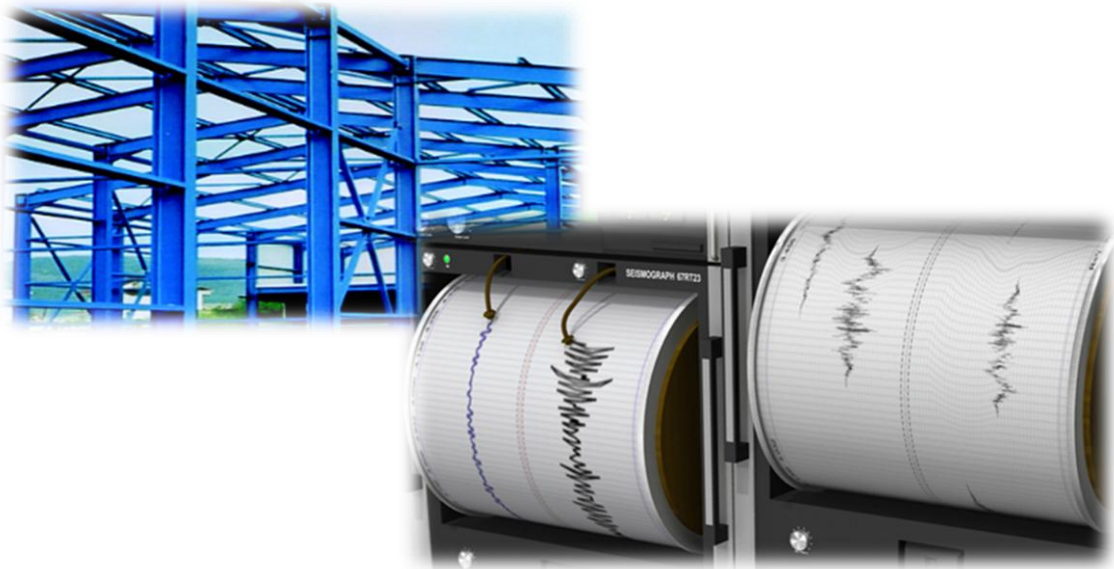




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
“ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ”
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ
ΟΛΙΓΟΚΥΚΛΙΚΗΣ ΚΟΠΩΣΗΣ – ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΥΚΛΩΝ



ΜΠΑΡΟΥΛΑΚΗ ΜΑΡΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Χ. ΜΟΥΖΑΚΗΣ
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Έχοντας ολοκληρώσει την παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία οφείλω να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα, καθ' όλη τη διάρκεια εξέλιξής της.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χ. Μουζάκη, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την άριστη συνεργασία μας και φυσικά για την ιδέα εκπόνησης του συγκεκριμένου θέματος, το οποίο βρήκα εξαιρετικά ενδιαφέρον. Οι υποδείξεις του, η συνεχής παρακολούθηση και η καθοδήγησή του κατά την πορεία της εργασίας συνέβαλαν ουσιαστικά στην ολοκλήρωσή της. Είναι αδύνατο να μην τονίσω επίσης ότι με βοήθησε με την ηθική του υποστήριξη να υπερβαίνω τα εμπόδια που συχνά παρουσιάζονταν μπροστά μου κυρίως λόγω άγχους και κούρασης.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Β. Ντερτιμάνη, Ερευνητή Ε.Μ.Π., του οποίου η συμβολή υπήρξε ιδιαίτερα ουσιαστική στα πρώτα στάδια της εργασίας.

Θα ήταν παράλειψή μου να μην αναφερθώ και στους ανθρώπους του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας, όπου πέρασα αρκετές ώρες το τελευταίο διάστημα, και οι οποίοι με υποδέχθηκαν στο χώρο εργασίας τους και βοήθησαν με τον ένα ή τον άλλο τρόπο.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με στήριξαν κυρίως ψυχολογικά, ώστε αυτή τη στιγμή να έχω στα χέρια μου την εργασία ολοκληρωμένη. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω το Σωτήρη και την Ελεάνα για το πραγματικό ενδιαφέρον και την κατανόηση που έδειξαν κατά τις πολύωρες συζητήσεις μας σχετικά με το περιεχόμενο της εργασίας αυτής. Τέλος ευχαριστώ τους γονείς μου, Στέλιο και Άρτεμις, οι οποίοι μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο τα απαραίτητα εφόδια, ηθικά και υλικά, για να ανταπεξέλθω στις δυσκολίες που κατά καιρούς παρουσιάστηκαν. Ιδιαίτερώς ευχαριστώ την αδερφή μου, Ειρήνη, για την ανεκτίμητες συμβουλές της.

ΜΠΑΡΟΥΛΑΚΗ ΜΑΡΙΑ

Αθήνα, Μάρτιος 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 3 |
| 2. ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ | 5 |
| 2.1 Πιθανολογική εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας (probabilistic seismic hazard analysis)..... | 5 |
| 2.2 Πιθανολογική εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας (probabilistic seismic hazard analysis) λαμβάνοντας υπόψη φαινόμενα κοντινού πεδίου | 10 |
| 2.3 Σεισμική επικινδυνότητα ελληνικού χώρου | 14 |
| 2.4 Ανάδρομη πιθανολογικής εκτίμησης σεισμικής επικινδυνότητας (probabilistic seismic hazard deaggregation) | 17 |
| 3. ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΙΣΧΥΡΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΟΝΗΣΗΣ | 19 |
| 3.1 Ορισμός διάρκειας ισχυρής σεισμικής δόνησης | 19 |
| 3.2 Σχέσεις υπολογισμού διάρκειας ισχυρής σεισμικής δόνησης | 22 |
| 3.3 Επιρροή της διάρκειας της ισχυρής σεισμικής δόνησης στον διορθωτικό συντελεστή απόσβεσης η | 24 |
| 3.4 Παράδειγμα εφαρμογής για την εύρεση της διάρκειας της ισχυρής εδαφικής κίνησης σε μία θέση | 26 |
| 4. ΤΕΧΝΗΤΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ | 37 |
| 4.1 Δημιουργία τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων | 37 |
| 4.2 Απαιτούμενα δεδομένα εισαγωγής | 38 |
| 5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΥΚΛΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΟΝΗΣΗΣ..... | 43 |
| 5.1 Σεισμική απόκριση..... | 43 |
| 5.1.1 Ελαστικά φάσματα απόκρισης..... | 43 |
| 5.1.2 Χρονοϊστορία απόκρισης | 46 |
| 5.2 Μέτρηση κύκλων φόρτισης..... | 47 |
| 5.2.1 Μέθοδος Rainflow..... | 50 |
| 6. ΚΟΠΩΣΗ | 54 |
| 6.1 Περιγραφή φαινομένου | 54 |
| 6.2 Κριτήριο Miner – Μοντέλο συσσωρευμένης βλάβης..... | 55 |
| 6.3 Μεθοδολογία χρήσης καμπύλων ολιγοκυκλικής κόπωσης | 57 |
| 6.3.1 Ορισμός εύρους τάσης S^* | 57 |
| 6.3.2 Υπολογισμός ισοδύναμης τάσης S_{eq}^* | 57 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.3.3 | Υπολογισμός επιτρεπόμενων κύκλων..... | 58 |
| 6.3.4 | Υπολογισμός συσσωρευμένης βλάβης..... | 59 |
| 7. | ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ | 60 |
| 7.1 | Δημιουργία τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων συγκεκριμένης διάρκειας ισχυρής σεισμικής δόνησης..... | 60 |
| 7.2 | Εύρεση πλήθους κύκλων συγκεκριμένου πλάτους σε κάθε χρονοϊστορία απόκρισης μετακινήσεων | 61 |
| 7.3 | Καθορισμός επικρατέστερου σεναρίου πλήθους και πλάτους κύκλων μετατόπισης 66 | |
| 7.4 | Σύγκριση του προτεινόμενου σεναρίου με τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα... 69 | |
| 7.5 | Σύγκριση του προτεινόμενου σεναρίου με πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις..... | 71 |
| 7.5.1 | Περιγραφή και χαρακτηριστικά σεισμικών δονήσεων | 71 |
| 7.5.2 | Εφαρμογή μεθοδολογίας ολιγοκυκλικής κόπωσης..... | 81 |
| 7.6 | Ανελαστικές αναλύσεις για σύγκριση του προτεινόμενου σεναρίου με πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις..... | 81 |
| 8. | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ | 88 |
| 8.1 | Συμπεράσματα κατά την πορεία της εργασίας..... | 88 |
| 8.2 | Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα | 90 |
| 9. | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ..... | 91 |

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|---|----|
| Σχήμα 2.1 Τέσσερα στάδια πιθανολογικής εκτίμησης σεισμικής επικινδυνότητας (Kramer, 1996)..... | 5 |
| Σχήμα 2.2 Παραδείγματα σεισμικών ζωνών διαφορετικής γεωμετρίας (Kramer, 1996) | 6 |
| Σχήμα 2.3 Παραδείγματα εύρεσης απόστασης πηγής – εξεταζόμενης θέσης για διαφορετική γεωμετρία πηγής (Kramer, 1996)..... | 6 |
| Σχήμα 2.4 Νόμος Gutenberg – Richter (Kramer, 1996) | 7 |
| Σχήμα 2.5 Ταίριασμα νόμου Gutenberg – Richter (φραγμένου και μη) με τυπική κατανομή μεγεθών σεισμών (Baker, 2008) | 7 |
| Σχήμα 2.6 Σχηματική απόδοση της εξίσωσης πρόβλεψης εδαφικής κίνησης (Wang, 2010) .. | 8 |
| Σχήμα 2.7 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας δ (Wang, 2010) | 8 |
| Σχήμα 2.8 Παράδειγμα εδαφικής κίνησης με παλμό | 10 |
| Σχήμα 2.9 (a) Ρήγμα ολίσθησης (strike – slip) | 12 |
| (b) Ρήγμα βύθισης (dip – slip) | 12 |
| Σχήμα 2.10 Δείκτης εμφάνισης παλμού ως συνάρτηση του προσανατολισμού. Οι σκιασμένες περιοχές παρουσιάζουν προσανατολισμούς όπου ισχυροί παλμοί είναι εμφανείς. (Shahi & Baker, 2011)..... | 13 |
| Σχήμα 2.11 Σεισμικές πηγές του ελληνικού χώρου για επιφανειακούς σεισμούς. Οι λευκοί κύκλοι παριστάνουν επίκεντρα ιστορικών σεισμών, ενώ οι μαύροι σεισμούς του παρόντα αιώνα (Παπαζάχος, 1989) | 14 |
| Σχήμα 2.12 Σεισμικές πηγές ενδιάμεσου βάθους (Παπαζάχος, 1989) | 15 |
| Σχήμα 2.13 Νέος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας ελληνικού χώρου (ΦΕΚ 1154/ΕΑΚ, 2003)..... | 15 |
| Σχήμα 3.1 Απεικόνιση του ορισμού της διάρκειας μεταξύ καθορισμένων ορίων (bracketed duration) και της ομοιόμορφης διάρκειας (uniform duration) που παρουσιάζει την πιθανότητα παρατήρησης ακόμα και μηδενικής διάρκειας σεισμού (Stafford et al., 2008) 20 | 20 |
| Σχήμα 3.2 Διάγραμμα Husid για την εύρεση της διάρκειας της ισχυρής σεισμικής δόνησης (Husid, 1969) | 21 |
| Σχήμα 3.3 Διάρκεια ισχυρής σεισμικής δόνησης (Significant duration) | 21 |
| Σχήμα 3.4 Μέγιστη μετατόπιση ταλαντωτών ιδιοπεριόδου T και διαφορετικής απόσβεσης (μέση) υποκείμενοι σε αρμονική ταλάντωση ίδιας ιδιοπεριόδου (επάνω) και διακύμανση του λόγου μετατοπίσεων με τον αριθμό των κύκλων (κάτω) (Bommer & Mendis, 2005) | 26 |
| Σχήμα 3.5 Γεωμετρία παραδείγματος εφαρμογής..... | 26 |
| Σχήμα 3.6 Μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης λ_{total} | 33 |
| Σχήμα 3.7 Πιθανότητα υπέρβασης για $T = 50$ έτη..... | 33 |
| Σχήμα 3.8 Deaggregated Magnitude | 34 |
| Σχήμα 3.9 Deaggregated Distance | 35 |
| Σχήμα 3.10 Deaggregated Epsilon | 36 |
| Σχήμα 4.1 Συναρτήσεις χρόνου | 38 |
| Σχήμα 4.2 Συναρτήσεις χρόνου και απαιτούμενα δεδομένα εισαγωγής για την παραγωγή τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων (Hou, 1968, Liu, 1969, Jennings, 1968) | 39 |
| Σχήμα 4.3 Σεισμοί προσομοίωσης ανάλογα με το μέγεθος του σεισμού (Jennings, Housner, Tsai, 1968) | 41 |
| Σχήμα 4.4 Ελαστικό φάσμα EC8..... | 41 |

| | |
|---|----|
| Σχήμα 5.1 Φάσμα απόκρισης για το σεισμό Imperial Valley | 43 |
| Σχήμα 5.2 Απεικόνιση της κατασκευής φάσματος απόκρισης. Η μέγιστη απόκριση κάθε μονοβάθμιου συστήματος αναπαριστάται γραφικά συναρτήσει της ιδιοπεριόδου του | 46 |
| Σχήμα 5.3 Απόκριση μετατοπίσεων μονοβάθμιου ταλαντωτή | 46 |
| Σχήμα 5.4 Παράδειγμα μέτρησης κορυφών | 47 |
| Σχήμα 5.5 Παράδειγμα μέτρησης κορυφών πάνω διάφορα καθορισμένα επίπεδα | 48 |
| Σχήμα 5.6 Παράδειγμα μέτρησης κύκλων ανάλογα με το εύρος τους, οι κόκκινες συμπαγείς γραμμές είναι οι πλήρεις κύκλοι, ενώ οι μπλε διακεκομμένες οι μισοί κύκλοι .. | 48 |
| Σχήμα 5.7 Αναπαράσταση του αριθμού των ισοδύναμων κύκλων σε ένα ελαστοπλαστικό σύστημα | 49 |
| Σχήμα 5.8 Αλγόριθμος Rainflow | 51 |
| Σχήμα 5.9 Μέθοδος Rainflow | 52 |
| Σχήμα 5.10 Μέγιστα (κορυφές) και ελάχιστα (κοιλιάδες) τυχαίας χρονιοιστορίας | 53 |
| Σχήμα 5.11 Εφαρμογή μεθόδου Rainflow στη Matlab | 53 |
| Σχήμα 6.1 Τυπική καμπύλη ανάπτυξης ρωγμής | 54 |
| Σχήμα 6.2 Στάδια κόπωσης | 55 |
| Σχήμα 6.3 Απεικόνιση των σταδίων κόπωσης I και II | 55 |
| Σχήμα 6.4 Καμπύλη κόπωση Wöhler (καμπύλη S – N) | 56 |
| Σχήμα 7.1 Μορφή αρχείου δεδομένων για την κατασκευή των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων | 60 |
| Σχήμα 7.2 Τιμές παραμέτρων εισόδου για την παραγωγή τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων στο SIMQKE | 61 |
| Σχήμα 7.3 Παράδειγμα προκύπτοντος τεχνητού επιταχυνσιογραφήματος | 61 |
| Σχήμα 7.4 Ιστόγραμμα κύκλων μέγιστου πλάτους | 62 |
| Σχήμα 7.5 Επιλεγμένα ιστογράμματα κύκλων μέγιστου πλάτους – γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών | 64 |
| Σχήμα 7.6 Διαφορετικές περιπτώσεις μορφής γενικευμένης κατανομής ακραίων τιμών | 65 |
| Σχήμα 7.7 Κατανομή των δεκαπέντε πρώτων κύκλων μεγαλύτερου πλάτους | 65 |
| Σχήμα 7.8 Αριθμός μισών κύκλων συναρτήσει του πλάτους τους | 68 |
| Σχήμα 7.9 Συσχέτιση μέγιστης μετατόπισης ελαστικού φάσματος – πλάτους κύκλου πρώτης τάξης | 68 |
| Σχήμα 7.10 Κλιμάκωση (scaling) πραγματικών σεισμικών διεγέρσεων σύμφωνα με το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων του EC8 | 71 |
| Σχήμα 7.11 Κλιμάκωση (scaling) πραγματικών σεισμικών διεγέρσεων σύμφωνα με το ελαστικό φάσμα μετακινήσεων του EC8 | 72 |
| Σχήμα 7.12 Επιταχυνσιογράφημα Golbasi | 73 |
| Σχήμα 7.13 Ελαστικό φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων Golbasi | 73 |
| Σχήμα 7.14 Ελαστικό φάσμα απόκρισης μετακινήσεων Golbasi | 73 |
| Σχήμα 7.15 Απόκριση μετακινήσεων Golbasi για $T = 0.5 \text{ sec}$ | 74 |
| Σχήμα 7.16 Επιταχυνσιογράφημα Whittier Narrows | 74 |
| Σχήμα 7.17 Ελαστικό φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων Whittier Narrows | 74 |
| Σχήμα 7.18 Ελαστικό φάσμα απόκρισης μετατοπίσεων Whittier Narrows | 75 |
| Σχήμα 7.19 Απόκριση μετακινήσεων Whittier Narrows για $T = 0.5 \text{ sec}$ | 75 |
| Σχήμα 7.20 Επιταχυνσιογράφημα Sicilia Orientale | 75 |
| Σχήμα 7.21 Ελαστικό φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων Sicilia Orientale | 76 |

| | |
|--|----|
| Σχήμα 7.22 Ελαστικό φάσμα απόκρισης μετακινήσεων Sicilia Orientale | 76 |
| Σχήμα 7.23 Απόκριση μετακινήσεων Sicilia Orientale για $T = 0.5$ sec..... | 76 |
| Σχήμα 7.24 Επιταχυνσιογράφημα Cerkez..... | 77 |
| Σχήμα 7.25 Ελαστικό φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων Cerkez | 77 |
| Σχήμα 7.26 Ελαστικό φάσμα απόκρισης μετακινήσεων Cerkez | 77 |
| Σχήμα 7.27 Απόκριση μετακινήσεων Cerkez για $T = 0.5$ sec | 78 |
| Σχήμα 7.28 Επιταχυνσιογράφημα Tirana | 78 |
| Σχήμα 7.29 Ελαστικό φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων Tirana | 78 |
| Σχήμα 7.30 Ελαστικό φάσμα απόκρισης μετακινήσεων Tirana | 79 |
| Σχήμα 7.31 Απόκριση μετακινήσεων Tirana για $T = 0.5$ sec..... | 79 |
| Σχήμα 7.32 Επιταχυνσιογράφημα Olfus..... | 79 |
| Σχήμα 7.33 Ελαστικό φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων Olfus..... | 80 |
| Σχήμα 7.34 Ελαστικό φάσμα απόκρισης μετακινήσεων Olfus..... | 80 |
| Σχήμα 7.35 Απόκριση μετακινήσεων Olfus για $T = 0.5$ sec..... | 80 |
| Σχήμα 7.36 Ελαστοπλαστικό σύστημα και το αντίστοιχο ελαστικό σύστημα..... | 82 |
| Σχήμα 7.37 Μονοβάθμιος ταλαντωτής προς επίλυση στο πρόγραμμα NONLIN..... | 83 |
| Σχήμα 7.38 Ενδεικτική παραμορφωμένη εικόνα του φορέα σε κάποια χρονική στιγμή κατά τη σεισμική φόρτιση | 83 |
| Σχήμα 7.39 Ενδεικτική εικόνα κατά την εισαγωγή των δεδομένων για την εκτέλεση των ανελαστικών αναλύσεων | 84 |
| Σχήμα 7.40 Ανελαστική απόκριση μετακινήσεων Golbasi | 84 |
| Σχήμα 7.41 Ανελαστική απόκριση μετακινήσεων Whittier Narrows | 84 |
| Σχήμα 7.42 Ανελαστική απόκριση μετακινήσεων Sicilia Orientale | 85 |
| Σχήμα 7.43 Ανελαστική απόκριση μετακινήσεων Cerkez | 85 |
| Σχήμα 7.44 Ανελαστική απόκριση μετακινήσεων Tirana | 85 |
| Σχήμα 7.45 Ανελαστική απόκριση μετακινήσεων Olfus..... | 85 |
| Σχήμα 7.46 Σύγκριση φάσματος σχεδιασμού επιταχύνσεων EC8 – διέγερσης Olfus..... | 86 |
| Σχήμα 7.47 Σύγκριση φάσματος σχεδιασμού μετατοπίσεων EC8 –διέγερσης Olfus..... | 87 |

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|----|
| Πίνακας 2.1 Επιφανειακοί σεισμοί..... | 16 |
| Πίνακας 2.2 Σεισμοί ενδιάμεσου βάθους | 17 |
| Πίνακας 3.1 Μέτρηση διάρκειας ισχυρής σεισμικής δόνησης | 22 |
| Πίνακας 3.2 Κατανομή πιθανότητας απόστασης πηγής – εξεταζόμενης θέσης..... | 27 |
| Πίνακας 3.3 Κατανομή πιθανότητας σεισμικού μεγέθους για τη σεισμική πηγή 1 | 27 |
| Πίνακας 3.4 Κατανομή πιθανότητας σεισμικού μεγέθους για σεισμική πηγή 2 | 28 |
| Πίνακας 3.5 Μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης λ ($D > d$ sec) για τη σεισμική πηγή 1..... | 28 |
| Πίνακας 3.6 Μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης λ ($D > d$ sec) για τη σεισμική πηγή 2..... | 30 |
| Πίνακας 3.7 Αθροιστική μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης λ_{total} και αντίστοιχη πιθανότητα υπέρβασης για $T = 50$ έτη | 32 |
| Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά ελαστικού φάσματος EC8 ανάλογα με τον τύπο του εδάφους | 41 |
| Πίνακας 4.2 Κατάταξη εδαφών σύμφωνα με τον EC8 | 42 |
| Πίνακας 7.1 Πλήθος μισών κύκλων συγκεκριμένου πλάτους ανά κλάση | 66 |
| Πίνακας 7.2 Επιτρεπόμενοι κύκλοι N_{total} και δείκτης συσσωρευμένης βλάβης I_d για τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα | 70 |
| Πίνακας 7.3 Επιτρεπόμενοι κύκλοι N_{total} και δείκτης συσσωρευμένης βλάβης I_d πραγματικών σεισμικών δονήσεων..... | 81 |
| Πίνακας 7.4 Απαιτούμενα δεδομένα για ανελαστικές αναλύσεις..... | 83 |

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα από τα σημαντικότερα φαινόμενα που παρατηρούνται όταν οι κατασκευές υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις μεταβλητού πλάτους, όπως είναι ο σεισμός, είναι η εμφάνιση αστοχιών μέσω ανάπτυξης ρωγμών εξαιτίας της κόπωσης.

Στην παρούσα εργασία δίνεται ιδιαίτερη προσοχή σε πιθανές αστοχίες λόγω του φαινομένου της ολιγοκυκλικής κόπωσης (low – cycle fatigue), η οποία οφείλεται σε ένα μικρό πλήθος κύκλων φόρτισης ικανών να προκαλέσουν μεγάλες μετελαστικές παραμορφώσεις, ακόμα και κατάρρευση του φορέα. Η μεθοδολογία όμως χρήσης καμπύλων ολιγοκυκλικής κόπωσης σε κατασκευές από χάλυβα που βασίζεται στην ερευνητική εργασία των C. Castiglioni, X. Μουζάκη και Π. Καρύδη: “Constant and Variable Amplitude Cyclic Behavior of Welded Steel Beam – to – Column Joints” (2007), απαιτεί την εκτίμηση του αριθμού και του εύρους των αναμενόμενων κύκλων μετατόπισης, κάτι το οποίο αποτελεί βασικό αντικείμενο των επόμενων κεφαλαίων.

Αρχικά περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθούνται σε μία πιθανολογική ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας, ενώ τονίζονται και οι διαφοροποιήσεις που απαιτεί η ανάλυση σε περιπτώσεις όπου λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα κοντινού πεδίου. Ακόμα παρουσιάζεται και η διαδικασία ανάδρομης ανάλυσης σεισμικής επικινδυνότητας, η οποία βρίσκει ευρεία εφαρμογή στον καθορισμό του επικρατέστερου σεισμικού σενάριο. Οι αναλύσεις αυτές εφαρμόζονται σε ένα παράδειγμα εύρεσης της διάρκειας της ισχυρής σεισμικής δόνησης, η οποία αποτελεί μια σημαντική εδαφική παράμετρο και για την οποία έχουν προταθεί διάφοροι ορισμοί και αρκετές σχέσεις.

Για τις ανάγκες του σχεδιασμού είναι συχνά αναγκαία η παραγωγή τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων με βάση κάποιο φάσμα αναφοράς (target spectrum). Η διαδικασία που απαιτείται για την δημιουργία τέτοιων επιταχυνσιογραφημάτων περιγράφεται βασισμένη στη λειτουργία του προγράμματος SIMQKE.

Η σεισμική απόκριση ενός συστήματος, το οποίο προοδευτικά χάνει μέρος της αντοχής του εξαιτίας των εναλλασσόμενων κύκλων φόρτισης στους οποίους υπόκεινται, εξαρτάται όχι μόνο από το μέγιστο πλάτος της σεισμικής δόνησης αλλά και από τη διάρκειά της, η οποία καθορίζει και τον αριθμό των κύκλων. Έτσι παρουσιάζονται μέθοδοι μέτρησης των κύκλων φόρτισης, ενώ ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στον ευρέως εφαρμοζόμενο αλγόριθμο Rainflow. Επιπλέον, περιγράφεται το φαινόμενο της κόπωσης αλλά και η μεθοδολογία χρήσης καμπύλων ολιγοκυκλικής κόπωσης με στόχο την εύρεση του δείκτη συσσωρευμένης βλάβης.

Η εκτίμηση του αριθμού και του εύρους των αναμενόμενων κύκλων μετατόπισης μιας κατασκευής πραγματοποιείται μέσω στατιστικών αναλύσεων, βασισμένων σε ένα δείγμα σαράντα τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων, τα οποία κατασκευάστηκαν σύμφωνα με ένα επιλεγμένο σεισμικό σενάριο και με φάσμα αναφοράς το ελαστικό φάσμα του EC8. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης, που προέκυψαν πιθανολογικά, συγκρίθηκαν μέσω της μεθοδολογίας καμπύλων ολιγοκυκλικής κόπωσης με τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα, ώστε να επιβεβαιωθεί η ισχύς τους.

Τέλος, επιλέχθηκαν πραγματικές χρονοϊστορίες που να ανταποκρίνονται όσο το δυνατόν καλύτερα στο σενάριο που μελετήθηκε και συγκρίθηκαν με αυτό μέσω ελαστικών και ανελαστικών αναλύσεων.

Τα γενικά συμπεράσματα όλων των αναλύσεων καθώς και προτάσεις για περαιτέρω μελλοντική έρευνα παρουσιάζονται στην τελευταία ενότητα της παρούσας εργασίας.

ABSTRACT

An important phenomenon observed when the structures are subjected to variable amplitude loading, such as earthquake, is the appearance of failures through the development of cracks due to fatigue.

In this dissertation special attention is given to possible failures due to low – cycle fatigue, which occurs when a small number of cycles cause great post – elastic deformations or even collapse of the structure. The methodology of using low – cycle fatigue curves in steel structures based on the research study of C. Castiglioni, C. Mouzakis and P. Karidis: “Constant and Variable Amplitude Cyclic Behavior of Welded Steel Beam – to – Column Joints” (2007), requires the estimation of the number and range of expected displacement cycles, which is the main subject of the next chapters.

Initially are described in detail the steps that need to be followed for a probabilistic seismic hazard analysis and they are highlighted the differences in the analysis in case near – field effects are considered. It is also presented the process of a deaggregation analysis, which finds wide application in the determination of the most expected seismic scenario. These analyses are applied through an example of finding strong shaking motion duration, an important soil parameter for which several different definitions and empirical relationships exist.

For the purposes of design it is necessary to produce artificial accelerograms based on a target spectrum. The process required for the creation of such accelerograms is described based on the software program SIMQKE.

The seismic response of a system, which gradually loses its strength due to alternating cycles, depends not only on the maximum amplitude of the seismic vibration but also on its duration, which consequently defines the number of cycles. As a matter of fact the methods of measuring cycles are presented, focusing especially to the widely used algorithm Rainflow. Furthermore, are described the phenomenon of fatigue and the methodology of using low – cycle fatigue curves in order to find the damage accumulation index.

The estimation of the number and range of expected displacement cycles of a steel structure was made through statistical analysis, based on a sample of forty artificial accelerograms, which were produced according to the selected seismic scenario with target spectrum the elastic spectrum of EC8. The results of this analysis, which were probabilistic obtained, were compared through low – cycle fatigue analysis with the artificial accelerograms, in order to confirm its validity.

Finally, real time – histories were selected to correspond as closely as possible to the studied scenario and compared with that through elastic and inelastic analyses.

The general conclusion of all analyses and suggestions for further future research are presented in the last section of this thesis.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σεισμικές δονήσεις συμβαίνουν σχεδόν καθημερινά σε όλο τον κόσμο. Η μελέτη τους χρονολογείται εδώ και αιώνες, με την παλαιότερη αξιόπιστη καταγραφή ισχυρού σεισμού να προέρχεται από την Κίνα (780 π. Χ.). Μόνο ένα μικρό ποσοστό των σεισμών είναι αρκετά ισχυροί ώστε να θεωρηθούν σημαντικοί, είτε λόγω του μεγέθους και των καταστροφών που προξένησαν είτε λόγω των σημαντικών πληροφοριών όπου μηχανικοί και άλλοι επιστήμονες άντλησαν από αυτούς.

Όταν συμβαίνει ένας σεισμός, σεισμικά κύματα ταξιδεύουν ραγδαία μακριά από την πηγή διαμέσου του φλοιού της Γης. Μόλις τα κύματα αυτά φτάσουν στη επιφάνεια του εδάφους παράγουν δόνηση, η οποία μπορεί να διαρκέσει από δευτερόλεπτα μέχρι μερικά λεπτά. Το βασικό όργανο για την καταγραφή των τριών συνιστωσών της εδαφικής δόνησης κατά τη διάρκεια των σεισμών είναι ο επιταχυνσιογράφος ισχυρής κίνησης, ο οποίος δεν καταγράφει συνεχώς αλλά τίθεται σε λειτουργία με τα πρώτα κύματα του σεισμού που φτάνουν. Η καταγραφή συνεχίζεται για μερικά λεπτά ή μέχρι η εδαφική δόνηση να πέσει και πάλι σε μη αντιληπτά επίπεδα.

Η ισχύς και η διάρκεια της δόνησης σε μία συγκεκριμένη θέση εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος του σεισμού, την απόσταση από τη σεισμική πηγή αλλά και από τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Σήμερα δίνονται παγκόσμια τεράστια χρηματικά ποσά για την ανάπτυξη υποδομών ανθεκτικών σε σεισμικές δονήσεις, έτσι ώστε να προστατευθεί κυρίως η ανθρώπινη ζωή και ιδιοκτησία. Εξαιτίας της αδυναμίας πρόγνωσης μέχρι σήμερα του ακριβούς χρόνου, της θέσης και του μεγέθους ενός μελλοντικού σεισμού, γίνεται προσπάθεια τουλάχιστον για την πρόγνωση των πλέον πιθανών εδαφικών κινήσεων σε μία θέση. Η εκτίμηση των αναμενόμενων εδαφικών κινήσεων στη θέση κατασκευής κάποιου τεχνικού έργου, βασίζεται στην υπόθεση ότι οι μελλοντικές εδαφικές κινήσεις θα είναι παρόμοιες με αυτές που παρατηρήθηκαν στο παρελθόν. Επομένως για την ακριβέστερη εκτίμησή τους απαιτείται να ληφθούν υπόψη όλα τα υπάρχοντα σεισμολογικά δεδομένα. Η διαδικασία εκτίμησης του σεισμικού κινδύνου που ακολουθείται σε πολλές περιπτώσεις είναι ντετερμινιστική, εξετάζοντας ένα συγκεκριμένο σεισμικό σενάριο, ή πιθανολογική, λαμβάνοντας υπόψη και πιθανές αβεβαιότητες στο μέγεθος του σεισμού, στην απόσταση από την εξεταζόμενη θέση και στην διάρκεια του.

Ένα από τα πιο σημαντικά φαινόμενα που παρατηρούνται όταν οι κατασκευές υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις μεταβλητού πλάτους, όπως είναι ο σεισμός, είναι η εμφάνιση αστοχιών μέσω ανάπτυξης ρωγμών, ακόμα και όταν οι μέγιστες τάσεις παραμένουν σημαντικά μικρότερες από το όριο διαρροής. Τέτοιου τύπου αστοχίες οφείλονται στο φαινόμενο της κόπωσης, η οποία ορίζεται ως η διαδικασία προοδευτικής τοπικής μόνιμης δομικής αλλαγής που λαμβάνει χώρα σε ένα υλικό υποκείμενο σε συνθήκες, οι οποίες προκαλούν αυξομειούμενες τάσεις και παραμορφώσεις σε ένα ή περισσότερα σημεία, με πιθανό αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών ή πλήρους αστοχίας ύστερα από ένα μεγάλο αριθμό αυξομειώσεων.

Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται σε πιθανές αστοχίες λόγω του φαινομένου της ολιγοκυκλικής κόπωσης (low – cycle fatigue), η οποία οφείλεται σε ένα μικρό πλήθος κύκλων φόρτισης

ικανών να προκαλέσουν μεγάλες μετελαστικές παραμορφώσεις, ακόμα και κατάρρευση του φορέα. Η μεθοδολογία χρήσης καμπύλων ολιγοκυκλικής κόπωσης σε κατασκευές από χάλυβα που βασίζεται στην ερευνητική εργασία των C. Castiglioni, X. Μουζάκη και Π. Καρύδη: “Constant and Variable Amplitude Cyclic Behavior of Welded Steel Beam – to – Column Joints” (2007), συνέβαλε σημαντικά στην ποσοτικοποίηση των επιδράσεων – βλαβών που επιφέρει το φαινόμενο αυτό στην κατασκευή.

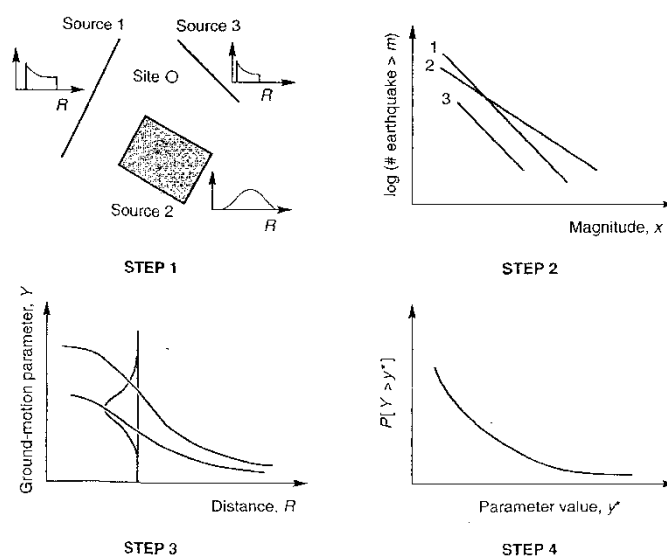
Για την εφαρμογή όμως της μεθόδου κρίνεται ουσιαστικής σημασίας, η πρόβλεψη ή έστω η εκτίμηση των αναμενόμενων κύκλων μετατόπισης μιας κατασκευής. Στην παρούσα εργασία γίνεται μία προσπάθεια εύρεσης των κύκλων μετατόπισης της απόκρισης μεταλλικής κατασκευής δεδομένης της σεισμικής δόνησης, κάνοντας χρήση κατάλληλων στατιστικών εργαλείων.

2. ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

2.1 Πιθανολογική εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας (probabilistic seismic hazard analysis)

Με τον όρο σεισμική επικινδυνότητα ορίζεται η πιθανότητα να ξεπεράσει κάποια εδαφική παράμετρος, μέσα σε δεδομένο χρονικό διάστημα, κάποια δεδομένη τιμή. Η σεισμική επικινδυνότητα σε μία θέση εξαρτάται κυρίως από τρεις παράγοντες: το είδος και το μέγεθος της σεισμικής πηγής, την επίδραση του μέσου διάδοσης καθώς και την επίδραση των τοπικών γεωλογικών συνθηκών.

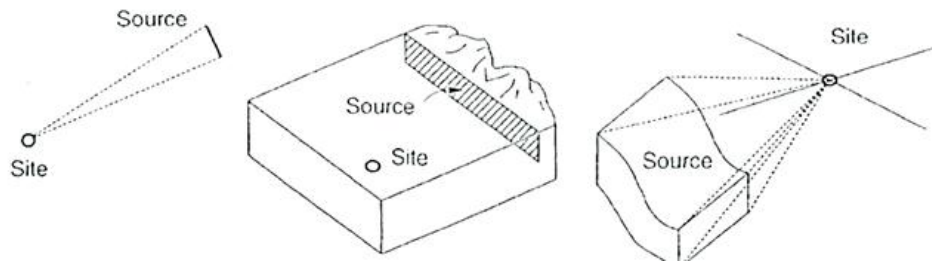
Η πιθανολογική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας σε μία θέση περιλαμβάνει τα εξής τέσσερα στάδια (Σχήμα 2.1):



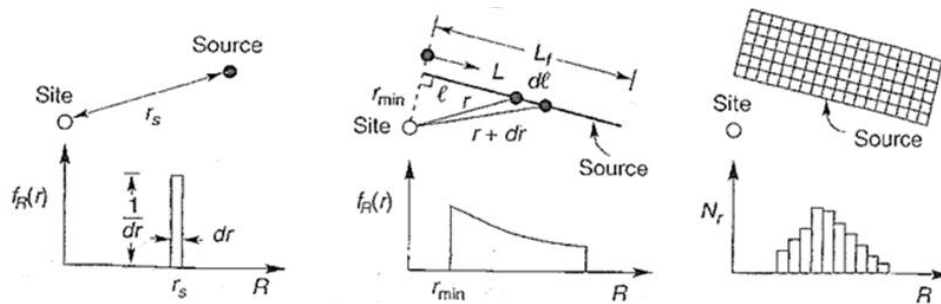
Σχήμα 2.1 Τέσσερα στάδια πιθανολογικής εκτίμησης σεισμικής επικινδυνότητας (Kramer, 1996)

1. Καθορισμός των πιθανών προς ενεργοποίηση σεισμικών πηγών (seismic source regionalization)

Στις περισσότερες των περιπτώσεων οι σεισμικές πηγές καθορίζονται ως ομοίμορφα σεισμικά περιοχές, όπου η πιθανότητα να συμβεί ένας σεισμός δεδομένου μεγέθους είναι η ίδια σε ολόκληρη την πηγή. Η πιθανότητα αυτή συνδυάζεται στη συνέχεια με τη γεωμετρία της πηγής (σημειακή, επιφανειακή, ογκομετρική πηγή) και έτσι προκύπτει η αντίστοιχη κατανομή πιθανότητας απόστασης πηγής – εξεταζόμενης θέσης.



Σχήμα 2.2 Παραδείγματα σεισμικών ζωνών διαφορετικής γεωμετρίας (Kramer, 1996)



Σχήμα 2.3 Παραδείγματα εύρεσης απόστασης πηγής – εξεταζόμενης θέσης για διαφορετική γεωμετρία πηγής (Kramer, 1996)

2. Εύρεση του στατιστικού μοντέλου που περιγράφει τη σεισμικότητα των πηγών και καθορισμός των μέγιστων αναμενόμενων ανά σεισμική πηγή μεγεθών

Το σεισμικό μέγεθος αποτελεί την πλέον συνηθισμένη παράμετρο των σεισμολογικών δεδομένων και επομένως η σεισμικότητα κάθε πηγής εξετάζεται με βάση τον εμπειρικό νόμο της συχνότητας εμφάνισης μεγεθών μεγαλύτερων από m των Gutenberg – Richter (1944):

$$\log \lambda_m = a - bm \Rightarrow \lambda_m = 10^{a-bm} = e^{a_1 - b_1 m} \quad (2.1)$$

Όπου,

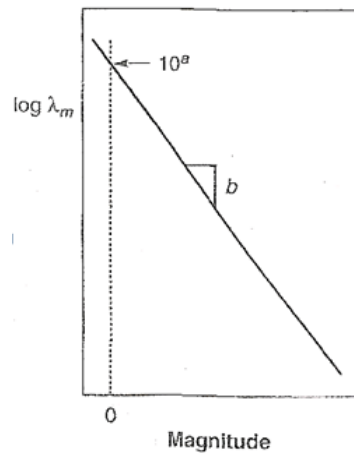
λ_m η μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης σεισμών μεγέθους μεγαλύτερων από m

10^a ο μέσος ετήσιος αριθμός σεισμών μεγέθους $m \geq 0$

b παράμετρος που περιγράφει τη σχετική πιθανότητα μεγάλου και μικρού μεγέθους σεισμών. Όσο αυξάνεται η παράμετρος αυτή, ο αριθμός των σεισμών μεγάλου μεγέθους μειώνεται σε σύγκριση με εκείνον μικρού μεγέθους.

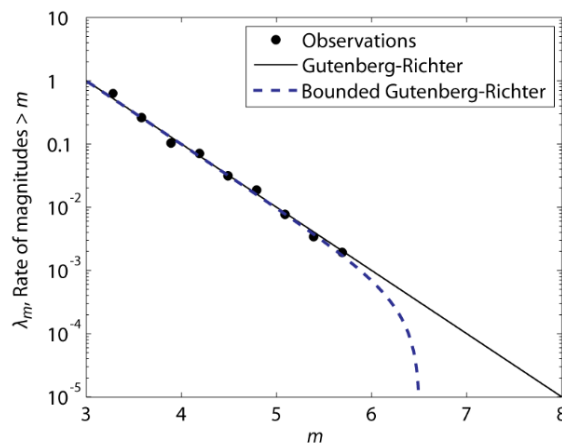
$$a_1 = 2.303a, b_1 = 2.303b$$

Οι παράμετροι a και b προκύπτουν γενικά μέσω μίας διαδικασίας ελαχίστων τετραγώνων στη βάση δεδομένων σεισμικότητας της πηγής που μελετάται.



Σχήμα 2.4 Νόμος Gutenberg – Richter (Kramer, 1996)

Σημαντική επίδραση σε μία μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας έχει η εκτίμηση ενός κατώτατου ορίου (κάτω από το οποίο δεν αναμένονται σημαντικές βλάβες στις κατασκευές, συνήθως $m_0 \approx 4.0 \div 5.0$) και ενός ανώτατου σεισμικού μεγέθους m_{max} .



Σχήμα 2.5 Ταίριασμα νόμου Gutenberg – Richter (φραγμένου και μη) με τυπική κατανομή μεγεθών σεισμών (Baker, 2008)

Επομένως η πιθανότητα το μέγεθος του σεισμού να βρίσκεται μεταξύ ενός κάτω ορίου m_L και ενός άνω ορίου m_U δίνεται από (Kramer, 1996):

$$P[m_L < m < m_U] = \int_{m=m_L}^{m=m_U} f_M(m) dm \cong f_M\left(\frac{m_L+m_U}{2}\right)(m_U - m_L) \quad (2.2)$$

$$\text{Όπου } f_M(m) = \frac{b_1 \cdot e^{-b_1(m-m_0)}}{1 - e^{-b_1(m_{max}-m_0)}}$$

3. Εκλογή του κατάλληλου νόμου απόσβεσης των σεισμικών πηγών (ground motion prediction equation)

Οι σχέσεις πρόβλεψης της ισχυρής κίνησης περιγράφουν τη μεταβολή του πλάτους των παραμέτρων της εδαφικής κίνησης (π.χ. μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, ταχύτητα, διάρκεια της ισχυρής κίνησης) και διαμορφώνονται ως συναρτήσεις του μεγέθους M , της απόστασης R της εξεταζόμενης θέσης από τη σεισμική πηγή και της αβεβαιότητας δ :

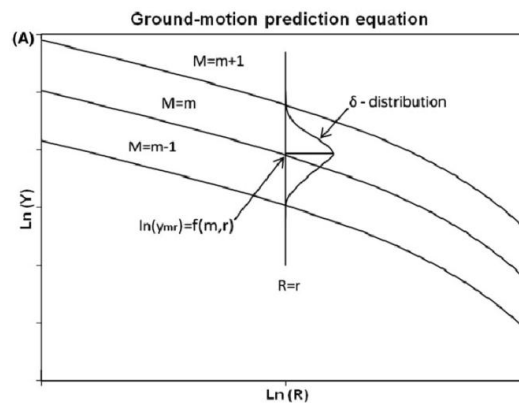
$$\ln Y = f(M, R) + \delta \Rightarrow \quad (2.3)$$

$$\ln Y = f(M, R) + \varepsilon \cdot \sigma_{\ln Y} \quad (2.4)$$

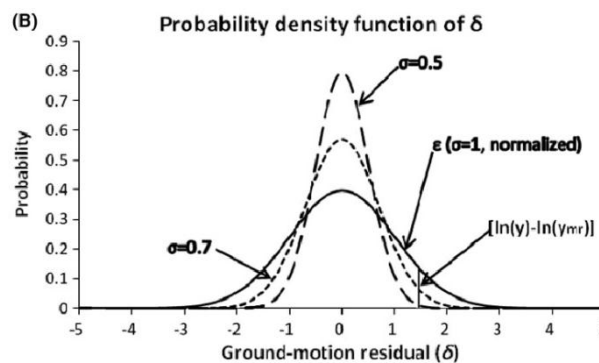
Όπου,

ε (σταθερά) ο αριθμός των τυπικών αποκλίσεων $\sigma_{\ln Y}$, ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση ίση με τη μονάδα και μετράται ως τη διαφορά σε σχέση με τη μέση τιμή $f(M, R)$

R η κοντινότερη απόσταση της εξεταζόμενης θέσης είτε από την επιφάνεια διάρρηξης (R_{RUP}) είτε από την επιφανειακή προβολή της διάρρηξης (R_{JB})



Σχήμα 2.6 Σχηματική απόδοση της εξίσωσης πρόβλεψης εδαφικής κίνησης (Wang, 2010)



Σχήμα 2.7 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας δ (Wang, 2010)

4. Υπολογισμός της πιθανότητας υπέρβασης κάποιας τιμής της επιλεγόμενης εδαφικής παραμέτρου χρησιμοποιώντας το κατάλληλο πιθανολογικό μοντέλο και το θεώρημα ολικής πιθανότητας

Οι αβεβαιότητες που αφορούν τη θέση εκδήλωσης του σεισμού, το μέγεθος του και τις παραμέτρους πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης συνδυάζονται ώστε να προκύψει η πιθανότητα υπέρβασης διαφορετικών επιπέδων της εδαφικής παραμέτρου που εξετάζεται σε μία θέση και κατά τη διάρκεια καθορισμένου χρονικού διαστήματος.

Η πιθανότητα αυτή για μια σεισμική πηγή j μπορεί να γραφεί (Wang, 2010):

$$\begin{aligned} P_j[Y > y] &= \iiint f_{M,R,\Delta}(m, r, \delta) H[\ln Y(m, r, \delta) - \ln y] dm dr d\delta \\ &= \iiint f_{M,j}(m) f_{R,j}(r) f_{\Delta,j}(\delta) H[\ln Y(m, r, \delta) - \ln y] dm dr d\delta \end{aligned} \quad (2.5)$$

Όπου,

$f_{M,R,\Delta}(m, r, \delta) = f_M(m) f_R(r) f_{\Delta}(\delta)$ μόνο εφόσον οι μεταβλητές M , R , δ είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές

$$H[\ln Y(m, r, \delta) - \ln y] = \begin{cases} 0 & \text{για } \ln Y(m, r, \delta) < \ln y \\ 1 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Εφόσον η αβεβαιότητα δ ακολουθεί την κανονική κατανομή η Σχέση 2.5 μετασχηματίζεται:

$$\begin{aligned} P_j[Y > y] &= \iint \left\{ 1 - \int_0^y \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln Y}} \exp\left[-\frac{(\ln y - \ln y_{mr})^2}{2\sigma_{\ln Y}^2}\right] d(\ln y) \right\} f_{M,j}(m) f_{R,j}(r) dm dr = \\ &= \iint \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{\ln y - \ln y_{mr}}{\sigma_{\ln Y}}\right) \right\} f_{M,j}(m) f_{R,j}(r) dm dr \end{aligned} \quad (2.6)$$

Όπου,

$$\ln y_{mr} = f(m, r)$$

$1 - \Phi(x)$ είναι η πιθανότητα υπέρβασης για την αβεβαιότητα δ

Αντίστοιχα η μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης $\lambda [Y > y]$ για όλες τις σεισμικές πηγές είναι:

$$\begin{aligned} \lambda[Y > y] &= \\ \sum_j \lambda_{m,j} \iint \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{\ln y - \ln y_{mr}}{\sigma_{\ln Y}}\right) \right\} f_{M,j}(m) f_{R,j}(r) dm dr \end{aligned} \quad (2.7)$$

Η χρονική εμφάνιση των σεισμών περιγράφεται συνήθως από ένα μοντέλο Poisson, το οποίο διαθέτει τις παρακάτω ιδιότητες:

1. Ο αριθμός των εμφανίσεων σεισμών σε ένα χρονικό διάστημα είναι ανεξάρτητο από τον αντίστοιχο αριθμό σε κάποιο άλλο χρονικό διάστημα.
2. Η πιθανότητα εμφάνισης σεισμού κατά τη διάρκεια ενός πολύ μικρού χρονικού διαστήματος είναι ανάλογη του μήκους του διαστήματος αυτού.
3. Η πιθανότητα περισσότερων της μίας εμφανίσεων κατά τη διάρκεια ενός πολύ μικρού διαστήματος είναι αμελητέα.

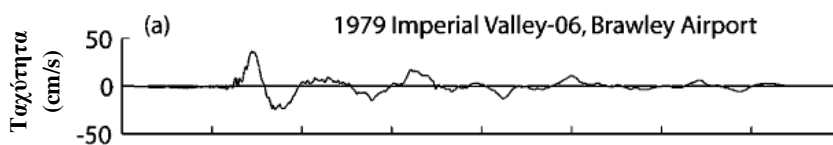
Οι ιδιότητες αυτές καταδεικνύουν ότι τα γεγονότα μίας διαδικασίας Poisson συμβαίνουν τυχαία, χωρίς «μνήμη» του χρόνου, του μεγέθους ή της θέσης οποιουδήποτε προηγούμενου γεγονότος.

Επομένως η πιθανότητα υπέρβασης σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα T είναι (Kramer, 1996):

$$P_{j,T}[Y > y] = 1 - e^{-P_j[Y>y] \cdot \lambda_m \cdot T} \quad (2.8)$$

2.2 Πιθανολογική εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας (probabilistic seismic hazard analysis) λαμβάνοντας υπόψη φαινόμενα κοντινού πεδίου

Οι εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου που περιέχουν ισχυρούς παλμούς (pulse like) (Σχήμα 2.8) παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στους τομείς της Σεισμολογίας και της Αντισεισμικής Μηχανικής, διότι επιβάλλουν ακραίες απαιτήσεις στις κατασκευές σε βαθμό που δεν προβλέπεται από τυπικές διαδικασίες σχεδιασμού, όπως είναι τα φάσματα απόκρισης. Φαινόμενα πρόσω κατευθυντικότητας είναι κυρίως υπεύθυνα για την εμφάνιση παλμών, τα οποία παρατηρούνται όταν η διάρρηξη του ρήγματος κατευθύνεται προς τη θέση ενδιαφέροντος με ταχύτητα παρόμοια με την ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων. (Somerville et al. 1997, Somerville 2003, Spudich & Chiou 2008)



Σχήμα 2.8 Παράδειγμα εδαφικής κίνησης με παλμό

Καταγραφές κοντινού πεδίου που δεν περιλαμβάνουν παλμό (non pulse like) εμφανίζουν ουσιαστικά την ίδια απόκριση με καταγραφές μακρινού πεδίου. (Tothong & Cornell, 2006) Επομένως ο εντοπισμός παλμού σε μία ιστορία ταχύτητας, κυρίως στη συνιστώσα κάθετη στη διεύθυνση του ρήγματος, είναι ιδιαίτερα κρίσιμος και συχνά δύσκολος λόγω της πολυπλοκότητας της εδαφικής κίνησης.

Η πιθανότητα εμφάνισης παλμού σε μία σεισμική δόνηση δεδομένου μεγέθους και απόστασης είναι πολύ χρήσιμη σε μία ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας. Καταρχάς

θεωρείται ότι όλες οι σεισμικές πηγές που μελετώνται βρίσκονται σε ακτίνα 30 km από την περιοχή ενδιαφέροντος και επειδή, όπως ειπώθηκε, δεν περιέχεται παλμός σε όλες τις καταγραφές κοντινού πεδίου (Near – Source) η μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης διαφορετικών επιπέδων μίας εδαφικής παραμέτρου εκφράζεται ως άθροισμα δύο παραμέτρων:

$$\lambda_{NS}[Y > y] = \lambda_{NS \& pulse}[Y > y] + \lambda_{NS \& no pulse}[Y > y] \quad (2.9)$$

Η παράμετρος χωρίς παλμό προκύπτει από μία συνηθισμένη διαδικασία πιθανολογικής εκτίμησης σεισμικής επικινδυνότητας, η οποία όμως απαιτεί τη χρήση σχέσεων απόσβεσης κοντινού πεδίου βάσει καταγραφών κοντινού πεδίου που δεν περιείχαν παλμό. Αντίστοιχα η παράμετρος με παλμό απαιτεί σχέσεις πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης ικανές να περιγράψουν το ιδιόμορφο φασματικό σχήμα που οφείλεται στον παλμό. Σε αυτή την περίπτωση οι σχέσεις απόσβεσης θα πρέπει να περιλαμβάνουν και ένα όρο z που να αντιπροσωπεύει την επίδραση των φαινομένων κατευθυντικότητας (Sommerville et al., 1997). Επομένως θα ισχύει (Iervolino & Cornell, 2008):

$$\begin{aligned} & \lambda_{NS \& pulse}[Y > y] = \\ & = \lambda_m \int_m \int_r \int_z \int_{t_p} P[pulse|m, r, z] \cdot G_{Y|pulse, M, R, Z, T_p}(y|m, r, z, t_p) \cdot f_{T_p|Z, M, R} \cdot f_{Z|M, R} \\ & \quad \cdot f_{M, R} dt_p dz dmdr \\ & \lambda_{NS \& no pulse}[Y > y] = \\ & = \lambda_m \int_m \int_r \int_z (1 - P[pulse|m, r, z]) \cdot G_{Y|no pulse, M, R}(y|m, r) \cdot f_{Z|M, R} \cdot f_{M, R} dz dmdr \end{aligned} \quad (2.10)$$

Όπου,

$$G_{Y|pulse, M, R, Z, T_p}(y|m, r, z, t_p) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln y - \ln y_{m, r, pulse}}{\sigma_{\ln Y, pulse}}\right)$$

$$G_{Y|no pulse, M, R}(y|m, r) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln y - \ln y_{m, r}}{\sigma_{\ln Y}}\right)$$

λ_m η μέση ετήσια συχνότητα εμφάνισης σεισμών μεγέθους μεγαλύτερου από ένα καθορισμένο κατώτατο μέγεθος m_0

M το μέγεθος του σεισμού

R η απόσταση από τη σεισμική πηγή

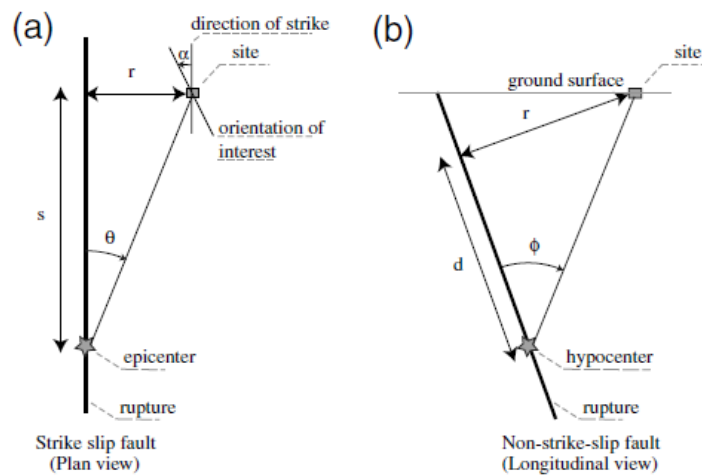
$Z = s \cdot \cos\theta$ παράμετρος κατευθυντικότητας για ρήγμα ολίσθησης (Σχήμα 2.9α)

ή

$Z = d \cdot \cos\phi$ παράμετρος κατευθυντικότητας για ρήγμα βύθισης (Σχήμα 2.9β)

T_p η περίοδος του παλμού

- $f_{T_p|Z,M,R}$ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για την ιδιοπερίοδο του παλμού T_p δεδομένων των Z, M, R
- $f_{Z|M,R}$ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για την παράμετρο Z δεδομένων των M, R
- $P[pulse|m,r,z]$ η πιθανότητα εμφάνισης εδαφικής κίνησης με παλμό, η οποία εξαρτάται από το είδος του ρήγματος (Σχήμα 2.9)



Σχήμα 2.9 (a) Ρήγμα ολίσθησης (strike – slip)
(b) Ρήγμα βύθισης (dip – slip)

Για ρήγμα ολίσθησης:

$$P[pulse|r, s] = \frac{1}{1+e^{(0.642+0.167\cdot r-0.075\cdot s)}} \quad (2.11)$$

Για ρήγμα βύθισης:

$$P[pulse|r, d, \varphi] = \frac{1}{1+e^{(0.128+0.055\cdot r-0.061\cdot d+0.036\cdot \varphi)}} \quad (2.12)$$

Επειδή η περίοδος του παλμού T_p έχει αποδειχθεί ότι εξαρτάται μόνο από το μέγεθος σεισμού η συνάρτηση $f_{T_p|Z,M,R}$ μπορεί απλούστερα να εκφραστεί ως $f_{T_p|M}$ (Tothong et al., 2007).

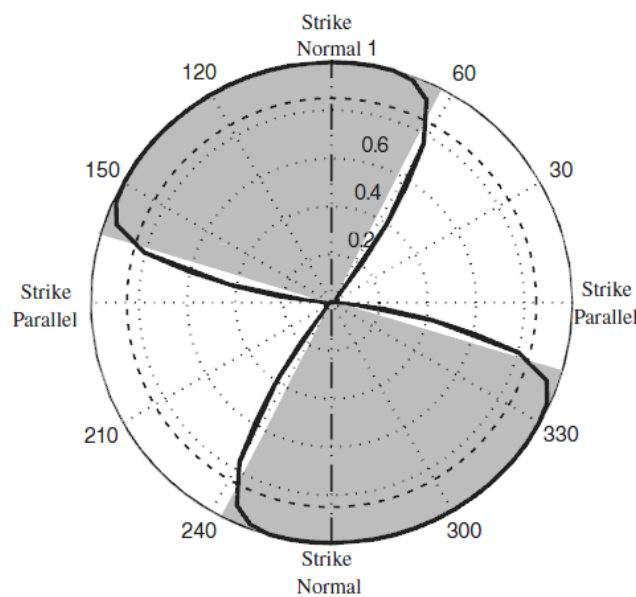
Όταν όλες οι απαιτούμενες πληροφορίες είναι διαθέσιμες, μπορεί να ενσωματωθεί η επίδραση φαινομένων κοντινού πεδίου στην πιθανολογική εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας:

$$\lambda[Y > y] = \lambda_{non-NS}[Y > y] + \lambda_{NS}[Y > y] \quad (2.13)$$

Αντίστοιχα η συνολική πιθανότητα υπέρβασης, χρησιμοποιώντας το θεώρημα ολικής πιθανότητας (Benjamin & Cornell, 1970), μπορεί να εκφραστεί: (Shahi & Baker, 2011):

$$P^*[Y > y|m, r, z] = P[pulse|m, r, z] \cdot P[Y > y|m, r, z, pulse] \\ + (1 - P[pulse|m, r, z]) \cdot P[Y > y|m, r, no pulse] \quad (2.14)$$

Η περιστροφή και η ταξινόμηση των εδαφικών κινήσεων οδήγησε στην ταυτοποίηση εκείνων που περιέχουν παλμό σε ένα εύρος κατευθύνσεων. Η πιθανότητα εμφάνισης ενός παλμού υπό γωνία α σε μία περιοχή, δεδομένου ότι έχει παρουσιαστεί παλμός, εξαρτάται από το είδος του ρήγματος (Σχέσεις 2.15 και 2.16), ενώ η γωνία α είναι η μικρότερη γωνία που μετριέται σε σχέση με τη διεύθυνση του ρήγματος. (Σχήματα 2.9α και 2.10)



Σχήμα 2.10 Δείκτης εμφάνισης παλμού ως συνάρτηση του προσανατολισμού. Οι σκιασμένες περιοχές παρουσιάζουν προσανατολισμούς όπου ισχυροί παλμοί είναι εμφανείς. (Shahi & Baker, 2011)

Για ρήγμα ολίσθησης:

$$P[pulse \text{ at } \alpha | pulse] = \min[0.67, 0.67 - 0.0041 \cdot (77,5 - \alpha)] \quad (2.15)$$

Για ρήγμα βύθισης:

$$P[\text{pulse at } a|\text{pulse}] = \min[0.53, 0.53 - 0.0041(70.2 - a)] \quad (2.16)$$

Τελικά η πιθανότητα εμφάνισης μιας εδαφικής κίνησης που περιέχει παλμό σε μία περιοχή και μάλιστα υπό γωνία a βαθμών σε σχέση με τη διεύθυνση του ρήγματος είναι:

$$P[\text{pulse at } a] = P[\text{pulse at } a|\text{pulse}] \cdot P[\text{pulse}] \quad (2.17)$$

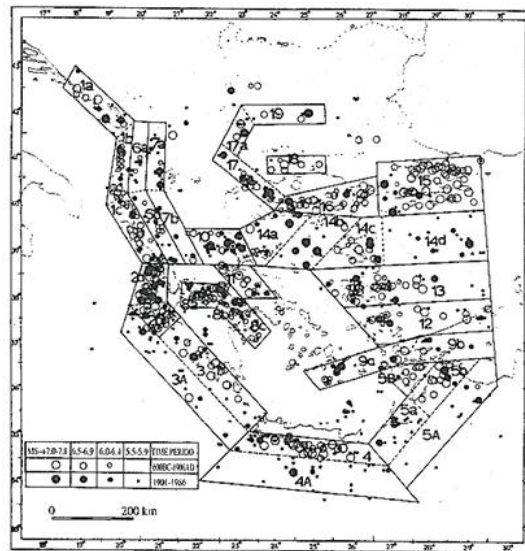
Όπου,

$P[\text{pulse at } a|a]$ όπως υπολογίζεται από τις σχέσεις (2.15) και (2.16)

$P[\text{pulse}]$ όπως υπολογίζεται από τις σχέσεις (2.11) και (2.12)

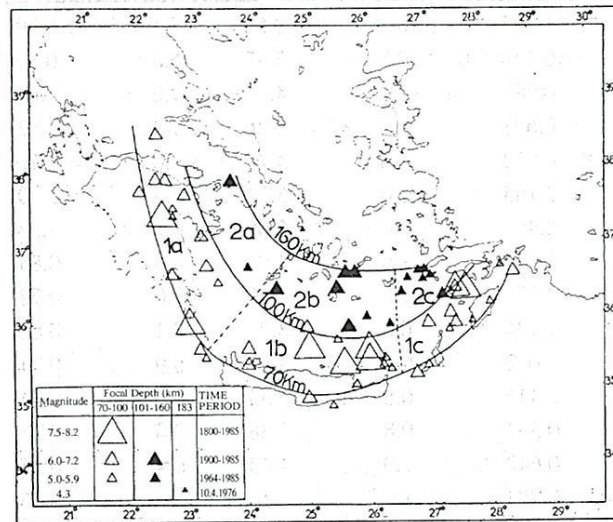
2.3 Σεισμική επικινδυνότητα ελληνικού χώρου

Με βάση τα σεισμολογικά στοιχεία (Παπαζάχος, 1988) ο ελληνικό χώρος υποδιαιρέθηκε σε δεκαεννέα ζώνες επιφανειακών σεισμών ($h < 60\text{km}$) (Σχήμα 2.11). Ορισμένες ζώνες έχουν χωριστεί σε υποζώνες για γεωμετρικούς κυρίως λόγους, ώστε κάθε υποζώνη να έχει όσο το δυνατόν απλούστερο σχήμα. Στο ίδιο σχήμα έχουν χαρτογραφηθεί τα επίκεντρα όλων των γνωστών επιφανειακών σεισμών με μεγέθη μεγαλύτερα των $6R$ από το 550 π. Χ. μέχρι σήμερα, καθώς και όλοι οι επιφανειακοί σεισμοί του παρόντος αιώνα με μέγεθος μεγαλύτερο από $5.5R$.



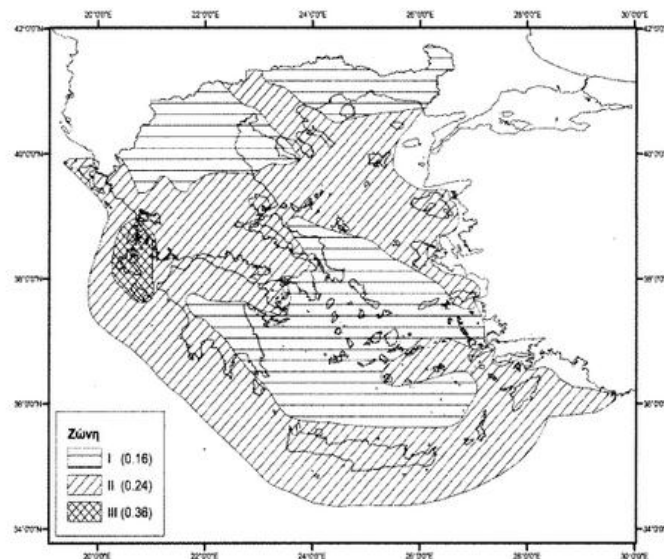
Σχήμα 2.11 Σεισμικές πηγές του ελληνικού χώρου για επιφανειακούς σεισμούς. Οι λευκοί κύκλοι παριστάνουν επίκεντρα ιστορικών σεισμών, ενώ οι μαύροι σεισμούς του παρόντα αιώνα (Παπαζάχος, 1989)

Σημαντική συμβολή στη σεισμική επικινδυνότητα του ελληνικού χώρου έχουν και οι σεισμοί ενδιάμεσου βάθους ($60 \text{ km} < h < 180 \text{ km}$) που συνήθως λαμβάνουν χώρα στο νότιο Αιγαίο (Σχήμα 2.12).



Σχήμα 2.12 Σεισμικές πηγές ενδιάμεσου βάθους (Παπαζάχος, 1989)

Με βάση την κατανομή των αναμενόμενων εδαφικών επιταχύνσεων ο ελληνικός χώρος χωρίστηκε σε τρεις κατηγορίες ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας (Σχήμα 2.13).



Σχήμα 2.13 Νέος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας ελληνικού χώρου (ΦΕΚ 1154/ΕΑΚ, 2003)

Στον Πίνακα 2.1 και 2.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι σεισμικές πηγές, η ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας στην οποία ανήκουν, οι παράμετροι b και a , το μέγιστο μέγεθος σεισμού m_{\max} που έχει παρατηρηθεί στην αντίστοιχη ζώνη και στην τελευταία στήλη με λ_m

συμβολίζεται η ετήσια συχνότητα υπέρβασης σεισμών μεγέθους $m > 5.0$ (υποθέτοντας ότι σεισμοί μεγέθους $m < 5$ δεν συμβάλουν σημαντικά στον σεισμικό κίνδυνο).

Πίνακας 2.1 Επιφανειακοί σεισμοί

| επιφανειακοί σεισμοί ($h < 60\text{km}$) | | | | | |
|--|---------------|-----|------|------------|-------------|
| Σεισμική πηγή | Σεισμική ζώνη | b | a | m_{\max} | λ_m |
| 1a | - | - | - | - | - |
| 1b | - | - | - | - | - |
| 1c | 0.24g (II) | 1.0 | 4.83 | 7.0 | 0.68 |
| 2a | 0.36g (III) | 1.0 | 5.26 | 7.2 | 1.82 |
| 2b | 0.36g (III) | 1.0 | 4.88 | 7.0 | 0.76 |
| 3 | 0.24g (II) | 1.0 | 5.34 | 7.5 | 2.19 |
| 3A | 0.24g (II) | 1.0 | 5.09 | 6.5 | 1.23 |
| 4 | 0.24g (II) | 1.0 | 4.93 | 8.0 | 0.85 |
| 4A | 0.24g (II) | 1.0 | 4.86 | 7.0 | 0.72 |
| 5a | 0.24g (II) | 0.8 | 3.78 | 7.1 | 0.60 |
| 5b | 0.24g (II) | 0.8 | 3.51 | 6.9 | 0.34 |
| 5A | 0.24g (II) | 0.8 | 3.53 | 6.9 | 0.34 |
| 5B | 0.24g (II) | 0.8 | 3.38 | 7.0 | 0.24 |
| 6a | - | - | - | - | - |
| 6b | 0.24g (II) | 1.0 | 4.66 | 6.4 | 0.46 |
| 7a | - | - | - | - | - |
| 7b | 0.24g (II) | 0.8 | 3.23 | 6.4 | 0.17 |
| 8a | 0.24g (II) | 1.0 | 4.66 | 7.1 | 0.46 |
| 8b | 0.24g (II) | 1.0 | 4.51 | 6.8 | 0.32 |
| 8c | 0.24g (II) | 1.0 | 4.08 | 6.3 | 0.12 |
| 9a | 0.24g (II) | 0.8 | 3.52 | 7.5 | 0.33 |
| 9b | 0.24g (II) | 0.8 | 3.50 | 7.0 | 0.32 |
| 10 | 0.24g (II) | 0.8 | 3.83 | 7.0 | 0.68 |
| 11 | 0.24g (II) | 0.8 | 3.59 | 7.0 | 0.39 |
| 12 | 0.24g (II) | 0.8 | 3.65 | 6.9 | 0.45 |
| 13 | 0.24g (II) | 0.8 | 3.72 | 7.1 | 0.52 |
| 14a | 0.24g (II) | 0.8 | 3.47 | 7.0 | 0.30 |
| 14b | 0.24g (II) | 0.8 | 3.55 | 7.2 | 0.35 |
| 14c | 0.24g (II) | 0.8 | 3.63 | 7.0 | 0.43 |
| 14d | - | - | - | - | - |
| 15 | - | - | - | - | - |
| 16 | 0.24g (II) | 0.6 | 2.54 | 7.5 | 0.35 |
| 17 | 0.24g (II) | 0.6 | 2.50 | 7.0 | 0.32 |
| 17a | 0.24g (II) | 0.6 | 1.82 | 7.7 | 0.07 |
| 18 | 0.24g (II) | 0.6 | 1.97 | 7.3 | 0.09 |
| 19 | - | - | - | - | - |

Πίνακας 2.2 Σεισμοί ενδιάμεσου βάθους

| σεισμοί ενδιάμεσου βάθους ($60 < h < 80\text{km}$) | | | | | |
|--|---------------|------|------|------------|-------------|
| Σεισμική πηγή | Σεισμική ζώνη | b | a | m_{\max} | λ_m |
| 1a | 0.16g (I) | 0.56 | 2.33 | 7.9 | 0.34 |
| 1b | 0.16g (I) | 0.56 | 2.43 | 8.2 | 0.43 |
| 1c | 0.16g (I) | 0.56 | 2.26 | 8.0 | 0.29 |
| 2a | 0.16g (I) | 0.75 | 2.85 | 7.1 | 0.13 |
| 2b | 0.16g (I) | 0.75 | 3.00 | 7.1 | 0.18 |
| 2c | 0.16g (I) | 0.75 | 2.53 | 7.1 | 0.06 |

Ορισμένες σεισμικές πηγές βρίσκονται εκτός των ορίων των ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας όπως αυτές έχουν διαμορφωθεί με βάση τον νέο χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας που ισχύει από το 2004 και για αυτό το λόγο δεν έχουν συμπληρωθεί τα αντίστοιχα στοιχεία.

2.4 Ανάδρομη πιθανολογική εκτίμησης σεισμικής επικινδυνότητας (probabilistic seismic hazard deaggregation)

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της πιθανολογικής εκτίμησης σεισμικής επικινδυνότητας είναι το γεγονός ότι λαμβάνει υπόψη όλες τις πιθανές πηγές σε ένα σεισμό. Συγχρόνως όμως αυτό αποτελεί και σημαντικό μειονέκτημα, διότι προκύπτει το εύλογο ερώτημα: «ποιο σενάριο σεισμού είναι πιο πιθανό να προκαλέσει υπέρβαση $Y > y$ της εδαφικής παραμέτρου που εξετάζεται;». Η απάντηση δεν είναι άμεσα προφανής. Από τους υπολογισμούς όμως που ήδη έχουν γίνει κατά την πιθανολογική εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας μπορεί να προκύψει η συνεισφορά των διαφόρων μεταβλητών (μέγεθος σεισμού M , απόσταση R και παράμετρος αβεβαιότητας ϵ) στην υπέρβαση $Y > y$ μέσω μίας διαδικασίας που ονομάζεται ανάδρομη (deaggregation) χρησιμοποιώντας τον κανόνα του Bayes (Bazzurro & Cornell 1999, McGuire 1995).

- Ανάδρομη ανάλυση για το μέγεθος του σεισμού (magnitude deaggregation)

Αναζητείται το μέγεθος του σεισμού \bar{M} με δεδομένη υπέρβαση $Y > y$:

$$\bar{M} = E(M|Y > y) = \sum_j m_j P(M = m_j | Y > y) \quad (2.18)$$

$$\text{Όπου } P[M = m_j | Y > y] = \frac{\lambda(Y > y, M = m_j)}{\lambda(Y > y)}$$

- Ανάδρομη ανάλυση για την απόσταση από τη σεισμική πηγή (distance deaggregation)

Αναζητείται η απόσταση από τη σεισμική πηγή \bar{R} με δεδομένη υπέρβαση $Y > y$:

$$\bar{R} = E(R|Y > y) = \sum_j r_j P(R = r_j|Y > y) \quad (2.19)$$

$$\text{Όπου } P[R = r_j|Y > y] = \frac{\lambda(Y>y, R=r_j)}{\lambda(Y>y)}$$

- Ανάδρομη ανάλυση για την παράμετρο αβεβαιότητας ε (epsilon deaggregation)

Αναζητείται η σταθερά $\bar{\varepsilon}$ με δεδομένη υπέρβαση $Y > y$:

$$\bar{\varepsilon} = E(\varepsilon|Y > y) = \sum_j \varepsilon_j P(\varepsilon = \varepsilon_j|Y > y) \quad (2.20)$$

$$\text{Όπου } P[\varepsilon = \varepsilon_j|Y > y] = \frac{\lambda(Y>y, \varepsilon=\varepsilon_j)}{\lambda(Y>y)}$$

Παρόμοια λογική ακολουθείται και στην περίπτωση ανάδρομης ανάλυσης με στόχο την εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης μίας εδαφικής κίνησης με παλμό με δεδομένη υπέρβαση $Y > y$ (Shahi & Baker, 2011):

$$P[pulse|Y > y] = \frac{P[Y>y, pulse] \cdot P[pulse]}{P[Y>y]} = \frac{\lambda_{pulse}(y)}{\lambda_{total}(y)} \quad (2.21)$$

Όπου,

$\lambda_{pulse}(y)$ η συχνότητα υπέρβασης $Y > y$ μόνο από εδαφικές κινήσεις που περιέχουν παλμό

$\lambda_{total}(y)$ η συνολική συχνότητα υπέρβασης $Y > y$

3. ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΙΣΧΥΡΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΟΝΗΣΗΣ

Μία πολύ σημαντική παράμετρος που υπεισέρχεται στη μελέτη των σεισμών είναι η διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης, η οποία σχετίζεται άμεσα με το μέγεθος των προκαλούμενων βλαβών στις κατασκευές. Μία μικρής διάρκειας εδαφική κίνηση, ακόμα και μεγάλου πλάτους, πιθανόν να μην προκαλέσει αρκετές φορές αντιστροφή του φορτίου, η οποία συμβαίνει κατά τη διάρκεια του σεισμού. Από την άλλη, μία μεγάλης διάρκειας εδαφική κίνηση με μέσο πλάτος μπορεί να προκαλέσει αρκετές φορές αντιστροφή του φορτίου και επομένως σημαντική βλάβη στην κατασκευή.

3.1 Ορισμός διάρκειας ισχυρής σεισμικής δόνησης

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πάνω από τριάντα διαφορετικοί ορισμοί της διάρκειας της ισχυρής σεισμικής δόνησης, οι οποίες όμως μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες (Bommer & Martinez – Pereira, 1999):

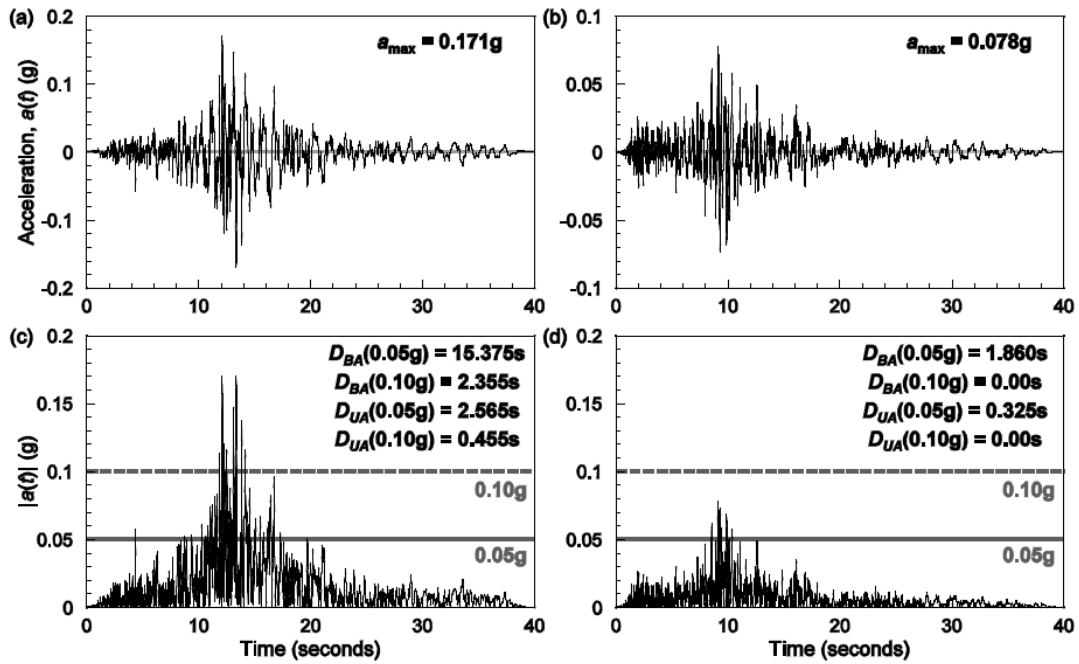
1. Διάρκεια μεταξύ καθορισμένων ορίων (Bracketed Duration)

Ορίζεται ως το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο η εδαφική κίνηση ξεπερνά κάποιο κατώτατο όριο (συνήθως 0.05g). Ο συγκεκριμένος ορισμός είναι ιδιαίτερα απλός εννοιολογικά αλλά διαθέτει το μειονέκτημα ότι λαμβάνει υπόψη μόνο την πρώτη και την τελευταία υπέρβαση κάποιου ορίου αγνοώντας τα χαρακτηριστικά της ισχυρής δόνησης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στην εκτίμηση πολύ μεγάλης χρονικής διάρκειας για σεισμούς στους οποίους παρατηρούνται πολλές μικρές έντονες δονήσεις μετά την εκδήλωση του ισχυρής δόνησης. Επιπλέον η μέθοδος αυτή προσδιορισμού της διάρκειας μπορεί να είναι πολύ ασταθής αν καθοριστούν πολύ μικρά κατώτατα όρια, με αποτέλεσμα μία αλλαγή του κατωφλίου για παράδειγμα από 0.03g σε 0.02g να οδηγεί ακόμα και σε αύξηση της διάρκειας κατά 20 sec ή και παραπάνω (Pagratis, 1995).

2. Ομοιόμορφη διάρκεια (Uniform Duration)

Ορίζεται ως το άθροισμα των χρονικών διαστημάτων, στη διάρκεια των οποίων, η επιτάχυνση λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από κάποιο καθορισμένο κατώτατο όριο. Η μέθοδος αυτή είναι λιγότερο ευαίσθητη σε αλλαγές του κατωφλίου αλλά έχει το μειονέκτημα ότι δεν λαμβάνει υπόψη ένα συνεχές διάστημα μέσα στο οποίο η σεισμική δόνηση είναι ισχυρή.

Ο υπολογισμός της διάρκειας με αυτούς τους δύο τρόπους δεν είναι πάντοτε ακριβής, διότι μπορεί να παρατηρηθεί για ορισμένα σενάρια σεισμού ακόμα και μηδενική διάρκεια (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1 Απεικόνιση του ορισμού της διάρκειας μεταξύ καθορισμένων ορίων (bracketed duration) και της ομοιόμορφης διάρκειας (uniform duration) που παρουσιάζει την πιθανότητα παρατήρησης ακόμα και μηδενικής διάρκειας σεισμού (Stafford et al., 2008)

3. Σημαντική διάρκεια (Significant Duration)

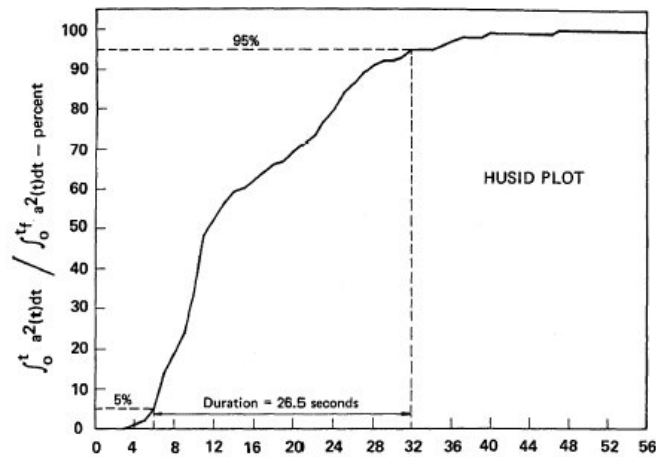
Ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος ορισμός της διάρκειας είναι το διάστημα εκείνο όπου η ένταση Arias I_A κυμαίνεται μεταξύ 5% - 95% (significant duration), η οποία υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_f} a^2(t) dt \quad (\text{Arias, 1970}) \quad (3.1)$$

Όπου,

- $a(t)$ η χρονοϊστορία της επιτάχυνση
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας
- t_f η συνολική διάρκεια της σεισμικής καταγραφής

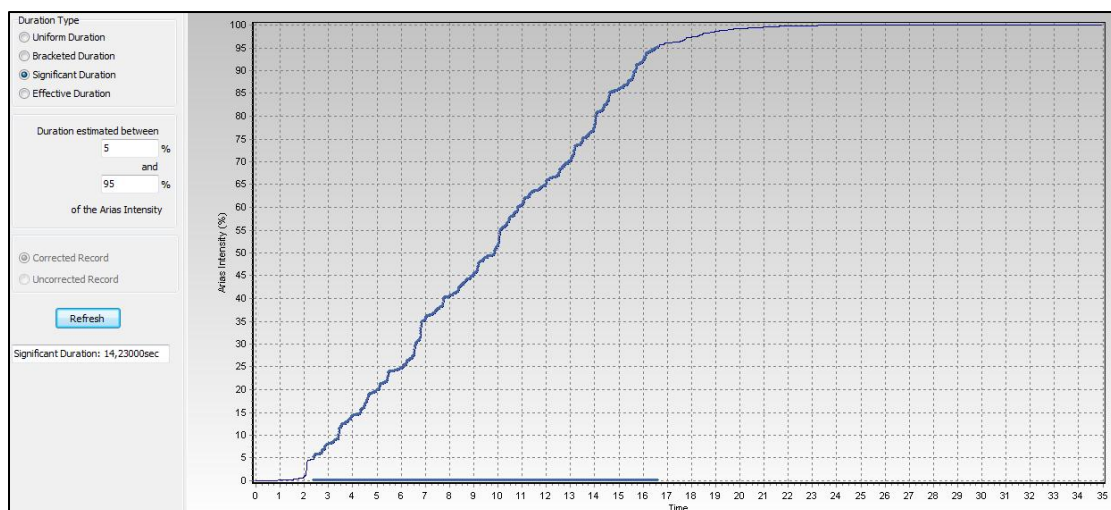
Στο Σχήμα 3.2 δίνεται ο ορισμός της διάρκειας της ισχυρής σεισμικής δόνησης υπό τη μορφή του διαγράμματος Husid, το οποίο παρουσιάζει τη συσσώρευση ενέργειας για ένα επιταχυνσιογράφημα συναρτήσε του χρόνου και τη ζητούμενη «σημαντική» διάρκεια που κυμαίνεται στο διάστημα 5 – 95% της έντασης Arias.



Σχήμα 3.2 Διάγραμμα Husid για την εύρεση της διάρκειας της ισχυρής σεισμικής δόνησης (Husid, 1969)

Η μέθοδος αυτή διαθέτει το πλεονέκτημα ότι θεωρεί το συνολικό επιταχυνσιογράφημα και καθορίζει ένα συνεχές διάστημα μέσα στο οποίο η σεισμική δόνηση μπορεί να θεωρηθεί ισχυρή. Οι Stanford et al. (2008) χρησιμοποίησαν στα μοντέλα πρόβλεψής τους πέρα από τη διάρκεια που κυμαίνεται μεταξύ 5 – 95% της έντασης Arias (D_{5-95}) και την διάρκεια που κυμαίνεται μεταξύ 5 – 75% της έντασης Arias (D_{5-75}).

Υπάρχουν διάφορα λογισμικά που δίνουν τη δυνατότητα άμεσου υπολογισμού της διάρκειας της ισχυρής σεισμικής δόνησης υπό τη μορφή του διαγράμματος Husid όπως το πρόγραμμα SEISMOSIGNAL (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 Διάρκεια ισχυρής σεισμικής δόνησης (Significant duration)

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τρεις παραπάνω τρόποι μέτρησης της διάρκειας της ισχυρής σεισμικής δόνησης σύμφωνα με τους Bommer et al. (2009).

Πίνακας 3.1 Μέτρηση διάρκειας ισχυρής σεισμικής δόνησης

| Τύπος Διάρκειας | Σχετικά ή Απόλυτα Όρια | Όρια |
|-----------------|------------------------|--------------------|
| Bracketed | Απόλυτα | 0.025, 0.05, 0.10g |
| Uniform | Απόλυτα | 0.025, 0.05, 0.10g |
| Significant | Σχετικά | 5 - 75%, 5 - 95% |

Ο υπολογισμός της διάρκειας χρησιμοποιώντας απόλυτα όρια μειώνεται με την απόσταση όσο το πλάτος της διέγερσης μειώνεται. Αντίθετα η εκτίμηση της διάρκειας με σχετικά όρια αυξάνεται με την απόσταση εξαιτίας της διασποράς των διαφορετικών σεισμικών κυμάτων.

3.2 Σχέσεις υπολογισμού διάρκειας ισχυρής σεισμικής δόνησης

Διάφορες σχέσεις έχουν προταθεί για τον υπολογισμό της διάρκειας D :

- Esteva & Rosenblueth (1964):

$$D = 2 \cdot (0.02 \cdot e^{0.7 \cdot M} + 0.3 \cdot R) \quad (3.2)$$

- Housner (1965):

$$D = 11 \cdot M - 53 \text{ για } M > 5 \quad (3.3)$$

- Donovan (1972):

$$D = 11 \cdot (M - 5) + 4 \text{ για } M \geq 5 \quad (3.4)$$

- Για την Ελλάδα έχει προταθεί (Τσελέντης, 1991):

$$\log D = 0.27 \cdot M - 0.623 \quad (3.5)$$

- Η εμπειρική σχέση των Hernandez & Cotton (2000) που προέκυψε από τη μελέτη 272 επιταχυνσιογραφημάτων σεισμικών δονήσεων της Καλιφόρνια και της Ιταλίας προτείνει:

$$D = e^{(-1.04 + 0.44 \cdot M + 0.19 \cdot \ln R + 0.04 \cdot S + \varepsilon \cdot 0.48)} \quad (3.6)$$

$$\text{Όπου } S = \begin{cases} 0, & \text{για τύπο εδάφους } A \\ 1, & \text{για οποιοδήποτε άλλο τύπο} \end{cases}$$

- Η σχέση των Jibson & Jibson (2003) με βάση 2160 καταγραφές ισχυρών σεισμικών δονήσεων προερχόμενες από 29 σεισμούς ($5.3 \leq M \leq 7.6$) σε ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών εδαφικών συνθηκών (McCalpin, 2009):

$$\log D = 0.252 \cdot M + 0.196 \cdot \log R - 0.784 + \varepsilon \cdot 0.187 \quad (3.7)$$

- Η σχέση των J.J. Kempton & J.P. Stewart (2006), η οποία προσδιορίζει την διάρκεια της ισχυρής κίνησης και δίνει τη δυνατότητα να ληφθούν υπόψη οποιεσδήποτε τοπικές συνθήκες (εδαφικά στρώματα σε μικρά βάθη, ύπαρξη λεκανών) και επιδράσεις κοντινού πεδίου:

$$\ln D = \ln \left[\frac{\left(\frac{\Delta\sigma}{4.9 \cdot 10^6 \beta} \right)^{-\frac{1}{3}}}{10^{1.5 \cdot M + 16.05}} + f_1 + f_2 \right] + \varepsilon \cdot \sigma_{total} \quad (3.8)$$

Όπου,

| | |
|--|--|
| β | η ταχύτητα του διατμητικού κύματος στην πηγή και λαμβάνεται ίση με 3.2 km/s |
| $\Delta\sigma$ | η πτώση τάσης ανάλογα με το μέγεθος του σεισμού μετρούμενη σε bars |
| $f_1 = c_2 \cdot r$ | παράμετρος που εξαρτάται από την απόσταση r |
| $f_2 = c_4 + c_5 \cdot V_{s,30} + c_6 + c_7 \cdot Z_{1.5}$ | παράμετρος που εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες |
| $V_{s,30}$ | μέση ταχύτητα διατμητικών κυμάτων στα ανώτερα 30 m εδάφους |
| $Z_{1.5}$ | το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους όπου η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων είναι 1.5 km/s |
| $c_1, c_2, c_4, c_5, c_6, c_7$ | συντελεστές διαδικασίας παλινδρόμησης, η οποία ακολουθήθηκε με βάση τα υπάρχοντα δεδομένα σεισμικών καταγραφών |
| σ_{total} | η τυπική απόκλιση |

Οι τιμές των παραμέτρων που υπεισέρχονται στην ανωτέρω σχέση εξαρτώνται από τις εκάστοτε συνθήκες που λαμβάνονται υπόψη και δίνονται από αντίστοιχους πίνακες

Σύμφωνα με τα παραπάνω η διάρκεια αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του μεγέθους του σεισμού (γεγονός που επαληθεύεται από όλες τις σχέσεις υπολογισμού) αλλά και με την

απόσταση εξαιτίας των διαφορετικών ταχυτήτων διάδοσης του σεισμικού κύματος και των πολλών ανακλώμενων και διαθλώμενων αφίξεων κυμάτων.

Μάλιστα παρατηρήσεις βασισμένες σε δεδομένα που παρουσιάστηκαν από τους Dobry, Idriss και Ng (1978) έδειξαν ότι η σεισμική διάρκεια σε περιοχές χαλαρών εδαφών είναι μεγαλύτερη κατά 1.5 με 2 φορές από την αντίστοιχη σε σκληρά πετρώματα.

Στις πλειονότητα των ανωτέρω σχέσεων χρησιμοποιείται η σεισμική ροπή M_w , όπου αυτή είναι διαθέσιμη, ειδάλως λαμβάνεται το επιφανειακό μέγεθος M_s για $M > 6$ και το τοπικό μέγεθος M_L για $M < 6$. Πρακτικά για μεγέθη μέχρι 6.5 ισχύει $M_L \approx M_s \approx M_w$ ενώ οι σχέσεις που συνδέουν τα παραπάνω μεγέθη για τον ελληνικό χώρο είναι:

$$M_s = 0.95 \cdot M_L + 0.72 \quad (3.9)$$

$$M_w = 0.97 \cdot M_L + 0.58 \quad (3.10)$$

3.3 Επιρροή της διάρκειας της ισχυρής σεισμικής δόνησης στον διορθωτικό συντελεστή απόσβεσης η

(Rezaeian, Bozorgnia, Idriss, Campbell, Abrahamson, Silva, 2012)

Οι σχέσεις πρόβλεψης των εδαφικών κινήσεων για ελαστικά φάσμα απόκρισης, συμπεριλαμβανομένων και των σχέσεων απόσβεσης επόμενης γενιάς (NGA models), αναπτύσσονται κυρίως σε 5% της κρίσιμης ιξώδους απόσβεσης. Στην πραγματικότητα όμως, τα δομικά και μη δομικά συστήματα μπορούν να έχουν ποσοστό της κρίσιμης απόσβεσης διάφορο του 5%, το οποίο εξαρτάται μεταξύ άλλων από τον τύπο της κατασκευής, το υλικό και την ένταση της σεισμικής διέγερσης. Αρκετοί συντελεστές διόρθωσης έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, με τις εκάστοτε προτάσεις να διαφέρουν σημαντικά.

Στον EC8 προτείνεται για τον διορθωτικό συντελεστή η :

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\zeta}} \geq 0.55 \quad (3.11)$$

Ενώ άλλες σχέσεις που έχουν κατά καιρούς προταθεί είναι:

- Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (2000):

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\zeta}} \geq 0.7 \quad (3.12)$$

- Tolis & Faccioli (1995):

$$\eta = \sqrt{\frac{15}{10+\zeta}} \quad (3.13)$$

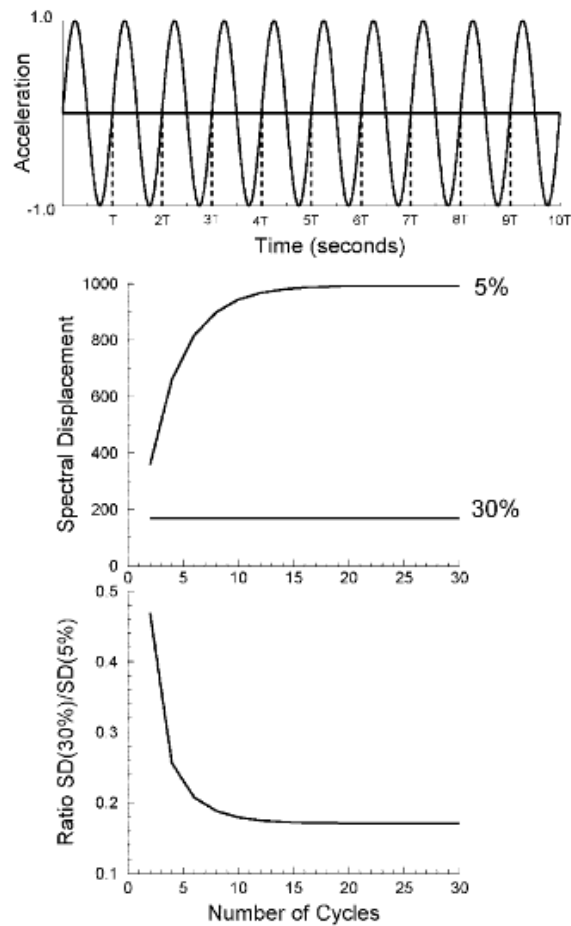
- Γαλλικός Κανονισμός (1990), Ισπανικός Κανονισμός (1994):

$$\eta = \left(\frac{5}{\zeta}\right)^{0.4} \quad (3.14)$$

Η διάρκεια της ισχυρής σεισμικής δόνησης μπορεί να καθορίσει σημαντικά το διορθωτικό συντελεστή απόσβεσης η , καθώς ο αριθμός των κύκλων κατά τους οποίους αποσβέννεται ενέργεια μπορεί να έχει ουσιαστική επιρροή. Το μοντέλο στο οποίο βασίστηκε η παραπάνω παρατήρηση είναι ανεξάρτητο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής, καθώς θεωρήθηκε η μέση τιμή των φασματικών τεταγμένων για ιδιοπεριόδους σε ένα εύρος $T = 1.5 - 3.0$ sec. (Stafford et al., 2008).

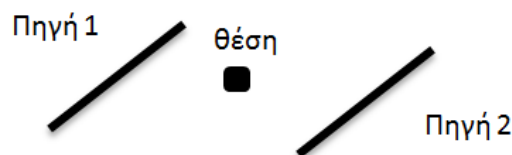
Οι Cameron & Green (2007) μελέτησαν επίσης την επιρροή της διάρκειας αλλά και του συχνοτικού περιεχομένου της σεισμικής δόνησης στον διορθωτικό συντελεστή απόσβεσης η . Μάλιστα για $\zeta = 1\%$ θεώρησαν την απόσταση ως μία επιπλέον παράμετρο που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη καθώς επηρεάζει τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης. Για $\zeta > 5\%$ σύμφωνα με τους Bommer & Mendis (2005), ο διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης η μειώνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος του σεισμού και η απόσταση. Το αντίθετο φαινόμενο παρατηρήθηκε για $\zeta < 5\%$. Εφόσον αύξηση στο μέγεθος και την απόσταση συνδέεται με αύξηση στη διάρκεια του σεισμού, προκύπτει ότι ο συντελεστής η μειώνεται όσο αυξάνεται η διάρκεια.

Το συμπέρασμα αυτό μπορεί να προκύψει ακόμα και μέσω απλών θεωρήσεων δυναμικής των κατασκευών. Για παράδειγμα αν υποτεθεί ένα ταλαντωτής χωρίς απόσβεση υποκείμενος σε αρμονική διέγερση στη βάση του: σε κάθε κύκλο θα συσσωρεύει περισσότερη ενέργεια, θα δονείται με μεγαλύτερη ένταση και επομένως η μέγιστη μετατόπιση θα αυξάνεται μονοτονικά με την αύξηση του αριθμού των κύκλων. Αντίστοιχα σε ένα ταλαντωτή με χαμηλή απόσβεση ($\approx 5\%$) και αφού έχει συμβεί ο πρώτος κύκλος, μόνο ένα μέρος της ενέργειας θα αποσβέννεται και το υπόλοιπο θα παραμένει. Έτσι στον επόμενο κύκλο της δόνησης εισάγεται νέα ενέργεια στο σύστημα και επομένως οι δονήσεις γίνονται ισχυρότερες όσο αυξάνεται ο αριθμός των κύκλων. Παρόλα αυτά μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό διεξαχθέντων κύκλων το σύστημα φτάνει σε μία σταθερή απόκριση (steady – state response) κατά την οποία η ενέργεια που εισάγεται κατά τη διέγερση είναι ακριβώς ίση με αυτή που χάνεται μέσω της απόσβεσης. Μάλιστα όσο μεγαλύτερο το ποσοστό απόσβεσης τόσο πιο γρήγορα φτάνει ο ταλαντωτής στη σταθερή απόκριση και τόσο μικρότερη είναι η διαφορά σε σχέση με την απόκριση του πρώτου κύκλου. Αφού επιτευχθεί η σταθερή κατάσταση, ο λόγος μεταξύ των φασματικών μετατοπίσεων είναι ίσος με το αντίστροφο του λόγου των τιμών απόσβεσης (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4 Μέγιστη μετατόπιση ταλαντωτών ιδιοπεριόδου T και διαφορετικής απόσβεσης (μέση) υποκειμένοι σε αρμονική ταλάντωση ίδιας ιδιοπεριόδου (επάνω) και διακύμανση του λόγου μετατοπίσεων με τον αριθμό των κύκλων (κάτω) (Bommer & Mendis, 2005)

3.4 Παράδειγμα εφαρμογής για την εύρεση της διάρκειας της ισχυρής εδαφικής κίνησης σε μία θέση



Σχήμα 3.5 Γεωμετρία παραδείγματος εφαρμογής

Θεωρείται ότι η εξεταζόμενη θέση επηρεάζεται από δύο σεισμικές πηγές (ρήγματα) με τα παρακάτω χαρακτηριστικά, σε κάθε μία από τις οποίες η σεισμική δραστηριότητα περιγράφεται από τις ακόλουθες σχέσεις Gutenberg – Richter:

Σεισμική πηγή 1: $\log \lambda_m = 4.4 - 1.0M$, $m_o = 4$, $m_{\max} = 7.4$

Σεισμική πηγή 2: $\log \lambda_m = 3.5 - 0.8M$, $m_o = 4.6$, $m_{\max} = 6.7$

Η διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης λαμβάνεται υπόψη χρησιμοποιώντας την εμπειρική Σχέση 3.6 των Hernandez & Cotton:

$$\ln D = -1.04 + 0.44 \cdot M + 0.19 \cdot \ln R + \varepsilon \cdot \sigma_{\ln D}$$

Η κατανομή πιθανότητας απόστασης πηγής – εξεταζόμενης θέσης λαμβάνεται απλοποιητικά η ίδια και φαίνεται στον Πίνακα 3.2. Αρχικά χωρίστηκαν οι επικεντρικές αποστάσεις σε βήματα των 10 km και στη συνέχεια χωρίζεται το ρήγμα σε 100 τμήματα και καταμετράται σε ποιο διάστημα επικεντρικών αποστάσεων με βήμα 10 km ανήκει το μέσο κάθε τμήματος. Από τις καταμετρήσεις N προκύπτει η πιθανότητα $P[R = r] = N/N_{total}$.

Πίνακας 3.2 Κατανομή πιθανότητας απόστασης πηγής – εξεταζόμενης θέσης

| Βήμα | R_{\min} | R_{\max} | Μέση τιμή | N | $P[R=r]$ |
|------|------------|------------|-----------|----|----------|
| 1 | 20 | 30 | 25 | 33 | 0.33 |
| 2 | 30 | 40 | 35 | 17 | 0.17 |
| 3 | 40 | 50 | 45 | 11 | 0.11 |
| 4 | 50 | 60 | 55 | 10 | 0.10 |
| 5 | 60 | 70 | 65 | 10 | 0.10 |
| 6 | 70 | 80 | 75 | 9 | 0.09 |
| 7 | 80 | 90 | 85 | 10 | 0.10 |

Στη συνέχεια έχοντας όλα τα απαραίτητα στοιχεία για κάθε σεισμική πηγή χρησιμοποιείται η Σχέση 2.2 και με βήματα μεγέθους σεισμών $m_U - m_L = 0.2$ και προκύπτουν οι αντίστοιχοι παρακάτω πίνακες με την κατανομή πιθανότητας σεισμικού μεγέθους.

Πίνακας 3.3 Κατανομή πιθανότητας σεισμικού μεγέθους για τη σεισμική πηγή 1

| Διάστημα | m_L | m_U | Μέση τιμή | $P[m_L < m < m_U]$ |
|----------|-------|-------|-----------|--------------------|
| 1 | 4 | 4.2 | 4.1 | 0.366 |
| 2 | 4.2 | 4.4 | 4.3 | 0.231 |
| 3 | 4.4 | 4.6 | 4.5 | 0.146 |
| 4 | 4.6 | 4.8 | 4.7 | 0.092 |
| 5 | 4.8 | 5.0 | 4.9 | 0.058 |
| 6 | 5.0 | 5.2 | 5.1 | 0.037 |
| 7 | 5.2 | 5.4 | 5.3 | 0.023 |
| 8 | 5.4 | 5.6 | 5.5 | 0.015 |
| 9 | 5.6 | 5.8 | 5.7 | 0.009 |
| 10 | 5.8 | 6.0 | 5.9 | 0.006 |
| 11 | 6.0 | 6.2 | 6.1 | 0.004 |
| 12 | 6.2 | 6.4 | 6.3 | 0.002 |
| 13 | 6.4 | 6.6 | 6.5 | 0.001 |
| 14 | 6.6 | 6.8 | 6.7 | 0.001 |
| 15 | 6.8 | 7.0 | 6.9 | 0.001 |
| 16 | 7.0 | 7.2 | 7.1 | 0.000 |
| 17 | 7.2 | 7.4 | 7.3 | 0.000 |

Πίνακας 3.4 Κατανομή πιθανότητας σεισμικού μεγέθους για σεισμική πηγή 2

| Διάστημα | m_L | m_U | Μέση τιμή | $P[m_L < m < m_U]$ |
|----------|-------|-------|-----------|--------------------|
| 1 | 4.6 | 4.8 | 4.7 | 0.312 |
| 2 | 4.8 | 5.0 | 4.9 | 0.216 |
| 3 | 5.0 | 5.2 | 5.1 | 0.149 |
| 4 | 5.2 | 5.4 | 5.3 | 0.103 |
| 5 | 5.4 | 5.6 | 5.5 | 0.071 |
| 6 | 5.6 | 5.8 | 5.7 | 0.049 |
| 7 | 5.8 | 6.0 | 5.9 | 0.034 |
| 8 | 6.0 | 6.2 | 6.1 | 0.024 |
| 9 | 6.2 | 6.4 | 6.3 | 0.016 |
| 10 | 6.4 | 6.6 | 6.5 | 0.011 |
| 11 | 6.6 | 6.8 | 6.7 | 0.008 |

Στη συνέχεια με βήμα 5 sec υπολογίζεται η μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης $\lambda (D > d)$ με βάση τη Σχέση 2.7 και τα αποτελέσματα των παραπάνω Πινάκων 3.2, 3.3 και 3.4.

Πίνακας 3.5 Μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης $\lambda (D > d \text{ sec})$ για τη σεισμική πηγή 1

| 5 | R | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | λ_5 |
|-----|------------|----------|-----------|------------|----------|-----------|------------|----------|-----------|------------|----------|-----------|------------|----------|-----------|------------|----------|-----------|------------|----------|-----------|-------------|
| | 25 | | | 35 | | | 45 | | | 55 | | | 65 | | | 75 | | | 85 | | | |
| | ϵ | $P(D>d)$ | λ | ϵ | $P(D>d)$ | λ | ϵ | $P(D>d)$ | λ | ϵ | $P(D>d)$ | λ | ϵ | $P(D>d)$ | λ | ϵ | $P(D>d)$ | λ | ϵ | $P(D>d)$ | λ | |
| 4.1 | 0.49 | 0.313 | 0.0950 | 0.35 | 0.362 | 0.0565 | 0.25 | 0.400 | 0.0404 | 0.18 | 0.431 | 0.0396 | 0.11 | 0.457 | 0.0420 | 0.05 | 0.479 | 0.0396 | 0.00 | 0.499 | 0.0459 | |
| 4.3 | 0.30 | 0.381 | 0.0729 | 0.17 | 0.432 | 0.0426 | 0.07 | 0.472 | 0.0301 | -0.01 | 0.503 | 0.0292 | -0.07 | 0.530 | 0.0307 | -0.13 | 0.552 | 0.0288 | -0.18 | 0.572 | 0.0332 | |
| 4.5 | 0.12 | 0.452 | 0.0546 | -0.01 | 0.505 | 0.0314 | -0.11 | 0.545 | 0.0219 | -0.19 | 0.576 | 0.0211 | -0.26 | 0.602 | 0.0220 | -0.31 | 0.623 | 0.0205 | -0.36 | 0.642 | 0.0235 | |
| 4.7 | -0.06 | 0.525 | 0.0400 | -0.20 | 0.578 | 0.0227 | -0.30 | 0.616 | 0.0156 | -0.37 | 0.646 | 0.0149 | -0.44 | 0.670 | 0.0155 | -0.50 | 0.691 | 0.0144 | -0.55 | 0.708 | 0.0163 | |
| 4.9 | -0.25 | 0.597 | 0.0287 | -0.38 | 0.648 | 0.0160 | -0.48 | 0.684 | 0.0110 | -0.56 | 0.712 | 0.0104 | -0.62 | 0.734 | 0.0107 | -0.68 | 0.752 | 0.0099 | -0.73 | 0.767 | 0.0112 | |
| 5.1 | -0.43 | 0.666 | 0.0202 | -0.56 | 0.713 | 0.0111 | -0.66 | 0.746 | 0.0075 | -0.74 | 0.771 | 0.0071 | -0.81 | 0.790 | 0.0073 | -0.86 | 0.806 | 0.0067 | -0.91 | 0.820 | 0.0075 | |
| 5.3 | -0.61 | 0.730 | 0.0140 | -0.75 | 0.772 | 0.0076 | -0.85 | 0.801 | 0.0051 | -0.92 | 0.822 | 0.0048 | -0.99 | 0.839 | 0.0049 | -1.05 | 0.853 | 0.0044 | -1.10 | 0.864 | 0.0050 | |
| 5.5 | -0.80 | 0.787 | 0.0095 | -0.93 | 0.824 | 0.0051 | -1.03 | 0.848 | 0.0034 | -1.11 | 0.866 | 0.0032 | -1.17 | 0.880 | 0.0032 | -1.23 | 0.891 | 0.0029 | -1.28 | 0.900 | 0.0033 | |
| 5.7 | -0.98 | 0.836 | 0.0064 | -1.11 | 0.867 | 0.0034 | -1.21 | 0.887 | 0.0023 | -1.29 | 0.902 | 0.0021 | -1.36 | 0.913 | 0.0021 | -1.41 | 0.921 | 0.0019 | -1.46 | 0.928 | 0.0021 | |
| 5.9 | -1.16 | 0.878 | 0.0042 | -1.30 | 0.903 | 0.0022 | -1.40 | 0.919 | 0.0015 | -1.47 | 0.930 | 0.0014 | -1.54 | 0.938 | 0.0014 | -1.60 | 0.945 | 0.0012 | -1.65 | 0.950 | 0.0014 | |
| 6.1 | -1.35 | 0.911 | 0.0028 | -1.48 | 0.930 | 0.0015 | -1.58 | 0.943 | 0.0010 | -1.66 | 0.951 | 0.0009 | -1.72 | 0.958 | 0.0009 | -1.78 | 0.963 | 0.0008 | -1.83 | 0.966 | 0.0009 | |
| 6.3 | -1.53 | 0.937 | 0.0018 | -1.66 | 0.952 | 0.0009 | -1.76 | 0.961 | 0.0006 | -1.84 | 0.967 | 0.0006 | -1.91 | 0.972 | 0.0006 | -1.96 | 0.975 | 0.0005 | -2.01 | 0.978 | 0.0006 | |
| 6.5 | -1.71 | 0.957 | 0.0012 | -1.85 | 0.968 | 0.0006 | -1.95 | 0.974 | 0.0004 | -2.02 | 0.979 | 0.0004 | -2.09 | 0.982 | 0.0004 | -2.15 | 0.984 | 0.0003 | -2.20 | 0.986 | 0.0004 | |
| 6.7 | -1.90 | 0.971 | 0.0007 | -2.03 | 0.979 | 0.0004 | -2.13 | 0.983 | 0.0002 | -2.21 | 0.986 | 0.0002 | -2.27 | 0.989 | 0.0002 | -2.33 | 0.990 | 0.0002 | -2.38 | 0.991 | 0.0002 | |
| 6.9 | -2.08 | 0.981 | 0.0005 | -2.21 | 0.987 | 0.0002 | -2.31 | 0.990 | 0.0002 | -2.39 | 0.992 | 0.0001 | -2.46 | 0.993 | 0.0001 | -2.51 | 0.994 | 0.0001 | -2.56 | 0.995 | 0.0001 | |
| 7.1 | -2.26 | 0.988 | 0.0003 | -2.40 | 0.992 | 0.0002 | -2.50 | 0.994 | 0.0001 | -2.57 | 0.995 | 0.0001 | -2.64 | 0.996 | 0.0001 | -2.70 | 0.997 | 0.0001 | -2.75 | 0.997 | 0.0001 | |
| 7.3 | -2.45 | 0.993 | 0.0002 | -2.58 | 0.995 | 0.0001 | -2.68 | 0.996 | 0.0001 | -2.76 | 0.997 | 0.0001 | -2.82 | 0.998 | 0.0001 | -2.88 | 0.998 | 0.0001 | -2.93 | 0.998 | 0.0001 | |

| 10 | R | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | λ_{10} |
|-----|------------|----------|-----------|------------|----------|-----------|------------|----------|-----------|------------|----------|-----------|------------|----------|-----------|------------|----------|-----------|------------|----------|-----------|----------------|
| | 25 | | | 35 | | | 45 | | | 55 | | | 65 | | | 75 | | | 85 | | | |
| | ϵ | $P(D>d)$ | λ | ϵ | $P(D>d)$ | λ | ϵ | $P(D>d)$ | λ | ϵ | $P(D>d)$ | λ | ϵ | $P(D>d)$ | λ | ϵ | $P(D>d)$ | λ | ϵ | $P(D>d)$ | λ | |
| 4.1 | 1.93 | 0.027 | 0.0081 | 1.80 | 0.036 | 0.0056 | 1.70 | 0.045 | 0.0045 | 1.62 | 0.053 | 0.0048 | 1.55 | 0.060 | 0.0055 | 1.50 | 0.067 | 0.0056 | 1.45 | 0.074 | 0.0068 | |
| 4.3 | 1.75 | 0.040 | 0.0077 | 1.61 | 0.053 | 0.0052 | 1.52 | 0.065 | 0.0041 | 1.44 | 0.076 | 0.0044 | 1.37 | 0.085 | 0.0050 | 1.31 | 0.095 | 0.0049 | 1.26 | 0.103 | 0.0060 | |
| 4.5 | 1.56 | 0.059 | 0.0071 | 1.43 | 0.076 | 0.0047 | 1.33 | 0.091 | 0.0037 | 1.25 | 0.105 | 0.0038 | 1.19 | 0.118 | 0.0043 | 1.13 | 0.129 | 0.0043 | 1.08 | 0.140 | 0.0051 | |
| 4.7 | 1.38 | 0.084 | 0.0064 | 1.25 | 0.106 | 0.0042 | 1.15 | 0.125 | 0.0032 | 1.07 | 0.143 | 0.0033 | 1.00 | 0.158 | 0.0036 | 0.95 | 0.172 | 0.0036 | 0.90 | 0.185 | 0.0043 | |
| 4.9 | 1.20 | 0.115 | 0.0056 | 1.06 | 0.143 | 0.0036 | 0.97 | 0.167 | 0.0027 | 0.89 | 0.188 | 0.0027 | 0.82 | 0.206 | 0.0030 | 0.76 | 0.223 | 0.0029 | 0.71 | 0.238 | 0.0035 | |
| 5.1 | 1.01 | 0.155 | 0.0047 | 0.88 | 0.189 | 0.0030 | 0.78 | 0.217 | 0.0022 | 0.70 | 0.241 | 0.0022 | 0.64 | 0.262 | 0.0024 | 0.58 | 0.281 | 0.0023 | 0.53 | 0.298 | 0.0027 | |
| 5.3 | 0.83 | 0.203 | 0.0039 | 0.70 | 0.243 | 0.0024 | 0.60 | 0.275 | 0.0018 | 0.52 | 0.302 | 0.0017 | 0.45 | 0.325 | 0.0019 | 0.40 | 0.346 | 0.0018 | 0.35 | 0.364 | 0.0021 | |
| 5.5 | 0.65 | 0.259 | 0.0031 | 0.51 | 0.303 | 0.0019 | 0.42 | 0.339 | 0.0014 | 0.34 | 0.369 | 0.0013 | 0.27 | 0.394 | 0.0014 | 0.21 | 0.416 | 0.0014 | 0.16 | 0.435 | 0.0016 | |
| 5.7 | 0.46 | 0.321 | 0.0024 | 0.33 | 0.370 | 0.0015 | 0.23 | 0.408 | 0.0010 | 0.15 | 0.439 | 0.0010 | 0.09 | 0.466 | 0.0011 | 0.03 | 0.488 | 0.0010 | -0.02 | 0.508 | 0.0012 | |
| 5.9 | 0.28 | 0.389 | 0.0019 | 0.15 | 0.441 | 0.0011 | 0.05 | 0.481 | 0.0008 | -0.03 | 0.512 | 0.0007 | -0.10 | 0.539 | 0.0008 | -0.15 | 0.561 | 0.0007 | -0.20 | 0.580 | 0.0008 | |
| 6.1 | 0.10 | 0.461 | 0.0014 | -0.04 | 0.514 | 0.0008 | -0.13 | 0.554 | 0.0006 | -0.21 | 0.585 | 0.0005 | -0.28 | 0.610 | 0.0006 | -0.34 | 0.632 | 0.0005 | -0.39 | 0.650 | 0.0006 | |
| 6.3 | -0.09 | 0.534 | 0.0010 | -0.22 | 0.587 | 0.0006 | -0.32 | 0.625 | 0.0004 | -0.40 | 0.655 | 0.0004 | -0.46 | 0.679 | 0.0004 | -0.52 | 0.699 | 0.0004 | -0.57 | 0.716 | 0.0004 | |
| 6.5 | -0.27 | 0.606 | 0.0007 | -0.40 | 0.656 | 0.0004 | -0.50 | 0.692 | 0.0003 | -0.58 | 0.719 | 0.0003 | -0.65 | 0.741 | 0.0003 | -0.70 | 0.759 | 0.0002 | -0.75 | 0.774 | 0.0003 | |
| 6.7 | -0.45 | 0.674 | 0.0005 | -0.59 | 0.721 | 0.0003 | -0.68 | 0.753 | 0.0002 | -0.76 | 0.778 | 0.0002 | -0.83 | 0.797 | 0.0002 | -0.89 | 0.812 | 0.0002 | -0.94 | 0.825 | 0.0002 | |
| 6.9 | -0.64 | 0.737 | 0.0004 | -0.77 | 0.779 | 0.0002 | -0.87 | 0.807 | 0.0001 | -0.95 | 0.828 | 0.0001 | -1.01 | 0.845 | 0.0001 | -1.07 | 0.858 | 0.0001 | -1.12 | 0.869 | 0.0001 | |
| 7.1 | -0.82 | 0.794 | 0.0002 | -0.95 | 0.829 | 0.0001 | -1.05 | 0.853 | 0.0001 | -1.13 | 0.871 | 0.0001 | -1.20 | 0.884 | 0.0001 | -1.25 | 0.895 | 0.0001 | -1.30 | 0.904 | 0.0001 | |
| 7.3 | -1.00 | 0.842 | 0.0002 | -1.14 | 0.872 | 0.0001 | -1.23 | 0.892 | 0.0001 | -1.31 | 0.906 | 0.0001 | -1.38 | 0.916 | 0.0001 | -1.44 | 0.925 | 0.0000 | -1.49 | 0.931 | 0.0001 | |

| 15 | R | | | | | | | | | | | | | | | | | | λ ₁₅ | | | |
|-----|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-----------------|-------|--------|---|
| | 25 | | | 35 | | | 45 | | | 55 | | | 65 | | | 75 | | | | 85 | | |
| | ε | P(D>d) | λ | ε | P(D>d) | λ | ε | P(D>d) | λ | ε | P(D>d) | λ | ε | P(D>d) | λ | ε | P(D>d) | λ | | ε | P(D>d) | λ |
| 4.1 | 2,78 | 0,003 | 0,0008 | 2,64 | 0,004 | 0,0006 | 2,54 | 0,005 | 0,0006 | 2,46 | 0,007 | 0,0006 | 2,40 | 0,008 | 0,0008 | 2,34 | 0,010 | 0,0008 | 2,29 | 0,011 | 0,0010 | |
| 4.3 | 2,59 | 0,005 | 0,0009 | 2,46 | 0,007 | 0,0007 | 2,36 | 0,009 | 0,0006 | 2,28 | 0,011 | 0,0007 | 2,21 | 0,013 | 0,0008 | 2,16 | 0,015 | 0,0008 | 2,11 | 0,018 | 0,0010 | |
| 4.5 | 2,41 | 0,008 | 0,0010 | 2,28 | 0,011 | 0,0007 | 2,18 | 0,015 | 0,0006 | 2,10 | 0,018 | 0,0007 | 2,03 | 0,021 | 0,0008 | 1,97 | 0,024 | 0,0008 | 1,92 | 0,027 | 0,0010 | |
| 4.7 | 2,23 | 0,013 | 0,0010 | 2,09 | 0,018 | 0,0007 | 1,99 | 0,023 | 0,0006 | 1,91 | 0,028 | 0,0006 | 1,85 | 0,032 | 0,0007 | 1,79 | 0,037 | 0,0008 | 1,74 | 0,041 | 0,0009 | |
| 4.9 | 2,04 | 0,021 | 0,0010 | 1,91 | 0,028 | 0,0007 | 1,81 | 0,035 | 0,0006 | 1,73 | 0,042 | 0,0006 | 1,66 | 0,048 | 0,0007 | 1,61 | 0,054 | 0,0007 | 1,56 | 0,060 | 0,0009 | |
| 5.1 | 1,86 | 0,031 | 0,0010 | 1,73 | 0,042 | 0,0007 | 1,63 | 0,052 | 0,0005 | 1,55 | 0,061 | 0,0006 | 1,48 | 0,069 | 0,0006 | 1,42 | 0,077 | 0,0006 | 1,37 | 0,085 | 0,0008 | |
| 5.3 | 1,68 | 0,047 | 0,0009 | 1,54 | 0,061 | 0,0006 | 1,44 | 0,074 | 0,0005 | 1,36 | 0,086 | 0,0005 | 1,30 | 0,097 | 0,0006 | 1,24 | 0,107 | 0,0006 | 1,19 | 0,117 | 0,0007 | |
| 5.5 | 1,49 | 0,068 | 0,0008 | 1,36 | 0,087 | 0,0005 | 1,26 | 0,104 | 0,0004 | 1,18 | 0,119 | 0,0004 | 1,11 | 0,133 | 0,0005 | 1,06 | 0,145 | 0,0005 | 1,01 | 0,157 | 0,0006 | |
| 5.7 | 1,31 | 0,095 | 0,0007 | 1,18 | 0,120 | 0,0005 | 1,08 | 0,141 | 0,0004 | 1,00 | 0,159 | 0,0004 | 0,93 | 0,176 | 0,0004 | 0,87 | 0,191 | 0,0004 | 0,82 | 0,205 | 0,0005 | |
| 5.9 | 1,13 | 0,130 | 0,0006 | 0,99 | 0,160 | 0,0004 | 0,89 | 0,186 | 0,0003 | 0,81 | 0,208 | 0,0003 | 0,75 | 0,227 | 0,0003 | 0,69 | 0,245 | 0,0003 | 0,64 | 0,261 | 0,0004 | |
| 6.1 | 0,94 | 0,173 | 0,0005 | 0,81 | 0,209 | 0,0003 | 0,71 | 0,239 | 0,0002 | 0,63 | 0,264 | 0,0002 | 0,56 | 0,286 | 0,0003 | 0,51 | 0,306 | 0,0003 | 0,46 | 0,323 | 0,0003 | |
| 6.3 | 0,76 | 0,224 | 0,0004 | 0,63 | 0,266 | 0,0003 | 0,53 | 0,299 | 0,0002 | 0,45 | 0,327 | 0,0002 | 0,38 | 0,352 | 0,0002 | 0,32 | 0,373 | 0,0002 | 0,27 | 0,392 | 0,0002 | |
| 6.5 | 0,58 | 0,282 | 0,0003 | 0,44 | 0,329 | 0,0002 | 0,34 | 0,366 | 0,0001 | 0,26 | 0,396 | 0,0001 | 0,20 | 0,422 | 0,0002 | 0,14 | 0,444 | 0,0001 | 0,09 | 0,464 | 0,0002 | |
| 6.7 | 0,39 | 0,347 | 0,0003 | 0,26 | 0,398 | 0,0002 | 0,16 | 0,436 | 0,0001 | 0,08 | 0,468 | 0,0001 | 0,01 | 0,494 | 0,0001 | -0,04 | 0,517 | 0,0001 | -0,09 | 0,537 | 0,0001 | |
| 6.9 | 0,21 | 0,417 | 0,0002 | 0,08 | 0,470 | 0,0001 | -0,02 | 0,509 | 0,0001 | -0,10 | 0,541 | 0,0001 | -0,17 | 0,567 | 0,0001 | -0,23 | 0,589 | 0,0001 | -0,28 | 0,608 | 0,0001 | |
| 7.1 | 0,03 | 0,490 | 0,0001 | -0,11 | 0,543 | 0,0001 | -0,21 | 0,582 | 0,0001 | -0,29 | 0,613 | 0,0001 | -0,35 | 0,638 | 0,0001 | -0,41 | 0,659 | 0,0001 | -0,46 | 0,677 | 0,0001 | |
| 7.3 | -0,16 | 0,563 | 0,0001 | -0,29 | 0,614 | 0,0001 | -0,39 | 0,652 | 0,0000 | -0,47 | 0,681 | 0,0000 | -0,54 | 0,704 | 0,0000 | -0,59 | 0,723 | 0,0000 | -0,64 | 0,739 | 0,0000 | |

| 20 | R | | | | | | | | | | | | | | | | | | λ ₂₀ | | | |
|-----|------|--------|--------|------|--------|--------|------|--------|--------|------|--------|--------|------|--------|--------|------|--------|--------|-----------------|-------|--------|---|
| | 25 | | | 35 | | | 45 | | | 55 | | | 65 | | | 75 | | | | 85 | | |
| | ε | P(D>d) | λ | ε | P(D>d) | λ | ε | P(D>d) | λ | ε | P(D>d) | λ | ε | P(D>d) | λ | ε | P(D>d) | λ | | ε | P(D>d) | λ |
| 4.1 | 3,38 | 0,000 | 0,0001 | 3,24 | 0,001 | 0,0001 | 3,14 | 0,001 | 0,0001 | 3,06 | 0,001 | 0,0001 | 3,00 | 0,001 | 0,0001 | 2,94 | 0,002 | 0,0001 | 2,89 | 0,002 | 0,0002 | |
| 4.3 | 3,19 | 0,001 | 0,0001 | 3,06 | 0,001 | 0,0001 | 2,96 | 0,002 | 0,0001 | 2,88 | 0,002 | 0,0001 | 2,81 | 0,002 | 0,0001 | 2,76 | 0,003 | 0,0002 | 2,71 | 0,003 | 0,0002 | |
| 4.5 | 3,01 | 0,001 | 0,0002 | 2,88 | 0,002 | 0,0001 | 2,78 | 0,003 | 0,0001 | 2,70 | 0,004 | 0,0001 | 2,63 | 0,004 | 0,0001 | 2,57 | 0,005 | 0,0002 | 2,52 | 0,006 | 0,0002 | |
| 4.7 | 2,83 | 0,002 | 0,0002 | 2,69 | 0,004 | 0,0001 | 2,59 | 0,005 | 0,0001 | 2,51 | 0,006 | 0,0001 | 2,45 | 0,007 | 0,0002 | 2,39 | 0,008 | 0,0002 | 2,34 | 0,010 | 0,0002 | |
| 4.9 | 2,64 | 0,004 | 0,0002 | 2,51 | 0,006 | 0,0001 | 2,41 | 0,008 | 0,0001 | 2,33 | 0,010 | 0,0001 | 2,26 | 0,012 | 0,0002 | 2,21 | 0,014 | 0,0002 | 2,16 | 0,015 | 0,0002 | |
| 5.1 | 2,46 | 0,007 | 0,0002 | 2,33 | 0,010 | 0,0002 | 2,23 | 0,013 | 0,0001 | 2,15 | 0,016 | 0,0001 | 2,08 | 0,019 | 0,0002 | 2,02 | 0,021 | 0,0002 | 1,97 | 0,024 | 0,0002 | |
| 5.3 | 2,28 | 0,011 | 0,0002 | 2,14 | 0,016 | 0,0002 | 2,04 | 0,021 | 0,0001 | 1,96 | 0,025 | 0,0001 | 1,90 | 0,029 | 0,0002 | 1,84 | 0,033 | 0,0002 | 1,79 | 0,037 | 0,0002 | |
| 5.5 | 2,09 | 0,018 | 0,0002 | 1,96 | 0,025 | 0,0002 | 1,86 | 0,031 | 0,0001 | 1,78 | 0,038 | 0,0001 | 1,71 | 0,043 | 0,0002 | 1,66 | 0,049 | 0,0002 | 1,61 | 0,054 | 0,0002 | |
| 5.7 | 1,91 | 0,028 | 0,0002 | 1,78 | 0,038 | 0,0001 | 1,68 | 0,047 | 0,0001 | 1,60 | 0,055 | 0,0001 | 1,53 | 0,063 | 0,0001 | 1,47 | 0,070 | 0,0001 | 1,42 | 0,077 | 0,0002 | |
| 5.9 | 1,73 | 0,042 | 0,0002 | 1,59 | 0,056 | 0,0001 | 1,49 | 0,068 | 0,0001 | 1,41 | 0,079 | 0,0001 | 1,35 | 0,089 | 0,0001 | 1,29 | 0,098 | 0,0001 | 1,24 | 0,107 | 0,0002 | |
| 6.1 | 1,54 | 0,062 | 0,0002 | 1,41 | 0,079 | 0,0001 | 1,31 | 0,095 | 0,0001 | 1,23 | 0,109 | 0,0001 | 1,16 | 0,122 | 0,0001 | 1,11 | 0,134 | 0,0001 | 1,06 | 0,145 | 0,0001 | |
| 6.3 | 1,36 | 0,087 | 0,0002 | 1,23 | 0,110 | 0,0001 | 1,13 | 0,130 | 0,0001 | 1,05 | 0,148 | 0,0001 | 0,98 | 0,163 | 0,0001 | 0,92 | 0,178 | 0,0001 | 0,87 | 0,191 | 0,0001 | |
| 6.5 | 1,18 | 0,120 | 0,0001 | 1,04 | 0,149 | 0,0001 | 0,94 | 0,173 | 0,0001 | 0,86 | 0,194 | 0,0001 | 0,80 | 0,213 | 0,0001 | 0,74 | 0,230 | 0,0001 | 0,69 | 0,245 | 0,0001 | |
| 6.7 | 0,99 | 0,161 | 0,0001 | 0,86 | 0,195 | 0,0001 | 0,76 | 0,224 | 0,0001 | 0,68 | 0,248 | 0,0001 | 0,61 | 0,270 | 0,0001 | 0,56 | 0,289 | 0,0001 | 0,51 | 0,306 | 0,0001 | |
| 6.9 | 0,81 | 0,209 | 0,0001 | 0,68 | 0,250 | 0,0001 | 0,58 | 0,282 | 0,0000 | 0,50 | 0,310 | 0,0000 | 0,43 | 0,333 | 0,0000 | 0,37 | 0,354 | 0,0000 | 0,32 | 0,373 | 0,0001 | |
| 7.1 | 0,63 | 0,266 | 0,0001 | 0,49 | 0,311 | 0,0000 | 0,39 | 0,347 | 0,0000 | 0,31 | 0,377 | 0,0000 | 0,25 | 0,402 | 0,0000 | 0,19 | 0,424 | 0,0000 | 0,14 | 0,444 | 0,0000 | |
| 7.3 | 0,44 | 0,329 | 0,0001 | 0,31 | 0,379 | 0,0000 | 0,21 | 0,417 | 0,0000 | 0,13 | 0,448 | 0,0000 | 0,06 | 0,475 | 0,0000 | 0,01 | 0,497 | 0,0000 | -0,04 | 0,517 | 0,0000 | |

| 25 | R | | | | | | | | | | | | | | | | | | λ ₂₅ | | | |
|-----|------|--------|--------|------|--------|--------|------|--------|--------|------|--------|--------|------|--------|--------|------|--------|--------|-----------------|-------|--------|---|
| | 25 | | | 35 | | | 45 | | | 55 | | | 65 | | | 75 | | | | 85 | | |
| | ε | P(D>d) | λ | ε | P(D>d) | λ | ε | P(D>d) | λ | ε | P(D>d) | λ | ε | P(D>d) | λ | ε | P(D>d) | λ | | ε | P(D>d) | λ |
| 4.1 | 3,84 | 0,000 | 0,0000 | 3,71 | 0,000 | 0,0000 | 3,61 | 0,000 | 0,0000 | 3,53 | 0,000 | 0,0000 | 3,46 | 0,000 | 0,0000 | 3,41 | 0,000 | 0,0000 | 3,36 | 0,000 | 0,0000 | |
| 4.3 | 3,66 | 0,000 | 0,0000 | 3,52 | 0,000 | 0,0000 | 3,42 | 0,000 | 0,0000 | 3,34 | 0,000 | 0,0000 | 3,28 | 0,001 | 0,0000 | 3,22 | 0,001 | 0,0000 | 3,17 | 0,001 | 0,0000 | |
| 4.5 | 3,47 | 0,000 | 0,0000 | 3,34 | 0,000 | 0,0000 | 3,24 | 0,001 | 0,0000 | 3,16 | 0,001 | 0,0000 | 3,10 | 0,001 | 0,0000 | 3,04 | 0,001 | 0,0000 | 2,99 | 0,001 | 0,0001 | |
| 4.7 | 3,29 | 0,001 | 0,0000 | 3,16 | 0,001 | 0,0000 | 3,06 | 0,001 | 0,0000 | 2,98 | 0,001 | 0,0000 | 2,91 | 0,002 | 0,0000 | 2,86 | 0,002 | 0,0000 | 2,81 | 0,003 | 0,0001 | |
| 4.9 | 3,11 | 0,001 | 0,0000 | 2,97 | 0,001 | 0,0000 | 2,87 | 0,002 | 0,0000 | 2,79 | 0,003 | 0,0000 | 2,73 | 0,003 | 0,0000 | 2,67 | 0,004 | 0,0000 | 2,62 | 0,004 | 0,0001 | |
| 5.1 | 2,92 | 0,002 | 0,0001 | 2,79 | 0,003 | 0,0000 | 2,69 | 0,004 | 0,0000 | 2,61 | 0,005 | 0,0000 | 2,55 | 0,005 | 0,0001 | 2,49 | 0,006 | 0,0001 | 2,44 | 0,007 | 0,0001 | |
| 5.3 | 2,74 | 0,003 | 0,0001 | 2,61 | 0,005 | 0,0000 | 2,51 | 0,006 | 0,0000 | 2,43 | 0,008 | 0,0000 | 2,36 | 0,009 | 0,0001 | 2,31 | 0,011 | 0,0001 | 2,26 | 0,012 | 0,0001 | |
| 5.5 | 2,56 | 0,005 | 0,0001 | 2,42 | 0,008 | 0,0000 | 2,32 | 0,010 | 0,0000 | 2,24 | 0,012 | 0,0000 | 2,18 | 0,015 | 0,0001 | 2,12 | 0,017 | 0,0001 | 2,07 | 0,019 | 0,0001 | |
| 5.7 | 2,37 | 0,009 | 0,0001 | 2,24 | 0,013 | 0,0000 | 2,14 | 0,016 | 0,0000 | 2,06 | 0,020 | 0,0000 | 2,00 | 0,023 | 0,0001 | 1,94 | 0,026 | 0,0001 | 1,89 | 0,029 | 0,0001 | |
| 5.9 | 2,19 | 0,014 | 0,0001 | 2,06 | 0,020 | 0,0000 | 1,96 | 0,025 | 0,0000 | 1,88 | 0,030 | 0,0000 | 1,81 | 0,035 | 0,0001 | 1,76 | 0,040 | 0,0001 | 1,71 | 0,044 | 0,0001 | |
| 6.1 | 2,01 | 0,022 | 0,0001 | 1,87 | 0,030 | 0,0000 | 1,77 | 0,038 | 0,0000 | 1,69 | 0,045 | 0,0000 | 1,63 | 0,052 | 0,0000 | 1,57 | 0,058 | 0,0000 | 1,52 | 0,064 | 0,0001 | |
| 6.3 | 1,82 | 0,034 | 0,0001 | 1,69 | 0,045 | 0,0000 | 1,59 | 0,056 | 0,0000 | 1,51 | 0,065 | 0,0000 | 1,45 | 0,074 | 0,0000 | 1,39 | 0,082 | 0,0000 | 1,34 | 0,090 | 0,0001 | |
| 6.5 | 1,64 | 0,050 | 0,0001 | 1,51 | 0,066 | 0,0000 | 1,41 | 0,080 | 0,0000 | 1,33 | 0,092 | 0,0000 | 1,26 | 0,103 | 0,0000 | 1,21 | 0,114 | 0,0000 | 1,16 | 0,124 | 0,0000 | |
| 6.7 | 1,46 | 0,073 | 0,0001 | 1,32 | 0,093 | 0,0000 | 1,22 | 0,110 | 0,0000 | 1,14 | 0,126 | 0,0000 | 1,08 | 0,140 | 0,0000 | 1,02 | 0,153 | 0,0000 | 0,97 | 0,165 | 0,0000 | |
| 6.9 | 1,27 | 0,101 | 0,0000 | 1,14 | 0,127 | 0,0000 | 1,04 | 0,149 | 0,0000 | 0,96 | 0,168 | 0,0000 | 0,90 | 0,185 | 0,0000 | 0,84 | 0,201 | 0,0000 | 0,79 | 0,215 | 0,0000 | |
| 7.1 | 1,09 | 0,138 | 0,0000 | 0,96 | 0,169 | 0,0000 | 0,86 | 0,196 | 0,0000 | 0,78 | 0,218 | 0,0000 | 0,71 | 0,238 | 0,0000 | 0,66 | 0,256 | 0,0000 | 0,61 | 0,272 | 0,0000 | |
| 7.3 | 0,91 | 0,182 | 0,0000 | 0,77 | 0,220 | 0,0000 | 0,67 | | | | | | | | | | | | | | | |

| 15 | R | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | λ_{15} | | |
|-----|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|----------------|-----------|-------|
| | 25 | | | 35 | | | 45 | | | 55 | | | 65 | | | 75 | | | 85 | | | | |
| | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | | λ | |
| M | 4,7 | 2,23 | 0,013 | 0,0009 | 2,09 | 0,018 | 0,0006 | 1,99 | 0,023 | 0,0005 | 1,91 | 0,028 | 0,0006 | 1,85 | 0,032 | 0,0007 | 1,79 | 0,037 | 0,0007 | 1,74 | 0,041 | 0,0008 | 0,045 |
| | 4,9 | 2,04 | 0,021 | 0,0010 | 1,91 | 0,028 | 0,0007 | 1,81 | 0,035 | 0,0006 | 1,73 | 0,042 | 0,0006 | 1,66 | 0,048 | 0,0007 | 1,61 | 0,054 | 0,0007 | 1,56 | 0,060 | 0,0008 | |
| | 5,1 | 1,86 | 0,031 | 0,0010 | 1,73 | 0,042 | 0,0007 | 1,63 | 0,052 | 0,0006 | 1,55 | 0,061 | 0,0006 | 1,48 | 0,069 | 0,0007 | 1,42 | 0,077 | 0,0007 | 1,37 | 0,085 | 0,0008 | |
| | 5,3 | 1,68 | 0,047 | 0,0011 | 1,54 | 0,061 | 0,0007 | 1,44 | 0,074 | 0,0006 | 1,36 | 0,086 | 0,0006 | 1,30 | 0,097 | 0,0007 | 1,24 | 0,107 | 0,0007 | 1,19 | 0,117 | 0,0008 | |
| | 5,5 | 1,49 | 0,068 | 0,0011 | 1,36 | 0,087 | 0,0007 | 1,26 | 0,104 | 0,0005 | 1,18 | 0,119 | 0,0006 | 1,11 | 0,133 | 0,0006 | 1,06 | 0,145 | 0,0006 | 1,01 | 0,157 | 0,0007 | |
| | 5,7 | 1,31 | 0,095 | 0,0010 | 1,18 | 0,120 | 0,0007 | 1,08 | 0,141 | 0,0005 | 1,00 | 0,159 | 0,0005 | 0,93 | 0,176 | 0,0006 | 0,87 | 0,191 | 0,0006 | 0,82 | 0,205 | 0,0007 | |
| | 5,9 | 1,13 | 0,130 | 0,0010 | 0,99 | 0,160 | 0,0006 | 0,89 | 0,186 | 0,0005 | 0,81 | 0,208 | 0,0005 | 0,75 | 0,227 | 0,0005 | 0,69 | 0,245 | 0,0005 | 0,64 | 0,261 | 0,0006 | |
| | 6,1 | 0,94 | 0,173 | 0,0009 | 0,81 | 0,209 | 0,0006 | 0,71 | 0,239 | 0,0004 | 0,63 | 0,264 | 0,0004 | 0,56 | 0,286 | 0,0004 | 0,51 | 0,306 | 0,0004 | 0,46 | 0,323 | 0,0005 | |
| | 6,3 | 0,76 | 0,224 | 0,0008 | 0,63 | 0,266 | 0,0005 | 0,53 | 0,299 | 0,0004 | 0,45 | 0,327 | 0,0004 | 0,38 | 0,352 | 0,0004 | 0,32 | 0,373 | 0,0004 | 0,27 | 0,392 | 0,0004 | |
| | 6,5 | 0,58 | 0,282 | 0,0007 | 0,44 | 0,329 | 0,0004 | 0,34 | 0,366 | 0,0003 | 0,26 | 0,396 | 0,0003 | 0,20 | 0,422 | 0,0003 | 0,14 | 0,444 | 0,0003 | 0,09 | 0,464 | 0,0003 | |
| 6,7 | 0,39 | 0,347 | 0,0006 | 0,26 | 0,398 | 0,0003 | 0,16 | 0,436 | 0,0002 | 0,08 | 0,468 | 0,0002 | 0,01 | 0,494 | 0,0003 | -0,04 | 0,517 | 0,0002 | -0,09 | 0,537 | 0,0003 | | |

| 20 | R | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | λ_{20} | | |
|-----|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|----------------|-----------|-------|
| | 25 | | | 35 | | | 45 | | | 55 | | | 65 | | | 75 | | | 85 | | | | |
| | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | | λ | |
| M | 4,7 | 2,83 | 0,002 | 0,0002 | 2,69 | 0,004 | 0,0001 | 2,59 | 0,005 | 0,0001 | 2,51 | 0,006 | 0,0001 | 2,45 | 0,007 | 0,0001 | 2,39 | 0,008 | 0,0002 | 2,34 | 0,010 | 0,0002 | 0,015 |
| | 4,9 | 2,64 | 0,004 | 0,0002 | 2,51 | 0,006 | 0,0001 | 2,41 | 0,008 | 0,0001 | 2,33 | 0,010 | 0,0001 | 2,26 | 0,012 | 0,0002 | 2,21 | 0,014 | 0,0002 | 2,16 | 0,015 | 0,0002 | |
| | 5,1 | 2,46 | 0,007 | 0,0002 | 2,33 | 0,010 | 0,0002 | 2,23 | 0,013 | 0,0001 | 2,15 | 0,016 | 0,0002 | 2,08 | 0,019 | 0,0002 | 2,02 | 0,021 | 0,0002 | 1,97 | 0,024 | 0,0002 | |
| | 5,3 | 2,28 | 0,011 | 0,0003 | 2,14 | 0,016 | 0,0002 | 2,04 | 0,021 | 0,0002 | 1,96 | 0,025 | 0,0002 | 1,90 | 0,029 | 0,0002 | 1,84 | 0,033 | 0,0002 | 1,79 | 0,037 | 0,0003 | |
| | 5,5 | 2,09 | 0,018 | 0,0003 | 1,96 | 0,025 | 0,0002 | 1,86 | 0,031 | 0,0002 | 1,78 | 0,038 | 0,0002 | 1,71 | 0,043 | 0,0002 | 1,66 | 0,049 | 0,0002 | 1,61 | 0,054 | 0,0003 | |
| | 5,7 | 1,91 | 0,028 | 0,0003 | 1,78 | 0,038 | 0,0002 | 1,68 | 0,047 | 0,0002 | 1,60 | 0,055 | 0,0002 | 1,53 | 0,063 | 0,0002 | 1,47 | 0,068 | 0,0002 | 1,42 | 0,077 | 0,0003 | |
| | 5,9 | 1,73 | 0,042 | 0,0003 | 1,59 | 0,056 | 0,0002 | 1,49 | 0,068 | 0,0002 | 1,41 | 0,079 | 0,0002 | 1,35 | 0,089 | 0,0002 | 1,29 | 0,098 | 0,0002 | 1,24 | 0,107 | 0,0002 | |
| | 6,1 | 1,54 | 0,062 | 0,0003 | 1,41 | 0,079 | 0,0002 | 1,31 | 0,095 | 0,0002 | 1,23 | 0,109 | 0,0002 | 1,16 | 0,122 | 0,0002 | 1,11 | 0,134 | 0,0002 | 1,06 | 0,145 | 0,0002 | |
| | 6,3 | 1,36 | 0,087 | 0,0003 | 1,23 | 0,110 | 0,0002 | 1,13 | 0,130 | 0,0002 | 1,05 | 0,148 | 0,0002 | 0,98 | 0,163 | 0,0002 | 0,92 | 0,178 | 0,0002 | 0,87 | 0,191 | 0,0002 | |
| | 6,5 | 1,18 | 0,120 | 0,0003 | 1,04 | 0,149 | 0,0002 | 0,94 | 0,173 | 0,0001 | 0,86 | 0,194 | 0,0001 | 0,80 | 0,213 | 0,0002 | 0,74 | 0,230 | 0,0002 | 0,69 | 0,245 | 0,0002 | |
| 6,7 | 0,99 | 0,161 | 0,0003 | 0,86 | 0,195 | 0,0002 | 0,76 | 0,224 | 0,0001 | 0,68 | 0,248 | 0,0001 | 0,61 | 0,270 | 0,0001 | 0,56 | 0,289 | 0,0001 | 0,51 | 0,306 | 0,0002 | | |

| 25 | R | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | λ_{25} | | |
|-----|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|----------------|-----------|-------|
| | 25 | | | 35 | | | 45 | | | 55 | | | 65 | | | 75 | | | 85 | | | | |
| | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | | λ | |
| M | 4,7 | 3,29 | 0,001 | 0,0000 | 3,16 | 0,001 | 0,0000 | 3,06 | 0,001 | 0,0000 | 2,98 | 0,001 | 0,0000 | 2,91 | 0,002 | 0,0000 | 2,86 | 0,002 | 0,0000 | 2,81 | 0,003 | 0,0001 | 0,005 |
| | 4,9 | 3,11 | 0,001 | 0,0000 | 2,97 | 0,001 | 0,0000 | 2,87 | 0,002 | 0,0000 | 2,79 | 0,003 | 0,0000 | 2,73 | 0,003 | 0,0000 | 2,67 | 0,004 | 0,0000 | 2,62 | 0,004 | 0,0001 | |
| | 5,1 | 2,92 | 0,002 | 0,0001 | 2,79 | 0,003 | 0,0000 | 2,69 | 0,004 | 0,0000 | 2,61 | 0,005 | 0,0000 | 2,55 | 0,005 | 0,0001 | 2,49 | 0,006 | 0,0001 | 2,44 | 0,007 | 0,0001 | |
| | 5,3 | 2,74 | 0,003 | 0,0001 | 2,61 | 0,005 | 0,0001 | 2,51 | 0,006 | 0,0000 | 2,43 | 0,008 | 0,0001 | 2,36 | 0,009 | 0,0001 | 2,31 | 0,011 | 0,0001 | 2,26 | 0,012 | 0,0001 | |
| | 5,5 | 2,56 | 0,005 | 0,0001 | 2,42 | 0,008 | 0,0001 | 2,32 | 0,010 | 0,0001 | 2,24 | 0,012 | 0,0001 | 2,18 | 0,015 | 0,0001 | 2,12 | 0,017 | 0,0001 | 2,07 | 0,019 | 0,0001 | |
| | 5,7 | 2,37 | 0,009 | 0,0001 | 2,24 | 0,013 | 0,0001 | 2,14 | 0,016 | 0,0001 | 2,06 | 0,020 | 0,0001 | 2,00 | 0,023 | 0,0001 | 1,94 | 0,026 | 0,0001 | 1,89 | 0,029 | 0,0001 | |
| | 5,9 | 2,19 | 0,014 | 0,0001 | 2,06 | 0,020 | 0,0001 | 1,96 | 0,025 | 0,0001 | 1,88 | 0,030 | 0,0001 | 1,81 | 0,035 | 0,0001 | 1,76 | 0,040 | 0,0001 | 1,71 | 0,044 | 0,0001 | |
| | 6,1 | 2,01 | 0,022 | 0,0001 | 1,87 | 0,030 | 0,0001 | 1,77 | 0,038 | 0,0001 | 1,69 | 0,045 | 0,0001 | 1,63 | 0,052 | 0,0001 | 1,57 | 0,058 | 0,0001 | 1,52 | 0,064 | 0,0001 | |
| | 6,3 | 1,82 | 0,034 | 0,0001 | 1,69 | 0,045 | 0,0001 | 1,59 | 0,056 | 0,0001 | 1,51 | 0,065 | 0,0001 | 1,45 | 0,074 | 0,0001 | 1,39 | 0,082 | 0,0001 | 1,34 | 0,090 | 0,0001 | |
| | 6,5 | 1,64 | 0,050 | 0,0001 | 1,51 | 0,066 | 0,0001 | 1,41 | 0,080 | 0,0001 | 1,33 | 0,092 | 0,0001 | 1,26 | 0,103 | 0,0001 | 1,21 | 0,114 | 0,0001 | 1,16 | 0,124 | 0,0001 | |
| 6,7 | 1,46 | 0,073 | 0,0001 | 1,32 | 0,093 | 0,0001 | 1,22 | 0,110 | 0,0001 | 1,14 | 0,126 | 0,0001 | 1,08 | 0,140 | 0,0001 | 1,02 | 0,153 | 0,0001 | 0,97 | 0,165 | 0,0001 | | |

| 30 | R | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | λ_{30} | | |
|-----|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|----------------|-----------|-------|
| | 25 | | | 35 | | | 45 | | | 55 | | | 65 | | | 75 | | | 85 | | | | |
| | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | | λ | |
| M | 4,7 | 3,67 | 0,000 | 0,0000 | 3,54 | 0,000 | 0,0000 | 3,44 | 0,000 | 0,0000 | 3,36 | 0,000 | 0,0000 | 3,29 | 0,000 | 0,0000 | 3,24 | 0,001 | 0,0000 | 3,19 | 0,001 | 0,0000 | 0,002 |
| | 4,9 | 3,49 | 0,000 | 0,0000 | 3,35 | 0,000 | 0,0000 | 3,25 | 0,001 | 0,0000 | 3,17 | 0,001 | 0,0000 | 3,11 | 0,001 | 0,0000 | 3,05 | 0,001 | 0,0000 | 3,00 | 0,001 | 0,0000 | |
| | 5,1 | 3,30 | 0,000 | 0,0000 | 3,17 | 0,001 | 0,0000 | 3,07 | 0,001 | 0,0000 | 2,99 | 0,001 | 0,0000 | 2,93 | 0,002 | 0,0000 | 2,87 | 0,002 | 0,0000 | 2,82 | 0,002 | 0,0000 | |
| | 5,3 | 3,12 | 0,001 | 0,0000 | 2,99 | 0,001 | 0,0000 | 2,89 | 0,002 | 0,0000 | 2,81 | 0,002 | 0,0000 | 2,74 | 0,003 | 0,0000 | 2,69 | 0,004 | 0,0000 | 2,64 | 0,004 | 0,0000 | |
| | 5,5 | 2,94 | 0,002 | 0,0000 | 2,80 | 0,003 | 0,0000 | 2,70 | 0,003 | 0,0000 | 2,62 | 0,004 | 0,0000 | 2,56 | 0,005 | 0,0000 | 2,50 | 0,006 | 0,0000 | 2,45 | 0,007 | 0,0000 | |
| | 5,7 | 2,75 | 0,003 | 0,0000 | 2,62 | 0,004 | 0,0000 | 2,52 | 0,006 | 0,0000 | 2,44 | 0,007 | 0,0000 | 2,38 | 0,009 | 0,0000 | 2,32 | 0,010 | 0,0000 | 2,27 | 0,012 | 0,0000 | |
| | 5,9 | 2,57 | 0,005 | 0,0000 | 2,44 | 0,007 | 0,0000 | 2,34 | 0,010 | 0,0000 | 2,26 | 0,012 | 0,0000 | 2,19 | 0,014 | 0,0000 | 2,14 | 0,016 | 0,0000 | 2,09 | 0,019 | 0,0000 | |
| | 6,1 | 2,39 | 0,009 | 0,0000 | 2,25 | 0,012 | 0,0000 | 2,15 | 0,016 | 0,0000 | 2,07 | 0,019 | 0,0000 | 2,01 | 0,022 | 0,0000 | 1,95 | 0,025 | 0,0000 | 1,90 | 0,029 | 0,0000 | |
| | 6,3 | 2,20 | 0,014 | 0,0000 | 2,07 | 0,019 | 0,0000 | 1,97 | 0,024 | 0,0000 | 1,89 | 0,029 | 0,0000 | 1,83 | 0,034 | 0,0000 | 1,77 | 0,038 | 0,0000 | 1,72 | 0,043 | 0,0000 | |
| | 6,5 | 2,02 | 0,022 | 0,0001 | 1,89 | 0,030 | 0,0000 | 1,79 | 0,037 | 0,0000 | 1,71 | 0,044 | 0,0000 | 1,64 | 0,050 | 0,0000 | 1,59 | 0,056 | 0,0000 | 1,54 | 0,062 | 0,0000 | |
| 6,7 | 1,84 | 0,033 | 0,0001 | 1,70 | 0,044 | 0,0000 | 1,60 | 0,054 | 0,0000 | 1,52 | 0,064 | 0,0000 | 1,46 | 0,072 | 0,0000 | 1,40 | 0,080 | 0,0000 | 1,35 | 0,088 | 0,0000 | | |

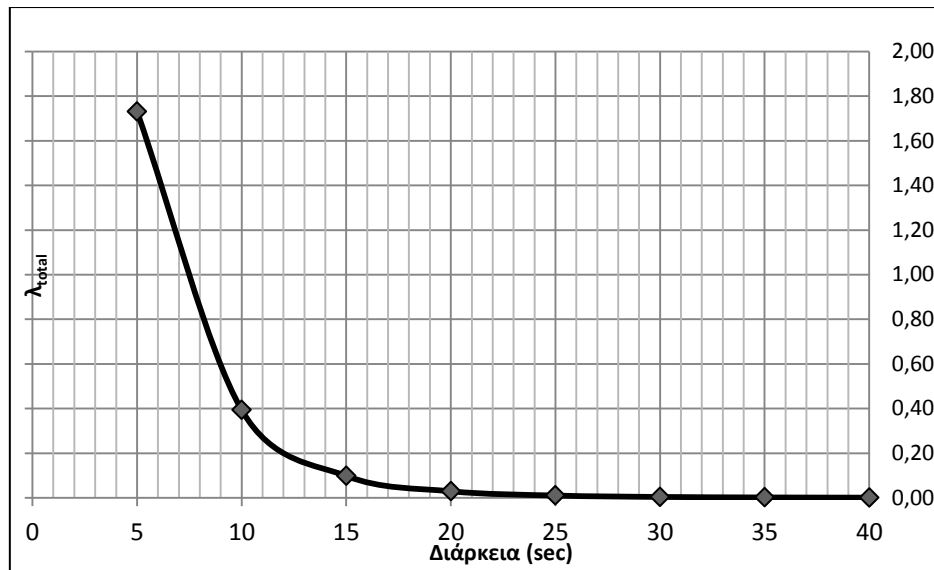
| 35 | R | | | | | | | | | | | | | | | | | | λ_{55} | | | | |
|-----|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|----------------|------------|--------|-----------|-------|
| | 25 | | | 35 | | | 45 | | | 55 | | | 65 | | | 75 | | | | 85 | | | |
| | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | | ϵ | P(D>d) | λ | |
| M | 4,7 | 3,99 | 0,000 | 0,0000 | 3,86 | 0,000 | 0,0000 | 3,76 | 0,000 | 0,0000 | 3,68 | 0,000 | 0,0000 | 3,61 | 0,000 | 0,0000 | 3,56 | 0,000 | 0,0000 | 3,51 | 0,000 | 0,0000 | 0,001 |
| | 4,9 | 3,81 | 0,000 | 0,0000 | 3,67 | 0,000 | 0,0000 | 3,58 | 0,000 | 0,0000 | 3,50 | 0,000 | 0,0000 | 3,43 | 0,000 | 0,0000 | 3,37 | 0,000 | 0,0000 | 3,32 | 0,000 | 0,0000 | |
| | 5,1 | 3,62 | 0,000 | 0,0000 | 3,49 | 0,000 | 0,0000 | 3,39 | 0,000 | 0,0000 | 3,31 | 0,000 | 0,0000 | 3,25 | 0,001 | 0,0000 | 3,19 | 0,001 | 0,0000 | 3,14 | 0,001 | 0,0000 | |
| | 5,3 | 3,44 | 0,000 | 0,0000 | 3,31 | 0,000 | 0,0000 | 3,21 | 0,001 | 0,0000 | 3,13 | 0,001 | 0,0000 | 3,06 | 0,001 | 0,0000 | 3,01 | 0,001 | 0,0000 | 2,96 | 0,002 | 0,0000 | |
| | 5,5 | 3,26 | 0,001 | 0,0000 | 3,12 | 0,001 | 0,0000 | 3,03 | 0,001 | 0,0000 | 2,95 | 0,002 | 0,0000 | 2,88 | 0,002 | 0,0000 | 2,82 | 0,002 | 0,0000 | 2,77 | 0,003 | 0,0000 | |
| | 5,7 | 3,07 | 0,001 | 0,0000 | 2,94 | 0,002 | 0,0000 | 2,84 | 0,002 | 0,0000 | 2,76 | 0,003 | 0,0000 | 2,70 | 0,004 | 0,0000 | 2,64 | 0,004 | 0,0000 | 2,59 | 0,005 | 0,0000 | |
| | 5,9 | 2,89 | 0,002 | 0,0000 | 2,76 | 0,003 | 0,0000 | 2,66 | 0,004 | 0,0000 | 2,58 | 0,005 | 0,0000 | 2,51 | 0,006 | 0,0000 | 2,46 | 0,007 | 0,0000 | 2,41 | 0,008 | 0,0000 | |
| | 6,1 | 2,71 | 0,003 | 0,0000 | 2,57 | 0,005 | 0,0000 | 2,48 | 0,007 | 0,0000 | 2,40 | 0,008 | 0,0000 | 2,33 | 0,010 | 0,0000 | 2,27 | 0,012 | 0,0000 | 2,22 | 0,013 | 0,0000 | |
| | 6,3 | 2,52 | 0,006 | 0,0000 | 2,39 | 0,008 | 0,0000 | 2,29 | 0,011 | 0,0000 | 2,21 | 0,013 | 0,0000 | 2,15 | 0,016 | 0,0000 | 2,09 | 0,018 | 0,0000 | 2,04 | 0,021 | 0,0000 | |
| | 6,5 | 2,34 | 0,010 | 0,0000 | 2,21 | 0,014 | 0,0000 | 2,11 | 0,017 | 0,0000 | 2,03 | 0,021 | 0,0000 | 1,96 | 0,025 | 0,0000 | 1,91 | 0,028 | 0,0000 | 1,86 | 0,032 | 0,0000 | |
| 6,7 | 2,16 | 0,015 | 0,0000 | 2,02 | 0,021 | 0,0000 | 1,93 | 0,027 | 0,0000 | 1,85 | 0,032 | 0,0000 | 1,78 | 0,038 | 0,0000 | 1,72 | 0,042 | 0,0000 | 1,67 | 0,047 | 0,0000 | | |

| 40 | R | | | | | | | | | | | | | | | | | | λ_{40} | | | | |
|-----|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|----------------|------------|--------|-----------|--------|
| | 25 | | | 35 | | | 45 | | | 55 | | | 65 | | | 75 | | | | 85 | | | |
| | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | ϵ | P(D>d) | λ | | ϵ | P(D>d) | λ | |
| M | 4,7 | 4,27 | 0,000 | 0,0000 | 4,14 | 0,000 | 0,0000 | 4,04 | 0,000 | 0,0000 | 3,96 | 0,000 | 0,0000 | 3,89 | 0,000 | 0,0000 | 3,83 | 0,000 | 0,0000 | 3,78 | 0,000 | 0,0000 | 0,0004 |
| | 4,9 | 4,09 | 0,000 | 0,0000 | 3,95 | 0,000 | 0,0000 | 3,85 | 0,000 | 0,0000 | 3,77 | 0,000 | 0,0000 | 3,71 | 0,000 | 0,0000 | 3,65 | 0,000 | 0,0000 | 3,60 | 0,000 | 0,0000 | |
| | 5,1 | 3,90 | 0,000 | 0,0000 | 3,77 | 0,000 | 0,0000 | 3,67 | 0,000 | 0,0000 | 3,59 | 0,000 | 0,0000 | 3,52 | 0,000 | 0,0000 | 3,47 | 0,000 | 0,0000 | 3,42 | 0,000 | 0,0000 | |
| | 5,3 | 3,72 | 0,000 | 0,0000 | 3,59 | 0,000 | 0,0000 | 3,49 | 0,000 | 0,0000 | 3,41 | 0,000 | 0,0000 | 3,34 | 0,000 | 0,0000 | 3,28 | 0,001 | 0,0000 | 3,23 | 0,001 | 0,0000 | |
| | 5,5 | 3,54 | 0,000 | 0,0000 | 3,40 | 0,000 | 0,0000 | 3,30 | 0,000 | 0,0000 | 3,22 | 0,001 | 0,0000 | 3,16 | 0,001 | 0,0000 | 3,10 | 0,001 | 0,0000 | 3,05 | 0,001 | 0,0000 | |
| | 5,7 | 3,35 | 0,000 | 0,0000 | 3,22 | 0,001 | 0,0000 | 3,12 | 0,001 | 0,0000 | 3,04 | 0,001 | 0,0000 | 2,97 | 0,001 | 0,0000 | 2,92 | 0,002 | 0,0000 | 2,87 | 0,002 | 0,0000 | |
| | 5,9 | 3,17 | 0,001 | 0,0000 | 3,04 | 0,001 | 0,0000 | 2,94 | 0,002 | 0,0000 | 2,86 | 0,002 | 0,0000 | 2,79 | 0,003 | 0,0000 | 2,73 | 0,003 | 0,0000 | 2,68 | 0,004 | 0,0000 | |
| | 6,1 | 2,99 | 0,001 | 0,0000 | 2,85 | 0,002 | 0,0000 | 2,75 | 0,003 | 0,0000 | 2,67 | 0,004 | 0,0000 | 2,61 | 0,005 | 0,0000 | 2,55 | 0,005 | 0,0000 | 2,50 | 0,006 | 0,0000 | |
| | 6,3 | 2,80 | 0,003 | 0,0000 | 2,67 | 0,004 | 0,0000 | 2,57 | 0,005 | 0,0000 | 2,49 | 0,006 | 0,0000 | 2,42 | 0,008 | 0,0000 | 2,37 | 0,009 | 0,0000 | 2,32 | 0,010 | 0,0000 | |
| | 6,5 | 2,62 | 0,004 | 0,0000 | 2,49 | 0,006 | 0,0000 | 2,39 | 0,009 | 0,0000 | 2,31 | 0,011 | 0,0000 | 2,24 | 0,013 | 0,0000 | 2,18 | 0,014 | 0,0000 | 2,13 | 0,016 | 0,0000 | |
| 6,7 | 2,44 | 0,007 | 0,0000 | 2,30 | 0,011 | 0,0000 | 2,20 | 0,014 | 0,0000 | 2,12 | 0,017 | 0,0000 | 2,06 | 0,020 | 0,0000 | 2,00 | 0,023 | 0,0000 | 1,95 | 0,025 | 0,0000 | | |

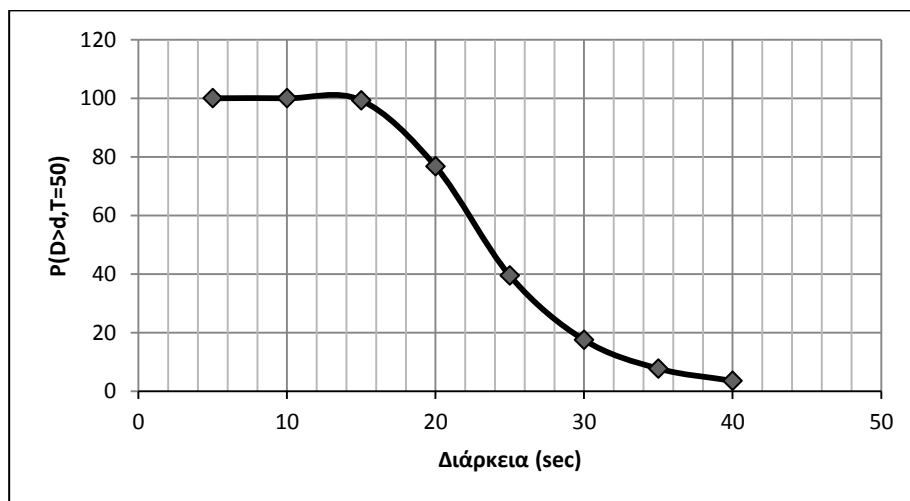
Προσθέτοντας την τελευταία στήλη από κάθε πίνακα για τα αντίστοιχα επίπεδα διάρκειας d και εφαρμόζοντας τη Σχέση 2.8 προκύπτει ο τελικός Πίνακας 3.7 και το διάγραμμα του Σχήματος 3.6. Επίσης στο Σχήμα 3.7 δίνεται η καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας (seismic hazard curve) για πιθανότητα υπέρβασης της διάρκειας του σεισμικού γεγονότος σε χρονικό διάστημα T = 50 έτη (εκτιμώμενος χρόνος ζωής των κατασκευών).

Πίνακας 3.7 Αθροιστική μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης λ_{total} και αντίστοιχη πιθανότητα υπέρβασης για T = 50 έτη

| d (sec) | λ_{total} | P(%) (T=50) |
|---------|-------------------|-------------|
| 5 | 1.7314 | 100.00 |
| 10 | 0.3937 | 100.00 |
| 15 | 0.0982 | 99.26 |
| 20 | 0.0292 | 76.77 |
| 25 | 0.0100 | 39.45 |
| 30 | 0.0039 | 17.53 |
| 35 | 0.0016 | 7.76 |
| 40 | 0.0007 | 3.56 |



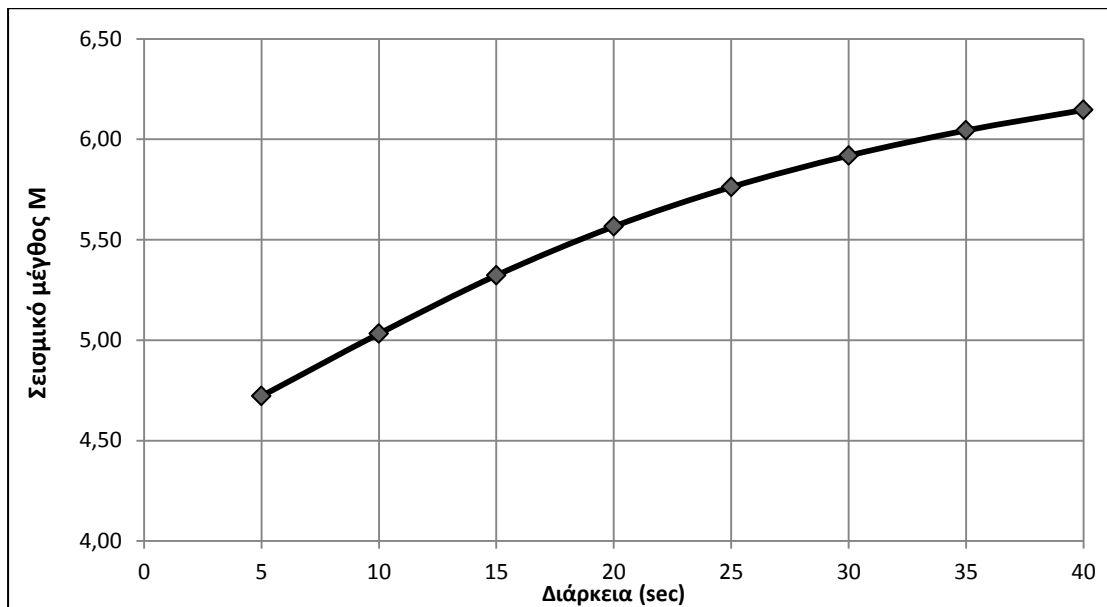
Σχήμα 3.6 Μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης λ_{total}



Σχήμα 3.7 Πιθανότητα υπέρβασης για $T = 50$ έτη

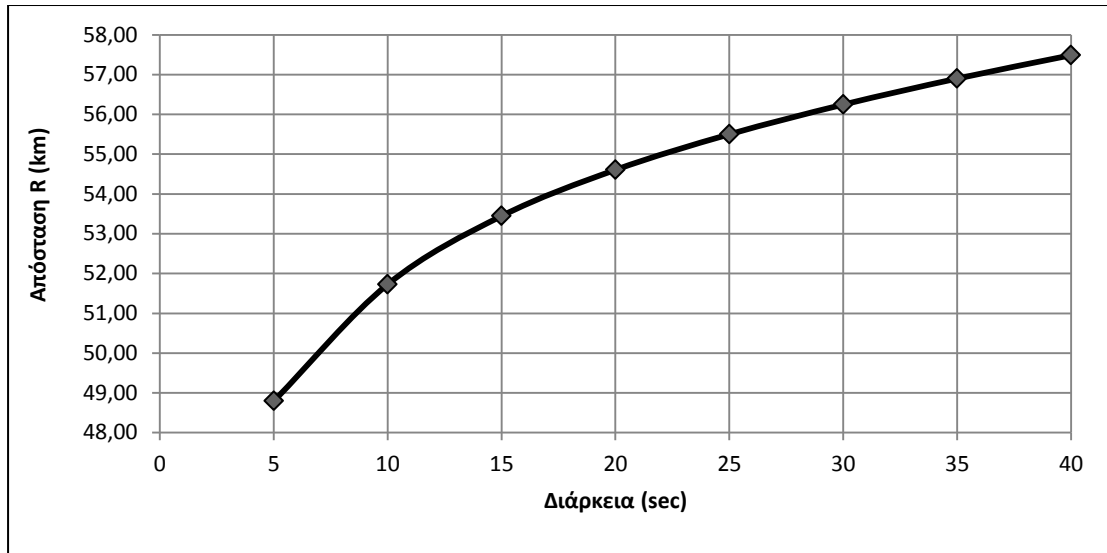
Παρατηρείται ότι πιθανότητα υπέρβασης 10% σε χρονικό διάστημα 50 ετών προκύπτει για διάρκεια περίπου 35 sec. Επομένως ακολουθείται η διαδικασία της ανάδρομης ανάλυσης (deaggregation) που περιγράφηκε παραπάνω για να προκύψουν οι τιμές των μεταβλητών M (deaggregated magnitude), R (deaggregated distance) και ϵ (deaggregated epsilon) για τις οποίες προκαλείται αυτή η υπέρβαση. Χρησιμοποιώντας τις Σχέσεις 2.18, 2.19 και 2.20 προκύπτουν οι ακόλουθοι πίνακες και τα αντίστοιχα διαγράμματα:

| | | D (sec) | | | | | | | |
|----------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| M | 4,1 | 0,85 | 0,43 | 0,22 | 0,12 | 0,06 | 0,04 | 0,02 | 0,01 |
| | 4,3 | 0,66 | 0,41 | 0,24 | 0,14 | 0,08 | 0,05 | 0,03 | 0,02 |
| | 4,5 | 0,51 | 0,38 | 0,25 | 0,16 | 0,11 | 0,07 | 0,05 | 0,03 |
| | 4,7 | 0,72 | 0,64 | 0,49 | 0,35 | 0,24 | 0,17 | 0,12 | 0,09 |
| | 4,9 | 0,55 | 0,59 | 0,51 | 0,40 | 0,30 | 0,23 | 0,17 | 0,13 |
| | 5,1 | 0,41 | 0,52 | 0,51 | 0,44 | 0,36 | 0,29 | 0,23 | 0,18 |
| | 5,3 | 0,31 | 0,46 | 0,50 | 0,48 | 0,42 | 0,36 | 0,30 | 0,25 |
| | 5,5 | 0,22 | 0,39 | 0,48 | 0,50 | 0,47 | 0,43 | 0,38 | 0,33 |
| | 5,7 | 0,16 | 0,32 | 0,45 | 0,51 | 0,52 | 0,50 | 0,46 | 0,43 |
| | 5,9 | 0,12 | 0,26 | 0,41 | 0,50 | 0,55 | 0,57 | 0,56 | 0,53 |
| | 6,1 | 0,08 | 0,21 | 0,36 | 0,49 | 0,57 | 0,62 | 0,64 | 0,65 |
| | 6,3 | 0,06 | 0,16 | 0,31 | 0,46 | 0,58 | 0,67 | 0,73 | 0,76 |
| | 6,5 | 0,04 | 0,12 | 0,26 | 0,42 | 0,57 | 0,69 | 0,79 | 0,87 |
| | 6,7 | 0,03 | 0,09 | 0,22 | 0,38 | 0,54 | 0,70 | 0,85 | 0,97 |
| | 6,9 | 0,01 | 0,02 | 0,05 | 0,09 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,30 |
| | 7,1 | 0,00 | 0,01 | 0,04 | 0,08 | 0,12 | 0,18 | 0,24 | 0,30 |
| | 7,3 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,06 | 0,10 | 0,16 | 0,22 | 0,29 |
| | sum | 4,72 | 5,03 | 5,32 | 5,57 | 5,76 | 5,92 | 6,04 | 6,15 |



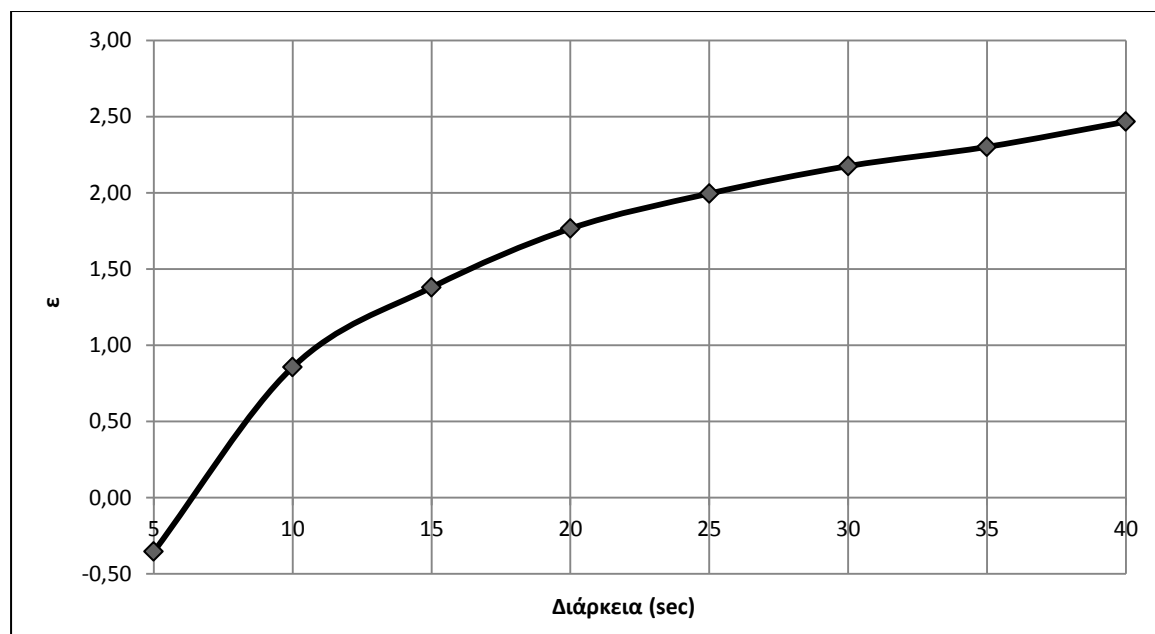
Σχήμα 3.8 Deaggregated Magnitude

| | | D (sec) | | | | | | | |
|-----|----|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| R | 25 | 7,14 | 5,93 | 5,27 | 4,84 | 4,52 | 4,26 | 4,04 | 3,84 |
| | 35 | 5,67 | 5,23 | 4,94 | 4,73 | 4,57 | 4,43 | 4,31 | 4,19 |
| | 45 | 5,05 | 5,03 | 4,97 | 4,91 | 4,86 | 4,81 | 4,76 | 4,72 |
| | 55 | 5,89 | 6,25 | 6,41 | 6,49 | 6,55 | 6,59 | 6,62 | 6,64 |
| | 65 | 7,24 | 8,08 | 8,54 | 8,84 | 9,06 | 9,24 | 9,39 | 9,53 |
| | 75 | 7,76 | 9,05 | 9,82 | 10,34 | 10,75 | 11,09 | 11,39 | 11,66 |
| | 85 | 10,04 | 12,15 | 13,50 | 14,44 | 15,19 | 15,82 | 16,39 | 16,91 |
| sum | | 48,79 | 51,73 | 53,45 | 54,61 | 55,50 | 56,25 | 56,90 | 57,49 |



Σχήμα 3.9 Deaggregated Distance

| | | ε | | | | | | | | | |
|---------|----|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | -1 | -2 | -3 | 4 | 5 | sum |
| D (sec) | 5 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | -0,285 | -0,067 | -0,002 | 0,000 | 0,000 | -0,35 |
| | 10 | 0,000 | 0,592 | 0,297 | 0,000 | -0,032 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,86 |
| | 15 | 0,000 | 0,427 | 0,864 | 0,090 | -0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,38 |
| | 20 | 0,000 | 0,350 | 0,941 | 0,474 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,77 |
| | 25 | 0,000 | 0,226 | 1,013 | 0,756 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 2,00 |
| | 30 | 0,000 | 0,111 | 1,091 | 0,958 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,016 | 0,000 | 2,18 |
| | 35 | 0,000 | 0,048 | 1,018 | 1,141 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,091 | 0,003 | 2,30 |
| | 40 | 0,000 | 0,012 | 0,942 | 1,329 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,172 | 0,011 | 2,47 |



Σχήμα 3.10 Deaggregated Epsilon

Διαπιστώνεται από τους πίνακες που προηγήθηκαν ότι υπέρβαση της διάρκειας των 35 sec της ισχυρής σεισμικής δόνησης προκύπτει για μέγεθος σεισμού $M = 6.05$, απόστασης $R = 56.90$ km και παραμέτρου $\varepsilon = 2.30$. Αντίστοιχη διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε περίπτωση όπου όλα τα σεισμοτεκτονικά δεδομένα της εξεταζόμενης περιοχής είναι γνωστά, έτσι ώστε να προκύψει το επικρατέστερο σενάριο σεισμού και σύμφωνα με αυτό να γίνει ο σχεδιασμός των κατασκευών.

4. ΤΕΧΝΗΤΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ

Οι πραγματικές σεισμικές δονήσεις περιλαμβάνουν ένα σύνολο παραμέτρων (μέγεθος σεισμού, διάρκεια, εστιακό βάθος, σχέσεις απόσβεσης), οι οποίες πιθανόν να μην συμβούν ξανά. Επομένως λόγω της σπανιότητας ή της απουσίας καταγεγραμμένων σεισμικών δονήσεων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, απαιτείται πολλές φορές για τις ανάγκες του σχεδιασμού η παραγωγή τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων με βάση κάποιο φάσμα αναφοράς (target spectrum).

4.1 Δημιουργία τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων

Μία από τις μεθόδους παραγωγής τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων είναι μέσω του προγράμματος SIMQKE. Η διαδικασία βασίζεται στο γεγονός ότι κάθε περιοδική συνάρτηση μπορεί να επεκταθεί σε μία σειρά από ημιτονοειδή κύματα:

$$X(t) = \sum_n A_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (4.1)$$

Όπου,

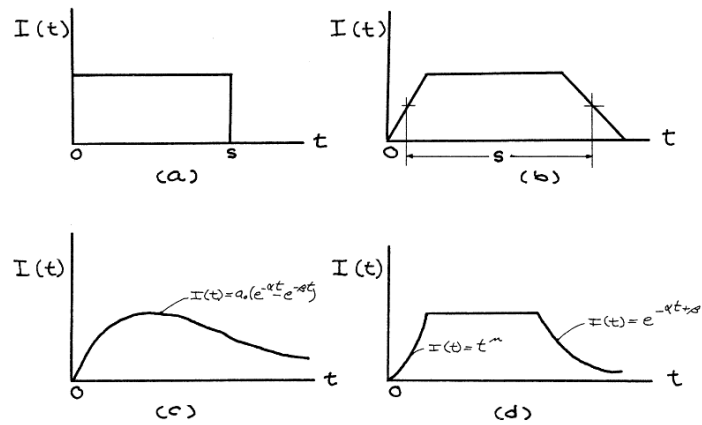
A_n το πλάτος του n – οστού κύματος

φ_n η γωνία φάσης του n – οστού κύματος μεταξύ 0 και 2π

Δημιουργώντας έναν πίνακα πλατών (που σχετίζονται με τη φασματική πυκνότητα ισχύος G_ω) και διάφορους πίνακες γωνιών φάσης μπορούν να προκύψουν διαφορετικές δονήσεις με την ίδια γενική εικόνα, αλλά με διαφορετικές λεπτομέρειες.

Για να προσομοιωθεί ο μεταβατικός χαρακτήρας των πραγματικών σεισμικών δονήσεων στην αρχή και το τέλος του επιταχυνσιογραφήματος πολλαπλασιάζονται με μία συνάρτηση χρόνου $I(t)$ (Σχήμα 4.1) και επομένως η τεχνητή εδαφική κίνηση γίνεται:

$$Z(t) = I(t) \sum_n A_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (4.2)$$



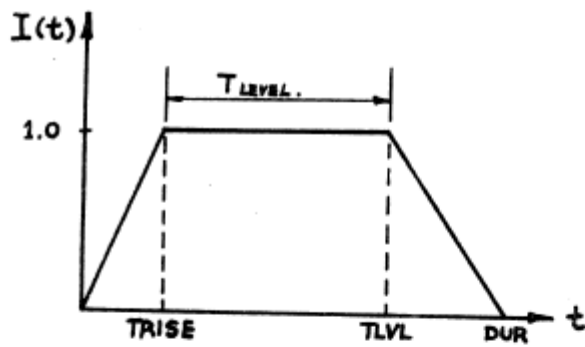
Σχήμα 4.1 Συναρτήσεις χρόνου

Η προκύπτουσα τεχνητή δόνηση είναι στάσιμη στο συχνοτικό της περιεχόμενο με τη μέγιστη επιτάχυνσή της να βρίσκεται πολύ κοντά στην επιθυμητή (target peak acceleration).

4.2 Απαιτούμενα δεδομένα εισαγωγής

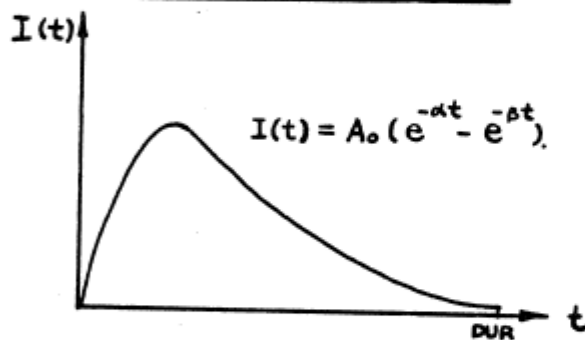
Για τη έναρξη της διαδικασίας παραγωγής των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων απαιτείται αρχικά η επιλογή του σχήματος της αντίστοιχης συνάρτησης και η εισαγωγή των ακόλουθων παραμέτρων:

- Χρόνος ανάδυσης (T_{RISE})
- Χρόνος ισχυρής δόνησης, όπου η συνάρτηση παραμένει σταθερή (T_{LVL})
- Συνολική διάρκεια σεισμικής δόνησης (DUR)
- Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA)



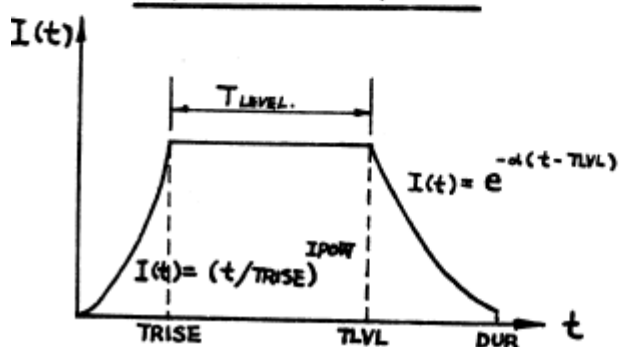
- INPUT DATA:
1. ICASE = 2
 2. TRISE
 3. TLVL
 4. DUR

Option B: Exponential



- INPUT DATA:
1. ICASE = 3
 2. ALFAO
 3. BETAO
 4. A0
 5. DUR

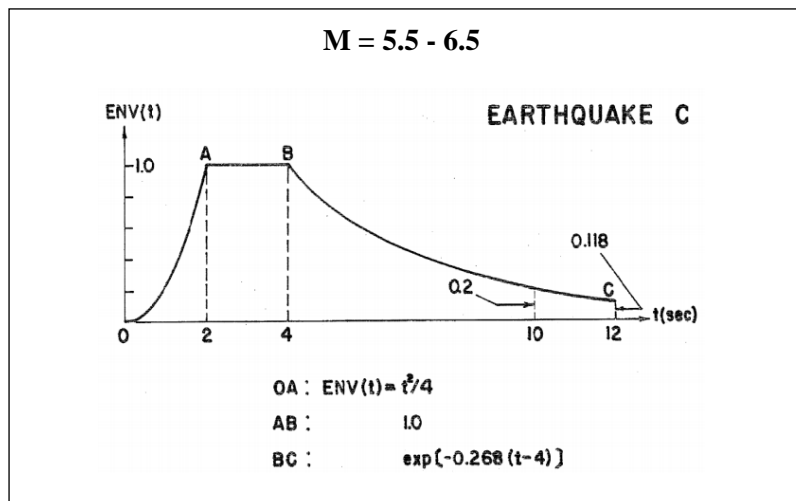
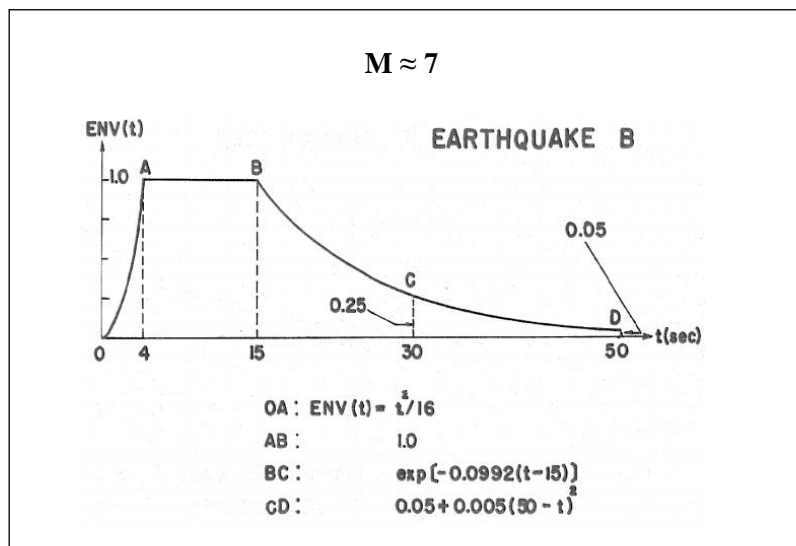
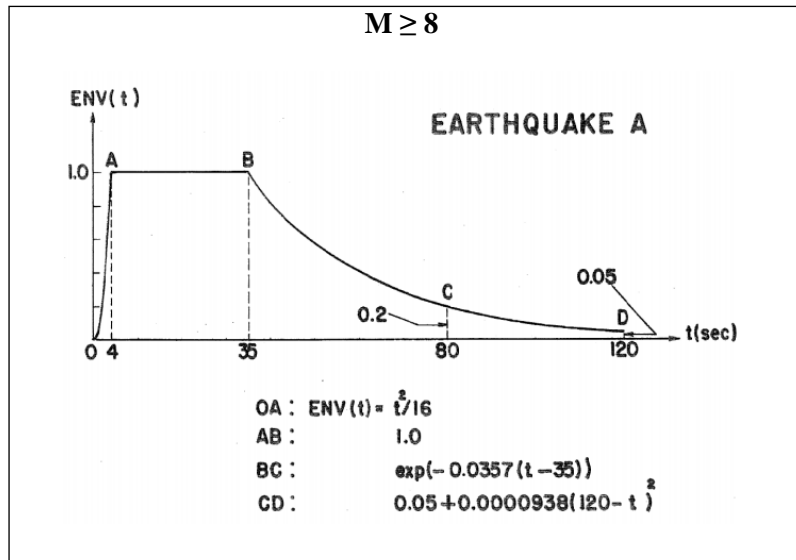
Option C: Compound

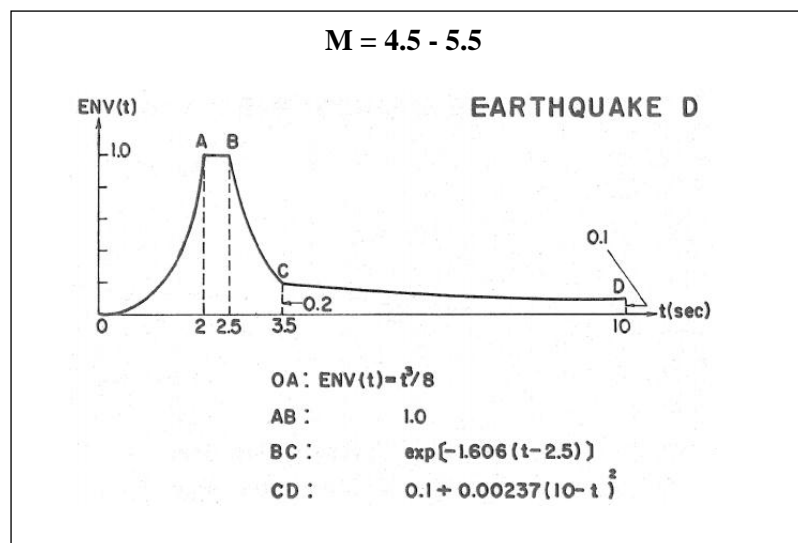


- INPUT DATA:
1. ICASE = 4
 2. TRISE
 3. TLVL
 4. IPOW
 5. ALFAO
 6. DUR

Σχήμα 4.2 Συναρτήσεις χρόνου και απαιτούμενα δεδομένα εισαγωγής για την παραγωγή τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων (Hou, 1968, Liu, 1969, Jennings, 1968)

Στο παρελθόν έχουν προταθεί οι ακόλουθες συναρτήσεις χρόνου για διάφορα μεγέθη σεισμού όπως φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα:

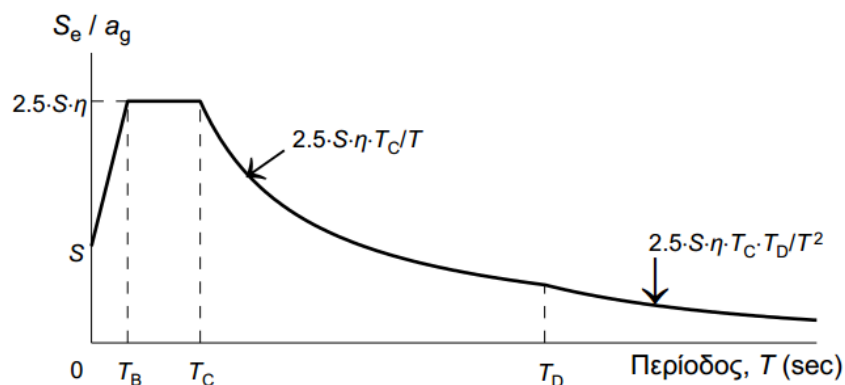




Σχήμα 4.3 Σεισμοί προσομοίωσης ανάλογα με το μέγεθος του σεισμού (Jennings, Housner, Tsai, 1968)

Για τις ανάγκες του σχεδιασμού στον ελληνικό χώρο μπορούν τα παραπάνω διαγράμματα να τροποποιηθούν κατάλληλα ανάλογα με το αναμενόμενο μέγεθος σεισμού και τη διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης.

Για την προσομοίωση με βάση το ελαστικό φάσμα του EC8 (Σχήμα 4.4) εισάγονται δεδομένα φασματικής ταχύτητας σε cm/sec ($S_V = S_e/(2\pi/T)$) ανάλογα με τον τύπο του εδάφους που έχει επιλεγεί (Πίνακας 4.1, 4.2).



Σχήμα 4.4 Ελαστικό φάσμα EC8

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά ελαστικού φάσματος EC8 ανάλογα με τον τύπο του εδάφους

| Τύπος Εδάφους | T _B (sec) | T _C (sec) | T _D (sec) | S |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|------|
| A | 0.15 | 0.40 | 2.50 | 1.00 |
| B | 0.15 | 0.50 | 2.50 | 1.20 |
| C | 0.20 | 0.60 | 2.50 | 1.15 |
| D | 0.20 | 0.80 | 2.50 | 1.35 |
| E | 0.15 | 0.50 | 2.50 | 1.40 |

Πίνακας 4.2 Κατάταξη εδαφών σύμφωνα με τον EC8

| Κατηγορία εδάφους | Περιγραφή στρωματογραφίας | Παράμετροι | | |
|-------------------|---|-----------------------|-----------|-------------|
| | | $v_{s,30}$ | N_{ESP} | c_u (kPa) |
| A | Βράχος ή άλλος βραχώδης γεωλογικός σχηματισμός που περιλαμβάνει το πολύ 5 m ασθενέστερου επιφανειακού υλικού | > 800 | – | – |
| B | Αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλικών, ή πολύ σκληρής αργίλου, πάχους τουλάχιστον αρκετών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος | 360 - 800 | > 50 | > 250 |
| C | Βαθιές αποθέσεις πυκνής ή μετρίως πυκνής άμμου, χαλικών 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 v_s κατηγορίας C ή D και πάχος που ποικίλλει μεταξύ περίπου 5 m και 20 m, με υπόστρωμα από πιο σκληρό υλικό με $v_s > 800$ 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 A – E ή S ₁ | | | |

Η βελτιστοποίηση αυτής της προσομοίωσης μέσω του προγράμματος SIMQKE επιτυγχάνεται με τη χρήση του προγράμματος SEISMOMATCH. Πιο συγκεκριμένα τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα που παρήχθησαν αρχικά εισάγονται για επιπλέον επεξεργασία στο πρόγραμμα SEISMOMATCH θεωρώντας όσο το δυνατό μικρότερο κάθε φορά ανεκτό σφάλμα στο «ταίριασμα» με το φάσμα αναφοράς (target spectrum).

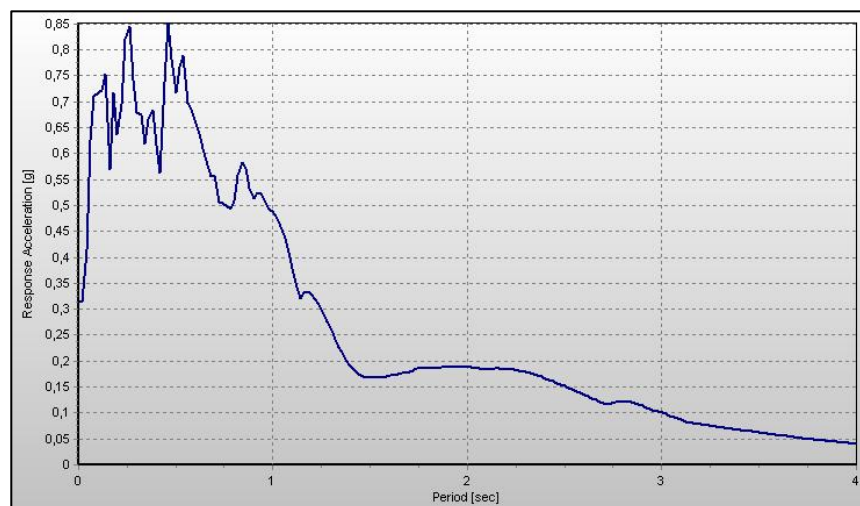
5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΥΚΛΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΟΝΗΣΗΣ

5.1 Σεισμική απόκριση

Μία από τις πιο σημαντικές εφαρμογές της θεωρίας της δυναμικής των κατασκευών βρίσκεται στην ανάλυση της απόκρισης τους σε βίαιη εδαφική δόνηση που προκαλείται από έναν σεισμό.

5.1.1 Ελαστικά φάσματα απόκρισης

Τα ελαστικά φάσματα απόκρισης ελήφθησαν αρχικά από τον Biot (1941) χρησιμοποιώντας ένα μηχανικό ανάλογο. Η ευρεία όμως διαθεσιμότητα των ηλεκτρονικών υπολογιστών έδωσε τη δυνατότητα αποτελεσματικού αριθμητικού υπολογισμού των φασμάτων (Nigam & Jennings, 1969). Σήμερα υπάρχουν πολλά λογισμικά για τον υπολογισμό ελαστικών φασμάτων απόκρισης όπως το SEISMOSIGNAL (Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1 Φάσμα απόκρισης για το σεισμό Imperial Valley

Όλες οι παράμετροι της ελαστικής απόκρισης εξάγονται από την επίλυση των εξισώσεων κίνησης ενός μονοβάθμιου συστήματος με ιξώδη απόσβεση:

$$m \cdot a + c \cdot v + k \cdot u = -m \cdot a_g \quad (5.1)$$

Όπου,

| | |
|-------|---|
| m | η μάζα |
| a | η απόλυτη επιτάχυνση τη μάζας |
| c | η ιξώδης απόσβεση |
| k | η ελαστική δυσκαμψία |
| u | η σχετική μετατόπιση μεταξύ της μάζας και του εδάφους |
| a_g | η εδαφική επιτάχυνση |

Είναι γενικά πιο βολικό να εκφράζονται τα χαρακτηριστικά του συστήματος ως όροι της ιδιοπεριόδου του (natural period) T_n ή της ιδιοσυχνότητας ω_n (natural frequency) και του λόγου απόσβεσης ζ :

$$T_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (5.2)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{2\pi}{T_n} \quad (5.3)$$

$$\zeta = \frac{c}{2 \cdot m \cdot \omega_n} \quad (5.4)$$

Αντικαθιστώντας στην Σχέση 5.1 προκύπτει:

$$a + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot \dot{v} + \omega_n^2 \cdot u = -a_g \quad (5.5)$$

Η Σχέση 5.5 μπορεί να επιλυθεί για την εύρεση της σχετικής μετατόπισης $v(t)$ υπό την δράση μίας αυθαίρετης εδαφικής χρονοϊστορίας επιτάχυνσης μέσω ολοκλήρωσης ή με επίλυση του ολοκληρώματος Duhamel. Το ολοκλήρωμα Duhamel περιγράφει την απόκριση σε όρους πλάτους της εδαφικής κίνησης και χρόνου της κίνησης. Η απόκριση σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του πλάτους της εδαφικής κίνησης σε κάθε στιγμή με μία αρμονική συνάρτηση μεταφοράς και μία συνάρτηση στάθμισης που μειώνει την επιρροή της εδαφικής κίνησης στο πλάτος απόκρισης με το χρόνο:

$$u(t) = -\frac{1}{\omega_d} \int_0^t a_g(\tau) \cdot e^{-\zeta \cdot \omega_n \cdot (t-\tau)} \cdot \sin[\omega_d(t-\tau)] dt \quad (5.6)$$

Όπου,

ω_d η αποσβενόμενη ιδιοσυχνότητα με $\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}$

τ ο χρόνος της εδαφικής κίνησης

Η σχετική ταχύτητα προκύπτει παραγωγίζοντας τη Σχέση 5.6 και η απόλυτη επιτάχυνση χρησιμοποιώντας τη Σχέση 5.5. Ο υπολογισμός του ολοκληρώματος Duhamel είναι ιδιαίτερα πολύπλοκος έως αδύνατος, γι' αυτό συνίσταται η εφαρμογή κάποιας αριθμητικής μεθόδου. Η μελέτη της απόκρισης μιας κατασκευής στο πεδίο του χρόνου απαιτεί την αριθμητική ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης σε διακριτά χρονικά διαστήματα της μορφής Δt , $2 \cdot \Delta t$, ..., $N \cdot \Delta t$.

Στο SEISMOSIGNAL χρησιμοποιείται η μέθοδος Newmark, η οποία απαιτεί τον καθορισμό των δύο παραμέτρων ολοκλήρωσης β (beta) και γ (gamma). Ανεξάρτητα από το χρησιμοποιούμενο χρονικό βήμα μπορεί να επιτευχθεί σταθερότητα όταν ισχύει για την παράμετρο β :

$$\beta \geq 0.25 \cdot (\gamma + 0.5)^2 \quad (5.7)$$

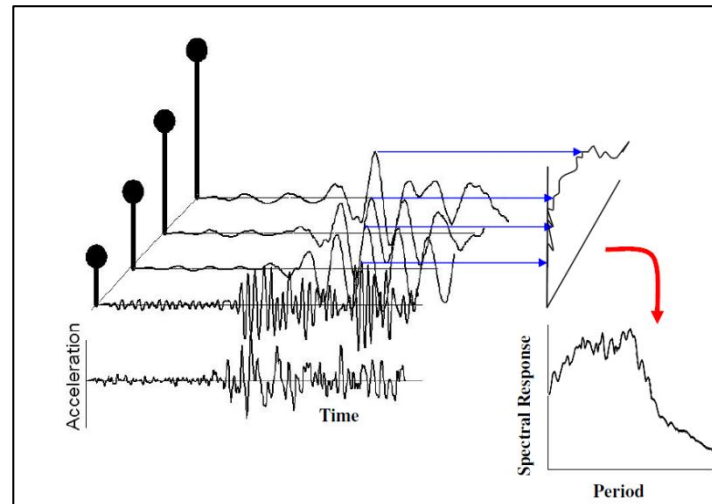
Οι προεπιλεγμένες τιμές που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα είναι $\beta = 0.25$ και $\gamma = 0.5$, για τις οποίες ο μέθοδος δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ δεν παρουσιάζεται διάχυση ενέργειας. Αρχικά χρησιμοποιείται το χρονικό βήμα του δοσμένου επιταχυνσιογραφήματος ως χρονικό βήμα της δυναμικής ανάλυσης και στη συνέχεια ελέγχεται αν αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να είναι μεγαλύτερο κατά 20% από την περίοδο του συστήματος που μελετάται, διαφορετικά ο αλγόριθμος αλλάζει αυτόματα το χρονικό βήμα έτσι ώστε ο λόγος dt/T να είναι αποδεκτός. Η μέγιστη προεπιλεγμένη τιμή είναι $dt/T = 0.02$ για να προκύπτουν ικανοποιητικά ακριβή αποτελέσματα.

Τα φάσματα απόκρισης φασματικής επιτάχυνσης SA, φασματικής ταχύτητας SV και φασματικής μετατόπισης SD κατασκευάζονται αναπαριστώντας γραφικά τη μέγιστη απόκριση για πολλά μονοβάθμια συστήματα σε ένα εύρος διαφορετικών τιμών περιόδου ή συχνοτήτων (Σχήμα 5.2). Υπάρχουν προσεγγιστικές σχέσεις που συνδέουν την φασματική επιτάχυνση, ταχύτητα και μετατόπιση. Εφόσον οι σχέσεις αυτές δεν είναι ακριβώς οι προκύπτουσες τιμές ονομάζονται φασματική ψευδοεπιτάχυνση (PSA) και φασματική ψευδοταχύτητα (PSV) αντίστοιχα:

$$PSA = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot SD \quad (5.8)$$

$$PSV = \left(\frac{2\pi}{T}\right) \cdot SD \quad (5.9)$$

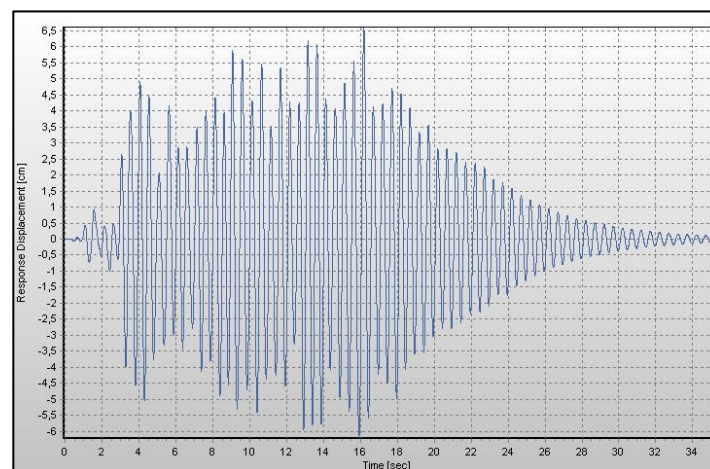
Τονίζεται ότι για επίπεδα απόσβεσης μικρότερα από 20% της κρίσιμης τιμής, η φασματική ψευδοεπιτάχυνση και ψευδοταχύτητα τείνουν στην φασματική επιτάχυνση και ταχύτητα αντίστοιχα, εκτός από περιπτώσεις πολύ μικρών ή πολύ μεγάλων τιμών ιδιοπεριόδου. Στην πραγματικότητα η φασματική ψευδοεπιτάχυνση και η φασματική επιτάχυνση είναι απολύτως ίσες για μηδενική απόσβεση. (Hancock, 2006)



Σχήμα 5.2 Απεικόνιση της κατασκευής φάσματος απόκρισης. Η μέγιστη απόκριση κάθε μονοβάθμιου συστήματος αναπαριστάται γραφικά συναρτήσει της ιδιοπεριόδου του

5.1.2 Χρονοϊστορία απόκρισης

Τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα που προκύπτουν με βάση τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη της απόκρισης ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή συγκεκριμένης ιδιοπεριόδου μέσω του προγράμματος SEISMOSIGNAL. Ενδεικτικά δίνεται στο Σχήμα 5.3 η ελαστική απόκριση μετακινήσεων για μονοβάθμιο ταλαντωτή ιδιοπεριόδου $T = 0.5$ sec και απόσβεσης $\zeta = 2\%$.



Σχήμα 5.3 Απόκριση μετατοπίσεων μονοβάθμιου ταλαντωτή

Διαπιστώνεται ότι η σεισμική απόκριση ενός συστήματος, το οποίο προοδευτικά χάνει μέρος της αντοχής του εξαιτίας των εναλλασσόμενων κύκλων φόρτισης στους οποίους υπόκειται, εξαρτάται όχι μόνο από το μέγιστο πλάτος της σεισμικής δόνησης αλλά και από τη διάρκειά της, η οποία καθορίζει και τον αριθμό των κύκλων φόρτισης.

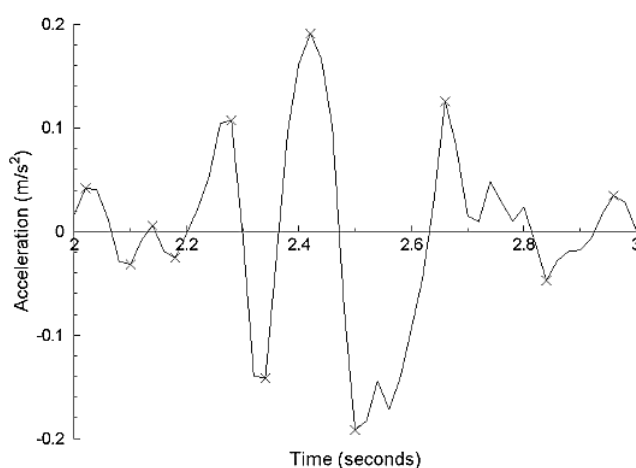
5.2 Μέτρηση κύκλων φόρτισης

Για τη μέτρηση των κύκλων φόρτισης μιας κατασκευής έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι (Hancock & Bommer, 2004):

- **Μέτρηση κορυφών (Peak Counting)**

Υπάρχουν αρκετές παραλλαγές της μεθόδου, με τις δύο βασικότερες διαφορές μεταξύ των διαφόρων ορισμών να είναι:

1. Επίπεδο αποκοπής: Για να αποφευχθεί η αλλοίωση των αποτελεσμάτων λόγω της επικράτησης πολλών μικρών κορυφών, επιλέγεται ένα επίπεδο αποκοπής κάτω από το οποίο δεν λαμβάνονται υπόψη οι υπάρχουσες κορυφές.
2. Εναλλαγή προσήμου: Ορισμένες μέθοδοι λαμβάνουν υπόψη μόνο τις μεγαλύτερες κορυφές μεταξύ διαδοχικών κορυφών διαφορετικού προσήμου (Σχήμα 5.4), ενώ άλλες λαμβάνουν υπόψη όλες τις κορυφές.

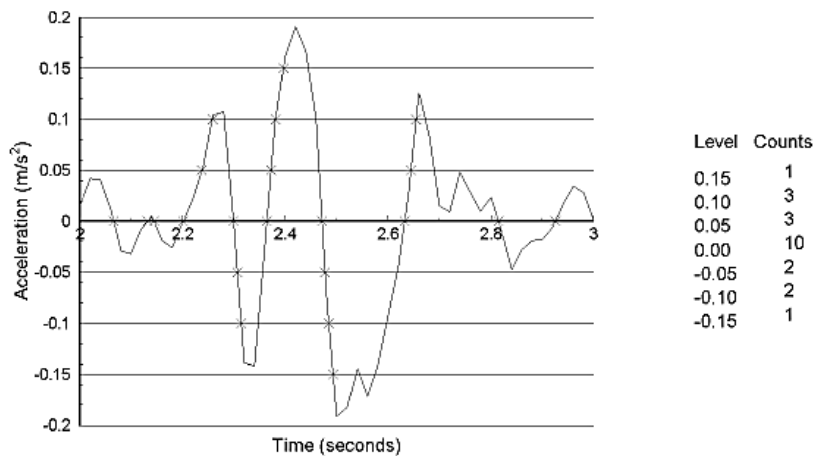


Σχήμα 5.4 Παράδειγμα μέτρησης κορυφών

- **Μέτρηση κορυφών πάνω από καθορισμένα επίπεδα (Level Crossing Counting)**

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως για τη μέτρηση της συχνότητας της εδαφικής κίνησης. Συγκεκριμένα η συχνότητα ορίζεται ως το ήμισυ του αριθμού των

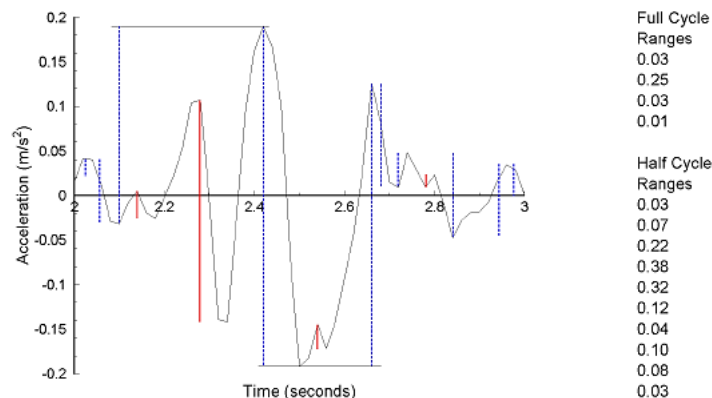
κορυφών πάνω ένα καθορισμένο επίπεδο, διαιρεμένο με τη χρονική διάρκεια της κίνησης πάνω από αυτό το όριο. (Σχήμα 5.5)



Σχήμα 5.5 Παράδειγμα μέτρησης κορυφών πάνω διάφορα καθορισμένα επίπεδα

- **Μέτρηση κύκλων ανάλογα με το εύρος τους (Range Counting)**

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος σε αναλύσεις κόπωσης, η οποία εφαρμόζεται συνήθως μέσω της μεθόδου Rainflow διότι δίνει τη δυνατότητα μέτρησης κύκλων τόσο υψηλής όσο και χαμηλής συχνότητας σε σήματα με ευρύ φάσμα συχνοτήτων (Σχήμα 5.6). Η μέθοδος, λόγω της μεγάλης σημασίας της, αναλύεται λεπτομερώς σε επόμενη ενότητα.



Σχήμα 5.6 Παράδειγμα μέτρησης κύκλων ανάλογα με το εύρος τους, οι κόκκινες συμπαγείς γραμμές είναι οι πλήρεις κύκλοι, ενώ οι μπλε διακεκομμένες οι μισοί κύκλοι

- **Έμμεση εκτίμηση μέσω στατιστικών τεχνικών (Indirect Estimation)**

Αφορά μεθόδους που δεν μετρούν τους κύκλους φόρτισης απευθείας από τη δοσμένη ιστορία, αλλά χρησιμοποιούν στατιστικές τεχνικές για την εκτίμησή τους. Συνήθως σύμφωνα με τη θεωρία της τυχαίας δόνησης, χρησιμοποιούνται φασματικές ροπές για να καθοριστεί η δεσπόζουσα συχνότητα και επομένως ο αριθμός των ακραίων κορυφών ανά

μονάδα χρόνου (Boore, 1983). Οι περισσότερες μέθοδοι υποθέτουν ότι δεν υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των κορυφών και ότι αποτελούν μέρος μίας στάσιμης διαδικασίας.

Ο αριθμός των κορυφών N σε χρονικό διάστημα T είναι (Boore, 1983):

$$N = 2\tilde{f}T \quad (5.10)$$

Όπου,

$$\tilde{f} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{m_4}{m_2} \right)^{1/2} \quad \text{η δεσπόζουσα συχνότητα} \quad (5.11)$$

$$m_2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \omega^2 |A(\omega)|^2 d\omega \quad \text{η φασματική ροπή δευτέρου βαθμού} \quad (5.12)$$

$$m_4 = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \omega^4 |A(\omega)|^2 d\omega \quad \text{η φασματική ροπή τετάρτου βαθμού} \quad (5.13)$$

ω η γωνιακή συχνότητα

$A(\omega)$ το φάσμα επιταχύνσεων

• **Μέθοδοι που βασίζονται στη σεισμική απόκριση (based on structural response)**

Σύμφωνα με την προσέγγιση των Zahrah and Hall (1984), προτείνεται ο καθορισμός των ισοδύναμων κύκλων διαρροής n_{eq} , διαιρώντας τη συνολική υστερητική ενέργεια (E_H) με την ισοδύναμη ενέργεια που θα είχε απορροφηθεί εάν η κατασκευή φορτιζόταν μονοτονικά με την ίδια μέγιστη μετακίνηση. Για τον προσδιορισμό των ισοδύναμων κύκλων διαρροής απαιτείται ένα ελαστοπλαστικό μοντέλο, το οποίο χρησιμεύει ως ένας συγκριτικός δείκτης για την αξιολόγηση της δριμύτητας της εδαφικής κίνησης:

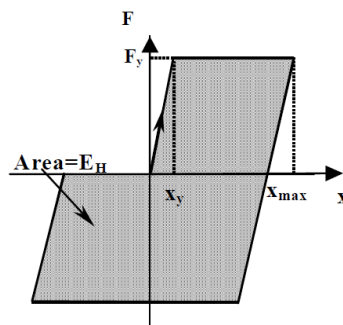
$$n_{eq} = \frac{E_H}{F_y \cdot (x_{max} - x_y)} \quad (5.14)$$

Όπου,

F_y η δύναμη διαρροής

x_{max} η μέγιστη μετακίνηση

Η φυσική έννοια της παραμέτρου n_{eq} παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.7.



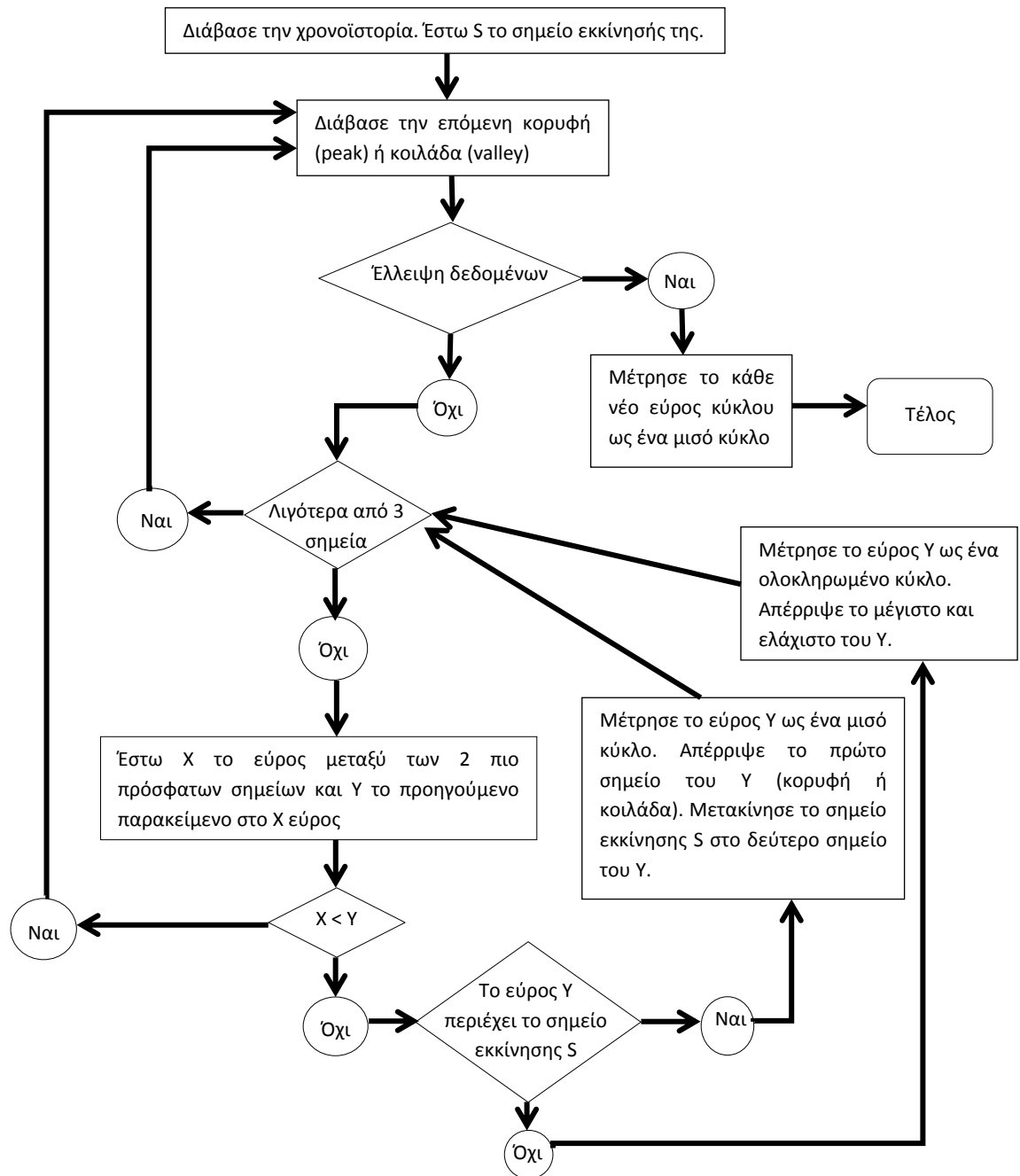
Σχήμα 5.7 Αναπαράσταση του αριθμού των ισοδύναμων κύκλων σε ένα ελαστοπλαστικό σύστημα

Κατά Manfredi et al. (2003), ο αριθμός των ισοδύναμων κύκλων όπως ορίζεται στη συγκεκριμένη μέθοδο αυξάνεται με την απόσταση από το ρήγμα, αν και το πλάτος τους μειώνεται.

Σε αυτό το σημείο είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονιστεί ότι ο εκάστοτε ερευνητής οφείλει να είναι ενήμερος για τους περιορισμούς των διαφόρων μεθόδων, έτσι ώστε να επιλέγει κάθε φορά εκείνη τη μέθοδο που ανταποκρίνεται καλύτερα στους σκοπούς της μελέτης του.

5.2.1 Μέθοδος Rainflow

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για τη μελέτη της εναπομένουσας αντοχής σε κόπωση μιας κατασκευής, η οποία υπόκειται σε τυχαία σεισμική δόνηση, είναι αυτή της εύρεσης του πλάτους των κύκλων μέσω του αλγόριθμου Rainflow. Ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε από τους Tatsuo Endo and M. Matsuishi το 1968 και περιγράφεται από το παρακάτω διάγραμμα ροής. (Σχήμα 5.8)



Σχήμα 5.8 Αλγόριθμος Rainflow

Απλούστερα η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται από τα εξής βήματα:

1. Περιορίζεται η ιστορία (μετακινήσεων, τάσεων κτλ.) σε μία ακολουθία κορυφών (μέγιστα) και κοιλάδων (ελάχιστα). Το μοντέλο θεωρείται ότι είναι μία κατασκευή με διαδοχικές κεκλιμένες οροφές.

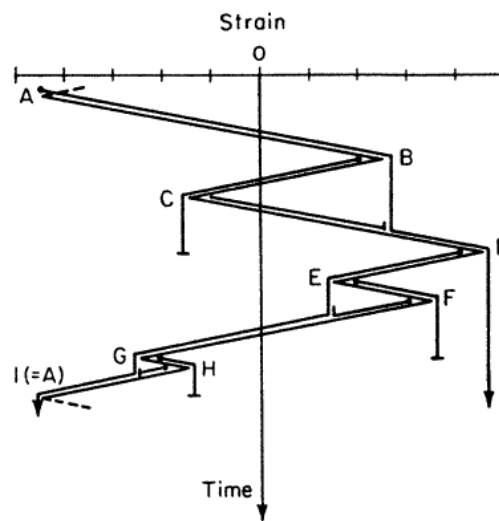
2. Περιστρέφεται το σχήμα ωρολογιακά κατά 90° και θεωρείται ότι νερό υπό μορφή βροχής αφήνεται να πέσει από ψηλά ακολουθώντας τη φυσική διαδρομή του κατά την ελεύθερη πτώση του.
3. Για κάθε τμήμα κεκλιμένης οροφής εισάγεται μία ροή νερού στο υψηλότερο σημείο της. Η ροή ακολουθεί την κεκλιμένη οροφή και πέφτει στα χαμηλότερα σημεία μέχρι τελικά να πέσει εκτός οροφής ή μέχρι να συναντήσει στην πορεία της μία άλλη προηγούμενη ροή.
4. Τέλος συνδυάζονται οι μισοί κύκλοι ίδιου εύρους και έτσι προκύπτουν ολοκληρωμένοι κύκλοι. Τυπικά παραμένουν και κάποιοι κύκλοι που δεν ολοκληρώνονται.

Η απόσταση μεταξύ του σημείου έναρξης της ροής και του σημείου που αυτή εγκαταλείπει την οροφή, αντιστοιχεί στο εύρος του κύκλου (Range), ενώ το πλάτος του κύκλου (Amplitude) είναι ουσιαστικά το μισό εύρος:

$$Range = S_{max} - S_{min} \quad (5.15)$$

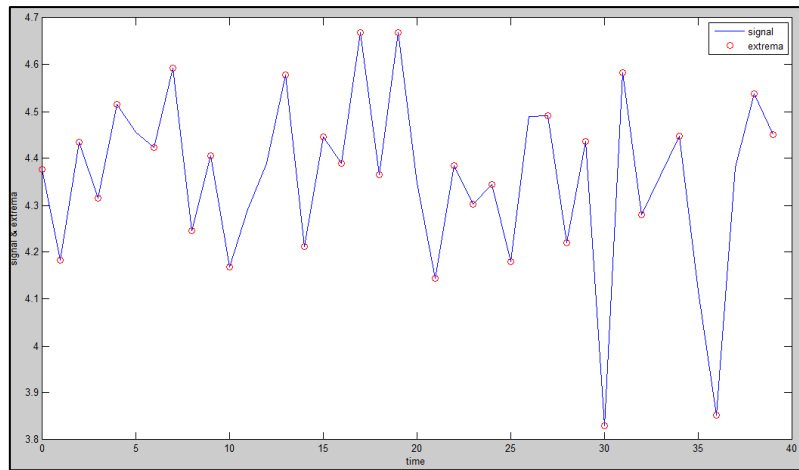
$$Amplitude = \frac{S_{max} - S_{min}}{2} \quad (5.16)$$

Η διαδικασία που περιγράφηκε αναπαριστάται και στο Σχήμα 5.9.

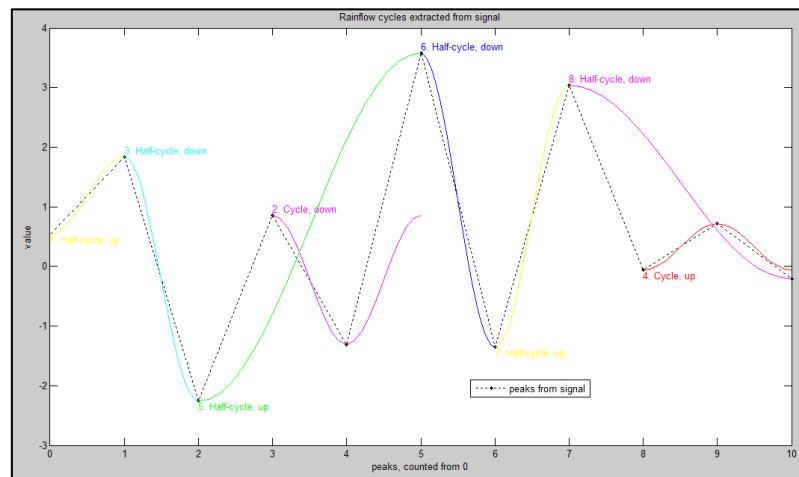


Σχήμα 5.9 Μέθοδος Rainflow

Η εφαρμογή της μεθόδου Rainflow μπορεί να γίνει με τη βοήθεια του κώδικα Matlab, από όπου μπορεί να προκύψουν οι ακόλουθες ενδεικτικές εικόνες:



Σχήμα 5.10 Μέγιστα (κορυφές) και ελάχιστα (κοιλιάδες) τυχαίας χρονοϊστορίας



Σχήμα 5.11 Εφαρμογή μεθόδου Rainflow στη Matlab

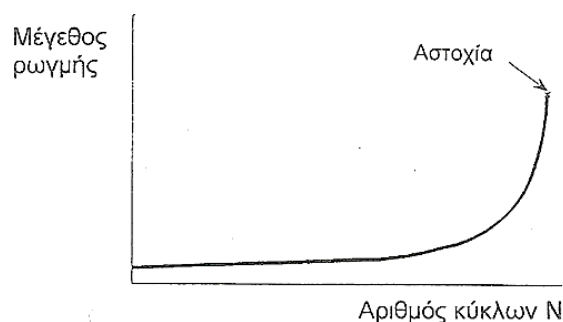
6. ΚΟΠΩΣΗ

6.1 Περιγραφή φαινομένου

Σύμφωνα με ανεξάρτητες μελέτες της Battelle (Business of Innovation) το 1982, το 80%-90% των κατασκευαστικών αστοχιών λαμβάνει χώρα μέσω ενός μηχανισμού κόπωσης. Η κόπωση ορίζεται ως η αστοχία υπό επαναλαμβανόμενο ή μεταβαλλόμενο φορτίο, το οποίο όμως ποτέ δεν φτάνει σε ικανό επίπεδο ώστε να προκαλέσει αστοχία με μία μόνο εφαρμογή του.

Η αστοχία σε κόπωση συνδέεται κατά κύριο λόγο με τις αναπόφευκτες μικροσκοπικές ατέλειες και γεωμετρικές ασυνέχειες που συσσωρεύονται στο εσωτερικό κάθε υλικού. Αυτές οι ατέλειες και ασυνέχειες (εγκοπές σε ελαττωματικά σύνορα, κακή κατασκευή ή κακή ποιότητα κοπής με φλόγα οξυγόνου, ραφές συγκόλλησης κακής ποιότητας και άλλες) αποτελούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, δηλαδή μικροσκοπικές περιοχές όπου οι τάσεις είναι δυνατόν να ξεπερνούν το όριο διαρροής, παρ' όλο που σε συνολικό μακροσκοπικό επίπεδο οι τάσεις αυτές βρίσκονται εντός της ελαστικής περιοχής.

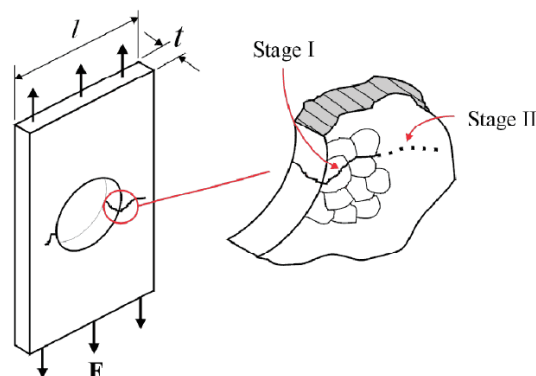
Με τη συνεχή εναλλαγή της φόρτισης εκκινεί στις μικροσκοπικές περιοχές αυξημένων τάσεων ένας μηχανισμός δημιουργίας και επέκτασης μικρορωγμών, καθώς και σχετικής ολίσθησης των επιπέδων των δομικών στοιχείων του υλικού. Τελικό αποτέλεσμα είναι ο σχηματισμός μακροσκοπικών ρωγμών, γεγονός που οδηγεί στη μείωση της αντοχής του υλικού και τη θραύση του. Στο Σχήμα 6.1 φαίνεται ποιοτικά η εξέλιξη μίας ρωγμής, η οποία αναπτύσσεται πολύ αργά στα πρώτα στάδια και επιταχύνεται κατά το τέλος. Το μεγαλύτερο τμήμα της όλης διαδικασίας, η οποία διακρίνεται σε τρία στάδια (Σχήματα 6.2, 6.3), καταναλώνεται για την αρχική ανάπτυξη της ρωγμής σε μία μικρή περιοχή με υψηλή τοπική τάση, όπου συσσωρεύεται όλη η βλάβη κατά τη διάρκεια της επαναλαμβανόμενης καταπόνησης.



Σχήμα 6.1 Τυπική καμπύλη ανάπτυξης ρωγμής

| | |
|-------------------|-----------------------------|
| Στάδιο I | Δημιουργία της ρωγμής |
| Στάδιο II | Διάδοση επικρατούσας ρωγμής |
| Στάδιο III | Τελική θραύση |

Σχήμα 6.2 Στάδια κόπωσης



Σχήμα 6.3 Απεικόνιση των σταδίων κόπωσης I και II

Η αστοχία που οφείλεται σε ένα μικρό πλήθος κύκλων φόρτισης ικανών να προκαλέσουν μεγάλες μεταλαστικές παραμορφώσεις, ακόμα και κατάρρευση του φορέα, ονομάζεται ολιγοκυκλική κόπωση (low – cycle fatigue). Περισσότερο επιρρεπείς σε τέτοιες αστοχίες είναι οι συνδέσεις δοκού – υποστυλώματος. Επομένως η συμπεριφορά αυτών των συνδέσεων κατά τη διάρκεια του σεισμικού γεγονότος θα καθορίσει και τη συμπεριφορά όλης της κατασκευής.

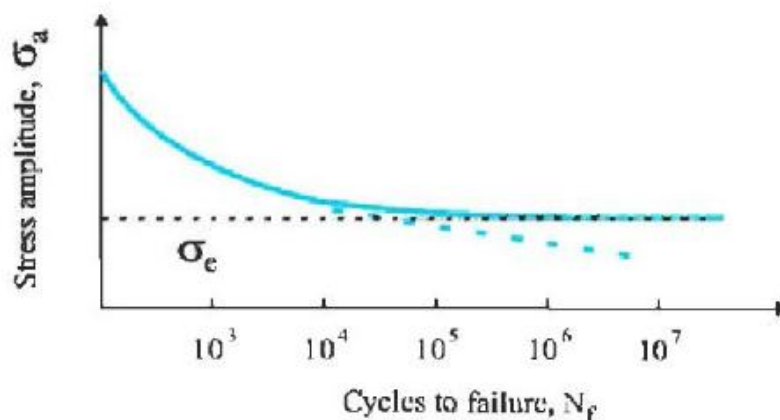
6.2 Κριτήριο Miner – Μοντέλο συσσωρευμένης βλάβης

Σε περίπτωση φόρτισης μεταβλητής διακύμανσης και διαφορετικού κύκλου επαναλήψεων, όπως είναι η σεισμική φόρτιση, προκαλείται στην υπό έλεγχο λεπτομέρεια συγκόλλησης μία συσσωρευμένη βλάβη (cumulative damage), για την εκτίμηση της οποίας έχουν διατυπωθεί διάφορες θεωρίες. Η απλούστερη είναι αυτή που διατυπώθηκε από τους Palmgren – Miner, γνωστή ως κριτήριο Miner, η οποία ορίζεται με την ακόλουθη συνθήκη:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (6.1)$$

Όπου,

- k το πλήθος των διαφορετικών ευρών τάσης $\Delta\sigma_i$ κατά τη διάρκεια της απαιτούμενης ζωής σχεδιασμού
- n_i ο αριθμός των κύκλων επανάληψης που αντιστοιχεί σε κάθε εύρος τάσης
- N_i ο αριθμός των κύκλων επανάληψης που προκύπτει από την καμπύλη Wöhler για κάθε εύρος τάσης (Σχήμα 6.4)



Σχήμα 6.4 Καμπύλη κόπωση Wöhler (καμπύλη S – N)

Μία κατασκευή κρίνεται επαρκής όταν δεν υπάρχει υπέρβαση του κριτηρίου Miner. Στην ανωτέρω συνθήκη δεν λαμβάνονται υπόψη εύρη τάσεων που βρίσκονται κάτω από το όριο κόπωσης σ_e (Σχήμα 6.4), διότι δεν έχουν καμία επιρροή (είναι $N \rightarrow \infty$). Το όριο κόπωσης είναι η τεταγμένη, η οποία αντιστοιχεί στην οριζόντια θέση της καμπύλης, και ουσιαστικά ονομάζεται η αντοχή κόπωσης που λαμβάνεται για καθορισμένη μέση τάση, όταν για οποιαδήποτε αύξηση των εναλλαγών φόρτισης δεν παρατηρείται μείωση της αντοχής.

Οι παράγοντες που επιδρούν στο όριο κόπωσης είναι (Παππάς, 2011):

1) Υλικό

Γενικά σε χάλυβες, αύξηση του ορίου θραύσης σε εφελκυσμό οδηγεί σε αύξηση του ορίου κόπωση.

2) Συγκέντρωση τάσεων

Η αρνητική επίδραση είναι πολύ μεγαλύτερη όταν η συγκέντρωση τάσεων συμβαίνει στην επιφάνεια.

3) Παραμένουσες τάσεις

Θλιπτικές παραμένουσες τάσεις στην επιφάνεια αυξάνουν γενικά το όριο κόπωσης.

6.3 Μεθοδολογία χρήσης καμπύλων ολιγοκυκλικής κόπωσης (Castiglioni, Μουζάκης, Καρύδης, 2007)

Η μεθοδολογία υπολογισμού της κόπωσης συγκολλητών συνδέσεων δοκού – υποστρώματος μέσω καμπύλων ολιγοκυκλικής κόπωσης βασίστηκε σε παρατηρήσεις προερχόμενες από πειράματα συγκολλητών κόμβων πραγματικής κλίμακας. Ο έλεγχος της κόπωσης πραγματοποιήθηκε μόνο στα άκρα των δοκών όπου υπάρχει η σύνδεση – συγκόλληση μεταξύ δοκού και υποστρώματος.

6.3.1 Ορισμός εύρους τάσης S^*

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για τον προσδιορισμό του εύρους τάσης. Σύμφωνα με τους Balio & Castiglioni (1995) ορίστηκε η αδιάστατη θεμελιώδης σχέση:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_y} = \frac{\Delta v}{v_y} = \frac{\Delta \varphi}{\varphi_y} \quad (6.2)$$

Για ένα ελαστικό και ισότροπο υλικό με βάση το νόμο του Hooke ισχύει:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6.3)$$

Αντίστοιχα μπορεί να οριστεί και το εύρος τάσης S^* :

$$S^* = E \cdot \Delta \varepsilon \xrightarrow{\text{διαρροή}} E \cdot \varepsilon_y \cdot \frac{\Delta v}{v_y} = \frac{\Delta v}{v_y} \cdot f_y = \frac{\Delta \varphi}{\varphi_y} \cdot f_y \quad (6.4)$$

Η ανωτέρω σχέση ισχύει και για τα εντατικά μεγέθη του φορέα και αυτή η ιδιότητα ελήφθη υπόψη, έτσι ώστε αντί για παραμορφώσεις να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ροπές, μιας και η εύρεση της ροπής διαρροής M_y είναι πολύ πιο εύκολη από τους άλλους παράγοντες, εφόσον προκύπτει άμεσα από τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της διατομής. Επομένως κάθε εύρος ροπής μπορεί να μετατραπεί πλέον σε αντίστοιχο εύρος τάσης:

$$S^* = \frac{\Delta M}{M_{pl}} \cdot f_y \quad (6.5)$$

Σύμφωνα με τα πειράματα που διεξήχθησαν προτείνεται η χρήση της πραγματικής τιμής του ορίου διαρροής f_y και όχι της ονομαστικής, δηλαδή αυξημένης κατά 20%, έτσι ώστε τα αποτελέσματα που προκύπτουν να είναι υπέρ της ασφαλείας.

6.3.2 Υπολογισμός ισοδύναμης τάσης S^*_{eq}

Κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος, οι κύκλοι στους υποβάλλεται μία κατασκευή δεν έχουν σταθερό εύρος. Επομένως προκειμένου να εκτιμηθεί η συσσωρευμένη ζημιά που έχει υποστεί, απαιτείται ο υπολογισμός μίας ισοδύναμης τάσης, η οποία προκύπτει από το σύνολο της χρονοϊστορίας. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατός ο υπολογισμός του πλήθους των

επιτρεπόμενων κύκλων τους οποίους μπορεί να εκτελέσει η κατασκευή υποβαλλόμενη στην ισοδύναμη τάση καθώς και το μέγεθος της βλάβης.

Αφού υπολογιστούν οι εκτελεσθέντες κύκλοι n_i σε κάθε εύρος μετατόπισης/ροπής, για παράδειγμα μέσω του αλγόριθμου Rainflow, προκύπτει η ισοδύναμη τάση από τη Σχέση 6.6:

$$S^*_{eq} = \sqrt[3]{\frac{\sum n_i S^{*3}_i}{\sum n_i}} \quad (6.6)$$

Όπου,

S^*_i το εύρος τάσης σε κάθε εύρος μετατόπισης/ροπής

N_i το πλήθος των εκτελεσθέντων κύκλων σε κάθε εύρος μετατόπισης/ροπής

6.3.3 Υπολογισμός επιτρεπόμενων κύκλων

Ο συνολικός αριθμός των επιτρεπόμενων κύκλων N_{total} στο σταθερό πλάτος S^*_{eq} είναι:

$$N_{total} \cdot (S^*_{eq})^m = 10^K \Rightarrow N_{total} = \frac{10^K}{S^{*m}_{eq}} \quad (6.7)$$

Όπου,

m συντελεστής που δείχνει την κλίση της καμπύλης $S - N$ στο διάγραμμα $\log S - \log N$, με πιο κατάλληλη τιμή να είναι $m = 3$, ενώ αν λαμβάνονται υπόψη μόνο οι πλαστικές παραμορφώσεις τότε λαμβάνεται $m = 2$

K συντελεστής που εξαρτάται από το είδος της αστοχίας: ξαφνική, προοδευτική, μεικτή

Για τον ορισμό του συντελεστή K απαιτείται πρώτα ο υπολογισμός μιας συγκεκριμένης τιμής «κατώφλι» (threshold value). Αυτή η τιμή ορίζεται για κάθε δομικό στοιχείο (δοκός, σύνδεση) και βασίζεται στην ποιότητα και τη λεπτομέρεια της συγκόλλησης. Ο υπολογισμός του «κατωφλίου» υπολογίζεται με βάση τη Σχέση 6.8:

$$M_{threshold} = \frac{\gamma \cdot M_{pl}}{n \cdot \lambda_w \cdot \lambda_f} \quad (kNM) \quad (6.8)$$

Όπου,

$\lambda_w = \frac{d}{t_w}$ η λυγηρότητα του κορμού της διατομής

$\lambda_f = \frac{c}{t_f} = \frac{0.5 \cdot b}{t_f}$ η λυγηρότητα του πέλματος της διατομής

- $\gamma = 2000$ προέκυψε από στατιστική ανάλυση πειραματικών δεδομένων
- n συντελεστής που εξαρτάται από την ποιότητα της συγκόλλησης με $n = 0.5$ για χαμηλή ποιότητα έως $n = 1$ για υψηλή ποιότητα

Από την τιμή S_{eq}^* υπολογίζεται με αντίστροφη διαδικασία η M_{eq}^* , η οποία αντιστοιχεί στο μισό του ισοδύναμου εύρους ταλάντωσης. Με βάση το λόγο $M_{eq}^*/M_{threshold}$ εκλέγεται ο τύπος της αναμενόμενης αστοχίας συγκόλλησης και προκύπτει αντίστοιχα ο συντελεστής K . Στα πλαίσια εύρεσης της ανωτέρω μεθοδολογίας παρατηρήθηκαν από τα πειράματα που διεξήχθησαν τρεις τρόποι αστοχίας:

- ❖ Ξαφνική αστοχία ($\frac{M_{eq}^*}{M_{threshold}} < 0.85 \rightarrow K = 10.31$)

Μορφή αστοχίας που οφείλεται στην ύπαρξη πολλών μικρών κύκλων με μικρές εξάρσεις πάνω από το όριο διαρροής. Ο μηχανισμός αστοχίας προκλήθηκε ύστερα από ρηγμάτωση της συγκόλλησης.

- ❖ Προοδευτική αστοχία ($\frac{M_{eq}^*}{M_{threshold}} > 1.15 \rightarrow K = 11.37$)

Μορφή αστοχίας που συνδέεται με κύκλους όπου οι πλαστικές παραμορφώσεις που ανέπτυξε το στοιχείο ήταν πολύ μεγάλες σε σχέση με την παραμόρφωση διαρροής. Ο μηχανισμός αστοχίας προκλήθηκε από μεγάλες παραμορφώσεις στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης.

- ❖ Μεικτή αστοχία ($0.85 < \frac{M_{eq}^*}{M_{threshold}} < 1.15 \rightarrow K = 11.56$)

Μορφή αστοχίας που περιλαμβάνει όλα όσα αναφέρθηκαν στους δύο προηγούμενους τύπους, με κυριότερο στοιχείο την κατάρρευση λόγω ρηγμάτωσης της συγκόλλησης.

6.3.4 Υπολογισμός συσσωρευμένης βλάβης

Μετά την εύρεση των επιτρεπόμενων κύκλων N_{total} μπορεί να προβλεφθεί ενδεχόμενη αστοχία, με βάση το δείκτη συσσωρευμένης βλάβης I_d (Damage Index), εφόσον υπάρξει υπέρβαση της παρακάτω ανίσωσης:

$$I_d = \frac{\sum n_i}{N_{total}} \leq 1 \quad (6.9)$$

7. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια εύρεσης του εύρους και του αριθμού των κύκλων σε μία χρονοϊστορία απόκρισης, με στόχο την επιρροή του στην εκτίμηση της αντοχής σε κόπωση χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία καμπυλών ολιγοκυκλικής κόπωσης.

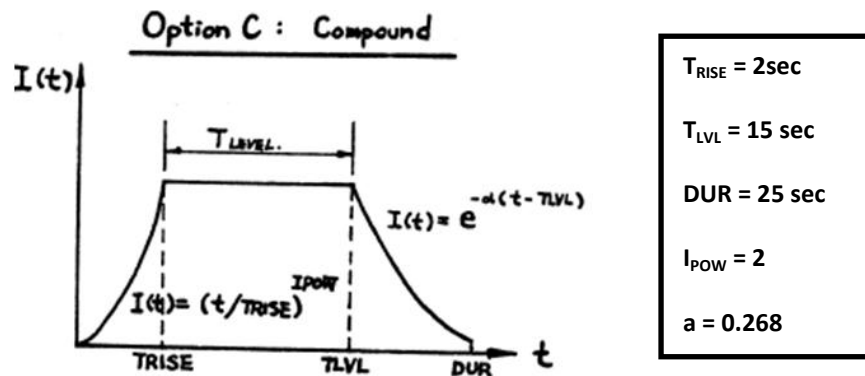
7.1 Δημιουργία τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων συγκεκριμένης διάρκειας ισχυρής σεισμικής δόνησης

Αρχικά δημιουργήθηκαν σαράντα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα με βάση του ελαστικό φάσμα του EC8 ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω και αλλάζοντας κάθε φορά στο αρχείο Data την ακέραια παράμετρο Fix (Σχήμα 7.1). Η παράμετρος αυτή αλλάζει ουσιαστικά τη γωνία φάσης και οδηγεί στην παραγωγή σαράντα χρονοϊστοριών με την ίδια γενική εικόνα αλλά με διαφορετικές λεπτομέρειες.

Η περίπτωση που μελετήθηκε αφορά την ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας III, όπου η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση είναι 0.36 g και για τύπο εδάφους A. Επίσης εξετάστηκαν σεισμικές δονήσεις μεγέθους $M = 5.5 - 6.5$ και επομένως οι αναλύσεις βασίστηκαν στο σεισμό προσομοίωσης C (Σχήμα 4.3). Από μία διαδικασία πιθανολογικής εκτίμησης σεισμικής επικινδυνότητας, η οποία περιγράφηκε σε προηγούμενες ενότητες, θεωρείται ότι προέκυψε η διάρκεια της ισχυρής σεισμικής δόνησης ίση με 15 sec, ενώ παρατηρήθηκε ότι ο χρόνος που η συνάρτηση διατηρείται σταθερή και καθορίζεται από την παράμετρο T_{LEVEL} σχεδόν ταυτίζεται με τη διάρκεια της ισχυρής δόνησης. Έτσι τέθηκε $T_{LEVEL} = 15$ sec και αντίστοιχα η συνολική διάρκεια του σεισμού ίση με 25 sec για να υπάρχει συμφωνία με το σεισμό προσομοίωσης που επιλέχθηκε. Η συνάρτηση χρόνου που χρησιμοποιήθηκε και τα χαρακτηριστικά της φαίνονται στο Σχήμα 7.2.

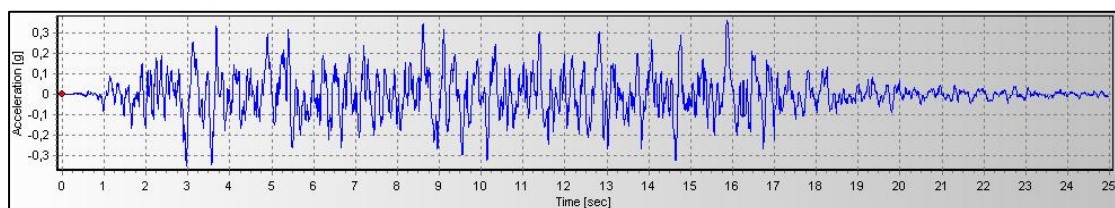
| ΑΡΧΕΙΟ DATA | | |
|--|----------------|---|
| Δεν χρειάζεται αλλαγή στις δύο πρώτες γραμμές. | | |
| 3 ^η | I5, 6F10.4, I5 | ICASE, TRISE, TLVL, DUR, A0, ALFA0, BETA0, IPOW |
| 4 ^η | 3F10.4, 5I5 | DELT, AGMX, FIX , INDAMP, NCYCLE, NPA, NKK, NRES |
| 5 ^η | 8F10.0 | DAMPING |
| 6 ^η | 2F10.4 | T, SV |
| ΑΡΧΕΙΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ACCRES | | |

Σχήμα 7.1 Μορφή αρχείου δεδομένων για την κατασκευή των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων



Σχήμα 7.2 Τιμές παραμέτρων εισόδου για την παραγωγή τεχνητών επιταχυνσιογραφήματων στο SIMQKE

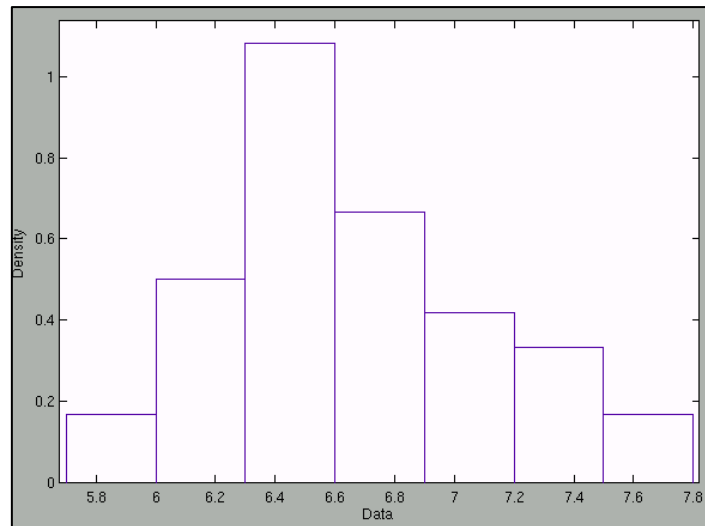
Παράδειγμα ενός ενδεικτικού τεχνητού επιταχυνσιογραφήματος, το οποίο προέκυψε βάσει των παραπάνω δεδομένων, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 7.3 Παράδειγμα προκύπτοντος τεχνητού επιταχυνσιογραφήματος

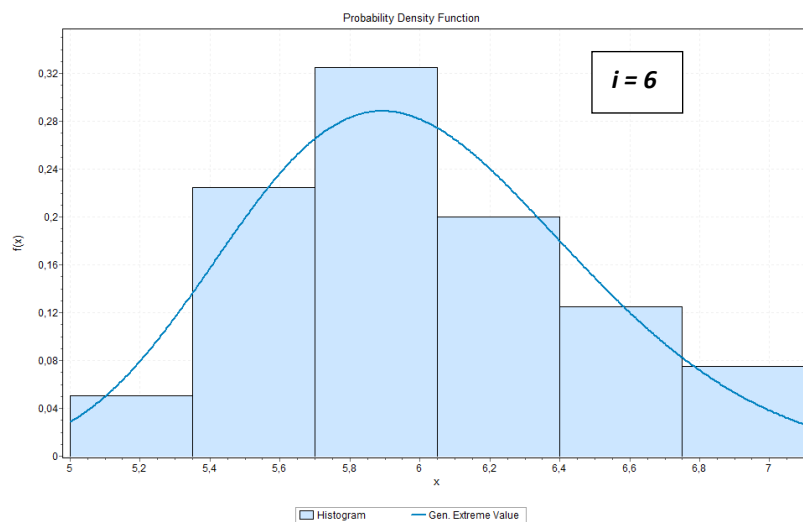
7.2 Εύρεση πλήθους κύκλων συγκεκριμένου πλάτους σε κάθε χρονοϊστορία απόκρισης μετακινήσεων

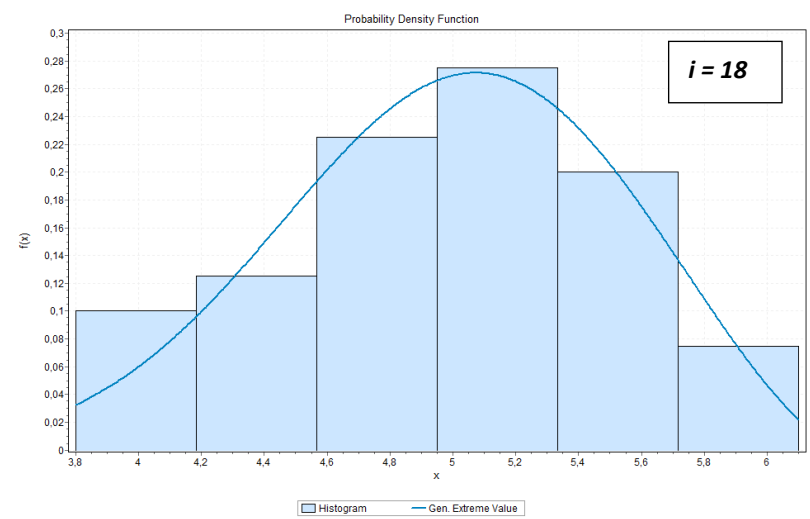
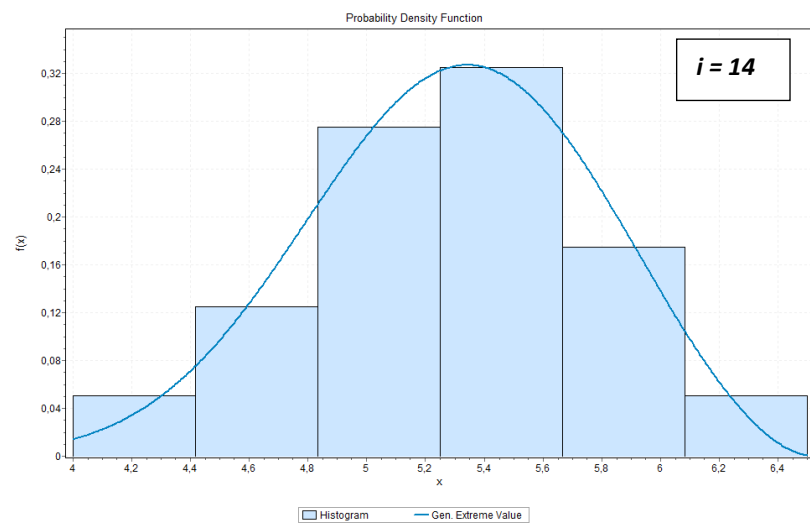
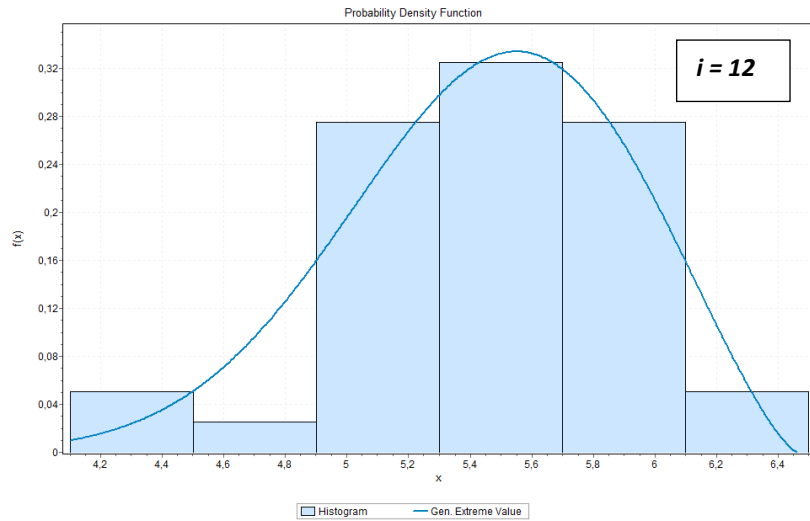
Από τα επιταχυνσιογραφήματα που προέκυψαν και μετά τη βελτιστοποίησή τους στο πρόγραμμα SEISMOMATCH, χρησιμοποιήθηκαν οι χρονοϊστορίες απόκρισης μετακινήσεων για ένα μονοβάθμιο ταλαντωτής ιδιοπεριόδου $T = 0.5\text{ sec}$ και για συντελεστή απόσβεσης $\zeta = 2\%$, εφόσον πρόκειται για μεταλλική συγκολλητή κατασκευή. Στη συνέχεια ακολουθήθηκε η διαδικασία Rainflow για την εύρεση του πλάτους και του συνολικού αριθμού των κύκλων κάθε χρονοϊστορίας απόκρισης. Ανάλογα με το πλάτος τους, ταξινομήθηκαν οι κύκλοι κάθε περίπτωσης (περίπου εκατό) σε φθίνουσα σειρά και ελήφθησαν συνολικά από όλες τις περιπτώσεις οι κύκλοι μέγιστου πλάτους. Έτσι σχεδιάστηκε το παρακάτω ιστόγραμμα για τους κύκλους πρώτης τάξης Σχήμα 7.4.

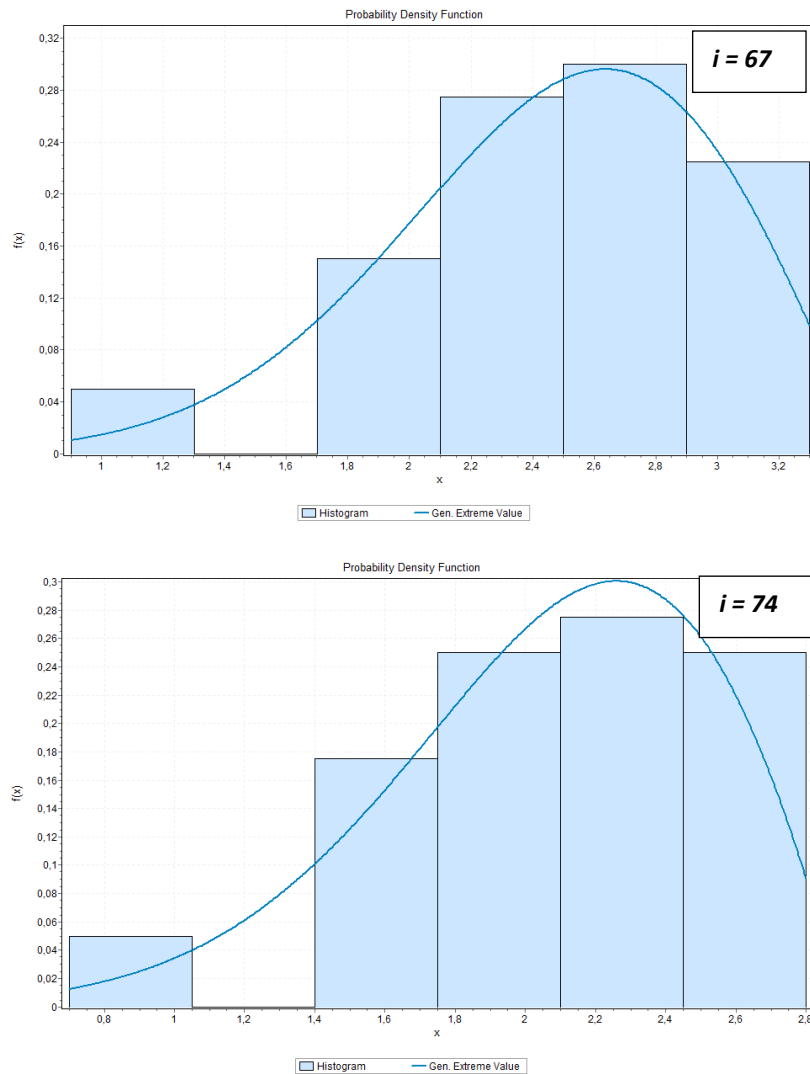


Σχήμα 7.4 Ιστογράμμα κύκλων μέγιστου πλάτους

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε διαδοχικά και για τους κύκλους μικρότερους πλάτους μέχρι σχεδόν μηδενικού πλάτους κύκλους. Παρατηρήθηκε ότι τα δεδομένα σχεδόν κάθε τάξης κύκλου ακολουθούν προσεγγιστικά την γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών (generalized extreme value distribution). Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται επιλεγμένα ιστογράμματα και αντίστοιχες κατανομές για διάφορες τάξεις κύκλων i (amplitude order statistics) (Σχήμα 7.5).







Σχήμα 7.5 Επιλεγμένα ιστογράμματα κύκλων μέγιστου πλάτους – γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών

Η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας για τη γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών με παραμέτρους θέσης μ , κλίμακας σ και σχήματος $k \neq 0$ είναι:

$$y = f(x|k, \mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \exp\left(-\left(1 + k \frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{\frac{1}{k}}\right) \left(1 + k \frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{-1-\frac{1}{k}} \quad (7.1)$$

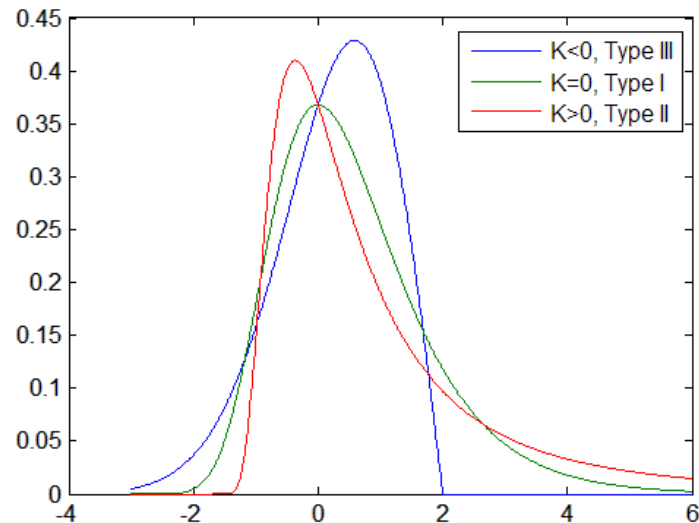
$$\text{για } 1 + k \frac{(x-\mu)}{\sigma} > 0$$

Διακρίνονται τρεις περιπτώσεις (Σχήμα 7.6):

- $k = 0$ αντιστοιχεί στον Τύπο I, όπου τα άκρα της κατανομής μειώνονται εκθετικά όπως στην κανονική κατανομή:

$$y = f(x|0, \mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right) - \frac{(x-\mu)}{\sigma}\right) \quad (7.2)$$

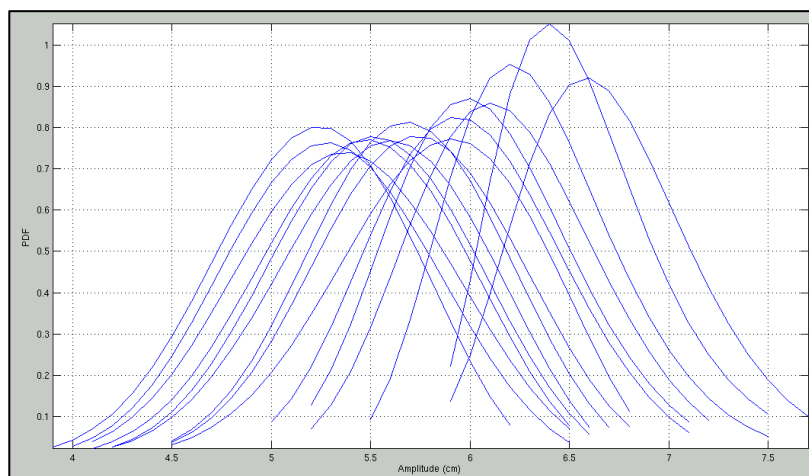
- $k > 0$ αντιστοιχεί στο Τύπο II, όπου τα άκρα της κατανομής μειώνονται όπως στην κατανομή Student
- $k < 0$ αντιστοιχεί στον Τύπο III, όπου τα άκρα της κατανομής είναι πεπερασμένα όπως στην κατανομή βήτα



Σχήμα 7.6 Διαφορετικές περιπτώσεις μορφής γενικευμένης κατανομής ακραίων τιμών

Διαπιστώνεται ότι η κατανομή συνδυάζει τρεις απλούστερες κατανομές σε μία σχέση, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα ενός συνεχούς εύρους πιθανών σχημάτων. Χρησιμοποιείται συχνά σε περιπτώσεις κατανομών των μεγίστων ή των ελάχιστων τιμών από ένα δείγμα τιμών.

Στο Σχήμα 7.7 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι κατανομές για τις δεκαπέντε πρώτες τάξεις κύκλων.



Σχήμα 7.7 Κατανομή των δεκαπέντε πρώτων κύκλων μεγαλύτερου πλάτους

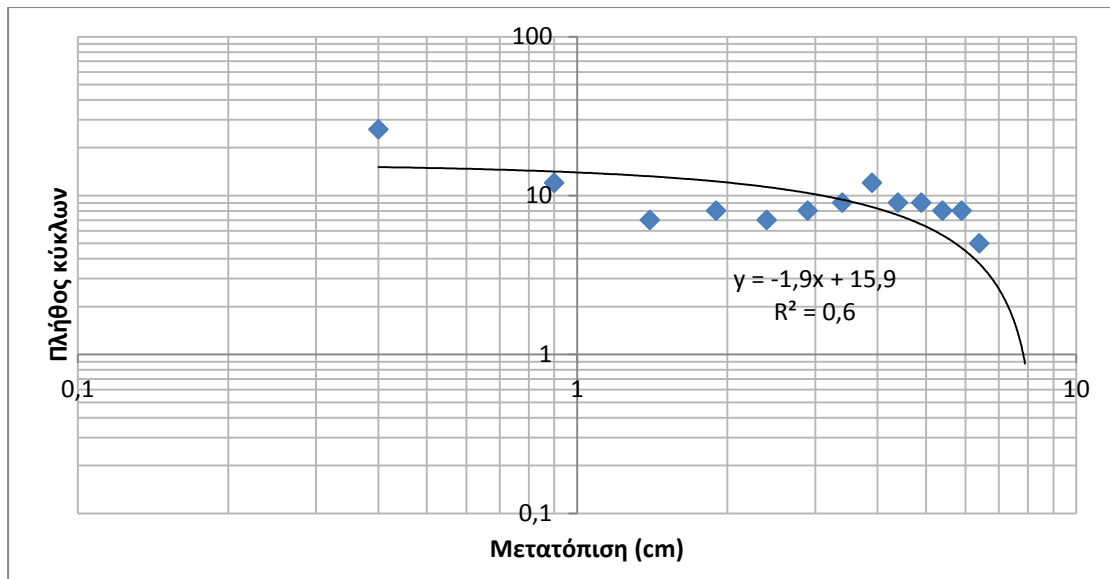
7.3 Καθορισμός επικρατέστερου σεναρίου πλήθους και πλάτους κύκλων μετατόπισης

Από τις κατανομές που προέκυψαν δημιουργήθηκαν κλάσεις ανά 0.4 cm και απαλείφοντας τις τιμές που έχουν κάτω από 10% πιθανότητα να εμφανιστούν προέκυψε ο αριθμός εμφάνισης μισών κύκλων συγκεκριμένου πλάτους μετατόπισης (Πίνακας 7.1) σε κάθε κλάση και το διάγραμμα αριθμού κύκλων – πλάτους κύκλων μετατόπισης (Σχήμα 7.7).

Πίνακας 7.1 Πλήθος μισών κύκλων συγκεκριμένου πλάτους ανά κλάση

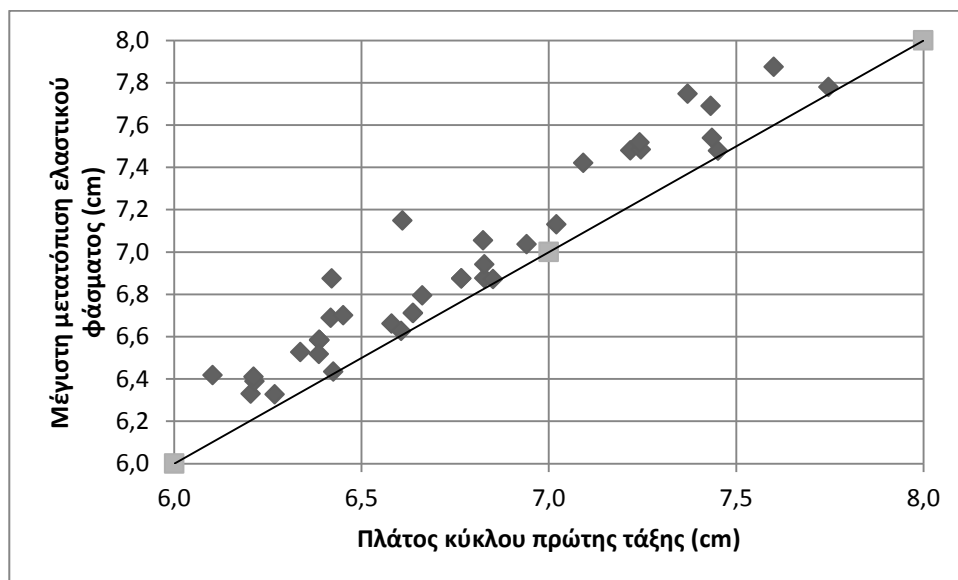
| Μετατόπιση (cm) | Μέσο κλάσης (cm) | Αριθμός μισών κύκλων |
|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 6.6 | 6.4 | 5 |
| 6.5 | | |
| 6.4 | | |
| 6.3 | | |
| 6.2 | | |
| 6.1 | 5.9 | 8 |
| 6.0 | | |
| 5.9 | | |
| 5.8 | | |
| 5.7 | | |
| 5.6 | 5.4 | 8 |
| 5.5 | | |
| 5.4 | | |
| 5.3 | | |
| 5.2 | | |
| 5.1 | 4.9 | 9 |
| 5.0 | | |
| 4.9 | | |
| 4.8 | | |
| 4.7 | | |
| 4.6 | 4.4 | 9 |
| 4.5 | | |
| 4.4 | | |
| 4.3 | | |
| 4.2 | | |
| 4.1 | 3.9 | 12 |
| 4.0 | | |
| 3.9 | | |
| 3.8 | | |
| 3.7 | | |
| 3.6 | 3.4 | 9 |
| 3.5 | | |
| 3.4 | | |

| | | |
|------------|-----|----|
| 3.3 | | |
| 3.2 | | |
| 3.1 | | |
| 3.0 | | |
| 2.9 | 2.9 | 8 |
| 2.8 | | |
| 2.7 | | |
| 2.6 | | |
| 2.5 | | |
| 2.4 | 2.4 | 7 |
| 2.3 | | |
| 2.2 | | |
| 2.1 | | |
| 2.0 | | |
| 1.9 | 1.9 | 8 |
| 1.8 | | |
| 1.7 | | |
| 1.6 | | |
| 1.5 | | |
| 1.4 | 1.4 | 7 |
| 1.3 | | |
| 1.2 | | |
| 1.1 | | |
| 1.0 | | |
| 0.9 | 0.9 | 12 |
| 0.8 | | |
| 0.7 | | |
| 0.6 | | |
| 0.5 | | |
| 0.4 | 0.4 | 26 |
| 0.3 | | |
| 0.2 | | |



Σχήμα 7.8 Αριθμός μισών κύκλων συναρτήσει του πλάτους τους

Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι η μέγιστη τιμή του ελαστικού φάσματος μετακινήσεων για την ιδιοπερίοδο του μονοβάθμιου ταλαντωτή που μελετήθηκε ($T = 0.5$ sec) διαφέρει ελάχιστα από το πλάτος του κύκλου πρώτης τάξης με τη μέση απόκλιση να μην ξεπερνάει τα 1.7 mm. (Σχήμα 7.9)



Σχήμα 7.9 Συσχέτιση μέγιστης μετατόπισης ελαστικού φάσματος – πλάτους κύκλου πρώτης τάξης

Συμπεραίνεται λοιπόν, από τη μέγιστη τιμή του ελαστικού φάσματος μετατοπίσεων είναι δυνατή η εκτίμηση του πλάτους και του αριθμού των κύκλων φόρτισης ακολουθώντας τη

μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να προσδιορισθεί και η απαιτούμενη αντοχή σε κόπωση κατά το σχεδιασμό μιας κατασκευής.

7.4 Σύγκριση του προτεινόμενου σεναρίου με τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα

Για τη σύγκριση του προτεινόμενου σεναρίου με τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα που δημιουργήθηκαν χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία καμπυλών ολιγοκυκλικής κόπωσης, η οποία περιγράφηκε παραπάνω. Θεωρήθηκε μονοβάθμιο μεταλλικός ταλαντωτής με τάση διαρροής $f_y = 235 \text{ MPa}$ (S235) επαυξημένη κατά 20% (για λόγους που περιγράφηκαν παραπάνω) και μετακίνησης διαρροής $v_y = 0.8 \text{ cm}$. Η μετακίνηση διαρροής ορίστηκε έτσι ώστε με τις προτεινόμενες τιμές να προκύπτει οριακά αστοχία, δηλαδή $I_d \approx 1$. Έτσι ελέγχεται αν για αυτή την οριακή κατάσταση προκύπτει κατάρρευση σε κάποια περίπτωση, δηλαδή υπέρβαση του δείκτη συσσωρευμένης βλάβης I_d .

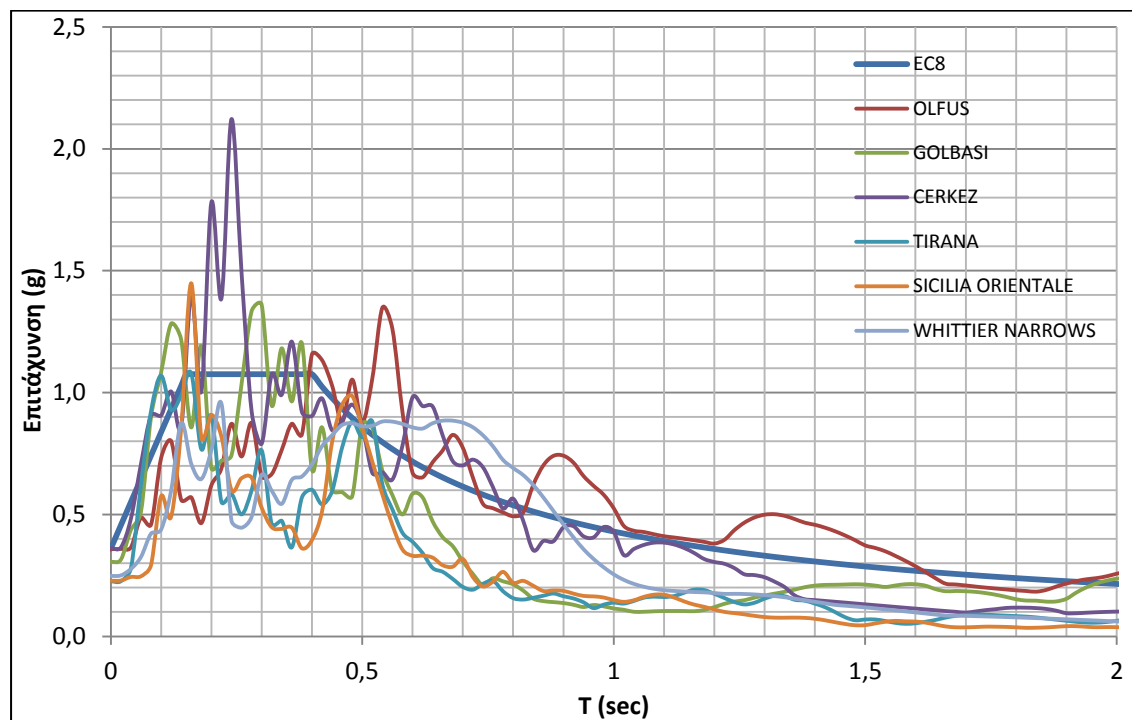
Το εύρος τάσης S^* μπορεί να υπολογισθεί με βάση τη Σχέση 6.4 για κάθε εύρος μετατόπισης, καθένα από τα οποία έχει προκύψει από μία διαδικασία Rainflow σε κάθε χρονοϊστορία απόκρισης μετακινήσεων. Για τους συντελεστές m και K υιοθετήθηκε $m = 3$ και $K = 11.56$ (μεικτή αστοχία με κυριότερο στοιχείο την κατάρρευση λόγω ρηγμάτων της συγκόλλησης) και αφού εφαρμόστηκαν οι Σχέσεις 6.6 – 6.9, ελέγχθηκε κατά πόσο ο αριθμός και των πλάτος των κύκλων που εκτιμήθηκε πιθανολογικά, ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Σε κάθε περίπτωση υπολογίστηκε το πλήθος των επιτρεπόμενων κύκλων N_{total} και ο δείκτης συσσωρευμένης βλάβης I_d και συγκρίθηκε με την αντίστοιχη τιμή του προτεινόμενου σεναρίου. Στον Πίνακα 7.2 δίνονται συγκεντρωτικά ο αριθμός των κύκλων που προέκυψε σε κάθε κλάση μετατόπισης, το άθροισμα όλων των παρατηρηθέντων ευρών (sum), το πλήθος των επιτρεπόμενων κύκλων N_{total} και ο δείκτης συσσωρευμένης βλάβης I_d . Με κόκκινο χρώμα έχουν τονιστεί οι περιπτώσεις όπου τα αποτελέσματα ήταν δυσμενέστερα σε σχέση με το προτεινόμενο σενάριο. Παρατηρείται ότι οι όποιες υπερβάσεις είναι σχετικά μικρές και αφορούν μόνο τέσσερις από τις σαράντα συνολικά περιπτώσεις, γεγονός που θεωρείται ικανοποιητικό.

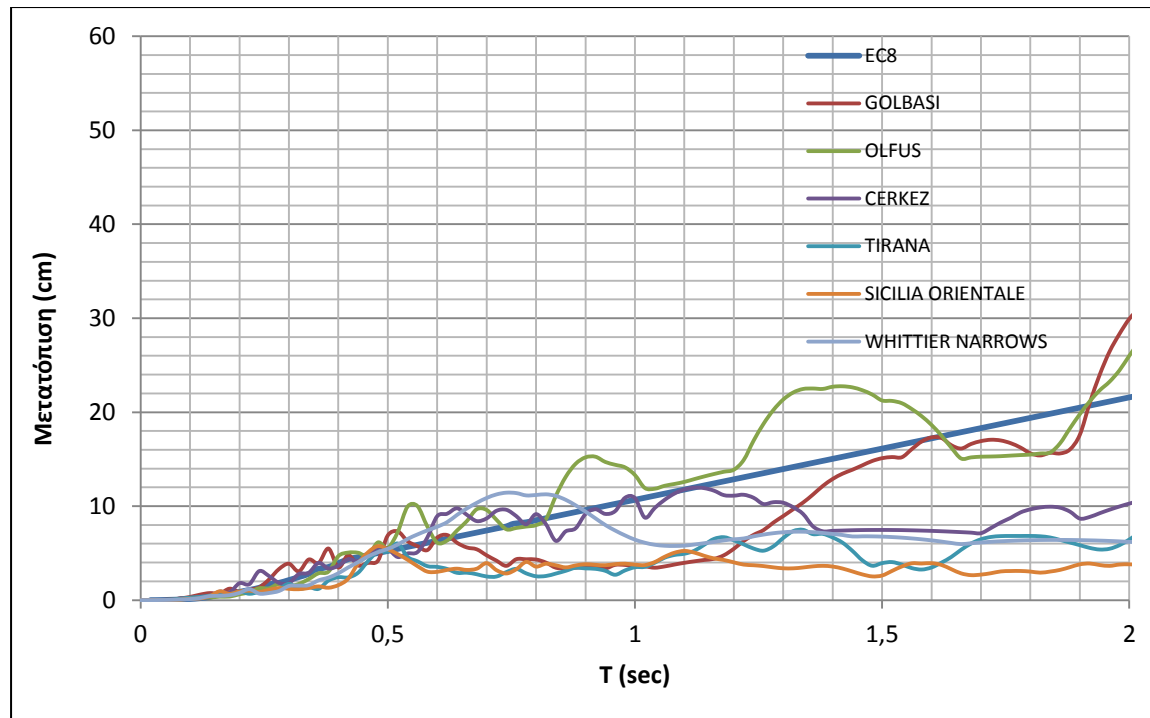
7.5 Σύγκριση του προτεινόμενου σεναρίου με πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις

7.5.1 Περιγραφή και χαρακτηριστικά σεισμικών δονήσεων

Επιλέχθηκαν καταγραφές σεισμικών δονήσεων μεγέθους $M = 5.5 - 6.5$ σε βραχώδες έδαφος και χρησιμοποιήθηκε ο κατάλληλος επαυξητικός συντελεστής ώστε για την ζητούμενη ιδιοπερίοδο $T = 0.5$ sec τα φάσματα απόκριση των πραγματικών σεισμικών δονήσεων να δίνουν ίδια τιμή με το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων και μετακινήσεων αντίστοιχα του EC8 (φάσμα αναφοράς) και επομένως τα αποτελέσματα να είναι όσο το δυνατόν συγκρίσιμα (Σχήματα 7.10 και 7.11).



Σχήμα 7.10 Κλιμάκωση (scaling) πραγματικών σεισμικών διεγέρσεων σύμφωνα με το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων του EC8

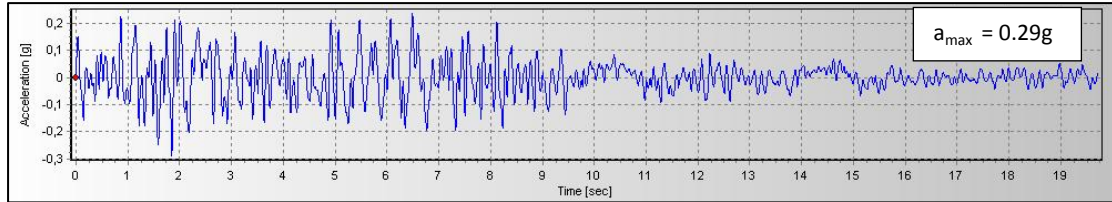


Σχήμα 7.11 Κλιμάκωση (scaling) πραγματικών σεισμικών διεγέρσεων σύμφωνα με το ελαστικό φάσμα μετακινήσεων του EC8

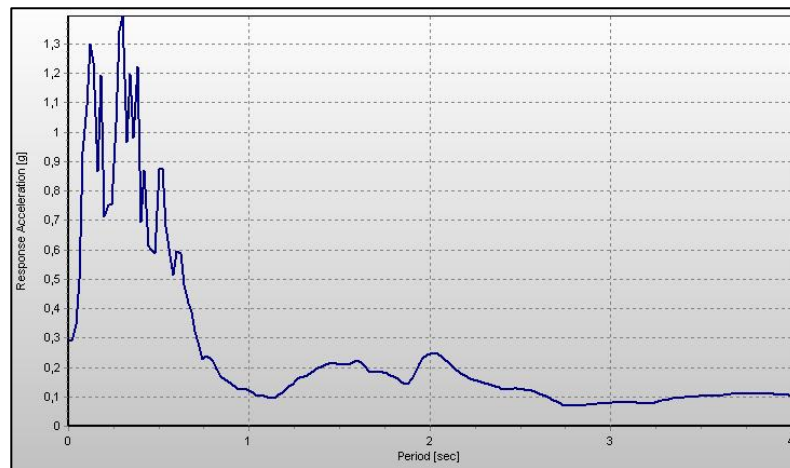
Για κάθε σεισμική δόνηση παρουσιάζονται πέρα από το επιταχυνσιογράφημά της, το ελαστικό φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων και μετακινήσεων αλλά και η απόκριση μετακινήσεων μέχρι σχεδόν μηδενισμού τους για ένα μονοβάθμιο ταλαντωτή ιδιοπεριόδου $T = 0.5 \text{ sec}$, όπως προέκυψαν μέσα από το πρόγραμμα SEISMOSIGNAL.

❖ **Σεισμική δόνηση Golbasi (1986), Τουρκία**

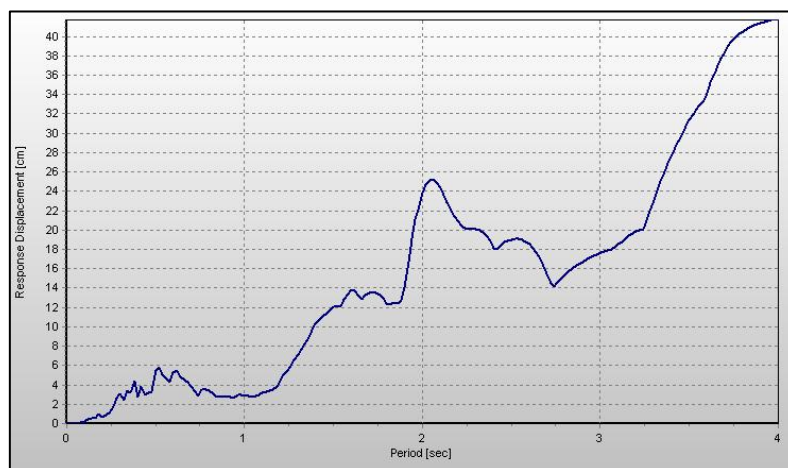
Πρόκειται για μία σεισμική δόνηση μεγέθους M 5.8, συνολικής διάρκειας περίπου $D_{total} = 20$ sec και διάρκειας ισχυρής δόνησης $D_{5-95} = 12$ sec.



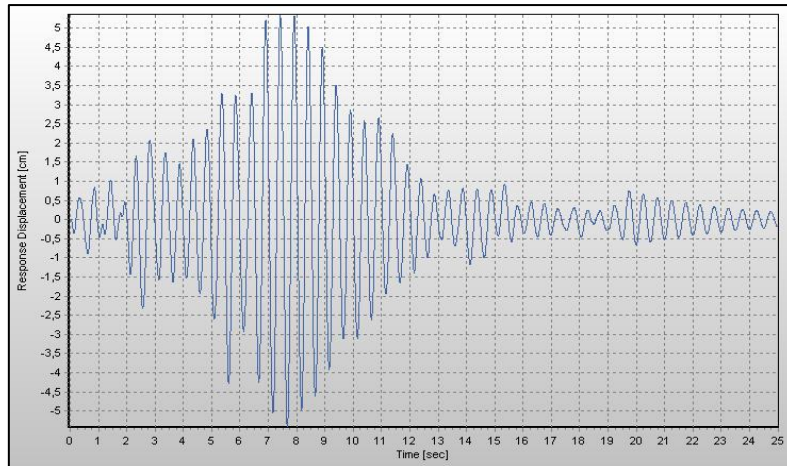
Σχήμα 7.12 Επιταχυνσιογράφημα Golbasi



Σχήμα 7.13 Ελαστικό φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων Golbasi



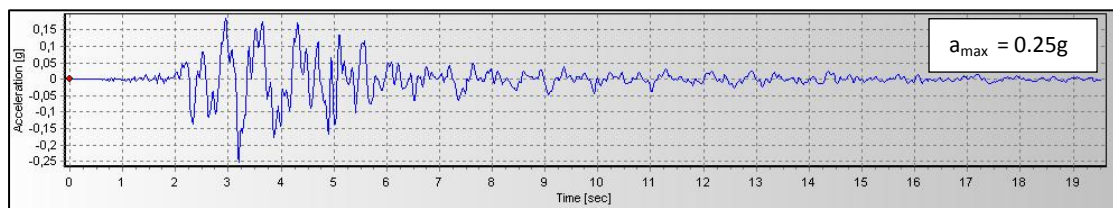
Σχήμα 7.14 Ελαστικό φάσμα απόκρισης μετακινήσεων Golbasi



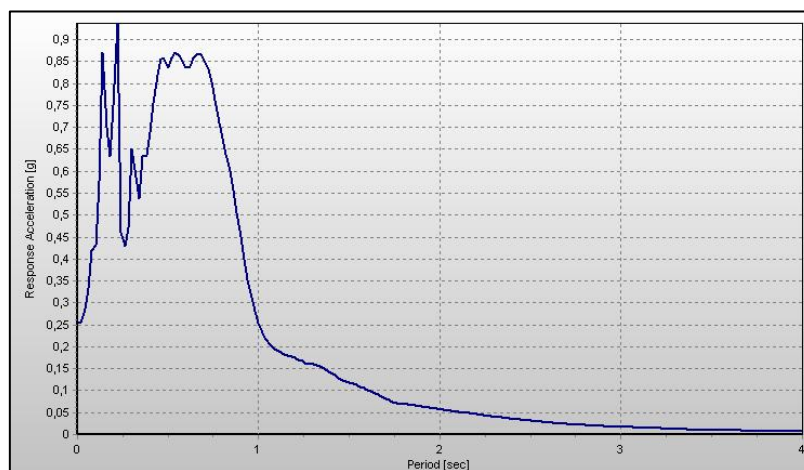
Σχήμα 7.15 Απόκριση μετακινήσεων Golbasi για $T = 0.5 \text{ sec}$

❖ **Σεισμική δόνηση Whittier Narrows (1987), Καλιφόρνια**

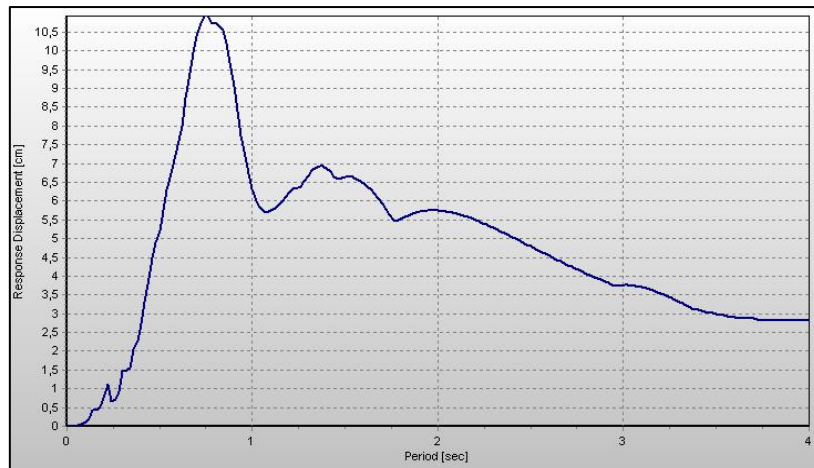
Πρόκειται για μία σεισμική δόνηση μεγέθους $M = 6.0$, συνολικής διάρκειας περίπου $D_{\text{total}} = 20 \text{ sec}$ και διάρκειας ισχυρής δόνησης $D_{5-95} = 5 \text{ sec}$.



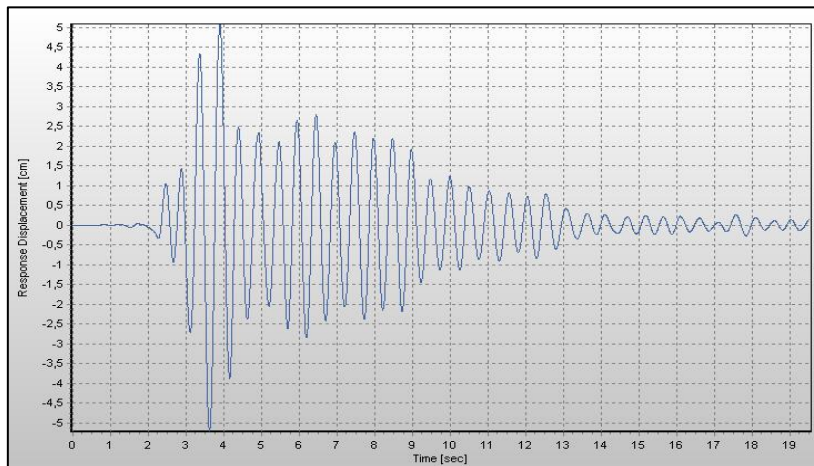
Σχήμα 7.16 Επιταχυνσιογράφημα Whittier Narrows



Σχήμα 7.17 Ελαστικό φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων Whittier Narrows



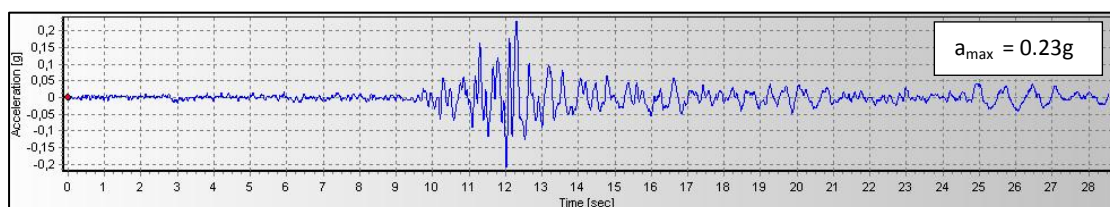
Σχήμα 7.18 Ελαστικό φάσμα απόκρισης μετατοπίσεων Whittier Narrows



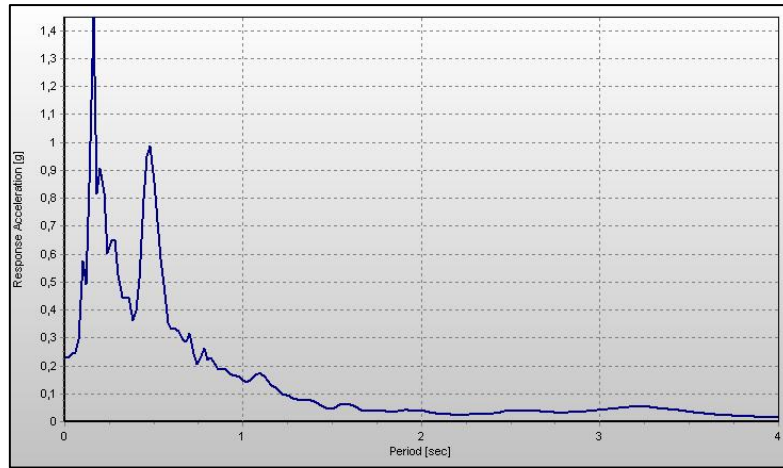
Σχήμα 7.19 Απόκριση μετακινήσεων Whittier Narrows για $T = 0.5$ sec

❖ **Σεισμική δόνηση Sicilia Orientale (1990), Ιταλία**

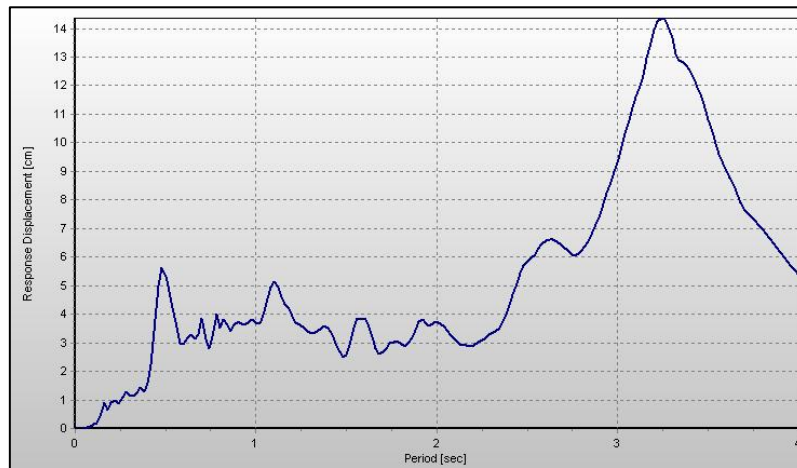
Πρόκειται για μία σεισμική δόνηση μεγέθους $M = 5.6$, συνολικής διάρκειας περίπου $D_{total} = 29$ sec και διάρκειας ισχυρής δόνησης $D_{5-95} = 14$ sec.



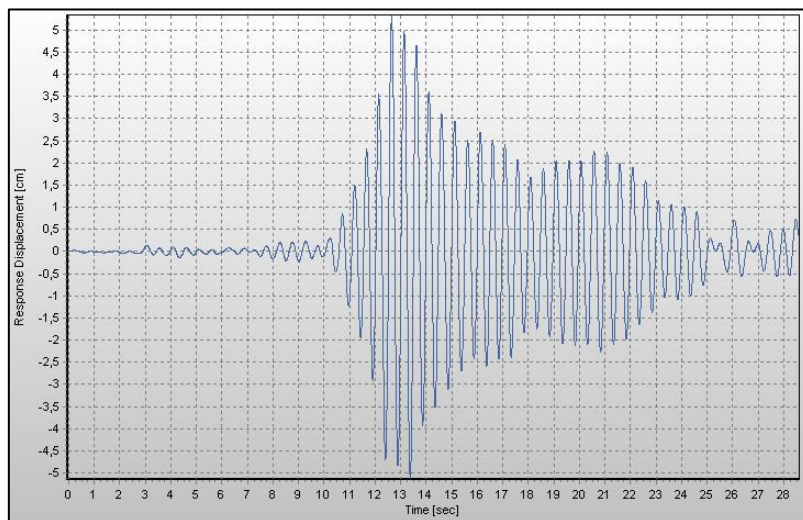
Σχήμα 7.20 Επιταχυνσιογράφημα Sicilia Orientale



Σχήμα 7.21 Ελαστικό φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων Sicilia Orientale



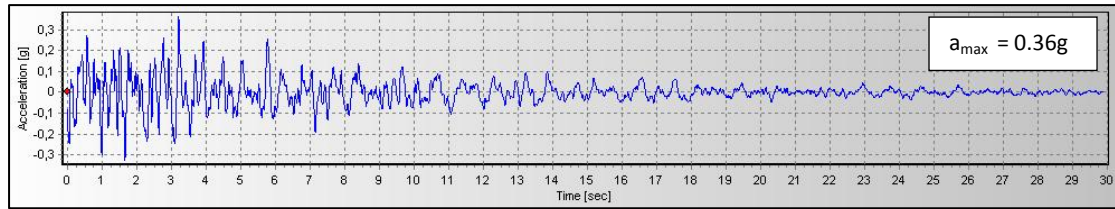
Σχήμα 7.22 Ελαστικό φάσμα απόκρισης μετακινήσεων Sicilia Orientale



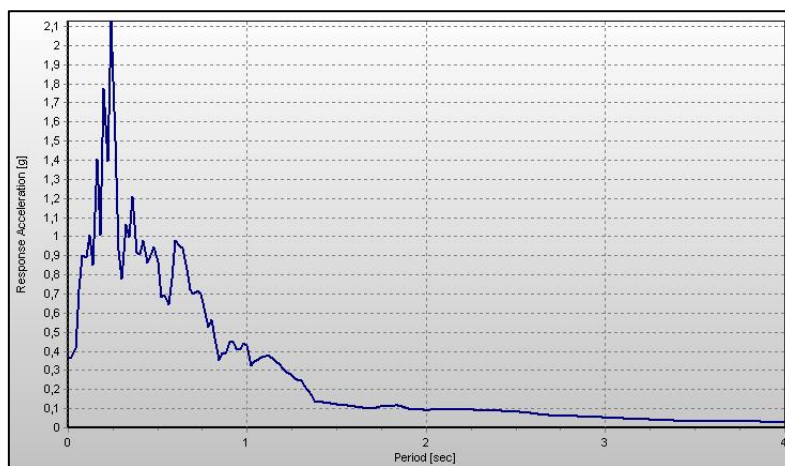
Σχήμα 7.23 Απόκριση μετακινήσεων Sicilia Orientale για $T = 0.5$ sec

❖ **Σεισμική δόνηση Cerkez (1996), Τουρκία**

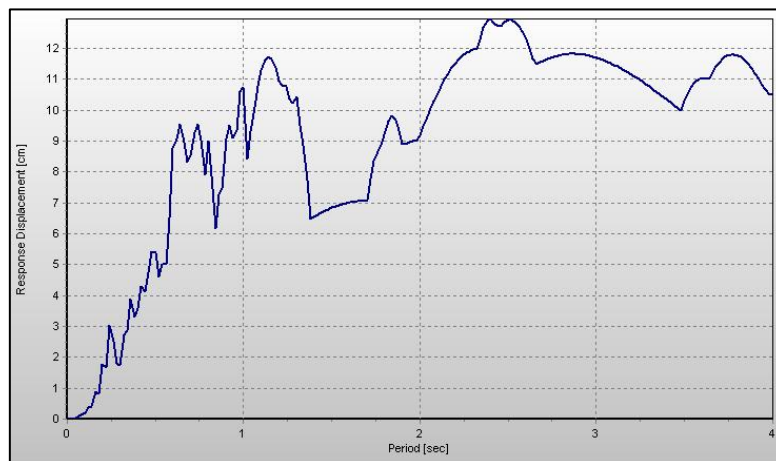
Πρόκειται για μία σεισμική δόνηση μεγέθους $M = 5.7$, συνολικής διάρκειας περίπου $D_{total} = 30$ sec και διάρκειας ισχυρής δόνησης $D_{5-95} = 14$ sec.



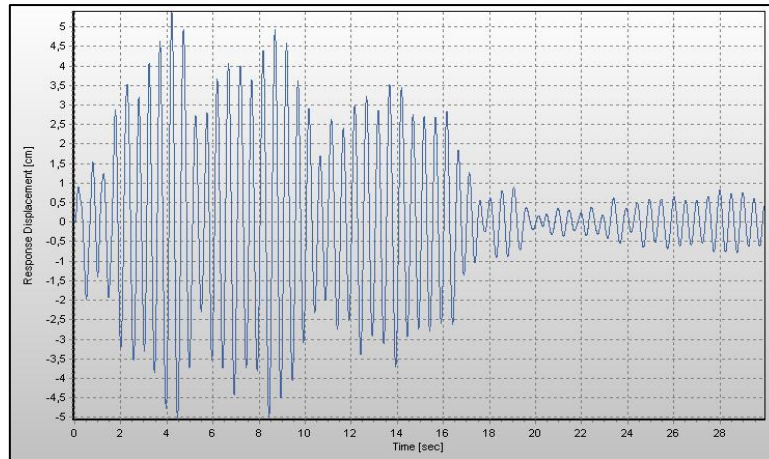
Σχήμα 7.24 Επιταχυνσιογράφημα Cerkez



Σχήμα 7.25 Ελαστικό φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων Cerkez



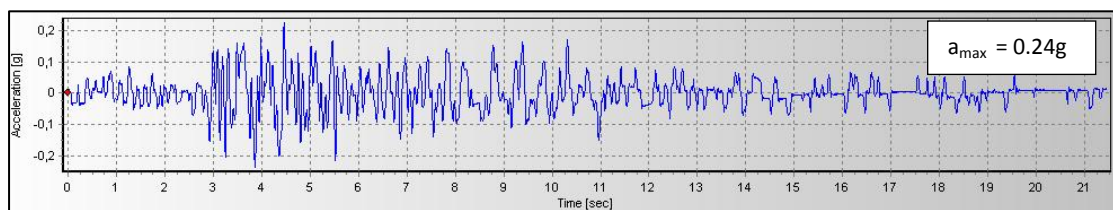
Σχήμα 7.26 Ελαστικό φάσμα απόκρισης μετακινήσεων Cerkez



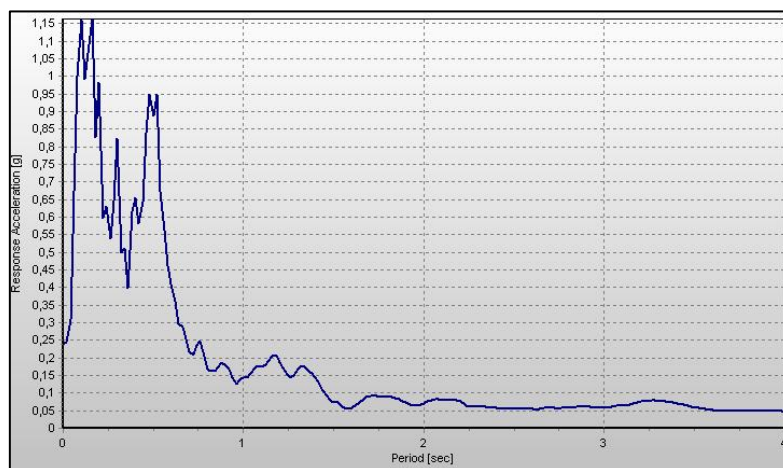
Σχήμα 7.27 Απόκριση μετακινήσεων Cerkez για $T = 0.5$ sec

❖ **Σεισμική δόνηση Tirana (1998), Αλβανία**

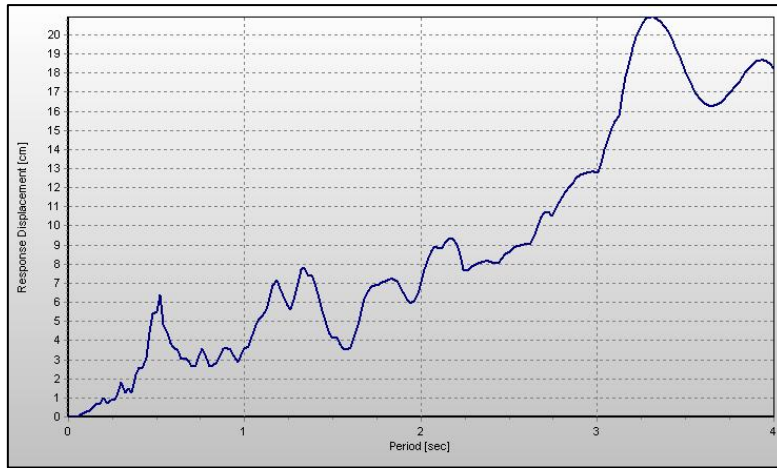
Πρόκειται για μία σεισμική δόνηση μεγέθους $M = 5.8$, συνολικής διάρκειας περίπου $D_{total} = 21$ sec και διάρκειας ισχυρής δόνησης $D_{5-95} = 12$ sec.



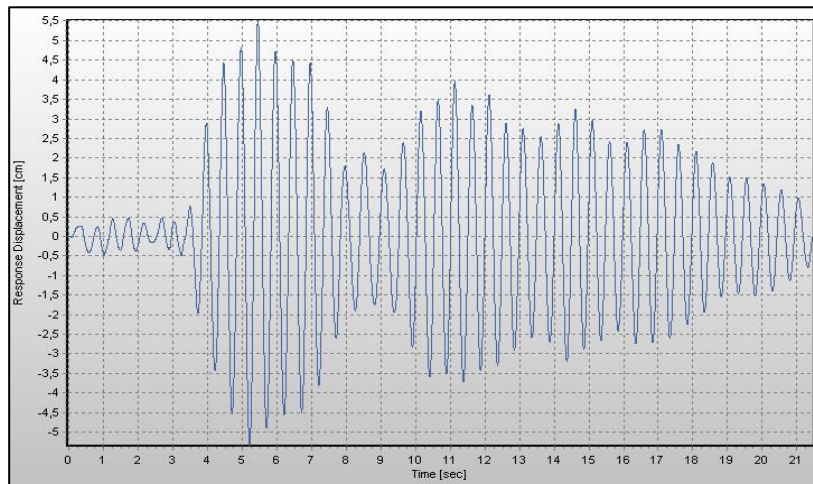
Σχήμα 7.28 Επιταχυνσιογράφημα Tirana



Σχήμα 7.29 Ελαστικό φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων Tirana



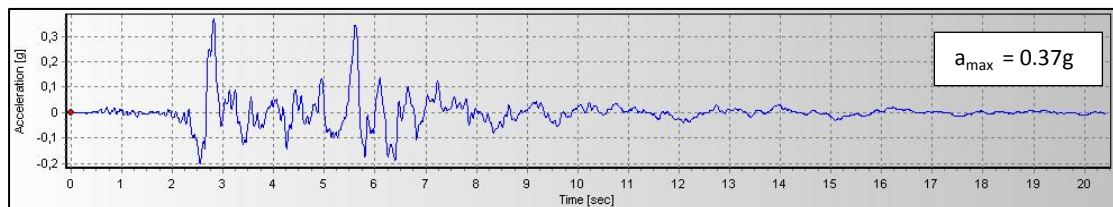
Σχήμα 7.30 Ελαστικό φάσμα απόκρισης μετακινήσεων Tirana



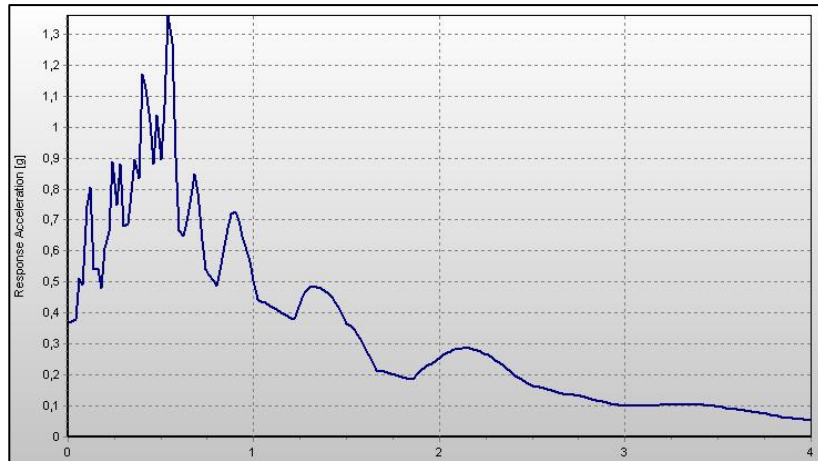
Σχήμα 7.31 Απόκριση μετακινήσεων Tirana για $T = 0.5 \text{ sec}$

❖ Σεισμική δόνηση Olfus (2008), Ισλανδία

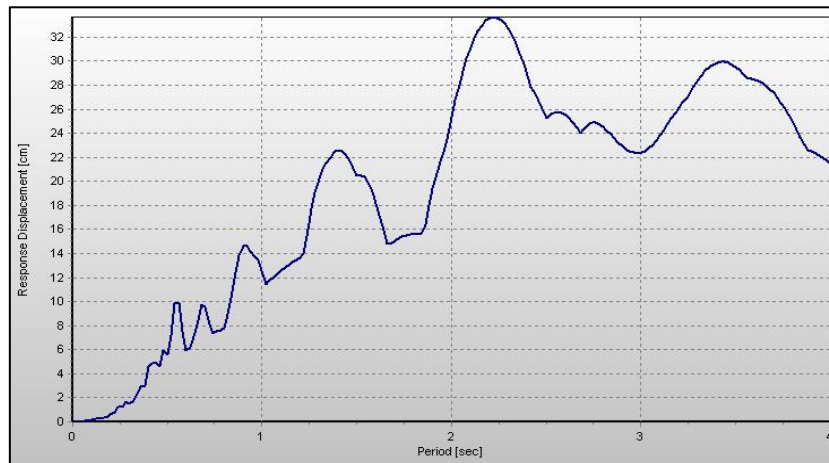
Πρόκειται για μία σεισμική δόνηση μεγέθους $M = 6.3$, συνολικής διάρκειας περίπου $D_{total} = 20 \text{ sec}$ και διάρκειας ισχυρής δόνησης $D_{5.95} = 6 \text{ sec}$.



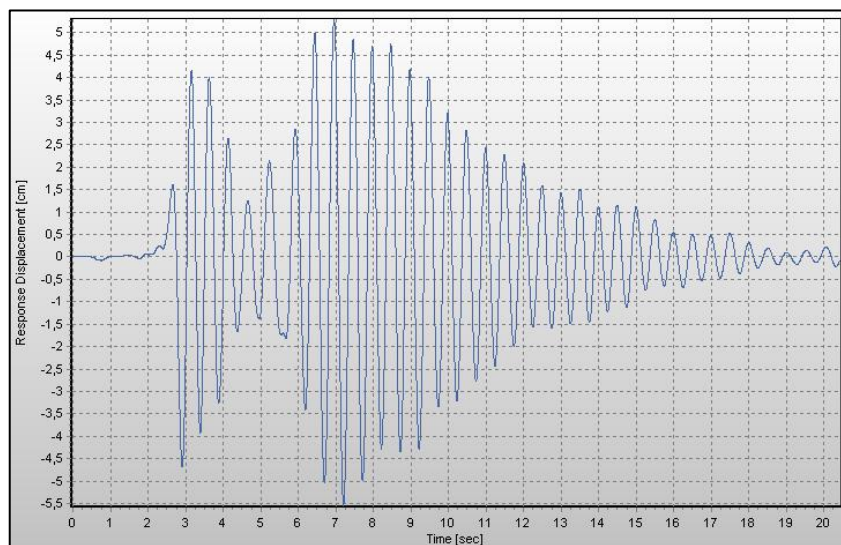
Σχήμα 7.32 Επιταχυνσιογράφημα Olfus



Σχήμα 7.33 Ελαστικό φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων Olfus



Σχήμα 7.34 Ελαστικό φάσμα απόκρισης μετακινήσεων Olfus



Σχήμα 7.35 Απόκριση μετακινήσεων Olfus για $T = 0.5 \text{ sec}$

7.5.2 Εφαρμογή μεθοδολογίας ολιγοκυκλικής κόπωσης

Εφαρμόστηκε και πάλι η μεθοδολογία χρήσης καμπυλών ολιγοκυκλικής κόπωσης έτσι ώστε να εκτιμηθεί ο δείκτης συσσωρευμένης βλάβης I_d σε κάθε περίπτωση και να συγκριθεί με τον αντίστοιχο σύμφωνα με το προτεινόμενο σενάριο. Στον Πίνακα 7.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα στοιχεία των παραπάνω σεισμικών δονήσεων καθώς και ο συνολικός αριθμός επιτρεπόμενων κύκλων N_{total} και ο δείκτης συσσωρευμένης βλάβης I_d . Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις των πραγματικών σεισμικών διεγέρσεων ο δείκτης συσσωρευμένης βλάβης I_d προέκυψε μικρότερος από τον προτεινόμενο, γεγονός που επιβεβαιώνει τη δυνατότητα εφαρμογής την προτεινόμενης μεθοδολογίας, στα πλαίσια τουλάχιστον των ελαστικών αναλύσεων.

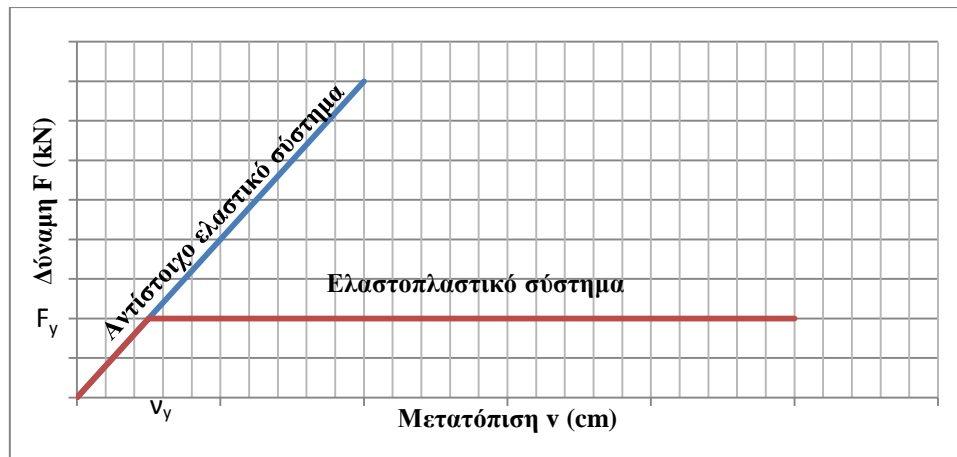
Πίνακας 7.3 Επιτρεπόμενοι κύκλοι N_{total} και δείκτης συσσωρευμένης βλάβης I_d πραγματικών σεισμικών δονήσεων

| Σεισμική Δόνηση | M | R (km) | PGA (g) | D_{5-95} | D_{total} | sum | N_{total} | I_d |
|---------------------------------|---------|--------|---------|------------|-------------|-----|-------------|-------|
| Golbasi (1986) | 5.8 | 34 | 0.29 | 12 | 20 | 121 | 245 | 0.5 |
| Whittier Narrows (1987) | 6.0 | 9 | 0.25 | 5 | 20 | 108 | 578 | 0.2 |
| Sicilia Orientale (1990) | 5.6 | 51 | 0.23 | 14 | 29 | 79 | 196 | 0.4 |
| Cerkez (1996) | 5.7 | 33 | 0.36 | 14 | 30 | 129 | 152 | 0.8 |
| Tiranna (1998) | 5.8 | 7 | 0.24 | 12 | 21 | 114 | 176 | 0.6 |
| Olfus (2008) | 6.3 | 9 | 0.37 | 6 | 20 | 66 | 95 | 0.7 |
| προτεινόμενο σενάριο | 5.5-6.4 | - | 0.36 | 15 | 25 | 128 | 128 | ≈1.0 |

7.6 Ανελαστικές αναλύσεις για σύγκριση του προτεινόμενου σεναρίου με πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις

Η απόκριση κατασκευών που παραμορφώνονται στην ανελαστική τους περιοχή κατά τη διάρκεια έντονης εδαφικής κίνηση είναι κεντρικής σημασίας στη σεισμική μηχανική και γι' αυτό κρίνεται σκόπιμος ο υπολογισμός της μέγιστης παραμόρφωσης του ελαστοπλαστικού συστήματος εξαιτίας μίας εδαφικής κίνησης και η σύγκριση της παραμόρφωσης αυτής με την αντίστοιχη του ελαστικού συστήματος.

Στις αναλύσεις που διεξήχθησαν θεωρήθηκε ελαστική - απολύτως πλαστική συμπεριφορά του μονοβάθμιου ταλαντωτή (Σχήμα 7.36).

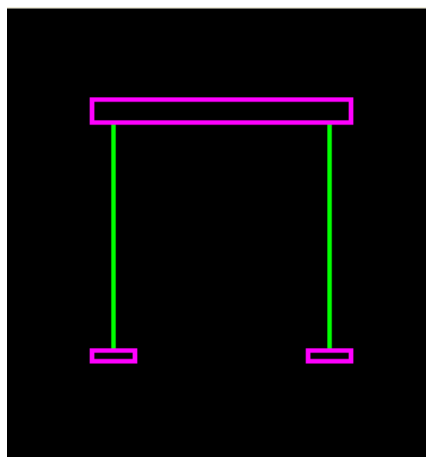


Σχήμα 7.36 Ελαστοπλαστικό σύστημα και το αντίστοιχο ελαστικό σύστημα

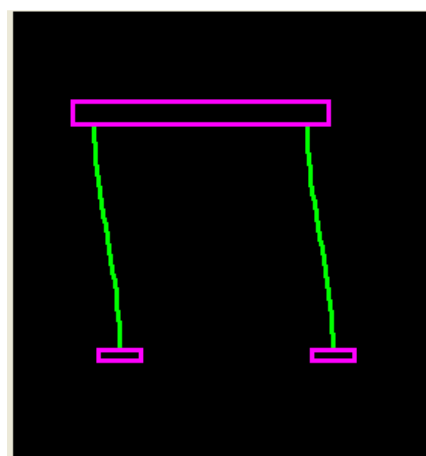
Το ανελαστικό σύστημα ορίζεται ώστε να έχει την ίδια δυσκαμψία με τη δυσκαμψία του ελαστικού συστήματος κατά τη διάρκεια της αρχικής φόρτισης, ενώ και τα δύο συστήματα έχουν την ίδια μάζα και απόσβεση, έτσι ώστε τελικά να προκύπτει η ίδια ιδιοπερίοδος ($T = 0.5 \text{ sec}$).

Η χρονική μεταβολή της μετατόπισης του διαρρέοντος συστήματος διαφέρει από αυτήν του ελαστικού. Σε αντίθεση με το ελαστικό, το ανελαστικό σύστημα, αφού διαρρεύσει, δεν ταλαντώνεται περί την αρχική θέση ισορροπίας του. Η διαρροή προκαλεί μετατόπιση του συστήματος από την αρχική του θέση ισορροπίας, και το σύστημα ταλαντώνεται γύρω από τη νέα θέση ισορροπίας μέχρι να μετατοπισθεί από ένα άλλο επεισόδιο διαρροής. Επομένως με το πέρασμα της εδαφικής δόνησης, το σύστημα φτάνει σε ηρεμία σε μία θέση γενικά διαφορετική από την αρχική του θέση ισορροπίας (δηλαδή υπάρχουν παραμένουσες παραμορφώσεις). Αντιθέτως ένα γραμμικό σύστημα επιστρέφει στην αρχική του θέση ισορροπίας του ακολουθώντας την εξασθένιση της ελεύθερης ταλάντωσης, αφού το έδαφος έχει πάψει να δονείται.

Η πραγματοποίηση των ανελαστικών αναλύσεων στην παρούσα εργασία έγινε μέσω του λογισμικού NONLIN. Πρόκειται για μία εφαρμογή με στόχο την δυναμική ανάλυση μονοβάθμιων ταλαντωτών (Σχήματα 7.37, 7.38), στην οποία ο ταλαντωτής μπορεί να επιλυθεί ελαστικά, απολύτως ελαστοπλαστικά ή ελαστοπλαστικά με δοσμένη δευτερεύουσα ακαμψία. Η δυναμική φόρτιση μπορεί να εισαχθεί στο σύστημα ως μία σεισμική χρονοϊστορία που δρα στη βάση του, ενώ το πρόγραμμα χρησιμοποιεί μία βήμα προς βήμα μέθοδο για την επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων της κίνησης.



Σχήμα 7.37 Μονοβάθμιος ταλαντωτής προς επίλυση στο πρόγραμμα NONLIN

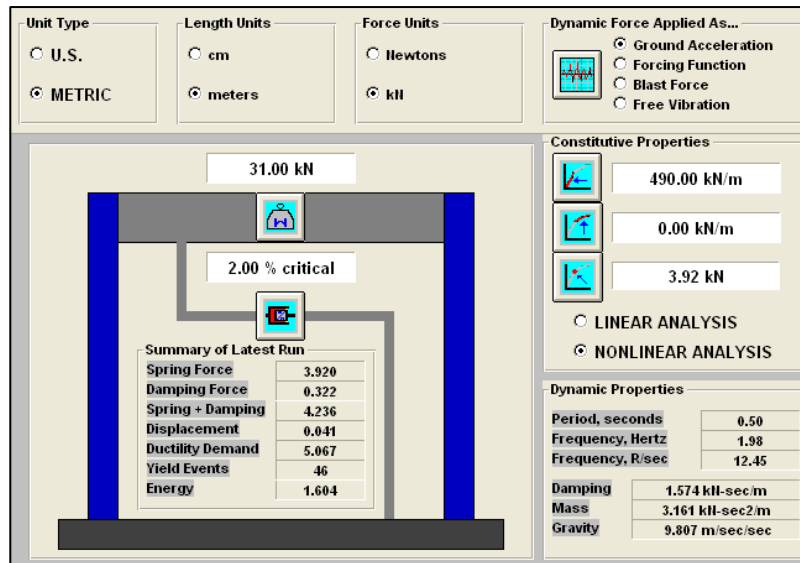


Σχήμα 7.38 Ενδεικτική παραμορφωμένη εικόνα του φορέα σε κάποια χρονική στιγμή κατά τη σεισμική φόρτιση

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του φορέα υποβαλλόμενου σε κάθε μία από τις σεισμικές διεγέρσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.5, ενώ στο Σχήμα 7.39 δίνεται μία ενδεικτική εικόνα της επιφάνειας εργασίας στο πρόγραμμα NONLIN κατά την εισαγωγή των δεδομένων.

Πίνακας 7.4 Απαιτούμενα δεδομένα για ανελαστικές αναλύσεις

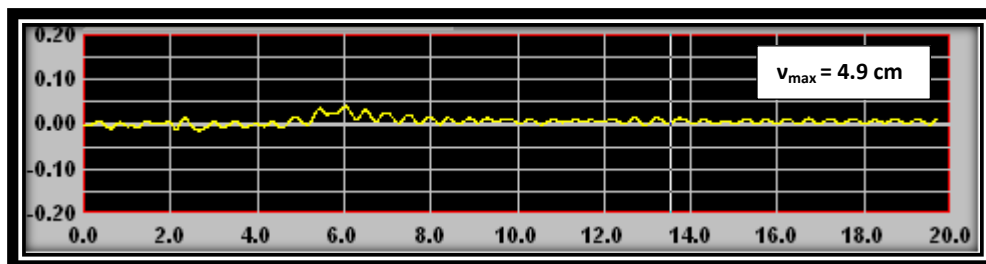
| | |
|---|--------------------------|
| Μάζα m ($\text{kN} - \text{sec}^2/\text{m}$) | $31/9.81 = 3.16$ |
| Απόσβεση ζ (%) | 2 |
| Δυσκαμψία K_1 (kN/m) | 490 |
| Μετακίνηση Διαρροής v_y (m) | 0.008 |
| Δύναμη Διαρροής F (kN) | $490 \cdot 0.008 = 3.92$ |



Σχήμα 7.39 Ενδεικτική εικόνα κατά την εισαγωγή των δεδομένων για την εκτέλεση των ανελαστικών αναλύσεων

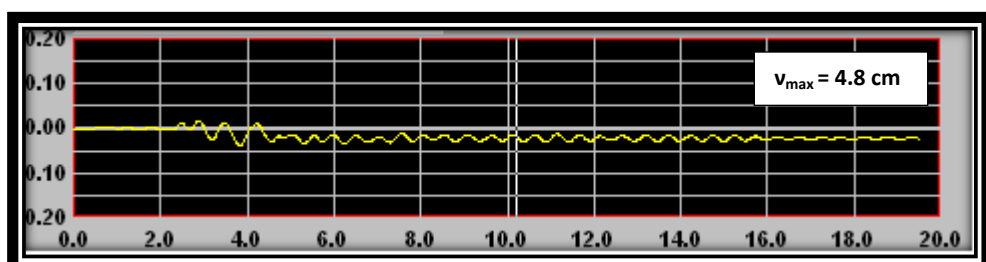
Για κάθε σεισμική διέγερση προέκυψε μετά την επίλυση η χρονοϊστορία απόκρισης μετακινήσεων και έτσι εκτιμήθηκε η μέγιστη μετατόπιση του φορέα, η οποία συγκρίθηκε με την προτεινόμενη σύμφωνα με το σενάριο κύκλων μετατόπισης που παρουσιάστηκε παραπάνω. Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται για κάθε σεισμική διέγερση οι μετακινήσεις του φορέα καθώς και η μέγιστη μετακίνηση σε κάθε περίπτωση.

❖ Σεισμική δόνηση Golbasi



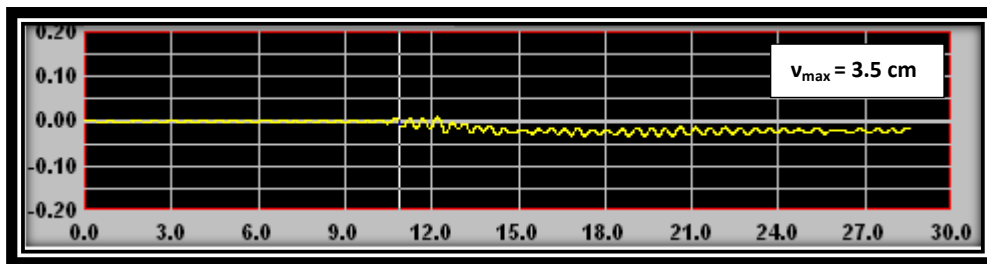
Σχήμα 7.40 Ανελαστική απόκριση μετακινήσεων Golbasi

❖ Σεισμική δόνηση Whittier Narrows



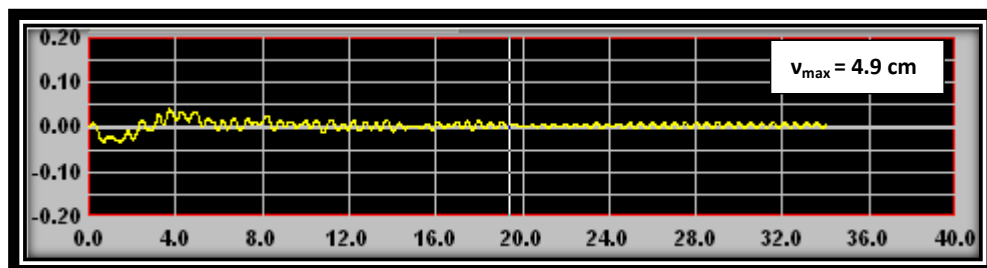
Σχήμα 7.41 Ανελαστική απόκριση μετακινήσεων Whittier Narrows

❖ Σεισμική δόνηση Sicilia Orientale



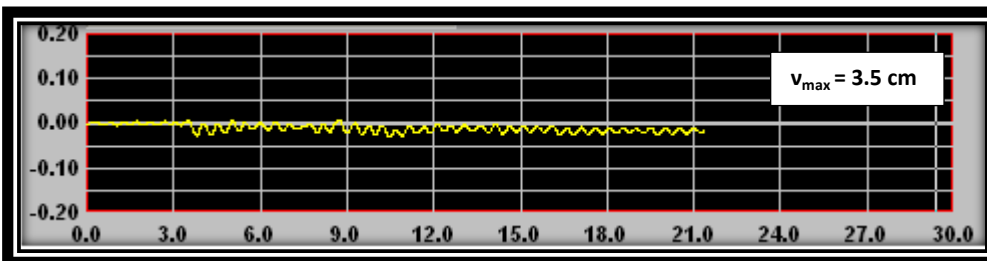
Σχήμα 7.42 Ανελαστική απόκριση μετακινήσεων Sicilia Orientale

❖ Σεισμική δόνηση Cerkez



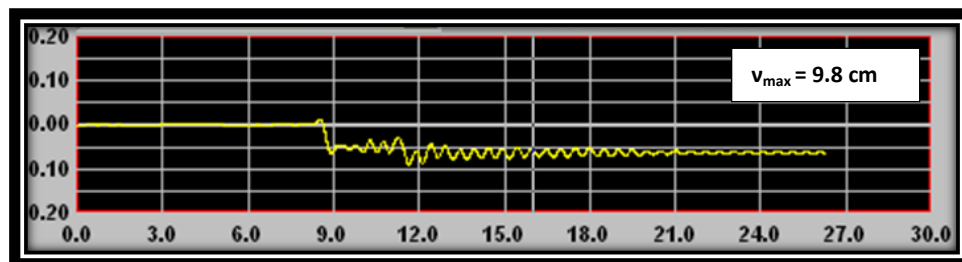
Σχήμα 7.43 Ανελαστική απόκριση μετακινήσεων Cerkez

❖ Σεισμική δόνηση Tirana



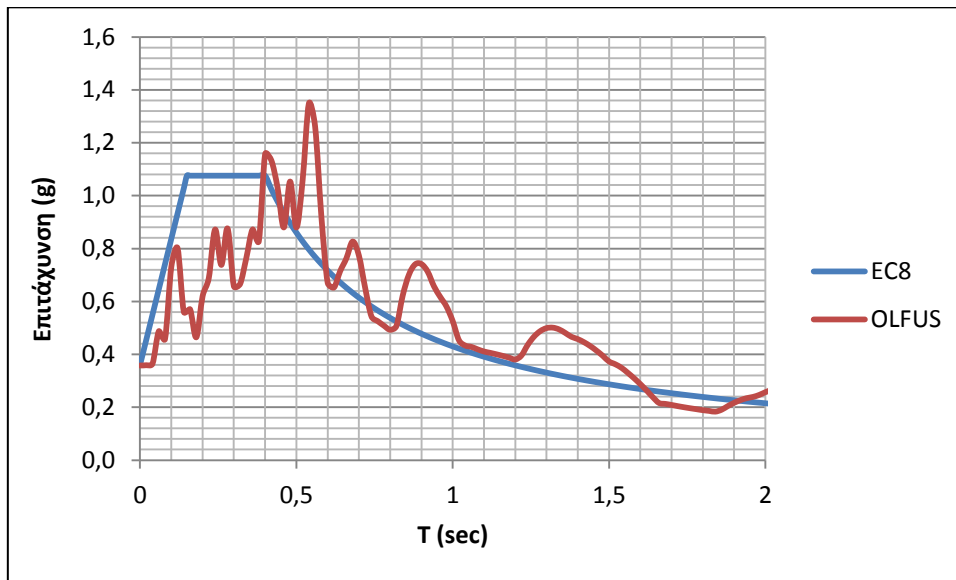
Σχήμα 7.44 Ανελαστική απόκριση μετακινήσεων Tirana

❖ Σεισμική δόνηση Olfus



Σχήμα 7.45 Ανελαστική απόκριση μετακινήσεων Olfus

Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις πλην της τελευταίας η μέγιστη μετατόπιση είναι μικρότερη από την προτεινόμενη και δεν παρατηρείται κατάρρευση του φορέα. Μόνο στη σεισμική διέγερση Olfus παρατηρείται υπέρβαση της μέγιστης μετατόπισης, γεγονός που δεν επιβεβαιώνει την εφαρμογή της μεθοδολογίας και το οποίο δεν έγινε αντιληπτό από τις ελαστικές αναλύσεις που προηγήθηκαν. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί αν λάβει κανείς υπόψη του τη μορφή των φασμάτων απόκρισης επιταχύνσεων και μετατοπίσεων, τα οποία παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές συγκρινόμενα με το φάσμα σχεδιασμού του EC8, στο οποίο στηρίχθηκε και η προτεινόμενη μεθοδολογία (Σχήμα 7.46).

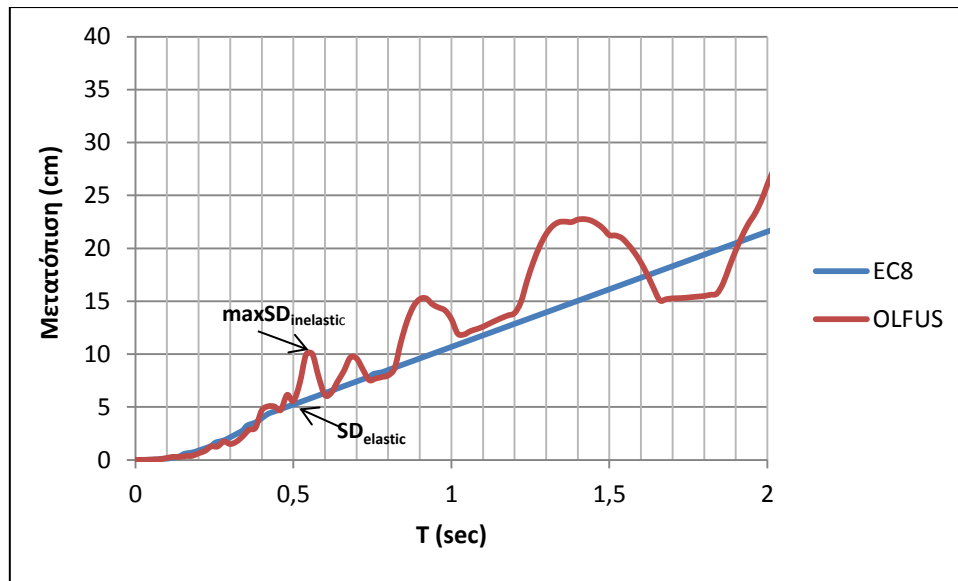


Σχήμα 7.46 Σύγκριση φάσματος σχεδιασμού επιταχύνσεων EC8 – διέγερσης Olfus

Παρατηρείται ότι η ιδιοπερίοδος της κατασκευής που εξετάζεται ($T = 0.5 \text{ sec}$) ανήκει σε ένα από τα τοπικά ελάχιστα του φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων, ενώ αμέσως μετά ακολουθεί ανιών κλάδος. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι καθώς η κατασκευή ρηγματώνεται με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ιδιοπερίοδος της, θα οδηγείται σε απαιτήσεις αυξημένων επιταχύνσεων και άρα και σε μεγαλύτερες μετατοπίσεις.

Για να ληφθούν υπόψη τέτοιες ειδικές περιπτώσεις χρειάζεται μία μικρή τροποποίηση κατά την χρήση των καμπύλων ολιγοκυκλικής κόπωσης, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη τα τυχόν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του σεισμικού γεγονότος. Για το λόγο αυτό υιοθετείται ένας επαυξητικός συντελεστής β , ο οποίος είναι ικανός να δώσει την απόκριση της κατασκευής για τη δεδομένη σεισμική φόρτιση. Ο συντελεστής αυτός θεωρείται ότι προκύπτει ως ο λόγος της μέγιστης φασματικής μετατόπισης κατά τη μετελαστική του απόκριση προς την ελαστική μετατόπιση που συμπίπτει με την θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της κατασκευής (Σχήμα 7.47):

$$\beta = \frac{\max SD_{inelastic}}{SD_{elastic}} \geq 1 \quad (7.3)$$



Σχήμα 7.47 Σύγκριση φάσματος σχεδιασμού μετατοπίσεων EC8 –διέγερσης Olfus

Επομένως αν εφαρμοστεί η ανωτέρω τροποποιημένη μεθοδολογία για την συγκεκριμένη περίπτωση, αναμένεται μέγιστη μετατόπιση ίση με 10 cm, το οποίο συμφωνεί και με τα αποτελέσματα των ανελαστικών αναλύσεων.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

8.1 Συμπεράσματα κατά την πορεία της εργασίας

Στην παρούσα εργασία έγινε μία προσπάθεια πρόβλεψης ή έστω εκτίμησης των αναμενόμενων κύκλων μετατόπισης μεταλλικής κατασκευής, δεδομένης της σεισμικής δόνησης, ώστε να ποσοτικοποιηθούν οι επιδράσεις - βλάβες που αυτές επιφέρουν στην κατασκευή, στηριζόμενοι στη μεθοδολογία καμπυλών ολιγοκυκλικής κόπωσης, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην ερευνητική εργασία των C. Castiglioni, X. Μουζάκη και Π. Καρύδη: “Constant and Variable Amplitude Cyclic Behavior of Welded Steel Beam – to – Column Joints” (2007).

Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας που προτείνεται απαιτείται αρχικά η εύρεση του επικρατέστερου σεισμικού σεναρίου, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα διαθέσιμα σεισμολογικά δεδομένα της υπό εξέταση περιοχής. Έτσι μέσω μιας διαδικασίας ανάδρομης πιθανολογικής εκτίμησης σεισμικής επικινδυνότητας (deaggregation) είναι δυνατή η εύρεση των πιθανότερων τιμών: μεγέθους σεισμού M , απόστασης R από την εξεταζόμενη θέση και παραμέτρου αβεβαιότητας ε , έτσι ώστε να προκαλείται κάποια καθορισμένη υπέρβαση της εδαφικής παραμέτρου που μελετάται. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας η παράμετρος που εξετάστηκε είναι η διάρκεια της ισχυρής σεισμικής δόνησης, για την οποία έχουν κατά καιρούς προταθεί διάφοροι ορισμοί και αρκετές εμπειρικές σχέσεις. Από όλες τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν εξάγεται το συμπέρασμα ότι η διάρκεια της ισχυρής σεισμικής δόνησης επηρεάζεται σημαντικά από το σεισμικό μέγεθος, ενώ σε μικρότερο βαθμό από την απόσταση από τη σεισμική πηγή.

Η ανωτέρω διαδικασία παρουσιάστηκε αναλυτικά μέσω ενός παραδείγματος, στο οποίο η εξεταζόμενη θέση επηρεάζεται από δύο σεισμικές πηγές, έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η επίδραση των παραμέτρων M , R και ε στην υπέρβαση κάποια καθορισμένης διάρκειας ισχυρής σεισμικής δόνησης. Συγκεκριμένα εξετάστηκε η περίπτωση όπου η πιθανότητα υπέρβασης της διάρκειας της ισχυρής σεισμικής δόνησης είναι 10% σε χρονικό διάστημα 50 ετών (μέση διάρκεια ζωής κατασκευών), κάτι το οποίο προέκυψε από μία συνηθισμένη ανάλυση πιθανολογικής εκτίμησης σεισμικής επικινδυνότητας (probabilistic seismic hazard analysis).

Μετά την εύρεση του επικρατέστερου σεισμικού σεναρίου και αφού κατασκευάστηκαν τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα έχοντας ως φάσμα αναφοράς το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού του EC8, και τα οποία ανταποκρίνονται στο συγκεκριμένο σενάριο, πραγματοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Βασικό εργαλείο για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων υπήρξε ο αλγόριθμος Rainflow, έτσι ώστε να βρεθούν τα πλάτη των κύκλων μετατόπισης, στις οποίες υπόκειται ο μονοβάθμιος ταλαντωτής θεμελιώδους ιδιοπεριόδου $T = 0.5$ sec που εξετάστηκε. Από τη διαδικασία που ακολουθήθηκε, κατά την οποία τα πλάτη κάθε ιστορίας απόκρισης ταξινομήθηκαν σε φθίνουσα σειρά, εξάχθηκαν τα παρακάτω βασικά συμπεράσματα:

- Στην πλειονότητα των περιπτώσεων οι διάφορες τάξεις πλατών ακολουθούν την γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών (generalized extreme value distribution).
- Στηριζόμενοι στη δυνατότητα εφαρμογής της ανωτέρω κατανομής μπορεί να προκύψει ο εκτιμώμενος αριθμός εμφάνισης κύκλων μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος πλατών, αφού απαλειφθούν οι τιμές που έχουν πιθανότητα κάτω από 10% να εμφανιστούν, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι πιο ρεαλιστικά. Μάλιστα η συσχέτιση του αριθμού κύκλων με το αντίστοιχο πλάτος τους προέκυψε ικανοποιητική ($R^2 \approx 0.6$).
- Σε κάθε περίπτωση ο κύκλος μέγιστου πλάτους διαφέρει κατά μέσο όρο μόνο 1.7 mm από την μέγιστη μετατόπιση του φορέα. Η διαφορά αυτή κρίνεται τόσο μικρή ώστε να μπορεί προσεγγιστικά η τιμή που προκύπτει από ένα ελαστικό φάσμα μετατοπίσεων (μέγιστη μετατόπιση του φορέα) να λαμβάνεται ίση με τον κύκλο μέγιστου πλάτους.

Το σενάριο που προέκυψε πιθανολογικά συγκρίθηκε μέσω της μεθοδολογίας καμπυλών ολιγοκυκλικής κόπωσης με καθένα από τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα, έτσι ώστε να επιβεβαιωθεί η ισχύς του. Πράγματι, χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία καμπυλών ολιγοκυκλικής κόπωσης, έγινε σύγκριση του δείκτη συσσωρευμένης βλάβης που προκύπτει σε κάθε τεχνητό επιταχυνσιογράφημα με εκείνον που προτείνεται και μάλιστα στην περίπτωση όπου το προτεινόμενο σενάριο δίνει οριακά αστοχία ($I_d \approx 1$). Διαπιστώθηκε ότι η μέθοδος πράγματι επιβεβαιώνεται εφόσον μόνο στο 10% των περιπτώσεων (τέσσερις στις συνολικά σαράντα περιπτώσεις) παρατηρήθηκε ελάχιστη υπέρβαση του δείκτη I_d .

Τέλος, επιλέχθηκαν πραγματικές χρονοϊστορίες που να ανταποκρίνονται όσο το δυνατόν καλύτερα στο σενάριο που ερευνάται και συγκρίθηκαν με αυτό μέσω ελαστικών και ανελαστικών αναλύσεων. Οι ελαστικές αναλύσεις απέδειξαν ότι το προτεινόμενο σενάριο είναι σε κάθε περίπτωση υπέρ της ασφαλείας.

Οι ανελαστικές αναλύσεις διεξήχθησαν θεωρώντας ελαστική – απολύτως πλαστική συμπεριφορά και συγκρίθηκε ουσιαστικά η μέγιστη μετατόπιση του φορέα, ο οποίος υποβάλλεται σε κάθε μία από τις επιλεγμένες σεισμικές διεγέρσεις, με την προτεινόμενη μέγιστη μετατόπιση. Σε όλες τις περιπτώσεις η μέγιστη μετατόπιση του φορέα προέκυψε μικρότερη από την προτεινόμενη, εκτός από την τελευταία σεισμική δόνηση (σεισμός Olfus, Ισλανδία), της οποίας το φάσμα απόκρισης παρουσίαζε διαφορές σε σχέση με το φάσμα σχεδιασμού του EC8 (σε αυτό στηρίχθηκε όλη η μεθοδολογία). Σε περιπτώσεις δηλαδή όπου η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής δίνει φασματικές επιταχύνσεις που κείνται περί τη βάση του φάσματος απόκρισης και ακολουθεί έξαρση φασματικών επιταχύνσεων, προτείνεται μία τροποποίηση κατά τη χρήση της μεθοδολογίας καμπύλων ολιγοκυκλικής κόπωσης. Συγκεκριμένα υιοθετείται ένας επανζητικός συντελεστής β , ο οποίος είναι ικανός να δώσει την απόκριση της κατασκευής για τη δεδομένη σεισμική φόρτιση. Ο συντελεστής αυτός θεωρείται ότι προκύπτει ως ο λόγος της μέγιστης φασματικής μετατόπισης κατά τη μετελαστική του απόκριση προς την ελαστική μετατόπιση που συμπίπτει με την θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της κατασκευής. Η τροποποιημένη διαδικασία επιτυγχάνει ακριβέστερη πρόβλεψη της συμπεριφοράς του φορέα, γεγονός που επιτρέπει στο μελετητή να προβεί στις απαραίτητες αλλαγές στο σχεδιασμό του.

Συγκεφαλαιώνοντας, η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε διαθέτει το πλεονέκτημα ότι βασίζεται σε ελαστικές επιλύσεις του εξεταζόμενου φορέα. Επομένως είναι εμφανής η ευκολία στην εφαρμογή της σε σχέσεις με αντίστοιχες μη γραμμικές αναλύσεις, στις οποίες ο μελετητής καλείται να ορίσει πληθώρα παραμέτρων, η εσφαλμένη επιλογή των οποίων μπορεί να οδηγήσει σε αποπροσανατολιστικά αποτελέσματα.

8.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Μετά την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονιστεί ότι για την εξαγωγή των όποιων συμπερασμάτων ήταν αναγκαία η υιοθέτηση παραδοχών και πιθανών απλουστευμένων προσεγγίσεων, οι οποίες όμως θεωρήθηκε ότι σε καμία περίπτωση δεν αντιβαίνουν στην ορθή αντιμετώπιση του εξεταζόμενου προβλήματος.

Η διεξαγωγή της μελέτης αυτής αποτελεί μία προσπάθεια κατανόησης και πρόβλεψης της σεισμικής απόκρισης μεταλλικών κατασκευών, για την περαιτέρω εξέλιξη της οποίας, προτείνεται στο μέλλον η μελέτη μονοβάθμιων ταλαντωτών διαφορετικών θεμελιωδών ιδιοπεριόδων και η σύγκριση των μεταξύ τους αποτελεσμάτων. Ιδιαίτερα χρήσιμο θα ήταν επιπλέον να μελετηθούν τόσο περιπτώσεις διεγέρσεων σε άλλους τύπους εδαφών όσο και μεγαλύτερου σεισμικού μεγέθους, για παράδειγμα $M \geq 7$, οι οποίες μπορούν να αποβούν καταστροφικότερες για τις κατασκευές. Επίσης κρίνεται σκόπιμη και η επέκταση της ανωτέρω μελέτης σε πολυβάθμιους ταλαντωτές.

Η πιθανή επιβεβαίωση της ισχύς της προτεινόμενης μεθοδολογίας ύστερα από μελλοντική ευρύτερη έρευνα, ευελπιστεί στην χρήση της ως εργαλείο για το σχεδιασμό ασφαλέστερων κατασκευών, με δεδομένη όμως τη διαθεσιμότητα των αναγκαίων σεισμοτεκτονικών δεδομένων της περιοχής που εξετάζεται.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ARIAS A. (1970), “A Measure of Earthquake Intensity”, Seismic Design for Nuclear Power Plants, Ed. Hansen R.J., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 438-489

BAKER J.W. (2008), “An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis” Version 1.3, US Nuclear Regulatory Commission, pp. 1 – 72

BAKER J.W., LIN T. (2011), “Probabilistic Seismic Hazard Deaggregation of Ground Motion Prediction Models”, 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Santiago, Chile, Paper No, PSHLI, pp. 1 - 12

BASU B., GUPTA K.V., KUNDU D. (1996), “Ordered Peak Statistics through Digital Simulation”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 25, pp. 1061 - 1073

BASU B., GUPTA K.V., KUNDU D. (1996), “A Markovian Approach to Ordered Peak Statistics”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 25, pp. 1335 - 1351

BAZZURRO P., CORNELL A.C. (1999), “Disaggregation of Seismic Hazard”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 89, No. 2, pp. 501 – 520

BIOT M.A. (1941), “A Mechanical Analyzer for the Prediction of Earthquake Stresses”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 31, pp. 151-17

BOLT B.A. (1973), “Duration of Strong Ground Motion”, Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Vol. 1, pp. 1304 – 1314

BOMMER J.J., MARTÍNEZ-PEREIRA A. (1999), “The Effective Duration of Earthquake Strong Motion”, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 3, Issue 2, pp. 127-172

BOMMER J.J. MARTÍNEZ-PEREIRA A. (2000), “Strong - Motion Parameters: Definition, Usefulness and Predictability”, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, Paper No. 206

BOMMER J.J., MENDIS R. (2005), “Scaling of Spectral Displacement Ordinates with Damping Ratios”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 34, Issue 2, pp. 145 – 165

BOMMER J.J., STAFFORD P.J., ALARCÓN J.E. (2009), “Empirical Equations for the Prediction of the Significant, Bracketed and Uniform duration of Earthquake Ground Motion”, Bulletin of the Seismological Society of America, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 99, pp. 3217-3233

CAMERON W.I., GREEN R.A. (2007), “Damping Correction Factors for Horizontal Ground - Motion Response Spectra”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, No. 3, pp. 934-960

CASTIGLIONI C., MOYZAKΗΣ X., ΚΑΡΥΔΗΣ Π. (2007), “Constant and Variable Amplitude Cyclic Behavior of Welded Steel Beam – to – Column Connections”, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 11, Issue 6, pp. 876 – 902

CHOPRA K.A. (1995), “Dynamics of Structures”, Pearson Pentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, pp. 197 – 304

EKBERG A. (2009), “Dynamic Loads”, Lecture Notes in Solid Mechanics, Chalmers University of Technology, Department of Applied Mechanics, Sweden (<http://www.am.chalmers.se/~anek/teaching/fatfract/98-2.pdf> - τελευταία πρόσβαση 2/2013)

ΕΡΜΟΠΟΥΛΟΣ Ι. (2012), «Σημειώσεις για το μάθημα Σχεδιασμός Τεχνικών Έργων», Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης: Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, σελ. 189 – 229

ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός (EN1998 – 1: 2004), «Γενικοί Κανόνες, Σεισμικές Δράσεις και Κανόνες για Κτήρια», Μέρος 1, σελ. 39 - 45

FIELD E. (2006) Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), A Primer (<http://analysis3.com/Oscillation-The-Free-download-w7666.pdf> - τελευταία πρόσβαση 2/2013)

GASPARINI D.A., VANMARCHE E.H. (1976), “SIMQKE – A Program for Artificial Motion Generation, User’s Manual and Documentation”, M.I.T. Department of Civil Engineering, pp. 1 – 101

HALFPENNY A. (2001) “A Practical Discussion on Fatigue”, Environmental Engineering, Vol. 14, Issue 3, pp. 1 - 5

HANCOCK J., BOMMER J.J. (2004), “Predicting the Number of Cycles of Ground Motion”, 13th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 1989, pp. 1 – 15

HANCOCK J. (2006), “The Influence of Duration and the Selection and Scaling of Accelerograms in Engineering Design and Assessment”, Phd Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College, pp. 46 – 49, 60 – 87, 163 – 166

HERNADEZ B., COTTON F. (2000), “Empirical Determination of the Ground Shaking Duration due to an Earthquake using Strong Motion Accelerograms for Engineering Applications, 12th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Auckland, New Zealand, Vol. 13, pp. 2254 – 2261

HUSID L.R. (1969), “Características de Terremotos – Analisis General”, Revista del IDIEM, Santiago, Chile, Vol. 8, pp. 21-42

IERVOLINO I., CORNELL A.C. (2008), “Probability of Occurrence of Velocity Pulses in Near - Source Ground Motions”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 98, No. 5, pp. 2262 – 2277

INSTITUTO GEOGRAFICO NACIONAL, MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS, TRANSPORTES Y MEDIO AMBIENTE (1994), “Norma de Construcción Sismorresistente (Parte General y Edificación)”, NCS-94, Spain

INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR EARTHQUAKE ENGINEERING (1996), “Regulations for Seismic Design: A World List—1996”, Japan, Tokyo

JENNINGS P.C., HOUSNER G.W., TSAI N.C., (1968), “Simulated Earthquake Motions”, Californian Institute of Technology, Pasadena, California, pp. 1 – 55

KEMPTON J.J., STEWART J.P. (2006), “Prediction Equations for Significant Duration of Earthquake Ground Motions Considering Site and Near-Source Effects”, *Earthquake Spectra*, Vol. 22, No. 4, pp. 985–1013

ΚΟΡΩΝΑΙΟΣ ΑΙΜ.Γ., Γ. Ι. ΠΟΥΛΑΚΟΣ Γ.Ι., (2006), «Τεχνικά υλικά», Τόμος Ι, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, σελ. 17 - 18

KRAMER S.L. (1996), “Geotechnical Earthquake Engineering”, Pearson Pentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, pp. 79 – 82, 106 – 142

MCCALPIN J.P. (2009), “Palaioseismology” 2nd Edition, Elsevier Inc., San Diego, California, pp. 593

MCGUIRE R.K. (1995), “Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes: Closing the Loop”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 5, pp. 1275 – 1284

NEWMARK N.M. (1959), “A Method of Computation for Structural Dynamics”, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 85, No. EM3, pp. 67-94

NIGAM N.C., JENNINGS P.C. (1969), “Calculation of Response Spectra from Strong Motion Earthquake Records”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 59, Issue 2, pp. 909-922

PAGRATIS D. (1995), “Prediction of Earthquake Strong Ground Motion Duration for Engineering Use”, MSc Dissertation, Imperial College, London

ΠΑΠΑΖΑΧΟΣ Β.Κ., ΠΑΠΑΖΑΧΟΥ Κ. (1989), «Οι σεισμοί της Ελλάδας», Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ. 365

ΠΑΠΠΑΣ Β. (2011), «Θραύση από Κόπωση», Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας ΕΜΠ

REZAEIAN S., BOZORGNIA Y., IDRIS I.M., CAMPBELL K., ABRAHAMSON N., SILVA W. (2012), “Spectral Damping Scaling Factors for Shallow Crustal Earthquakes in Active Tectonic Regions”, Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), University of California, Berkeley, pp. 14 – 19

SEISMOMATCH VERSION 2.0.0 – A Computer Program Capable of Adjusting Earthquake Accelerograms to Match a Specific Target Response Spectrum (Available online: <http://www.seismosoft.com>)

SEISMOSIGNAL VERSION 5.0.0 - A Computer Program for Signal Processing of Strong - Motion Data (Available online: <http://www.seismosoft.com>)

SHASHI S.K., BAKER J.W. (2010), “Signal Processing and Probabilistic Seismic Hazard Analysis Tools for Characterizing the Impact of Near - Fault Directivity”, Joint Conference Proceedings of the 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering (CUEE) & the 5th International Conference on Earthquake Engineering (ICEE), Tokyo, Japan, pp. 1 - 6

SHASHI S.K., BAKER J.W. (2011), “Regression Models for Predicting the Probability of Near - Fault Earthquake Ground Motion Pulses, and their Period”, 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, Zurich, Switzerland, pp. 1 - 8

SHASHI S.K., BAKER J.W. (2011), “An Empirically Calibrated Framework for Including the Effects of Near – Fault Directivity in Probabilistic Seismic Hazard Analysis”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, No. 2, pp. 742 – 755

STAFFORD P.J., STRASSER F.O., BOMMER J.J. (2008), “An Evaluation of the Applicability of the NGA Models to Ground - Motion Prediction in the Euro-Mediterranean Region”, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 6, Issue 2, pp. 149-177

STAFFORD P.J. (2009), “Towards Vector Implementations of Hazard Analysis and Loss Estimation”, Earthquake Engineering by the Beach, pp. 1 - 17

(http://www.reluis.it/doc/pdf/EEBTB/Stafford_EEBTB_Paper.pdf - τελευταία πρόσβαση 2/2013)

TOLIS S., FACCIOLI E. (1999), “Displacement Design Spectra”, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 3, pp. 107–125

TOTHONG P., CORNELL C.A., BAKER J.W. (2007), “Explicit Directivity - Pulse Inclusion in Probabilistic Seismic Hazard Analysis”, Earthquake Spectra, Vol. 23, No. 4, pp. 867 – 891

ΤΣΕΛΕΝΤΗΣ Α. (1997), «Σύγχρονη Σεισμολογία», Β' Τόμος, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, σελ. 546 – 551, 836 – 846, 902 – 916, 946 - 950

ΦΕΚ 1154/Β/ΕΑΚ (2003), «Τροποποίηση Διατάξεων του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού ΕΑΚ – 2000 λόγω Αναθεώρησης του Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας»

WANG Z. (2008), “Understanding Seismic Hazard and Risk: a Gap between Engineers and Seismologists”, 14th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Beijing, China, Paper S27 – 001, pp. 1 - 11

WANG Z. (2010), “Seismic Hazard Assessment: Issues and Alternatives”, Pure and Applied Geophysics, Vol. 168, Issue 1 – 2, pp. 11 - 25

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

<http://www.mathworks.com/help/stats/>

http://www.isesd.hi.is/ESD_Local/frameset.htm

<http://peer.berkeley.edu/smcat/>

http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database/