηριστικά, όπως αυτές στα σχήματα 3.4a και 3.4d κατατάσσονται κατάληλα. Καταγραφές χωρίς διακριτά χαρακτηριστικά, όπως αυτές στα σχήματα 3.4b και 3.4c ταξινομούνται ως ασαφείς και διαχειρίζονται χωριστά, μετά την εκ των υστέρων εκτίμηση της αποδοτικότητας των κριτηρίων που τίθενται στην κυματική ανάλυση. Οι ταξινομήσεις γίνονται αρχικά με οπτικούς μόνο ελέγχους των χρονοϊστοριών ταχύτητας, χωρίς χρήση σεισμολογικών πληροφοριών και χωρίς αποκλεισμό των παλμικόν που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία της εδαφικής κίνησης ή παλμικών μορφών μικρού πλάτους. Αυτός ο "χειροκίνητος" έλεγχος του *Baker* έδωσε 124 πιθανώς παλμικές, 190 μη παλμικές και 84 ασαφείς εδαφικές κινήσεις. Μετά τη χειροκίνητη αυτή ταξινόμηση των εδαφικών κινήσεων, χρησιμοποιήθηκαν στατιστικά εργαλείε πρόβλεψης για την αναλαναγαγωγή της ταξινόμησης βάσει αυτοματοποιημένων προβλέψεων, με χρήση κυματικής ανάλυσης.



Σχήμα 3.4: Παραδείγματα καθέτων στο ρήγμα συνιστωσών σε σεισμούς κοντινού πεδίου (Baker 2007).

Ο Baker χρησιμοποιεί μια ποικιλία μεταβλητών πρόβλεψης, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους των συντελεστών που προκύπτουν από την αποσύνθεση του σήματος σε κυματίδια, τις φασματικές τιμές απόκρισης, τις μέγιστες εδαφικές ταχύτητες και ενεργειακές τιμές. Μετά από την εξέταση των μεταβλητών πρόβλεψης σε σειρές της μιας, των δύο και των τριών, ελέγχεται κατά πόσο αυτές μπορούν να παράξουν τα ίδια αποτελέσματα με τη χειροκίνητη ταξινόμηση. Δύο μεταβλητές που είναι αφενός εύκολες στον υπολογισμό και αφετέρου δείχνουν την ικανότητα πρόβλεψης που αναζητείται, είναι η μέγιστη εδαφική ταχύτητα (Peak Ground Velocity ή PGV) της εναπομένουσας καταγραφής προς τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα της αρχικής καταγραφής και η ενέργεια της εναπομένουσας καταγραφής προς την ενέργεια της αρχικής καταγραφής. Αυτές οι μεταβλητές αναφέρονται στις μελέτες του Baker ως: «Λόγος PGV" (PGV ratio) και «Λόγος ενεργειών» (Energy ratio), αντίστοιχα. Στο σχήμα 3.5 εμφανίζεται ένα διάγραμμα μεταξύ των λόγων αυτών για τις καταγραφές που έχουν ταξινουν ταξινομηθεί χειροκίνητα, στο οποίο φαίνεται ότι η χρήση των συγκεκριμένων δεικτών είναι ικανοί για την αναπαραγωγή της χειροκίνητης ταξινόμησης.



Σχήμα 3.5: Περιγραφή της διαδικασίας αφαίρεσης παλμού (Baker 2007).

Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των δύο αυτών δεικτών πρόβλεψης, επιτρέπει τη δημιουργία ενός δείκτη πρόβλεψης της ύπαρξης ή όχι παλμού σε μια εδαφική κίνηση. Ο δείκτης αυτός που καλείται από τον *Baker* ως *Pulse Indicator* (*Παλμικός δείκτης*), βασίζεται στο μέρος των καταγραφών που έχουν όμοια χαρακτηριστικά και έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές από τη χειροκίνητη ταξινόμηση και προκύπτει ως:

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

Ο Παλμικός δείκτης παίρνει τιμές εντός του εύρους 0 και 1, με τις υψηλές τιμές να παρέχουν μια ισχυρή ένδειξη ότι μια εδαφική κίνηση είναι παλμική. Τα αποτελέσματα των προβλέψεων του Παλμικού δείκτη διαμορφώνουν ένα συνεχές φάσμα τιμών μεταξύ των ακραίων μηδέν και ένα. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων δυαδικού τύπου, δηλαδή «Παλμική» ή «Μη παλμική» καταγραφή, εδραιώνονται δύο εσωτερικά όρια κατάταξης. Συνεπώς, για καταγραφές όπου ο Παλμικός δείκτης παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 0,85 ή μικρότερες από 0,15, αυτές κατατάσσονται ως Παλμικές και Μη παλμικές, αντίστοιχα. Οι εδαφικές κινήσεις που δίνουν ενδιάμεσες τιμές του Pulse Indicator χαρακτηρίζονται ως Ασαφείς (Ambiguous) όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.5.

3.5.3 Αποκλεισμός των παλμών που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία ταχύτητας

Ενώ οι εδαφικές κινήσεις που ταξινομούνται ως παλμικές με βάση τη διαδικασία που περιγράφηκε στις παραπάνω ενότητες εμπεριέχουν σημαντικά παλμικά χαρακτηριστικά, αυτά μπορεί να οφείλονται σε μια ποικιλία φαινομένων πέρα από τα φαινόμενα κατευθυντικότητας. Εάν η επεξεργασία ενός εύρους εδαφικών κινήσεων πραγματοποιείται για την εύρεση των παλμών που οφείλονται σε φαινόμενα κατευθυντικότητας, θα πρέπει να εδραιωθεί ένα κριτήριο για τον εντοπισμό εκείνων των παλμών που φτάνουν νωρίς στη χρονοϊστορία της ταχύτητας, όπως προβλέπεται από θεωρητικές σεισμολογικές μελέτες ότι συμβαίνει στους παλμούς που οφείλονται στην κατευθυντικότητα. Οι παλμοί που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μπορούν να εντοπιστούν υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας (*Cumulative Squared Velocity* ή *CSV*) της αρχικής καταγραφής και του εξαγόμενου παλμού. Σε μια τυχαία χρονική στιγμή *t* το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας υπολογίζεται ως:

$$CSV(t) = \int_{0}^{1} V^{2}(u) du \quad (3.4)$$

όπου V(u) είναι η ταχύτητα της εδαφικής κίνησης τη χρονική στιγμή u. Υπολογίζοντας το παραπάνω ολοκλήρωμα για την αρχική καταγραφή και για τον εξαγόμενο παλμό, καθορίζονται οι χρονικές στιγμές για τις οποίες καθένα φτάνει το x% του συνολικού του CSV. Οι χρονικές αυτές στιγμές συμβολίζονται ως t_{x%,orig} και t_{x%,pulse} για την αρχική εδαφική κίνηση και για τον παλμό αντίστοιχα.

Μετά την εξέταση των αρχικών και των εναπομενουσών εδαφικών κινήσεων (original & residual ground motion) για κάθε καταγραφή, εκτελείται μια βαθμονόμηση της διαδικασίας που δείχνει ότι οι παλμοί που φτάνουν νωρίς στη χρονοϊστορία της ταχύτητας έχουν τιμές $t_{20\%,orig}$ μεγαλύτερες από το χρόνο $t_{10\%,pulse}$. Δηλαδή για να θεωρείται ότι ο παλμός βρίσκεται στην αρχή της εδαφικής κίνησης, θα πρέπει να φτάνει το 10% του συνολικού του CSV, πριν η εδαφική κίνηση φτάνει το 20% του συνολικού της CSV. Το κριτήριο αυτό διασφαλίζει ότι ένα σημαντικό ποσοστό της ενέργειας του παλμού έχει εκδηλωθεί πριν ακόμα αναπτυχθεί σημαντικό μέρος της ενέργειας της αρχικής χρονοϊστορίας. Στα σχήματα 3.6 και 3.7 απεικονίζονται παραδείγματα παλμών που φτάνουν νωρίς και αργά στη χρονοϊστορία της εδαφικής κίνησης.



Σχήμα 3.6: Παλμός στην αρχή της χρονοϊστορίας: (a), (b) χρονοϊστορία ταχύτητας και παλμού, (c) *CSV (Baker 2007*).



Σχήμα 3.7: Παλμός στο τέλος της χρονοϊστορίας. (a), (b) χρονοϊστορία ταχύτητας και παλμού, (c) *CSV (Baker 2007).*

Ενώ στις μελέτες του Baker οι παλμοί που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία της κίνησης αποκλείονται ως παλμοί κατευθυντικότητας, το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

3.5.4 Αποκλεισμός των εδαφικών κινήσεων με PGV<30cm/s

Η τελευταία κατάσταση που τίθεται υπό εξέταση στις μελέτες του *Baker* αφορά σεισμικές εδαφικές κινήσεις μικρής έντασης στις οποίες εμφανίζονται παλμικές μορφές στη χρονοϊστορία της ταχύτητάς τους. Αυτό παρατηρείται για παράδειγμα σε σεισμικές κινήσεις σύντομης διάρκειας και μικρού μεγέθους που εμφανίζουν ανακλάσεις κατά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων. Αντιπροσωπευτικά, απεικονίζεται στο σχήμα 3.8 μια εδαφική κίνηση μεγέθους 5.1, για την οποία υποδεικνύεται ότι η εμφάνιση του παλμού ταχύτητας μπορεί να είναι απότοκο της σύντομης διάρκειας της εδαφικής κίνησης και δεν οφείλεται στο φαινόμενο της κατευθυντικότητας.



Σχήμα 3.8: Εδαφική κίνηση με μικρή PGV που εμφανίζεται ως παλμική και αποκλείεται (Baker 2007).

Για τον αποκλεισμό των καταγραφών αυτών, αποκλείονται οι σεισμικές εδαφικές κινήσεις με μέγιστη εδαφική ταχύτητα (*PGV*) μικρότερη των *30cm/s*. Το κριτήριο αυτό αποκλείει αυτόματα και τις καταγραφές μακρινού πεδίου.

Τα τρία κριτήρια που περιγράφηκαν στην ενότητα αυτή μπορούν να συνδυαστούν με διάφορους τρόπους για τη δημιουργία ενός υποσυνόλου παλμικών εδαφικών κινήσεων. Για τη δημιουργία ενός τέτοιου υποσυνόλου, ο *Baker* εξέτασε όλες τις καταγραφές της βάσης δεδομένων *NGA* στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση και κατέληξε σε 91 παλμικές κινήσεις (*πίνακας 1*) που πληρούν και τα τρία κριτήρια που αναφέρθηκαν, δηλαδή:

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

3.6 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού

Η περίοδος ενός παλμού ταχύτητας είναι μια κρίσιμη και σημαντική παράμετρος για το δομοστατικό μηχανικό, αφού ο λόγος της περιόδου του παλμού προς τη θεμελιώδη περίοδο μιας κατασκευής μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόκριση της κατασκευής (Alavi and Krawinkler 2001, Anderson and Bertero 1987, Mavroeidis et al. 2004). Εξετάζοντας τη δεσπόζουσα συχνότητα του χρησιμοποιούμενου κυματιδίου που χρησιμοποιείται για την περιγραφή του παλμού ταχύτητας μιας εδαφικής κίνησης, ο Baker στα πλαίσια των μελετών του προσδιορίζει την περίοδο του παλμού.

Η έννοια της περιόδου ενός κυματιδίου δεν είναι ξεκάθαρα ορισμένη, όπως συμβαίνει στα ημιτονικά κύματα που προκύπτουν από ανάλυση *Fourier*. Παρ' όλα αυτά η περίοδος που σχετίζεται με το μέγιστο πλάτος *Fourier* ενός κυματιδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό μιας ψευδο-περιόδου. Στο σχήμα 3.9 δείχνεται το παράδειγμα ενός κυματιδίου συγκριτικά με ένα ημιτονικό σήμα που έχει περίοδο ίση με εκείνη στην οποία παρατηρείται το μεγαλύτερο πλάτος *Fourier* του κυματιδίου. Η ψευδο-περίοδος της μεγαλύτερης συνιστώσας του κυματιδίου χρησιμοποιείται ως η περίοδος παλμού της εδαφικής κίνησης. Οι περίοδοι των παλμών ταχύτητας για τις καταγραφές που χαρακτηρίζονται παλμικές από τον *Baker* δίνονται στον πίνακα 1.



Σχήμα 3.9: Κυματίδιο Daubechies και ημιτονικό κύμα με περίοδο ίση με τη μέγιστη της κυματομορφής από το φάσμα Fourier (Baker 2007).

Πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει διαφορετικές μεθόδους για τον προσδιορισμό της περιόδου του παλμού ταχύτητας. Κάποιες από αυτές λαμβάνουν υπόψη το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών μηδενισμών των τιμών του κυματιδίου ή κάνουν χρήση μη γραμμικής βελτιστοποίησης, ώστε να γίνει παρεμβολή ενός περικομμένου ημιτόνου μέσα στον παλμό (Akkar et al. 2005, Bray and Rodriguez-Marek 2004, Mavroeidis and Papageorgiou 2003, Menun and Fu 2002). Οι μέθοδοι αυτές εμπεριέχουν ένα βαθμό υποκειμενικότητας όσον αφορά τα σημεία μηδενισμού σε περιπτώσεις που η καταγραφή έχει θόρυβο, ή όσον αφορά την επιλογή λογικών σημείων έναρξης του παλμού, ώστε να συγκλίνει η βελτιστοποίηση, γι' αυτό και δεν εφαρμόζονται στις αναλύσεις του Baker.

Η κύρια εναλλακτική μέθοδος για τον προσδιορισμό της περιόδου ενός παλμού είναι η επιλογή της περιόδου στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη αιχμή του φάσματος ταχύτητας της εδαφικής κίνησης. Στο σχήμα 3.10 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα των περιόδων των παλμών που εξήχθησαν μέσω κυματικής ανάλυσης ως προς τις περιόδους που προκύπτουν από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος ταχύτητας, για τις 91 καταγραφές που έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές από το *Baker* και δείχνονται στον πίνακα 1. Οι περίοδοι που εξάγονται από τις δύο αυτές προσεγγίσεις είναι κατά βάση παρόμοιες, με τις περιόδους *T*_ρ που προκύπτουν από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος ταχύτητας του εξάγονται από τις δύο αυτές προσεγγίσεις είναι κατά βάση παρόμοιες, με τις περιόδους *T*_ρ που προκύπτουν από την κυματική ανάλυση να είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες *T*_ρ που υπολογίζονται από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος της ταχύτητας. Σημειώνεται ότι και οι ερευνητές Bray and Rodriguez-Marek, 2004 έχουν κάνει την ίδια παρατήρηση.



Σχήμα 3.10: Περίοδος παλμού (*T_p*) από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος της ταχύτητας σε σχέση με την περίοδο παλμού (*T_p*) από την ψευδο-περίοδο του κυματιδίου για τις 91 εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου.

Στις περιπτώσεις όπου οι περίοδοι που λαμβάνονται από την κυματική ανάλυση και από το φάσμα ταχύτητας διαφέρουν σημαντικά, η περίοδος που προκύπτει από την κυματική ανάλυση δείχνει να είναι πιο αξιόπιστο μέτρο ένδειξης της περιόδου του παλμού. Στις περιπτώσεις αυτές, η περίοδος που αντιστοιχεί στη μέγιστη φασματική ταχύτητα σχετίζεται γενικά με υψίσυχνες συνιστώσες της ταλάντωσης της εδαφικής κίνησης, ενώ η περίοδος του κυματιδίου σχετίζεται με τον ορατό παλμό ταχύτητας. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας περίπτωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.11, όπου οι κύριοι διαδοχικοί μηδενισμοί που σχετίζονται με τον παλμό της εδαφικής κίνησης απέχουν κατά 7,3 sec και η αιχμή της φασματικής ταχύτητας εμφανίζεται σε περίοδο 1,4 sec, ενώ η ψευδο-περίοδος του κυματιδίου είναι 7,5 sec και είναι εμφανές ότι ταιριάζει με την περίοδο του παλμού που αναγνωρίζεται οπτικά.



Σχήμα 3.11: Η αρχική κίνηση, ο εξαγόμενος παλμός και η εναπομένουσα εδαφική κίνηση για την εδαφική κίνηση Landers 1992, Yermo Fire Station. (a) Χρονοϊστορίες ταχύτητας b) Φάσματα ταχύτητας στα οποία φαίνεται ο προσδιορισμός της περιόδου του παλμού με τη χρήση του φάσματος ψευδο-ταχύτητας και μέσω κυματικής ανάλυσης.

Η προσέγγιση της περιόδου από τον Baker με χρήση της ψευτο-περιόδου του κυματιδίου θεωρείται αξιόπιστη σε σχέση με τις άλλες εναλλακτικές, αφού προκύπτει μέσα από μια αυτοματοποιημένη διαδικασία χωρίς υποκειμενικά κριτήρια, ενώ παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα από τη μέθοδο που αφορά τη μέγιστη αιχμή του φάσματος της ψευδοταχύτητας.

3.7 Εντοπισμός παλμών σε ένα εύρος προσανατολισμών

Στην ενότητα αυτή κρίνεται σκόπιμη η αναφορά κάποιων βασικών παρατηρήσεων από το μοντέλο εκτίμησης σεισμικού κινδύνου των *Shahi and Baker* (2011), στο οποίο λαμβάνεται υπόψη η επιρροή των φαινομένων κατευθυντικότητας.

Ενώ οι παλμοί ταχύτητας που οφείλονται στα φαινόμενα κατευθυντικότητας αναμένεται να εμφανίζονται τυπικά στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της εδαφικής κίνησης (Somerville et al. 1997), πολλές επιφάνειες διάρρηξης έχουν ακανονική γεωμετρία, γεγονός που καθιστά τον καθορισμό της ακριβούς κάθετης στο ρήγμα διεύθυνσης δύσκολο. Όπως αναφέρεται και στις μελέτες των Howard et al. 2005, παλμικές εδαφικές κινήσεις παρατηρούνται σε ένα εύρος διευθύνσεων. Στο σχήμα 3.12 παρουσιάζονται οι τιμές του παλμικού δείκτη (pulse indicator score) όπως έχει υπολογιστεί με τον αλγόριθμο του Baker (2007) για μια θέση, σε διάφορες διευθύνσεις. Οι τιμές του παλμικού δείκτη δείχνουν ότι παλμικές εδαφικές κινήσεις εντοπίζονται σε ένα εύρος διευθύνσεια.

Για τη μελέτη των διευθύνσεων στις οποίες παρατηρούνται παλμικές κινήσεις, οι καταγραφές περιστρέφονται από τους Shahi and Baker (2011) σε όλες τις δυνατές διευθύνσεις και η εδαφική κίνηση που προκύπτει σε κάθε διεύθυνση ταξινομείται ως





Σχήμα 3.12: Τιμές του παλμικού δείκτη συναρτήσει του προσανατολισμού για την καταγραφή EC Country Center από το σεισμό στο Imperial Valley του 1979. Οι σκιασμένες επιφάνειες υποδεικνύουν τις διευθύνσεις στις οποίες παρατηρήθηκε ένας σημαντικός παλμός.

Σημειώνεται ότι η διαδικασία περιστροφής, όπως και η διαδικασία ταξινόμησης των καταγραφών, αφορά μόνο τις οριζόντιες διευθύνσεις μιας εδαφικής κίνησης και είναι πιθανό να μην είναι αποτελεσματική σε περιπτώσεις που ο παλμός εκδηλώνεται εκτός του οριζόντιου επιπέδου. Για μηχανισμούς διάρρηξης μη οριζόντιας ολίσθησης (non-strike-slip faults, δηλαδή dip-slip faults), η κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση δε βρίσκεται εντός του οριζόντιου επιπέδου. Ωστόσο στις περιπτώσεις αυτές, η μέθοδος μπορεί να είναι αποτελεσματική εκτός του οριζόντιου επιπέδου δεν είναι σημαντικοί.

Η παρατήρηση που παρουσιάζεται στην ενότητα αυτή υπάρχει και στις μελέτες του Baker (2007), όπου γίνεται αναφορά στην εφαρμογή της διαδικασίας ταξινόμησης σε εδαφικές κινήσεις δύο συνιστωσών, δηλαδή δύο διαστάσεων. Χαρακτηριστικά, αναφέρεται από τον Baker (2007) το παράδειγμα της καταγραφής TCU075 στο Tsaotun από το σεισμικό γεγονός του Chi-Chi, Taiwan, η χρονοϊστορία ταχύτητας της οποίας φαίνεται στο σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13: Χρονοϊστορία ταχύτητας της καταγραφής Tsaotun (TCU075) από το σεισμό στο Chi-Chi της Ταϊβάν. (a) Χρονοϊστορίες στην κάθετη και στην παράλληλη στο ρήγμα διευθύνσεις. (b) Τροχιακό διάγραμμα της ταχύτητας στην κάθετη στο ρήγμα συνιστωσα ως προς την παράλλη.

Η παρουσία παλμού είναι εμφανής στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα, ενώ δεν εμφανίζεται κάποιος παλμός στην παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα, όπως υποδεικνύεται από τους παλμικούς δείκτες 0,999 και 0,001 αντίστοιχα. Περιστρέφοντας τις δύο συνιστώσες της εδαφικής κίνησης, είναι δυνατός ο υπολογισμός του παλμικού δείκτη για διάφορες διευθύνσεις. Αυτές οι τιμές του παλμικού δείκτη παρουσιάζονται για την καταγραφή *TCU075* στο σχήμα 3.14, στο οποίο εντοπίζεται η παρουσία παλμού σε περισσότερες από τις μισές γωνίες, υποδεικνύοντας ότι οι παλμοί κατευθυντικότητας μπορούν να επηρεάσουν κατασκευές σε ένα εύρος διευθύνσεων.



Σχήμα 3.14: Τιμές του Παλμικού δείκτη συναρτήσει του προσανατολισμού για την καταγραφή Tsaotun (TCU075) από το σεισμό στο Chi-Chi της Ταϊβάν.

Αυτό συμβαίνει αφού ο παλμός ταχύτητας, ακόμα και όταν παρατηρείται σε μια γωνία άλλη από αυτή της κύριας αναμενόμενης διεύθυνσης, μπορεί να είναι ακόμα μεγάλος σε σχέση με τις μικρότερες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης που σχετίζονται με το μη παλμικό περιεχόμενό της καταγραφής. Ακόμα, άλλες εδαφικές κινήσεις υποδεικνύουν ότι κάποιες φορές ο παλμός ταχύτητας εμφανίζεται σε μια διεύθυνση που διαφέρει σημαντικά από την κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση. Αυτά τα φαινόμενα έχουν παρατηρηθεί από ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με τους παλμούς ταχύτητας (*Howard et al. 2005, Mavroeidis and Papageorgiou 2002*) και η προτεινόμενη διαδικασία του *Baker (2007*) στην οποία γίνεται η χρήση του παλμικού δείκτη, παρέχει μια μέθοδο ποσοτικού προσδιορισμού του εύρους των γωνιών στις οποίες παρατηρούνται παλμοί ταχύτητας.

Όπως αναφέρεται από τους Shahi and Baker (2011), για τον υπολογισμό του σεισμικού κινδύνου σε μια θέση που βρίσκεται κοντά σε ρήγματα, είναι απαραίτητη η γνώση της πιθανότητας εμφάνισης μιας παλμικής κίνησης σε μια τυχαία διεύθυνση. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα ταξινόμησης ενός πλήθους στραμμένων καταγραφών, ώστε να προκύψει μια σχέση υπολογισμού της πιθανότητας εμφάνισης ενός παλμού σε μια διεύθυνση *a*, δεδομένου ότι παρατηρείται η ύπαρξη κάποιου παλμού στη θέση. Η πιθανότητα αυτή συμβολίζεται *P*(pulse at *a*|pulse), όπου η γωνία *a* παριστά τη μικρότερη γωνία που μετράται από το αζιμούθιο της παραλληλης στο ρήγμα διεύθυνσης (*Strike direction*) όπως δίνεται στη βάση δεδομένων *NGA*. Στο σχήμα 3.15 φαίνεται μια απεικόνιση της γωνίας *a* σε σχέση με άλλες γεωμετρικές παραμέτρους μεταξύ μιας τυχαίας θέσης και του υποκέντρου που παρουσιάζουν κάποια ισχυρή πιθανοτική συσχέτιση με την παρουσία η συσχέτιση της πιθανότητας *P*(pulse at *a*|pulse) προκύπτει διαφορετική για μηχανισμούς οριζόντιας και κεκλιμένης ολίσθησης, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η συσχέτιση της πιθανότητας *P*(pulse at *a*|pulse) προκύπτει διαφορετική για μηχανισμούς οριζόντιας.



Σχήμα 3.15: Γεωμετρικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται στις σχέσεις γραμμικής παλινδρόμησης για μηχανισμό (a) οριζόντιας ολίσθησης και (b) κεκλιμένης ολίσθησης *(Shahi and Baker, 2011)*.

Στα σχήματα 3.16a και 3.16a φαίνονται οι ισο-πιθανοτικές καμπύλες εμφάνισης παλμού ταχύτητας πάνω στους χάρτες δύο περιοχών για ένα ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και για ένα ρήγμα μη οριζόντιας ολίσθησης, αντίστοιχα. Οι ισο-πιθανοτικές αυτές καμπύλες υποδεικνύουν την πιθανότητα εμφάνισης παλμού όπως υπολογίζεται με βάση τα

γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε διάρρηξης, για τους σεισμούς στο Imperial Valley και στο Northridge αντίστοιχα. Οι χάρτες αυτοί μπορούν να συγκριθούν με τους πραγματικούς χάρτες των περιοχών, στα σχήματα 3.17a και 3.17b όπου τονίζονται οι θέσεις όπου παρατηρήθηκαν παλμικές εδαφικές κινήσεις για τους σεισμούς στο Imperial Valley και Northridge, αντίστοιχα.



Σχήμα 3.16: Χάρτης του σεισμικού γεγονότος στο Imperial Valley που δείχνει: (a) ισοπιθανοτικές καμπύλες εμφάνισης παλμού για τη δεδομένη διάρρηξη και (b) θέσεις όπου παρατηρήθηκε παρουσία παλμού (Shahi and Baker, 2011).



Σχήμα 3.17: Χάρτης του σεισμικού γεγονότος στο Northridge που δείχνει: (a) ισοπιθανοτικές καμπύλες εμφάνισης παλμού για τη δεδομένη διάρρηξη και (b) θέσεις όπου παρατηρήθηκε παρουσία παλμού (Shahi and Baker 2011).

Γίνεται εμφανές ότι το μοντέλο προβλέπει υψηλή πιθανότητα εμφάνισης παλμού στις περιοχές που φαίνεται ότι έχουν εμφανιστεί φαινόμενα κατευθυντικότητας και το σχήμα των ισο-πιθανοτικών καμπυλών παρουσιάζει ισχυρή συσχέτιση με τις πραγματικές παρατηρήσεις.

#	Event	Year	Station	Tp	PGV	Mw ^a	Closest Dist. ^b	Epi. Dist. ^۲
1	San Fernando	1971	Pacoima Dam (upper left abut)	1.6	116.5	6.6	1.8	11.9
2	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #6	1.2	51.5	5.7	3.1	4.4
3	Imperial Valley-06	1979	Aeropuerto Mexicali	2.4	44.3	6.5	0.3	2.5
4	Imperial Valley-06	1979	Agrarias	2.3	54.4	6.5	0.7	2.6
5	Imperial Valley-06	1979	Brawley Airport	4.0	36.1	6.5	10.4	43.2
6	Imperial Valley-06	1979	EC County Center FF	4.5	54.5	6.5	7.3	29.1
7	Imperial Valley-06	1979	EC Meloland Overpass FF	3.3	115.0	6.5	0.1	19.4
8	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #10	4.5	46.9	6.5	6.2	26.3
9	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #11	7.4	41.1	6.5	12.5	29.4
10	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #3	5.2	41.1	6.5	12.9	28.7
11	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #4	4.6	77.9	6.5	7.1	27.1
12	mperial Valley-06	1979	El Centro Array #5	4.0	91.5	6.5	4.0	27.8
13	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #6	3.8	111.9	6.5	1.4	27.5
14	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #7	4.2	108.8	6.5	0.6	27.6
15	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #8	5.4	48.6	6.5	3.9	28.1
16	Imperial Valley-06	1979	El Centro Differential Array	5.9	59.6	6.5	5.1	27.2
17	Imperial Valley-06	1979	Holtville Post Office	4.8	55.1	6.5	7.7	19.8
18	Mammoth Lakes-06	1980	Long Valley Dam (Upr L Abut)	1.1	33.1	#	5.9	14.0
19	Irpinia, Italy-01	1980	Sturno	3.1	41.5	6.9	10.8	30.4
20	Westmorland	1981	Parachute Test Site	3.6	35.8	5.9	16.7	20.5
21	Coalinga-05	1983	Oil City	0.7	41.2	#	5.8	4.6
22	Coalinga-05	1983	Transmitter Hill	0.9	46.1	#	5.8	6.0
23	Coalinga-07	1983	Coalinga-14th & Elm (Old CHP)	0.4	36.1	#	5.2	9.6
24	Morgan Hill	1984	Coyote Lake Dam (SW Abut)	1.0	62.3	6.2	0.5	24.6
25	Morgan Hill	1984	Gilroy Array #6	1.2	35.4	6.2	9.9	36.3
26	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 COO	1.6	31.2	1.2	6.3	68.2
27	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 M07	1.6	36.1	6.1	6.3	67.2
28	N. Palm Springs	1986	North Palm Springs	1.4	73.6	6.1	4.0	10.6
29	San Salvador	1986	Geotech Investig Center	0.9	62.3	5.8	6.3	7.9
30	Whittier Narrows-01	1987	Downey - Co Maint Bldg	0.8	30.4	6.0	20.8	16.0
31	Whittier Narrows-01	1987	LB - Orange Ave	1.0	32.9	6.0	24.5	20.7
32	Superstition Hills-02	1987	Parachute Test Site	2.3	106.8	6.5	1.0	16.0
33	Loma Prieta	1989	Alameda Naval Air Stn Hanger	2.0	32.2	6.9	71.0	90.8
34	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #2	1.7	45.7	6.9	11.1	29.8
35	Loma Prieta	1989	Oakland - Outer Harbor Wharf	1.8	49.2	6.9	74.3	94.0
36	Loma Prieta	1989	Saratoga - Aloha Ave	4.5	55.6	6.9	8.5	27.2

Πίνακας 1: Παλμικές καταγραφές της βάσης δεδομένων NGA (Baker 2007).

37	Erzican, Turkey	1992	Erzincan	2.7	95.4	6.7	4.4	9.0
38	Cape Mendocino	1992	Petrolia	3.0	82.1	7.0	8.2	4.5
39	Landers	1992	Barstow	8.9	30.4	7.3	34.9	94.8
40	Landers	1992	Lucerne	5.1	140.3	7.3	2.2	44.0
41	Landers	1992	Yermo Fire Station	7.5	53.2	7.3	23.6	86.0
42	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant	3.5	67.4	6.7	5.4	13.0
43	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant Generator	3.5	67.4	6.7	5.4	13.0
44	Northridge-01	1994	LA - Wadsworth VA Hospital North	2.4	32.4	6.7	23.6	19.6
45	Northridge-01	1994	LA Dam	1.7	77.1	6.7	5.9	11.8
46	Northridge-01	1994	Newhall - W Pico Canyon Rd.	2.4	87.8	6.7	5.5	21.6
47	Northridge-01	1994	Pacoima Dam (downstr)	0.5	50.4	6.7	7.0	20.4
48	Northridge-01	1994	Pacoima Dam (upper left)	0.9	107.1	6.7	7.0	20.4
49	Northridge-01	1994	Rinaldi Receiving Sta	1.2	167.2	6.7	6.5	10.9
50	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta	3.5	130.3	6.7	5.4	13.1
51	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta East	3.5	116.6	6.7	5.2	13.6
52	Northridge-01	1994	Sylmar - Olive View Med FF	3.1	122.7	6.7	5.3	16.8
53	Kobe, Japan	1995	Takarazuka	1.4	72.6	6.9	0.3	38.6
54	Kobe, Japan	1995	Takatori	1.6	169.6	6.9	1.5	13.1
55	Kocaeli, Turkey	1999	Gebze	5.9	52.0	7.5	10.9	47.0
56	Chi-Chi, Taiwan	1999	СНY006	2.6	64.7	7.6	9.8	40.5
57	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY035	1.4	42.0	7.6	12.7	43.9
58	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY101	4.8	85.4	7.6	10.0	32.0
59	Chi-Chi, Taiwan	1999	ТАРООЗ	3.4	33.0	7.6	102.4	151.7
60	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU029	6.4	62.3	7.6	28.1	79.2
61	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU031	6.2	59.9	7.6	30.2	80.1
62	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU034	8.6	42.8	7.6	35.7	87.9
63	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU036	5.4	62.4	7.6	19.8	67.8
64	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU038	7.0	50.9	7.6	25.4	73.1
65	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU040	6.3	53.0	7.6	22.1	69.0
66	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU042	9.1	47.3	7.6	26.3	78.4
67	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU046	8.6	44.0	7.6	16.7	68.9
68	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU049	11.8	44.8	7.6	3.8	38.9
69	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU053	12.9	41.9	7.6	6.0	41.2
70	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU054	10.5	60.9	7.6	5.3	37.6
71	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU056	12.9	43.5	7.6	10.5	39.7
72	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU060	12.0	33.7	7.6	8.5	45.4
73	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU065	5.7	127.7	7.6	0.6	26.7
74	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU068	12.2	191.1	7.6	0.3	47.9
75	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU075	5.1	88.4	7.6	0.9	20.7
76	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU076	4.0	63.7	7.6	2.8	16.0
77	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU082	9.2	56.1	7.6	5.2	36.2
78	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU087	9.0	53.7	7.6	7.0	55.6
79	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU098	7.5	32.7	7.6	47.7	99.7
80	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU101	10.0	68.4	7.6	2.1	45.1
81	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU102	9.7	106.6	7.6	1.5	45.6

82	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU103	8.3	62.2	7.6	6.1	52.4
83	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU104	12.0	31.4	7.6	12.9	49.3
84	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU128	9.0	78.7	7.6	13.2	63.3
85	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU136	10.3	51.8	7.6	8.3	48.8
86	Northwest China-03	1997	Jiashi	1.3	37.0	6.1	#	19.1
87	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY024	3.2	33.1	6.2	19.7	25.5
88	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY080	1.4	69.9	6.2	22.4	29.5
89	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	TCU076	0.9	59.4	6.2	14.7	20.8
90	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY101	2.8	36.3	6.3	36.0	50.0
91	Yountville	2000	Napa Fire Station #3	0.7	43.0	5.0	#	9.9

α: Μέγεθος της ροπής.

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

c: Απόσταση του καταγραφικού σταθμού από το επίκεντρο.

Κεφάλαιο 4

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ ΜΕΣΩ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΝΕΛΙΞΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Τα φαινόμενα κατευθυντικότητας έχουν αποτελέσει τις τελευταίες δεκαετίες αντικείμενο συστηματικών ερευνών, οι οποίες επικεντρώνονται στην εύρεση των κυριότερων χαρακτηριστικών του παλμού που εμπεριέχεται στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας σεισμικής καταγραφής κοντινού πεδίου. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια μέθοδος εντοπισμού των κύριων παλμών που εμπεριέχονται στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας εδαφικής κίνησης, όπως εισήχθη από τους ερευνητές Π. Μίμογλου, Ι. Ψυχάρη και Ι. Ταφλαμπά. Στη μέθοδο αυτή, η οποία αποτελεί μια κλειστή μαθηματική διαδικασία, οι παλμοί ταχύτητας εντοπίζονται μέσω κυματικής ανάλυσης και για τη μαθηματική τους περιγραφή γίνεται χρήση του κυματιδίου που χρησιμοποιούν στις μελέτες τους οι Mavroeidis and Papageorgiou (2003). Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του χρησιμοποιείται η νεοεισαχθείσα έννοια CAD (Taflampas et al. 2009).

Η αυξημένη πυκνότητα καταγραφικών σταθμών σε περιοχές που βρίσκονται κοντά σε ενεργά ρήγματα έχει καταστήσει δυνατή τη συλλογή πλήθους καταγραφών κοντινού πεδίου, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές από τις τυπικές καταγραφές μακριά από τη ζώνη κοντινού πεδίου. Ειδικά μετά το σεισμό του Northridge το 1994, σύγχρονες έρευνες (Somerville et a. 1997, Abrahamson and Silva 1997, Somerville 1998, Abrahamson 2000, Rodriguez-Marek 2000, Somerville 2003) έχουν απομονώσει τα κύρια χαρακτηριστικά των εδαφικών κινήσεων που σχετίζονται με φαινόμενα κατευθυντικότητας και οι επιπτώσεις τους στις κατασκευές (Hall et al. 1995, Alavi and Krawinkler 2000, Sasani and Bertero 2000, Alavi and Krawinkler 2001). Σημαντικοί παλμοί έχουν παρατηρηθεί στη χρονοϊστορία ταχύτητας των εδαφικών κινήσεων κοιτινού πεδίου, οι οποίοι σχετίζονται κυρίως με την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της σεισμικής δράσης και ενισχύουν τις φασματικές τιμές των ταχυτήτων και των μετακινήσεων στις μεσαίες και τις μεγάλες περιόδους.

Η αναγνώριση της ύπαρξης παλμών στη χρονοϊστορία ταχύτητας των σεισμικών διεγέρσεων κοντινού πεδίου έχει σταθεί η αφορμή για περαιτέρω έρευνα, ώστε να καθοριστούν οι χαρακτηριστικές παράμετροι του δεσπόζοντος παλμού και κυρίως η περίοδος και το πλάτος του. Διάφοροι ερευνητές έχουν παρουσιάσει σχέσεις που συνδέουν γραμμικά το λογάριθμο της δεσπόζουσας περιόδου του παλμού με το μέγεθος της ροπής του σεισμικού γεγονότος *(Somerville 1998, Alavi and Krawinkler 2000, Rodriguez-Marek 2000, Rupakhety et al. 2011).* Παρά το γεγονός ότι η περίοδος του παλμού μπορεί να συνδεθεί με το μέγεθος του σεισμού, δεν έχει αποδειχτεί κάτι αντίστοιχο για το πλάτος του δεσπόζοντος παλμού.

Με βάση τη σημασία των παλμών κατευθυντικότητας στη γραμμική και μη γραμμική απόκριση των κατασκευών, έχουν προταθεί αρκετές μαθηματικές παραστάσεις για την

προσομοίωση των σεισμικών κινήσεων κοντινού πεδίου. Αυτά τα προσομοιώματα ποικίλουν από απλές συναρτήσεις (Sasani and Bertero 2000, Krawinkler and Alavi 1998, Makris and Black 2004), μέχρι πιο πολύπλοκα κυματίδια (Daubechies 1992, Mallat 1999) όπως στις αναλύσεις του Baker (2007).

Ένα αποτελεσματικό προσομοίωμα έχει προταθεί από τους *Mavroeidis and Papageorgiou* (2003, 2004), το οποίο εισήγαγε περαιτέρω παραμέτρους, που αφορούν τη συνολική διάρκεια και την αλλαγή φάσης των προσομοιούμενων παλμών. Το συγκεκριμένο προσομοίωμα εμφανίζει καλή συσχέτιση με τις αρχικές παλμικές εδαφικές κινήσεις, όπως πιστοποιήθηκε από τους Vassiliou and Makris (2011).

Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό συνδυάζει την αποδεδειγμένη αποτελεσματικότητα της μαθηματικής παράστασης των παλμών κατευθυντικότητας που αναπτύχθηκε από τους *Mavroeidis and Papageorgiou (2003)* μαζί με μια καλώς ορισμένη διαδικασία για τον προσδιορισμό των παραμέτρων των χρησιμοποιούμενων κυματιδίων.

Μέχρι τώρα το προσομοίωμα των Mavroeidis and Papageorgiou (2005) έχει χρησιμοποιηθεί είτε σε διαδικασίες που ακολουθούν τη λογική «δοκιμή και σφάλμα», όπως στην αρχική δημοσίευση με την οποία εισήχθη, είτε μέσω κυματικής ανάλυσης, όπως προτάθηκε από τους Vassiliou and Makris (2011). Η προτεινόμενη διαδικασία που περιγράφεται στο κεφάλαιο αυτό βασίζεται σε νεοεισαχθείσες έννοιες και επιτρέπει την αναγνώριση και την εξαγωγή όλων των σημαντικών παλμών που εντοπίζονται στο εύρος των μέτριων και μεγάλων περιόδων. Αν γίνει υπέρθεση όλων των εξαγόμενων παλμών, μπορεί να παραχθεί μια προσομοίωση ολόκληρης της εδαφικής κίνησης.

Τα χαρακτηριστικά των κυματιδίων καθορίζονται από τη βέλτιστη προσαρμογή τους (best fitting) στο φάσμα απόκρισης της ταχύτητας κάθε σεισμικής καταγραφής. Σημειώνεται ότι και άλλοι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει συσχέτιση των φασμάτων παλμού και καταγραφής (spectral matching) ώστε να εκφράσουν ένα γνωστό σήμα μέσω κυματιδίων. Για παράδειγμα, οι Hancock et al. (2006) θεώρησαν ένα αλγόριθμο βασισμένο σε κυματίδια στο πεδίο της χρονοϊστορίας, ενώ οι *Giaralis and Spanos (2009)* θεώρησαν μια διαδικασία βασισμένη σε κυματίδια στο πεδίο των συχνοτήτων. Η διαφορά της συγκεκριμένης διαδικασίας που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό είναι ότι επικεντρώνεται στην αναγνώριση μόνο των πιο σημαντικών παλμών που εμπεριέχονται στις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου, οι οποίοι είναι επαρκείς για την ολοκληρωμένη προσομοίωση της αρχικής καταγραφής.

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

Οι μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας φόρτισης χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για το σχεδιασμό των κατασκευών. Ωστόσο, τα αποτελέσματά τους είναι ευαίσθητα ως προς τα χαρακτηριστικά των επιλεγμένων εδαφικών κινήσεων που χρησιμοποιούνται ως διέγερση βάσης. Για το λόγο αυτό είναι σημαντική η επιλογή διεγέρσεων βάσης με σαφώς ξεκάθαρα ορισμένα χαρακτηριστικά. Για την ικανοποίηση αυτής της απαίτησης, η συγκεκριμένη μεθοδολογία επιτρέπει τον προσδιορισμό των σημαντικών χαρακτηριστικών μιας επιλεγμένης σεισμικής καταγραφής και την προσομοίωσή της με μια υπέρθεση λίγων, αυστηρά μαθηματικά καθορισμένων παλμών.

4.2 Προσδιορισμός των περιόδων των σημαντικών παλμών

Μια κοινή πρακτική για την εκτίμηση της περιόδου *T_p* του δεσπόζοντος παλμού που περιέχεται στις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου είναι η τιμή της περιόδου για την οποία το ελαστικό φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5% εμφανίζει τη μέγιστη αιχμή του. Για παράδειγμα, η κλιμάκωση του μεγέθους της περιόδου του παλμού κατευθυντικότητας δίνεται από σχέσεις παλινδρόμησης που συχνά βασίζονται σε αυτό τον ορισμό (*Somerville 1998, Alavi and Krawinkler 2000, Rupakhety et al. 2011*). Ωστόσο, η ακρίβεια της διαδικασίας αυτής έχει αμφισβητηθεί από πολλούς ερευνητές (*Rodriguez-Marek 2000, Baker 2007*).

Ένα παράδειγμα στο οποίο αυτός ο ορισμός της περιόδου του δεσπόζοντος παλμού οδηγεί σε εσφαλμένα αποτελέσματα δείχνεται στο σχήμα 4.1 για την καταγραφή G06-320 (Gilroy Array #6) από το σεισμό του Coyote Lake (1979), ο οποίος είχε μέγεθος $M_w = 5,7$. Στο σχήμα 4.1a παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας, στην οποία είναι εμφανές ότι η κίνηση χαρακτηρίζεται από ένα παλμό με περίοδο κοντά στο 1,2 sec. Η τιμή αυτή προτείνεται και από τον Baker (2007). Ωστόσο, η περίοδος στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη αιχμή του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για λόγο ιξώδους απόσβεσης 5% είναι ίση με 0,34 sec (σχήμα 4.1b), ενώ η κορυφή στην περίοδο T = 1,2 sec έχει σημαντικά μικρότερο πλάτος.



Σχήμα 4.1: Καταγραφή G 06-320 (Coyote Lake) 1979 (a) χρονοϊστορία ταχύτητας, (b) *PSV 5% (Mimoglou et al.* 2014).

Είναι γνωστό ότι οι φασματικές τιμές Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης μπορούν να είναι ίσες με τις αντίστοιχες φασματικές τιμές της εδαφικής ταχύτητας (Hudson 1979). Έτσι, το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας για μηδενική απόσβεση θεωρείται ότι είναι μια επαρκής περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης, δηλαδή:

$$\tilde{\alpha}_{g}(\omega) \leq S_{v,0}(\omega)$$
 (4.1)

όπου $\tilde{\alpha}_g(\omega) = \mathscr{F}(\tilde{\alpha}_g)$ είναι τα πλάτη του φάσματος *Fourier* της εδαφικής επιτάχυνσης $\alpha_g(t)$ και $S_{v,0}(\omega)$ είναι το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας για μηδενική απόσβεση.

Όμοια, μπορεί να αποδειχτεί ότι το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης για μηδενική απόσβεση αποτελεί μια επαρκή περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής ταχύτητας. Όντως, για ταλαντωτές με μηδενική απόσβεση (ξ = 0) μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας $S_{v,0}(\omega)$ συμπίπτει με το φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας $PS_{v,0}(\omega)$, εκτός από τις περιοχές μεγάλων περιόδων. Έτσι, σε ένα μεγάλο εύρος περιόδων, μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι $S_{v,0}(\omega) = \omega \cdot S_{d,0}(\omega)$, όπου $S_{d,0}(\omega)$ είναι το φάσμα απόκρισης της μετατόπισης για μηδενική απόσβεση. Τότε, διαιρώντας και τα δύο μέλη της σχέσης (4.1) με ω και λαμβάνοντας υπόψη ότι $\tilde{a}_g(\omega)/\omega = \tilde{v}_g(\omega)$, όπου $\tilde{v}_g(\omega) = \mathscr{F}(\tilde{v}_g)$ το φάσμα Fourier της εδαφικής ταχύτητας $v_g(t)$, προκύπτει:

$$\tilde{\mathbf{v}}_{g}(\omega) \leq \mathrm{Sd}_{,0}(\omega)$$
 (4.2)

το οποίο δείχνει ότι το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης είναι μια επαρκής περιβάλλουσα καμπύλη του φάσματος *Fourier* της εδαφικής ταχύτητας. Ένα παράδειγμα δείχνεται στο σχήμα 4.2 για την καταγραφή *G06-320* από το σεισμό στο *Coyote Lake (1979)*.

Με βάση την παραπάνω παρατήρηση, και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο παλμός κατευθυντικότητας είναι δεσπόζων στη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας, θα ήταν λογικό η περίοδος του παλμού T_p να καθορίζεται από τη δεσπόζουσα περίοδο στο φάσμα απόκρισης της μετακίνησης. Για την καταγραφή *G06-320*, αυτός ο ορισμός οδηγεί σε περίοδο $T_p = 1,58$ sec (Σχήμα 4.2b) η οποία είναι κοντά στην περίοδο του παλμού (*1,2 sec*) που μπορεί να προσδιοριστεί από την καταγραφή της εδαφικής ταχύτητας (Σχήμα 4.1a).



Σχήμα 4.2: Καταγραφή G06-320 (Coyote Lake) 1979: (a) σύγκριση του φάσματος ταχύτητας Fourier με το φάσμα μετακίνησης για μηδενική απόσβεση, (b) Sd 5% (Mimoglou et al. 2014).
Ωστόσο, αυτός ο εναλλακτικός ορισμός της *T_ρ* μέσω της δεσπόζουσας περιόδου του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης δε μπορεί να γενικευτεί, αφού υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες δεν επαληθεύεται. Ένα τέτοιο παράδειγμα δίνεται στο σχήμα 4.3 για τη συνιστώσα *PCD-164* της καταγραφής *Pacoima Dam* από το σεισμό του *San Fernando* (1971). Στην περίπτωση αυτή, η περίοδος του παλμού κατευθυντικότητας είναι ίση με *1,47* sec σύμφωνα με τους *Mavroeidis and Papageorgiou (2003)* και *1,60 sec* σύμφωνα με τον *Baker (2007)*. Αυτές οι τιμές είναι κοντινές στη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας (σχέδιο 4.3a), ενώ η δεσπόζουσα περίοδος του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης είναι αρκετά μεγαλύτερη, ίση με: *5,89 sec* (σχήμα 4.3b). Ακόμα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αιχμή του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης συχνά επηρεάζεται από την παρουσία σφαλμάτων στις καταγραφές του επιταχύνσεων στην περιοχή των μεγάλων περιόδων, με συνέπεια ο ορισμός της περιόδου *T_ρ* από το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης να μην είναι αξιόπιστος σε πολλές περιπτώσεις.



Σχήμα 4.3: Καταγραφή PCD-164 από το σεισμό στο San Fernando, CA (1971): (a) φάσμα απόκρισης ψευδοταχύτητας για απόσβεση 5%; (b) φάσμα απόκρισης μετακίνησης για απόσβεση 5% (*Mimoglou et al. 2014*).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι εμφανές ότι η δεσπόζουσα περίοδος του παλμού δε μπορεί να προκύψει από τις αιχμές των φασμάτων απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας ή της μετακίνησης, αφού υπάρχουν περιπτώσεις που οι δύο αυτές προσεγγίσεις δίνουν αποτελέσματα που απέχουν σημαντικά από τα πραγματικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πολλές εδαφικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου επηρεάζονται από περισσότερους από ένα παλμούς διαφορετικών περιόδων. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία, σύμφωνα με την οποία η εύρεση όλων των σημαντικών παλμών που σχετίζονται με φαινόμενα κατευθυντικότητας προκύπτει μέσω ενός συνδυασμού των φασμάτων της ταχύτητας και της μετακίνησης.

Συγκεκριμένα, αφού οι παλμικές συνιστώσες των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου επηρεάζουν και την εδαφική επιτάχυνση και την εδαφική ταχύτητα, αν και σε διαφορετικό βαθμό, οι σημαντικές περίοδοι *T_i* είναι λογικό να ξεχωρίζουν στο ολοκλήρωμα συνέλιξης (convolution integral) των δύο αυτών χρονοϊστοριών. Ακόμα, με τη χρήση του ολοκληρώματος συνέλιξης απομειώνεται η επιρροή συνιστωσών με εξαιρετικά υψηλή ή χαμηλή συχνότητα που μπορεί να εμπεριέχονται στην επιτάχυνση και την ταχύτητα της εδαφικής κίνησης. Κατά συνέπεια, οι κορυφές του φάσματος συνέλιξης επιτάχυνσης και ταχύτητας αντιστοιχούν στις περιόδους των σημαντικών παλμών που εμπεριέχονται σε μια εδαφική κίνηση. Είναι γνωστό ότι το φάσμα Fourier του ολοκληρώματος συνέλιξης είναι ίσο με το φάσμα Fourier των σημάτων για τα οποία γίνεται η συνέλιξη. Ακόμα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας για μηδενική απόσβεση $S_{\nu,0}$ είναι μια επαρκής περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης και το φάσμα απόκρισης της μα μηδενική απόσβεση $S_{d,0}$ είναι μια επαρκής περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης και το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης για μηδενική απόσβεση $S_{d,0}$ είναι μια επαρκής περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης και το φάσμα του φάσματος συνέλιξης μπορεί να προσεγγιστεί από το γινόμενο $S_{\nu,0} \times S_{d,0}$, το οποίο στη συνέχεια θα αναφέρεται ως "Φάσμα Συνέλιξης" (convolution spectrum). Συνεπώς, οι περίοδοι των σημαντικών παλμών μπορούν να καθοριστούν από τις κορυφές του φάσματος συνέλιξης.

Ένα παράδειγμα δίνεται στο σχήμα 4.4, όπου παρουσιάζονται τα φάσματα συνέλιξης για τις καταγραφές που αναφέρθηκαν παραπάνω, όπου η καταγραφή *GO6-320* αντιστοιχεί στο σεισμό του *Coyote Lake*, ενώ η καταγραφή *PCD-164* αντιστοιχεί στο σεισμό του *San Fernando*. Όπως αναφέρθηκε ήδη, στην πρώτη περίπτωση η περίοδος του παλμού σχετίζεται με τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης, ενώ στη δεύτερη σχετίζεται με τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης της ψευδοταχύτητας. Η χρήση του φάσματος συνέλιξης επιτρέπει το σωστό υπολογισμό της περιόδου του παλμού και στις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 4.4: Φάσματα συνέλιξης και προσδιορισμός της περιόδου Τ_i για τις καταγραφές: (a) G06-320 (Coyote Lake), (b) PCD-164 San Fernando *(Mimoglou et al. 2014).*

Η χρήση του φάσματος συνέλιξης επιτρέπει τον εντοπισμό πρόσθετων σημαντικών παλμών που ενδέχεται να εμπεριέχονται μέσα στην εδαφική κίνηση και εμφανίζονται στο πεδίο των μεσαίων και χαμηλών συχνοτήτων. Το γεγονός ότι ίσως απαιτούνται περισσότεροι από ένα παλμό για την αξιόπιστη παράσταση της εδαφικής κίνησης και την ικανοποιητική προσέγγιση των φασμάτων απόκρισης των καταγραφών, έχει τονιστεί και από τους *Mavroeidis and Papageorgiou (2003).* Στις περιπτώσεις αυτές είναι απαραίτητος ο συνδυασμός περισσότερων από ένα κυματιδίων για την επαρκή αναπαράσταση της αρχικής καταγραφής.

Αυτοί οι επιπλέον παλμοί εμφανίζονται ως δευτερεύουσες κορυφές στο φάσμα συνέλιξης και μπορεί να αντιστοιχούν σε μικρότερες ή μεγαλύτερες περιόδους σε σύγκριση με τον πρώτο παλμό που προκύπτει από τη μεγαλύτερη αιχμή του φάσματος συνέλιξης. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις αυτό δεν είναι ξεκάθαρο. Για το λόγο αυτό προτείνεται η εύρεση κάθε επιπρόσθετου παλμού επαναλαμβάνοντας την προαναφερθείσα διαδικασία στην εναπομένουσα εδαφική κίνηση (residual motion), μετά την αφαίρεση όλων των προηγούμενων παλμών από την αρχική καταγραφή. Αυτή η διαδικασία θα πρέπει να επαναλαμβάνεται όσες φορές είναι απαραίτητο, μέχρι να εξαχθούν διαδοχικά όλοι οι σημαντικοί παλμοί.

Παρατηρείται ότι όλοι οι παλμοί που εξάγονται από τη διαδικασία αυτή δεν είναι εξίσου σημαντικοί. Είναι έτσι απαραίτητος ο καθορισμός κριτηρίων, ώστε να ελέγχεται εάν ένας παλμός είναι αποδεκτός ή θα πρέπει να απορρίπτεται.

Ένα κριτήριο αφορά το χρόνο στον οποίο φτάνει ο παλμός, αφού οι παλμοί που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία της καταγραφής δε σχετίζονται με την επιρροή των φαινομένων κατευθυντικότητας (Baker 2007). Υιοθετείται το κριτήριο που προτείνεται από τον Baker (2007) για τους παλμούς που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία μιας καταγραφής και σχετίζεται με το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας, με μια μικρή τροποποίηση. Η συνάρτηση του ολοκληρώματος του τετραγώνου της ταχύτητας CSV (cumulative squared velocity) μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε χρονική στιγμή από το ολοκλήρωμα:

$$CSV = \int_{0}^{t} v_{g}^{2}(\tau) d\tau$$
 (4.3)

Η συνάρτηση *CSV(t)* υπολογίζεται για την αρχική καταγραφή και για κάθε κυματίδιο που αντιστοιχεί σε περίοδο T_i και καθορίζονται οι χρόνοι στους οποίους καθένα φτάνει x% του συνολικού του *CSV*. Αυτοί οι χρόνοι συμβολίζονται ως $t_{x\%,orig}$ και $t_{x\%,pulse,i}$ για την αρχική καταγραφή και τον εκάστοτε παλμό *i* αντίστοιχα. Σύμφωνα με τον *Baker*, για να θεωρείται ένας παλμός ότι βρίσκεται στην αρχή της εδαφικής κίνησης, θα πρέπει να φτάνει το 10% του συνολικού του *CSV* πριν η αρχική καταγραφή φτάσει το 20% του δικού της *CSV*, δηλαδή $t_{10\%,pulse,i} < t_{20\%,orig}$. Αυτό το κριτήριο υιοθετείται στην παρούσα μεθοδολογία για το χαρακτηρισμό ενός παλμού ως σημαντικού, με την ακόλουθη τροποποίηση: Όλοι οι επόμενοι παλμοί που ξεκινούν πριν το τέλος του πρώτου παλμού θεωρούνται σημαντικοί ακόμα και εάν προκύπτει $t_{10\%,pulse,i} > t_{20\%,orig}$. Με τον τρόπο αυτό, παλμοί που τροποποιούν το δεσπόζων παλμό λαμβάνονται πάντα υπόψη.

Για τους παλμούς που ικανοποιούν το παραπάνω κριτήριο, θεωρείται ένα δεύτερο κριτήριο για τη διατήρηση μόνο των σημαντικών. Αυτό το κριτήριο βασίζεται στην επιρροή του κάθε διαδοχικού παλμού στο φάσμα απόκρισης της ταχύτητας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το ολοκλήρωμα του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας *CS_ν* (cumulative response velocity spectrum), το οποίο ορίζεται ως:

$$CS_{v} = \int_{0}^{T_{\text{max}}} PS_{v,\xi}(T) dT$$
 (4.4)

όπου PS_{v,ξ} (T) είναι η φασματική ψευδο-ταχύτητα για την επιθυμητή τιμή λόγου ιξώδους απόσβεσης ξ σε περίοδο T και T_{max} είναι η μέγιστη περίοδος του φάσματος. Θα πρέπει να χρησιμοποιείται μια αρκετά μεγάλη τιμή για την T_{max}, π.χ T_{max} = 20 sec.

Πρώτα υπολογίζεται το $CS_{v,sim,i}$ για την προσομοιωμένη εδαφική κίνηση που αποτελείται από όλους τους ορισμένους παλμούς μέχρι το βήμα αυτό (*i* παλμοί) και έπειτα υπολογίζεται

το $CS_{v,sim,(i-1)}$, μετά την αφαίρεση του παλμού *i* (*i*-1 παλμοί). Στη συνέχεια, ο παλμός *i* θεωρείται σημαντικός εάν συνεισφέρει στο $CS_{v,sim}$ περισσότερο από 5%, δηλαδή εάν:

$$\frac{CS_{v,sim,i} - CS_{v,sim,(i-1)}}{CS_{v,sim,(i-1)}} \ge 5\%$$
 (4.5)

Εάν ο παλμός ί δεν ικανοποιεί το παραπάνω κριτήριο, απορρίπτεται.

Θεωρείται ένα ακόμα κριτήριο για τον καθορισμό του βήματος στο οποίο πρέπει να διακοπεί η διαδικασία, το οποίο βασίζεται στο ποσοστό ταύτισης του τεχνητού φάσματος της ψευδο-ταχύτητας που προκύπτει με υπέρθεση όλων των σημαντικών παλμών που εξάγονται από τη διαδικασία, με αυτό της αρχικής καταγραφής. Έτσι, η διαδικασία σταματά όταν ένα σημαντικό ποσοστό, γύρω στο 90%, του ολοκληρώματος του φάσματος της ψευδο-ταχύτητας της αρχικής καταγραφής $CS_{v,orig}$, έχει επιτευχθεί με την προσομοίωση της εδαφικής κίνησης μέχρι αυτό το βήμα. Δηλαδή όταν:

$$\frac{CS_{v,sim,i}}{CS_{v,orig}} \ge 90\% \quad (4.6)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κάποιος θα μπορούσε να θεωρήσει άλλα κριτήρια για τον προσδιορισμό των σημαντικών παλμών. Για παράδειγμα, ένα κριτήριο θα μπορούσε να βασίζεται στη σύγκριση της ενέργειας της εναπομένουσας κίνησης μετά την αφαίρεση ενός παλμού, με την ενέργεια της αρχικής καταγραφής. Αυτό το κριτήριο θα μπορούσε αποτελέσει ένα δείκτη του εάν η εναπομένουσα κίνηση μετά την αφαίρεση του *i* παλμού, περιέχει και άλλους παλμούς που περιέχουν σημαντικό ποσοστό ενέργειας.

Αφού η ενέργεια κάθε καταγραφής υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της εδαφικής ταχύτητας CSV (Cumulative Squared Velocity) στο τέλος της εδαφικής κίνησης, ένα τέτοιο κριτήριο θα μπορούσε να βασίζεται στο λόγο: CSV_{res,i}/ CSV_{orig}, όπου τα CSV_{res,i} και CSV_{orig} συμβολίζουν το αθροιστικό τετράγωνο της ταχύτητας για την εναπομένουσα εδαφική κίνηση μετά την αφαίρεση του παλμού *i* και την αρχική εδαφική κίνηση, αντίστοιχα. Χαμηλές τιμές του λόγου CSV_{res,i}/ CSV_{orig} υποδηλώνουν ότι οι παλμοί που εμπεριέχονται στην εναπομένουσα κίνηση είναι μικρότερης σημασίας. Ωστόσο, ο καθορισμός ενός σταθερού ορίου στο λόγο αυτό δεν είναι εύκολος, αφού ποικίλει σημαντικά από καταγραφή σε καταγραφή, λόγω της επιρροής των συνιστωσών υψηλών συχνοτήτων της εδαφικής κίνησης στον υπολογισμό του CSV. Για το λόγο αυτό προτείνεται το κριτήριο αυτό να χρησιμοποιείται μόνο ενδεικτικά.

4.3 Προσδιορισμός των παραμέτρων των κυματιδίων

Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό αναπαριστά κάθε σημαντικό παλμό που εντοπίζεται με την προαναφερθείσα διαδικασία με ένα κυματίδιο και η εδαφική κίνηση προσομοιώνεται μέσω της υπέρθεσης των κυματιδίων αυτών. Υιοθετείται το κυματίδιο που έχει προταθεί από τους *Mavroeidis and Papageorgiou (2003)* και εφεξής θα αναφέρεται ως κυματίδιο *M&P*.

Το κυματίδιο των Mavroeidis and Papageorgiou (2003) προέρχεται από τη σύζευξη ενός σήματος αρμονικής ταλάντωσης και μια περιβάλλουσα κωδωνοειδούς μορφής.

Για τον ορισμό του παλμού χρησιμοποιούνται τέσσερις παράμετροι:

- Η περίοδος *T_p* της αρμονικής ταλάντωσης του κυματιδίου.
- Το πλάτος Α της περιβάλλουσας, το οποίο σχετίζεται με το πλάτος της χρονοϊστορίας ταχύτητας.
- Η διάρκεια γ του κυματιδίου, η οποία μετρά τον αριθμό των ταλαντώσεων και ορίζεται ως $\gamma = t_{tot}/T_{\rho}$ με $\gamma > 1$, όπου t_{tot} η χρονική διάρκεια του κυματιδίου.
- Η διαφορά φάσης ν.

Με χρήση των παραμέτρων αυτών, η επιτάχυνση $\alpha_p(t)$ και η ταχύτητα $v_p(t)$ του κυματιδίου μπορεί να οριστεί από τις εξισώσεις που ακολουθούν (*Mavroeidis and Papageorgiou 2003*):

$$\alpha_{p}(t) = \begin{cases} -\frac{A\pi}{\gamma T_{p}} \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{2\pi}{\gamma T_{p}}(t-t_{0})\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\gamma T_{p}}(t-t_{0})+\nu\right) \\ +\gamma \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\gamma T_{p}}(t-t_{0})+\nu\right) \cdot \left[1+\cos\left(\frac{2\pi}{T_{p}}(t-t_{0})\right)\right] \end{bmatrix}, \quad t_{0} - \frac{\gamma}{2}T_{p} \le t \le t_{0} + \frac{\gamma}{2}T_{p} \end{cases}$$
(4.7)
$$0, \quad \delta i \alpha \varphi o \rho \varepsilon \tau i \kappa \dot{\alpha}$$

$$v_{p}(t) = \begin{cases} \frac{A}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\gamma T_{p}}(t - t_{0})\right) \right] \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_{p}}(t - t_{0}) + v\right), & t_{0} - \frac{\gamma}{2}T_{p} \le t \le t_{0} + \frac{\gamma}{2}T_{p} \end{cases}$$
(4.8)
$$0, \quad \delta i \alpha \phi o \rho \varepsilon \tau i \kappa \dot{\alpha}$$

όπου t_o είναι η χρονική στιγμή που καθορίζει την περιοχή της αιχμής της περιβάλλουσας.

Προκειμένου να αντιστοιχηθεί ένα κυματίδιο σε κάθε σημαντικό παλμό *i*, η περίοδος του παλμού *T_p* τίθεται ίση με την αντίστοιχη *T_i*. Ο καθορισμός των υπολοίπων παραμέτρων του κυματιδίου, *A*, *γ* και *ν*, πραγματοποιείται με τη χρήση της νεοεισαχθείσας παραμέτρου *CAD* (*Cumulative Absolute Displacement – Αθροιστική Απόλυτη Μετατόπιση*), η οποία εισήχθη από τους *Taflampas et al. (2009)* σε αναλογία με το δείκτη *CAV* (*Cumulative Absolute Displacement – ΕΡRI 1991*). Το *CAD* ορίζεται ως το χρονικό ολοκλήρωμα της απόλυτης εδαφικής ταχύτητας, δηλαδή:

$$CAD = \int_{0}^{t_{tot}} \left| v_{g} \right| dt \quad (4.9)$$

Σημειώνεται ότι ο Baker (2007) όπως και οι Zamora and Riddell (2011) έχουν επίσης χρησιμοποιήσει παρόμοιους δείκτες και συγκεκριμένα το χρονικό ολοκλήρωμα του τετραγώνου της επιτάχυνσης (Arias 1970) και το χρονικό ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας (Riddell 2007), ως δείκτες μέτρησης του παλμικού περιεχομένου μιας εδαφικής κίνησης.

Ας θεωρήσουμε μια αρμονική εδαφική κίνηση πλάτους d_{g,max}, η οποία επιβάλλεται ως διέγερση στη βάση ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή χωρίς απόσβεση. Στο συντονισμό, το

πλάτος της απόκρισης του ταλαντωτή συσχετίζεται σχεδόν γραμμικά με τον αριθμό των κύκλων και για μια διέγερση γ κύκλων, η μέγιστη απόκριση είναι (Clough and Penzien 1975):

$$S_{d,0}(T_{res}) = \pi \cdot \gamma \cdot d_{g,\max} \quad (4.10)$$

Από την άλλη, η τιμή του CAD στο τέλος του γ κύκλου μιας αρμονικής διέγερσης, είναι ίσο με:

$$CAD = 4 \cdot \gamma \cdot d_{g,\max} \qquad (4.11)$$

Συνεπώς, για μια αρμονική διέγερση γ κύκλων υπάρχει μια σταθερή σχέση μεταξύ του CAD και της φασματικής μετατόπισης για μηδενική απόσβεση στο συντονισμό, η οποία μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\frac{S_{d,0}(T_{res})}{CAD} = \frac{\pi}{4}$$
 (4.12)

Εάν αντί μιας καθαρά αρμονικής διέγερσης χρησιμοποιείται ένα κυματίδιο *M&P*, η παραπάνω σχέση συνεχίζει να διατηρείται με ικανοποιητική ακρίβεια, παρά το γεγονός ότι η περιβάλλουσα κωδωνοειδούς μορφής έχει επιβληθεί στο πλάτος της διέγερσης. Η θέση αυτή επιβεβαιώνεται στο σχήμα 4.5, στο οποίο παρουσιάζεται ο λόγος της μέγιστης φασματικής μετακίνησης για μηδενική απόσβεση προς το *CAD* (*S*_{d,0,max}/*CAD*) για διαφορά φάσης *ν* και για $\gamma = 1,5$; 2,0; 3,0 και 5,0. Τα αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα από την περίοδο *T*_ρ και το πλάτος *A*. Είναι εμφανές ότι ο λόγος *S*_{d,0,max}/*CAD* είναι κοντά στο π/4, ειδικά για παλμούς μεγάλης διάρκειας (μεγάλες τιμές του *γ*). Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται για $\gamma = 1,5$ και $v = 30^{\circ}$, αλλά ακόμα και τότε το σφάλμα είναι μικρότερο από *6%*.

Μια παρόμοια σχέση μεταξύ της μέγιστης φασματικής μετακίνησης και του CAD μπορεί να οριστεί για τιμές απόσβεσης διαφορετικές από τη μηδενική. Για ένα μονοβάθμιο ταλαντωτή με λόγο ιξώδους απόσβεσης ξ και για καθαρά αρμονική διέγερση, η μετακίνηση στο συντονισμό είναι (Clough and Penzien 1975):

$$S_{d,\xi}(T_{res}) = \frac{1 - e^{-2\pi\gamma\xi}}{2\xi} \cdot d_{g,\max}$$
 (4.13)

και με χρήση της σχέσης (4.11), προκύπτει:

$$\frac{S_{d,\xi}(T_{res})}{CAD} = \frac{1 - e^{-2\pi\gamma\xi}}{8\gamma\xi}$$
(4.14)

Εάν η διέγερση δεν είναι καθαρά αρμονική, αλλά ένα κυματίδιο *M&P*, η παραπάνω εξίσωση παρουσιάζει σφάλματα για μεγάλες τιμές του γ. Μια παραμετρική διερεύνηση έδειξε ότι στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να θεωρηθεί ένας διορθωτικός συντελεστής ίσος με 1+(γ-1)ξ. Συνεπώς, για κυματίδια *M&P*, προκύπτει η σχέση:

$$\frac{S_{d,\xi}(T_{res})}{CAD} = \frac{1 - e^{-2\pi\gamma\xi}}{8\gamma\xi} [1 + (\gamma - 1)\xi]$$
(4.15)

Μια σύγκριση των τιμών που παράγονται από τη σχέση (4.15) με τις πραγματικές τιμές του λόγου S_{d,ξ,max}/CAD, οι οποίες υπολογίστηκαν για διάφορες τιμές ν και γ, παρουσιάζονται στο

σχήμα 4.5 για $\xi = 5\%$. Είναι εμφανές ότι η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με την εξίσωση (4.15) είναι ικανοποιητική σε όλες τις περιπτώσεις.



Σχήμα 4.5: Σχέση μεταξύ της μέγιστης φασματικής μετακίνησης *S_{d,max}* και *CAD* για κυματίδιο *M&P* και διάφορες τιμές γ και ν. (a) μηδενική απόσβεση (b) απόσβεση *5% (Mimoglou et al. 2014).*

Κάνοντας χρήση των εξισώσεων (4.12) και (4.15) και τη γνωστή σχέση μεταξύ του φάσματος μετακίνησης και του φάσματος ψευδο-ταχύτητας $PS_{v_r} = (2\pi/T) \cdot S_d$, μπορούν να διατυπωθούν οι εξής σχέσεις μεταξύ του CAD της PS_v , για κυματίδια M&P:

$$\frac{PS_{\nu,0,\max}}{CAD} = \frac{\pi^2}{2T_p} \qquad \qquad \xi = 0 \qquad (4.16)$$

$$\frac{PS_{\nu,\xi,\max}}{CAD} = \frac{\pi (1 - e^{-2\pi\gamma\xi})[1 + (\gamma - 1)\xi]}{4\gamma\xi T_n} \quad \xi \neq 0$$
(4.17)

Για κυματίδια *M&P* η τιμή του *CAD* σχετίζεται άμεσα με το πλάτος *A* και το δείκτη διάρκειας *γ*, αφού ισχύει η σχέση:

$$CAD = \gamma AT_p / \pi \qquad (4.18)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι προσανατολισμένη γύρω από τις φασματικές τιμές των διαφόρων μεγεθών, αφού τα κυματίδια ορίζονται έτσι ώστε να γίνεται η καλύτερη δυνατή προσαρμογή (*best fitting*) των φασμάτων τους, στα φάσματα της αρχικής καταγραφής. Συνεπώς στη βάση αυτής της λογικής, αντικαθιστώντας το *CAD* στις εξισώσεις (4.16) και (4.17) και με χρήση της εξίσωσης (4.18), προκύπτουν:

$$A_{i} = \frac{2PS_{\nu,0}(T_{i})}{\pi\gamma_{i}}, \qquad \xi = 0 \quad (4.19)$$

$$A_{i} = \frac{4\xi PS_{\nu,\xi}(T_{i})}{\left(1 - e^{-2\pi\gamma_{i}\xi}\right) \cdot \left[1 + (\gamma_{i} - 1)\xi\right]}, \quad \xi \neq 0$$
 (4.20)

Στις παραπάνω σχέσεις ο δείκτης *i* αναφέρεται στο κυματίδιο που αντιστοιχεί στη δεσπόζουσα περίοδο *T_i* του παλμού *i* και *PS_{v,0}(T_i)* και *PS_{v,ξ}(T_i')* είναι οι αντίστοιχες κορυφές του φάσματος της ψευδο-ταχύτητας της εδαφικής κίνησης για μηδενική απόσβεση και για λόγο ιξώδους απόσβεσης ίσο με *ξ*, αντίστοιχα.

Σημειώνεται ότι ο όρος "εδαφική κίνηση" αναφέρεται στην αρχική καταγραφή μόνο για τον πρώτο παλμό (*i* = 1), ενώ για τους πρόσθετους παλμούς (*i* ≥ 2) αναφέρεται στην "εναπομένουσα κίνηση", η οποία προκύπτει με αφαίρεση όλων των προηγούμενων εντοπισμένων παλμών (*i* = 1 μέχρι *i*-1) από την αρχική καταγραφή.

Μεταξύ των εξισώσεων (4.19) και (4.20), για τον καθορισμό του πλάτους *A_i* προτιμάται η εξίσωση (4.20), αφού το παραγόμενο κυματίδιο συσχετίζεται καλύτερα με τα αρχικά φάσματα για την επιθυμητή τιμή απόσβεσης. Ωστόσο, η εξίσωση (4.19) θα πρέπει να χρησιμοποιείται στην περίπτωση που κάποιος θέλει να κανονικοποιήσει τα κυματίδια με τη φασματική τιμή απόκρισης για μηδενική απόσβεση.

Για τον καθορισμό του πλάτους *A*_i του κυματιδίου από τις εξισώσεις (4.19) ή (4.20), η τιμή της διάρκειας *γ*_i θα πρέπει να είναι γνωστή. Αφού η παράμετρος αυτή είναι κατά βάσει άγνωστη, ελέγχονται όλες οι τιμές *γ*_{ij} εντός ενός επιλεγμένου εύρους. Από αυτά τα ζεύγη (*A*_{ij}, *γ*_{ij}), εκείνα που οδηγούν σε πλάτη επιταχύνσεων, ταχυτήτων ή μετακινήσεων των κυματιδίων, τα οποία είναι μεγαλύτερα από τις αντίστοιχες αιχμές της εδαφικής κίνησης, *PGA*, *PGV* και *PGD* αντίστοιχα, απορρίπτονται.

Για τα ζεύγη (A_{ij} , γ_{ij}) που είναι αποδεκτά, υπολογίζονται τα κυματίδια για όλες τις τιμές της διαφοράς φάσης v_i , η οποία παίρνει τιμές εντός του εύρους (0° - 360°) και επιλέγεται το κυματίδιο που έχει το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης με την εδαφική κίνηση. Η διαδικασία επεξηγείται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην επόμενη ενότητα.

4.4 Προτεινόμενη Μεθοδολογία σε Βήματα

Με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο που αναφέρθηκε παραπάνω, μπορεί να εδραιωθεί μια καλώς ορισμένη διαδικασία για τον καθορισμό των πιο σημαντικών παλμών και των παραμέτρων των αντίστοιχων κυματιδίων *M&P* που μπορούν να αναπαραστήσουν βέλτιστα την αρχική εδαφική κίνηση. Αυτή η μέθοδος, η οποία μπορεί εύκολα να προγραμματιστεί σε μορφή κώδικα, αποτελείται από τα βήματα που ακολουθούν:

1. Για την υπό εξέταση εδαφική κίνηση παράγεται το φάσμα συνέλιξης με πολλαπλασιασμό των φασμάτων ταχύτητας και μετακίνησης για λόγο ιξώδους απόσβεσης 5%. Στη θεωρητική τεκμηρίωση της μεθόδου, αναφέρεται ότι τα φάσματα ταχύτητας και μετακίνησης για μηδενική απόσβεση αποτελούν επαρκείς περιβάλλουσες των φασμάτων Fourier επιτάχυνσης και ταχύτητας αντίστοιχα. Παρ' όλα αυτά, γίνεται χρήση των φασμάτων ταχύτητας και μετακίνησης για απόσβεση 5%, με στόχο την εξομάλυνση των κορυφών τους που αντιστοιχούν σε υψηλό συχνοτικό περιεχόμενο (υψίσυχνες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης).

- Προσδιορίζεται η περίοδος που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη αιχμή του φάσματος συνέλιξης και τίθεται ίση με T₁.
- Υπολογίζεται το φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για την επιθυμητή τιμή του λόγου ιξώδους απόσβεσης ξ (τυπικά χρησιμοποιείται η τιμή ξ=5%) και προσδιορίζεται η τιμή PS_{v,ξ,max}(T₁').
- 4. Τίθεται μια μέγιστη τιμή γ_{max} για την διάρκεια του κυματιδίου M&P. Αφού η διάρκεια του κυματιδίου δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, για τον καθορισμό του κυματιδίου που προσαρμόζεται καλύτερα στη συγκεκριμένη εδαφική κίνηση απαιτείται η σάρωση όλων των πιθανών τιμών του γ, από 1 μέχρι και γ_{max}. Για παλμούς κατευθυντικότητας σε σεισμικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου, η τιμή γ_{max} = 5 θεωρείται επαρκής. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις ίσως απαιτούνται μεγαλύτερες τιμές της τάξης του γ_{max} = 10 ή και μεγαλύτερες. Για τη σάρωση των τιμών της διάρκειας γ εντός του εύρους που περιγράφηκε παραπάνω, προτείνεται ένα βήμα Δγ = 0.1.

Για κάθε τιμή γ_j εντός του εύρους $1 \le \gamma_j \le \gamma_{max}$, με βήμα Δγ και για την τιμή $PS_{\nu,\xi,max}(T_1)$ που καθορίστηκε στο βήμα 3, υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή του πλάτους A_j με χρήση της εξίσωσης (4.20) ή (4.19) για ξ=0%.

- 5. Για κάθε ζεύγος (A_j, γ_j) που προσδιορίστηκε στο βήμα 4 και για τιμές διαφοράς φάσης ν εντός του εύρους 0° έως 360°, παράγεται το κυματίδιο M&P με χρήση των εξισώσεων (4.7) και (4.8) θέτοντας T_p = T₁ και αφήνοντας το t₀ ως παράμετρο. Για τη σάρωση όλων των τιμών διαφοράς φάσης εντός του εύρους που αναφέρθηκε παραπάνω, προτείνεται ένα βήμα ίσο με Δν=5°. Τα κυματίδια στα οποία η μέγιστη επιτάχυνση, ταχύτητα ή μετακίνηση είναι μεγαλύτερη από την PGA, PGV ή PGD της εδαφικής κίνησης αντίστοιχα, απορρίπτονται.
- 6. Για κάθε αποδεκτό κυματίδιο που υπολογίστηκε στο βήμα 5 και για τιμές t_0 από $t_0 = \gamma_j T_1/2$ (αντιστοιχεί σε κυματίδια που ξεκινούν τη χρονική στιγμή t = 0) έως $t_0 = t_{max} \gamma_j T_1/2$ (αντιστοιχεί σε κυματίδια που τελειώνουν τη χρονική στιγμή $t = t_{max}$), με το t_{max} να αντιστοιχεί στο τέλος της εδαφικής κίνησης, υπολογίζεται η συσχέτιση μεταξύ της χρονοϊστορίας ταχύτητας του κυματιδίου $v_P(t)$, όπως ορίστηκε στην εξίσωση (4.8) και της χρονοϊστορίας της εδαφικής ταχύτητας της καταγραφής $v_g(t)$. Επιλέγεται το κυματίδιο με το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης και για αυτό καθορίζονται οι παράμετροι A_1 , γ_1 , v_1 και $t_{0,1}$. Υπολογίζεται ο χρόνος έναρξης του παλμού: $t_{p,1}=t_{0,1}-\gamma_j T_1/2$.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι εάν οι συντελεστές συσχέτισης για τα επιλεγμένα κυματίδια είναι μικροί, είναι αμφισβητήσιμο το εάν η συγκεκριμένη εδαφική κίνηση επηρεάζεται από παλμούς κατευθυντικότητας.

7. Υπολογίζεται το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της εδαφικής ταχύτητας CSV_{orig}(t) για την αρχική καταγραφή με χρήση της εξίσωσης (4.3) και προσδιορίζεται η χρονική στιγμή t_{20%,orig}, στην οποία η αρχική κίνηση φτάνει το 20% του συνολικού της CSV. Στη

συνέχεια υπολογίζεται το ολοκλήρωμα του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας *CS_{v,orig},* με χρήση της εξίσωσης (4.4), για την επιθυμητή τιμή μέγιστης περιόδου *T_{max}*.

- 8. Ελέγχεται εάν το κυματίδιο που επιλέχθηκε στο βήμα 6 αντιστοιχεί σε παλμό που φτάνει αργά στη χρονοϊστορία ταχύτητας και αν αυτό συμβαίνει, το κυματίδιο απορρίπτεται. Για την υλοποίηση αυτού του ελέγχου, υπολογίζεται η συνάρτηση του ολοκληρώματος του τετραγώνου της εδαφικής ταχύτητας CSV_{pulse1}(t) για αυτό τον πρώτο παλμό και προσδιορίζεται η χρονική στιγμή t_{10%,pulse1}, ως η χρονική στιγμή στην οποία ο παλμός φτάνει το 10% του συνολικού του CSV. Εάν t_{10%,pulse1} > t_{20%,orig}, ο παλμός απορρίπτεται και η διαδικασία συνεχίζεται στο βήμα 10. Εάν ο παλμός ικανοποιεί το παραπάνω κριτήριο, είναι δηλαδή αποδεκτός, εκτελείται το βήμα 9.
- 9. Για το επιλεγμένο κυματίδιο υπολογίζεται το ολοκλήρωμα του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας CS_{v,sim} και ο λόγος CS_{v,sim}/_{CSv,orig}, όπου CS_{v,orig} είναι η αντίστοιχη τιμή για την αρχική καταγραφή, όπως ορίστηκε στο βήμα 7. Εάν ο λόγος είναι μεγαλύτερος από 90% δεν απαιτούνται επιπλέον παλμοί για την περιγραφή της εδαφικής κίνησης και η διαδικασία ολοκληρώνεται. Εάν όχι, εκτελείται το βήμα 10.

Τα παρακάτω βήματα επαναλαμβάνονται για όλους τους επιπλέον σημαντικούς παλμούς *i*, με $i \le 2 \le k$, όπου *k* ο συνολικός αριθμός των σημαντικών παλμών που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την ικανοποίηση του κριτηρίου που δίνεται στο βήμα 14.

- 10. Υπολογίζεται η εναπομένουσα εδαφική κίνηση (residual ground motion) με αφαίρεση του κυματιδίου που υπολογίστηκε στο βήμα 6 από την αρχική καταγραφή. Αυτή η εναπομένουσα εδαφική κίνηση θεωρείται ως η αρχική εδαφική κίνηση για τους πρόσθετους παλμούς πέραν του πρώτου στα επόμενα βήματα, εκτός από εκείνα όπου επισημαίνεται ότι ορίζεται διαφορετικά.
- 11. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 έως 6 για τη νέα εδαφική κίνηση και προσδιορίζεται ο επόμενος παλμός *i*. Στα βήματα αυτά, ο δείκτης 1 αντικαθίσταται με το δείκτη του εκάστοτε παλμού *i*.
- 12. Ελέγχεται εάν το νέο κυματίδιο *i* αντιστοιχεί σε παλμό που φτάνει αργά στη χρονοϊστορία της ταχύτητας και συνεπώς εάν θεωρείται αποδεκτός ή θα πρέπει να απορριφθεί:
 - I. Ελέγχεται εάν η έναρξη του παλμού πραγματοποιείται πριν τη λήξη του πρώτου παλμού, δηλαδή εάν $t_{p,i} = t_{0,i} \gamma_i \cdot T_i/2$ είναι μικρότερο από $t_{0,1} + \gamma_1 \cdot T_1/2$, όπου οι δείκτες 1 και *i* αναφέρονται στον πρώτο παλμό και τον παλμό *i* αντίστοιχα. Εάν ο παλμός ξεκινάει πριν το τέλος του πρώτου παλμού, θεωρείται αποδεκτός ανεξαρτήτως του εάν ικανοποιεί το κριτήριο του Baker (2007). Στην περίπτωση αυτή η διαδικασία συνεχίζεται στο βήμα 13. Εάν όμως ο παλμός ξεκινάει μετά το τέλος του πρώτου παλμού, δηλαδή $t_{p,i} > t_{0,1} + \gamma_1 \cdot T_1'/2$, η διαδικασία συνεχίζεται στο βήμα 12. Π.

- II. Υπολογίζεται η συνάρτηση του ολοκληρώματος του τετραγώνου της εδαφικής ταχύτητας CSV_{pulse,i}(t) για το κυματίδιο i και υπολογίζεται η χρονική στιγμή t_{10%,pulse,i}. Εάν ικανοποιείται το κριτήριο t_{10%,pulse,i} > t_{20%,orig}, όπου η χρονική στιγμή t_{20%,orig} υπολογίστηκε στο βήμα 8 για την αρχική καταγραφή (και όχι την εναπομένουσα), ο παλμός απορρίπτεται ως παλμός που φτάνει αργά στη χρονοϊστορία της ταχύτητας και η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το βήμα 10, χωρίς αλλαγή του δείκτη i. Εάν ο παλμός θεωρείται αποδεκτός με βάση το παραπάνω κριτήριο, η διαδικασία συνεχίζεται στο επόμενο βήμα.
- 13. Γίνεται υπέρθεση του παλμού i με όλους τους προηγούμενους παλμούς 1 έως και i-1 που κρίθηκαν αποδεκτοί, ώστε να διαταχθεί η σειρά των κυματιδίων για την προσομοίωση της εδαφικής κίνησης.
- 14. Υπολογίζεται το ολοκλήρωμα του φάσματος της ψευδο-ταχύτητας *CS_{ν,sim,i}* για την τεχνητή κίνηση, όπως καθορίστηκε στο βήμα 13 και εκτελούνται οι παρακάτω έλεγχοι:
 - Ι. Υπολογίζεται η διαφορά: $\Delta CS_v = CS_{v,sim,i} CS_{v,sim,(i-1)}$, όπου $CS_{v,sim,(i-1)}$ είναι το ολοκλήρωμα του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για τη σειρά των (i-1) σημαντικών παλμών που έχουν εντοπιστεί πριν την επιλογή του παλμού i. Ελέγχεται εάν ο λόγος $\Delta CS_v/CS_{v,sim,(i-1)} < 5\%$. Εάν ναι, ο παλμός θεωρείται ασήμαντος και απορρίπτεται, ενώ η διαδικασία επιστρέφει στο βήμα 10 για την εύρεση του επόμενου παλμού. Εάν ο λόγος $\Delta CS_v/CS_{v,sim,(i-1)} < 5\%$, τότε ο παλμός θεωρείται σημαντικός και η διαδικασία συνεχίζεται στο βήμα 14.ΙΙ.
 - ΙΙ. Υπολογίζεται ο λόγος CS_{v,sim,i}/CS_{v,orig}, όπου η τιμή CS_{v,orig} είναι η τιμή του αθροιστικού φάσματος απόκρισης της ταχύτητας CS_v της αρχικής καταγραφής, όπως ορίστηκε στο βήμα 9. Εάν CS_{v,sim,i}/CS_{v,orig} > 90%, δεν απαιτείται η εύρεση επιπλέον παλμών. Εάν όχι, η διαδικασία επιστρέφει στο βήμα 10 για την εύρεση του επόμενου παλμού.

Μετά το τέλος της παραπάνω επαναληπτικής διαδικασίας οι k παλμοί που θεωρούνται αποδεκτοί επαναριθμούνται, αφού διαταχθούν σε φθίνουσα σειρά με βάση τις περιόδους τους, δηλαδή $T_1 > T_2 > ... > T_k$.

Η διαδικασία μπορεί να προγραμματιστεί εύκολα στο σύνολό της και συνεπώς μπορεί να αυτοματοποιηθεί πλήρως, για την εύρεση των χαρακτηριστικών των σημαντικών παλμών σε ένα πλήθος σεισμικών καταγραφών.

<u>Κεφάλαιο 5</u> ΤΟ *CAD* ΩΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΥΠΑΡΞΗΣ ΠΑΛΜΟΥ

5.1 Εισαγωγή

Οι σεισμικές καταγραφές στις οποίες εμπεριέχεται ένας ή περισσότεροι παλμοί στη χρονοϊστορία της ταχύτητας αποτελούν μια ειδική κατηγορία εδαφικών κινήσεων ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, αφού είναι ικανές να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες σε ένα μεγάλο εύρος κατασκευών. Οι παλμοί που ενέχονται στις κινήσεις αυτές οφείλονται τυπικά σε φαινόμενα κατευθυντικότητας εντός μιας ζώνης κοντινού πεδίου και σπάνια σε άλλες αιτίες. Μέχρι τώρα, ο χαρακτηρισμός μιας καταγραφής ως παλμικής έχει βασιστεί στην παρατήρηση ότι το παλμικό μέρος της εδαφικής κίνησης περιέχει ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής ενέργειας της καταγραφής.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια διαφορετική προσέγγιση για τον καθορισμό της δεσπόζουσας περιόδου του παλμού και την κατάταξη των καταγραφών σε παλμικές και μη, όπως έχει προταθεί από τους ερευνητές *Β. Καρδούτσου, Ι. Ταφλαμπάς, Ι. Ψυχάρης (2014)* και βασίζεται στην τιμή της νεοεισαχθείσας έννοιας *CAD* (*Taflampas et al. 2009*).

Το CAD (Cumulative Absolute Displacement – Αθροιστική Απόλυτη Μετακίνηση) που ορίζεται ως το ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής της εδαφικής ταχύτητας συγκρίνεται με τη φασματική μετακίνηση για μηδενική απόσβεση $S_{d,0}(T_p)$, που αντιστοιχεί στη δεσπόζουσα περίοδο T_p του παλμού που εντοπίζεται στη χρονοϊστορία των ταχυτήτων. Έχει αποδειχτεί ότι για παλμικές εδαφικές κινήσεις, ο λόγος $S_{d,0}(T_p)/CAD$ παίρνει τιμές κοντά στο $\pi/4$, ενώ για μη παλμικές εδαφικές κινήσεις η τιμή του λόγου είναι σημαντικά μικρότερη. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου έχει επαληθευτεί στην αρχική δημοσίευση εισαγωγής της (Kardoutsou et al. 2014) με εφαρμογή της σε ένα δείγμα 229 καταγραφών της βάσης δεδομένων NGA, για τις οποίες η Μέγιστη Εδαφική Ταχύτητα είναι PGV>30 cm/s.

Η αυξημένη πυκνότητα βάσεων δεδομένων που αφορούν την καταγραφή σεισμικών γεγονότων τα τελευταία χρόνια, σε συνδυασμό με την αυξημένη πυκνότητα καταγραφικών σταθμών σε περιοχές που βρίσκονται κοντά σε ρήγματα, έχει επιτρέψει τη συλλογή πλήθους καταγραφών κοντινού πεδίου, οι οποίες εμφανίζουν σημαντικές διαφορές με τις καταγραφές μακριά από το ρήγμα. Η κύρια διαφορά μεταξύ των καταγραφών αυτών οφείλεται στην παρουσία μεγάλων παλμών στη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας των πρώτων, κυρίως σε θέσεις που βρίσκονται στην περιοχή έμπροσθεν της επιφάνειας διάρρηξης του ρήγματος και προκαλείται από φαινόμενα κατευθυντικότητας.

Οι καταγραφές που περιέχουν τέτοιους παλμούς χαρακτηρίζονται ως παλμικές (pulse like records) και παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα πεδία της Τεχνικής Σεισμολογίας και της Αντισεισμικής Μηχανικής, ειδικά όσον αφορά τον Αντισεισμικό Σχεδιασμό με Στάθμες Επιτελεστικότητας (Performance Based Design), λόγω των επιδράσεών τους στα ελαστικά και ανελαστικά φάσματα απόκρισης (Bertero et al. 1978, Somerville 1997, 1998 & 2003, Champion and Liel 2012).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αν και στην πλειονότητα των παλμικών καταγραφών η εμφάνιση του παλμού οφείλεται στην ύπαρξη συνθηκών κοντινού πεδίου (παλμοί κατευθυντικότητας), σημαντικοί παλμοί μπορεί να προκληθούν και από άλλες αιτίες, όπως είναι τα φαινόμενα που δημιουργούνται σε μια γεωλογική λεκάνη (basins effects), οι εδαφικές συνθήκες, η βαθειά διάρρηξη (deep rupture) κ.α. (Rodriguez-Marek 2000, Baker 2007). Στα πλαίσια της διαδικασίας που περιγράφεται παρακάτω λαμβάνονται υπόψη όλοι οι εμφανιζόμενοι παλμοί, χωρίς περαιτέρω διερεύνηση της αιτίας που προκαλεί τον παλμό.

5.2 Διεγέρσεις κοντινού πεδίου και ανελαστική απαίτηση

Σε ότι αφορά τα ελαστικά φάσματα απόκρισης, οι παλμοί κατευθυντικότητας προκαλούν μια επαύξηση κωδωνοειδούς μορφής στα φάσματα μετακινήσεων στο πεδίο περιόδων κοντά στη δεσπόζουσα περίοδο του παλμού *T_p* (Shahi & Baker, 2011).

Για τα ανελαστικά φάσματα απόκρισης, η πλαστιμότητα μ είναι αρκετά μεγαλύτερη από το συντελεστή συμπεριφοράς q_y για περιόδους μικρότερες από την περίοδο του παλμού (*lervolino and Cornell, 2008*). Όσο η περίοδος μειώνεται, ο λόγος πλαστιμότητας - συντελεστή συμπεριφοράς αυξάνεται. Για περιόδους ίσες ή μεγαλύτερες από τη δεσπόζουσα περίοδο του παλμού, ο λόγος αυτός παίρνει τιμές κοντά στη μονάδα και επικρατεί η παραδοχή των "ίσων μετακινήσεων" δηλαδή $\mu = q_v$.

Αυτή η παρατήρηση προκύπτει από τις μελέτες των Tothong and Cornell (2006), οι οποίοι δημιούργησαν για ένα μονοβάθμιο σύστημα (SDOF oscillator) με σταθερό συντελεστή $q_y = 4,0$, μετελαστική δυσκαμψία με κράτυνση ίση με το 5% της ελαστικής (hardening stiffness) και λόγο ιξώδους απόσβεσης 5%, το λόγο της ανελαστικής προς την ελαστική μετακίνηση ($S_{d,i}[T]/S_{d,e}[T]$) και την παρέστησαν γραφικά ως προς την περίοδο ταλάντωσης ανηγμένη ως προς τη δεσπόζουσα περίοδο του παλμού (T/T_p), για τρείς τιμές της περιόδου του παλμού.



Σχήμα 5.1: Λόγοι απαίτησης ανελαστικής προς ελαστικής μετακίνησης παλμικών καταγραφών (Tothong and Cornell, 2006).

Στα διαγράμματα αυτά παρατηρείται μια τοπική επαύξηση του λόγου $S_{d,i}/S_{d,e}$ κοντά στην περιοχή περιόδων $T \approx 0.5 \cdot T_p$, γεγονός που υποδηλώνει την απαίτηση μιας σημαντικά αυξημένης ανελαστικής απαίτησης στην περιοχή αυτή. Δηλαδή, στις ανελαστικές αναλύσεις αναμένεται η απαίτηση αυξημένης πλαστιμότητας για τις κατασκευές που έχουν ιδιοπεριόδους κοντά στη μισή ιδιοπερίοδο του δεσπόζοντος παλμού, όπου η περίοδος του παλμού έχει προκύψει από τα ελαστικά φάσματα απόκρισης. Στην περίπτωση (a) του σχήματος 5.1 όπου η περίοδος του παλμού είναι μικρή, η επαύξηση αυτή υπερκαλύπτεται από τις συνιστώσες υψηλού συχνοτικού περιεχομένου της διέγερσης.

5.3 Άλλες μέθοδοι ταξινόμησης των εδαφικών κινήσεων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι παλμοί ταχύτητας που εμπεριέχονται στις καταγραφές των εδαφικών κινήσεων είναι συχνά εμφανείς στη χρονοϊστορία της ταχύτητας. Για τον προσδιορισμό των κύριων χαρακτηριστικών τους, διάφοροι ερευνητές έχουν παρουσιάσει διαφορετικές μεθόδους για την προσομοίωση και εξαγωγή του σημαντικού παλμού, κυρίως χρησιμοποιώντας κυματική ανάλυση.

Οι Mavroeidis and Papageorgiou (2003) έχουν προτείνει ένα αποτελεσματικό προσομοίωμα για τη μαθηματική απεικόνιση του παλμού, το οποίο περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 4 και υιοθετείται από τη διαδικασία που τελικώς εφαρμόζεται για την επεξεργασία των σεισμικών καταγραφών στην εργασία αυτή (Mimoglou et al. 2014).

Ακόμα, ο Baker (2007) έχει αναπτύξει μια νέα μέθοδο για τον εντοπισμό των παλμών που εμπεριέχονται στις εδαφικές κινήσεις. Η διαδικασία που ακολουθεί ο Baker (2007) ακολουθεί επεξεργασία των σημάτων με βάση κυματίδια για την αναγνώριση και την εξαγωγή του μεγαλύτερου παλμού ταχυτήτων από την εδαφική κίνηση, με τον ορισμό δύο κριτηρίων: *i*. ο παλμός φτάνει νωρίς στη χρονοϊστορία της εδαφικής κίνησης και *ii*. η απόλυτη τιμή του πλάτους του παλμού είναι μεγάλη.

Παρά το γεγονός ότι η μέθοδος αυτή είναι απλή και οδηγεί στην εδραίωση ενός δείκτη για μια ποσοτική κατάταξη των καταγραφών σε παλμικές και μη παλμικές, δε δίνει τα αναμενόμενα αποτελέσματα σε κάποιες καταγραφές οι οποίες εμφανώς περιέχουν σημαντικούς παλμούς.

Μια διαφορετική μέθοδος για την αναγνώριση των παλμικών καταγραφών έχει προταθεί από τους *Zhai et al. (2013)*, η οποία βασίζεται σε ενεργειακά κριτήρια. Συγκεκριμένα, οι εδαφικές κινήσεις στις οποίες ο δεσπόζων παλμός ταχύτητας ενέχει τιμές ενέργειας μεγαλύτερες από ένα συγκεκριμένο ποσοστό της συνολικής ενέργειας της καταγραφής, κατατάσσονται ως παλμικές. Ωστόσο, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα των δύο παραπάνω μεθόδων.

5.4 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μια συχνή τακτική προσδιορισμού της περιόδου του δεσπόζοντος παλμού *T_p* μιας εδαφικής κίνησης βασίζεται στην παραδοχή ότι η δεσπόζουσα περίοδος του παλμού προκύπτει από την αιχμή του φάσματος απόκρισης της ταχύτητας για απόσβεση *5%* (Alavi and Krawinkler 2000), μια μέθοδος που έχει αμφισβητηθεί από αρκετούς ερευνητές (Rodriguez-Marek 2000, Baker 2007).

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

Ο καθορισμός της περιόδου του δεσπόζοντος παλμού *T_p* σύμφωνα με τη μέθοδο που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό (*V. Kardoutsou, I. Taflampas, I. Psycharis*), πραγματοποιείται με τη διαδικασία που περιγράφηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο (*P. Mimoglou, I. Psycharis, I. Taflampas 2014*):

Η περίοδος του δεσπόζοντος παλμού προκύπτει από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος συνέλιξης (convolution spectrum ή product spectrum) $S_{d,5} \times S_{v,5}$, όπου $S_{d,5}$ είναι το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης και $S_{v,5}$ το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας για απόσβεση 5%.

Προς επιβεβαίωση της παραπάνω θέσης για την ανίχνευση του παλμού ταχύτητας μιας καταγραφής, η μέθοδος εφαρμόζεται για την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα μιας σεισμικής καταγραφής από το σεισμό του Cape Mendocino (1992) στο Petrolia. Η τιμή της περιόδου του παλμού προκύπτει με βάση τα παραπάνω ίση με: *T_p* = 2,74 sec (Σχήμα 5.2), μια τιμή κοντά στην περίοδο των 3,0 sec που έχει προταθεί από τον *Baker (2007)*. Ωστόσο, όπως δείχνεται στο σχήμα 5.2, αυτή η τιμή είναι κοντά στη δεύτερη κορυφή του φάσματος ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5% (ίση με 2,30 sec) και όχι στην περίοδο στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της ψευδο-ταχύτητας (που είναι ίση με 0,72 sec). Στο σχήμα 5.2 δείχνεται η μορφή του παλμού, όπως εξάγεται με βάση τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 (*Mimoglou et al. 2014*) πάνω στη χρονοϊστορία ταχύτητας της αρχικής καταγραφής.



Σχήμα 5.2: Καταγραφή Petrolia από το σεισμό στο Cape Mendocino, 1992: (a) Φάσμα συνέλιξης S_d x S_v; (b) Φάσμα ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5%; (c) χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας και ο υπολογισμένος δεσπόζων παλμός (*Mimoglou 2014*).

5.5 Νέα μέθοδος ταξινόμησης των εδαφικών κινήσεων

Μέχρι τώρα, η κατάταξη των εδαφικών κινήσεων σε παλμικές ή μη παλμικές έχει βασιστεί στην υπόθεση ότι η ενέργεια μιας παλμικής εδαφικής κίνησης συγκεντρώνεται στο χρονικό διάστημα εκδήλωσης του παλμού. Αυτό υπονοεί ότι η επιβαλλόμενη στις κατασκευές μετακίνηση λόγω μιας τέτοιας εδαφικής διέγερσης συγκεντρώνει ενέργεια σε ένα ή λίγους υστερητικούς κύκλους.

Διαφορετικά κριτήρια έχουν οριστεί από διαφορετικούς ερευνητές όσον αφορά τον κατάταξη αυτή. Ο Baker (2007) πρότεινε ένα παλμικό δείκτη ο οποίος λαμβάνει υπόψη το λόγο της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας PGV της αρχικής καταγραφής προς τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV της εναπομένουσας καταγραφής, μετά την αφαίρεση του παλμού ταχυτήτων από την αρχική καταγραφή, όπως και το λόγο των ενεργειών της αρχικής και της εναπομένουσας κίνησης. Όσον αφορά τον τελευταίο, ο δείκτης των ενεργειών προκύπτει από το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της εδαφικής ταχύτητας. Αυτός ο παλμικός δείκτης παίρνει τιμές από 0 έως 1. Εάν η τιμή του είναι μεγαλύτερη από 0,85, η καταγραφή κατατάσσεται ως μη παλμική. Για ενδιάμεσες τιμές του παλμικού δείκτη η μέθοδος δεν είναι αποτελεσματική.

Ένας παρόμοιος δείκτης προτάθηκε από τους Zhai et al. (2013), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που εμπεριέχεται στον παλμό της ταχύτητας και στη συνολική ενέργεια της καταγραφής. Εάν ο λόγος αυτός είναι μεγαλύτερος από 0,3 η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως παλμική. Ένα εμφανές μειονέκτημα της διαδικασίας αυτής είναι ότι λαμβάνει υπόψη μόνο ένα κύκλο της εδαφικής κίνησης, ενώ ο αριθμός των κύκλων μπορεί να είναι μεγαλύτερος.

Η μέθοδος που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό κάνει χρήση της νεοεισαχθείσας παραμέτρου CAD (Taflampas et al. 2009), η οποία ορίζεται ως το χρονικό ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής της εδαφικής ταχύτητας, όπως περιγράφηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, δηλαδή:

$$CAD = \int_{0}^{t_{tot}} \left| v_{g} \right| dt \quad (5.1)$$

Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό βασίζεται στην παραδοχή ότι για μια αρμονική κίνηση ενός αριθμού κύκλων, η οποία επιβάλλεται ως διέγερση βάσης σε ένα μονοβάθμιο ταλαντωτή χωρίς απόσβεση (undamped SDOF oscillator), υπάρχει μια σταθερή σχέση μεταξύ του CAD και της φασματικής μετακίνησης στο συντονισμό για μηδενική απόσβεση, η οποία εκφράζεται ως (Mimoglou et al. 2014):

$$\frac{S_{d,0}(T_{res})}{CAD} = \frac{\pi}{4}$$
 (5.2)

Η εξίσωση 3.2 υπαινίσσεται ότι για εδαφικές κινήσεις που χαρακτηρίζονται από παλμούς ταχύτητας, το φάσμα απόκρισης μετακίνησης για μηδενική απόσβεση, το οποίο όπως έχει

ήδη αναφερθεί, αποτελεί μια προσέγγιση του φάσματος *Fourier* της εδαφικής ταχύτητας, θα πρέπει να εμφανίζει μια μεγάλη επαύξηση κοντά στην περίοδο του παλμού *T*_ρ και ο λόγος *S_{d,0}(T_p)/CAD* θα πρέπει να είναι κοντά στην τιμή *π/4*.

Από την άλλη, για μη παλμικές εδαφικές κινήσεις, το φάσμα Fourier της εδαφικής ταχύτητας είναι πιο επίπεδο, με αποτέλεσμα να προκύπτει μια τιμή του λόγου $S_{d,0}(T_p)/CAD$ σημαντικά μικρότερη από $\pi/4$.

Για τον υπολογισμό αυτού του δείκτη προτείνεται το CAD να μην υπολογίζεται για όλη τη χρονοϊστορία της εδαφικής κίνησης, αλλά για ένα μικρότερο χρονικό διάστημα, από τη χρονική στιγμή t_{min} μέχρι τη στιγμή t_{max} , όπου t_{min} είναι η χρονική στιγμή στην οποία η εδαφική ταχύτητα μηδενίζεται πριν υπερβεί την τιμή 0,4·PGV για πρώτη φορά και t_{max} είναι η χρονική στιγμή που η εδαφική ταχύτητα μηδενίζεται αφού υπερβεί την τιμή 0,4·PGV για τελευταία φορά, δηλαδή:

$$CAD = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \left| v_g \right| dt \quad (5.3)$$

Είναι εμφανές από τα παραπάνω ότι ο λόγος $S_{d,0}(T_p)/CAD$, όπου $S_{d,0}(T_p)$ είναι η τιμή της φασματικής μετακίνησης για μηδενική απόσβεση που αντιστοιχεί στην τιμή της δεσπόζουσας περιόδου του παλμού T_p και CAD η τιμή της αθροιστικής απόλυτης μετακίνησης όπως ορίστηκε στην εξίσωση (5.3) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης του αν μια καταγραφή είναι παλμική ή μη παλμική. Το όριο για αυτή την κατάταξη μπορεί να τεθεί σε μια τιμή κάπως μικρότερη από $\pi/4$.

Με βάση τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από αυτή τη μέθοδο και τις μεθόδους των *Baker (2007)* και *Zhai et al. (2013)* που αναφέρθηκαν προηγουμένως, προτείνεται το όριο να τίθεται σε μια τιμή κοντά στο π/5 (= 0,628). Πιο συγκεκριμένα, το προτεινόμενο κριτήριο είναι το εξής:

- Αν ο λόγος S_{d,0}(T_p)/CAD είναι μεγαλύτερος από 0,65, η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως "Παλμική".
- Αν ο λόγος S_{d,0}(T_p)/CAD είναι μικρότερος από 0,55, η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως *"Μη παλμική"*.
- Οι καταγραφές για τις οποίες ο λόγος παίρνει τιμές 0,55 < S_{d,0}(T_p)/CAD < 0,65
 Θεωρούνται "Ασαφείς".

Προς επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής της σε μια γνωστή παλμική καταγραφή από το σεισμό στο *Cape Mendocino* (*Petrolia*), 1992. Στην περίπτωση αυτή είναι: t_{min} = 1,6 sec και t_{max} = 3,9 sec (Σχήμα 5.3) και η εφαρμογή της σχέσης (5.3) δίνει *CAD* = 75,04 cm. Η περίοδος του παλμού υπολογίζεται από

την κορυφή του φάσματος συνέλιξης $S_d \times S_v$ για απόσβεση 5% και είναι ίση με: $T_p = 2,7$ sec. (Σχήμα 5.3). Η τιμή της φασματικής μετακίνησης για μηδενική απόσβεση που αντιστοιχεί στην περίοδο του παλμού είναι: $S_{d,0}(T_p) = 64$ cm. Συνεπώς, ο λόγος $S_{d,0}(T_p)/CAD = 0,85$, σημαντικά μεγαλύτερος από 0,65, και η καταγραφή κατατάσσεται ως παλμική.



Σχήμα 5.3: Σεισμός του Cape Mendocino, 1992: (a) χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας. Οι σκιασμένες επιφάνειες υποδεικνύουν το τμήμα της καταγραφής για το οποίο υπολογίζεται το *CAD*; (b) Φάσμα συνέλιξης S_dxS_v για απόσβεση 5%. (c) Φάσμα μετατόπισης για μηδενική απόσβεση.

Ως ένα δεύτερο παράδειγμα, θεωρείται μια μη παλμική καταγραφή και συγκεκριμένα η καταγραφή *CHY036* από το σεισμό του *Chi-Chi 1999*. Στην περίπτωση αυτή είναι: $t_{min} = 27$ sec και $t_{max} = 54$ sec (Σχήμα 5.4) και εφαρμογή της σχέσης (5.3) δίνει *CAD* = 235 cm. Το φάσμα συνέλιξης $S_d × S_v$ για απόσβεση 5% παρουσιάζει τη μέγιστη αιχμή του για περίοδο $T_p = 3,94$ sec (Σχήμα 5.4) και από το φάσμα απόκρισης της μετατόπισης για μηδενική απόσβεση βρίσκεται ότι $S_{d,0}(T_p) = 116$ cm. Συνεπώς, είναι: $S_{d,0}(T_p)/CAD = 0,49 < 0,55$ συνεπώς η καταγραφή χαρακτηρίζεται ως μη παλμική.



Σχήμα 5.4: Καταγραφή CHY036 από το σεισμό στο Chi-Chi, 1999: (a) χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας; (b) Φάσμα συνέλιξης S_dxS_v για απόσβεση 5%; (c) φάσμα μετατόπισης για μηδενική απόσβεση.

5.6 Σύγκριση με άλλες μεθόδους

Η μεθοδολογία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο αυτό εφαρμόστηκε σε 91 καταγραφές που έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές από το Baker (2007) και σε ένα σύνολο 160 καταγραφών που χρησιμοποιήθηκαν από τους Zhai et al. (2013). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα 5.5a και 5.5b αντίστοιχα, στο επίπεδο S_{d,0}(T_p) - CAD, στο οποίο οι μαύρες κουκίδες αντιστοιχούν σε παλμικές καταγραφές και οι γκρι σταυροί σε μη παλμικές, ανάλογα με την κατάταξη που έγινε στις αρχικές δημοσιεύσεις των δύο ερευνητών. Στα ίδια σχήματα δείχνονται οι γραμμές που αντιστοιχούν στα όρια της μεθόδου που αναφέρθηκαν

παραπάνω, $S_{d,0}(T_p)/CAD = 0.55$ και $S_{d,0}(T_p)/CAD = 0.65$. Ακόμα, δείχνεται η γραμμή που αντιστοιχεί στις τιμές με: $S_{d,0}(T_p)/CAD = π/4$ (≈ 0.785) για περαιτέρω σύγκριση.



Σχήμα 5.5: S_{d,0}(T_p) ως προς το CAD για τις καταγραφές που έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές από τους (a) Baker (2007) και (b) Zhai et al. (2013). Οι μαύρες κουκίδες αντιστοιχούν σε παλμικές καταγραφές και οι γκρι σταυροί σε μη παλμικές σύμφωνα με την ταξινόμηση που έχει γίνει στις αρχικές δημοσιεύσεις.

Φαίνεται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις οι μαύρες κουκίδες βρίσκονται πάνω από την ευθεία $S_{d,0}(T_p)/CAD = 0,65$ και οι γκρι σταυροί βρίσκονται κάτω από την ευθεία $S_{d,0}(T_p)/CAD = 0,55$. Υπάρχουν λίγες μόνο περιπτώσεις στις οποίες η μεθοδολογία έρχεται σε αντίθεση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του *Baker* και των *Zhai et al*. Δύο παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων δείχνονται στο σχήμα 5.6 για τις καταγραφές *Hollister City Hall* (σχήμα 5.6a) και *Sunnyvale - Colton Ave*. (Σχήμα 5.6b) του σεισμού στο *Loma Prieta (1989)*, οι οποίες έχουν χαρακτηριστεί ως μη παλμικές από τους *Zhai et al*. και δεν αναφέρονται από τον *Baker (2007)* ως παλμικές. Για αυτές τις καταγραφές ο λόγος $S_{d,0}(T_p)/CAD$ παίρνει τις τιμές *1,22* και 0,76 αντίστοιχα, οι οποίες είναι σημαντικά μεγαλύτερες από 0,65 και συνεπώς χαρακτηρίζονται ως παλμικές. Αυτές οι καταγραφές όπως είναι εμφανές εμπεριέχουν σημαντικούς παλμούς, όπως μπορεί να γίνει ορατό και από τη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας που φαίνεται στο σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6: Χρονοϊστορίες της εδαφικής ταχύτητας για τις καταγραφές: (a) Hollister City Hall και (b) Sunnyvale - Colton Ave. από το σεισμό στο Loma Prieta, 1989.

No	NGA No.	Earthquake Name	Year	Station Name	Earthquake Magnitude	ClstD (km)
1	77	San Fernando	1971	Pacoima Dam (upper left abut)	6.61	1.81
2	126	Gazli, USSR	1976	Karakyr	6.80	5.46
3	143	Tabas, Iran	1978	Tabas	7.35	2.05
4	150	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #6	5.74	3.11
5	158	Imperial Valley-06	1979	Aeropuerto Mexicali	6.53	0.34
6	159	Imperial Valley-06	1979	Agrarias	6.53	0.65
7	161	Imperial Valley-06	1979	Brawley Airport	6.53	10.42
8	170	Imperial Valley-06	1979	EC County Center FF	6.53	7.31
9	171	Imperial Valley-06	1979	EC Meloland Overpass FF	6.53	0.07
10	173	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #10	6.53	6.17
11	174	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #11	6.53	12.45
12	178	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #3	6.53	12.85
13	179	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #4	6.53	7.05
14	180	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #5	6.53	3.95
15	181	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #6	6.53	1.35
16	182	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #7	6.53	0.56
17	183	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #8	6.53	3.86
18	184	Imperial Valley-06	1979	El Centro Differential Array	6.53	5.09
19	185	Imperial Valley-06	1979	Holtville Post Office	6.53	7.65
20	250	Mammoth Lakes-06	1980	Long Valley Dam (Upr L Abut)	5.94	
21	292	Irpinia, Italy-01	1980	Sturno	6.90	10.84
22	316	Westmorland	1981	Parachute Test Site	5.90	16.66
23	338	Coalinga-01	1983	Parkfield - Fault Zone 14	6.36	29.48
24	407	Coalinga-05	1983	Oil City	5.77	
25	415	Coalinga-05	1983	Transmitter Hill	5.77	
26	418	Coalinga-07	1983	Coalinga-14th & Elm (Old CHP)	5.21	
27	451	Morgan Hill	1984	Coyote Lake Dam (SW Abut)	6.19	0.53
28	459	Morgan Hill	1984	Gilroy Array #6	6.19	9.86
29	495	Nahanni, Canada	1985	Site 1	6.76	9.60
30	496	Nahanni, Canada	1985	Site 2	6.76	4.93
31	503	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 C00	6.32	
32	508	Taiwan SMART1(40)	1986	SMART1 M07	6.32	
33	527	N. Palm Springs	1986	Morongo Valley	6.06	12.07
34	529	N. Palm Springs	1986	North Palm Springs	6.06	4.04
35	568	San Salvador	1986	Geotech Investig Center	5.80	6.30
36	569	San Salvador	1986	National Geografical Inst	5.80	6.99
37	585	Baja California	1987	Cerro Prieto	5.50	
38	615	Whittier Narrows-01	1987	Downey - Co Maint Bldg	5.99	20.82
39	645	Whittier Narrows-01	1987	LB - Orange Ave	5.99	24.54
40	723	Superstition Hills-02	1987	Parachute Test Site	6.54	0.95
41	723	Superstition Hills-02	1987	Parachute Test Site	6.54	0.95

Πίνακας 2:	Παλμικές	καταγραφές	(Kardoutsou	et al.	2014).
------------	----------	------------	-------------	--------	--------

42	738	Loma Prieta	1989	Alameda Naval Air Stn Hanger 6.93		71.00
43	753	Loma Prieta	1989	Corralitos	6.93	3.85
44	758	Loma Prieta	1989	Emeryville - 6363 Christie	6.93	76.97
45	764	Loma Prieta	1989	Gilroy - Historic Bldg.	6.93	10.97
46	766	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #2	6.93	11.07
47	767	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #3	6.93	12.82
48	768	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #4	6.93	14.34
49	776	Loma Prieta	1989	Hollister - South & Pine	6.93	27.93
50	777	Loma Prieta	1989	Hollister City Hall	6.93	27.60
51	778	Loma Prieta	1989	Hollister Diff. Array	6.93	24.82
52	779	Loma Prieta	1989	LGPC	6.93	3.88
53	783	Loma Prieta	1989	Oakland - Outer Harbor Wharf	6.93	74.26
54	787	Loma Prieta	1989	Palo Alto - SLAC Lab	6.93	30.86
55	802	Loma Prieta	1989	Saratoga - Aloha Ave	6.93	8.50
56	803	Loma Prieta	1989	Saratoga - W Valley Coll.	6.93	9.31
57	806	Loma Prieta	1989	Sunnyvale - Colton Ave.	6.93	24.23
58	821	Erzican, Turkey	1992	Erzincan	6.69	4.38
59	825	Cape Mendocino	1992	Cape Mendocino	7.01	6.96
60	828	Cape Mendocino	1992	Petrolia	7.01	8.18
61	829	Cape Mendocino	1992	Rio Dell Overpass - FF	7.01	14.33
62	838	Landers	1992	Barstow	7.28	34.86
63	848	Landers	1992	Coolwater	7.28	19.74
64	900	Landers	1992	Yermo Fire Station	7.28	23.62
65	952	Northridge-01	1994	Beverly Hills - 12520 Mulhol	6.69	18.36
66	959	Northridge-01	1994	Canoga Park - Topanga Can	6.69	14.70
67	963	Northridge-01	1994	Castaic - Old Ridge Route	6.69	20.72
68	982	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant	6.69	5.43
69	983	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant Generator	6.69	5.43
70	1003	Northridge-01	1994	LA - Saturn St	6.69	27.01
71	1004	Northridge-01	1994	LA - Sepulveda VA Hospital	6.69	8.44
72	1009	Northridge-01	1994	LA - Wadsworth VA Hospital North	6.69	23.60
73	1012	Northridge-01	1994	LA 00	6.69	19.07
74	1013	Northridge-01	1994	LA Dam	6.69	5.92
75	1044	Northridge-01	1994	Newhall - Fire Sta	6.69	5.92
76	1045	Northridge-01	1994	Newhall - W Pico Canyon Rd.	6.69	5.48
77	1050	Northridge-01	1994	Pacoima Dam (downstr)	6.69	7.01
78	1051	Northridge-01	1994	Pacoima Dam (upper left)	6.69	7.01
79	1052	Northridge-01	1994	Pacoima Kagel Canyon	6.69	7.26
80	1054	Northridge-01	1994	Pardee - SCE	6.69	7.46
81	1063	Northridge-01	1994	Rinaldi Receiving Sta	6.69	6.50
82	1077	Northridge-01	1994	Santa Monica City Hall	6.69	26.45
83	1080	Northridge-01	1994	Simi Valley - Katherine Rd	6.69	13.42
84	1084	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta	6.69	5.35
85	1085	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta East	6.69	5.19

86	1086	Northridge-01	1994	Sylmar - Olive View Med FF 6.69		5.30
87	1116	Kobe, Japan	1995	Shin-Osaka	6.90	19.15
88	1120	Kobe, Japan	1995	Takatori	6.90	1.47
89	1158	Kocaeli, Turkey	1999	Duzce	7.51	15.37
90	1161	Kocaeli, Turkey	1999	Gebze	7.51	10.92
91	1182	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY006	7.62	9.77
92	1193	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY024	7.62	9.64
93	1194	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY025	7.62	19.09
94	1198	Chi-Chi, Taiwan	1999	СНУ029	7.62	10.97
95	1201	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY034	7.62	14.82
96	1202	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY035	7.62	12.65
97	1231	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY080	7.62	2.69
98	1244	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY101	7.62	9.96
99	1403	Chi-Chi, Taiwan	1999	NSY	7.62	13.15
100	1410	Chi-Chi, Taiwan	1999	TAP003	7.62	102.39
101	1471	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU015	7.62	49.81
102	1472	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU017	7.62	54.28
103	1475	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU026	7.62	56.12
104	1476	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU029	7.62	28.05
105	1479	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU034	7.62	35.69
106	1482	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU039	7.62	19.90
107	1483	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU040	7.62	22.08
108	1484	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU042	7.62	26.32
109	1485	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU045	7.62	26.00
110	1486	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU046	7.62	16.74
111	1487	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU047	7.62	35.00
112	1489	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU049	7.62	3.78
113	1491	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU051	7.62	7.66
114	1493	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU053	7.62	5.97
115	1494	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU054	7.62	5.30
116	1496	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU056	7.62	10.50
117	1503	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU065	7.62	0.59
118	1510	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU075	7.62	0.91
119	1511	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU076	7.62	2.76
120	1513	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU079	7.62	10.97
121	1515	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU082	7.62	5.18
122	1519	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU087	7.62	7.00
123	1523	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU094	7.62	54.53
124	1528	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU101	7.62	2.13
125	1529	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU102	7.62	1.51
126	1530	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU103	7.62	6.10
127	1532	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU105	7.62	17.18
128	1542	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU117	7.62	25.44
129	1545	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU120	7.62	7.41
130	1548	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU128	7.62	13.15

131	1550	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU136	7.62	8.29
132	1595	Chi-Chi, Taiwan	1999	WGK	7.62	9.96
133	1596	Chi-Chi, Taiwan	1999	WNT	7.62	1.84
134	1605	Duzce, Turkey	1999	Duzce	7.14	6.58
135	1629	St Elias, Alaska	1979	Yakutat	7.54	80.00
136	1634	Manjil, Iran	1990	Abhar	7.37	75.58
137	1752	Northwest China-03	1997	Jiashi	6.10	
138	1853	Yountville	2000	Napa Fire Station #3	5.00	
139	2457	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY024	6.20	19.65
140	2495	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY080	6.20	22.37
141	2627	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	TCU076	6.20	14.66
142	3317	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY101	6.30	35.97
143	3548	Loma Prieta	1989	Los Gatos - Lexington Dam	6.93	5.02

Πίνακας 3: Μη παλμικές καταγραφές (Kardoutsou et al. 2014).

No	NGA No.	Earthquake Name	Year	Station Name	Earthquake Magnitude	ClstD (km)
1	6	Imperial Valley-02	1940	El Centro Array #9	6.95	6.09
2	160	Imperial Valley-06	1979	Bonds Corner	6.53	2.68
3	368	Coalinga-01	1983	Pleasant Valley P.P yard	6.36	8.41
4	558	Chalfant Valley-02	1986	Zack Brothers Ranch	6.19	7.58
5	725	Superstition Hills-02	1987	Poe Road (temp)	6.54	11.16
6	729	Superstition Hills-02	1987	Wildlife Liquef. Array	6.54	23.85
7	765	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #1	6.93	9.64
8	864	Landers	1992	Joshua Tree	7.28	11.03
9	901	Big Bear-01	1992	Big Bear Lake - Civic Center	6.46	
10	949	Northridge-01	1994	Arleta - Nordhoff Fire Sta	6.69	8.66
11	1048	Northridge-01	1994	Northridge - 17645 Saticoy St	6.69	12.09
12	1082	Northridge-01	1994	Sun Valley - Roscoe Blvd	6.69	10.05
13	1087	Northridge-01	1994	Tarzana - Cedar Hill A	6.69	15.60
14	1106	Kobe, Japan	1995	КЈМА	6.90	0.96
15	1111	Kobe, Japan	1995	Nishi-Akashi	6.90	7.08
16	1141	Dinar, Turkey	1995	Dinar	6.40	3.36
17	1176	Kocaeli, Turkey	1999	Yarimca	7.51	4.83
18	1180	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY002	7.62	24.98
19	1197	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY028	7.62	3.14
20	1203	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY036	7.62	16.06
21	1463	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU003	7.62	86.57
22	1478	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU033	7.62	40.89
23	1488	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU048	7.62	13.55
24	1495	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU055	7.62	6.36
25	1500	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU061	7.62	17.19
26	1501	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU063	7.62	9.80

1	1			1	1	
27	1507	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU071	7.62	5.31
28	1509	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU074	7.62	13.46
29	1517	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU084	7.62	11.24
30	1521	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU089	7.62	8.88
31	1527	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU100	7.62	11.39
32	1533	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU106	7.62	14.99
33	1534	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU107	7.62	16.01
34	1535	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU109	7.62	13.08
35	1536	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU110	7.62	11.60
36	1538	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU112	7.62	27.50
37	1543	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU118	7.62	26.84
38	1547	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU123	7.62	14.93
39	1549	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU129	7.62	1.84
40	1551	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU138	7.62	9.79
41	1602	Duzce, Turkey	1999	Bolu	7.14	12.04
42	2734	Chi-Chi, Taiwan-04	1999	CHY074	6.20	6.20
43	3474	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	TCU079	6.30	10.05

Πίνακας 4: Ασαφείς καταγραφές (Kardoutsou et al. 2014).

No	NGA No.	Earthquake Name	Year	Station Name	Earthquake Magnitude	ClstD (km)
1	319	Westmorland	1981	Westmorland Fire Sta	5.90	6.50
2	540	N. Palm Springs	1986	Whitewater Trout Farm	6.06	6.04
3	721	Superstition Hills-02	1987	El Centro Imp. Co. Cent	6.54	18.20
4	727	Superstition Hills-02	1987	Superstition Mtn Camera	6.54	5.61
5	741	Loma Prieta	1989	BRAN	6.93	10.72
6	752	Loma Prieta	1989	Capitola	6.93	15.23
7	759	Loma Prieta	1989	Foster City - APEEL 1	6.93	43.94
8	811	Loma Prieta	1989	WAHO	6.93	17.47
9	879	Landers	1992	Lucerne	7.28	2.19
10	953	Northridge-01	1994	Beverly Hills - 14145 Mulhol	6.69	17.15
11	960	Northridge-01	1994	Canyon Country - W Lost Cany	6.69	12.44
12	1080	Northridge-01	1994	Simi Valley - Katherine Rd	6.69	13.42
13	1119	Kobe, Japan	1995	Takarazuka	6.90	0.27
14	1147	Kocaeli, Turkey	1999	Ambarli	7.51	69.62
15	1195	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY026	7.62	29.53
16	1238	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY092	7.62	22.70
17	1246	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY104	7.62	18.04
18	1462	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU	7.62	5.18
19	1477	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU031	7.62	30.18
20	1480	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU036	7.62	19.84
21	1481	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU038	7.62	25.44
22	1490	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU050	7.62	9.51

23	1492	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU052	7.62	0.66
24	1497	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU057	7.62	11.84
25	1498	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU059	7.62	17.13
26	1499	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU060	7.62	8.53
27	1502	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU064	7.62	16.62
28	1504	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU067	7.62	0.64
29	1505	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU068	7.62	0.32
30	1506	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU070	7.62	19.02
31	1508	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU072	7.62	7.03
32	1512	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU078	7.62	8.20
33	1514	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU081	7.62	55.49
34	1526	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU098	7.62	47.67
35	1531	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU104	7.62	12.89
36	1537	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU111	7.62	22.14
37	1540	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU115	7.62	21.78
38	1541	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU116	7.62	12.40
39	1546	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU122	7.62	9.35
40	1553	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU141	7.62	24.21
41	1633	Manjil, Iran	1990	Abbar	7.37	12.56
42	1787	Hector Mine	1999	Hector	7.13	11.66
43	2114	Denali, Alaska	2002	TAPS Pump Station #10	7.90	2.74

<u>Κεφάλαιο 6</u>

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΟΥ NORTHRIDGE (1994) ΣΕ ΠΑΛΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗ

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται η ταξινόμηση 314 σεισμικών καταγραφών από τη βάση δεδομένων του προγράμματος NGA (Next Generation Attenuation) σε παλμικές και μη παλμικές. Οι καταγραφές αυτές προέρχονται από 157 διαφορετικούς καταγραφικούς σταθμούς και αφορούν στο σύνολό τους ένα σεισμικό γεγονός, ώστε να γίνει δυνατή μια διερεύνηση ως προς τη θέση που εμφανίζονται οι παλμικές καταγραφές σε σχέση με τη γεωμετρία και την ολίσθηση του ρήγματος και ως προς τη γωνία στην οποία εμφανίζονται οι πιο έντονοι παλμοί, σε σχέση με το αζιμούθιο της διεύθυνσης παράλληλα στο επίπεδο της διάρρηξης (fault-strike direction). Η περίπτωση που εξετάζεται αφορά το σεισμό του Northridge στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α. το 1994.

6.2 Κριτήρια ταξινόμησης των καταγραφών

Για την ταξινόμηση των καταγραφών σε παλμικές (pulse like) και μη παλμικές (non pulse like) εφαρμόζεται η μέθοδος των *P. Mimoglou, I. Psycharis, I. Taflampas* (2014) που περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 5, στην οποία ο εντοπισμός του παλμού προκύπτει μέσω κυματικής ανάλυσης και για τη μαθηματική του περιγραφή γίνεται χρήση του κυματιδίου των *Mavroeidis and Papageorgiou* (2003).

Για το χαρακτηρισμό μιας καταγραφής ως παλμικής τίθενται τα παρακάτω κριτήρια:

- Η ταξινόμηση γίνεται με βάση τον πρώτο (δεσπόζων) παλμό κάθε καταγραφής.
- Ο συντελεστής συσχέτισης του πρώτου παλμού με την αρχική καταγραφή είναι κατ' ελάχιστο ίσος με r = 0,65.
- Η μέγιστη εδαφική ταχύτητα της αρχικής καταγραφής είναι τουλάχιστον ίση με PGV=30cm/sec.

Το τελευταίο κριτήριο τίθεται, αφού στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας καταγραφής μπορεί να εκδηλώνεται μια παλμική μορφή, χωρίς όμως η καταγραφή να εμπεριέχει σημαντική ενέργεια στο σύνολό της. Εφόσον ο παλμός κατευθυντικότητας εκδηλώνεται μέσα στη χρονοϊστορία της ταχύτητας, λαμβάνεται ως γενικός δείκτης για κάθε καταγραφή το μέγεθος της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας (*Peak Ground Velocity*).

Αξίζει να γίνει μια ακόμα αναφορά στο τελευταίο κριτήριο, την απόρριψη δηλαδή καταγραφών από τη λίστα των παλμικών, στην περίπτωση που η τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης PGV είναι μικρή, ακόμα και αν το κυματίδιο των Mavroeides and Papageorgiou (2003) εμφανίζει καλή συσχέτιση με την αρχική καταγραφή. Η επιλογή αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι η παρουσία ενός παλμού κατευθυντικότητας συνοδεύεται με την έκλυση σημαντικής κινητικής ενέργειας. Οι καταγραφές συνεπώς που παρουσιάζουν χαμηλές τιμές εδαφικής ταχύτητας θεωρείται ότι δε σχετίζονται άμεσα με το φαινόμενο, αλλά μπορεί να οφείλονται σε άλλες αιτίες, όπως είναι τα «Φαινόμενα Λεκάνης» (Basin

Effects), λόγω ανάκλασης των σεισμικών κυμάτων σε μια εκτεταμένη οριζόντια επιφάνεια εντός μιας γεωλογικής λεκάνης, μια παρατήρηση που έχει γίνει και από τον Baker (2007). Ακόμα, θέτοντας το όριο αυτό, αποκλείονται αυτόματα οι καταγραφές μακρινού πεδίου, αφού σε μεγάλες αποστάσεις από το ρήγμα το σήμα έχει εξασθενήσει. Τέλος, η μελέτη των παλμικών καταγραφών παρουσιάζει ενδιαφέρον για το μηχανικό, αφού τοποθετούν στις κατασκευές σημαντικά μεγαλύτερες απαιτήσεις από αυτές για τις οποίες έχουν σχεδιαστεί και συνεπώς οι εν λόγω καταγραφές που τυπικά εμπεριέχουν ενέργεια της ίδιας τάξης με τις μη παλμικές καταγραφές, απορρίπτονται από τη διαδικασία ταξινόμησης.

6.3 Διευθύνσεις στις οποίες αναμένονται οι παλμοί

Όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2, οι παλμοί κατευθυντικότητας προκύπτουν τυπικά σε διευθύνσεις κάθετα στην επιφάνεια διάρρηξης. Συνεπώς, ενώ για μηχανισμούς οριζόντιας ολίσθησης (strike-slip faults) οι διευθύνσεις αυτές κείνται επί του οριζόντιου επιπέδου, για ρήγματα κεκλιμένης ολίσθησης (dip-slip faults) το επίπεδο εμφάνισης των παλμών κατευθυντικότητας προκύπτει εκτός του οριζόντιου επιπέδου.

Στη συγκεκριμένη εργασία, αν και το ρήγμα της περιοχής που εξετάζεται είναι ανάστροφο, γίνεται η παραδοχή ότι οι σημαντικοί παλμοί προκύπτουν εντός του οριζόντιου επιπέδου. Αυτό πραγματοποιείται θεωρώντας το ίχνος του ρήγματος, την κατακόρυφη δηλαδή προβολή του στο οριζόντιο επίπεδο, στο οποίο προβάλλονται η κάθετη και η παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα.



Με βάση την παραπάνω παραδοχή, για την ταξινόμηση των καταγραφών σε παλμικές και μη παλμικές χρησιμοποιούνται οι δύο οριζόντιες καταγραφές που δίνονται από κάθε καταγραφικό σταθμό και αγνοείται η κατακόρυφη. Ένας ακόμα λόγος για τον οποίο γίνεται η συγκεκριμένη επιλογή, αφορά το γεγονός ότι η μέθοδος εντοπισμού των παλμών κατευθυντικότητας που εφαρμόζεται, έχει σχεδιαστεί και βαθμονομηθεί με βάση οριζόντιες σεισμικές καταγραφές.

6.4 Διαθέσιμες καταγραφές - Η περιοχή του Northridge

Το όνομα του υπό εξέταση σεισμικού γεγονότος αναφέρεται στη βάση δεδομένων του προγράμματος NGA ως: Northridge-01 και διαχωρίζεται από σεισμικές δονήσεις μικρότερου μεγέθους που καταγράφηκαν στην περιοχή την ίδια χρονιά (Northridge-02, Northridge-03, Northridge-04, Northridge-05, Northridge-06). Το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος είναι $M_w = 6.69$.

Για το εν λόγω σεισμικό γεγονός διατίθενται καταγραφές από 157 καταγραφικούς σταθμούς της περιοχής. Η διαδικασία ταξινόμησης εφαρμόζεται για όλες τις διατιθέμενες καταγραφές. Στους χάρτες που ακολουθούν φαίνεται η θέση των καταγραφικών σταθμών που απέχουν το πολύ 60km από το ρήγμα, ενώ οι υπόλοιπες χαρακτηρίζονται ως καταγραφές μακρινού πεδίου. Για τις 256 καταγραφές που προκύπτουν από τους 128 σταθμούς που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από 60 km από το ρήγμα εξάγονται τα ελαστικά φάσματα ψευδο-επιτάχυνσης και ψευδο-ταχύτητας, τα οποία φαίνονται στο παράρτημα Α της εργασίας αυτής. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας φυσικός χάρτης της περιοχής στον οποίο διακρίνονται οι καταγραφικοί σταθμοί και έπειτα ένας στον οποίο αναγράφονται τα σνόματα των σταθμών.



Σχήμα 6.1: Χάρτης της περιοχής του Northridge. Με κόκκινο σημειώνονται οι θέσεις των καταγραφικών σταθμών που απέχουν αποστάσεις μικρότερες από 60 km από το ρήγμα.



Σχήμα 6.2: Θέσεις και ονόματα των καταγραφικών σταθμών με ClstD<60km.

6.5 Το ρήγμα

Το ρήγμα που προκάλεσε το σεισμικό γεγονός στο Northridge το 1994 ονομάζεται Northridge Blind Thrust. Η ονομασία αυτή υποδηλώνει δύο κύρια χαρακτηριστικά του ρήγματος: *i*. Το ανώτερο τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης δε φτάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους (Blind fault) και *ii*. το ρήγμα είναι ανάστροφο και η κλίση του σχηματίζει γωνία με το οριζόντιο επίπεδο μικρότερη ή ίση από 45° (Thrust).

Ένα αρκετά αναλυτικό προσομοίωμα του ρήγματος παρέχεται στη βάση δεδομένων *Rowshandel*. Το προσομοίωμα αυτό που ονομάζεται *s1994NORTHRzeng* φαίνεται στο σχήμα 6.3. Το σύστημα αναφοράς *X*, *Y* του σχήματος έχει ως αρχή των αξόνων το υπόκεντρο, το οποίο συμβολίζεται με ένα αστέρι. Η χρωματική κλίμακα στα δεξιά του σχήματος περιγράφει την ολίσθηση σε μέτρα.

Το ανώτερο τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης βρίσκεται σε βάθος 5,00 km κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, το υπόκεντρο βρίσκεται σε βάθος 17,50 km και η επιφάνεια διάρρηξης εκτείνεται μέχρι βάθος 19,3 km. Η γωνία που σχηματίζεται από την κλίση της επιφάνειας διάρρηξης και το οριζόντιο επίπεδο είναι ίση με Dip = 40° και η παράλληλη στο ρήγμα διεύθυνση σχηματίζει με το βορρά γωνία Strike = 122°. Η γωνία Rake = 103° και με βάση αυτή, δίνεται στη βάση δεδομένων του προγράμματος NGA η κατάταξη του ρήγματος ως ανάστροφο. Δηλαδή, ενώ το ρήγμα κλίνει από τα BA προς τα NΔ, η μέση ολίσθηση εκδηλώνεται προς τα ΝΑ προς τα BΔ.





6.6 Ταξινόμηση των καταγραφών

Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ταξινόμησης των καταγραφών για τους καταγραφικούς σταθμούς που βρίσκονται εντός μιας ζώνης *60 km* από το ρήγμα.

Με μπλε διαγράμμιση μαρκάρονται οι καταγραφές στις οποίες επιτυγχάνεται συσχέτιση του μητρικού κυματιδίου με την αρχική καταγραφή μεγαλύτερη από 0,65. Με κίτρινο μαρκάρονται οι καταγραφές όπου ο συντελεστής συσχέτισης παίρνει τιμές εντός του εύρους [0,55 - 0,65]. Σημειώνεται ότι το κατώτατο όριο του συντελεστή συσχέτισης για την ταξινόμηση μιας καταγραφής ως παλμικής είναι το 0,65. Παρ' όλα αυτά, σημειώνοται ενδεικτικά οι καταγραφές με ελαφρώς μικρότερο συντελεστή συσχέτισης για τον εντοπισμό των καταγραφών που δεν πληρούν το κριτήριο οριακά. Με πορτοκαλί μαρκάρονται οι καταγραφές στις οποίες η μέγιστη εδαφική ταχύτητα (Peak Ground Velocity) παίρνει τιμές PGV>30cm/s.

Καταγραφή NGA No.		Συντελεστής Συσχέτισης <i>r</i>	Περίοδος παλμού Τ _ρ (sec)	Γωνία (deg)	ClstD (km)	PGV (cm/sec)	PGA (g)
00942	L	0.4607	1.68	90	26 77	9 6 1	0 0970
	Т	0.0352	11	360	50.77	0.04	0.0879
00945	L	0.5421	2.42	90	28.00	5 91	0.0502
	Т	0.5316	1.14	180	56.00	5.61	0.0302
00946	L	0.5848	10.6	00	46.01	2 5 1	0.0550
	Т	0.6641	9.48	90	40.91	5.51	0.0555
00947	Γ	0.4045	1.6	172	20 72	7.83	0.0054
	Т	0.4959	1.3	262	59.75		0.0951
00948	L	0.4509	2.66	09	A1 A1	E OE	0 1061
	Т	0.4928	2.8	279	41.41	5.55	0.1001
00949	L	0.5342	1.08	90	8 66	20.00	0 2208
	Т	0.5420	3.02	360	8.00	30.90	0.3298
00950	L	0.4754	3.62	180	17 08	5.92	0 1070
	Т	0.4561	1.82	270	47.50	5.85	0.1079
00951	L	0.5023	4.2	220	<i>11</i> 11	7 0 2	0.0702
	Т	0.4017	1.7	310	44.11	7.52	0.0792
00952	L	0.6105	1.2	35	18 36	37.87	0 5102
	Т	0.4746	0.58	125	10.50	52.02	0.5102
00953	L	0.7149	1.24	09	17 15	54 22	0 1591
	Т	0.6570	1.62	279	17.15	34.22	0.4334
00954	L	0.3647	0.9	262	10 7 <i>1</i>	9.61	0 1000
	Т	0.3907	1.02	352	15.74	5.04	0.1555
00957	L	0.4302	3.58	60	16 88	9 09	0 1/03
	Т	0.3668	2.06	330	10.00	5.05	0.1403
00958	L	0.3985	2.76	180	10 34	12 11	0 1151
	Т	0.3657	1.52	270	40.34	12.11	0.1131

Πίνακας 5: Αποτελέσματα ταξινόμησης των καταγραφών για τους σταθμούς που βρίσκονται στα εγγύτερα 60km από το ρήγμα.

00959	L	0.5481	2.12	106	14 70	14.06	0 2764
	Т	0.5825	2.2	196	14.70	44.90	0.5704
00960	L	0.6960	2.1	00	12 44	12.22	0 4255
	Т	0.4931	0.72	270	12.44	45.55	0.4555
00961	L	0.3839	1.78	90	50.38	5 87	0 08/12
	Т	0.3960	2.38	180	50.58	5.87	0.0042
00962	L	0.3730	2.02	180	/0.81	7 1 8	0 0850
	Т	0.4275	2.46	270	45.01	7.10	0.0055
00963	L	0.5025	1.78	90	20.72	46 51	0 4898
	Т	0.5644	0.98	360	20.72	40.31	0.4050
00964	L	0.3589	2.22	00	47 04	7 18	0 1058
	Т	0.4137	1.7	270	17.01	7.10	0.1050
00965	L	0.4503	1.78	74	57 51	5 86	0.0652
	Т	0.3760	1.66	344	07.01	5.00	0.0032
00966	L	0.3765	3.72	00	53.45	6.25	0.0935
	Т	0.5807	1.78	270	55115	0120	0.0333
00967	L	0.3448	2.28	90	48.87	10.04	0.1568
	Т	0.3809	1.94	180			
00968	L	0.3592	1.74	90	46.74	12.11	0.2001
	Т	0.4278	1.42	360	_		
00969	L	0.3866	6.04	90	48.63	3.11	0.0561
	Т	0.3922	1.58	180			
00970	L	0.5158	4.28	95	44.79	9.49	0.1426
	Т	0.5217	1.34	185			
00971	L	0.3984	0.88	90	36.55	8.01	0.1331
	Т	0.5466	0.8	180			
00974	L	0.3760	0.52	177	22.21	10.83	0.2558
	Т	0.3335	0.52	267			
00975	L	0.4045	1.4	80	53.94	3.77	0.0612
	Т	0.3653	1.92	170			
00976	L	0.4638	1.48	140	57.02	3.97	0.0582
	Т	0.5576	1.82	230			
00978	L	0.4790	3.78	90	23.07	22.68	0.1976
	T	0.6704	1.1	180			
00981	L	0.0433	17.16	00	42.20	8.41	0.1018
00000	-	0.1102	10.58	90			
00982	L	0.8292	3.02	22	5.43	73.99	0.7636
00000	1	0.7378	1.98	292			
00983	L	0.8415	2.88	22	5.43	72.33	0.7649
00094	1	0.0099	2.10	292			
00984	L T	0.4343	2.4ð	30	41.17	12.48	0.1733
00005		0.4340	2.80	300			
00985	L T	0.4142	3.82	90	29.88	17.19	0.2039
	1	0.4143	1.64	360			

00986	L	0.5396	2.56	285	22.50 2	23.23 0.178	0 1 7 9 7
	Т	0.5196	2.32	195	22.30	25.25	0.1787
00987	L	0.4434	2.4	155	20 20	21 50	0.2696
	Т	0.4606	2.36	245	28.50	21.50	0.3080
00988	L	0.5027	2.58	90	22 /1	24 55	0 2220
	т	0.5420	1.1	360	25.41	24.55	0.2250
00989	L	0.5025	1.6	70	20.45	72 12	0.2149
	Т	0.5900	1.6	160	20.43	25.15	0.2140
00990	L	0.4591	4.24	90	26.62	14.07	0 2672
	Т	0.3844	1.52	180	50.02	14.07	0.2072
00991	L	0.4999	1.32	53	20.70	12.20	0 2062
	т	0.4214	1.7	143	50.70	15.50	0.2005
00992	L	0.4351	1.78	90	26.75	10.02	0 1 4 6 7
	т	0.5026	1.64	180	30.75	10.03	0.1407
00993	L	0.3093	1.02	144	27.26	16 51	0 2071
	Т	0.6168	0.76	234	27.20	10.51	0.2071
00994	L	0.5404	0.92	270	72 77	21.09	0.2459
	т	0.5812	0.92	360	25.77	21.08	0.2456
00995	L	0.4533	1.64	90	24.02	22 /1	0.2254
	Т	0.5462	1.08	360	24.05	25.41	0.5554
00996	L	0.6431	0.66	00	20.01	20 72	0 2462
	Т	0.6142	1.1	90	20.81	20.72	0.2402
00997	L	0.4710	1.32	58	21.16	0.20	0 152/
	Т	0.3669	1.86	328	51.10	9.20	0.1354
00998	L	0.4099	1.32	00	26 72	22.05	0.2600
	Т	0.5492	0.74	270	20.75	22.05	0.3099
00999	L	0.4324	0.64	90	27.26	21 70	0 4673
	Т	0.6335	0.7	360	57.50	21.75	0.4075
01000	L	0.5077	4.18	90	31 33	12 99	0 1/12
	Т	0.4163	1.26	180	51.55	12.55	0.1412
01001	L	0.4825	0.68	90	33.00	22.86	0 2727
	Т	0.5828	0.56	180	33.33	22.00	0.2727
01002	L	0.3442	2.24	00	32.27	7.06	0 1217
	Т	0.6087	1.64	90	52.27	7.00	0.1217
01003	L	0.5289	1.04	20	27.01	35 34	0 4536
	Т	0.5269	1.6	110	27.01	33.31	0.1550
01004	L	0.5802	3	360	8.44	74,13	0.8026
	Т	0.7587	1.04	270		7 1120	0.0020
01005	L	0.5305	4.1	90	31.48	17.35	0.1647
	Т	0.6183	0.88	180	51110	17.00	0.1017
01006	L	0.4130	1.64	90	22.49	22.41	0.3908
	Т	0.6421	2.32	360			0.0000
01007	L	0.6934	0.48	05	34 20	19.39	0.3492
	Т	0.5224	4.14	95	0.120		0.0102
01008	L	0.5132	2.22	90	29.74	12.40	0.1289

	Т	0.4365	2.22	180			
01009	L	0.3867	1.76	325	23.60	28.02	0.2648
	Т	0.6382	2.34	235			
01010	L	0.3965	1.6	325	22.60	26.27	0 2201
	Т	0.5503	1.6	235	23.00	20.37	0.3391
01011	L	0.5565	1.2	95	20.20	11 17	0 12/2
	Т	0.7048	0.86	185	20.30	11.17	0.1345
01012	L	0.5743	0.78	00	10.07	22.27	0 2186
	Т	0.6231	1.08	90	19.07	52.27	0.3180
01013	L	0.6457	2.1	64	5 92	53 70	0 / 528
	Т	0.7499	2.68	334	5.52	55.70	0.4328
01014	L	0.4500	2.68	90	57.68	4.12	0.0417
	Т	0.3669	3.08	360			
01015	L	0.3985	2.16	00	51.89	6.28	0.0689
	Т	0.3872	1.7	90			
01016	L	0.4850	0.5	90	18.50	11.52	0.1731
	Т	0.3744	1.48	180			
01017	L	0.4335	0.7	00	59.62	10.12	0.1480
	Т	0.3345	1.8	90	33.02		
01018	L			15	56.59	8.51	0.1147
	Т	0.5425	0.48	105			
01019	L	0.5635	1.02	00	35.81	9.64	0.0796
	Т	0.4323	1.18	90			
01020	L	0.6675	4.84	90	21.36	9.97	0.2153
	Т	0.6633	6.58	180			
01021	L	0.7029	7.94	00	31.66	5.49	0.0793
	Т	0.6276	6.34	90			
01022	L	0.4340	15.02	00	31 69	4.27	0.0476
	Т	0.1937	14.78	90	51.05		
01023	L	0.7348	6.96	00	25 36	9.02	0.1690
	Т	0.6123	4.64	90	23.30		
01024	L	0.3269	2.28	00	56 92	9.86	0 1 2 9 5
	Т	0.4616	2.48	90	20.02	2.00	
01025	L	0.3922	1.92	90	52.12	6.19	0.0737
	Т	0.4662	1.96	360			
01026	L	0.4058	1.68	92	39.91	8.22	0.1145
	Т	0.4153	2.82	182	00.01		
01027	L	0.5946	1.04	00	37.19	6.29	0.0753
	Т	0.0637	14.04	90			
01028	L	0.0314	17.3	00	37.24	6.89	0.0771
	Т	0.6430	2.16	90			
01029	L	0.6169	1.02	00	37.33	7.63	0.0887
	Т	0.5903	2.16	90	0.00		
01030	L	0.0198	19.48	00	37.57	10.04	0.0761
	Т	0.6383	2.14	90	57.57	10.04	0.0701
01031	L	0.6978	1.08	00	27.00	15 28	0 1275
-------	---	--------	------	-----	--------	-------------	-----------
	Т	0.7468	1.86	90	57.60	15.20	0.1275
01032	L	0.4095	2.28	90	20 02	11 77	0 1 1 1 6
	Т	0.5466	1.08	360	56.05	11.//	0.1410
01033	L	0.6822	0.94	90	16 58	1 93	0.0683
	Т	0.4968	2.5	180	40.58	4.55	0.0085
01034	L	0.4921	2.38	90	33.67	863	0 1046
	Т	0.4611	2.12	360	55.07	0.05	0.1040
01035	L	0.4774	2.94	00	39.29	16.88	0 1657
	Т	0.4316	3.92	90	35.25	10.00	0.1057
01038	L	0.4068	0.46	206	45.03	<u>8</u> 21	0 15/18
	Т	0.4101	3.42	296	45.05	0.21	0.1348
01039	L	0.4965	1.3	90	24.76	22.21	0 2201
	Т	0.3778	2.2	180	24.70	22.51	0.2251
01041	L	0.3055	1.1	00	35.88	6.41	0 1678
	Т	0.2782	0.92	90	55.00	0.41	0.1078
01042	L	0.4966	2.46	180	12 51	22 93	0 2792
	Т	0.6254	2.38	270	12.51	23.55	0.2752
01043	L	0.5651	5.96	90	51.85	12.72	0.0647
	Т	0.5753	5.28	180	51.85		
01044	L	0.5247	1.32	90	5.02	Q1 Q2	0 6080
	Т	0.5555	1.3	360	5.52	01.05	0.0980
01045	L	0.9241	2.4	46	5 / 8	79.07	0 3848
	Т	0.7392	2.48	316	5.40	79.07	0.3646
01048	L	0.4776	1.42	90	12.09	48.04	0 / 11/
	Т	0.5680	2.1	180	12.05	40.04	0.4114
01049	L	0.3274	2.86	190	2/1 08	22.65	0 3316
	Т	0.5044	1.66	280	24.00	22.05	0.5510
01050	L	0.5490	3.32	175	7.01	36.76	0 /085
	Т	0.4407	3.44	265	7.01	50.70	0.4005
01051	L	0.5731	0.58	104	7 01	75 50	1 4279
	Т	0.7704	0.94	194	7.01	/ 3.30	1.1275
01052	L	0.5767	3.66	90	7 26	45 38	0 3482
	Т	0.3674	2.02	360	7.20	43.30	0.5402
01053	L	0.5433	1.1	00	41 67	8 68	0.0676
	Т	0.6602	1.2	270	41.07	0.00	0.0070
01054	L	0.8453	1.28	#	7 46	58 26	0 5054
	Т	0.8102	1.68	#	7.40	30.20	0.5054
01055	L	0.5067	0.44	180	36 12	12 98	0 2337
	Т	0.3693	0.44	270	00.12	12.50	0.2007
01057	L	0.4065	0.88	00	31 74	14 12	0.1040
	Т	0.4595	2.3	270	51.74	17.12	0.1040
01058	L	0.5227	0.52	00	41 93	14 52	0 1753
	Т	0.6143	0.58	90	-1.JJ	17.32	0.1755

01059	L	0.4168	1.9	90	51 70	8 16	0 0965
	Т	0.3561	5.6	180	51.79	0.10	0.0903
01061	L	0.0501	9.24	00	52.18	1 55	0.0640
	Т	0.4086	1.14	90	52.10	4.55	0.0040
01062	L	0.4823	0.78	05	54 45	9 81	0 1414
	Т	0.4107	0.44	95	54.45	5.01	0.1414
01063	L	0.7945	1.44	228	6.50	109.24	0.6336
	Т	0.7674	2.46	318	0.50	105.21	0.0350
01065	L	0.4989	0.58	90	49.32	7.30	0.1077
	Т	0.3871	0.68	360	13132	7.00	0.1077
01070	L	0.3768	3.84	180	39.31	10.23	0.2087
	Т	0.4445	4.12	270			
01072	L	0.0211	10.74	90	35.02	7.52	0.1340
	Т	0.3988	0.72	360			
01073	L	0.0207	10.46	00	57.03	5.94	0.0974
	Т	0.0215	12.06	90		0.0.1	
01074	L	0.4498	4.96	90	41.56	10.21	0.0941
	Т	0.5421	7.28	180			0.000.1
01076	L	0.2992	0.74	30	50.22	7.76	0.1350
	Т	0.3649	1.74	120			
01077	L	0.6978	2.32	90	26.45	31.22	0.5908
	Т	0.5936	2.54	360			
01078	L	0.2960	9.58	90	16.74	16.06	0.2530
	Т	0.5002	2.08	00			
01080	L	0.6285	0.7	00	13.42	39.18	0.7453
	Т	0.4752	0.98	90			
01081	L	0.5809	0.78	00	19.07	30.64	0.3391
	Т	0.6344	1.08	90			
01082	L	0.4161	3.36	00	10.05	31.38	0.3595
	Т	0.4560	2.42	90			
01083	L	0.4345	3.82	170	13.35	14.55	0.1437
	Т	0.4367	1.04	260			
01084	L	0.7231	2.96	52	5.35	109.38	0.7123
	Т	0.6673	1.66	142			
01085	L	0.7053	3.08	18	5.19	95.07	0.6469
	Т	0.7037	2.48	288			
01086	L	0.7397	2.44	90	5.30	95.38	0.7007
	<u> </u>	0.8055	2.6	360			
01087	L _	0.2933	7.8	90	15.60	96.00	1.6615
04000	<u> </u>	0.4297	7.94	360			
01088	L -	0.3992	0.48	240	57.20	13.90	0.1583
04000	<u> </u>	0.4464	0.74	330			
01089	L	0.42/3	2.6	360	22.28	13.76	0.2591
	Т	0.3772	4.88	270			

01091 L	0.5387	2.24	00	22.64	1/1 27	0 1 / / 0	
Т	0.5362	1.02	90	25.04	14.27	0.1449	
01092 L	0.4387	1.42	90	F8 00	10.89	0.0698	
Т	0.0337	18.62	360	38.00			
01094 L	0.4489	2	225	E1 71	E 76	0.0626	
т	0.5529	5	315	51.71	5.70	0.0030	
01095 L	0.6552	1.06	00	10 10	1 01	0.0725	
Т	0.4890	1.76	90	49.10	4.91	0.0755	

Σημειώνεται ότι για τις καταγραφές που προκύπτουν μη παλμικές, η περίοδος που αναγράφεται στον πίνακα αντιστοιχεί σε εκείνο το χαρακτηριστικό της κίνησης που ανιχνεύθηκε από τη διαδικασία ως πιθανός παλμός. Αφού όμως η συσχέτισή του με την αρχική κίνηση είναι μικρή (r < 0,65), δε θεωρείται παλμός και η περίοδος δεν αντιστοιχεί σε κάποιο δεσπόζων χαρακτηριστικό της εδαφικής κίνησης.

6.7 Καταγραφές με ClstD > 60km

Στον πίνακα 6 παρουσιάζεται η αντίστοιχη διαδικασία ταξινόμησης για τις καταγραφές που έχουν ληφθεί από σταθμούς εκτός της ζώνης των 60 km από το ρήγμα. Οι καταγραφές αυτές προκύπτουν στο σύνολό τους μη παλμικές, αφενός λόγω του ότι ο συντελεστής συσχέτισης προκύπτει μικρότερος από το κατώτερο όριο που έχει τεθεί και αφετέρου αφού η μέγιστη εδαφική ταχύτητα είναι σημαντικά μικρότερη από το αντίστοιχο κατώτατο όριο που έχει τεθεί. Δηλαδή στις καταγραφές αυτές η χρονοϊστορία ταχύτητας δεν παρουσιάζει παλμικές μορφές και παίρνει τυπικά μικρές απόλυτες τιμές. Η χρωματική κλίμακα διατηρείται όπως και στον παραπάνω πίνακα.

Καταγραφή NGA No.	Συντελεστής Συσχέτισης	Περίοδος παλμού <i>(sec)</i>	Γωνία (deg)	ClstD (km)	PGV (cm/sec)	PGA (g)
00943 L	0.026	13.9	00	68.02	2 5 2	0.0511
т	0.047	9.96	270	00.95	2.35	0.0511
00944 L	0.423	1.54	00	69 63	E 00	0.0659
т	0.435	2.28	90	06.02	5.99	0.0658
00955 L	0.501	0.5	20	6E 42	5.43 8.11	0 1102
т	0.507	0.82	290	05.45		0.1105
00956 L	0.411	1.72	90	61.06	7.74	0 1 2 2 7
т	0.402	1.66	180	01.90		0.1227
00972 L	0.013	14.82	00	07 27	6 50	0.1014
т	0.015	13.16	90	02.52	0.56	
00973 L	0.440	2.58	00	66.64	0.06	0 1070
т	0.585	2.1	270	00.04	9.00	0.1070
00977 L	0.599	0.66	00	144 71	4.20	0.0527
Т	0.628	0.68	90	144./1	4.33	0.0537
00979 L	0.514	3.5	200	69.50	6.07	0.0775

Πίνακας 6: Αποτελέσματα ταξινόμησης των καταγραφών για τους σταθμούς που βρίσκονται σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 60 km από το ρήγμα.

	Т	0.502	2.86	290			
00980	L	0.264	3.58	00	77 / 6	с со	0.0767
	Т	0.392	2.74	90	77.45	5.56	0.0767
01036	L	0.020	15.98	00	0E 40	2 62	0.0451
	Т	0.395	1.04	90	85.43	3.03	0.0451
01037	L	0.516	1.76	00	75 90	2 01	0.0522
	Т	0.281	3.56	90	75.80	5.01	0.0322
01040	L	0.392	0.92	90	71 /7	4.07	0 0758
	Т	0.370	0.46	180	/1.4/	4.07	0.0738
01046	L	0.426	2.38	00	85 /0	1 25	0.0472
	Т	0.463	2.48	90	85.45	4.55	0.0472
01047	L	0.440	2.36	90	8/1 5/1	6 5 8	0 0027
	Т	0.299	3.72	180	04.54	0.56	0.0527
01056	L	0.452	2.32	90	85 90	163	0.0568
	Т	0.394	3.18	180	85.50	4.05	0.0508
01060	L	0.286	1.82	90	70 00	ллл	0.0645
	Т	0.577	1.16	180	75.55	4.44	0.0045
01064	L	0.365	0.26	180	98.96	2.86	0.0575
	Т	0.494	1.74	270	50.50	2.00	0.0373
01066	L	0.034	11.48	00	64 80	4.00	0.0555
	Т	0.034	12.18	90	04.00	4.00	0.0555
01067	L	0.426	0.62	00	103.16	3,33	0.0529
	Т	0.480	1.12	90	105.10	5.55	0.0325
01068	L	0.324	1.82	360	107 70	4 74	0 0389
	Т	0.403	1.44	270	10/11/0		0.0000
01069	L	0.419	1.3	90	108.29	6.08	0.0918
	Т	0.433	1.26	180	100.25	0.00	0.0510
01071	L	0.497	1.62	00	147.55	7.77	0.0837
	Т	0.399	2.1	90	117.00		0.0007
01075	L	0.349	0.84	00	109.13	6.95	0.0738
	Т	0.271	4.64	90			
01079	L	0.456	2.62	00	64.76	6.10	0.0755
	Т	0.413	2.78	90			
01090	L	0.464	2.28	135	83.72	3.42	0.0668
	Т	0.350	1.4	225		_	
01093	L	0.451	3.98	00	77.56	3.52	0.0433
	Т	0.420	3.82	270			
01096	L	0.386	1	90	64.66	4.15	0.0486
	Т	0.410	1	180		_	
01097	L	0.333	1.34	90	81.69	3.15	0.0438
	Т	0.545	1.34	180		_	
01098	L	0.492	0.68	90	71.69	3.01	0.0556
	Т	0.302	1.02	180			

6.8 Διευθύνσεις εμφάνισης των παλμών

Στον πίνακα 7 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι καταγραφές που χαρακτηρίζονται ως παλμικές, πληρούν δηλαδή τα κριτήρια που τέθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου αυτού.

Καταγραά NGA No.	þή	Συντελεστής Συσχέτισης	Περίοδος παλμού <i>(sec)</i>	Γωνία (deg)	ClstD (km)	PGV (cm/sec)	PGA (g)
00953	L	0.7149	1.24	09	17 15	E1 22	0.4504
	Т	0.6570	1.62	279	17.15	54.22	0.4394
00960	L	0.6960	2.1	00	12.44	43.33	0.4355
00982	L	0.8292	3.02	22	5 / 2	72.00	0 7626
	Т	0.7378	1.98	292	5.45	75.99	0.7050
00983	L	0.8415	2.88	22	5.43	72.33	0.7649
01004	Т	0.7587	1.04	270	8.44	74.13	0.8026
01013	Т	0.7499	2.68	334	5.92	53.70	0.4528
01045	L	0.9241	2.4	46	E 10	79.07	0.3848
	Т	0.7392	2.48	316	5.40		
01051	Т	0.7704	0.94	194	7.01	75.50	1.4279
01054	L	0.8453	1.28	#	7 16	50.76	0 5054
	Т	0.8102	1.68	#	7.40	56.20	0.5054
01063	Г	0.7945	1.44	228	6 50	100.24	0.0220
	Т	0.7674	2.46	318	0.50	109.24	0.0550
01077	L	0.6978	2.32	90	26.45	31.22	0.5908
01084	Г	0.7231	2.96	52	E 2E	100.29	0 71 22
	Т	0.6673	1.66	142	5.55	109.30	0.7125
01085	L	0.7053	3.08	18	E 10	05.07	0.6460
	Т	0.7037	2.48	288	5.19	95.07	0.0409
01086	L	0.7397	2.44	90	E 20	05.20	0 7007
	Т	0.8055	2.6	360	5.50	95.50	0.7007

Πίνακας 7: Παλμικές καταγραφές.

Παρατηρείται ότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων, οι παλμικές καταγραφές προκύπτουν σε γωνίες κοντά στη διεύθυνση της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (faultnormal component), γεγονός που αν και δεν αποτελεί κανόνα, έχει παρατηρηθεί από πολλούς ερευνητές (Somerville et al. 1997, Baker 2007, Shahi and Baker 2011).

Στις περιπτώσεις που σε ένα καταγραφικό σταθμό προκύπτουν παλμικές και οι δύο οριζόντιες συνιστώσες της εδαφικής δράσης, η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται με σύγκριση των συντελεστών συσχέτισης. Δηλαδή, εφόσον έχει γίνει η παραδοχή ότι το κυματίδιο των *Mavroeidis and Papageorgiou* (2003) περιγράφει ικανοποιητικά τη μορφή ενός παλμού κατευθυντικότητας, η μεγαλύτερη συσχέτιση της αρχικής εδαφικής κίνησης με αυτό, δηλώνει πιο σημαντικό παλμικό περιεχόμενο σε μια καταγραφή, εφόσον φυσικά πληρούνται και τα υπόλοιπα κριτήρια κατάταξης. Υπενθυμίζεται ότι η παράλληλη στο ρήγμα διεύθυνση (fault-parallel direction) καθορίζεται από το αζιμούθιο της διεύθυνσης της ευθείας που σχηματίζεται ως η τομή του επιπέδου του ρήγματος με το οριζόντιο επίπεδο, η οποία δίνεται στη βάση δεδομένων του προγράμματος NGA ως "Strike" και για το συγκεκριμένο ρήγμα είναι ίση με Strike = 122°. Συνεπώς, η κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα βρίσκεται σε διεύθυνση κάθετη σε αυτή, σχηματίζει δηλαδή γωνία 122° - 90° = 32° με το βορρά. Στο σχήμα 6.4 παρουσιάζεται η παράλληλη και η κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα για το ρήγμα της περιοχής που εξετάζεται (Northridge Blind Thrust).



Σχήμα 6.4: Αζιμούθια παράλληλης και κάθετης στο ρήγμα διεύθυνσης.

Αξίζει ακόμα να γίνει ένα σχόλιο όσον αφορά τους καταγραφικούς σταθμούς στους οποίους εκδηλώνεται παλμός και στις δύο οριζόντιες καταγραφές. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 3, οι παλμοί κατευθυντικότητας εμφανίζονται σε ένα εύρος διευθύνσεων περί την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα, ανάλογα με τη γεωμετρία του ρήγματος και τη μορφολογία της εκάστοτε περιοχής. Σε αυτή την παρατήρηση οφείλεται και η επιλογή στην εργασία αυτή να γίνει η επεξεργασία των καταγραφών στην αρχική τους μορφή, χωρίς δηλαδή να στραφούν στη διεύθυνση της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας, όπως έχει πραγματοποιηθεί από πολλούς ερευνητές.

Οι παλμικές καταγραφές παρουσιάζονται στο σχήμα 6.5 πάνω στο χάρτη της περιοχής και επιβεβαιώνεται η αναμενόμενη εμφάνιση του παλμού στην περιοχή που επηρεάζεται από την έμπροσθεν κατευθυντικότητα. Ακολουθούν χάρτες της περιοχής, πάνω στους οποίους έχουν προστεθεί τα φάσματα ψευδο-ταχύτητας και τα φάσματα ψευδο-επιτάχυνσης για απόσβεση 5%.



Σχήμα 6.5: Παλμικές καταγραφές πάνω στο χάρτη της περιοχής του Northridge.



Σχήμα 6.6: Ελαστικά φάσματα ψευδο-ταχύτητας για 10 παλμικές και 5 μη παλμικές καταγραφές.



Σχήμα 6.7: Ελαστικά φάσματα ψευδο-επιτάχυνσης για 10 παλμικές και 5 μη παλμικές καταγραφές.

6.8 Επιβεβαίωση του παλμικού περιεχομένου με βάση την τιμή του λόγου *S_{d,0}(T_p)/CAD*

Για τις καταγράφες που προκύπτουν παλμικές εφαρμόζεται η διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5, σύμφωνα με την οποία μια εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται ως παλμική, εάν ικανοποιείται η συνθήκη $S_{d,0}(T_p)/CAD > 0,65$, όπου $S_{d,0}(T_p)$ η τιμή του φάσματος μετακίνησης για μηδενική απόσβεση που αντιστοιχεί στη δεσπόζουσα περίοδο του παλμού και CAD η Αθροιστική Απόλυτη Μετακίνηση (*Taflampas et al. 2009*) για εκείνο το τμήμα της καταγραφής όπου η εδαφική ταχύτητα υπερβαίνει για πρώτη και τελευταία φορά την τιμή $0,4 \cdot PGV$. Η περίοδος του παλμού T_p υπολογίζεται ως η μέγιστη αιχμή του φάσματος συνέλιξης $S_d \times S_v$ για απόσβεση 5%, όπως έχει αναφερθεί στα κεφάλαια 4 και 5. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής αυτής παρουσιάζονται στον πίνακα 8.

NGA No.	Sd,0 (cm)	CAD _{0.4·PGV} (cm)	$S_{d,0}(T_p)/CAD$	t _{min} (sec)	t _{max} (sec)	Συνολικό CAD (cm)
953L	45.979	78.848	0.583	3.59	12.14	182.9667
953T	66.005	81.732	0.808	4.32	10.39	200.2132
960L	53.934	69.898	0.772	3.66	9.13	110.4397
982L	176.922	185.224	0.955	2.88	8.02	305.9854
982T	112.948	159.291	0.709	3.4	7.56	296.3286
983L	137.357	153.980	0.892	2.84	8.06	246.5382
1004T	36.675	56.903	0.645	1.92	9.4	177.6128
1013T	88.723	104.701	0.847	2.26	9.805	153.9654
1045L	118.129	135.339	0.873	3.71	6.92	241.2732
1045T	82.986	86.782	0.956	3.59	11.92	189.8384
1051T	40.561	64.426	0.630	3.58	7.36	157.5549
1054L	86.876	104.898	0.828	5.015	8.805	178.3798
1054T	78.224	129.946	0.602	5.22	11.22	184.6934
1063L	97.002	77.083	1.258	1.965	3.215	233.3764
1063T	99.267	133.841	0.742	2.095	7.14	182.4055
1077L	83.360	62.616	1.331	8.6	14.36	165.6547
1084L	236.552	207.195	1.142	3.16	8.865	512.7051
1084T	134.175	175.483	0.765	2.95	8.39	347.9223
1085L	129.529	87.856	1.474	3.005	6.92	271.38
1085T	70.396	95.442	0.738	3.395	6.9	218.8162
1086L	96.748	80.275	1.205	3.24	6.78	193.8296
1086T	117.288	95.206	1.232	3.4	5.32	240.8962

Πίνακας 8: Επιβεβαίωση του παλμικού περιεχομένου με βάση την τιμή του λόγου $S_{d,0}(T_p)/CAD$.

Στην πλειονότητα των καταγραφών επιβεβαιώνεται η ύπαρξη παλμού ταχύτητας. Για τις τέσσερις καταγραφές όπου ο λόγος S_{d,0}(T_p)/CAD βρίσκεται μεταξύ των τιμών 0,55 και 0,65, ταξινομούνται δηλαδή ως "ασαφείς" με βάση τη συγκεκριμένη διαδικασία ταξινόμησης, το παλμικό περιεχόμενο επιβεβαιώνεται οπτικά από τα ελαστικά φάσματα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5% και τις χρονοϊστορίες ταχύτητας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα εξέλιξης του CAD στη χρονοϊστορία κάθε καταγραφής. Τα

μαρκαρισμένα τμήματα αναφέρονται στις χρονικές στιγμές t_{min} και t_{max} , όπως ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 5.







Τα διαγράμματα εξέλιξης του CAD στις χρονοϊστορίες των εδαφικών κινήσεων παρέχουν εποπτεία του παλμικού περιεχομένου κάθε καταγραφής, αφού το τμήμα στο οποίο η κλίση αυξάνει σημαντικά σε σχέση με το υπόλοιπο διάγραμμα υποδηλώνει το χρονικό διάστημα της εκάστοτε σεισμικής κίνησης στο οποίο εκδηλώνεται ο δεσπόζων παλμός ταχύτητας.

<u>Κεφάλαιο 7</u> ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται δύο τυπικές πλαισιακές κατασκευές από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα, οι οποίες διαστασιολογούνται με βάση τα κείμενα των Ευρωκωδίκων (EN 1992-1-1:2004 & EN 1998-1:2004). Στις κατασκευές δίνεται η ίδια κάτοψη και τα ίδια χαρακτηριστικά που αφορούν τον αντισεισμικό σχεδιασμό τους, όπως το έδαφος, η σπουδαιότητα και το στατικό σύστημα, αφήνοντας ως ανοιχτή παράμετρο του προβλήματος τον αριθμό των ορόφων και κατ' επέκταση τις διαστάσεις των υποστυλωμάτων, όπως φυσικά και την όπλιση όλων των δομικών μελών.

Επιλέγονται μια Τριώροφη και μια Εννιαώροφη κατασκευή, ώστε να μελετηθεί η επιρροή των παλμών κατευθυντικότητας σε ένα δύσκαμπτο και σε ένα πιο εύκαμπτο σύστημα. Για τις κατασκευές αυτές παρουσιάζονται τα δυναμικά τους χαρακτηριστικά (μάζες ορόφων, ιδιοπερίοδοι και ιδιομορφές), όπως υπολογίζονται από το λογισμικό διαστασιολόγησης *FESPA 10* της *LH Λογισμική*, όπως και τομές των υποστυλωμάτων στις οποίες φαίνονται οι τοποθετούμενοι διαμήκεις και εγκάρσιοι οπλισμοί. Στο Παράρτημα Γ της εργασίας αυτής παρατίθενται οι κατά μήκος τομές των όλων των δοκών και των δύο κατασκευών, στις οποίες φαίνεται η όπλισή τους όπως προκύπτει από το λογισμικό διαστασιολόγησης.

7.2 Παραδοχές Σχεδιασμού

Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας

Σε κάθε σεισμική ζώνη ορίζεται μία τιμή αναφοράς a_{gR} της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης σε έδαφος κατηγορίας Α, η οποία αντιστοιχεί στην τιμή αναφοράς της περιόδου επαναφοράς T_{NCR} = 475 έτη. Για έδαφος διαφορετικής κατηγορίας, η τιμή αυτή πολλαπλασιάζεται με το Συντελεστή Εδάφους S. Για τις εν λόγω κατασκευές επιλέχθηκε Ζώνη σεισμικής Επικινδυνότητας **Z2** για την οποία σύμφωνα με το Ελληνικό Εθνικό Προσάρτημα, ορίζεται μέγιστη εδαφική επιτάχυνση *a*_{gR} = **0,24** g:

Ζώνη	a _{gR} /g
Z1	0,16
Z2	0,24
Z3	0,36

Κατηγορία Εδάφους

Για το σύνολο των κατασκευών επιλέγεται **Κατηγορία Εδάφους Β**, όπως ορίζεται με βάση τη μέση ταχύτητα διατμητικών κυμάτων ν_{s,30} στον Ευρωκώδικα 8 - Μέρος 1.

Κατηγορία Εδάφους	Περιγραφή στρωματογραφίας		Παράμετροι		
		v _{s,30} (m/s)	Ν_{SPT} (κρούσεις/30cm)	c _u (kPa)	
A	Βράχος ή άλλος βραχώδης γεωλογικός σχηματισμός, που περιλαμβάνει το πολύ 5 m ασθενέστερου επιφανειακού υλικού.	> 800	_	-	
В	Αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλίκων, ή πολύ σκληρής αργίλου, πάχους τουλάχιστον αρκετών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος.	360 – 800	> 50	> 250	
С	Βαθιές αποθέσεις πυκνής ή μετρίως πυκνής άμμου, χαλίκων ή σκληρής αργίλου πάχους από δεκάδες έως πολλές εκατοντάδες μέτρων.	180 - 360	15 - 50	70 - 250	
D	Αποθέσεις χαλαρών έως μετρίως χαλαρών μη συνεκτικών υλικών (με ή χωρίς κάποια μαλακά στρώματα συνεκτικών υλικών), ή κυρίως μαλακά έως μετρίως σκληρά συνεκτικά υλικά.	< 180	< 15	< 70	
E	Εδαφική τομή που αποτελείται από ένα επιφανειακό στρώμα ιλύος με τιμές ν _s κατηγορίας C ή D και πάχος που ποικίλλει μεταξύ περίπου 5m και 20m, με υπόστρωμα από πιο σκληρό υλικό με ν _s > 800 m/s.				
S ₁	Αποθέσεις που αποτελούνται, ή που περιέχουν ένα στρώμα πάχους τουλάχιστον 10 m μαλακών αργίλων/ιλών με υψηλό δείκτη πλαστικότητας (PI > 40) και υψηλή περιεκτικότητα σε νερό.	< 100 (ενδεικτικό)	_	10 - 20	
S ₂	Στρώματα ρευστοποιήσιμων εδαφών, ευαίσθητων αργίλων, ή οποιαδήποτε άλλη εδαφική τομή που δεν περιλαμβάνεται στους τύπους Α – Ε ή S1				

Κατηγορία Εδάφους	S	Τ _B (s)	T _c (s)	$T_{\rm D}(s)$
А	1,0	0,15	0,4	2,5
В	1,2	0,15	0,5	2,5
С	1,15	0,20	0,6	2,5
D	1,35	0,20	0,8	2,5
E	1,4	0,15	0,5	2,5

Ο συντελεστής εδάφους και οι χαρακτηριστικές περίοδοι για Κατηγορία Εδάφους Β όπως δίνονται στο Ελληνικό Εθνικό Προσάρτημα του ΕC8:

Συντελεστής Σπουδαιότητας

Τα κτίρια ταξινομούνται σε 4 κατηγορίες σπουδαιότητας, ανάλογα με τις συνέπειες της κατάρρευσης σε ανθρώπινές ζωές, την σημασία τους για τη δημόσια ασφάλεια και την προστασία των πολιτών κατά την άμεση μετασεισμική περίοδο και τις κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες της κατάρρευσης. Τα εν λόγω κτίρια θεωρούνται Συνήθους Σπουδαιότητας ως προς τη χρήση τους (κατοικίες ή χώροι γραφείων), ή κατά τον κανονισμό, Κατηγορίας Σπουδαιότητας ΙΙ.

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

Ο Συντελεστής Σπουδαιότητας **γ**_I = **1,00** όπως ορίζεται από τον κανονισμό και το Ελληνικό Εθνικό Προσάρτημα για κατασκευές με κατηγορία σπουδαιότητας ΙΙ:

Κατηγορία Σπουδαιότητας	I	II	III	IV
Συντελεστής Σπουδαιότητας γ _ι	0,80	1,00	1,20	1,40

Συνεπώς η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση για έδαφος Α είναι: $\alpha_g = \alpha_{gR} \cdot \gamma_i = 0.25 \cdot 1.00$ ή $\alpha_g = 0.25 g$.

Κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής δράσης

Η κατακόρυφη επιτάχυνση σχεδιασμού για φάσμα τύπου 1 υπολογίζεται ως $\alpha_{vg} = \alpha_g \cdot 0,90$ => $\alpha_{vg} = 0,9 \cdot 0,25g$ ή $\alpha_{vg} = 0,225g$ και είναι μικρότερη από 0,25g, συνεπώς όπως αναφέρεται στην §4.3.3.5.2(1) του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 1, η κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής δράσης παραλείπεται για το σχεδιασμό των κατασκευών. Γενικά, ακόμα και εάν η κατακόρυφη επιτάχυνση σχεδιασμού *a_{vg}* υπερβαίνει την τιμή 0,25g, η κατακόρυφη σεισμική συνιστώσα λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό εάν πληρούνται συγκεκριμένα κριτήρια που αφορούν τη γεωμετρία και τον τύπο της κατασκευής, όπως π.χ. είναι οι φορείς με οριζόντια μέλη μεγάλου ανοίγματος, προεντεταμένα μέλη, φυτευτά υποστυλώματα ή φορείς με σεισμική μόνωση.

Φάσμα Σχεδιασμού για ελαστική ανάλυση

Η ικανότητα των φορέων να παρουσιάζουν αντοχή σε σεισμικές δράσεις στην μη-γραμμική περιοχή, επιτρέπει γενικά τον σχεδιασμό τους για ανάληψη σεισμικών δυνάμεων μικρότερων από εκείνες που αντιστοιχούν σε γραμμική ελαστική απόκριση

Για να αποφευχθεί η εκτέλεση πλήρως ανελαστικής ανάλυσης στην μελέτη, η ικανότητα του φορέα για απόδοση ενέργειας, κυρίως μέσω της πλάστιμης συμπεριφοράς των στοιχείων του ή/και άλλων μηχανισμών, λαμβάνεται υπόψη με εκτέλεση ελαστικής ανάλυσης βασισμένης σε φάσμα απόκρισης μειωμένο σε σχέση με το ελαστικό, που ονομάζεται "φάσμα σχεδιασμού". Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται με την εισαγωγή του συντελεστή συμπεριφοράς *q*.

Για τις οριζόντιες συνιστώσες της σεισμικής δράσης το φάσμα σχεδιασμού, *S*_d(*T*), ορίζεται από τις ακόλουθες εκφράσεις:

$$0 \leq T \leq T_{\rm B} : S_{\rm d}(T) = a_{\rm g} \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_{\rm B}} \cdot \left(\frac{2.5}{q} - \frac{2}{3}\right)\right] \quad (7.1)$$

$$T_{\rm B} \leq T \leq T_{\rm C} : S_{\rm d}(T) = a_{\rm g} \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \quad (7.2)$$

$$T_{\rm C} \leq T \leq T_{\rm D} : S_{\rm d}(T) \begin{cases} = a_{\rm g} \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \left[\frac{T_{\rm C}}{T}\right] \\ \ge \beta \cdot a_{\rm g} \end{cases} \quad (7.3)$$

$$T_{\rm D} \leq T : S_{\rm d}(T) \begin{cases} = a_{\rm g} \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \left[\frac{T_{\rm C}}{T}\right] \\ \ge \beta \cdot a_{\rm g} \end{cases} \quad (7.4)$$

όπου

- Τ η περίοδος ταλάντωσης ενός γραμμικού συστήματος μίας ελευθερίας κίνησης
- $a_{\rm g}$ η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού σε έδαφος κατηγορίας A ($a_q = \gamma_i . a_{\rm gR}$);
- *T*_B η περίοδος κάτω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης
- T_c η περίοδος άνω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης
- $T_{\rm D}$ η τιμή της περιόδου στην αρχή της περιοχής σταθερής μετακίνησης του φάσματος
- S είναι ο συντελεστής εδάφους
- S_d (T) το φάσμα σχεδιασμού
- *q* ο συντελεστής συμπεριφοράς
- *θ ο* συντελεστής κατώτατου ορίου για το οριζόντιο φάσμα σχεδιασμού.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Η τιμή που αποδίδεται στο συντελεστή β για χρήση σε μια χώρα μπορεί να βρεθεί στο Εθνικό Προσάρτημα. Η συνιστώμενη τιμή για τον β είναι 0,2. Η τιμή αυτή υιοθετείται και από το Ελληνικό Προσάρτημα.



Σχήμα 7.1: Ελαστικό φάσμα ΕC8 για ξ=5% και Φάσματα σχεδιασμού για q=5,85 και q = 5,40.

Λόγος Ιξώδους Απόσβεσης

Ο λόγος ιξώδους απόσβεσης για κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ξ=5%. Σημειώνεται ότι ο λόγος ξ υπεισέρχεται κατά το σχεδιασμό, μέσω του συντελεστή η, στον υπολογισμό του ελαστικού φάσματος, δηλαδή στην περίπτωση πλήρως ελαστικού σχεδιασμού, όχι όμως στο φάσμα σχεδιασμού, όπου η επιρροή της απόσβεσης της κατασκευής συμπεριλαμβάνεται στην τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς.

Μέθοδος ανάλυσης

Η μέθοδος αναφοράς που χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό των κατασκευών για τον υπολογισμό της σεισμικής απόκρισης είναι η *ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης*, η οποία χρησιμοποιεί γραμμικό-ελαστικό προσομοίωμα του φορέα και το φάσμα σχεδιασμού όπως ορίστηκε στην αντίστοιχη παράγραφο. Για κάθε ιδιομορφή των κατασκευών υπολογίζεται η τιμή της αντίστοιχης επιτάχυνσης από το φάσμα σχεδιασμού και η τελική απόκριση κάθε κατασκευής προκύπτει από την επαλληλία των ιδιομορφών που έχουν αθροιστικό ποσοστό δρώσας ιδιομορφικής μάζας μεγαλύτερο από το 90% της συνολικής ταλαντούμενης μάζας σε κάθε διεύθυνση. Τα εντατικά μεγέθη κάθε μέλους προκύπτουν από την περιβάλλουσα των σεισμικών συνδυασμών {*A_x* + 0,3 · *A_y*} και {*A_y* + 0,3 · *A_y*}, όπου *A_x*, *A_y* τα σεισμικά φορτία που προκύπτουν από το φάσμα σχεδιασμού στις κύριες διευθύνσεις *X* και Υτων κατασκευών, αντίστοιχα.

Κατηγορία Πλαστιμότητας

Τα κτίρια από σκυρόδεμα κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες πλαστιμότητας: *ΚΠΜ* (μέση πλαστιμότητα) και *ΚΠΥ* (υψηλή πλαστιμότητα), ανάλογα με την ικανότητα υστερητικής απόδοσης ενέργειας που διαθέτουν. Και οι δύο κατηγορίες αντιστοιχούν σε κτίρια που σχεδιάζονται, διαστασιολογούνται και οι λεπτομέρειές τους διαμορφώνονται σύμφωνα με ειδικές αντισεισμικές διατάξεις που δίνουν την δυνατότητα στον φορέα να αναπτύξει ευσταθείς πλαστικούς μηχανισμούς που συνοδεύονται από μεγάλη απόδοση υστερητικής ενέργειας υπό φόρτιση με επαναλαμβανόμενες αναστροφές χωρίς να υποστεί ψαθυρές αστοχίες. Σημειώνεται ότι αν ο κανονισμός προβλέπει Κατηγορία Πλαστιμότητας Χαμηλή

(*ΚΠΧ*), δηλαδή τη διαστασιολόγηση κατασκευών χωρίς προδιαγραφές πλαστιμότητας, αυτή απαγορεύεται για υπέργειες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα στον Ελλαδικό χώρο.

Για το σύνολο των κτιρίων που σχεδιάζονται στην εργασία αυτή επιλέγεται **Κατηγορία** Πλαστιμότητας Υψηλή (ΚΠΥ), αφού είναι επιθυμητό τα μέλη που συμμετέχουν στην ανάληψη των σεισμικών δράσεων (δοκοί και υποστυλώματα) να έχουν αυτές τις λεπτομέρειες όπλισης που θα τους δώσουν την ικανότητα να συμπεριφερθούν πλάστιμα όταν βρεθούν στην πλαστική περιοχή, δηλαδή να σχηματίσουν πλαστικές αρθρώσεις σε εκείνες τις θέσεις και με εκείνες τις δυνατότητες ροπής-στροφής, που θα τους δώσουν τη δυνατότητα ο σχηματισμός του πλαστικού μηχανισμού κατάρρευσης να σχηματιστεί σε στάθμες φορτίων/μετακινήσεων αρκετά μεγαλύτερες από αυτές που προκαλούν την πρώτη διαρροή της κατασκευής.

Στατικό Σύστημα

Οι κατασκευές που μελετώνται στην παρούσα εργασία είναι αποκλειστικά Πλαισιωτά Συστήματα και στις δύο διευθύνσεις. Επισημαίνεται ότι πλαισιωτό σύστημα σύμφωνα την §5.1.2(1) του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 1 είναι το στατικό σύστημα όπου τόσο τα κατακόρυφα όσο και τα οριζόντια φορτία αναλαμβάνονται κυρίως από χωρικά πλαίσια των οποίων η διατμητική αντοχή στην βάση του κτιρίου υπερβαίνει το 65% της συνολικής διατμητικής αντοχής του όλου στατικού συστήματος.

Σημειώνεται ότι ενώ το Στατικό Σύστημα και ο Συντελεστής Συμπεριφοράς μπορεί να είναι διαφορετικά σε κάθε μια από τις κύριες διευθύνσεις των κατασκευών, η Κατηγορία Πλαστιμότητας είναι ενιαία για κάθε κατασκευή.

Κανονικότητα

Για την αντισεισμική μελέτη, οι φορείς κτιρίων ταξινομούνται σε κανονικούς ή μηκανονικούς. Αυτή η διάκριση έχει επιπτώσεις στη σεισμική μελέτη των κατασκευών ως προς τα προσομοιώματα ανάλυσης (χωρικά ή επίπεδα), τις μεθόδους μελέτης (απλουστευμένη ανάλυση οριζόντιας φόρτισης ή ιδιομορφική) και την ανώτατη τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς. Οι κατασκευές κατηγοριοποιούνται σε κανονικές και μη κανονικές ως προς την κανονικότητά τους σε κάτοψη και την κανονικότητά τους καθ' ύψος

-Κανονικότητα σε κάτοψη

Οι κατασκευές που αναλύονται στην εργασία αυτή είναι στο σύνολό τους Κανονικές σε Κάτοψη, αφού:

- Όσον αφορά την αντοχή σε οριζόντια φορτία και την κατανομή της μάζας, τα κτίρια είναι πλήρως συμμετρικά σε κάτοψη, σε σχέση με δύο ορθογώνιους άξονες.
- Η διαμόρφωση των κατόψεων είναι συμπαγής, δηλαδή οι πλάκες όλων των ορόφων οριοθετούνται από κυρτή πολυγωνική γραμμή και δεν υπάρχουν ανωμαλίες στην περίμετρο (εισέχουσες γωνίες ή εσοχές στην περίμετρο).

- Η δυσκαμψία των πλακών όλων των ορόφων μέσα στο επίπεδό τους είναι αρκετά μεγάλη σε σύγκριση με την οριζόντια δυσκαμψία των κατακόρυφων φερόντων στοιχείων, έτσι ώστε η παραμόρφωση των πλακών έχει μικρή επίδραση στη κατανομή των δυνάμεων μεταξύ των κατακόρυφων φερόντων στοιχείων
- Η λυγηρότητα σε κάτοψη λ = L_{max}/L_{min}, δεν είναι μεγαλύτερη του 4, όπου το L_{max} και το L_{min} είναι αντίστοιχα η μεγαλύτερη και η μικρότερη διάσταση του κτιρίου σε κάτοψη, μετρούμενη σε ορθογώνιες διευθύνσεις. Για την ακρίβεια, είναι:

$$\lambda = L_{max}/L_{min} = 18,0 \text{ m}/6,0 \text{ m} = 3,0 < 4,0.$$

Σε κάθε επίπεδο και για κάθε διεύθυνση της ανάλυσης x και y, οι στατικές εκκεντρότητες e_{0x}, e_{0y} και οι ακτίνες δυστρεψίας r_x, r_y ικανοποιούν τις δύο παρακάτω συνθήκες:

$$\frac{\Delta ιεύθυνση ανάλυσης y}{e_{0x} \le 0,30 \cdot r_x}$$
$$r_x \ge l_s$$

$$\frac{\Delta \iota \varepsilon \upsilon \Theta \upsilon v \sigma \eta}{e_{0y}} \propto 0,30 \cdot r_y$$
$$r_y \geq l_s$$

όπου

- *e*_{ox,y} είναι η απόσταση μεταξύ του κέντρου δυσκαμψίας και του κέντρου μάζας, που μετράται κατά την διεύθυνση *x,y*, κάθετη στην εξεταζόμενη διεύθυνση της ανάλυσης.
- *r_{x,y}* είναι η ακτίνα δυστρεψίας, δηλαδή η τετραγωνική ρίζα του λόγου της δυστρεψίας (στροφικής δυσκαμψίας) προς την μεταφορική δυσκαμψία στη διεύθυνση y,x.

$$r_x = \sqrt{\frac{K_\theta}{K_y}}$$
 και $r_y = \sqrt{\frac{K_\theta}{K_x}}$. (7.5) και (7.6)

Is είναι η ακτίνα αδρανείας της μάζας της πλάκας ορόφου σε κάτοψη (τετραγωνική ρίζα του λόγου (α) της πολικής ροπής αδρανείας της μάζας της πλάκας του ορόφου σε κάτοψη, ως προς το κέντρο μάζας της πλάκας του ορόφου προς (β) την μάζα της πλάκας του ορόφου)

$$l_s = \sqrt{\frac{I_{KM}}{m_{opó\phiov}}}$$
(7.7)

-Κανονικότητα καθ' ύψος

Οι κατασκευές που αναλύονται στην εργασία αυτή είναι στο σύνολό τους *Κανονικές σε* Όψη, αφού:

Όλα τα συστήματα ανάληψης οριζοντίων φορτίων (στη συγκεκριμένη περίπτωση πλαίσια), είναι συνεχή χωρίς διακοπή από τα θεμέλια έως την άνω επιφάνεια των κτιρίων.

- Η μεταφορική δυσκαμψία και η μάζα των επιμέρους ορόφων παραμένουν σταθερές, χωρίς αλλαγές, από τη βάση ως την κορυφή των κτιρίων.
- Σε κτίρια με πλαισιωτό σύστημα (όπως όλα τα κτίρια που αναλύονται στην εργασία αυτή) ο λόγος της πραγματικής αντοχής των ορόφων προς την αντοχή που απαιτείται από την ανάλυση δε διαφέρει δυσανάλογα μεταξύ συνεχόμενων ορόφων.
- Δεν υπάρχουν εσοχές καθ' ύψος των ορόφων.

Συνεπώς οι κατασκευές είναι στο σύνολό τους *Κανονικές σε Κάτοψη και σε Όψη*, άρα δεν απαιτείται μείωση της ανώτατης τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς.

Διαφραγματική λειτουργία των πλακών

Η κανονικότητα σε κάτοψη εξασφαλίζει ότι τα διαφράγματα των ορόφων είναι άκαμπτα, απαίτηση που ορίζεται στις βασικές αρχές μελέτης διαμόρφωσης στην §4.2.1.5 του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 1. Όσον αφορά το υπολογιστικό προσομοίωμα, όπως ορίζεται στην §4.3.1(4) του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 1, όταν τα διαφράγματα δαπέδων του κτιρίου μπορούν να ληφθούν ως άκαμπτα μέσα στο επίπεδό τους, οι μάζες και οι ροπές αδρανείας κάθε δαπέδου μπορούν να συγκεντρωθούν στο κέντρο βάρους. Σημειώνεται ότι ένα διάφραγμα θεωρείται άκαμπτο εάν κατά την προσομοίωση με την πραγματική εντός του επιπέδου ευκαμψία του, οι οριζόντιες μετακινήσεις δεν υπερβαίνουν πουθενά αυτές που προκύπτουν από την υπόθεση άκαμπτου διαφράγματος κατά περισσότερο από το 10% των αντίστοιχων απόλυτων οριζόντιων μετακινήσεων κατά την σεισμική κατάσταση σχεδιασμού.

Συντελεστές συνδυασμού για μεταβλητές δράσεις - Καθορισμός των μαζών

Όπως αναφέρεται στην § 3.2.4 (2)Ρ του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 1, τα αδρανειακά αποτελέσματα της σεισμικής δράσης σχεδιασμού θα αποτιμώνται λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία των μαζών που συνδέονται με όλα τα φορτία βαρύτητας που περιλαμβάνονται στον ακόλουθο συνδυασμό δράσεων:

$$\Sigma G_{k,j}$$
 "+" $\Sigma \psi_{E,i} \cdot Q_{k,i}$ (7.8)

όπου

 $\psi_{\rm E,i}$ είναι ο συντελεστής συνδυασμού για την μεταβλητή δράση *i*.

Οι συντελεστές συνδυασμού $\psi_{E,i}$ λαμβάνουν υπόψη την πιθανότητα τα κινητά φορτία $q_{k,i}$ να μην είναι παρόντα σε ολόκληρο τον φορέα κατά τη διάρκεια του σεισμού. Οι συντελεστές αυτοί μπορεί επίσης να λάβουν υπόψη την μειωμένη συμμετοχή των μαζών στην κίνηση του φορέα λόγω μη-στερεάς σύνδεσής τους.

Οι συντελεστές συνδυασμού ψ_{EI} που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων σεισμικών δράσεων θα υπολογίζονται από την ακόλουθη έκφραση:

$$\psi_{\rm Ei} = \varphi \cdot \psi_{2i}$$
 (7.9)

Οι τιμές που αποδίδονται στον φ για χρήση σε μια χώρα μπορούν να βρεθούν στο Εθνικό Προσάρτημα. Οι συνιστώμενες τιμές του φ περιέχονται στον παρακάτω πίνακα.

Τύπος μεταβλητής δράσης	Όροφος	φ
· · · ·	Δώμα	1,0
Κατηγορίες Α-C [*]	Όροφοι με συσχετισμένες χρήσεις	0,8
	Όροφοι με μη-συσχετισμένες χρήσεις	0,5
Κατηγορίες D-F [*] και αρχεία		1,0

* Κατηγορίες όπως ορίζονται στο ΕΝ 1991-1-1:2002.

Επισημαίνεται ότι ο συντελεστής φ αφορά σε μείωση μόνο των μαζών των ορόφων και όχι των κινητών φορτίων, τα οποία λαμβάνουν την τιμή που ορίζεται από τον εκάστοτε συνδυασμό δράσεων.

Οι συντελεστές συνδυασμού ψ_{2i} που αφορούν την οιονεί-μόνιμη τιμή της μεταβλητής δράσης q_i για την μελέτη κτιρίων δίνονται στο ΕΝ 1990:2002, Παράρτημα Α1, όπως ορίζεται στην § 4.2.4 του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 1.

Δράσεις	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2			
Κατηγορία Α: κατοικίες, συνήθη κτήρια κατοικιών	0,7	0,5	0,3			
Κατηγορία Β: χώροι γραφείων	0,7	0,5	0,3			
Κατηγορία C: χώροι συνάθροισης	0,7	0,7	0,6			
Κατηγορία D: χώροι καταστημάτων	0,7	0,7	0,6			
Κατηγορία Ε: χώροι αποθήκευσης	1,0	0,9	0,8			
Κατηγορία F: χώροι κυκλοφορίας οχημάτων						
βάρος οχημάτων ≤ 30kN	0,7	0,7	0,6			
Κατηγορία G: χώροι κυκλοφορίας οχημάτων						
30kN < βάρος οχημάτων ≤ 160kN	0,7	0,5	0,3			
Κατηγορία Η: στέγες	0	0	0			
Φορτία χιονιού για υψόμετρο Η > 1000 m	0,70	0,50	0,20			
Φορτία χιονιού για υψόμετρο Η ≤ 1000 m	0,50	0,20	0			
Φορτία ανέμου	0,6	0,2	0			
Θερμοκρασία (μη-πυρκαϊάς)	0,6	0,5	0			

Πίνακας Α
1.1 – Προτεινόμενες τιμές των συντελεστών ψ για κτήρια

Σεισμικός συνδυασμός

Ο σεισμικός συνδυασμός, ο οποίος εφαρμόζεται στον Ευρωκώδικα 8, προκύπτει ως:

$$E_{d} = \sum G_{k,j} "+" P"+" A_{Ed} "+" \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} , j \ge 1, i \ge 1$$
(7.10)

όπου

"+"	= «προς συνδυασμό με»
Σ	= «το συνδυασμένο αποτέλεσμα του»
G_k	= χαρακτηριστική τιμή μόνιμης δράσης
Q_k	= χαρακτηριστική τιμή μεμονωμένης μεταβλητής δράσης

- A_{Ed} = τιμή σχεδιασμού σεισμικής δράσης
- ψ₂ = συντελεστής για οιονεί μόνιμη τιμή μεταβλητής δράσης

Σημειώνεται ότι τα κατακόρυφα φορτία του σεισμικού συνδυασμού αποτελούν τα φορτία του οιονεί μόνιμου συνδυασμού δράσεων.

Πλασματικός άξονας

Σε πολυώροφα κτίρια είναι δυνατοί μόνο κατά προσέγγιση ορισμοί του κέντρου δυσκαμψίας και της ακτίνας δυστρεψίας. Απλουστευμένος ορισμός για την ταξινόμηση της στατικής κανονικότητας σε κάτοψη και για την κατά προσέγγιση ανάλυση των στρεπτικών αποτελεσμάτων, είναι δυνατός όταν ικανοποιούνται οι ακόλουθες συνθήκες:

α) όλα τα συστήματα ανάληψης οριζόντιων φορτίων, όπως πυρήνες, φέροντα τοιχώματα ή πλαίσια, είναι συνεχή, χωρίς διακοπή, από τα θεμέλια έως την κορυφή του κτιρίου

β) οι μορφές παραμόρφωσης των επιμέρους συστημάτων υπό οριζόντια φορτία δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές. Η συνθήκη αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι ικανοποιείται στις περιπτώσεις πλαισιωτών συστημάτων.

Συνεπώς, εφόσον τηρούνται τα παραπάνω κριτήρια του κανονισμού, ως Κέντρα Ελαστικής Στροφής των κατασκευών επιλέγονται οι Πλασματικοί τους Άξονες. Ο Πλασματικός Άξονας μιας πολυώροφης κατασκευής προκύπτει με υπολογισμό του Κέντρου Μεταφορικής δυσκαμψίας του ορόφου-διαφράγματος που βρίσκεται πλησιέστερα στο ύψος: y = 0.80 · H, όπου Η το συνολικό ύψος του κτιρίου, εννοώντας φυσικά το ύψος του ανώτερου διαφράγματος. Με βάση αυτό τον Πλασματικό Άξονα γίνεται ο υπολογισμός των ακτινών δυστρεψίας κάθε ορόφου.

Τυχηματική εκκεντρότητα

Προκειμένου να ληφθούν υπόψη αβεβαιότητες στη θέση των μαζών και στη χωρική μεταβολή της σεισμικής κίνησης, το υπολογιζόμενο κέντρο της μάζας σε κάθε όροφο θεωρείται ως μετατοπισμένο από την ονομαστική θέση του σε κάθε διεύθυνση κατά την τυχηματική εκκεντρότητα:

$$e_{\rm ai} = \pm 0.05 \cdot L_{\rm i}$$
 (7.11)

όπου

είναι η τυχηματική εκκεντρότητα του κέντρου μάζας ορόφου i από την ονομαστική
 θέση του, εφαρμοζόμενη στην ίδια διεύθυνση σε όλους τους ορόφους

L_i είναι η διάσταση του ορόφου, κάθετη προς την διεύθυνση της σεισμικής δράσης.

Συντελεστές απομείωσης Δυσκαμψίας Σκυροδέματος κατά το σχεδιασμό

Η δυσκαμψία όλων των μελών που συμμετέχουν στους μηχανισμούς ανάληψης των σεισμικών δράσεων (δοκοί και υποστυλώματα) απομειώνεται στο μισό της γεωμετρικής για τη διαστασιολόγηση των κατασκευών, λόγω της ρηγμάτωσης του σκυροδέματος. Δηλαδή

$$(EI)_{cr} = 0,50 \cdot (EI)_{gr}$$
 (7.12)

Συντελεστής συμπεριφοράς για οριζόντιες σεισμικές δράσεις

Ο συντελεστής συμπεριφοράς *q* είναι μια προσέγγιση του λόγου των σεισμικών δυνάμεων στις οποίες θα υποβαλλόταν ο φορέας εάν η απόκρισή του ήταν απεριόριστα ελαστική με ιξώδη απόσβεση 5%, προς τις σεισμικές δυνάμεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην μελέτη, με ένα συμβατικό προσομοίωμα ελαστικής ανάλυσης, εξασφαλίζοντας όμως ικανοποιητική απόκριση του φορέα.

Η ανώτατη τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς *q*, που εισάγεται στον υπολογισμό του φάσματος σχεδιασμού *S_d(T)* για να εκφράσει την ικανότητα απόδοσης ενέργειας, υπολογίζεται για κάθε διεύθυνση σχεδιασμού ως:

$$q = q_{\rm o} k_{\rm w} \ge 1.5$$
 (7.13)

όπου

- *q*o
 Είναι η βασική τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς, που εξαρτάται από τον τύπο του στατικού συστήματος και από την κανονικότητά του σε όψη.
- k_w είναι συντελεστής που εκφράζει την επικρατούσα μορφή αστοχίας σε στατικά συστήματα με τοιχώματα.

Για κτίρια κανονικά σε όψη, οι βασικές τιμές του q_{\circ} για τους διάφορους τύπους στατικών συστημάτων δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

ΤΥΠΟΣ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	КПМ	КПҮ
Πλαισιωτό σύστημα, διπλό σύστημα, σύστημα συζευγμένων τοιχωμάτων	3,0 <i>α</i> ₀∕ <i>α</i> ₁	4,5 <i>α</i> ,/ <i>α</i> 1
Σύστημα ασύζευκτων τοιχωμάτων	3,0	4,0 <i>α</i> _u / <i>α</i> ₁
Στρεπτικά εύκαμπτο σύστημα	2,0	3,0
Σύστημα ανεστραμμένου εκκρεμούς	1,5	2,0

Συνεπώς για τις κατασκευές που αναλύονται στην εργασία αυτή, οι οποίες είναι στο σύνολό τους *Πλαισιωτά Συστήματα*, οι βασικές τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς για τις δύο κύριες διευθύνσεις υπολογίζονται ως:

$$q_0 = 4,5 \alpha_u / \alpha_1$$
 (7.14)

όπου τα α_1 και α_u ορίζονται ως εξής:

- α1 είναι η τιμή με την οποίαν πρέπει να πολλαπλασιαστεί η οριζόντια σεισμική δράση σχεδιασμού ώστε για πρώτη φορά η καμπτική επιπόνηση να γίνει ίση με την καμπτική αντοχή σε οποιοδήποτε στοιχείο στον φορέα, ενώ όλες οι άλλες δράσεις σχεδιασμού παραμένουν σταθερές
- α_u είναι η τιμή με την οποίαν πρέπει να πολλαπλασιαστεί η οριζόντια σεισμική δράση σχεδιασμού για να αναπτυχθούν πλαστικές αρθρώσεις σε τόσες θέσεις ώστε να σχηματιστεί πλήρως πλαστικός μηχανισμός, ενώ όλες οι άλλες δράσεις σχεδιασμού παραμένουν σταθερές. Ο συντελεστής α_u μπορεί να υπολογιστεί από μη-γραμμική στατική γενική ανάλυση.

Όταν ο πολλαπλασιαστικός συντελεστής α_u / α_1 δεν έχει υπολογιστεί με ειδικό υπολογισμό, για Πλαισιωτά Συστήματα, κανονικά σε κάτοψη μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες προσεγγιστικές τιμές α_u / α_1 :

- Πολυώροφα Δίστυλα Πλαισιωτά κτίρια: α_u/α₁=1,2.
- Πολυώροφα Πολύστυλα Πλαισιωτά κτίρια: α_u/α₁=1,3.

Συνεπώς, για τη διεύθυνση X κατά την επιμήκη πλευρά των κατασκευών λαμβάνεται η τιμή 1,3 ενώ για τη διεύθυνση Y κατά τη μικρή τους πλευρά, λαμβάνεται η τιμή 1,2. Συνεπώς, οι βασικές τιμές των συντελεστών συμπεριφοράς στις δύο κύριες διευθύνσεις των κατασκευών θα είναι:

 $q_{OX} = 4,5 \cdot 1,3 \Rightarrow q_{OX} = 5,85 \& q_{OY} = 4,5 \cdot 1,2 \Rightarrow q_{OY} = 5,40.$

Συντελεστής k_w

Ο συντελεστής *k*_w που εκφράζει την κυρίαρχη μορφή αστοχίας σε στατικά συστήματα με τοιχώματα θα λαμβάνεται ως εξής:

 $k_{w} = \begin{cases} 1,00, \gamma i \alpha \pi \lambda \alpha i σι σοδύναμα προς πλαισιωτά συστήματα τοιχωμάτων \\ (1 + \alpha_{o})/3 \leq 1, \alpha \lambda \lambda ά όχι μικρότερη από 0,5, για συστήματα τοιχωμάτων,$ ισοδύναμα προς τοιχώματα διπλά συστήματα και στρεπτικά εύστρεπτασυστήματα

όπου α_{\circ} είναι κυριαρχούσα τιμή του λόγου όψεως των τοιχωμάτων του στατικού συστήματος.

Συνεπώς, για Πλαισιωτά Συστήματα είναι k_w = 1,00 και η ανώτατη τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς όλων των κατασκευών στις δύο κύριες διευθύνσεις τους, είναι:

$$q_x = 5,85 \& q_y = 5,40$$

Υλικά

Σκυρόδεμα

Στο σύνολο των κατασκευών επιλέχθηκε σκυρόδεμα ποιότητας C30/37 για το οποίο είναι:

- Χαρακτηριστική Θλιπτική Αντοχή: *f_{ck} = 30 MPa*.
- Μέτρο Ελαστικότητας: *E_{cm}* = 33 GPa.
- Συντελεστής Ασφαλείας στην Ο.Κ.Α.: γ_c = 1,50.

Συντελεστής μακροχρόνιων επιδράσεων στην θλιπτική αντοχή α_{cc}

Η θλιπτική αντοχή σχεδιασμού του σκυροδέματος στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας προκύπτει ως:

$$f_{cd} = \alpha_{CC} \cdot f_{ck} / \gamma_C \quad (7.15)$$

όπου

 α_{cc} = 0,85 για τους ελέγχους σε κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη και α_{cc} = 1,00 για όλες τις άλλες περιπτώσεις ελέγχων.

Ο συντελεστής *α_{cc}* εισάγεται προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι μακροχρόνιες επιδράσεις στην αντοχή του σκυροδέματος.

Χάλυβας οπλισμού

Ο χάλυβας οπλισμού που χρησιμοποιείται είναι ο νευροχάλυβας υψηλής συνάφειας *B500c,* τα χαρακτηριστικά του οποίου είναι:

- Όριο διαρροής: f_{yk} = 500 MPa.
- Μέτρο Ελαστικότητας: *E_s* = 200 GPa.
- Συντελεστής Ασφαλείας: γ_s = 1,15.

Κατακόρυφα φορτία

Τα κατακόρυφα φορτία που ασκούνται στις πλάκες πλην των ιδίων βαρών είναι:

- Πρόσθετο μόνιμο φορτίο επικαλύψεων: $g_k = 1.0 \ kN/m^2$.
- Κινητό φορτίο: *q_k* = 2,0 kN/m².

Γεωμετρικοί Περιορισμοί Δοκών

Όπως ορίζεται στην §5.4.1.2 (1)P & (2) του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 1, η οριζόντια εκκεντρότητα του άξονα δοκών σε σχέση με αυτό του υποστυλώματος στο οποίο συμβάλλει θα πρέπει να είναι περιορισμένη ώστε να επιτρέπει σωστή μεταφορά των ανακυκλικών ροπών από μια κύρια σεισμική δοκό σε ένα υποστύλωμα. Για να καλυφθεί η απαίτηση αυτή, η οριζόντια απόσταση μεταξύ των αξόνων των δύο μελών θα πρέπει να περιορίζεται σε λιγότερο από *b*_c/4, όπου *b*_c είναι η μεγαλύτερη διάσταση διατομής του υποστυλώματος κάθετα στον διαμήκη άξονα της δοκού.



Σχήμα 7.2: Μέγιστη εκκεντρότητα δοκών – υποστυλωμάτων.

Ο περιορισμός αυτός, αν και αναφέρεται αναλυτικά στο εγχειρίδιο του λογισμικού διαστασιολόγησης (βιβλιογραφική αναφορά [20]), δεν εμφανίζεται από το λογισμικό στα λάθη ή τις ειδοποιήσεις κατά την ανάλυση των κατασκευών σε περίπτωση που παραβιαστεί. Είναι συνεπώς απαραίτητη η εποπτεία του μελετητή, αφού στις περιπτώσεις χωρικών πλαισίων πολλών ορόφων και για χαμηλές κατηγορίες σκυροδέματος, είναι πιθανή η επιλογή υποστυλωμάτων μεγάλων διαστάσεων και συνεπώς θα πρέπει να δίνεται προσοχή ώστε να μη δίνεται μεγάλη γεωμετρική εκκεντρότητα μεταξύ των δοκών και των υποστυλωμάτων.

Στις περιπτώσεις ορθογωνικών μελών των οποίων οι εξωτερικές πλευρές ταυτίζονται, ο παραπάνω γεωμετρικός περιορισμός παίρνει τη μορφή

$$e_{geom} = \frac{b_c}{2} - \frac{b_w}{2} \le \frac{b_c}{4} \implies b_w \ge \frac{b_c}{2}$$
 (7.16)

δηλαδή το πλάτος της δοκού στην προκειμένη περίπτωση θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από την πλευρά του υποστυλώματος κάθετα στη δοκό.

7.3 Τριώροφη κατασκευή

Η κατασκευή αυτή αποτελείται από 3 ορόφους - διαφράγματα της ίδιας κάτοψης με τυπικό ύψος ορόφου *h_{opóφou} = 3,0 m* και έχει συνολικό ύψος *H_{oλικό} = 9,0 m*. Μια τρισδιάστατη απεικόνιση του στατικού συστήματος ακολουθεί στο σχήμα 7.3.



Σχήμα 7.3: Τριώροφη κατασκευή - Τρισδιάστατη απεικόνιση.

7.3.1 Βάρος κατασκευής & Μάζες ορόφων

Στον πίνακα 9 παρουσιάζονται το βάρος της κατασκευής και οι μάζες των επιπέδων, όπως υπολογίζονται από το λογισμικό διαστασιολόγησης.

Επίπεδο	Υψόμετρο <i>[m]</i>	Συνολικό βάρος υπερκείμενων επιπέδων [kN]	Μάζα επιπέδου [ton]
1	3,0	5170	169
2	6,0	3450	169
3	9,0	1720	168

Πίνακας 9: Τριώροφη κατασκευή - Μάζες και Βάρη ορόφων

7.3.2 Ιδιομορφές κατασκευής

Στον πίνακα 10 παρουσιάζονται οι ιδιομορφές της κατασκευής στις δύο κύριες διευθύνσεις της *X* και *Y* και τα ποσοστά δρώσας ιδιομορφικής μάζας που τους αντιστοιχούν, όπως υπολογίζονται από το λογισμικό διαστασιολόγησης. Δείχνονται μόνο οι ιδιομορφές για τις οποίες το άθροισμα της δρώσας ιδιομορφικής μάζας τους καλύπτει το 90% της συνολικής μάζας της κατασκευής σε κάθε διεύθυνση.

15	Ιδιοπερίοδος	Ποσοστά Δρώσας Ιδιομορφικής Μάζας					
ιοιομορφη	[sec]	X _i [%]	ΣΧ i [%]	Y _i [%]	Σ Υ _i [%]		
1	0.542	0	0	85.034	85.034		
2	0.502	86.035	86.035	0	85.034		
3	0.4895	0	86.035	0	85.034		
4	0.1637	0	86.035	11.792	96.827		
5	0.1561	11.092	97.127	0	96.827		

Πίνακας 10: Τριώροφη κατασκευή - Ιδιομορφές ταλάντωσης.

7.3.3 Κάτοψη τυπικού ορόφου

Η γεωμετρία της κάτοψης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομικών μελών φαίνονται στο σχήμα 7.4.



Σχήμα 7.4: Τριώροφη κατασκευή - Κάτοψη τυπικού ορόφου

7.3.4 Συντεταγμένες του πλασματικού άξονα

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι συντεταγμένες του πλασματικού άξονα της κατασκευής. Οι συντεταγμένες *X_{Po}, Y_{Po}* αναφέρονται σε ένα ορθογώνιο σύστημα αξόνων στη γωνία της κάτοψης, στο ελεύθερο άκρο της δοκού Δ3.1. Η συντεταγμένη *Z_{Po}* αναφέρεται στο ύψος του διαφράγματος - ορόφου με βάση τον οποίο υπολογίζεται ο πλασματικός άξονας.

X _{Po}	Y _{Po}	Z _{Po}
[m]	[m]	[m]
9.00	6.00	6.00

7.3.5 Ακτίνες δυστρεψίας & Στατική εκκεντρότητα

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ακτίνες δυστρεψίας, η ακτίνα αδράνειας της πλάκας, ο λόγος δυστρεψίας και η στατική εκκεντρότητα, σε κάθε επίπεδο της κατασκευής.

Επίπεδο	r _x	r _y	ls	Δυστρ	οεψία	e _{ox}	e _{oy}
Entheod	[m]	[m]	[m]	rx/ls	ry/ls	[m]	[m]
1	6.76	7.27	6.18	1.094	1.176	0.00	0.00
2	6.76	7.27	6.18	1.094	1.176	0.00	0.00
3	6.76	7.27	6.18	1.094	1.176	0.00	0.00

7.3.6 Διατομές μελών

7.3.6.1 Πλάκες

Κάθε όροφος αποτελείται από εννιά πλάκες πάχους *h=16cm*, από τις οποίες οι τρείς είναι τετραέρειστες ανοιγμάτων *6,0m x 6,0m* ενώ οι άλλες έξι είναι τριέρειστες ανοιγμάτων *6,0m x 3,0m*.

7.3.6.2 Υποστυλώματα

Κάθε όροφος του κτιρίου αποτελείται από οχτώ υποστυλώματα, τοποθετημένα σε κάνναβο ανοίγματος 6,0 m. Λόγω της διπλής συμμετρίας της κάτοψης και των φορτίων σε κάθε όροφο, τα υποστυλώματα μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες ως προς τη γεωμετρία και την όπλισή τους:

- Περιμετρικά Υποστυλώματα: K1, K2, K3, K4
- Εσωτερικά Υποστυλώματα: K5, K6, K7, K8

Η αναφορά στα υποστυλώματα K1 και K5 θα αντιπροσωπεύει στο εξής το σύνολο της αντίστοιχης ομάδας στο σύνολο του κεφαλαίου αυτού.

Στη συνέχεια, παρατίθενται διατομές των χαρακτηριστικών υποστυλωμάτων κάθε ομάδας, σε κάθε όροφο του κτιρίου, στις οποίες φαίνεται ο τοποθετούμενος διαμήκης και εγκάρσιος οπλισμός.



Τριώροφη κατασκευή - Υποστυλώματα ορόφου 0.





Τριώροφη κατασκευή - Υποστυλώματα ορόφου 1.





7.3.6.3 Δοκοί

Κάθε όροφος αποτελείται από δύο συνεχείς δοκούς τριών ανοιγμάτων στη μια διεύθυνση της κάτοψης, συνολικού μήκους 18,0m έκαστη και τέσσερις αμφιπροέχουσες δοκούς ενός ανοίγματος στην άλλη διεύθυνση, μήκους 12,0 m έκαστη. Λόγω της διπλής συμμετρίας της κάτοψης και των φορτίων του κτιρίου, οι δοκοί κάθε ορόφου μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρείς κατηγορίες ως προς τη γεωμετρία και την όπλισή τους:

- Εσωτερικές Δοκοί: Δ1, Δ2
- Περιμετρικές Δοκοί: Δ3, Δ6
- Εσωτερικές Δοκοί: Δ4, Δ5

Η αναφορά στις δοκούς Δ1, Δ3, Δ4 κάθε ορόφου θα αντιπροσωπεύει στο εξής το σύνολο της αντίστοιχης ομάδας, στο σύνολο του κεφαλαίου αυτού.

Σημειώνεται ότι στο σύνολο της εργασίας αυτής οι δοκοί αντιμετωπίζονται ως ορθογωνικές διατομές σε όλο το μήκος τους. Αν και οι δοκοί συμπεριφέρονται ως πλακοδοκοί στις περιοχές των θετικών ροπών (ανοίγματα), επιλέγεται στο λογισμικό διαστασιολόγησης να μην υπολογίζεται το συνεργαζόμενο πλάτος (*b_{eff}*). Ως συνέπεια, στην όπλιση των δοκών αλλά και στους ελέγχους πλαστιμότητας (ικανοτικός σχεδιασμός, απαιτούμενα ποσοστά θλιβόμενου οπλισμού κ.λπ.) επιλέγεται να μη συμμετέχουν και οι οπλισμοί των πλακών που βρίσκονται εντός του συνεργαζόμενου πλάτος. Στο σχήμα 7.5, παρατίθεται η τυπική διατομή μιας δοκού της κατασκευής και το ανάπτυγμα ενός συνδετήρα.



Σχήμα 7.5: Διατομή μιας τυπικής δοκού και ανάπτυγμα του συνδετήρα.

Στο Παράρτημα Γ της εργασίας αυτής παρουσιάζονται οι κατά μήκος τομές των χαρακτηριστικών δοκών κάθε ομάδας, σε κάθε όροφο της κατασκευής, στις οποίες φαίνεται ο τοποθετούμενος διαμήκης και εγκάρσιος οπλισμός σε κάθε θέση.

7.4 Εννιαώροφη κατασκευή

Η κατασκευή αυτή αποτελείται από 9 ορόφους της ίδιας κάτοψης με τυπικό ύψος ορόφου h_{ορόφου} = 3,0 m και έχει συνολικό ύψος H_{ολικό} = 27,0 m. Μια τρισδιάστατη απεικόνιση του στατικού συστήματος ακολουθεί στο σχήμα 7.6.



Σχήμα 7.6: Εννιαώροφη κατασκευή - Τρισδιάστατη απεικόνιση.

7.4.1 Βάρος κατασκευής & Μάζες ορόφων

Στον πίνακα 11 παρουσιάζονται το βάρος της κατασκευής και οι μάζες των επιπέδων, όπως υπολογίζονται από το λογισμικό διαστασιολόγησης.

Επίπεδο	Υψόμετρο <i>[m]</i>	Συνολικό βάρος υπερκείμενων επιπέδων [kN]	Μάζα επιπέδου [ton]
1	3,0	15900	174
2	6,0	14200	174
3	9,0	12400	174
4	12,0	10600	174
5	15,0	8850	174
6	18,0	7080	174
7	21,0	5310	174
8	24,0	3540	174
9	27,0	1770	170

Πίνακας 11: Εννιαώροφη κατασκευή - Μάζες και βάρη ορόφων.

7.4.2 Ιδιομορφές κατασκευής

Στον πίνακα 12 παρουσιάζονται οι ιδιομορφές της κατασκευής στις δύο κύριες διευθύνσεις της *X* και *Y* και τα ποσοστά δρώσας ιδιομορφικής μάζας που τους αντιστοιχούν, όπως υπολογίζονται από το λογισμικό διαστασιολόγησης. Δείχνονται μόνο οι ιδιομορφές για τις οποίες το άθροισμα της δρώσας ιδιομορφικής μάζας τους καλύπτει το 90% της συνολικής μάζας της κατασκευής σε κάθε διεύθυνση.

15.0.004	Ιδιοπερίοδος	Ποσοστά Δρώσας Ιδιομορφικής Μάζας				
ιοιομορφη	[sec]	X _i [%]	ΣΧ i [%]	Y _i [%]	Σ Υ _i [%]	
1	1.5459	0	0	79.684	79.684	
2	1.3814	81.021	81.021	0	79.684	
3	1.3456	0	81.021	0	79.684	
4	0.4916	0	81.021	10.669	90.353	
5	0.4449	0	81.021	0	90.353	
6	0.435	9.903	90.923	0	90.353	

Πίνακας 12: Εννιαώροφη κατασκευή - Ιδιομορφές ταλάντωσης.

7.4.3 Κάτοψη τυπικού ορόφου

Η γεωμετρία της κάτοψης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομικών μελών φαίνονται στο σχήμα 7.7.



Σχήμα 7.7: Εννιαώροφη κατασκευή - Κάτοψη τυπικού ορόφου.

7.4.4 Συντεταγμένες του πλασματικού άξονα

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι συντεταγμένες του πλασματικού άξονα της κατασκευής. Οι συντεταγμένες *X_{Po}, Y_{Po}* αναφέρονται σε ένα ορθογώνιο σύστημα αξόνων στη γωνία της κάτοψης, στο ελεύθερο άκρο της δοκού Δ3.1. Η συντεταγμένη *Z_{Po}* αναφέρεται στο ύψος του διαφράγματος - ορόφου με βάση τον οποίο υπολογίζεται ο πλασματικός άξονας.

X _{Po}	Y _{Po}	Z _{Po}
[<i>m</i>]	[m]	[m]
9.00	6.00	21.00

7.4.5 Ακτίνες δυστρεψίας & Στατική εκκεντρότητα

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ακτίνες δυστρεψίας, η ακτίνα αδράνειας της πλάκας, ο λόγος δυστρεψίας και η στατική εκκεντρότητα, σε κάθε επίπεδο της κατασκευής.

Επίπεδο	r _x	r _y	ls	Δυστρ	οεψία	e _{ox}	e _{oy}
Entheod	[m]	[m]	[m]	r_x/l_s	r_y/l_s	[m]	[m]
1	6.39	7.35	6.18	1.034	1.189	0.0	0.0
2	6.39	7.35	6.18	1.034	1.189	0.0	0.0
3	6.39	7.35	6.18	1.034	1.189	0.0	0.0
4	6.39	7.35	6.18	1.034	1.189	0.0	0.0
5	6.39	7.35	6.18	1.034	1.189	0.0	0.0
6	6.39	7.35	6.18	1.034	1.189	0.0	0.0
7	6.39	7.35	6.18	1.034	1.189	0.0	0.0
8	6.39	7.35	6.18	1.034	1.189	0.0	0.0
9	6.39	7.35	6.18	1.034	1.189	0.0	0.0

7.4.6 Διατομές μελών

7.4.6.1 Πλάκες

Κάθε όροφος αποτελείται από εννιά πλάκες πάχους *h=16cm*, από τις οποίες οι τρείς είναι τετραέρειστες ανοιγμάτων *6,0m x 6,0m* ενώ οι άλλες έξι είναι τριέρειστες ανοιγμάτων *6,0m x 3,0m*.

7.4.6.2 Υποστυλώματα

Κάθε όροφος του κτιρίου αποτελείται από οχτώ υποστυλώματα, τοποθετημένα σε κάνναβο ανοίγματος 6,0 m. Λόγω της διπλής συμμετρίας της κάτοψης και των φορτίων σε κάθε όροφο, τα υποστυλώματα μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες ως προς τη γεωμετρία και την όπλισή τους:

- Περιμετρικά Υποστυλώματα: K1, K2, K3, K4
- Εσωτερικά Υποστυλώματα: K5, K6, K7, K8

Η αναφορά στα υποστυλώματα K1 και K5 θα αντιπροσωπεύει στο εξής το σύνολο της αντίστοιχης ομάδας στο σύνολο του κεφαλαίου αυτού. Στη συνέχεια παρατίθενται διατομές
των χαρακτηριστικών υποστυλωμάτων κάθε ομάδας, σε κάθε όροφο του κτιρίου, στις οποίες φαίνεται ο τοποθετούμενος διαμήκης και εγκάρσιος οπλισμός.



Εννιαώροφη κατασκευή - Υποστυλώματα ορόφου 0.



Εννιαώροφη κατασκευή - Υποστυλώματα ορόφου 1.



Εννιαώροφη κατασκευή - Υποστυλώματα ορόφου 2.



Εννιαώροφη κατασκευή - Υποστυλώματα ορόφου 3.



Εννιαώροφη κατασκευή - Υποστυλώματα ορόφου 4.



Εννιαώροφη κατασκευή - Υποστυλώματα ορόφου 5.



Εννιαώροφη κατασκευή - Υποστυλώματα ορόφου 6.



Εννιαώροφη κατασκευή - Υποστυλώματα ορόφου 7.



Εννιαώροφη κατασκευή - Υποστυλώματα ορόφου 8.

7.4.6.3 Δοκοί

Κάθε όροφος αποτελείται από δύο συνεχείς δοκούς τριών ανοιγμάτων στη μια διεύθυνση της κάτοψης, συνολικού μήκους 18,0m έκαστη και τέσσερις αμφιπροέχουσες δοκούς ενός ανοίγματος στην άλλη διεύθυνση, μήκους 12,0 m έκαστη. Λόγω της διπλής συμμετρίας της κάτοψης και των φορτίων του κτιρίου, οι δοκοί κάθε ορόφου μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρείς κατηγορίες ως προς τη γεωμετρία και την όπλισή τους:

- Εσωτερικές Δοκοί: Δ1, Δ2
- Περιμετρικές Δοκοί: Δ3, Δ6
- Εσωτερικές Δοκοί: Δ4, Δ5

Η αναφορά στις δοκούς Δ1, Δ3, Δ4 κάθε ορόφου θα αντιπροσωπεύει στο εξής το σύνολο της αντίστοιχης ομάδας, στο σύνολο του κεφαλαίου αυτού.

Όπως αναφέρθηκε και για την τριώροφη κατασκευή, στο σύνολο της εργασίας αυτής οι δοκοί αντιμετωπίζονται ως ορθογωνικές διατομές σε όλο το μήκος τους. Αν και οι δοκοί συμπεριφέρονται ως πλακοδοκοί στις περιοχές των θετικών ροπών (ανοίγματα), επιλέγεται στο λογισμικό διαστασιολόγησης να μην υπολογίζεται το συνεργαζόμενο πλάτος (b_{eff}). Ως συνέπεια, στην όπλιση των δοκών αλλά και στους ελέγχους πλαστιμότητας (ικανοτικός σχεδιασμός, απαιτούμενα ποσοστά θλιβόμενου οπλισμού κ.λπ.) επιλέγεται να μη συμμετέχουν και οι οπλισμοί των πλακών που βρίσκονται εντός του συνεργαζόμενου πλάτους. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται η τυπική διατομή μιας δοκού της κατασκευής και το ανάπτυγμα ενός συνδετήρα.



Στο Παράρτημα Γ της εργασίας αυτής παρουσιάζονται οι κατά μήκος τομές των χαρακτηριστικών δοκών κάθε ομάδας, σε κάθε όροφο της κατασκευής, στις οποίες φαίνεται ο τοποθετούμενος διαμήκης και εγκάρσιος οπλισμός σε κάθε θέση.

Κεφάλαιο 8

ΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

8.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι παραδοχές που πραγματοποιούνται για την προσομοίωση των κατασκευών στο λογισμικό *SAP2000 v.15.2.1* και αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείται το υπολογιστικό προσομοίωμα. Το γεωμετρικό προσομοίωμα που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ανελαστικής απόκρισης των κατασκευών θα πρέπει να είναι συμβατό με το αντίστοιχο που μορφώθηκε για τη διαστασιολόγησή τους. Για τη διενέργεια όμως των μη γραμμικών στατικών αναλύσεων και των αναλύσεων χρονοϊστορίας φόρτισης, δίδονται οι πραγματικές τιμές αντοχής των υλικών και η μη γραμμική τους συμπεριφορά, ορίζονται οι ενεργές δυσκαμψίες των διατομών και οι περισφίγξεις στα υποστυλώματα, ώστε να γίνει μια ρεαλιστική εκτίμηση της πραγματικής συμπεριφοράς των κατασκευών.

8.2 Μόρφωση του υπολογιστικού προσομοιώματος

Για την αποτίμηση της συμπεριφοράς των κατασκευών θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα υπολογιστικό προσομοίωμα το οποίο θα περιγράφει ικανοποιητικά τα χαρακτηριστικά κάθε κατασκευής. Τα πιο σημαντικά είναι: η γεωμετρία της κάτοψης - η θέση, οι διαστάσεις και οι οπλισμοί των δομικών μελών - τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών - τα ελαστικά μήκη των δομικών μελών - τα κατακόρυφα φορτία - οι δυσκαμψίες των μελών και οι μάζες των ορόφων.

Οι οπλισμοί των δοκών και των υποστυλωμάτων χρησιμοποιούνται από το λογισμικό για τον υπολογισμό των διαγραμμάτων ροπών - καμπυλοτήτων κάθε διατομής και για τον καθορισμό των ιδιοτήτων των πλαστικών αρθρώσεων. Έτσι, γίνεται εξαρχής η παραδοχή ότι πλαστικές αρθρώσεις θα οριστούν μόνο στα άκρα των δοκών και των υποστυλωμάτων. Συνεπώς, για τις δοκούς ορίζονται μόνο οι διατομές που αφορούν τους οπλισμούς στα άκρα τους. Λόγω της γεωμετρικής διπλής συμμετρίας των κατασκευών, αλλά και της συμμετρίας των κατακόρυφων φορτίων που τους επιβάλλονται, οι κατασκευές παρουσιάζουν πανομοιότυπα οπλισμένα μέλη σε ζεύγη. Κατά συνέπεια, σε κάθε όροφο διακρίνονται 4 διαφορετικές διατομές δοκών που μπορούν να περιγράψουν επακριβώς την όπλιση των άκρων όλων των δοκών του ορόφου. Χαρακτηριστικά, στο σχήμα 8.2 δείχνονται οι διατομές που ορίζονται στις δοκούς ενός τυπικού ορόφου σε μια από τις κατασκευές.



Σχήμα 8.1: Χαρακτηριστικές διατομές των δοκών που προσομοιώνονται.

Οι συμβολισμοί F0_Xi και F0_Yi παραπέμπουν στον όροφο του ισογείου (Όροφος0 - Floor0) και στον προσανατολισμό κάθε δοκού ως προς τους κύριους άξονες X και Y κάθε κατασκευής, όπως φαίνονται στο παραπάνω σχήμα. Αντίστοιχη κωδικοποίηση χρησιμοποιείται για τους υπόλοιπους ορόφους κάθε κατασκευής.

Μονάδες

Ορίζονται οι κύριες μονάδες δύναμης, μήκους και θερμοκρασίας (*KN,m,C*), αφού στο λογισμικό είναι προεπιλεγμένες οι μονάδες που χρησιμοποιούνται στο Αμερικάνικο Μετρικό Σύστημα (*Kip,ft,F*). Στις μονάδες αυτές εισάγονται και εξάγονται όλα τα δεδομένα και αποτελέσματα αντίστοιχα, ενώ παράγονται και συνδυασμοί αυτών, αφού για παράδειγμα οι τάσεις ορίζονται σε *KPa* και οι ροπές σε *KNm*.

Στηρίξεις

Οι στηρίξεις τις κατασκευής θεωρούνται πλήρεις πακτώσεις. Οι πακτώσεις αυτές ορίζονται με επιλογή των κόμβων στη βάση των υποστυλωμάτων του ισογείου, εκτέλεση των εντολών: Assign → Joint → Restraints και παγίωση όλων των βαθμών ελευθερίας, μεταφορικών και στροφικών, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

Joint Restraints					
Restraints in Joint Local Directions					
🔽 Translation 1 🔽 Rotation about 1					
▼ Translation 2 ▼ Rotation about 2					
▼ Translation 3 ▼ Rotation about 3					
- Fast Restraints					
11111 11111 11111 •					
Cancel					

Σχήμα 8.2: Ορισμός των στηρίξεων.

Κατακόρυφα Φορτία

Τα διάφορα φορτία που ασκούνται στις κατασκευές ομαδοποιούνται σε Load Patterns ανάλογα με τη φύση τους (μόνιμα, κινητά κ.λπ.), αφού καθένα από αυτά λαμβάνει διαφορετικούς συντελεστές στους συνδυασμούς φορτίσεων και τον καθορισμό των μαζών. Τα κατακόρυφα φορτία που καταπονούν την κατασκευή είναι: τα ίδια βάρη των πλακών, των δοκών και των στύλων, τα κινητά φορτία και τα φορτία επικαλύψεων των πλακών, όπως αυτά περιγράφηκαν στην αντίστοιχη παράγραφο που αφορά τη διαστασιολόγηση των κατασκευών.



Σχήμα 8.3: Κατασκευή τύπων φόρτισης (Load Cases).

Τα ίδια βάρη των πλακών και οι επικαλύψεις των πλακών ορίζονται ενιαία στο προσομοίωμα ως ένα Load Pattern με όνομα: **DEAD_SLABS**. Τα ίδια βάρη των δοκών και των υποστυλωμάτων ορίζονται χωριστά στο Load Pattern: **DEAD**, το οποίο είναι και το μόνο με πολλαπλασιαστή 1,0 στο πεδίο SelfWeight, δηλαδή το ίδιο βάρος υπολογίζεται αυτόματα από το λογισμικό με βάση το ειδικό βάρος του σκυροδέματος που έχει οριστεί. Τα κινητά φορτία των ορόφων πλην του δώματος ορίζονται ως: **LIVE** και τα κινητά φορτία του δώματος ορίζονται ως: **LIVE_TOP**. Τα δύο τελευταία, αν και στους ίδιους συνδυασμούς φορτίσεων λαμβάνουν τους ίδιους συντελεστές, ορίζονται διαφορετικά για τον ορισμό των μαζών, αφού λαμβάνουν διαφορετική τιμή του μειωτικού συντελεστή *φ*.

Μάζα

Οι μάζες των κατασκευών για τον οιονεί μόνιμο συνδυασμό φόρτισης (κατακόρυφα φορτία του σεισμικού συνδυασμού φόρτισης) ορίζεται στο λογισμικό ως $G+\psi_{Ei}\cdot Q$, όπου $\psi_{Ei} = \varphi \cdot \psi_{2i}$, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 7 που αφορά τη διαστασιολόγηση των κατασκευών. Ο συντελεστής φ δεν είναι ενιαίος για όλους τους ορόφους, γι' αυτό και τα κινητά φορτία του δώματος και των υπόλοιπων ορόφων ορίζονται σε διαφορετικά Load Patterns. Η μάζα ορίζεται για όλη την κατασκευή με εκτέλεση των εντολών:

Define → Mass Source → Mass Definition: From Element and Additional Masses and Loads → DEAD_SLABS με συντελεστή 1,00 -> LIVE με συντελεστή 0,15 -> →LIVE_TOP με συντελεστή 0,30.

Define Mass Source		
Mass Definition C From Element and Additional Masses C From Loads Image: The Mass Multiplier for Loads Define Mass Multiplier for Loads Load Multiplier DEAD_SLABS 1. DEAD_SLABS 0.15 LIVE_TOP 0.3		
	Cancel]

Σχήμα 8.4: Ορισμός της μάζας στο λογισμικό.

Το ίδιο βάρος των δοκών και των υποστυλωμάτων υπολογίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα (*From Elements*) γι' αυτό και δεν ορίζεται στα φορτία το *Load Pattern: DEAD*.

Επισημαίνεται ότι ο συντελεστής φ χρησιμοποιείται για απομείωση των μαζών και όχι των κατακόρυφων φορτίων της κατασκευής.

8.3 Προσομοιώματα Υλικών

8.3.1 Προσομοίωμα Χάλυβα Οπλισμού

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του χάλυβα οπλισμού, το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα υιοθέτησης των παραμετρικών καμπυλών τάσεων - παραμορφώσεων Simple και Park, αλλά και τη δυνατότητα καθορισμού από το χρήστη. Οι καμπύλες Simple και Park είναι σχεδόν πανομοιότυπες, με τη διαφορά ότι στην κρατυνόμενη περιοχή μετά το πλατό διαρροής, η καμπύλη Simple χρησιμοποιεί παραβολική σχέση, ενώ η Park μια εμπειρική σχέση. Επιλέγεται η χρήση της καμπύλης Park, η οποία φαίνεται σχηματικά παρακάτω.



Σχήμα 8.5: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού.

Ακόμα, ο νόμος που διέπει τη συμπεριφορά του υλικού ορίζεται *Μονοαξονικός (Uniaxial Material)* αφού το υλικό θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση των ράβδων οπλισμού.

Η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων Park περιγράφεται από τις εξής μαθηματικές σχέσεις:

Ελαστική περιοχή

$$(\varepsilon \leq \varepsilon_v) \rightarrow f = \mathbf{E} \cdot \varepsilon$$
 (8.1)

Πλήρως πλαστική περιοχή

$$(\mathcal{E}_{y} < \mathcal{E} \le \mathcal{E}_{sh}) \rightarrow f = f_{y}$$
 (8.2)

Πλαστική περιοχή με κράτυνση

$$(\varepsilon_{sh} < \varepsilon \le \varepsilon_u) \Rightarrow f = f_y \left(\frac{m(\varepsilon - \varepsilon_{sh}) + 2}{60(\varepsilon - \varepsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\varepsilon - \varepsilon_{sh})(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right)$$
(8.3)

όπου
$$r = \varepsilon_u - \varepsilon_{sh}$$
 (8.4), $m = \frac{(f_u / f_y)(30r + 1)^2 - 60r - 1}{15r^2}$ (8.5) και

ε η ανηγμένη παραμόρφωση (τροπή) του χάλυβα σε τυχαίο σημείο της καμπύλης

- fη τάση του χάλυβα σε τυχαίο σημείο της καμπύλης
- Ε το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα
- f_v η τάση διαρροής του χάλυβα
- f_u η τάση θραύσης του χάλυβα
- ${\cal E}_{
 m v}$ η ανηγμένη παραμόρφωση του χάλυβα στην τάση διαρροής $f_{
 m v}$
- *ε_{sh}* η ανηγμένη παραμόρφωση στην αρχή του κρατυνόμενου κλάδου
- \mathcal{E}_u η ανηγμένη παραμόρφωση στην τάση θραύσης f_u

Τα ελάχιστα μηχανικά χαρακτηριστικά των χαλύβων οπλισμού όπως ορίζονται στον Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων (*KTX 2008*) που εφαρμόζεται στη χώρα μας, δίνονται στον παρακάτω πίνακα, όπως και ένα τυπικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων για χάλυβες οπλισμού με διακριτό όριο διαρροής (θερμής έλασης), όπως είναι ο *B500c*.





 $\epsilon_{u,p}: \pi \lambda a \sigma \tau i \kappa \eta$ παραμένουσα παραμόρφωση υπό το μέγιστο φορτίο ϵ_u : συνολική παραμόρφωση υπό το μέγιστο φορτίο

 z_u . ουνολική παραμόρφωση αντιστοιχούσα στο μέγιστο φορτίο $\varepsilon_{u,el}$: ελαστική παραμόρφωση αντιστοιχούσα στο μέγιστο φορτίο

Σχήμα 8.6: Ελάχιστα μηχανικά χαρακτηριστικά χαλύβων οπλισμού (ΚΤΧ 2008).

Η χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής του υλικού είναι: $f_{yk} = 500 MPa$. Όπως ορίζεται στον παραπάνω πίνακα, το όριο θραύσης του χάλυβα θα πρέπει να είναι μεταξύ των τιμών: $1,15 \le f_{tk} / f_{yk} \le 1,35$. Λαμβάνεται η ελάχιστη τιμή, δηλαδή: $f_{tk} = 575 MPa$.

Από τις τιμές που αναφέρονται στους πίνακες του Κανονισμού Τεχνολογίας Χαλύβων, το όριο διαρροής είναι χαρακτηριστική τιμή ποσοστημορίου 95%, ενώ οι τιμές $f_{y,act} / f_{y,nom}$ και f_t / f_y είναι χαρακτηριστικές τιμές ποσοστημορίου 90%.

Η ανηγμένη παραμόρφωση στην τάση θραύσης για χάλυβα ποιότητας *B500c* λαμβάνεται ίση με: $\varepsilon_{uk} = 0.075$ δηλαδή η ελάχιστη επιτρεπόμενη, όπως ορίζεται τόσο στα Ελληνικά, όσο και στα Ευρωπαϊκά Πρότυπα για χάλυβα οπλισμού κατηγορίας *C*.

Όσον αφορά την ανηγμένη παραμόρφωση \mathcal{E}_{sh} , την παραμόρφωση δηλαδή στην οποία αρχίζει η κράτυνση του χάλυβα, η τιμή της δεν καθορίζεται σε κανένα Ελληνικό ή Ευρωπαϊκό Πρότυπο που αφορά τη συμπεριφορά χαλύβων οπλισμού, όπως είναι ο Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων, το παράρτημα C του Ευρωκώδικα 2 - Μέρος 1-1 ή το EN 10080 αντίστοιχα. Συνεπώς η τιμή της λαμβάνεται συμβατικά ίση με: $\mathcal{E}_{sh} = 0,02$.

Για την αποτίμηση της συμπεριφοράς των κατασκευών δε λαμβάνονται οι ονομαστικές τιμές αντοχής των υλικών, αλλά οι μέσες, ως μια εκτίμηση της πραγματικής αντοχής των υλικών. Κατά συνέπεια, όπως ορίζεται στην παράγραφο Ε.2.2 (1) του Παραρτήματος Ε του Ευρωκώδικα 8 - Μέρος 2, όταν δεν υπάρχουν συγκεκριμένες πληροφορίες για το χάλυβα που θα χρησιμοποιηθεί στο έργο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες τιμές:

$$\frac{f_{ym}}{f_{yk}} = 1,15$$
, $\frac{f_{tm}}{f_{tk}} = 1,20$, $\varepsilon_{su} = \varepsilon_{uk}$.

Συνεπώς, στο λογισμικό εισάγονται οι τιμές: $f_{ym} = 575MPa$, $f_{tm} = 690MPa$, $\varepsilon_{sh} = 20\%$ και $\varepsilon_{su} = 75\%$. Το Μέτρο Ελαστικότητας του Χάλυβα οπλισμού λαμβάνεται ίσο με: E = 200GPa και ο λόγος Poisson ίσος με v = 0, 30. Η μάζα ανά μονάδα όγκου για το χάλυβα (Mass per Unit Volume) είναι $7,85tn/m^3$. Το ειδικό βάρος ορίζεται ίσο με $78,5kN/m^3$, δηλαδή για το συγκεκριμένο πεδίο, η επιτάχυνση της βαρύτητας θεωρείται ίση με 10 m/s², μια παραδοχή που γίνεται ευρέως για τον υπολογισμό του ειδικού βάρους των υλικών. Η εισαγωγή των παραμέτρων του υλικού στο λογισμικό φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:

Material Name	Material Type	Symmetry Type
B500c	Rebar	Uniaxial
Modulus of Elasticity	Weight and Mass	Units
ET J2.000E+08	Mass per Unit Volume 7.85	5 KN, m, L 💌
	Other Properties for Rebar Materials	
Poisson's Ratio	Minimum Yield Stress, Fy	575000.
U12 0.	Minimum Tensile Stress, Fu	690000.
	Expected Yield Stress, Fye	575000.
	Expected Tensile Stress, Fue	690000.
Coeff of Thermal Expansion A1 1.000E-05		
Shear Modulus	Advanced Material Property Data	
and posterio	Nonlinear Material Data	Material Damping Properties
	Time Dependent Properties	Thermal Properties
	(. 1

Σχήμα 8.7: Ορισμός των χαρακτηριστικών του χάλυβα οπλισμού στο λογισμικό.

onlinear Material Data dit		
Material Name B500c	Material Type	
Hysteresis Type Kinematic	Drucker-Prager Parameters Friction Angle Dilatational Angle	Units KN, m, C
Parametric User Defined	Park	Convert To User Defined
Parametric Strain Dat Strain At Onset of Str Ultimate Strain Capa Final Slope (Multiplier	a ain Hardening xity on E)	0.02
🔲 Use Caltrans Def	ault Controlling Strain Values (Bar Size Deper	ndent)

Σχήμα 8.8: Ορισμός των χαρακτηριστικών του χάλυβα οπλισμού στο λογισμικό.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων του υλικού όπως υπολογίζεται από το λογισμικό με τις παραμέτρους που ορίστηκαν στην ενότητα αυτή.



Σχήμα 8.9: Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού.

8.3.2 Προσομοιώματα Σκυροδέματος

8.3.2.1 Μη περισφιγμένο σκυρόδεμα

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του μη περισφιγμένου σκυροδέματος, το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα υιοθέτησης των παραμετρικών καμπυλών τάσεων παραμορφώσεων Simple και Mander, αλλά και τη δυνατότητα καθορισμού από το χρήστη. Επιλέγεται η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων Mander Unconfined, η οποία αποτελείται από ένα καμπύλο και ένα γραμμικό τμήμα. Ακόμα, ο νόμος που διέπει τη συμπεριφορά του υλικού ορίζεται Ισοτροπικός (Isotropic Material).



Σχήμα 8.10: Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων μη περισφιγμένου σκυροδέματος.

Η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων Mander - Unconfined περιγράφεται από τις εξής μαθηματικές σχέσεις:

Καμπύλο Τμήμα

$$(\varepsilon \leq 2\varepsilon'_{C}) \rightarrow f = \frac{f'_{C}xr}{r-1+x^{r}}$$
 (8.6)

Γραμμικό Τμήμα

$$(2\varepsilon_{c} < \varepsilon \leq \varepsilon_{u}) \rightarrow f = \left(\frac{2f_{c}r}{r-1+2^{r}}\right) \left(\frac{\varepsilon_{u}-\varepsilon}{\varepsilon_{u}-2\varepsilon_{c}}\right)$$
 (8.7)

όπου
$$x = \varepsilon / \varepsilon'_{C}$$
, $r = \frac{E}{E - (f'_{C} / \varepsilon'_{C})}$ (8.8) και

- ε η ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος (τροπή) σε τυχαίο σημείο
- fη τάση του σκυροδέματος σε τυχαίο σημείο
- E το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος
- f'_{C} η αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη
- $\dot{\mathcal{E}}_{c}$ η ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος στην τάση f_{c}
- *ε*_u η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος

Η χαρακτηριστική τιμή της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος C30/37 είναι: $f_{ck} = 30MPa$, για ποσοστημόριο αστοχίας 95%. Όσον αφορά τις χαρακτηριστικές τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων του σκυροδέματος, λαμβάνονται οι τιμές σχεδιασμού: $\varepsilon'_{C} = -0,002$ και $\varepsilon_{\mu} = -0,0035$.

Για την αποτίμηση των κατασκευών, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα που αφορά το χάλυβα οπλισμού, δε θα ληφθούν οι χαρακτηριστικές αντοχές των υλικών, αλλά οι μέσες. Όπως δίνεται από τον πίνακα 3.1 στην § 3.1.3 του Ευρωκώδικα 2 - Μέρος 1, η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι: $f_{cm} = f_{ck} + 8MPa$ ή $f_{cm} = 38MPa$, η μέση εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος είναι: $f_{ctm} = 0, 30 \cdot f_{ck}^{-2/3}$ για σκυρόδεμα ποιότητας μικρότερης από C50/60 ή $f_{ctm} = 2,9MPa$ για σκυρόδεμα ποιότητας C30/37 και το μέσο μέτρο ελαστικότητας για σκυροδέματα με χαλαζιακά αδρανή υπολογίζεται ως: $E_{cm} = 22 \cdot (f_{cm}^{-(MPa)}/10)^{0,3}$ ή $E_{cm} = 33GPa$ για σκυρόδεμα ποιότητας C30/37, ενώ ο λόγος Poisson για αρηγμάτωτο σκυρόδεμα λαμβάνεται ίσος με $\nu = 0, 20$.

Η μάζα ανά μονάδα όγκου για το οπλισμένο σκυρόδεμα (Mass per Unit Volume) είναι $2,5tn/m^3$. Το ειδικό βάρος ορίζεται ίσο με $25kN/m^3$, δηλαδή για το συγκεκριμένο πεδίο, η επιτάχυνση της βαρύτητας θεωρείται ίση με 10 m/s². Η μάζα ανά μονάδα όγκου για το άοπλο σκυρόδεμα είναι κατά συντηρητική προσέγγιση ίση με $2,4tn/m^3$. Παρ' όλα αυτά επιλέγεται να εισαχθεί η συντηρητική τιμή $2,5tn/m^3$ που αφορά οπλισμένο σκυρόδεμα, αφού αν και ορίζεται στο λογισμικό η αντίστοιχη τιμή για το χάλυβα οπλισμού, οι μάζες λαμβάνονται αποκλειστικά από τη γεωμετρική διατομή σκυροδέματος. Σημειώνεται ότι θεωρήθηκαν οι ίδιες τιμές για τις μάζες και τα φορτία των κατασκευών στο λογισμικό διαστασιολόγησης.

Material Name	Material Type	Symmetry Type
C30/37	Concrete	Isotropic
Modulus of Elasticity	Weight and Mass	Units
E 33000000	Weight per Unit Volume 25.	KN, m, C 💌
	Mass per Unit Volume 2.5	
	Other Properties for Concrete Materia	lls
Poisson's Ratio	Specified Concrete Compressive Stre	ength, f'c 38000.
U 0.2	Lightweight Concrete	
	Shear Strength Reduction Factor	or
		,
Coeff of Thermal Expansion		
A 1.000E-05	-	
Shear Modulus	- Advanced Material Property Data	
G J13750000	i Noninear Material Data	Material Damping Properties
		I nermal Properties

Η εισαγωγή των παραμέτρων του υλικού στο λογισμικό φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:

Σχήμα 8.11: Ορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος στο λογισμικό.

Nonlinear Material Data	Name and	-	and the second se		
Edit					
Material Name	h	Material Type Concrete			
Hysteresis Type	Drucker-Prager Paramet	ters	Units		
Takeda 💌	Friction Angle	0.	KN, m, C 💌		
	Dilatational Angle	0.			
Stress-Strain Curve Defin	tion Options				
 Parametric 	Mander	✓ Convert	To User Defined		
C User Defined					
Parametric Strain Data					
Strain At Unconfined Co	mpressive Strength, f'c		2.000E-03		
Ultimate Unconfined Stra	in Capacity		3.500E-03		
Final Compression Slope	(Multiplier on E)		-0.1		
Show Stress-Strain Plot					
		Cancel			

Σχήμα 8.12: Ορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος.



Σχήμα 8.13: Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων του μη περισφιγμένου σκυροδέματος.

8.3.2.2 Περισφιγμένο σκυρόδεμα

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του περισφιγμένου σκυροδέματος, το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα υιοθέτησης της παραμετρικής καμπύλης τάσεων -παραμορφώσεων Mander-Confined, αλλά και τη δυνατότητα καθορισμού από το χρήστη. Επιλέγεται η καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων Mander – Confined, η οποία αποτελείται από ένα καμπύλο τμήμα. Ο νόμος που διέπει τη συμπεριφορά του υλικού ορίζεται Ισοτροπικός (Isotropic Material).

Η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων Mander - Confined περιγράφεται ως εξής:

Καμπύλο τμήμα

$$f = \frac{f'_{CC}xr}{r - 1 + x^{r}}$$
 (8.9)

όπου $\mathcal{E}_{CC} = \left\{ 5 \left(\frac{f'_{CC}}{f'_{C}} - 1 \right) + 1 \right\} \mathcal{E}_{C}$ (8.10)

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{CC}} \quad (8.11), \qquad E_{sec} = \frac{f_{CC}}{\varepsilon_{CC}} \quad (8.12), \quad r = \frac{E}{E - E_{sec}} \quad (8.13) \text{ kal}$$

ε η ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος (τροπή) σε τυχαίο σημείο

- fη τάση του σκυροδέματος σε τυχαίο σημείο
- Ε το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος
- f'_{C} η οριακή αντοχή του μη περισφιγμένου σκυροδέματος σε θλίψη

 f'_{CC} η θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος

- $\dot{\mathcal{E}}_{CC}$ η ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος στην τάση \dot{f}_{CC}
- $E_{
 m sec}$ το τέμνων μέτρο Ελαστικότητας στην τάση $\dot{E_{cC}}$

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η μορφή του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων για το προσομοίωμα Mander – Confined.



Σχήμα 8.14: Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων περισφιγμένου σκυροδέματος.

Η f_{CC} και η \mathcal{E}_{cu} εξαρτώνται από τον οπλισμό περίσφιγξης που παρέχεται στη διατομή. Η διαδικασία υπολογισμού τους περιγράφεται αναλυτικά στη βιβλιογραφική αναφορά [15]. και συνοπτικά στις παρακάτω παραγράφους.

Η θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος f'_{CC} υπολογίζεται στις μελέτες του Mander χρησιμοποιώντας ένα διάγραμμα για το πολυαξονικό κριτήριο αστοχίας σε συνάρτηση με δύο πλευρικές τάσεις περίσφιγξης.

Όσον αφορά τη μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση \mathcal{E}_{cu} του περισφιγμένου σκυροδέματος στο προσομοίωμα Mander-Confined, αυτή υπολογίζεται αυτόματα από το λογισμικό μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας που περιγράφεται αναλυτικά στο εγχειρίδιο του λογισμικού και στη βιβλιογραφική αναφορά [15], κατά την οποία εξισώνονται οι ενέργειες κάτω από τις καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων του σκυροδέματος και του οπλισμού περίσφιγξης.

Για τον έλεγχο των τιμών αυτών και για υπολογισμούς στο χέρι, προτείνεται η σχέση του Παραρτήματος C του Ευρωκώδικα 8 - Μέρος 2, σύμφωνα με την οποία είναι:

$$\varepsilon_{\rm cu,c} = 0.004 + \frac{1.4\rho_{\rm s}f_{\rm ym}\varepsilon_{\rm su}}{f_{\rm cm\,c}} \quad (8.14)$$

όπου $\rho_{\rm s}$ = 2 $\rho_{\rm w}$ για ορθογωνικούς συνδετήρες.

Η σχέση αυτή που έχει προταθεί από τον Priestley είναι αφενός απλούστερη από την επαναληπτική διαδικασία του Mander και αφετέρου συμβατή με το προσομοίωμα, αφού στον Ευρωκώδικα 8 - Μέρος 2 προτείνεται αυτούσιο το προσομοίωμα περισφιγμένου σκυροδέματος του Mander, σε αντίθεση με τον Ευρωκώδικα 2 – Μέρος 1 και τον Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3, στους οποίους υιοθετούνται άλλα προσομοιώματα για τη συμπεριφορά του περισφιγμένου σκυροδέματος.

Στο ίδιο πεδίο του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 2 δίδεται η ίδια σχέση με το Mander για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος:

$$f'_{CC} = f'_{C} \cdot \left(2.254\sqrt{1+7,94f'_{L}} / f'_{C} - 2f'_{L} / f'_{C} - 1,254 \right) \quad (8.15)$$

όπου η ενεργός τάση περίσφιγξης υπολογίζεται ως: $f'_L = a \cdot \rho_w \cdot f_{ym}$ για ορθογωνικούς ή μονοσκελείς συνδετήρες και όπου α ο συντελεστής απόδοσης της περίσφιγξης.

Επισημαίνεται ότι το περισφιγμένο σκυρόδεμα δεν εισάγεται ως νέο υλικό στο λογισμικό, αλλά σε κάθε διατομή χωριστά μέσω του Section Designer, αφού κάθε υποστύλωμα διαθέτει το δικό του οπλισμό περίσφιγξης και κατά συνέπεια αναπτύσσει διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά.

8.4 Πλάκες

Οι πλάκες δεν εισάγονται στο λογισμικό ως δομικά μέλη (Area Elements), αλλά η ύπαρξή τους εισάγεται έμμεσα στο υπολογιστικό προσομοίωμα. Η διαφραγματική λειτουργία υλοποιείται με αλληλεξάρτηση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων σε κάθε υψομετρική στάθμη, ώστε να εξασφαλίζεται το απαραμόρφωτο των πλακών. Τα διαφράγματα ορίζονται στο λογισμικό με επιλογή των κόμβων του εκάστοτε ορόφου και εκτέλεση των επιλογών:



Assing \rightarrow Joint \rightarrow Constraints \rightarrow Diaphragm \rightarrow Z Axis.

Σχήμα 8.15: Ορισμός των διαφραγμάτων στα επίπεδα των πλακών.

Τα φορτία των πλακών κατανέμονται στις δοκούς με βάση τις επιφάνειες φόρτισης και τον κανόνα 30°-45°-60° και μεταφέρονται αμέσως στις δοκούς ως γραμμικά κατανεμημένα φορτία στο μήκος τους, όπως παρέχονται από το λογισμικό διαστασιολόγησης. Όλοι οι όροφοι έχουν την ίδια κάτοψη και τα ίδια φορτία πλακών.

8.5 Δοκοί

Οι διατομές των δοκών σχεδιάζονται στο Section Designer, ώστε να είναι δυνατός ο άμεσος υπολογισμός του διαγράμματος ροπών καμπυλοτήτων κάθε διατομής από το λογισμικό. Ο σχεδιασμός διατομών στο Section Designer υλοποιείται ακολουθώντας τις εντολές:

Define \rightarrow Section Properties \rightarrow Frame Sections \rightarrow Add New Property \rightarrow Frame Section Property Type: Other \rightarrow Section Designer.

To Section Designer αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για το σχεδιασμό διατομών πολύπλοκης γεωμετρίας, αλλά και ορθογωνικών διατομών με διπλές στρώσεις οπλισμού.

8.5.1 Εκκεντρότητες Δομικών Μελών

Η σύνδεση των περιμετρικών δοκών με τα υποστυλώματα γενικώς δεν πραγματοποιείται κεντρικά. Κατά συνέπεια, για τη ρεαλιστική προσομοίωση της σύνδεσης των διαφόρων μελών και της μορφής των κόμβων των κατασκευών, αλλά και για το σωστό υπολογισμό

των εντατικών μεγεθών, εισάγονται οι πραγματικές εκκεντρότητες των μελών με επιλογή του εκάστοτε μέλους και εκτέλεση της σειράς εντολών: Assign → Frame → Insertion Point και τροποποίηση του Cardinal Point. Για το σωστό ορισμό των εκκεντροτήτων των μελών, προτείνεται η σειρά επιλογών: View → Set Display Options → General → Extrude View με την οποία γίνεται τρισδιάστατη απεικόνιση των δομικών μελών και συνεπώς οι εκκεντρότητες μπορούν να ελεγχθούν οπτικά. Ακόμα, στο πεδίο Insertion Points δίνεται η δυνατότητα της επιλογής: Do not Transform Stiffness Matrix, με την οποία δεν τροποποιείται το μητρώο δυσκαμψίας κάθε μέλους λόγω της εκκεντρότητάς του. Η επιλογή αυτή ισοδυναμεί με το μη ορισμό των σχετικών εκκεντροτήτων των μελών και δεν προτείνεται, αφού δεν επιτρέπει την προσομοίωση της πραγματικής θέσης των διαφόρων δομικών μελών.

8.5.2 Άκαμπτες περιοχές κόμβων

Στις περιοχές των κόμβων οι δοκοί ενώνονται με τα υποστυλώματα, με αποτέλεσμα να υπάρχει μια περιοχή αλληλοεπικάλυψης των οριζόντιων στοιχείων με τα κατακόρυφα. Αυτή η αλληλοεπικάλυψη έχει σαν συνέπεια τη μείωση των ελαστικών μηκών των δοκών, με βάση τα οποία υπολογίζονται οι δυσκαμψίες τους. Η παράμετρος αυτή πρέπει να οριστεί χειροκίνητα από το χρήστη, με επιλογή κάθε δοκού, εκτέλεση της σειράς εντολών: Assign \rightarrow Frame \rightarrow End (Length) Offsets \rightarrow Define Lengths για τον καθορισμό του μήκους που θεωρείται άκαμπτο στην αρχή (*End-I*) και το τέλος (*End-J*) και ορισμό της τιμής του συντελεστή \rightarrow Rigid-zone factor που ορίζει πόσο άκαμπτα είναι αυτά τα μήκη. Κατά την προσομοίωση των εν λόγω κατασκευών, η τιμή που δίνεται στον *Rigid-zone factor* είναι 1,0 δηλαδή τα άκρα των στοιχείων που αφορούν δοκούς θεωρούνται πλήρως άκαμπτα στα μήκη που αλληλεπικαλύπτονται με τα υποστυλώματα. Το ίδιο δεν πραγματοποιείται για τα στοιχεία που αφορούν υποστυλώματα, στα οποία δεν ορίζονται επό (Length) Offsets.

Σημειώνεται ότι το λογισμικό δίνει την δυνατότητα αυτόματου καθορισμού των άκαμπτων άκρων στις περιοχές των κόμβων με βάση τη συνδεσιμότητα και τις διαστάσεις των μελών, με την επιλογή **Automatic from Connectivity**. Η αυτόματη επιλογή όμως δε λαμβάνει υπόψη τις σχετικές εκκεντρότητες των μελών όπως αυτές ορίζονται μέσω των *Insertion Points*, αλλά θεωρεί κεντροβαρική σύνδεση μεταξύ των μελών. Συνεπώς για το σύνολο των κατασκευών που προσομοιώνονται στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, τα άκαμπτα άκρα στις περιοχές των κόμβων ορίζονται χειροκίνητα για κάθε μέλος.

Οι ίδιες παραδοχές ακολουθούνται στο λογισμικό διαστασιολόγησης, στο οποίο τα End Offsets αναφέρονται ως Άκαμπτες απολήξεις και υπολογίζονται αυτόματα από τη γεωμετρία του φορέα, εκτός αν οριστεί διαφορετικά. Η παραδοχή της θεώρησης αυξημένης δυσκαμψίας στις περιοχές των κόμβων είναι μια εν γένει ρεαλιστική παραδοχή, που επηρεάζει σημαντικά τα δυναμικά χαρακτηριστικά μιας κατασκευής.

8.6 Υποστυλώματα

Οι διατομές των υποστυλωμάτων σχεδιάζονται στο Section Designer με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε για τις δοκούς, με την ιδιαιτερότητα ότι το Section Designer παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής της επιρροής της περίσφιγξης στη συμπεριφορά κάθε στύλου. Τα βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά των διατομών λόγω της περίσφιγξης (αντοχή και παραμορφωσιμότητα) υπολογίζονται αυτόματα από το λογισμικό με χρήση του προσομοιώματος σκυροδέματος Mander-Confined για τον περισφιγμένο πυρήνα και αφού εισαχθούν τα χαρακτηριστικά του τοποθετούμενου εγκάρσιου οπλισμού, δηλαδή η διάμετρος, οι αποστάσεις και οι τμήσεις των συνδετήρων.



Σχήμα 8.16: Διατομές (a) Δοκού, (b) Στύλου.



Σχήμα 8.17: Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων περισφιγμένου σκυροδέματος.

8.7 Ανάλυση Διατομών

8.7.1 Διαγράμματα Ροπών Καμπυλοτήτων

Τα διαγράμματα ροπών Καμπυλοτήτων των διατομών υπολογίζονται από το λογισμικό μέσω του Section Designer. Ο υπολογισμός αυτός προκύπτει με ακριβή ολοκλήρωση της ισορροπίας κάθε διατομής σε ένα αριθμό σημείων που καθορίζεται από το χρήστη. Η ολοκλήρωση αυτή λαμβάνει υπόψη τις μη γραμμικές ιδιότητες των υλικών, όπως έχουν εισαχθεί με το προσομοίωμα Park για το χάλυβα οπλισμού και τα προσομοιώματα Mander-Unconfined και Mander-Confined για το σκυρόδεμα.

Για τον υπολογισμό των Ροπών και Καμπυλοτήτων Διαρροής των διατομών, ελήφθησαν οι τιμές των εξιδανικευμένων τιμών, μετά από διγραμμικοποίηση των διαγραμμάτων, η οποία γίνεται αυτόματα από το λογισμικό, σύμφωνα με τα *Caltrans Seismic Design Criteria*, όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφική αναφορά: [17]. Οι τιμές που προκύπτουν από τα διγραμμικοποιημένα διαγράμματα αναφέρονται στο λογισμικό ως: **Mp** και **Phi-yield** (Idealized).



Σχήμα 8.18: Καμπύλη Ροπών-καμπυλοτήτων μιας τυπικής διατομής.

Όσον αφορά τον αριθμό των σημείων που απαρτίζουν τις καμπύλες ροπών καμπυλοτήτων, υιοθετείται η τιμή **No. of Points = 100** έναντι της προεπιλεγμένης τιμής 20, ώστε να γίνεται μια καλή εκτίμηση των ιδιοτήτων των διατομών. Η απαίτηση από το πρόγραμμα καμπυλών με περισσότερα από 100 σημεία θεωρείται υπερβολή, αφού δοκιμές έδειξαν αφενός αμελητέα διαφορά στις τιμές και αφετέρου σημαντική αύξηση του χρόνου υπολογισμού των διγραμμικοποιημένων καμπυλών.

Για τον υπολογισμό των διαγραμμάτων στις περιπτώσεις των διατομών που αφορούν δοκούς, οι οποίες έχουν τυπικά ασύμμετρο άνω και κάτω οπλισμό, ο υπολογισμός των ροπών και καμπυλοτήτων διαρροής γίνεται με αλλαγή του πεδίου: Angle (Deg) = 0° για εφελκυσμό του κάτω οπλισμού και Angle (Deg) = 180° για εφελκυσμό του άνω.

Όσον αφορά τα διαγράμματα ροπών καμπυλοτήτων των διατομών που αφορούν υποστυλώματα, θα πρέπει να εισαχθεί στο πεδίο: P [Tension +ve] μια τιμή αξονικής δύναμης (θετική για εφελκυσμό), ώστε να ληφθεί η συμπεριφορά κάθε διατομής υπό μια αντιπροσωπευτική τιμή αξονικής δύναμης. Επιλέγεται να εισαχθούν οι αξονικές δυνάμεις των υποστυλωμάτων που προκαλούνται από τα φορτία του οιονεί μόνιμου συνδυασμού φόρτισης (κατακόρυφα φορτία του σεισμικού συνδυασμού) *G+0.3*·*Q*. Αξίζει να επισημανθεί ότι στύλοι διαφορετικών ορόφων αν και μπορεί να έχουν τον ίδιο διαμήκη οπλισμό, έχουν σημαντικά διαφορετική συμπεριφορά, αφού καταπονούνται από διαφορετικές αξονικές δυνάμεις δυνάμεις και διαθέτουν διαφορετικό οπλισμό περίσφιγξης.

8.7.2 Ενεργός Δυσκαμψία Διατομών

Για την αποτίμηση της πραγματικής συμπεριφοράς των κατασκευών, θα πρέπει να υπολογιστεί η ενεργός δυσκαμψία των δομικών μελών ώστε να ληφθεί υπόψη η ρηγμάτωση του σκυροδέματος (Διατομές Σταδίου ΙΙ). Όπως αναφέρεται στην παράγραφο A.3.2.4 (5) του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3, εάν η αποτίμηση της ανελαστικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής πραγματοποιείται σε όρους παραμορφώσεων, οι απαιτήσεις παραμόρφωσης θα πρέπει να προκύπτουν από την ανάλυση ενός προσομοιώματος του φορέα στο οποίο η δυσκαμψία κάθε στοιχείου λαμβάνεται ως ίση με τη μέση τιμή του μεγέθους $M_y L_v/3\theta_y$, στα δύο άκρα του στοιχείου. Στον υπολογισμό αυτό του μήκους του στοιχείου.

Η σχέση αυτή που προτείνεται και στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. δίνει σημαντικά μικρότερες τιμές από την ενεργό ελαστική δυσκαμψία (ΕΙ) = M_y/φ_y και θεωρείται γενικώς πιο ρεαλιστική για αποτίμηση κατασκευών σε όρους παραμορφώσεων.

Οι ροπές και οι καμπυλότητες διαρροής *M_y* και *φ_y* των διατομών λαμβάνονται από το διγραμμικοποιημένο διάγραμμα Ροπών - Καμπυλοτήτων που παρέχεται από το λογισμικό μέσω του *Section Designer*, όπως περιγράφηκε στην αντίστοιχη ενότητα.

Στις δοκούς οι οπλισμοί είναι κατ' εξοχήν ασύμμετροι στις στάθμες οπλισμού άνω και κάτω, συνεπώς υπολογίζονται χωριστά οι τιμές της ενεργού δυσκαμψίας για τις δύο φορές της ροπής, λαμβάνεται ο μέσος όρος των τιμών και έπειτα λαμβάνεται ο μέσος όρος στα δύο άκρα του εκάστοτε μέλους.

Για τον υπολογισμό των στροφών χορδής στη διαρροή των μελών, σύμφωνα με τη σχέση (Α.10β) της παραγράφου Α.3.2.4 (2) στο Παράρτημα Α του Ευρωκώδικα 8 - Μέρος 3, είναι:

$$\theta_{\rm y} = \phi_{\rm y} \frac{L_{\rm V} + a_{\rm V} z}{3} + 0,0013 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_{\rm V}}\right) + 0.13 \phi_{\rm y} \frac{d_{\rm b} f_{\rm y}}{\sqrt{f_{\rm c}}} \quad (8.16)$$

όπου:

- φ_{y} η καμπυλότητα διαρροής της διατομής για συγκεκριμένη φορά ροπής
- *L*_ν το άνοιγμα διάτμησης (≈ *L*/2)
- α_{vz} το μήκος μετατόπισης του διαγράμματος των ροπών κάμψης. Για την περίπτωση που η διατμητική ρηγμάτωση δεν αναμένεται να προηγηθεί της καμπτικής διαρροής στην ακραία διατομή, λαμβάνεται αν = 0.
- h το ύψος της διατομής
- *d_b* η (μέση) διάμετρος του τοποθετούμενου διαμήκη οπλισμού.
- f_y το όριο διαρροής του χάλυβα οπλισμού σε MPa (= f_{ym}).
- f_c η μέγιστη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε MPa (= f_{cm}).

Η μείωση των δυσκαμψιών εισάγεται σε κάθε μέλος χειροκίνητα ως ένας μειωτικός συντελεστής I_{eff}/I_{gr} μέσω των Property Modifiers στις ροπές αδρανείας I_{22} και I_{33} , όπως φαίνεται στο σχήμα 8.19. Ο λόγος αυτός προκύπτει ως το πηλίκο της ενεργού δυσκαμψίας $(EI)_{eff}$ προς την ελαστική δυσκαμψία της διατομής $(EI)_{qr} = EI_{qr}$.

Frame Property/Stiffness Modification Factors							
Property/Stiffness Modifiers for Analysis—							
Cross-section (axial) Area	1						
Shear Area in 2 direction	1						
Shear Area in 3 direction	1						
Torsional Constant	1						
Moment of Inertia about 2 axis	0.13485						
Moment of Inertia about 3 axis	0.13485						
Mass	1						
Weight	1						
ОК	Cancel						

Σχήμα 8.19: Επιβολή των ενεργών δυσκαμψιών ως μειωτικός πολλαπλασιαστικός λόγος στις γεωμετρικές δυσκαμψίες.

Οι ενεργές δυσκαμψίες των μελών των δύο κατασκευών παρατίθενται στο Παράρτημα Β.

8.8 Πλαστικές Αρθρώσεις

Για την αποτίμηση της συμπεριφοράς των κατασκευών γίνεται η θεώρηση συγκεντρωμένης πλαστικότητας στα άκρα των μελών που αναμένεται να σχηματίσουν πλαστικές αρθρώσεις. Οι πλαστικές αρθρώσεις ορίζονται στο λογισμικό με επιλογή των μελών που αναμένεται να σχηματίσουν πλαστικές αρθρώσεις και εκτέλεση της σειράς εντολών:

Assign \rightarrow Frame \rightarrow Hinges.

Γίνεται η θεώρηση ότι οι πιθανές θέσεις στις οποίες αναμένεται να σχηματιστούν πλαστικές αρθρώσεις είναι τα άκρα των δοκών και τα άκρα των υποστυλωμάτων σε όλους τους ορόφους. Φυσικά, δεν ορίζονται πλαστικές αρθρώσεις στα ισοστατικά μέλη των

κατασκευών, δηλαδή στις δοκούς που βρίσκονται εν προβόλω, αφού δε συμμετέχουν στο μηχανισμό ανάληψης των σεισμικών δράσεων.

Για τον καθορισμό της συμπεριφοράς των πλαστικών αρθρώσεων υιοθετούνται τα πρότυπα της FEMA 356, για τα οποία το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα αυτόματου καθορισμού των πλαστικών αρθρώσεων στα μέλη. Ο αυτόματος υπολογισμός των χαρακτηριστικών κάθε πλαστικής άρθρωσης γίνεται με βάση τα στοιχεία της διατομής κάθε μέλους (διαστάσεις, υλικά, οπλισμοί), όπως έχουν προσομοιωθεί αναλυτικά μέσω του Section Designer. Το λογισμικό παρέχει ακόμα τη δυνατότητα αυτόματου καθορισμού πλαστικών αρθρώσεων σύμφωνα με τα πρότυπα των Caltrans Seismic Design Criteria, χαρακτηριστικό που δεν υιοθετείται, αλλά αναφέρεται ως εναλλακτική.



Σχήμα 8.20: Τυπική συμπεριφορά πλαστικής άρθρωσης.

Για τον αυτόματο καθορισμό των πλαστικών αρθρώσεων μέσω του πεδίου *Hinges,* ενεργοποιείται η επιλογή **Auto** και ο καθορισμός του πεδίου **Relative Length**. Το Relative Length παίρνει την τιμή *Ο* για ορισμό πλαστικής άρθρωσης στην αρχή ενός μέλους και την τιμή *1* για ορισμό πλαστικής άρθρωσης στο τέλος του.

8.8.1 Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων στις δοκούς

Οι πλαστικές αρθρώσεις ορίζονται στα άκρα των δοκών με εκτέλεση της παραπάνω διαδικασίας και εκτέλεση των εντολών:

Auto Hinge Type: From Tables In FEMA 356 → Select a FEMA356 Table: Table 6-7 (Concrete Beams – Flexure) Item i → Component Type: Primary → Degree of Freedom: M3 → V value from: Case/Combo: G+0.3Q → Deformation Controlled Hinge Load Carrying Capacity: Is Extrapolated After Point E.

Δηλαδή, ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στις δοκούς θεωρείται ότι οφείλεται αποκλειστικά στην υπέρβαση της ροπής **M3**, η οποία είναι η καμπτική ροπή περί τον οριζόντιο άξονα 3 κάθε διατομής.

Η επιλογή **V value from** αφορά μια τιμή τέμνουσας που χρησιμοποιείται στα πρότυπα της *FEMA 356*. Η χρήση της φαίνεται στους πίνακες της *FEMA 356* που παρουσιάζονται στο τέλος της ενότητας αυτής.

Η επιλογή **Transverse Reinforcing is Conforming** αφορά τις αποστάσεις των συνδετήρων στα άκρα των δοκών, όπου ορίζονται οι πλαστικές αρθρώσεις. Εφόσον στα άκρα των δοκών οι συνδετήρες τοποθετούνται σε αποστάσεις ≤ 3d, και η αντοχή τους είναι μεγαλύτερη από τα ¾ της τέμνουσας δύναμης σχεδιασμού, όπως ορίζεται στον πίνακα *6-7* της *FEMA 356*, θεωρείται ότι η επιλογή ισχύει. Η χρήση της επιλογής αυτής δίνει μεγαλύτερη στροφική ικανότητα στις πλαστικές αρθρώσεις όπου ορίζεται.

Η τελευταία επιλογή αφορά τη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης μετά την υπέρβαση του σημείου *Ε*, δηλαδή μετά το σημείο που η πλαστική άρθρωση έχει περάσει στην εναπομένουσα αντοχή της και έχει εξαντλήσει όλα τα περιθώρια στροφής που διαθέτει.

8.8.2 Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα

Οι πλαστικές αρθρώσεις ορίζονται στην κεφαλή και τον πόδα κάθε υποστυλώματος με εκτέλεση των εντολών:

Auto Hinge Type: From Tables In FEMA 356 \rightarrow Select a FEMA356 Table: Table 6-8 (Concrete Columns – Flexure) Item i \rightarrow Component Type: Primary \rightarrow Degree of Freedom: P-M2-M3 \rightarrow P and V values from: Case/Combo: G+0.3Q \rightarrow Deformation Controlled Hinge Load Carrying Capacity: Is Extrapolated After Point E.

Δηλαδή, ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα οφείλεται στην αλληλεπίδραση αξονικής δύναμης **P** και διαξονικής κάμψης **M2-M3**.

Τα χαρακτηριστικά κάθε πλαστικής άρθρωσης που δημιουργείται μέσω του αυτόματου καθορισμού μπορούν να ελεγχθούν από το χρήστη με εκτέλεση των εντολών:

Define \rightarrow Section Properties \rightarrow Hinge Properties \rightarrow Show Generated Props \rightarrow Modify/Show Property.

Ακόμα, δίνεται η επιλογή μετατροπής των πλαστικών αρθρώσεων που δημιουργήθηκαν από τον αυτόματο καθορισμό, σε μορφή επεξεργάσιμη από το χρήστη (User Defined). Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στις περιπτώσεις που γίνεται κάποια επέμβαση στις πλαστικές αρθρώσεις, ώστε οι ιδιότητές τους να ορίζονται επαρκώς. Συγκεκριμένα, για τα υποστυλώματα θα πρέπει να περιγράφεται η συμπεριφορά κάθε πλαστικής άρθρωσης σε ένα πλήθος γωνιών ανάλογα με τη γεωμετρία και την όπλισή τους και θα πρέπει να δίνεται ο τρόπος υπολογισμού του κριτηρίου διαρροής (χειροκίνητα ή από το λογισμικό), ενώ θα πρέπει να καθορίζεται και ο τρόπος υπολογισμού της ροπής διαρροής κάθε διατομής (χειροκίνητα ή από το λογισμικό).

Στη συνέχεια παρατίθενται οι πίνακες σύμφωνα με τους οποίους υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά κάθε πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με τα πρότυπα της FEMA 356 για δοκούς και υποστυλώματα αντίστοιχα.



Σχήμα 8.21: Χαρακτηριστικά σημεία της καμπύλης ροπής-στροφής χορδής διατομής και στάθμες επιτελεστικότητας (FEMA 356).

Οι τιμές των πλαστικών στροφών χορδής παρουσιάζονται στους πίνακες ως *a* και *b* όπως φαίνεται και στο σχήμα 8.21a. Στο σχήμα 8.21b φαίνονται οι στάθμες επιτελεστικότητας για πρωτεύοντα (*Primary members*) και δευτερεύοντα σεισμικά μέλη (*Secondary members*).

Table 6-7	Mod Rein	eling Param forced Con	eters and crete Bear	Numerica ns	al Acceptanc	e Criteria	for Nonli	inear Pro	cedures–	_	
			Mod	leling Para	meters ³		Acce	ptance Cri	teria ³		
							Plastic Ro	tation Ang	le, radian	5	
					-	Performance Level					
					Residual			Compon	ent Type		
			Plastic I Angle,	Rotation radians	Strength Ratio		Primary Sec		Seco	ondary	
Condition	IS		а	b	с	ю	LS	СР	LS	СР	
i. Beams	controlled	by flexure ¹									
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Trans. Reinf. ²	$\frac{V}{b_w d_v f_c'}$									
≤ 0.0	С	≤ 3	0.025	0.05	0.2	0.010	0.02	0.025	0.02	0.05	
≤ 0.0	С	≥6	0.02	0.04	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.04	
≥ 0.5	С	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03	
≥ 0.5	С	≥6	0.015	0.02	0.2	0.005	0.005	0.015	0.015	0.02	
≤ 0.0	NC	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03	
≤ 0.0	NC	≥6	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.005	0.01	0.01	0.015	
≥ 0.5	NC	≤ 3	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.01	0.01	0.015	
≥ 0.5	NC	≥ 6	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.005	0.005	0.01	
ii. Beams	controlled	by shear ¹									
Stirrup spacing $\leq d/2$			0.0030	0.02	0.2	0.0015	0.0020	0.0030	0.01	0.02	
Stirrup spacing > d/2			0.0030	0.01	0.2	0.0015	0.0020	0.0030	0.005	0.01	
iii. Beams	s controlled	by inadequa	te developi	ment or sp	licing along th	ne span ¹					
Stirrup spa	acing $\leq d/2$		0.0030	0.02	0.0	0.0015	0.0020	0.0030	0.01	0.02	
Stirrup spacing > d/2			0.0030	0.01	0.0	0.0015	0.0020	0.0030	0.005	0.01	
iv. Beams	controlled	by inadequa	te embedm	ent into be	am-column jo	oint ¹					
			0.015	0.03	0.2	0.01	0.01	0.015	0.02	0.03	

1. When more than one of the conditions i, ii, iii, and iv occurs for a given component, use the minimum appropriate numerical value from the table.

2. "C" and "NC" are abbreviations for conforming and nonconforming transverse reinforcement. A component is conforming if, within the flexural plastic hinge region, hoops are spaced at $\leq d/3$, and if, for components of moderate and high ductility demand, the strength provided by the hoops (V_s) is at least three-fourths of the design shear. Otherwise, the component is considered nonconforming.

3. Linear interpolation between values listed in the table shall be permitted.

Seismic Rehabilitation Prestandard

6-21

Table 6-8	Mod Rein	leling Param oforced Cond	eters and crete Colu	Numerica	l Acceptanc	e Criteria	for Nonli	inear Pro	cedures–	-
	Modeling Parameters ⁴			Acceptance Criteria ⁴						
							Plastic Ro	tation Ang	le, radians	5
							Perf	ormance l	_evel	
					Residual			Compon	ent Type	
			Plastic Angle,	Rotation radians	Strength Ratio		Prin	nary	Seco	ndary
Conditior	IS		а	b	с	ю	LS	СР	LS	СР
i. Column	s controlle	d by flexure ¹		1						
$\frac{P}{A_g f_c'}$	Trans. Reinf. ²	$\frac{V}{b_w d_v f_c'}$								
≤ 0.1	С	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.015	0.02	0.02	0.03
≤ 0.1	С	≥ 6	0.016	0.024	0.2	0.005	0.012	0.016	0.016	0.024
≥ 0.4	С	≤ 3	0.015	0.025	0.2	0.003	0.012	0.015	0.018	0.025
≥ 0.4	С	≥ 6	0.012	0.02	0.2	0.003	0.01	0.012	0.013	0.02
≤ 0.1	NC	≤ 3	0.006	0.015	0.2	0.005	0.005	0.006	0.01	0.015
≤ 0.1	NC	≥ 6	0.005	0.012	0.2	0.005	0.004	0.005	0.008	0.012
≥ 0.4	NC	≤ 3	0.003	0.01	0.2	0.002	0.002	0.003	0.006	0.01
≥ 0.4	NC	≥ 6	0.002	0.008	0.2	0.002	0.002	0.002	0.005	0.008
ii. Columi	ns controlle	ed by shear ^{1, :}	3							
All cases	5		_	_	—	-	—	—	.0030	.0040
iii. Colum	ns controll	ed by inadeq	uate develo	opment or s	plicing along	the clear	height ^{1,3}			
Hoop spacing $\leq d/2$			0.01	0.02	0.4	0.005	0.005	0.01	0.01	0.02
Hoop spacing > d/2			0.0	0.01	0.2	0.0	0.0	0.0	0.005	0.01
iv. Colum	ns with axi	al loads exce	eding 0.70	o ^{1, 3}						
Conformir length	ng hoops ov	er the entire	0.015	0.025	0.02	0.0	0.005	0.01	0.01	0.02
All other c	ases		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
 When n "C" and hinge re three-fo 	 When more than one of the conditions i, ii, iii, and iv occurs for a given component, use the minimum appropriate numerical value from the table. "C" and "NC" are abbreviations for conforming and nonconforming transverse reinforcement. A component is conforming if, within the flexural plastic hinge region, hoops are spaced at ≤ d/3, and if, for components of moderate and high ductility demand, the strength provided by the hoops (V_s) is at least three-fourths of the design shear. Otherwise, the component is considered nonconforming. 									

3. To qualify, columns must have transverse reinforcement consisting of hoops. Otherwise, actions shall be treated as force-controlled.

4. Linear interpolation between values listed in the table shall be permitted.

5. For columns controlled by shear, see Section 6.5.2.4.2 for acceptance criteria.

6-22

Seismic Rehabilitation Prestandard

FEMA 356

8.8.3 Hinge Overwrites

Μετά τον ορισμό των πλαστικών αρθρώσεων στα μέλη των κατασκευών, δίνεται η δυνατότητα καθορισμού της ιδιότητας *Hinge Overwrites* ως:

Assign \rightarrow Frame \rightarrow Hinge Overwrites \rightarrow Auto Subdivide Line Objects at Hinges \rightarrow Relative Length of Line Element at Hinge: 0.02

Με την ενεργοποίηση της επιλογής αυτής, το λογισμικό διακριτοποιεί κάθε μέλος σε τμήματα με μήκος ίσο με το 2% του συνολικού του μήκους και τοποθετεί πλαστικές αρθρώσεις στο κέντρο καθενός από τα τμήματα αυτά. Η επιλογή αυτή προτείνεται στα εγχειρίδια του λογισμικού για την επίτευξη ακριβέστερων αποτελεσμάτων.



Σχήμα 8.22: Εσωτερική διακριτοποίηση μέλους λόγω ορισμού της ιδιότητας Hinge Overwrites.

Μετά από εκτέλεση μη γραμμικών στατικών αναλύσεων στις κατασκευές πριν και μετά τον opισμό των Hinge Overwrites εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο opισμός τους είναι καθοριστικός για την ανελαστική συμπεριφορά των κατασκευών και ειδικά για τη συμπεριφορά των πλαστικών αρθρώσεων μετά την υπέρβαση της μέγιστης αντοχής τους, δηλαδή μετά την υπέρβαση του σημείου C (Unloading). Στις περιπτώσεις που δεν opίστηκε η παραπάνω επιλογή, η συμπεριφορά των πλαστικών αρθρώσεων μετά την υπέρβαση της μέγιστης ροπής αντοχής παρέκλινε κατά πολύ από τη δοσμένη ιδεατή καμπύλη σκελετό, με αποτέλεσμα να δίνεται στις κατασκευές μια φαινόμενη δυνατότητα μετελαστικών παραμορφώσεων. Η τιμή 0,02 προτείνεται στα εγχειρίδια του λογισμικού και υπάρχει σαν προεπιλογή, ενώ δοκιμάστηκε και η επιλογή των μεγαλύτερων τιμών 0,05 και 0,10, που έδωσαν όμως τα παρόμοια αποτελέσματα με το μη ορισμό των Hinge Overwrites και συνεπώς θεωρήθηκαν μη αποδοτικές.

Μετά τη διενέργεια μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας φόρτισης, με και χωρίς τον ορισμό της συγκεκριμένης δυνατότητας, εξάγεται το συμπέρασμα ότι σε περιπτώσεις έντονης μη γραμμικής συμπεριφοράς των πλαστικών αρθρώσεων, η ιδιότητα αυτή οδηγεί σε αναξιόπιστα αποτελέσματα των αναλύσεων. Για το λόγο αυτό επιλέγεται να μη γίνει χρήση των Hinge Overwrites σε καμία μη γραμμική ανάλυση, στατική ή δυναμική, αλλά να γίνεται έλεγχος κάθε πλαστικής άρθρωσης σε χαρακτηριστικά βήματα όπως μορφώνεται ο μηχανισμός κατάρρευσης και αξιολόγηση του σημείου μέχρι το οποίο τα αποτελέσματα θεωρούνται αξιόπιστα.

<u>Κεφάλαιο 9</u>

ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

9.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο σύμφωνα με το οποίο γίνεται η αποτίμηση της ανελαστικής απόκρισης των κατασκευών. Αναφέρονται τα βασικά στοιχεία του Αντισεισμικού Σχεδιασμού με Στάθμες Επιτελεστικότητας και γίνεται μια περιγραφή της Μη Γραμμικής Στατικής Ανάλυσης (Pushover Analysis) και της Μη Γραμμικής Ανάλυσης Χρονοϊστορίας Φόρτισης (Time History Analysis), όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν, και τον τρόπο με τον οποίο εκτελούνται στο λογισμικό SAP2000 v15.2.1. Τέλος, αναλύεται ο τρόπος κατασκευής του Ισοδύναμου Μονοβάθμιου Συστήματος.

9.2 Αντισεισμικός Σχεδιασμός με Στάθμες Επιτελεστικότητας

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών με στάθμες επιτελεστικότητας (Performance-Based Design) βασίζεται στην αρχή του καθορισμού αποδεκτού επιπέδου ζημιών ανάλογα με την πιθανότητα εμφάνισης της σεισμικής δόνησης σχεδιασμού, δηλαδή στον καθορισμό του επιδιωκόμενου στόχου σεισμικής ικανότητας. Με άλλα λόγια, η μέθοδος εξετάζει τον πραγματικό τρόπο που θα συμπεριφερθεί η κατασκευή σε διάφορα επίπεδα ισχύος της σεισμικής δόνησης σχεδιασμού και το αντίστοιχο αναμενόμενο επίπεδο ζημιών. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ένας βέλτιστος συνδυασμός ασφάλειας και οικονομίας.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η γνώση του τρόπου συμπεριφοράς της κατασκευής και πέραν της ελαστικής περιοχής, δηλαδή μετά την εμφάνιση των ζημιών έως την οιονεί κατάρρευση. Για το λόγο αυτό, η μέθοδος εφαρμόζεται σε συνδυασμό με μη-γραμμικές (ανελαστικές) αναλύσεις, είτε στατικές (ανάλυση pushover) είτε δυναμικές (αναλύσεις χρονοϊστορίας φόρτισης).

9.2.1 Στάθμες επιτελεστικότητας φέροντος και μη-φέροντος οργανισμού

Όλοι οι κανονισμοί ορίζουν, με μικροδιαφορές, τρεις βασικές στάθμες επιτελεστικότητας για το φέροντα οργανισμό και τα μη-φέροντα στοιχεία, ανάλογα με το επίπεδο βλαβών

1. Άμεση χρήση μετά το σεισμό (Immediate Occupancy)

Όσον αφορά το φέροντα οργανισμό (στάθμη Α), το επίπεδο βλαβών είναι τέτοιο ώστε καμία λειτουργία να μη διακόπτεται κατά τη διάρκεια του σεισμού ή μετά από αυτόν, εκτός ενδεχομένως από δευτερεύουσας σημασίας λειτουργίες. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι επιτρέπονται μόνο μερικές αραιές τριχοειδείς ρωγμές καμπτικού χαρακτήρα, οι οποίες δεν επηρεάζουν την ικανότητα της κατασκευής να φέρει τα κατακόρυφα και τα οριζόντια φορτία, στον ίδιο βαθμό, όπως και πριν το σεισμό. Επίσης, ο κίνδυνος τραυματισμού ατόμων από τις βλάβες είναι πρακτικά αμελητέος.

Όσον αφορά τα μη-φέροντα στοιχεία (στάθμη Α), επιτρέπονται μικρές μόνο βλάβες, οι οποίες δεν επηρεάζουν τις βασικές λειτουργίες. Οι προσβάσεις και τα συστήματα

ασφαλείας (π.χ. κλιμακοστάσια, πόρτες, ανελκυστήρες, συστήματα πυρασφάλειας, γεννήτριες κλπ) πρέπει να παραμείνουν σε λειτουργία, εκτός εάν υπάρχει γενική διακοπή ηλεκτροδότησης στην περιοχή, η οποία τα επηρεάζει.

Στον Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3, ως πρώτη στάθμη επιτελεστικότητας χρησιμοποιείται η Οριακή κατάσταση περιορισμού βλαβών (Limit state of damage limitation - DL), η οποία δεν ταυτίζεται ακριβώς με τη στάθμη Άμεση χρήση, αλλά αναφέρεται σε λίγο μεγαλύτερες βλάβες. Για το σχεδιασμό συνήθων κατασκευών, η στάθμη Άμεση χρήση συνδυάζεται με σεισμική διέγερση με περίοδο επανάληψης 72 χρόνια (50% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 χρόνια) ενώ η στάθμη Περιορισμού βλαβών με σεισμική διέγερση με περίοδο επανάληψης 225 χρόνια (20% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 χρόνια).

2. Προστασία ζωής (Life Safety)

Όσον αφορά το φέροντα οργανισμό (στάθμη B), αναμένεται να εμφανιστούν βλάβες, οι οποίες είναι επισκευάσιμες και δεν αποτελούν αιτία απώλειας της στατικής ευστάθειας της κατασκευής ή σοβαρούς τραυματισμούς ατόμων (μικροί τραυματισμοί, οι οποίοι όμως δεν αποτελούν κίνδυνο απώλειας ζωής, μπορεί να συμβούν) ή σημαντικών ζημιών σε αντικείμενα που βρίσκονται στην κατασκευή. Για την επανάχρηση της κατασκευής μετά το σεισμό απαιτείται να επισκευαστούν οι βλάβες.

Όσον αφορά τα μη-φέροντα στοιχεία (στάθμη Β), αναμένονται βλάβες, οι οποίες όμως δεν αποτελούν κίνδυνο για άτομα εντός ή εκτός της κατασκευής, είτε λόγω πτώσης αντικειμένων είτε λόγω δευτερογενών αιτιών, όπως διαφυγή τοξικών ουσιών, αστοχία συστημάτων υψηλής πίεσης, κίνδυνος πρόκλησης πυρκαγιάς, κλπ.

Η στάθμη αυτή στον Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3 αναφέρεται ως Οριακή κατάσταση σημαντικών βλαβών (Limit state of significant damage - SD).

3. Οιονεί κατάρρευση (Structural Stability)

Όσον αφορά το φέροντα οργανισμό (στάθμη Γ), αναμένεται να εμφανιστούν εκτεταμένες, μη-επισκευάσιμες κατά πλειονότητα βλάβες. Ο φέρων οργανισμός έχει ακόμη την ικανότητα να φέρει τα κατακόρυφα φορτία, αλλά η οριζόντια δυσκαμψία και η ικανότητα αντίστασης σε οριζόντια φορτία έχουν μειωθεί σημαντικά, με αποτέλεσμα η κατασκευή να μη διαθέτει άλλα περιθώρια ασφάλειας έναντι ολικής ή μερικής κατάρρευσης. Γι' αυτό υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης σε μετασεισμούς. Ο κίνδυνος σοβαρού τραυματισμού ατόμων από πτώσεις στοιχείων της κατασκευής είναι μεγάλος, εντός και εκτός αυτής. Για τη επανάχρηση της κατασκευής μετά το σεισμό απαιτούνται εκτεταμένες επιδιορθώσεις, ενώ είναι πιθανόν να μην είναι τεχνικά ή οικονομικά δυνατή η επισκευή της.

Όσον αφορά τα μη-φέροντα στοιχεία (στάθμη Γ), αναμένονται σημαντικές βλάβες, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν ακόμη και την πτώση τους. Εξαίρεση αποτελούν τα υψηλού κινδύνου μη-φέροντα στοιχεία και προσαρτήματα, τα οποία πρέπει να είναι καλά στερεωμένα, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος πτώσης τους σε χώρους συνάθροισης κοινού. Η στάθμη αυτή στον Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3 αναφέρεται επίσης ως Οριακή κατάσταση οιονεί κατάρρευσης (Limit state of near collapse - NC).

9.2.2 Καθορισμός σταθμών επιτελεστικότητας

Καμπύλη ικανότητας (capacity curve)

Ο καθορισμός των σταθμών επιτελεστικότητας γίνεται πάνω στην καμπύλη ικανότητας μιας κατασκευής, η οποία εκφράζει τη μη-γραμμική σχέση μεταξύ του επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου και της μετατόπισης ενός κόμβου ελέγχου. Όπως αναφέρεται στην §4.3.3.4.2.3 (2) του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 1, η μετακίνηση ελέγχου λαμβάνεται στο κέντρο μάζας του δώματος του κτιρίου με προσοχή στην παρατήρηση ότι το δώμα ορόφου σε εσοχή δεν πρέπει να θεωρείται δώμα του κτιρίου.

Η κατασκευή της καμπύλης ικανότητας γίνεται με υπολογισμό της ανελαστικής μετακίνησης του κέντρου βάρους του δώματος για διάφορες τιμές μονοτονικά αυξανόμενων φορτίων δεδομένης κατανομής καθ' ύψος των ορόφων. Για την κατασκευή αυτής της καμπύλης γίνονται πολλές στατικές επιλύσεις, με σταδιακή αύξηση της τέμνουσας βάσης και υπολογισμό της μετακίνησης της κορυφής σε κάθε βήμα (προσαυξητική ελαστοπλαστική μέθοδος βήμα προς βήμα), λαμβάνοντας υπόψη τη μειωμένη δυσκαμψία των στοιχείων που έχουν διαρρεύσει.



Σχήμα 9.1: Κατασκευή της καμπύλης ικανότητας.

Καμπύλη Μ-ϑ δομικού στοιχείου

Για την κατασκευή της καμπύλης ικανότητας μιας κατασκευής θα πρέπει πρώτα να έχουν οριστεί οι νόμοι που διέπουν την ανελαστική συμπεριφορά των μελών της κατασκευής, οι οποίοι περιγράφονται μέσω διαγραμμάτων που σχετίζουν εντατικά μεγέθη "F" με παραμορφώσεις "δ". Οι ιδιότητες αυτές ορίζονται στα μέλη των υπό εξέταση κατασκευών με τη μορφή του διαγράμματος ροπών-στροφών χορδής που ορίζονται στις πιθανές θέσεις πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των δοκών και των υποστυλωμάτων σύμφωνα με τα πρότυπα της FEMA 356, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 8.



Σχήμα 9.2: Περιγραφή της στροφής χορδής μέλους.

Η επιλογή των μεγεθών ροπής-στροφής χορδής πραγματοποιείται αφού καθοριστική για την ανελαστική συμπεριφορά των μελών θεωρείται η κάμψη και όχι η διάτμηση, καθώς οι κατασκευές έχουν διαστασιολογηθεί σύμφωνα με τα κείμενα των Ευρωκωδίκων και ο ικανοτικός έλεγχος τέμνουσας έχει απαιτηθεί στο σχεδιασμό όλων των δομικών μελών. Η ικανότητα στροφής χορδής των δοκών και των υποστυλωμάτων έχει υπολογιστεί σύμφωνα με τους πίνακες 6-7 και 6-8 της FEMA 356, βάσει των οποίων προκύπτει αυτόματα από το λογισμικό η ιδεατή καμπύλη σκελετός κάθε διατομής που αναμένεται να συμπεριφερθεί ανελαστικά, δηλαδή να σχηματίσει πλαστική άρθρωση.



Σχήμα 9.3: Καμπύλες F-δ δομικών στοιχείων (α) καμπτική συμπεριφορά, (β) διατμητική συμπεριφορά.

Ιδεατή καμπύλη Μ-θ στοιχείου

Η γενική μορφή των διαγραμμάτων Μ-θ λαμβάνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 9.4. Ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών σημείων των διαγραμμάτων ροπών στροφών των διατομών ορίζεται από τον εκάστοτε κανονισμό και στην προκειμένη περίπτωση από τα πρότυπα της FEMA 356. Τα τμήματα μιας καμπύλης Μ-θ ορίζονται ως εξής:



Σχήμα 9.4: Ιδεατή καμπύλη F-δ δομικού στοιχείου.

Τμήμα ΟΑ

Αντιπροσωπεύει την ελαστική συμπεριφορά μέχρι το θεωρητικό σημείο διαρροής Α.

Τμήμα ΑΒ

Αντιπροσωπεύει τη μετελαστική συμπεριφορά του στοιχείου μέχρι το σημείο θεωρητικής αστοχίας Β. Το σημείο Β καθορίζεται από την οριακή παραμόρφωση αστοχίας δυ, που ορίζεται ως η παραμόρφωση για την οποία έχει συμβεί ουσιαστική μείωση της ικανότητας παραλαβής φορτίων. Η παραμόρφωση δυ ορίζει την ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης του στοιχείου, η οποία ορίζεται από το μετελαστικό τμήμα της παραμόρφωσης μέχρι την αστοχία, δηλαδή *δρ* = *δυ-δy*.

Τμήμα CD

Αντιπροσωπεύει την απομένουσα ικανότητα του στοιχείου. Συνήθως μετά την παραμόρφωση αστοχίας δυ, η ικανότητα ενός μέλους να παραλάβει σεισμικά φορτία μειώνεται σημαντικά, αλλά δε μηδενίζεται και έτσι το στοιχείο εξακολουθεί να μπορεί να παραλαμβάνει κατακόρυφα φορτία. Στο σημείο D γίνεται η θεώρηση ότι το στοιχείο δε μπορεί να παραλάβει ούτε τα κατακόρυφα φορτία. Η τιμή της απομένουσας αντοχής εκτιμάται συνήθως ως το 20% της οριακής αντοχής.

Στάθμες επιτελεστικότητας στην καμπύλη Μ-θ στοιχείου

Στην καμπύλη M-θ ενός δομικού στοιχείου ορίζονται οι στάθμες επιτελεστικότητας με βάση τις παραμορφώσεις δ_d στις οποίες θεωρείται ότι ενεργοποιούνται. Για παράδειγμα στο σχήμα 9.4 το σημείο Ε αντιστοιχεί στην προστασία ζωής. Ο ορισμός της θέσης των σταθμών επιτελεστικότητας καθορίζεται από τον εκάστοτε κανονισμό ανάλογα με το είδος του στοιχείου (δοκός, υποστύλωμα), τον τρόπο αστοχίας (πλάστιμη ή ψαθυρή) και την κατηγοριοποίηση του στοιχείου σε πρωτεύων ή δευτερεύων.

Σε περιπτώσεις πλάστιμων στοιχείων, στις περιπτώσεις δηλαδή που η καμπτική αστοχία προηγείται της διατμητικής, κρίσιμες είναι οι παραμορφώσεις και γι' αυτό ο ορισμός των σταθμών επιτελεστικότητας γίνεται σε όρους παραμορφώσεων. Για παράδειγμα, η στάθμη επιτελεστικότητας Προστασία Ζωής για πλάστιμα στοιχεία, ορίζεται από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. σε όρους παραμορφώσεων ως:

*	$\delta_d = 0.5^* (\delta_y + \delta_u) / \gamma_{Rd}$	για πρωτεύοντα στοιχεία &
*	$\delta_d = \delta_u / \gamma_{Rd}$	για δευτερεύοντα στοιχεία.

όπου γ_{Rd} = 1,50 είναι ο συντελεστής ασφαλείας.

Στάθμες επιτελεστικότητας κατασκευής

Αφού καθοριστούν οι καμπύλες Μ-θ που περιγράφουν τη συμπεριφορά των στοιχείων της κατασκευής και οι στάθμες επιτελεστικότητας κάθε στοιχείου πάνω στην αντίστοιχη καμπύλη, μπορεί να κατασκευαστεί η καμπύλη ικανότητας όλης της κατασκευής και να τοποθετηθούν πάνω σε αυτή τα σημεία που αντιστοιχούν στις διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας κατασκευή, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.5.





Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο καθορισμός των σημείων επιτελεστικότητας πάνω στην καμπύλη ικανότητας, δηλαδή των μετακινήσεων κορυφής που αντιστοιχούν στα αντίστοιχα επίπεδα βλαβών, δεν είναι μονοσήμαντος ούτε προφανής, γι' αυτό και απαιτεί καλή κρίση μηχανικού. Αυτό συμβαίνει γιατί μια στάθμη επιτελεστικότητας για την κατασκευή ως σύνολο δεν αντιστοιχεί στο σημείο που το πρώτο στοιχείο της κατασκευής φτάνει τη στάθμη αυτή. Στην περίπτωση που μια κατασκευή αποτελείται από πολλά στοιχεία, μπορεί ένα μικρό ποσοστό αυτών να έχει περάσει κάποια στάθμη επιτελεστικότητας, αλλά η κατασκευή ως σύνολο να βρίσκεται ακόμη κάτω από αυτή τη στάθμη.

9.3 Μη Γραμμική Στατική Ανάλυση (Pushover Analysis)

Όπως ορίζεται στην § 4.3.3.4.2.1 (1) του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 1: "Μη γραμμική στατική ανάλυση είναι εκείνη η ανάλυση η οποία εκτελείται υπό τη δράση σταθερών φορτίων βαρύτητας και μονοτονικά αυξανόμενων οριζόντιων φορτίων". Αυτός ο τύπος ανάλυσης
μπορεί να εφαρμοστεί για τον έλεγχο της στατικής συμπεριφοράς νέων και υπαρχόντων κτιρίων με τους ακόλουθους στόχους:

α) για τον έλεγχο ή την αναθεώρηση των τιμών του λόγου υπεραντοχής α_u / α_1 .

β) για την εκτίμηση των αναμενόμενων πλαστικών μηχανισμών και της κατανομής των βλαβών.

γ) για την αποτίμηση της στατικής συμπεριφοράς υπαρχόντων ή ανασχεδιαζόμενων κτιρίων για τους σκοπούς του ΕΝ 1998-3.

δ) ως εναλλακτική λύση αντί της μελέτης που βασίζεται σε γραμμική-ελαστική ανάλυση που χρησιμοποιεί τον συντελεστή συμπεριφοράς *q*. Στην περίπτωση αυτή, η μετακίνησηστόχος που υποδεικνύεται στην § 4.3.3.4.2.6(1)Ρ του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 1, πρέπει να χρησιμοποιείται ως βάση της μελέτης.

Οριζόντια φορτία

Για την αποτίμηση της συμπεριφοράς μιας κατασκευής μέσω μη γραμμικής στατικής ανάλυσης, πρέπει να εφαρμόζονται τουλάχιστον δύο καθ' ύψος κατανομές των οριζόντιων φορτίων, όπως ορίζεται στην §4.3.3.4.2.2 του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 1:

- "ομοιόμορφη" κατανομή, βασισμένη σε οριζόντια φορτία που είναι ανάλογα προς τη μάζα ανεξάρτητα από την στάθμη (ομοιόμορφη επιτάχυνση απόκρισης)
- "ιδιομορφική" κατανομή, ανάλογη προς οριζόντια φορτία συμβατά προς την κατανομή οριζόντιων φορτίων στην υπό εξέταση διεύθυνση όπως προκύπτει από ελαστική ανάλυση.

Κατακόρυφα φορτία

Τα κατακόρυφα λαμβάνονται από τον οιονεί μόνιμο συνδυασμό φόρτισης *G+ψ_{2,i}·Q* (κατακόρυφα φορτία του σεισμικού συνδυασμού φόρτισης) και ορίζονται πριν την έναρξη της επιβολής των μονοτονικά αυξανόμενων οριζόντιων φορτίων, αποτελούν δηλαδή την αρχική συνθήκη φόρτισης και προκαλούν τις αρχικές συνθήκες καταπόνησης και μετακίνησης των διαφόρων μελών.

Η μη γραμμική στατική ανάλυση παρουσιάζει πολλά ελαττώματα, αφού τα αποτελέσματά της είναι εξαρτημένα από το προφίλ φόρτισης και αποτελεί μια στατική επίλυση πολλών βημάτων, αγνοώντας την αυξημένη απόσβεση των κατασκευών υπό δυναμικά φορτία. Παρ' όλα αυτά, υπολογίζοντας την καμπύλη ικανότητας, παρέχεται στο μηχανικό μια ενδεικτική εικόνα της συμπεριφοράς μιας κατασκευής υπό οριζόντια φορτία, χαρακτηριστικό που δε μπορεί να προκύψει από τα αποτελέσματα μιας ανάλυσης χρονοϊστορίας φόρτισης.

9.3.1 Μη γραμμική στατική ανάλυση στο λογισμικό SAP2000 v.15.2.1

Αρχικά πρέπει να οριστεί μια μη γραμμική στατική Load Case, η οποία αποτελεί την αρχική κατάσταση πριν την επιβολή των οριζόντιων φορτίων και από την οποία προκύπτει η εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση της κατασκευής υπό τα κατακόρυφα φορτία του οιονεί μόνιμου συνδυασμού φόρτισης. Συνεπώς, η Load Case: G+0.3Q μετατρέπεται από γραμμική στατική φόρτιση (linear static) σε μη γραμμική στατική φόρτιση ενός βήματος (nonlinear static), ώστε να χρησιμοποιηθεί ως αρχικά επιβαλλόμενη φόρτιση.

Load Case Name G+0.3Q Set Def Name Modify/Show	Load Case Type Static _ Design
Initial Conditions Cero Initial Conditions - Start from Unstressed State Continue from State at End of Nonlinear Case Important Note: Loads from this previous case are included in the current case Modal Loads Case All Modal Loads Applied Use Modes from Case Loads Applied Load Stape Load Name Scale Factor Load State	Analysis Type C Linear Nonlinear Nonlinear Staged Construction Geometric Nonlinearity Parameters None None P-Delta C P-Delta plus Large Displacements
Load Pattern DEAD 1 Load Pattern DEAD_SLABS 1. Load Pattern LIVE 0.3 Load Pattern LIVE_TOP 0.3	
Other Parameters Load Application Full Load Modify/Show Results Saved Final State Only Modify/Show Nonlinear Parameters Default Modify/Show	OK Cancel

Σχήμα 9.6: Ορισμός των παραμέτρων μιας μη γραμμικής στατικής ανάλυσης.

Στη συνέχεια μορφώνεται η *Load Case* που περιγράφει τη μη γραμμική μονοτονική αυξανόμενη φόρτιση, με εκτέλεση των επιλογών:

Define \rightarrow **Load Cases** \rightarrow **Add New Load Case** \rightarrow Load Case Type: **Static** \rightarrow Analysis Type: **NonLinear** \rightarrow Initial Conditions: **Continue From State at End of Nonlinear Case: G+0.3Q**.

Στο πεδίο Loads Applied ορίζεται:

α) για την ομοιόμορφη κατανομή φόρτισης: Load Type: Accel → Load Name: UX
 β) για την ιδιομορφική κατανομή φόρτισης: Load Type: Mode → Load Name: 2.

Η διεύθυνση UX υποδηλώνει τη διεύθυνση στην οποία θα ασκηθεί η ομοιόμορφη φόρτιση (σταθερή επιτάχυνση), ενώ ο αριθμός 2 αναφέρεται στον αριθμό της μεταφορικής ιδιομορφής, το σχήμα της οποίας επιθυμείται να υιοθετήσει το λογισμικό ως προφίλ φόρτισης για την ιδιομορφική κατανομή.

Load Case Data - Nonlinear Static	
Load Case Name Notes PUSHx Set Def Name Modify/Show Initial Conditions Caro Initial Conditions - Start from Unstressed State Modify/Show Continue from State at End of Nonlinear Case G+0.3Q Important Note: Important Note: Loads from this previous case are included in the current case Modal Load Case MODAL Important Note: Loads Applied Load Name Scale Factor Load Type Load Name Scale Factor Accel UX 1. Accel UX 1. Add Modify	Load Case Type Static Design Analysis Type C Linear C Nonlinear Nonlinear Staged Construction Geometric Nonlinearity Parameters None C P-Delta C P-Delta C P-Delta plus Large Displacements
Other Parameters Load Application Displ Control Results Saved Multiple States Nonlinear Parameters User Defined	Cancel

Σχήμα 9.7: Ορισμός της ομοιόμορφης κατανομής φόρτισης.

	es Lo	ad Case Type
PUSHx Set Def Name M	lodify/Show	Static 🗾 Design
Initial Conditions C Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State C Continue from State at End of Nonlinear Case G	+0.3Q •	nalysis Type C Linear ? Nonlinear
Modal Load Case		Nonlinear Staged Construction
Loads Applied Load Type Load Name Scale Factor Mode 2 1.		 P-Delta P-Delta plus Large Displacements
	Add	
	Modify Delete	
Other Parameters	Modify Delete	[]
Other Parameters Load Application Displ Control N	Modify Delete	[]

Σχήμα 9.8: Ορισμός της ιδιομορφικής κατανομής φόρτισης.

Σημειώνεται ότι στις μη γραμμικές στατικές αναλύσεις που διενεργούνται στα πλαίσια της εργασίας αυτής δεν επιλέγεται η επιρροή φαινομένων 2^{ας} τάξης (*P-Delta*), ούτε γεωμετρική μη γραμμικότητα (*P-Delta plus Large Displacements*).

Στο πεδίο Load Application γίνεται η επιλογή: **Displacement Control**. Η εκτέλεση των μη γραμμικών στατικών αναλύσεων σε όρους παραμορφώσεων και όχι δυνάμεων είναι εξέχουσας σημασίας, αφού η εναλλακτική επιλογή Load Control δε δίνει αποτελέσματα μετά την υπέρβαση της μέγιστης τέμνουσας βάσης και συνεπώς δεν παρέχει επαρκή εικόνα της ανελαστικής απόκρισης.

Στο πεδίο Control Displacement πραγματοποιείται η επιλογή: Use Monitored Displacement, έναντι της Conjugate Displacement, η οποία χρησιμοποιεί ένα σταθμικό μέσο των μετακινήσεων της κατασκευής έναντι των οριζοντίων φορτίων κάθε ορόφου και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου δεν επιτυγχάνεται σύγκλιση της ανάλυσης. Στο πεδίο Load to a Motitored Displacement Magnitude of εισάγεται σε μέτρα η μέγιστη μετακίνηση που επιθυμείται να φτάσει η κατασκευή.

Στο πεδίο Monitored Displacement επιλέγεται ο βαθμός ελευθερίας στον οποίο αναφέρεται η παραπάνω μετακίνηση και ο κόμβος στον οποίο αντιστοιχεί. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ως κόμβος ελέγχου λαμβάνεται το κέντρο μάζας του υψηλότερου διαφράγματος της κατασκευής. Για το λόγο αυτό έχει θεωρηθεί ένας κόμβος στο κέντρο μάζας του δώματος, ο οποίος συνδέεται διαφραγματικά με τους λοιπούς κόμβους στη στάθμη του δώματος.

Load Ap	oplication Control for Nonlinear Static Analysis
Loa	d Application Control
0	Full Load
•	Displacement Control
Cor	ntrol Displacement
0	Use Conjugate Displacement
•	Use Monitored Displacement
Lo	ad to a Monitored Displacement Magnitude of 0.7
Mor	nitored Displacement
•	DOF U1 • at Joint 187
C	Generalized Displacement
	Cancel

Σχήμα 9.9: Ορισμός της Στοχευόμενης Μετακίνησης και του κόμβου ελέγχου.

Στο πεδίο Results Saved γίνεται η επιλογή *Multiple States* ώστε να αποθηκευτεί ένας πεπερασμένος αριθμός αποτελεσμάτων σε συγκεκριμένα βήματα. Ως *Minimum Number of Saved States* εισάγεται ο ελάχιστος αριθμός βημάτων που επιθυμείται να εκτελέσει η ανάλυση και αντίστοιχα ως *Maximum Number of Saved States* ο μέγιστος.

Ο ελάχιστος αριθμός είναι αυτός που καθορίζει το βήμα μετακίνησης του κόμβου ελέγχου σε κάθε βήμα της ανάλυσης, π.χ. αν έχει οριστεί *Monitored Displacement* = 0,7m και *Minimum Number of Saved States* = 700, το βήμα μετακίνησης του κόμβου ελέγχου είναι: 0,7/700 = 0,001 m = 1 mm.

Σε αυτή τη φάση αξίζει να σημειωθεί ότι αν μια ανάλυση εκτελέσει όλα τα ελάχιστα βήματα που της έχουν δοθεί, αυτό αποτελεί ένδειξη ότι η μετακίνηση του κόμβου ελέγχου που επιδιώκεται να πραγματοποιηθεί από την κατασκευή είναι μικρή και θα πρέπει να αυξηθεί. Αυτό μπορεί να φανεί ξεκάθαρα από τη μορφή της καμπύλης ικανότητας, η οποία στην προκειμένη περίπτωση δε θα εμφανίζει σημαντική πτώση της δυσκαμψίας. Με με λίγα λόγια, η κατασκευή μπορεί να εκτελέσει μεγαλύτερες μετακινήσεις από αυτές που της απαιτήθηκαν.

Από την άλλη, αν μια ανάλυση εκτελέσει τα ελάχιστα βήματα που της έχουν δοθεί και εκτελέσει ακόμα περισσότερα, αυτό αποτελεί ένδειξη ότι η μετακίνηση σε κάθε βήμα είναι μεγάλη και ο αριθμός των ελάχιστων βημάτων δεν είναι επαρκής για την περιγραφή της συμπεριφοράς της κατασκευής μέχρι την επιθυμητή μετακίνηση. Αυτό συμβαίνει σε μια ομάδα περιπτώσεων, όπου π.χ. ενώ σε κάθε βήμα η μετακίνηση του κόμβου ελέγχου αυξάνεται κατά 10mm, ένα σημαντικό γεγονός, όπως μια σημαντική απώλεια δυσκαμψίας, συμβαίνει σε μετακίνηση 5mm από το προηγούμενο βήμα και το λογισμικό προσθέτει βήματα ώστε να περιγράψει τη συμπεριφορά της κατασκευής στις μετακινήσεις που έχουν απαιτηθεί και αφετέρου στις μετακινήσεις που συμβαίνουν σημαντικά γεγονότα. Το συγκεκριμένο πρόβλημα λύνεται δίνοντας ένα ικανοποιητικά μεγάλο αριθμό μέγιστων βημάτων.

ts Saved for Nonlinear Static Load Cases
Results Saved
or Each Stage
Minimum Number of Saved States 2800 Maximum Number of Saved States 3500
Save positive Displacement Increments Only

Σχήμα 9.10: Ορισμός του αριθμού των ελάχιστον και των μέγιστων βημάτων μιας μη γραμμικής στατικής ανάλυσης.

Στο πεδίο Nonlinear Parameters → Hinge Unloading Method επιλέγεται η μέθοδος: Apply Local Redistribution, ώστε μετά την απώλεια αντοχής μιας πλαστικής άρθρωσης, τα εντατικά μεγέθη να ανακατανέμονται στα γειτονικά μέλη του πλαστικοποιημένου άκρου. Αυτή η επιλογή πραγματοποιείται από το λογισμικό και στις μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας φόρτισης, στις οποίες δε δίνεται δυνατότητα αλλαγής από το χρήστη. Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη επιλογή κρίνεται πολύ σημαντική για την προσέγγιση της πραγματικής ανελαστικής συμπεριφοράς, αφού αποτελεί μια προσπάθεια του λογισμικού για την πραγματοποίηση μη ολόνομης συμπεριφοράς. Δηλαδή με τη συγκεκριμένη επιλογή ελέγχεται σε κάθε βήμα της ανάλυσης το πρόσημο του γινομένου ροπής - στροφής ώστε να είναι θετικό, στις διατομές που σχηματίζονται οι πλαστικές αρθρώσεις, όπως επιβάλλεται για το σχηματισμό του μηχανισμού κατάρρευσης.

Στο πεδίο Maximum Total Steps per Stage, ορίζεται ο μέγιστος αριθμός βημάτων της ανάλυσης, ενώ στο πεδίο Null Steps, ορίζεται ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός βημάτων στα οποία δεν επιτεύχθηκε σύγκλιση. Στα πρώτα, εμπεριέχονται τα βήματα της ανάλυσης που ορίζονται από το χρήστη, τα Null Steps αλλά και βήματα μικρότερης μετακίνησης, τα

οποία δεν αποθηκεύονται και δημιουργούνται από το λογισμικό για την επίτευξη σύγκλισης. Όσον αφορά τα βήματα μικρότερης μετακίνησης, η ύπαρξή τους είναι σχεδόν δεδομένη, ειδικά αφού ένα πλήθος μελών περάσει στην πλαστική περιοχή και ένας αριθμός πλαστικών αρθρώσεων αρχίσουν να χάνουν την αντοχή τους (υπέρβαση του σημείου *C* στο διάγραμμα *M*-ϑ).

Ο μέγιστος αριθμός των βημάτων στα οποία δεν επιτυγχάνεται σύγκλιση (Null Steps) προτείνεται να τίθεται μεγαλύτερος από το μέγιστο συνολικό αριθμό βημάτων (Total Steps) ώστε μια ανάλυση να σταματά λόγω ανεπάρκειας σύγκλισης και όχι λόγω υπέρβασής του.

Material Nonlinearity Parameters	Solution Control					
Frame Element Tension/Compression Only	Maximum Total Steps per Stage	4000				
🔽 Frame Element Hinge	Maximum Null (Zero) Steps per Stage	4001				
🔽 Cable Element Tension Only	Maximum Constant-Stiff Iterations per Step	10				
🔽 Link Gap/Hook/Spring Nonlinear Properties	Maximum Newton-Raphson Iter, per Step	40				
🔽 Link Other Nonlinear Properties	Iteration Convergence Tolerance (Relative)	1.000E-04				
Time Dependent Material Properties	Use Event-to-event Stepping	Yes 💌				
	Event Lumping Tolerance (Relative)	0.01				
	Max Line Searches per Iteration	20				
	Line-search Acceptance Tol. (Relative)	0.1				
	Line-search Step Factor	1.618				
Hinge Unloading Method	Target Force Iteration					
O Unload Entire Structure	Maximum Iterations per Stage	10				
 Apply Local Redistribution 	Convergence Tolerance (Relative)	0.01				
C Restart Using Secant Stiffness	Acceleration Factor	1.				
	Continue Analysis If No Convergence	No 💌				
Reset To Defaults						

Σχήμα 9.11: Ορισμός παραμέτρων σύγκλισης μιας μη γραμμικής στατικής ανάλυσης.

Τέλος, σε εξαιρετικές περιπτώσεις αδυναμίας σύγκλισης, μπορεί να δοκιμάζεται αύξηση των Iterations per Step, τα οποία αποτελούν εσωτερικά βήματα μέσα σε κάθε βήμα. Σε καμία περίπτωση όμως δεν προτείνεται η τροποποίηση των ανεκτών ορίων σύγκλισης (Convergence Tolerance).

Εξαγωγή της μάζας κάθε ορόφου από το λογισμικό SAP2000 v15.2.1

Κατά τις διάφορες επιλύσεις (ιδιομορφικές, pushover, εν χρόνω) το λογισμικό υπολογίζει τις μάζες των μελών και τις κατανείμει στους αντίστοιχους κόμβους στα άκρα τους για την πραγματοποίηση των αναλύσεων. Οι μάζες αυτές, αφού κατανεμηθούν στους κόμβους, είναι διαθέσιμες από το λογισμικό μετά τη διενέργεια μιας ανάλυσης μέσω του πεδίου *Tables*. Η μάζα κάθε ορόφου μπορεί να υπολογιστεί και χειροκίνητα με υπολογισμό των φορτίων κάθε ορόφου μπορεί να υπολογιστεί και χειροκίνητα με υπολογισμό των συντελεστών του οιονεί μόνιμου συνδυασμού φόρτισης και του μειωτικού συντελεστή *φ* για τα κινητά φορτία και χωρίς να παραλείπεται η μισή μάζα των υποστυλωμάτων σε κάθε όροφο. Παρ' όλα αυτά, παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των παραπάνω και αυτών που προκύπτουν από το λογισμικό.

Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στον ακριβή καθορισμό των μαζών στο λογισμικό αλλά και στον τρόπο υπολογισμού της μάζας κάθε ορόφου χωριστά, αφού τόσο τα αποτελέσματα των αναλύσεων, όσο και τα χαρακτηριστικά των ισοδύναμων μονοβάθμιων συστημάτων είναι ευαίσθητα όσον αφορά τη μάζα.

Για το λόγο αυτό θεωρείται σκόπιμος ο ακριβής υπολογισμός των μαζών των ορόφων, ώστε το ισοδύναμο μονοβάθμιο να προκύψει από τις ίδιες μάζες με τις οποίες εκτελούνται οι μη γραμμικές αναλύσεις.

Η μάζα κάθε ορόφου μπορεί να υπολογιστεί εύκολα από το λογισμικό SAP2000 v.15 με εκτέλεση μιας ανάλυσης, επιλογή των κόμβων ενός ορόφου και εκτέλεση της σειράς εντολών:

Display → Show Tables → ANALYSIS RESULTS → Joint Output → Joint Masses → Assembled Joint Masses → File → Export Current Table → To Excel

και με άθροισμα των μαζών που έχουν κατανεμηθεί σε κάθε κόμβο του ορόφου. Στη διαδικασία αυτή υπάρχει ένα λεπτό σημείο, αφού θα πρέπει να εκτελεστεί πριν τον ορισμό της ιδιότητας *Hinge Overwrites* στα μέλη που έχουν οριστεί πλαστικές αρθρώσεις. Με τον ορισμό των *Hinge Overwrites*, τα μέλη διακριτοποιούνται για την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων στις στατικές και δυναμικές μη γραμμικές αναλύσεις και οι μάζες κατανέμονται σε "*ψευτο-κόμβους*" που δημιουργούνται ενδιάμεσα των μελών, οι οποίοι δεν μπορούν να επιλεγούν από την προτεινόμενη διαδικασία υπολογισμού των μαζών των ορόφων. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα έχει προκύψει από επαλήθευση των μαζών που εξάγονται από το λογισμικό με υπολογισμούς στο χέρι και με εξαγωγή των μαζών πριν και μετά τον ορισμό των *Hinge Overwrites*. Η κατανομή των μαζών σε αυτούς τους ενδιάμεσους "*ψευτο-κόμβους*" μπορεί να γίνει ορατή στο χρήστη με εκτέλεση της παραπάνω διαδικασίας χωρίς την επιλογή κάποιου κόμβου, όπου φαίνονται στους πίνακες με το σύμβολο «~» πριν την αρίθμησή τους.

Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται για άλλη μια φορά η αναγκαιότητα της διενέργειας ελέγχων στο χέρι, αφού κάθε λογισμικό λειτουργεί σύμφωνα με δικές του παραδοχές και ο μηχανικός καλείται συχνά να αποκωδικοποιήσει τον τρόπο λειτουργίας του, στην προσπάθεια απόκτησης σωστών αποτελεσμάτων και πραγματοποίησης σωστών αναλύσεων.

Προσδιορισμός του κέντρου μάζας ενός ορόφου στο λογισμικό SAP2000 v15.2.1

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για τη διενέργεια των μη γραμμικών στατικών αναλύσεων επιλέγεται ως κόμβος ελέγχου το κέντρο μάζας του ανώτερου διαφράγματος κάθε κατασκευής. Στις κατασκευές που μελετώνται στην εργασία αυτή, στις οποίες υπάρχει απόλυτη συμμετρία κατανομής των μαζών, ο προσδιορισμός του κέντρου μάζας κάθε ορόφου είναι προφανής. Σε περιπτώσεις πολύπλοκων κατασκευών, το κέντρο μάζας του ανώτερου διαφράγματος μπορεί να υπολογιστεί με εκτέλεση μιας ιδιομορφικής ανάλυσης, επιλογή των κόμβων στην επιθυμητή υψομετρική στάθμη και εξάγοντας από το λογισμικό

τις συντεταγμένες των κόμβων αυτών και τις μάζες που κατανέμονται στον καθένα κατά την επίλυση. Οι συντεταγμένες των κόμβων μπορούν να ληφθούν με εκτέλεση των εντολών

$\begin{array}{l} \text{Display} \rightarrow \text{Show Tables} \rightarrow \text{Model Definition} \rightarrow \text{Connectivity Data} \rightarrow \text{Joint Coordinates} \\ \\ \text{Table: Joint Coordinates} \end{array}$

Εξάγοντας τα παραπάνω στοιχεία σε ένα λογιστικό φύλλο Excel, οι συντεταγμένες του κέντρου μάζας ενός ορόφου μπορούν να προκύψουν από τους σταθμικούς μέσους:

$$x_{com} = \frac{\sum (x_i \cdot m_i)}{\sum m_i}$$
 & $y_{com} = \frac{\sum (y_i \cdot m_i)}{\sum m_i}$ (9.1) кац (9.2)

όπου

x_i,y_i: οι συντεταγμένες ενός τυχαίου επιλεγμένου κόμβου.

*m*_i: η μάζα που κατανέμεται κατά τις επιλύσεις στον κόμβο αυτό.

9.4 Μη Γραμμική Ανάλυση Χρονοϊστορίας Φόρτισης Άμεσης Ολοκλήρωσης (Direct Integration Time History Analysis)

Οι μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας φόρτισης αποτελούν τον πιο ρεαλιστικό τύπο ανάλυσης που διαθέτει ένας μηχανικός για την αποτίμηση της ανελαστικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής υπό την επιβολή μιας σεισμικής διέγερσης βάσης. Το λογισμικό παρέχει δύο τύπους μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας φόρτισης, την *ιδιομορφική* μέθοδο (modal method) και τη μέθοδο άμεσης ολοκλήρωσης (direct-integration method).

Στο σύνολο των μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας φόρτισης που διενεργούνται στα πλαίσια της εργασίας αυτής εφαρμόζεται η μέθοδος άμεσης ολοκλήρωσης, η οποία είναι μια μη γραμμική δυναμική μέθοδος, στην οποία ολοκληρώνεται η διαφορική εξίσωση που περιγράφει τη δυναμική απόκριση μιας κατασκευής σε κάθε χρονική στιγμή *t* και η οποία είναι είναι της μορφής:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t) \quad (9.3)$$

όπου

- Μ: Τιμές του μητρώου μάζας.
- *C*: Τιμές του μητρώου απόσβεσης.
- *K*: Τιμές του μητρώου δυσκαμψίας.
- *F*(t): Τιμές των σεισμικών φορτίων που προκύπτουν ως $-M \cdot \alpha_g(t)$ όπου $\alpha_g(t)$ οι τιμές του επιταχυνσιογραφήματος που ορίζεται ως διέγερση βάσης.

Οι μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας φόρτισης χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για την αποτίμηση της αντισεισμικής επάρκειας υφιστάμενων κατασκευών αλλά και τον έλεγχο της ανελαστικής συμπεριφοράς κατασκευών αμέσως μετά το σχεδιασμό τους. Σημειώνεται όμως ότι τα αποτελέσματά τους όμως είναι ευαίσθητα ως προς την επιλογή της διέγερσης βάσης.

9.4.1 Μη γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας φόρτισης στο λογισμικό SAP2000 v15.2.1

Αρχικά ορίζεται η χρονική συνάρτηση (Time Function) που θα επιβληθεί ως διέγερση βάσης με εκτέλεση των επιλογών:

Define \rightarrow **Functions** \rightarrow **Time History** \rightarrow Choose Function Type to Add: **From File** \rightarrow **Add New Function** \rightarrow Επιλογή επιταχυνσιογραφήματος.

Τα επιταχυνσιογραφήματα στο βήμα αυτό εισάγονται σε *g* όπως δίνονται στη βάση NGA.

Function Name	1045L
File Browse File Name Browse [c:\users\dixng\desktop\nine\time histories\d. pulse like\1045I f0.02\\1045I dat Header Lines to Skip 0 Prefix Characters per Line to Skip 0 Number of Points per Line 1 Convert to User Defined View File	Values are:
Function Graph	$\overline{\mathbf{v}}$

Σχήμα 9.12: Εισαγωγή επιταχυνσιογραφήματος ως διέγερση βάσης.

Στη συνέχεια, η Load Case: *G+0.3Q* μετατρέπεται από γραμμική στατική σε μη γραμμική στατική φόρτιση ενός βήματος, όπως ορίστηκε στην ενότητα 9.3.1, ώστε να αποτελέσει την αρχική συνθήκη για τη μη γραμμική δυναμική ανάλυση. Δηλαδή στο φορέα επιβάλλονται πρώτα τα κατακόρυφα φορτία του σεισμικού συνδυασμού φόρτισης στατικά και από εκείνη την εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση ξεκινά η δυναμική ανάλυση.

Τέλος, δημιουργείται η *Load Case* στην οποία ορίζονται τα χαρακτηριστικά της μη γραμμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας φόρτισης με εκτέλεση της σειράς εντολών:

Define \rightarrow Load Cases \rightarrow Add new Load Case \rightarrow Load Case Type: Time History \rightarrow Analysis Type: NonLinear \rightarrow Time History Type: Direct Integration \rightarrow Time History Motion Type: Transient \rightarrow Initial Conditions: Continue From State at End of Nonlinear Case: G+0.3Q \rightarrow Loads Applied: Accel - Load Name: U1 \rightarrow Function: $\delta o \theta \epsilon i \sigma \alpha \chi \rho o v o i \sigma \tau o \rho i \alpha \epsilon \pi \iota \tau \alpha \chi v v \sigma \epsilon \omega v \omega \varsigma$ Time Function \rightarrow Scale Factor: 9.81 \rightarrow Add.

Επισημαίνεται ότι το Load Name: U1 ορίζει τη διεύθυνση στην οποία επιβάλλεται η διέγερση βάσης, ενώ προσοχή πρέπει να δίνεται στο Scale Factor: 9.81 με τον οποίο τα στοιχεία του επιταχυνσιογραφήματος μετατρέπονται από g σε m/s².

Όσον αφορά τα βήματα που θα εκτελέσει η ανάλυση (Time Step Data), στο πεδίο Number of Output Time Steps ορίζεται ο αριθμός των σημείων που απαρτίζουν τη διέγερση βάσης, δηλαδή τη χρονοϊστορία επιταχύνσεων της καταγραφής, ενώ στο πεδίο Output Time Step Size ορίζεται το χρονικό βήμα από σημείο σε σημείο, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.13.

Load Case Name	Notes		Load Case Type	
TH_1045L Se	et Def Name Modify/	Show	Time History	✓ Design
Initial Conditions			Analysis Type	Time History Type
C Zero Initial Conditions - Star	t from Unstressed State		C Linear	C Modal
 Continue from State at End 	of Nonlinear Case G+0.3Q	-	Nonlinear	 Direct Integration
Important Note: Loads from	n this previous case are include	ed in the	- Geometric Nonline	arity Parameters
current ca	20		None	
Modal Load Case			O P-Delta	
Use Modes from Case	IMODAL	<u></u>	C P-Delta plus La	arge Displacements
Accel U1 Accel U1	▼ 1045L ▼ 9.81 1045L 9.81	E	Add Modify	
Accel U1 Accel U1	▼ 1045L ▼ 9.81 1045L 9.81 ameters	E v	Add Modify Delete	
Accel U1 Accel U1 Show Advanced Load Par Time Step Data	▼ 1045L ▼ 9.81 1045L 9.81 9.81 9.81 ameters 9.81 9.81 9.81	× T	Add Modify Delete	- Time History Motion Type
Accel U1 Accel U1 C Show Advanced Load Par Time Step Data Number of Output Time Ste	▼ 1045L ▼ 9.81 1045L 9.81 ameters eps	÷	Add Modify Delete	Time History Motion Type
Accel U1 Accel U1 Show Advanced Load Par Time Step Data Number of Output Time Ste Output Time Step Size		1250 0.02	Add Modify Delete	Time History Motion Type Transient C Periodic
Accel U1 Accel U1 Show Advanced Load Par Time Step Data Number of Output Time Ste Output Time Step Size Dther Parameters		1250 0.02	Add Modify Delete	Time History Motion Type Transient C Periodic
Accel U1 Accel U1 C Show Advanced Load Par Time Step Data Number of Output Time Step Output Time Step Size Dther Parameters Damping	▼ 1045L ▼ 9.81 1045L 9.81 9.81 ameters 9.81 9.81	1250 0.02 Modify/3	Add Modify Delete	-Time History Motion Type Transient Periodic OK
Accel U1 Accel U1 C Show Advanced Load Par Time Step Data Number of Output Time Step Output Time Step Size Other Parameters Damping Time Integration		1250 0.02 Modify/3	Add Modify Delete Show	Time History Motion Type Transient Periodic DK

Σχήμα 9.13: Παράμετροι μη γραμμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας φόρτισης.

Μητρώο απόσβεσης

Για τη διενέργεια των μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων, είναι απαραίτητος ο καθορισμός του μητρώου απόσβεσης κάθε κατασκευής. Το μητρώο απόσβεσης υπολογίζεται ως ένα ποσοστό του μητρώου μάζας συν ένα ποσοστό του μητρώου δυσκαμψίας (ιξώδης αναλογική απόσβεση), δηλαδή ως

$$C_j = c_M M_j + c_K K_j \quad (9.4)$$

όπου

<i>c_M</i> και <i>c_K</i>	οι συντελεστές αναλογίας του μητρώου μάζας και δυσκαμψίας
М	το μητρώο μάζας
К	το ελαστικό μητρώο δυσκαμψίας

Οι συντελεστές *c*_M και *c*_K μπορούν να δοθούν απευθείας από το χρήστη, να υπολογιστούν από το λογισμικό αφού δοθούν από το χρήστη δύο ιδιοπερίοδοι και οι επιθυμητοί λόγοι ιξώδους απόσβεσης για καθεμιά από αυτές ή να δοθούν δύο ιδιοσυχνότητες και οι επιθυμητοί λόγοι ιξώδους απόσβεσης για αυτές. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 9.14 επιλέγεται ο δεύτερος τρόπος.

N	Mass and Stiffness Proportional Damping	if Rest	
	Damping Loefficients	Mass Proportional Coefficient	Stiffness Proportional Coefficient
	C Direct Specification		
	Specify Damping by Period	0.1871	0.0101
	C Specify Damping by Frequency		
	Period Frequency First 2.5146	Damping 0.05 0.05	Recalculate Coefficients
	[ŪK]	Cancel	

Σχήμα 9.14: Ορισμός του μητρώου απόσβεσης.

Οι δύο ιδιοπερίοδοι που δίνονται αντιστοιχούν σε εκείνες τις μεταφορικές ιδιομορφές που εμφανίζουν τα μεγαλύτερα ποσοστά δρώσας ιδιομορφικής μάζας κατά τη διεύθυνση Χ των κατασκευών (παράλληλα στην επιμήκη τους πλευρά), κατά την οποία ασκείται η σεισμική διέγερση βάσης.

Σημειώνεται ότι η απόσβεση ορίζεται ως χαρακτηριστικό της μη γραμμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας φόρτισης και δεν έχει οριστεί ως ιδιότητα των υλικών στο πεδίο Materials.

Μέθοδος Χρονικής Ολοκλήρωσης

Για την άμεση ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη δυναμική συμπεριφορά των κατασκευών σε κάθε χρονική στιγμή *t*, επιλέγεται η μέθοδος **Hilber** - **Hughes** - **Taylor**. Η μέθοδος αυτή καθορίζεται από 3 παραμέτρους γ (gamma), β (beta) και α (alpha) από τις οποίες οι δύο πρώτες δε μπορούν να τροποποιηθούν από το χρήστη και παίρνουν τιμές $\gamma=1/2$ και $\beta=1/4$, ενώ η τελευταία παίρνει τιμές εντός του εύρους - $1/3 \le \alpha \le 0$.

Για μηδενική τιμή του α, η μέθοδος είναι πανομοιότυπη με τη μέθοδο σταθερής επιτάχυνσης (νόμος τραπεζίου) του Newmark, η οποία είναι και η προτεινόμενη μέθοδος ολοκλήρωσης στα εγχειρίδια του λογισμικού. Για μη γραμμικές αναλύσεις άμεσης ολοκλήρωσης και σε περιπτώσεις αδυναμίας σύγκλισης, μπορεί να χρησιμοποιείται μια ελαφρώς αρνητική τιμή για το α, με την οποία επιβάλλεται αυξημένη απόσβεση στις υψίσυχνες ιδιομορφές, δηλαδή στις ιδιομορφές που αντιστοιχούν σε μικρές περιόδους, ώστε να μειώνεται η συμμετοχή τους στη συνολική απόκριση κατά τη μη γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας φόρτισης άμεσης ολοκλήρωσης. Ενώ για μηδενική τιμή του α επιτυγχάνεται καλύτερη ακρίβεια, στις περιπτώσεις που εμφανίζονται ισχυρές δονήσεις στο πεδίο υψηλών συχνοτήτων, μια τιμή του α=-1/3, τείνει να αφαιρέσει τη συμμετοχή ιδιομορφών που αντιστοιχούν σε περιόδους μεγέθους μέχρι και 10 φορές το χρονικό βήμα. Στις περιπτώσεις αυτές προτείνεται στα εγχειρίδια του λογισμικού να επιχειρούνται πρώτα μικρότερες τιμές για το α, της τάξης του -1/24 ή -1/48 και να ελέγχεται εάν επιτυγχάνεται σύγκλιση.

Τέλος, αξίζει να γίνει μια αναφορά για τη μέθοδο γραμμικής επιτάχυνσης του Newmark, δηλαδή για γ=1/2 και β=1/6 . Η μέθοδος του Newmark είναι σταθερή χωρίς προϋποθέσεις μόνο για τιμές παραμέτρων $2\beta \ge \gamma \ge \frac{1}{2}$. Όταν το β λαμβάνει την τιμή 1/6, η μέθοδος εμφανίζει σταθερότητα υπό προϋποθέσεις και γίνεται ασταθής όταν $\frac{4}{17} > 2\sqrt{3}/_{2\pi}$, όπου dt είναι το χρονικό βήμα της ανάλυσης και T είναι η μικρότερη ιδιοπερίοδος της κατασκευής η οποία διεγείρεται από τη φόρτιση. Για τις περιπτώσεις λοιπόν που χρησιμοποιείται η μέθοδος γραμμικής επιτάχυνσης του *Newmark*, η μικρότερη αυτή περίοδος μπορεί να υπολογίζεται από ιδιομορφική ανάλυση, ώστε να δίνονται κατάλληλες τιμές στο χρονικό βήμα (επαρκώς μεγάλες) και να μη δημιουργούνται προβλήματα στη σύγκλιση.

Τα παραπάνω σχόλια σχετικά με τις μεθόδους χρονικής ολοκλήρωσης τεκμηριώνονται στα εγχειρίδια του λογισμικού.

9.5 Ισοδύναμο Μονοβάθμιο Σύστημα & Φάσμα Ικανότητας

Μετά την εκτέλεση των μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας φόρτισης και τον υπολογισμό της στοχευόμενης μετακίνησης κάθε κατασκευής για κάθε σεισμική καταγραφή, πραγματοποιείται αποτίμηση της ανελαστικής συμπεριφοράς των κατασκευών σε όρους πλαστιμοτήτων.

Η αποτίμηση της ανελαστικής συμπεριφοράς ενός συστήματος πολλών ελευθεριών κίνησης (ΣΠΕΚ) σε όρους πλαστιμοτήτων, πραγματοποιείται με τη δημιουργία ενός ισοδύναμου συστήματος μίας ελευθερίας κίνησης (ΣΜΕΚ), τα χαρακτηριστικά του οποίου υπολογίζονται με βάση την καμπύλη ικανότητας για μια δεδομένη κατανομή φόρτισης.

Στην προκειμένη, για κάθε κατασκευή κατασκευάζονται δύο ισοδύναμα μονοβάθμια συστήματα, ένα για ομοιόμορφη κατανομή φόρτισης και ένα για κατανομή με τη μορφή της πρώτης (μεταφορικής) ιδιομορφής κατά την εξεταζόμενη διεύθυνση.



Σχήμα 9.15: Κατανομές φόρτισης; (a) Ομοιόμορφη, (b) ιδιομορφική (*LH Λογισμική*).

Γενικά, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η κατανομή των φορτίων στους ορόφους γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση (9.5):

$$F_i = V \frac{m_i \varphi_i}{\sum_j m_j \varphi_j} \quad (9.5)$$

Όπου *m_i* η μάζα του ορόφου *i* και *V* = *Σ F_i* είναι η τέμνουσα βάσης. Οι συντελεστές *φ_i* δηλώνουν την κατανομή των μετακινήσεων στους ορόφους και κανονικοποιούνται έτσι ώστε η τιμή στην κορυφή (επίπεδο του κόμβου ελέγχου) να ισούται με μονάδα: *φ_{top}* = 1,0.

Σημειώνεται ότι ενώ για την ιδιομορφική κατανομή οι συντελεστές φi παίρνουν τις τιμές τους από τις μετακινήσεις (το σχήμα) της ιδιομορφής, για την ομοιόμορφη κατανομή φόρτισης, όπου τα σεισμικά φορτία *F_i* έχουν την ίδια τιμή σε όλους τους ορόφους, η εξίσωση (9.5) παίρνει τη μορφή:

$$m_1 \cdot \varphi_1 = m_2 \cdot \varphi_2 = \dots = m_{top} \cdot \varphi_{top} \quad \text{if} \quad \varphi_i = \frac{m_{top}}{m_i} \cdot \varphi_{top} \quad (9.6)$$

Εάν η κατανομή των φορτίων γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση (9.5) και φ_{top} = 1,0, η αντιστοιχία μεταξύ του πολυβάθμιου συστήματος και του ισοδύναμου μονοβάθμιου για όλα τα μεγέθη (δυνάμεις, μετακινήσεις, ενέργεια κ.λπ.) γίνεται με τη σχέση:

$$Q = \Gamma \cdot Q^* \quad (9.7)$$

όπου

Q* μέγεθος στο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα (π.χ. δύναμη F*, μετακίνηση δ*)

- Q αντίστοιχο μέγεθος στο πολυβάθμιο σύστημα (π.χ. τέμνουσα βάσης V, μετακίνηση κορυφής Δ)
- Γ συντελεστής συμμετοχής που δίνεται από τη σχέση:

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \varphi_i}{\sum m_i {\varphi_i}^2} \quad (9.8)$$

Ο αριθμητής της παραπάνω σχέσης είναι ίσος με τη μάζα του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος, δηλαδή:

$$m^* = \sum m_i \varphi_i$$
 (9.9)

Σημειώνεται ότι αφού τόσο οι δυνάμεις όσο και οι μετακινήσεις ακολουθούν τον ίδιο κανόνα μετασχηματισμού, η δυσκαμψία του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος είναι ίδια με αυτή του πολυβαθμίου. Η ιδιοπερίοδος όμως του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος δεν ισούται με την 1^η ιδιοπερίοδο του πολυβαθμίου, ακόμα και εάν οι συντελεστές *φ*_i ισούνται με τις αντίστοιχες τιμές της πρώτης ιδιομορφής.

Η σχέση (9.7) χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της καμπύλης ικανότητας του κτιρίου σε φάσμα ικανότητας (capacity spectrum) του ισοδύναμου μονοβάθμιου μορφής ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectrum – Φάσμα απόκρισης Επιτάχυνσης-Μετακίνησης) με βάση τις σχέσεις:

$$S_a = \frac{V}{a \cdot m_{o\lambda}}$$
 και $S_d = \frac{\Delta}{\Gamma \cdot \varphi_{top}}$ (9.10) και (9.11)

όπου

V η τέμνουσα βάσης του πολυβαθμίου.

*m*_{ολ} η συνολική μάζα του πολυβαθμίου.

α ποσοστό συνολικής μάζας που συμμετέχει στη δυναμική απόκριση της κατασκευής για
 την αναμενόμενη μορφή παραμόρφωσης, που δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{\left[\sum m_i \varphi_i\right]^2}{m_{o\lambda} \cdot \sum m_i \varphi_i^2} = \frac{\Gamma \cdot \sum m_i \varphi_i}{m_{o\lambda}} = \Gamma \frac{m^*}{m_{o\lambda}} \quad (9.12)$$

Δ η μετακίνηση οροφής.



Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές των συντελεστών *α* για διάφορους τρόπους συμπεριφοράς κτιρίων.



Διγραμμικοποίηση του φάσματος ικανότητας

Για τον προσδιορισμό της ιδιοπεριόδου του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος αλλά και για τον καθορισμό ενός συμβατικού σημείου διαρροής με βάση το οποίο θα υπολογιστούν οι πλαστιμότητες.

Η μετακίνηση διαρροής του ιδεατού συστήματος ΣΜΕΚ υπολογίζεται ως $\delta_y^* = Sd_y$, όπου

$$Sd_{y} = 2\left(d_{m}^{*} - \frac{E_{m}}{Sa_{y}^{*}}\right)$$
 (9.13)

και

Sdy η μετακίνηση διαρροής του διγραμμικοποιημένου φάσματος ικανότητας.

- *d^{*}_m* η μέγιστη μετακίνηση του διγραμμικοποιημένου φάσματος ικανότητας, όπως έχει προκύψει από μη γραμμική στατική ανάλυση (*Pushover*).
- *E_m* η πραγματική ενέργεια παραμόρφωσης έως τη δημιουργία του πλαστικού μηχανισμού, δηλαδή το εμβαδό του φάσματος ικανότητας.
- *Sa^{*}*, η μέγιστη επιτάχυνση του φάσματος ικανότητας.

Όσον αφορά το τελευταίο, επισημαίνεται ότι για το διγραμμικό φάσμα ικανότητας θεωρείται ελαστικό-ιδεωδώς πλαστικό με επιτάχυνση διαρροής εκείνη που αντιστοιχεί στο σημείο με μετακίνηση d^{*}_m, θεώρηση που υιοθετείται και στην §B.3 στο Παράρτημα Β του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3.



Σχήμα 9.16: Κατασκευή ιδεατού διγραμμικού φάσματος ικανότητας.

Η ιδιοπερίοδος του ισοδύναμου συστήματος μιας ελευθερίας κίνησης υπολογίζεται ως

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{Sd_y}{Sa_y^*}}$$
 (9.14)

Συνεπώς, μετά την εκτέλεση των μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας φόρτισης εξάγεται από κάθε ανάλυση η στοχευόμενη μετακίνηση του πολυβάθμιου (πραγματικού) συστήματος δ^{*}_{max}, έπειτα, σύμφωνα με τη σχέση (9.7) διαιρείται με το συντελεστή συμμετοχής Γ για να γίνει η μετάβαση στο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα και η απαιτούμενη πλαστιμότητα προκύπτει ως:

$$\mu = \delta^*_{\max} / \delta_y^* \quad (9.15)$$

<u>Κεφάλαιο 10</u> ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ

10.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται 10 παλμικές και 5 μη παλμικές καταγραφές από το σεισμικό γεγονός στο Northridge το 1994, οι οποίες επιλέγονται για να επιβληθούν ως διέγερση βάσης στις δύο κατασκευές σε μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας φόρτισης. Για τις καταγραφές αυτές παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της επιτάχυνσης, η χρονοϊστορία της ταχύτητας και τα ελαστικά φάσματα ψευδο-επιτάχυνσης και ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5%.

Για τις παλμικές καταγραφές, σχεδιάζεται πάνω στις χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης και της ταχύτητας ο δεσπόζων παλμός και αναγράφεται πάνω στα ελαστικά φάσματα απόκρισης της ψευδο-επιτάχυνσης και της ψευδο-ταχύτητας η περίοδός του. Ακόμα, στη χρονοϊστορία ταχύτητας των παλμικών καταγραφών αναγράφεται ο συντελεστής συσχέτισης *r* κάθε παλμού με την αρχική εδαφική κίνηση.

Για κάθε καταγραφή παρουσιάζεται το όνομα της καταγραφής όπως δίνεται στη βάση δεδομένων NGA, το όνομα του καταγραφικού σταθμού, η κοντινότερη απόσταση του καταγραφικού σταθμού από το ρήγμα (ClstD) και η γωνία καταγραφής μετρημένη ωρολογιακά από το βορρά (αζιμούθιο της διεύθυνσης καταγραφής).

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

10.2 Παλμικές Καταγραφές





















10.3 Μη παλμικές Καταγραφές











<u>Κεφάλαιο 11</u>

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΩΝ & ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

11.1 Εισαγωγή

11.2 Ιδιομορφές ταλάντωσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι ιδιομορφές ταλάντωσης των δύο κατασκευών και οι συντελεστές ιδιομορφικής μάζας που τους αντιστοιχούν για μετακίνηση κατά *X*, μετακίνηση κατά *Y* και στροφή περί τον κατακόρυφο άξονα *Z*, όπως εξάγονται από το λογισμικό *SAP2000 v15.2.1*. Αξίζει να γίνει η παρατήρηση ότι οι ιδιοπερίοδοι που προκύπτουν από το υπολογιστικό προσομοίωμα που κατασκευάζεται για την αποτίμηση των κατασκευών είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του προσομοιώματος με βάση το οποίο έγινε η διαστασιολόγηση αυτών. Αυτό έγκειται στο γεγονός ότι η ενεργός δυσκαμψία των μελών (*EI*)_{eff} = $M_y \cdot L_v/3\partial_y$ που θεωρείται στο υπολογιστικό προσομοίωμα της αποτίμησης είναι σημαντικά μικρότερη από το 50% της γεωμετρικής δυσκαμψίας που είχε υποτεθεί κατά το σχεδιασμό, δηλαδή για την αποτίμηση σε όρους παραμορφώσεων οι κατασκευών μπορούν να βρεθούν στο *Παράρτημα Β* της εργασίας αυτής.

11.2.1 Τριώροφη κατασκευή

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ιδιομορφές της τριώροφης κατασκευής για το άθροισμα των οποίων επιτυγχάνονται ποσοστά δρώσας ιδιομορφικής μάζας μεγαλύτερα από το 90% της συνολικής μάζας, σε κάθε διεύθυνση.

15 1.4	Ιδιοπερίοδος		Ποσοστό	ι Δρώσας Ιδ	διομορφική	ίς Μάζας	
ιοιομορφη	[sec]	X _i [%]	ΣX _i [%]	Y _i [%]	Σ Υ _i [%]	RZ _i [%]	ΣRZ _i [%]
1	1.035946	0	0	83.106	83.106	0	0
2	0.951895	85.554	85.554	0	83.106	0	0
3	0.844693	0	85.554	0	83.106	85.218	85.218
4	0.342019	0	85.554	10.202	93.307	0	85.218
5	0.300782	11.149	96.704	0	93.307	0	85.218
6	0.285948	0	96.704	0	93.307	9.417	94.635

Στη συνέχεια παρουσιάζονται σχηματικά οι τρείς πρώτες ιδιομορφές της κατασκευής.



Σχήμα 11.1: Τριώροφη κατασκευή - 1η ιδιομορφή - Μεταφορική κατά Υ

& 2^η ιδιομορφή – Μεταφορική κατά Χ.



Σχήμα 11.2: Τριώροφη κατασκευή - 3η ιδιομορφή – Στρεπτική.

11.2.2 Εννιαώροφη κατασκευή

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ιδιομορφές της εννιαώροφης κατασκευής για το άθροισμα των οποίων επιτυγχάνονται ποσοστά δρώσας ιδιομορφικής μάζας μεγαλύτερα από το 90% της συνολικής μάζας, σε κάθε διεύθυνση.

Ιδιουορφά	Ιδιοπερίοδος		Ποσοστό	α Δρώσας Ιά	διομορφική	ής Μάζας	
ιοιομορφη	[sec]	X _i [%]	ΣX _i [%]	Y _i [%]	ΣY _i [%]	RZ _i [%]	ΣRZ _i [%]
1	2.583429	0	0	0.7838	0.7838	0	0
2	2.494179	0.79994	0.79994	0	0.7838	0	0
3	2.068274	0	0.79994	0	0.7838	0.80655	0.80655
4	0.903602	0	0.79994	0.11216	0.89596	0	0.80655
5	0.8369	0.10474	0.90468	0	0.89596	0	0.80655
6	0.713318	0	0.90468	0	0.89596	0.103	0.90955
7	0.517894	0	90.468	3.921	93.517	0	90.955

Στη συνέχεια παρουσιάζονται σχηματικά οι τρείς πρώτες ιδιομορφές της κατασκευής.



Σχήμα 11.3: Σχήμα 11.1: Εννιαώροφη κατασκευή - 1η ιδιομορφή - Μεταφορική κατά Υ

& 2η ιδιομορφή – Μεταφορική κατά Χ.



Σχήμα 11.4: Εννιαώροφη κατασκευή - 3η ιδιομορφή – Στρεπτική.

11.3 Καμπύλες Ικανότητας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι καμπύλες ικανότητας (capacity curves) των δύο κατασκευών, οι οποίες υπολογίζονται μέσω μη γραμμικών στατικών αναλύσεων (pushover analysis) για ομοιόμορφη και για ιδιομορφική κατανομή φόρτισης καθ' ύψος των ορόφων. Για την ιδιομορφική κατανομή φόρτισης επιλέγεται το σχήμα της δεσπόζουσας ιδιομορφής κατά την υπό εξέταση διεύθυνση *X*.



11.3.1 Τριώροφη κατασκευή




11.4 Ισοδύναμα Μονοβάθμια Συστήματα

Για τις δύο κατασκευές κατασκευάζονται με βάση τις καμπύλες ικανότητας για τις δύο κατανομές φόρτισης τα ισοδύναμα μονοβάθμια συστήματα, με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην §9.5. Για τα ισοδύναμα αυτά συστήματα μιας ελευθερίας κίνησης (*ΣΜΕΚ*) υπολογίζονται τα φάσματα ικανότητας και διγραμμικοποιούνται σε ελαστικήιδεωδώς πλαστική μορφή, όπως ορίζεται στην § Β.3 στο παράρτημα Β του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 1. Μετά τη διγραμμικοποίηση των φασμάτων ικανότητας υπολογίζονται οι ιδιοπερίοδοι των ισοδύναμων μονοβάθμιων συστημάτων.

11.4.1 Τριώροφη κατασκευή

11.4.1.1Ομοιόμορφη κατανομή φόρτισης

Όροφος	Μάζα (ton)	$\boldsymbol{\varphi}_i$	$m_i \cdot \varphi_i$	$m_i \cdot \varphi_i^2$
0	170.96	1.00	170.96	170.96
1	170.96	1.00	170.96	170.96
2	170.12	1.00	170.12	170.12
Σ	512.04		512.04	512.04

Г	m [*] (ton)	α
1.00	512.04	1.00

E _m *	$S_{ay}^{*}(m/s^{2})$	d _y * (m)	$d_m^*(m)$
0.705	4.149	0.147	0.244

_	T	(sec)
	1.1	8418



11.4.1.2 Ιδιομορφική κατανομή φόρτισης

Όροφος	Mάζα (ton)	$\boldsymbol{\varphi}_i$	$m_i \cdot \varphi_i$	$m_i \cdot \varphi_i^2$			
0	170.96	0.32	54.43	17.33			
1	170.96	0.73	125.33	91.88			
2	170.12	1.00	170.12	170.12			
Σ	512.04		349.89	279.34			
	Г	m [*] (ton)	α				
	1.25	349.891	0.86				
	* *	. 7 *	*				
<i>E</i> ,	n S _{ay} (m)	s^2) d_y	(m) d _m	(m)			
0.7	12 4 363	₹ 01	33 02	29			
	12 1.503	, 0.1					
	12 1.500	7 * (a.c.)		-23			
		<u>T[*] (sec)</u>		-23			
		7[*] (sec) 1.09872					
		7[*] (sec) 1.09872					
		7[*] (sec) 1.09872					
	-	T[*] (sec) 1.09872					
	-	<i>T[*] (sec)</i> 1.09872					
		<u>T* (sec)</u> 1.09872				-	
		<u>T* (sec)</u> 1.09872					
		<u>T* (sec)</u> 1.09872					
		<u>T* (sec)</u> 1.09872					
		<u>T* (sec)</u> 1.09872					
		<u>T* (sec)</u> 1.09872					
		<u>T* (sec)</u> 1.09872					
		<u>T* (sec)</u> 1.09872					
		<u>T* (sec)</u> 1.09872			Φάσι	μα Ικανό	τητας

11.4.2 Εννιαώροφη κατασκευή

11.4.2.1 Ομοιόμορφη κατανομή φόρτισης

Όροφος	Μάζα (ton)	$\boldsymbol{\varphi}_i$	$m_i \cdot \varphi_i$	$m_i \cdot \varphi_i^2$
0	175.84	1.00	175.84	175.84
1	175.84	1.00	175.84	175.84
2	175.84	1.00	175.84	175.84
3	175.84	1.00	175.84	175.84
4	175.84	1.00	175.84	175.84
5	175.84	1.00	175.84	175.84
6	175.84	1.00	175.84	175.84
7	175.84	1.00	175.84	175.84
8	172.56	1.00	172.56	172.56
Σ	1579.28		1579.28	1579.28

Г	m [*] (ton)	α
1.00	1579.28	1.00

E_m^*	S_{ay}^{*} (m/s ²)	d _y * (m)	d_m [*] (m)
0.435	1.304	0.307	0.487

T^{*} (sec) 3.04926



11.4.2.2 Ιδιομορφική κατανομή φόρτισης

Όροφος	Mάζα (ton)	${oldsymbol arphi}_i$	$m_i \cdot \varphi_i$	$m_i \cdot \varphi_i^2$
0	175.84	0.09	15.70	1.40
1	175.84	0.24	41.54	9.81
2	175.84	0.39	67.90	26.22
3	175.84	0.53	93.41	49.62
4	175.84	0.67	117.24	78.17
5	175.84	0.79	138.75	109.49
6	175.84	0.89	156.53	139.34
7	175.84	0.96	169.03	162.49
8	172.56	1.00	172.56	172.56
Σ	1579.28		972.67	749.11

Г	m [*] (ton)	α
1.30	972.674113	0.80

E_m^*	$S_{ay}^{*}(m/s^{2})$	d _y * (m)	d _m * (m)
0.354	1.292	0.243	0.395

T^{*} (sec) 2.72467



11.5 Σημεία μέγιστης σεισμικής απόκρισης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι μέγιστες μετακινήσεις οροφής και οι μέγιστες τέμνουσες βάσεις που προκύπτουν από τις μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας φόρτισης, για τις δύο κατασκευές. Τα σημεία μέγιστης μετακίνησης (Δ_{top} , V_b^{max}) ανάγονται στα δύο ισοδύναμα μονοβάθμια συστήματα που έχουν δημιουργηθεί για κάθε κατασκευή, ώστε να είναι δυνατή η παράστασή τους πάνω στα αντίστοιχα φάσματα ικανότητας. Με βάση τα διγραμμικοποιημένα φάσματα ικανότητας, υπολογίζονται οι τιμές της απαιτούμενης πλαστιμότητας "μ" και του αναπτυσσόμενου συντελεστή συμπεριφοράς " q_y ". Για όλα τα παραπάνω συστήματα υπολογίζονται οι λόγοι " μ/q_y ". Οι πλαστιμότητες υπολογίζονται από τα σημεία μέγιστης τέμνουσας για κάθε καταγραφή.

11.5.1 Τριώροφη κατασκευή

11.5.1.1 Ομοιόμορφη κατανομή φόρτισης Σημεία μέγιστης μετακίνησης (Δ_{top}^{max},V_b)

	ΣΠΕΚ		ΣΜΕΚ		
Κατανοαφή	Δ_{top}^{max}	V_{b}	S _d	Sa	Ш
καταγραφη	(m)	(kN)	(m)	(m/s²)	μ
982L	0.327	1998.9	0.327	3.904	2.219
983L	0.148	1470.8	0.148	2.872	1.003
1004T	0.331	1669.2	0.331	3.260	2.246
1045L	0.346	2090.1	0.346	4.082	2.347
1051T	0.244	1961.2	0.244	3.830	1.658
1054L	0.299	2054.9	0.299	4.013	2.031
1063L	0.465	1907.9	0.465	3.726	3.155
1084L	0.345	1704.9	0.345	3.330	2.344
1085L	0.219	1708.7	0.219	3.337	1.484
1086T	0.235	1769.1	0.235	3.455	1.597

Παλμικές Καταγραφές

Λεζάντα: ΜΗ Παλμικές Καταγραφές

	ΣΠΕΚ		ΣΜΕΚ		
Καταγραφή	Δ_{top}^{max}	V _b (kN)	S _d (m)	S _a (m/s ²)	μ
1010L	0.074	1110.0	0.074	2.168	0.502
1039T	0.056	834.6	0.056	1.630	0.377
1048L	0.082	898.6	0.082	1.755	0.558
1049L	0.066	429.0	0.066	0.838	0.446
1078L	0.066	1173.1	0.066	2.291	0.451



Φάσμα Ικανότητας - Ομοιόμορφη κατανομή φόρτισης (Δ_{top}^{max} ,V $_{b}$)

Σημεία μέγιστης τέμνουσας βάσης (Δ_{top},V_b^{max})

	ΣΠ	EK	ΣΝ	ΣΜΕΚ	
Καταγραφή	Δ _{top} (m)	V _b ^{max} (kN)	S _d (m)	S _a (m/s ²)	q _y
982L	0.2138	2078.3	0.213	4.058	0.978
983L	0.07699	1971.7	0.076	3.850	0.928
1004T	0.10768	2026.4	0.107	3.957	0.953
1045L	0.26474	2158.0	0.264	4.214	1.015
1051T	0.04422	2076.7	0.044	4.055	0.977
1054L	0.2993	2055.8	0.299	4.015	0.967
1063L	0.40291	2247.2	0.402	4.388	1.057
1084L	0.33338	2110.9	0.333	4.122	0.993
1085L	0.15872	2003.8	0.158	3.913	0.943
1086T	0.06434	2493.5	0.064	4.869	1.173

Παλμικές

Μη Παλμικές

_	ΣΠΕΚ		ΣΜΕΚ		
Καταγραφή	Δ_{top} (m)	V _b ^{max} (kN)	S _d (m)	S _a (m/s ²)	q _y
1010L	0.074	1110.0	0.074	2.168	0.523
1039T	0.042	850.56	0.042	1.661	0.400
1048L	0.058	1315.9	0.058	2.570	0.620
1049L	0.053	1320.6	0.053	2.579	0.622
1078L	0.066	1218.4	0.066	2.379	0.574



Φάσμα Ικανότητας - Ομοιόμορφη κατανομή φόρτισης (Δ_{top} , V_b^{max})

11.5.1.2 Ιδιομορφική κατανομή φόρτισης Σημεία μέγιστης μετακίνησης (Δ_{top}^{max},V_b)

	_				
	ΣΠΕΚ		ΣΜΕΚ		
Καταγραφή	Δ_{top}^{max}	V _b (kN)	S _d (m)	S _a (m/s ²)	μ
982L	0.327	1998.9	0.261	4.561	1.957
983L	0.148	1470.8	0.118	3.356	0.885
1004T	0.331	1669.2	0.264	3.809	1.981
1045L	0.346	2090.1	0.276	4.769	2.070
1051T	0.244	1961.2	0.195	4.475	1.462
1054L	0.299	2054.9	0.239	4.689	1.791
1063L	0.465	1907.9	0.371	4.353	2.782
1084L	0.345	1704.9	0.276	3.890	2.067
1085L	0.219	1708.7	0.175	3.899	1.309
1086T	0.235	1769.1	0.188	4.037	1.409

Παλμικές

Mŋ	Παλμικές	
----	----------	--

	ΣΠΕΚ		ΣΜΕΚ		
Καταγραφή	Δ_{top}^{max}	V _b (kN)	S _d (m)	S _a (m/s ²)	μ
1010L	0.074	1110.0	0.059	2.533	0.443
1039T	0.055	834.6	0.044	1.904	0.333
1048L	0.082	898.6	0.066	2.050	0.492
1049L	0.0658	429.0	0.0525	0.979	0.394
1078L	0.066	1173.1	0.053	2.677	0.398



Φάσμα Ικανότητας - Ιδιομορφική κατανομή φόρτισης (Δ_{top}^{max}, V_b)

Σημεία μέγιστης τέμνουσας βάσης (Δ_{top},V_b^{max})

Παλμικές							
		ΣΙ	ПЕК	ΣN	IEK		
	Καταγραφή	Δ _{top} (m)	V _b ^{max} (kN)	S _d (m)	S _a (m/s ²)	q _y	
	982L	0.214	2078.4	0.171	4.742	1.087	
	983L	0.077	1971.7	0.061	4.499	1.031	
	1004T	0.108	2026.5	0.086	4.624	1.060	
	1045L	0.265	2158.0	0.211	4.924	1.129	
	1051T	0.044	2076.8	0.035	4.739	1.086	
	1054L	0.299	2055.9	0.239	4.691	1.075	
	1063L	0.403	2247.3	0.322	5.128	1.175	
	1084L	0.333	2111.0	0.266	4.817	1.104	
	1085L	0.159	2003.9	0.127	4.572	1.048	
	1086T	0.064	2493.6	0.051	5.690	1.304	

Μη Παλμικές

	ΣΠΕΚ		ΣΜΕΚ		
Καταγραφή	Δ _{top} (m)	V _b ^{max} (kN)	S _d (m)	S _a (m/s ²)	q _y
1010L	0.074	1110.0	0.059	2.533	0.581
1039T	0.042	850.6	0.034	1.941	0.445
1048L	0.058	1315.9	0.046	3.003	0.688
1049L	0.053	1320.6	0.043	3.013	0.691
1078L	0.066	1218.4	0.053	2.780	0.637



Φάσμα Ικανότητας - Ιδιομορφική κατανομή φόρτισης (Δ_{top} , V_{b}^{max})

11.5.2 Εννιαώροφη κατασκευή

11.5.2.1 Ομοιόμορφη κατανομή φόρτισης Σημεία μέγιστης μετακίνησης (Δ_{τορ}^{max},V_b)

	_				
	ΣΓ	1EK	Σ	MEK	
Καταγραφή	Δ_{top}^{max}	V _b (kN)	S _d (m)	S _a (m/s ²)	μ
982L	0.529	1530.0	0.529	0.969	1.721
983L	0.443	1582.6	0.443	1.002	1.442
1004T	0.394	136.3	0.394	0.086	1.284
1045L	1.136	564.8	1.136	0.358	3.698
1051T	0.239	54.6	0.239	0.035	0.778
1054L	0.281	1128.0	0.281	0.714	0.914
1063L	0.697	645.6	0.697	0.409	2.270
1084L	0.756	401.6	0.756	0.254	2.462
1085L	0.591	260.4	0.591	0.165	1.924
1086T	0.555	61.3	0.555	0.039	1.807

Μη Παλμικές

	ΣΠΕΚ		ΣΝ		
Καταγραφή	Δ_{top}^{max}	V _b (kN)	S _d (m)	S _a (m/s ²)	μ
1010L	0.163	1203.9	0.163	0.762	0.531
1039T	0.134	832.1	0.134	0.527	0.435
1048L	0.256	1391.3	0.256	0.881	0.833
1049L	0.116	69.1	0.116	0.044	0.377
1078L	0.106	124.8	0.106	0.079	0.346



Φάσμα Ικανότητας - Ομοιόμορφη κατανομή φόρτισης (Δ_{top}^{max} , V_b)

Σημεία μέγιστης τέμνουσας βάσης (Δ_{top}, V_b^{max})

Παλμικές						
	ΣΙ	ПЕК	ΣΝ	1EK		
Καταγραφή	Δ _{top} (m)	V _b ^{max} (kN)	S _d (m)	S _a (m/s ²)	q _y	
982L	0.328	2423.6	0.328	1.535	1.177	
983L	0.221	2363.3	0.221	1.496	1.147	
1004T	0.002	2209.2	0.002	1.399	1.073	
1045L	0.091	2497.7	0.091	1.582	1.213	
1051T	0.101	2503.3	0.101	1.585	1.215	
1054L	0.256	1598.8	0.256	1.012	0.776	
1063L	0.412	3008.6	0.412	1.905	1.461	
1084L	0.300	2676.6	0.300	1.695	1.300	
1085L	0.320	2613.7	0.320	1.655	1.269	
1086T	0.200	2805.1	0.200	1.776	1.362	

	_	<u>٦</u>		,
N/In		~ ~ .	1112	cr
IVIII		1/1	11 N	c.u
••••			~~~ ~	~ 7

	ΣΙ	ТЕК	ΣN	1EK	
Καταγραφή	Δ _{top} (m)	V _b ^{max} (kN)	S _d (m)	S _a (m/s ²)	q _y
1010L	0.160	1264.3	0.160	0.801	0.614
1039T	0.133	841.8	0.133	0.533	0.409
1048L	0.245	1421.9	0.245	0.900	0.690
1049L	0.051	1050.1	0.051	0.665	0.510
1078L	0.021	774.7	0.021	0.491	0.376



Φάσμα Ικανότητας - Ομοιόμορφη κατανομή φόρτισης (Δ_{top} , V_{b}^{max})

11.5.2.2 Ιδιομορφική κατανομή φόρτισης Σημεία μέγιστης μετακίνησης (Δ_{top}^{max},V_b)

	ΣΓ	1EK	ΣΜΕΚ		
Καταγραφή	Δ_{top}^{max}	V _b (kN)	S _d (m)	S _a (m/s ²)	μ
982L	0.529	1530.0	0.407	1.211	1.676
983L	0.443	1582.6	0.341	1.253	1.404
1004T	0.394	136.3	0.304	0.108	1.251
1045L	1.136	564.8	0.875	0.447	3.602
1051T	0.239	54.6	0.184	0.043	0.757
1054L	0.281	1128.0	0.216	0.893	0.891
1063L	0.697	645.6	0.537	0.511	2.211
1084L	0.756	401.6	0.582	0.318	2.398
1085L	0.591	260.4	0.455	0.206	1.874
1086T	0.555	61.3	0.427	0.049	1.760

Παλμικές Καταγραφές

Μη Παλμικές Καταγραφές

	ΣΠΕΚ		ΣΜΕΚ		
Καταγραφή	Δ_{top}^{max}	V _b (kN)	S _d (m)	S _a (m/s ²)	μ
1010L	0.163	1203.9	0.126	0.953	0.517
1039T	0.134	832.1	0.103	0.659	0.424
1048L	0.256	1391.3	0.197	1.102	0.811
1049L	0.116	69.1	0.089	0.055	0.367
1078L	0.106	124.8	0.082	0.099	0.337



Φάσμα Ικανότητας - Ιδιομορφική κατανομή φόρτισης (Δ_{top}^{max}, V_b)

Σημεία μέγιστης τέμνουσας βάσης (Δ_{top}, V_b^{max})

Παλμικες						
	ΣΓ	1EK	ΣΝ	ΣΜΕΚ		
Καταγραφή	Δ _{top} (m)	V _b ^{max} (kN)	S _d (m)	S _a (m/s ²)	q _y	
982L	0.328	2423.6	0.253	1.919	1.486	
983L	0.221	2363.3	0.170	1.871	1.449	
1004T	0.002	2209.2	0.001	1.749	1.354	
1045L	0.091	2497.7	0.070	1.978	1.531	
1051T	0.101	2503.3	0.078	1.982	1.535	
1054L	0.256	1598.8	0.197	1.266	0.980	
1063L	0.412	3008.6	0.317	2.382	1.844	
1084L	0.300	2676.6	0.231	2.119	1.641	
1085L	0.320	2613.7	0.247	2.069	1.602	
1086T	0.200	2805.1	0.154	2.221	1.720	

Παλμικές

	–)	,
Min	ιιαλι	IIKEC
	i i i care	uncs

	ΣΠΕΚ		ΣΜΕΚ		
Καταγραφή	Δ _{top} (m)	V _b ^{max} (kN)	S _d (m)	S _a (m/s ²)	q _y
1010L	0.160	1264.3	0.123	1.001	0.775
1039T	0.133	841.8	0.102	0.667	0.516
1048L	0.245	1421.9	0.189	1.126	0.872
1049L	0.051	1050.1	0.040	0.831	0.644
1078L	0.021	774.7	0.016	0.613	0.475



Φάσμα Ικανότητας - Ιδιομορφική κατανομή φόρτισης (Δ_{top} , V_b^{max})

Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις οι μη παλμικές καταγραφές δίνουν τιμές πλαστιμότητας και συντελεστή συμπεριφοράς μικρότερες της μονάδας. Ακόμα, για τις παλμικές καταγραφές παρατηρείται ότι μεγαλύτερες πλαστιμότητες προκύπτουν από τα ισοδύναμα μονοβάθμια συστήματα για ομοιόμορφη κατανομή φόρτισης, από τα ισοδύναμα μονοβάθμια συστήματα για ιδιομορφική κατανομή φόρτισης προκύπτουν μεγαλύτεροι συντελεστές συμπεριφοράς.

11.6 Διαγράμματα " $\mu/q_y - T/T_p$ "

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας φόρτισης, υπολογίζονται οι λόγοι πλαστιμότητας προς συντελεστή συμπεριφοράς μ/q_y που αναπτύσσονται από κάθε καταγραφή και δείχνεται σχηματικά η κατανομή τους ως προς το λόγο της περιόδου κάθε μονοβάθμιου συστήματος προς την περίοδο του δεσπόζοντος παλμού κάθε καταγραφής, δηλαδή *T/T*_p.

11.6.1 Τριώροφη κατασκευή

11.6.1.1 Ομοιόμορφη κατανομή φόρτισης

T [*] (sec)	ΣΜΕΚ - Ομοιόμορφη κατανομή					
1.18418	μ	q _y	T _p (sec)	T/Tp	µ/qy	
982L	2.219	0.978	3.02	0.392	2.268	
983L	1.003	0.928	2.88	0.411	1.081	
1004T	2.246	0.954	1.04	1.139	2.355	
1045L	2.347	1.016	2.4	0.493	2.311	
1051T	1.658	0.978	0.94	1.260	1.696	
1054L	2.031	0.968	1.28	0.925	2.099	
1063L	3.155	1.058	1.44	0.822	2.982	
1084L	2.344	0.994	2.96	0.400	2.359	
1085L	1.484	0.943	3.08	0.384	1.573	
1086T	1.597	1.174	2.6	0.455	1.361	



11.6.1.2 Ιδιομορφική κατανομή φόρτισης

T [*] (sec)	ΣΜΕΚ - Ιδιομορφική κατανομή					
1.098723	μ	q _y	T _p (sec)	T/Tp	μ/qy	
982L	1.957	1.087	3.02	0.364	1.801	
983L	0.885	1.031	2.88	0.382	0.858	
1004T	1.981	1.060	1.04	1.056	1.869	
1045L	2.070	1.129	2.4	0.458	1.834	
1051T	1.462	1.086	0.94	1.169	1.346	
1054L	1.791	1.075	1.28	0.858	1.666	
1063L	2.782	1.175	1.44	0.763	2.367	
1084L	2.067	1.104	2.96	0.371	1.872	
1085L	1.309	1.048	3.08	0.357	1.249	
1086T	1.409	1.304	2.6	0.423	1.080	





11.6.2 Εννιαώροφη κατασκευή

11.6.2.1	Ομοιόμο	ορφη	κατανομή	φόρτισης
----------	---------	------	----------	----------

T [*] (sec)	ΣΜΕΚ - Ομοιόμορφη κατανομή					
3.049264	μ	q _y	T _p (sec)	T/T _p	µ/qy	
982L	1.721	1.177	3.02	1.010	1.463	
983L	1.442	1.147	2.88	1.059	1.257	
1004T	1.284	1.073	1.04	2.932	1.197	
1045L	3.698	1.213	2.4	1.271	3.050	
1051T	0.778	1.215	0.94	3.244	0.640	
1054L	0.914	0.776	1.28	2.382	1.178	
1063L	2.270	1.461	1.44	2.118	1.554	
1084L	2.462	1.300	2.96	1.030	1.894	
1085L	1.924	1.269	3.08	0.990	1.516	
1086T	1.807	1.362	2.6	1.173	1.327	



11.6.2.2 Ιδιομορφική κατανομή φόρτισης

T [*] (sec)	ΣΜΕΚ - Ιδιομορφική κατανομή					
2.724669	μ	q _y	T _p (sec)	T/T _p	µ/qy	
982L	1.676	1.486	3.02	0.902	1.128	
983L	1.404	1.449	2.88	0.946	0.969	
1004T	1.251	1.354	1.04	2.620	0.924	
1045L	3.602	1.531	2.4	1.135	2.352	
1051T	0.757	1.535	0.94	2.899	0.494	
1054L	0.891	0.980	1.28	2.129	0.909	
1063L	2.211	1.844	1.44	1.892	1.199	
1084L	2.398	1.641	2.96	0.920	1.461	
1085L	1.874	1.602	3.08	0.885	1.170	
1086T	1.760	1.720	2.6	1.048	1.023	



Παρατηρείται ότι στο σύνολο των περιπτώσεων και για το σύνολο των καταγραφών, οι μεγαλύτεροι λόγοι μ/q_y προκύπτουν για τα συστήματα που έχουν προκύψει από την ομοιόμορφη κατανομή φόρτισης. Ακόμα, παρατηρείται ότι ο λόγος μ/q_y παίρνει μεγαλύτερες τιμές όταν η ιδιοπερίοδος του συστήματος βρίσκεται εντός του εύρους $T_p/2 \le T^* \le T$, δηλαδή για λόγους T^*/T_p μεταξύ 0,5 και 1,0, επιβεβαιώνοντας την αντίστοιχη παρατήρηση των Tothong and Cornell (2006), η οποία έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 5.

Στις περιπτώσεις των καταγραφών που μελετώνται στην εργασία αυτή, όπου οι δεσπόζουσες περίοδοι των παλμών έχουν τιμές εντός του εύρους (0,94 sec - 3,08 sec), παρατηρείται ότι τα ισοδύναμα μονοβάθμια συστήματα που έχουν προκύψει από την τριώροφη κατασκευή και έχουν περιόδους 1,184 sec και 1,099 sec παρουσιάζουν μεγάλες τιμές του λόγου μ/q_{y} τόσο για τις μικρές, όσο και για τις μεγάλες περιόδους παλμού, αφού και στις δύο περιπτώσεις βρίσκονται εντός της περιοχής $T_{p}/2 \leq T^{*} \leq T$.

Στη βάση της ίδιας παρατήρησης, τα ισοδύναμα μονοβάθμια συστήματα που έχουν προκύψει από την εννιαώροφη κατασκευή και έχουν περιόδους 3,049 sec και 2,725 sec παρουσιάζουν μεγάλες τιμές του λόγου μ/q_y για τις περιπτώσεις όπου ο λόγος T^*/T_p παίρνει τιμές κοντά στη μονάδα, σαφώς όμως μικρότερες για τις περιπτώσεις όπου η περίοδος του παλμού είναι αρκετά μικρότερη από την περίοδο του συστήματος, δηλαδή $T^*/T_p > 1$.

Αυτή η παρατήρηση έχει διατυπωθεί από τους *Tothong and Cornell (2006)* και *lervolino and Cornell (2008),* όπως περιγράφηκε στην ενότητα 5.2 της εργασίας αυτής.

11.7 Διαγράμματα "μ – Τ/Τ_ρ"

Κατ' αντιστοιχία με τα παραπάνω, παρουσιάζεται στη συνέχεια η πλαστιμότητα που απαιτείται από κάθε ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα για κάθε καταγραφή, σε σχέση με το λόγο της περιόδου κάθε συστήματος προς την περίοδο του δεσπόζοντος παλμού.

11.7.1 Τριώροφη κατασκευή

11.7.1.1 Ομοιόμορφη κατανομή φόρτισης



11.7.1.2 Ιδιομορφική κατανομή φόρτισης



11.7.2 Εννιαώροφη κατασκευή

11.7.2.1 Ομοιόμορφη κατανομή φόρτισης







11.8 Μέγιστες Σχετικές Μετακινήσεις Ορόφων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι μέγιστες σχετικές μετακινήσεις ορόφων που εκδηλώνονται σε κάθε σεισμική καταγραφή για τις δύο κατασκευές. Οι σχετικές αυτές μετακινήσεις ανάγονται στο ύψος των υποστυλωμάτων κάθε ορόφου (*3,0 m*) και είναι:

$$drift = \frac{\left|\Delta_{i+1} - \Delta_i\right|}{h_i}$$

Οι μέγιστες σχετικές μετακινήσεις υπολογίζονται εξάγοντας από το λογισμικό SAP2000 v15.2.1 τις μετακινήσεις των κ.β. των ορόφων στην εξεταζόμενη διεύθυνση για κάθε χρονική στιγμή και υπολογίζοντας τη μέγιστη κατ' απόλυτο τιμή διαφορά όλων των διαδοχικών ορόφων από κάθε χρονική στιγμή.

11.8.1 Τριώροφη κατασκευή

Στο παρακάτω ραβδόγραμμα γίνεται εμφανής η επιρροή του φαινομένου και στις μέγιστες γωνιακές παραμορφώσεις των ορόφων (Inter-storey drifts), αφού οι παλμικές καταγραφές δημιουργούν σημαντικά μεγαλύτερες σχετικές μετακινήσεις των ορόφων απ' ότι οι μη παλμικές.



Στη συνέχεια παρουσιάζεται για τις παλμικές καταγραφές η κατανομή των μέγιστων αυτών σχετικών μετακινήσεων ως προς το λόγο *T*₁/*T*_p, όπου *T*₁ είναι η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής κατά την εξεταζόμενη διεύθυνση. Σημειώνεται ότι στους λόγους αυτούς χρησιμοποιείται η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του πολυβάθμιου (πραγματικού) συστήματος, αφού οι σχετικές μετακινήσεις των ορόφων προκύπτουν άμεσα από την πραγματική κατασκευή και δεν απαιτείται η μετάβαση σε κάποιο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα.

T ₁ = 0,952 sec Καταγραφή	Τ _p	T_1/T_p	Μέγιστο drift
983L	3.02	0.315197	4.39%
1004T	2.88	0.330519	2.17%
1045L	1.04	0.915284	4.54%
1051T	2.4	0.396623	4.65%
1054L	0.94	1.012654	3.43%
1063L	1.28	0.743668	4.04%
1084L	1.44	0.661038	6.13%
1085L	2.96	0.321586	4.56%
1086T	3.08	0.309057	3.17%



Είναι εμφανές ότι οι μέγιστες σχετικές μετακινήσεις των ορόφων της τριώροφης κατασκευής ακολουθούν την ίδια κατανομή με την πλαστιμότητα για τις αντίστοιχες καταγραφές, με διαφορά ότι η θεμελιώδης ιδιομορφή της πραγματικής κατασκευής είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτή των ισοδύναμων μονοβάθμιων συστημάτων.

11.8.2 Εννιαώροφη κατασκευή

Κατ' αντιστοιχία με πριν, είναι εμφανής η επιρροή των παλμικών καταγραφών στις γωνιακές παραμορφώσεις των ορόφων, σε σχέση με τις μη παλμικές.



Όπως και για την τριώροφη κατασκευή, για τις παλμικές καταγραφές υπολογίζεται η κατανομή των μέγιστων αυτών σχετικών μετακινήσεων ως προς το λόγο T_1/T_p , όπου T_1 είναι η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής κατά την εξεταζόμενη διεύθυνση. Σημειώνεται ξανά ότι στους λόγους αυτούς χρησιμοποιείται η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του πολυβάθμιου (πραγματικού) συστήματος, αφού οι σχετικές μετακινήσεις των ορόφων προκύπτουν άμεσα από την πραγματική κατασκευή και δεν απαιτείται η μετάβαση σε κάποιο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα.

T ₁ = 2,494 sec	Тр	T/T _p	drift
Καταγραφή			
982L	3.02	0.825887	3.56%
983L	2.88	0.866035	3.21%
1004T	1.04	2.39825	2.72%
1045L	2.4	1.039242	6.16%
1051T	0.94	2.653383	2.18%
1054L	1.28	1.948578	2.60%
1063L	1.44	1.732069	5.23%
1084L	2.96	0.842628	5.13%
1085L	3.08	0.809799	3.90%
1086T	2.6	0.9593	3.58%



Οι σχετικές μετακινήσεις των ορόφων αποτελούν ένα αντιπροσωπευτικό δείκτη βλάβης για τη σύγκριση από καταγραφή σε καταγραφή.

<u>Κεφάλαιο 12</u> ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την ταξινόμηση των σεισμικών καταγραφών του σεισμού στο Northridge (1994) και από τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων (στατικών και δυναμικών) που διενεργούνται στην τριώροφη και την εννιαώροφη κατασκευή. Η επεξεργασία μιας ομάδας 314 σεισμικών καταγραφών που αφορούν στο σύνολό τους ένα σεισμικό γεγονός παρείχε τη δυνατότητα βαθύτερης κατανόησης του φαινομένου, όσον αφορά τις θέσεις εμφάνισης παλμικών καταγραφών και τις διευθύνσεις στις οποίες εμφανίζονται σημαντικοί παλμοί, σε σχέση με τη γεωμετρία της επιφάνειας διάρρηξης. Ακόμα, η πραγματοποίηση μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας φόρτισης σε δύο πλαισιακές κατασκευές με σημαντική διαφορά δυσκαμψίας (τριώροφη κατασκευή και εννιαώροφη κατασκευή της ίδιας κάτοψης), παρείχε τη δυνατότητα μελέτης της ανελαστικής απαίτησης που δημιουργείται από τις ίδιες παλμικές καταγραφές για διαφορετικές τιμές του λόγου της δεσπόζουσας ιδιοπεριόδου κάθε κατασκευής προς τη δεσπόζουσα περίοδο του παλμού.

Στη συνέχεια δίνονται συνοπτικά τα συμπεράσματα της διπλωματικής αυτής εργασίας και παρατηρήσεις πάνω σε αυτά.

Οι παλμικές καταγραφές και κατά συνέπεια οι μεγάλοι παλμοί κατευθυντικότητας εκδηλώνονται στην περιοχή που επηρεάζεται από την έμπροσθεν κατευθυντικότητα.

Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνει μια γνωστή πτυχή του φαινομένου που έχει επισημανθεί από πλήθος ερευνητών, αφού στην περιοχή στην οποία εκδηλώνεται η όπισθεν κατευθυντικότητα εμφανίζονται τυπικά παλμοί μικρού πλάτους και μεγάλης περιόδου, οι οποίοι θεωρούνται ασήμαντοι σε σχέση με τους παλμούς της έμπροσθεν κατευθυντικότητας.

Οι παλμοί αυτοί συναντώνται σε ένα εύρος προσανατολισμών περί την κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση.

Παρατηρείται ότι οι παλμοί ταχύτητας μέγιστου πλάτους δεν προκύπτουν σε όλες τις καταγραφές στην πλησιέστερη στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα. Όμως σε όλες ο συντελεστής συσχέτισης της αρχικής εδαφικής κίνησης με το μητρικό κυματίδιο είναι μεγαλύτερος στις διευθύνσεις που η γωνία καταγραφής προσεγγίζει την κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση, γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη σημαντικού παλμικού περιεχομένου σε αυτή τη συνιστώσα της εδαφικής κίνησης.

Οι παλμικές καταγραφές, δηλαδή εκείνες που επηρεάζονται σημαντικά από τα φαινόμενα κατευθυντικότητας, τοποθετούν μεγάλες ανελαστικές απαιτήσεις στις κατασκευές σε σχέση με τις μη παλμικές.

Αυτό γίνεται εμφανές, αφού οι μη παλμικές καταγραφές δίνουν στο σύνολό τους πλαστιμότητες και συντελεστές συμπεριφοράς μικρότερους της μονάδας για τις δύο υπό εξέταση κατασκευές. Αντίθετα, οι παλμικές καταγραφές δημιουργούν σημαντικές ανελαστικές απαιτήσεις. Μια εικόνα της απαίτησης που δημιουργείται από κάθε σεισμική καταγραφή εξάγεται και από τις μέγιστες σχετικές παραμορφώσεις ορόφου κάθε κατασκευής, η κατανομή των οποίων προκύπτει ανάλογη των πλαστιμοτήτων.

Οι παλμοί κατευθυντικότητας επηρεάζουν σημαντικά την ανελαστική συμπεριφορά των κατασκευών για τις περιπτώσεις ιδιοπεριόδων T_p/2 < T < T_p.

Η παρατήρηση αυτή φαίνεται στην κατανομή των πλαστιμοτήτων ανά σεισμική καταγραφή, αν εξετάσουμε το λόγο *T/T_p* σε κάθε περίπτωση, όπου *T* η περίοδος του εκάστοτε ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος και *T_p* η δεσπόζουσα περίοδος του πρώτου παλμού κάθε παλμικής καταγραφής. Είναι εμφανές ότι οι ανελαστικές απαιτήσεις που δημιουργούνται από τις δέκα παλμικές καταγραφές στην τριώροφη κατασκευή είναι πιο ομοιόμορφες από αυτές που δημιουργούνται στην εννιαώροφη κατασκευή από τις ίδιες καταγραφές. Αυτό συμβαίνει, αφού οι περίοδοι των ισοδύναμων μονοβάθμιων συστημάτων που προκύπτουν από την τριώροφη κατασκευή από τις ίδιες καταγραφές. Αυτό συμβαίνει, αφού οι περίοδοι των ισοδύναμων μονοβάθμιων συστημάτων που προκύπτουν από την τριώροφη κατασκευή από τις ίδιες καταγραφές. Αυτό συμβαίνει, αφού οι περίοδοι των ισοδύναμων μονοβάθμιων συστημάτων που προκύπτουν από την τριώροφη κατασκευή για τις δύο κατανομές φόρτισης κατά τη μη γραμμική στατική ανάλυση, βρίσκονται εντός του εύρους T_p/2 < T < T_p για τις δέκα παλμικές καταγραφές που επιβάλλονται ως διέγερση βάσης στις μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας φόρτισης. Το ίδιο δε συμβαίνει για την εννιαώροφη και ισοδύναμα μονοβάθμια συστήματα που προκύπτουν από αυτή έχουν μεγάλες ιδιοπεριόδους και κατά συνέπεια για τις παρατηρούνται μικρότερες τιμές πλαστιμότητας και κατά συνέπεια μικρότερη ανελαστική απαίτηση. Το ίδιο παρατηρείται και για τους λόγους μ/q_y, οι οποίοι παρουσιάζουν μικρότερες τιμές για τις περιπτώσεις όπου T-T_p.

Με βάση τα παραπάνω, είναι επιτακτική η ανάγκη να λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα κατευθυντικότητας στα Μοντέλα Απομείωσης των Εδαφικών Κινήσεων και συνεπώς στην Πιθανοτική Ανάλυση Εκτίμησης Σεισμικού Κινδύνου (Probabilistic Seismic Hazard Analysis ή PSHA), σε περιοχές που βρίσκονται κοντά σε ενεργά ρήγματα. Αντίστοιχα επιτακτική είναι η ανάγκη της ποσοτικοποίησης του φαινομένου στον Αντισεισμικό Κανονισμό κατά το σχεδιασμό των κατασκευών, στις περιπτώσεις που πληρούνται οι συνθήκες εμφάνισης φαινομένων κατευθυντικότητας.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] Baker J.W., Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis, 2007.
- Mavroeidis G., Papagewrgiou A., Effect of Fault Rupture Characteristics on Near-Fault Strong Ground Motions, 2010.
- [3] Mavroeidis G., Papagewrgiou A., Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions, 2003
- [4] Mimoglou P, Psycharis I., Taflampas I., Design-oriented simulation of near fault ground motions by a limited number of velocity pulses, 2014.
- [5] Vassiliki Kardoutsou, Ioannis Taflampas, Ioannis Psycharis, A New Method for the Classification of Ground Motions as Pulse-Like on Non Pulse-Like, 2014.
- [6] Iunio Iervolino, Allin Cornell, **Probability of Occurrence of Velocity Pulses in Near-Sourse Ground Motions**, 2008.
- [7] Rowshandel B., Directivity Correction for the Next Generation Attenuation (NGA) Relations, Earthquake Spectrum, Volume 26, May 2010.
- [8] Shahi S. K., Baker J. W., An Empirically Calibrated Framework for Including the Effects of Near-Fault Directivity in Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Bulletin of the seismological society of America, Vol.101 No2, pp.742-755, April 2011.
- [9] Somerville P.G., Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse, Physics of the Earth and Planetary Interiors 137 (2003), 201-212.
- [10] CEN (Comite Europeen de Normalisation) (2004), Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, EN 1998-1: 2004.
- [11] CEN (2004), Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, EN 1998-3:2005.
- [12] CEN (2004), Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings, EN 1992-1-1: 2004.
- [13] CEN (2001), Eurocode 0: Basis of structural design, EN 1990: 2001.
- [14] CSI Knowledge base/Test problems/Moment curvature, cracked moment of inertia and Caltrans idealized model.
- [15] Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. Journal of Structural Engineering. ASCE. 114(8). 1804-1826, 1998.
- [16] TECHNICAL NOTE, MATERIAL STRESS-STRAIN CURVES ©COMPUTERS AND STRUCTURES, INC., BERKELEY, CALIFORNIA JUNE 2008. http://docs.csiamerica.com/manuals/csibridge/Technical%20Notes/S-TN-MAT-001.pdf
- [17] Caltrans Seismic Design Criteria, version 1.6, November 2010. http://www.dot.ca.gov/hq/esc/techpubs/manual/othermanual/other-engin-manual/seismic-designcriteria/sdc.html
- [18] FEMA 356: Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilation of Buildings, Washington D.C, November 2000.
- [19] ΙΩΑΝΝΗΣ Ν. ΨΥΧΑΡΗΣ, ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΣΤΑΘΜΕΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ, ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑ ΤΟΥ 9^{ου} ΕΞΑΜΗΝΟΥ - ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ 2, 2010.
- [20] Εγχειρίδιο χειρισμού FESPA 10, LH Λογισμική, Αθήνα.

Παράρτημα Α Ελαστικά Φάσματα Απόκρισης

A1

Φάσματα ψευδο-επιτάχυνσης (Pseudo Acceleration Spectra) για ξ =5%

A2

Φάσματα ψευδο-ταχύτητας (Pseudo Velocity Spectra) για ξ=5%






















A2: Ελαστικά φάσματα ψευδο-ταχύτητας (Elastic Pseudo Velocity Spectra) για ξ=5%



















Παράρτημα Β Ενεργές Δυσκαμψίες Μελών - (EI)eff

B1

Τριώροφο

B2 Εννιαώροφο

	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΜΕΙΩΜΕΝΩΝ ΔΥΣΚΑΜΨΙΩΝ - ΤΡΙΩΡΟΦΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ													
		ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ												
	ΔΙΑΤΟΜΗ	N <i>(KN)</i>	M _p (KNm)	φ _{idealized} (m ⁻¹)	L _{καθαρό} (m)	L _v (m)	dbL <i>(m)</i>	h <i>(m)</i>	θ _γ (rad)	l _{el} (m⁴)	K _{eff} (KNm ²)	K _{el} (KNm²)	K _{eff} /K _{el}	λ
Όροφος 0	E0 K1	443.97	465.358	0.0115	3.0	1.5	0.018	0.50	0.0102101	0.0052083	22789.127	171875	0.13259	0.13180
	F0_KI	462.72	437.157	0.0108	3.0	1.5	0.018	0.50	0.0097073	0.0052083	22516.9	171875	0.13101	
	F0_K5	832.701	492.738	0.011	3.0	1.5	0.018	0.50	0.009851	0.0052083	25009.654	171875	0.14551	0.14593
		851.451	495.604	0.011	3.0	1.5	0.018	0.50	0.00985	0.0052083	25155.111	171875	0.14636	
	F1 K1	289.425	409.450	0.0107	3.0	1.5	0.018	0.50	0.0096355	0.0052083	21246.991	171875	0.12362	0.12439
Deather 1	LT_VI	308.175	411.467	0.0106	3.0	1.5	0.018	0.50	0.00956	0.0052083	21512.01	171875	0.12516	
Οροφος Ι	E1 K5	549.189	448.122	0.0108	3.0	1.5	0.018	0.50	0.0097073	0.0052083	23081.691	171875	0.13429	0 12417
	FI_K3	567.939	450.635	0.0109	3.0	1.5	0.018	0.50	0.00978	0.0052083	23040.631	171875	0.13405	0.15417
	E2 K1	133.661	382.239	0.0106	3.0	1.5	0.018	0.50	0.0095637	0.0052083	19983.948	171875	0.11627	0 11627
Όροφος 2	FZ_KI	152.411	385.751	0.0107	3.0	1.5	0.018	0.50	0.00964	0.0052083	20017.218	171875	0.11646	0.11037
	E2 K5	266.896	427.701	0.0107	3.0	1.5	0.018	0.50	0.0096355	0.0052083	22194.074	171875	0.12913	0.12960
	F2_K5	285.627	430.803	0.0107	3.0	1.5	0.018	0.50	0.00964	0.0052083	22355.026	171875	0.13007	

B1: Ενεργές Δυσκαμψίες Διατομών (*EI*)_{eff} - Τριώροφο

	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΜΕΙΩΜΕΝΩΝ ΔΥΣΚΑΜΨΙΩΝ - ΤΡΙΩΡΟΦΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ												
							ΔΟΚΟ	I					
	ΜΕΛΟΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ	dbL (m)	M _p (KNm)	Φ _{idealized} (m ⁻¹)	L _{καθαρό} (m)	L _v (m)	θ _γ (rad)	l _{el} (m⁴)	K _{eff} (KNm ²)	K _{el} (KNm²)	K _{eff} /K _{el}	λ
		F0 V1	0.01450	192.36690	0.007010	5.25	2.625	0.009112	0.0054	18472.424	178200	0.103661	
	11	F0_X1	0.01450	220.95410	0.007078	5.25	2.625	0.0091835	0.0054	21052.475	178200	0.11814	
	1.1	50 V0	0.014	364.368	0.007376	5.25	2.625	0.0094519	0.0054	33730.954	178200	0.189287	0.154645
		F0_X2	0.014	236.097	0.006977	5.25	2.625	0.009035	0.0054	22864.86	178200	0.12831	
Όροφος		50.140	0.014	364.368	0.007376	5.50	2.75	0.009739	0.0054	34295.563	178200	0.192455	
0	1.2	F0_X2	0.014	236.097	0.006977	5.50	2.75	0.0093055	0.0054	23257.489	178200	0.130513	0.161484
		50.14	0.014	279.322	0.007106	5.00	2.5	0.008896	0.0054	26165.434	178200	0.146832	0.146832
	3.2	F0_Y1	0.014	279.322	0.007106	5.00	2.5	0.008896	0.0054	26165.434	178200	0.146832	
	4.2	F0_Y2	0.01520	275.47080	0.007114	5.00	2.5	0.0090076	0.0054	25485.156	178200	0.143014	0.143014
			0.01520	275.47080	0.007114	5.00	2.5	0.0090076	0.0054	25485.156	178200	0.143014	
	1.1	F1_X1	0.01425	192.53040	0.007014	5.25	2.625	0.009095	0.0054	18522.803	178200	0.103944	0.133285
			0.01425	205.71270	0.006972	5.25	2.625	0.0090509	0.0054	19887.263	178200	0.111601	
		F1 V2	0.014	364.368	0.007376	5.25	2.625	0.0094519	0.0054	33730.954	178200	0.189287	
		11_72	0.014	236.097	0.006977	5.25	2.625	0.009035	0.0054	22864.86	178200	0.12831	
Όροφος	1.2	F1_X2	0.014	364.368	0.007376	5.50	2.75	0.009739	0.0054	34295.563	178200	0.192455	0.161484
1			0.014	236.097	0.006977	5.50	2.75	0.0093055	0.0054	23257.489	178200	0.130513	
		F1_Y1	0.014	278.941	0.007148	5.00	2.5	0.0089381	0.0054	26006.58	178200	0.14594	0.135706
	3.2		0.014	236.588	0.007028	5.00	2.5	0.0088178	0.0054	22358.971	178200	0.125471	
	4.2	54.140	0.014	278.941	0.007148	5.00	2.5	0.0089381	0.0054	26006.58	178200	0.14594	0 105706
	4.2	F1_Y2	0.014	236.588	0.007028	5.00	2.5	0.0088178	0.0054	22358.971	178200	0.125471	0.135700
		E2 V1	0.01429	192.64830	0.007039	5.25	2.625	0.0091242	0.0054	18474.744	178200	0.103674	
	1.1	F2_X1	0.01429	161.63130	0.006932	5.25	2.625	0.009012	0.0054	15693.161	178200	0.088065	0 107004
	1.1	F2 V2	0.014	364.368	0.007376	5.25	2.625	0.0094519	0.0054	33730.954	178200	0.189287	0.127334
		F2_X2	0.014	236.097	0.006977	5.25	2.625	0.009035	0.0054	22864.86	178200	0.12831	
Όροφος	1.2	52 V2	0.014	364.368	0.007376	5.50	2.75	0.009739	0.0054	34295.563	178200	0.192455	0 161494
2	1.2	F2_A2	0.014	236.097	0.006977	5.50	2.75	0.0093055	0.0054	23257.489	178200	0.130513	0.101464
	2.2	E2 V1	0.014	279.030	0.007217	5.00	2.5	0.0090074	0.0054	25815.023	178200	0.144865	0 100016
	5.2	F2_11	0.014	192.673	0.006978	5.00	2.5	0.0087676	0.0054	18312.955	178200	0.102766	0.123810
	4.2	E2 V2	0.014	279.030	0.007217	5.00	2.5	0.0090074	0.0054	25815.023	178200	0.144865	0 100016
	4.2	F2_Y2	0.014	192.673	0.006978	5.00	2.5	0.0087676	0.0054	18312.955	178200	0.102766	0.123816

	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΜΕΙΩΜΕΝΩΝ ΔΥΣΚΑΜΨΙΩΝ - ΕΝΝΙΑΩΡΟΦΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ												
		ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ											
	ΔΙΑΤΟΜΗ	N	Mp	 $\phi_{\text{idealized}}$	L _{καθαρό}	Lv	dbL	h	θγ	l _{el}	K _{eff}	K _{el}	K.#/K.
		(KN)	(KNm)	(m ⁻¹)	(m)	(m)	(m)	(m)	(rad)	(m⁴)	(KNm²)	(KNm²)	- 'elly - 'el
Doodoc 0	F0_K1	1444.965	705.065	0.010700	3.0	1.5	0.018	0.55	0.0097005	0.0076255	36341.742	251642.19	0.14442
οροφοςυ	F0_K5	2607.232	1084.773	0.009923	3.0	1.5	0.018	0.60	0.0092074	0.0108	58907.779	356400	0.16529
Dephase 1	F1_K1	1285.136	710.359	0.010800	3.0	1.5	0.018667	0.55	0.0098596	0.0076255	36023.7	251642.19	0.14315
Οροφος Ι	F1_K5	2316.817	1009.875	0.009477	3.0	1.5	0.018	0.60	0.0088870	0.0108	56817.327	356400	0.15942
Deephor 2	F2_K1	1124.62	680.649	0.010600	3.0	1.5	0.018667	0.55	0.0097143	0.0076255	35033.183	251642.19	0.13922
Ορυφος 2	F2_K5	2027.089	968.156	0.009394	3.0	1.5	0.018	0.60	0.0088274	0.0108	54837.993	356400	0.15387
Doopbox 2	F3_K1	963.949	623.931	0.010400	3.0	1.5	0.018	0.55	0.009485	0.0076255	32890.396	251642.19	0.13070
Ορυφος s	F3_K5	1737.515	921.327	0.009214	3.0	1.5	0.018	0.60	0.0086981	0.0108	52961.189	356400	0.14860
Dechec 4	F4_K1	803.099	558.325	0.009754	3.0	1.5	0.018	0.55	0.009021	0.0076255	30945.838	251642.19	0.12298
Οροφος 4	F4_K5	1448.121	871.302	0.009038	3.0	1.5	0.018	0.60	0.0085717	0.0108	50824.237	356400	0.14260
Deedee 5	F5_K1	642.038	530.453	0.009573	3.0	1.5	0.018	0.55	0.008891	0.0076255	29830.947	251642.19	0.11855
Ορυφος 3	F5_K5	1158.937	820.226	0.008949	3.0	1.5	0.018	0.60	0.0085078	0.0108	48204.43	356400	0.13525
Deedee 6	F6_K1	480.842	502.170	0.009439	3.0	1.5	0.018	0.55	0.0087947	0.0076255	28549.427	251642.19	0.11345
Οροφος σ	F6_K5	869.889	765.291	0.008887	3.0	1.5	0.018	0.60	0.0084633	0.0108	45212.54	356400	0.12686
Deedee 7	F7_K1	319.694	470.778	0.009382	3.0	1.5	0.018	0.55	0.0087538	0.0076255	26889.925	251642.19	0.10686
οροφος /	F7_K5	580.792	766.704	0.009402	3.0	1.5	0.018	0.60	0.0088332	0.0108	43399.175	356400	0.12177
Dootoc 9	F8_K1	158.094	439.711	0.009437	3.0	1.5	0.018	0.55	0.0087933	0.0076255	25002.61	251642.19	0.09936
υρυφος 8	F8_K5	292.146	648.446	0.008561	3.0	1.5	0.018	0.60	0.0082291	0.0108	39399.538	356400	0.11055

B2: Ενεργές Δυσκαμψίες Διατομών (*ΕΙ*)_{eff} - Εννιαώροφο

	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΜΕΙΩΜΕΝΩΝ ΔΥΣΚΑΜΨΙΩΝ - ΕΝΝΙΑΩΡΟΦΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ												
							ΔΟΚΟ	וכ					
	ΜΕΛΟΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ	dbL (m)	M _p (KNm)	Φ _{idealized} (m ⁻¹)	L _{καθαρό} <i>(m)</i>	L _v (m)	θ _y (rad)	l _{el} (m⁴)	K _{eff} (KNm²)	K _{el} (KNm²)	K _{eff} /K _{el}	λ
		F0 V1	0.0188	160.6356	0.006966	5.1	2.55	0.009268	0.0054	14732.503	178200	0.082674	
	1.1	FU_X1	0.0188	265.4646	0.007234	5.1	2.55	0.0095569	0.0054	23610.787	178200	0.132496	
	1.1	50.00	0.0175	303.9886	0.007249	5.1	2.55	0.0094588	0.0054	27317.584	178200	0.153297	0.120007
		F0_X2	0.0175	281.2943	0.007143	5.1	2.55	0.0093462	0.0054	25582.715	178200	0.143562	
Όροφος		50 V0	0.0175	303.9886	0.007249	5.4	2.7	0.0097957	0.0054	27929.536	178200	0.156731	0.454764
0	1.2	F0_X2	0.0175	281.2943	0.007143	5.4	2.7	0.0096778	0.0054	26159.287	178200	0.146797	0.151764
		50 V/1	0.014	365.2853	0.00731	4.9	2.45	0.0089884	0.0054	33189.167	178200	0.186247	0.105047
	3.2	F0_Y1	0.014	365.2853	0.00731	4.9	2.45	0.0089884	0.0054	33189.167	178200	0.186247	0.186247
	4.2	F0_Y2	0.017	319.5641	0.007224	4.8	2.4	0.0090559	0.0054	28230.43	178200	0.15842	0.168687
			0.017	368.2045	0.007404	4.8	2.4	0.009237	0.0054	31889.594	178200	0.178954	
	1.1	F1_X1	0.0174	188.1431	0.006976	5.1	2.55	0.0091627	0.0054	17453.493	178200	0.097943	0.147185
			0.0174	319.3124	0.007302	5.1	2.55	0.0095087	0.0054	28543.837	178200	0.160179	
		E1 V2	0.0166	330.5491	0.007238	5.1	2.55	0.0093681	0.0054	29991.929	178200	0.168305	
		F1_72	0.0166	319.2504	0.007251	5.1	2.55	0.0093817	0.0054	28924.559	178200	0.162315	
Όροφος	1.2	E1 V2	0.0166	330.5491	0.007238	5.4	2.7	0.0097045	0.0054	30655.32	178200	0.172028	
1		11_72	0.0166	319.2504	0.007251	5.4	2.7	0.0097188	0.0054	29563.857	178200	0.165903	
	2.2	F1_Y1	0.014	482.8016	0.007754	4.9	2.45	0.0094263	0.0054	41828.321	178200	0.234727	0.0005.40
	5.2		0.014	443.3542	0.007631	4.9	2.45	0.009305	0.0054	38911.58	178200	0.218359	0.220345
	4.2	54.140	0.0153	404.7102	0.007452	4.8	2.4	0.0091271	0.0054	35473.12	178200	0.199064	0.011004
	4.2	F1_12	0.0153	460.4329	0.007591	4.8	2.4	0.009264	0.0054	39760.852	178200	0.223125	0.211094
		E2 V1	0.0174	205.1176	0.006967	5.1	2.55	0.0091532	0.0054	19048.026	178200	0.106891	
	11	F2_A1	0.0174	303.1993	0.007225	5.1	2.55	0.009427	0.0054	27338.423	178200	0.153414	0 14424
	1.1	E2 V2	0.0171	304.3331	0.007173	5.1	2.55	0.0093442	0.0054	27683.816	178200	0.155353	0.14454
		FZ_AZ	0.0171	318.8871	0.007232	5.1	2.55	0.0094066	0.0054	28815.326	178200	0.161702	
Όροφος	1.2	E2 V2	0.0171	304.3331	0.007173	5.4	2.7	0.0096774	0.0054	28303.15	178200	0.158828	0 162069
2	1.2	FZ_7Z	0.0171	318.8871	0.007232	5.4	2.7	0.0097427	0.0054	29457.78	178200	0.165307	0.102008
	2.2	E2 V1	0.0147	442.6926	0.007483	4.9	2.45	0.0092231	0.0054	39198.7	178200	0.21997	0 210904
	3.2	FZ_11	0.0147	404.8788	0.007462	4.9	2.45	0.0092022	0.0054	35931.839	178200	0.201638	0.210604
	4.2	E2 V2	0.0168	390.5504	0.007345	4.8	2.4	0.0091571	0.0054	34120.135	178200	0.191471	0 20522
	4.2	F2_Y2	0.0168	459.8245	0.007605	4.8	2.4	0.0094179	0.0054	39059.474	178200	0.219189	0.20533

	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΜΕΙΩΜΕΝΩΝ ΔΥΣΚΑΜΨΙΩΝ - ΕΝΝΙΑΩΡΟΦΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΟΙ												
								л 					
	ΜΕΛΟΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ	dbL	Mp	 d i d e a i i b b b b b b b b b b	L _{καθαρό}	Lv	θγ	l _{el}	K _{eff}	K _{el}	K _{eff} /K _{el}	λ
			(<i>m</i>)	(KNm)	(m ⁻ *)	(m)	(m)	(rad)	(m*)	(KNm²)	(KNm²)		
		F3 X1	0.0163	205.2272	0.006935	5.1	2.55	0.0090201	0.0054	19339.37	178200	0.108526	
	1.1	_	0.0163	300.1785	0.007252	5.1	2.55	0.009352	0.0054	27283.066	178200	0.153104	0.139868
		F3 X2	0.0164	304.1248	0.007235	5.1	2.55	0.0093513	0.0054	27643.933	178200	0.155129	
Όροφος		-	0.0164	274.9185	0.00708	5.1	2.55	0.0091886	0.0054	25431.539	178200	0.142713	
Όροφος	1.2	F3_X2	0.0164	304.1248	0.007235	5.4	2.7	0.0096875	0.0054	28254.067	178200	0.158553	0.152223
3		_	0.0164	2/4.9185	0.00708	5.4	2.7	0.00951/1	0.0054	25998.035	1/8200	0.145892	
	3.2	F3 Y1	0.0147	387.3358	0.007412	4.9	2.45	0.0091489	0.0054	34575.114	178200	0.194024	0.189514
		-	0.0147	365.5149	0.007317	4.9	2.45	0.0090544	0.0054	32967.747	178200	0.185004	
	4.2	F3 Y2	0.0167	389.9412	0.007403	4.8	2.4	0.0092061	0.0054	33885.637	178200	0.190155	0.190155
		_	0.0167	389.9412	0.007403	4.8	2.4	0.0092061	0.0054	33885.637	178200	0.190155	
		F4 X1	0.0173	160.7664	0.00696	5.1	2.55	0.0091377	0.0054	14954.67	178200	0.083921	
	1.1	-	0.0173	274.0623	0.0072	5.1	2.55	0.0093922	0.0054	24802.93	178200	0.139186	0.126342
		F4 X2	0.017	303.6315	0.007272	5.1	2.55	0.0094391	0.0054	27342.324	178200	0.153436	
			0.017	248.1975	0.007036	5.1	2.55	0.0091898	0.0054	22956.631	178200	0.128825	
Όροφος	1.2	F4 X2	0.017	303.6315	0.007272	5.4	2.7	0.0097772	0.0054	27949.539	178200	0.156844	0.144285
4			0.017	248.1975	0.007036	5.4	2.7	0.0095162	0.0054	23473.531	178200	0.131726	
	3.2	F4 Y1	0.0153	331.2841	0.007227	4.9	2.45	0.0090233	0.0054	29983.217	178200	0.168256	0.168256
			0.0153	331.2841	0.007227	4.9	2.45	0.0090233	0.0054	29983.217	178200	0.168256	0.100200
	12	F4 V2	0.0158	319.676	0.007245	4.8	2.4	0.0089732	0.0054	28500.581	178200	0.159936	0 163034
	4.2	14_12	0.0158	330.7771	0.00721	4.8	2.4	0.0089385	0.0054	29604.823	178200	0.166133	0.103034
		E5 X1	0.0167	160.5912	0.006938	5.1	2.55	0.0090583	0.0054	15069.332	178200	0.084564	
	1.1	13_/1	0.0167	244.5998	0.007128	5.1	2.55	0.0092582	0.0054	22456.835	178200	0.12602	0.119749
		F5 X2	0.0165	303.3676	0.007267	5.1	2.55	0.0093898	0.0054	27462.111	178200	0.154108	
		10_72	0.0165	218.5899	0.007012	5.1	2.55	0.009122	0.0054	20368.532	178200	0.114302	
Όροφος		E5 V2	0.0165	303.3676	0.007267	5.4	2.7	0.0097276	0.0054	28067.608	178200	0.157506	
5	1.2	FJ_72	0.0165	218.5899	0.007012	5.4	2.7	0.0094471	0.0054	20824.491	178200	0.11686	0.137105
	2.2		0.0153	330.8257	0.007286	4.9	2.45	0.0090771	0.0054	29764.269	178200	0.167027	0.154196
	5.2	F3_11	0.0153	275.2072	0.007131	4.9	2.45	0.0089218	0.0054	25191.258	178200	0.141365	0.134150
	4.2		0.0158	274.8897	0.007106	4.8	2.4	0.0088337	0.0054	24894.497	178200	0.1397	0 140710
	4.2	F5_12	0.0158	319.1866	0.007244	4.8	2.4	0.0089706	0.0054	28465.161	178200	0.159737	0.149718
	1.1	E6 V1	0.0168	160.9229	0.006923	5.1	2.55	0.0090537	0.0054	15108.111	178200	0.084782	0.110453
		P0_X1	0.0168	193.358	0.00705	5.1	2.55	0.0091875	0.0054	17888.839	178200	0.100386	
		E6 V2	0.016	303.5281	0.007253	5.1	2.55	0.0093311	0.0054	27649.42	178200	0.155159	
		10_72	0.016	191.8648	0.006953	5.1	2.55	0.0090179	0.0054	18084.651	178200	0.101485	
Όροφος	1.2	F6 X2	0.016	303.5281	0.007253	5.4	2.7	0.0096682	0.0054	28254.922	178200	0.158557	0 121152
6	1.2	F0_72	0.016	191.8648	0.006953	5.4	2.7	0.00934	0.0054	18487.979	178200	0.103748	0.151155
		E6 V1	0.0151	274.9781	0.007164	4.9	2.45	0.0089409	0.0054	25116.737	178200	0.140947	0 107045
	3.2	F6_Y1	0.0151	219.3239	0.00706	4.9	2.45	0.0088369	0.0054	20268.98	178200	0.113743	0.127345
	4.2		0.0149	248.9584	0.007089	4.8	2.4	0.0087386	0.0054	22791.677	178200	0.127899	0.124666
Όροφος 6	4.2		0.0149	236.0256	0.007076	4.8	2.4	0.0087258	0.0054	21639.269	178200	0.121432	0.124666
 Οροφος 3 Οροφος 4 Οροφος 5 Οροφος 6 Οροφος 7 Οροφος 8 		F7 V1	0.0153	188.3138	0.007008	5.1	2.55	0.0090186	0.0054	17748.432	178200	0.099598	
		F/_X1	0.0153	161.4969	0.006892	5.1	2.55	0.0088985	0.0054	15426.509	178200	0.086569	0 400 440
	1.1	57 V0	0.0151	356.2112	0.007352	5.1	2.55	0.0093534	0.0054	32371.103	178200	0.181656	0.123413
		F/_X2	0.0151	236.2762	0.006968	5.1	2.55	0.0089567	0.0054	22422.804	178200	0.125829	
Όροφος		57 V.A	0.0151	356.2112	0.007352	5.4	2.7	0.0096955	0.0054	33065.867	178200	0.185555	
7	1.2	F7_X2	0.0151	236.2762	0.006968	5.4	2.7	0.0092796	0.0054	22915.633	178200	0.128595	0.15/0/5
			0.0147	275.2671	0.007199	4.9	2.45	0.0089371	0.0054	25153.829	178200	0.141155	
	3.2	F7_Y1	0.0147	192.3549	0.006985	4.9	2.45	0.0087242	0.0054	18006.132	178200	0.101045	0.1211
			0.015	248.5207	0.007084	4.8	2.4	0.0087432	0.0054	22739.528	178200	0.127607	
	4.2	F7_Y2	0.015	192.2006	0.006999	4.8	2.4	0.0086598	0.0054	17755.757	178200	0.099639	0.113623
			0.0153	188.3138	0.007008	5.1	2.55	0.0090186	0.0054	17748.432	178200	0.099598	
		F8_X1	0.0153	161.4969	0.006892	5.1	2.55	0.0088985	0.0054	15426.509	178200	0.086569	
	1.1		0.0151	356.2112	0.007352	5.1	2.55	0.0093534	0.0054	32371.103	178200	0.181656	0.123413
		F8_X2	0.0151	236.2762	0.006968	5.1	2.55	0.0089567	0.0054	22422.804	178200	0.125829	
Όροφος			0.0151	356.2112	0.007352	5.4	2.7	0.0096955	0.0054	33065.867	178200	0.185555	
8	1.2	F8_X2	0.0151	236.2762	0.006968	5.4	2.7	0.0092796	0.0054	22915.633	178200	0.128595	0.157075
			0.0147	275.2671	0.007199	4.9	2.45	0.0089371	0.0054	25153.829	178200	0.141155	
	3.2	F8_Y1	0.0147	192.3549	0.006985	4.9	2.45	0.0087242	0.0054	18006.132	178200	0.101045	0.1211
			0.015	248.5207	0.007084	4.8	2.4	0.0087432	0.0054	22739.528	178200	0.127607	
	4.2	F8_Y2	0.015	192.2006	0.006999	4.8	2.4	0.0086598	0.0054	17755.757	178200	0.099639	0.113623

Παράρτημα Γ Κατά μήκος τομές δοκών

Г1

Τριώροφο

Г2

Εννιαώροφο



Γ1: Κατά μήκος τομές δοκών - Τριώροφο

Όροφος 0 – Δοκός Δ1



Όροφος 0 – Δοκός Δ3



Όροφος 0 – Δοκός Δ4



Όροφος 1 – Δοκός Δ1



Όροφος 1 – Δοκός Δ3



Όροφος 1 – Δοκός Δ4



Όροφος 2 – Δοκός Δ1



Όροφος 2 – Δοκός Δ3



Όροφος 2 – Δοκός Δ4



Γ2: Κατά μήκος τομές δοκών – Εννιαώροφο

Όροφος 0 – Δοκός Δ1



Όροφος 0 – Δοκός Δ3



Όροφος 0 – Δοκός Δ4



Όροφος 1 – Δοκός Δ1



Όροφος 1 – Δοκός Δ3



Όροφος 1 – Δοκός Δ4
