



ΑΘΑΝΑΣΙΑ Σ. ΚΕΡΚΕΝΟΥ Γεωλόγος MSc Σεισμολόγος

ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΑΘΡΟΙΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΜΕ ΤΗ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΛΟΓΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2023

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης





ATHANASIA S. KERKENOU Geologist MSc Seismologist

PROBABILISTIC ASSESSMENT AND DEAGGREGATION OF SEISMIC HAZARD FOR GREECE USING A JOINT EVALUATION OF NUMERICAL METHODS AND ANALYSIS OF SYNTHETIC CATALOGS

DISSERTATION THESIS

THESSALONIKI 2023





ΑΘΑΝΑΣΙΑ Σ. ΚΕΡΚΕΝΟΥ Γεωλόγος MSc Σεισμολόγος

ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΑΘΡΟΙΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΜΕ ΤΗ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΛΟΓΩΝ

Εκπονήθηκε στον Τομέα Γεωφυσικής του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ. τον Οκτώβριο του 2023

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 29/11/2023

Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής Επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Ν°: 242

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Κωνσταντίνος Παπαζάχος, Καθηγητής ΑΠΘ, Επιβλέπων Βασίλειος Μάργαρης, Ερευνητής Α', Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής Χρήστος Παπαϊωάννου, Ερευνητής Α', Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Εξεταστική Επιτροπή

Κωνσταντίνος Παπαζάχος, Καθηγητής ΑΠΘ Βασίλειος Μάργαρης, Διευθυντής Ερευνών (Ερευνητής Α') ΙΤΣΑΚ-ΟΑΣΠ Χρήστος Παπαϊωάννου, Διευθυντής Ερευνών (Ερευνητής Α') ΙΤΣΑΚ-ΟΑΣΠ Παναγιώτης Χατζηδημητρίου, Καθηγητής ΑΠΘ Βασίλειος Καρακώστας, Καθηγητής ΑΠΘ Εμμανουήλ Σκορδύλης, Καθηγητής ΑΠΘ Αναστάσιος Σέξτος, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ



© Αθανασία Σ. Κερκένου, MSc Σεισμολόγος, 2023 Με την επιφύλαξη κάποιων δικαιωμάτων ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΑΘΡΟΙΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΜΕ ΤΗ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΛΟΓΩΝ. – Διδακτορική Διατριβή Το έργο παρέχεται υπό τους όρους Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0.

© Athanasia S. Kerkenou, MSc Seismologist, 2023 Some rights reserved. PROBABILISTIC ASSESSMENT AND DEAGGREGATION OF SEISMIC HAZARD FOR GREECE USING A JOINT EVALUATION OF NUMERICAL METHODS AND ANALYSIS USING SYNTHETIC CATALOGS. – *Ph.D. Thesis* The work is provided under the terms of Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0.

Citation:

Κερκένου Α. Σ., 2023. – Πιθανολογική εκτίμηση και αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας του Ελληνικού χώρου με τη συγκριτική αξιολόγηση αριθμητικών μεθόδων και αναλύσεων με τη χρήση συνθετικών καταλόγων. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής Επετηρίδας Τμ. Γεωλογίας Νο 242, 242 σελ.

Kerkenou A. S., 2023. – Probabilistic assessment and deaggregation of seismic hazard of the Greek area with the comparative evaluation of numerical methods and analyzes using synthetic catalogs. Ph.D. Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, Annex Number of Scientific Annals of the School of Geology No 242, 242 pp.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



«Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας – 2°^ς κύκλος» (MIS-5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (IKY)»



Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας είναι ένα εφαρμοσμένο επιστημονικό αντικείμενο της Γεωφυσικής και ειδικότερα της Τεχνικής Σεισμολογίας, με ιδιαίτερη σημασία για σεισμογενείς περιοχές, όπως η Ελλάδα. Η αξιόπιστη εκτίμησή της είναι σημαντική για τον αντισεισμικό σχεδιασμό και την αντισεισμική προστασία. Αν και υπάρχουν πολλοί τρόποι εκτίμησής της, τις τελευταίες δεκαετίες έχει κερδίσει έδαφος η Πιθανολογική Εκτίμηση της Σεισμικής Επικινδυνότητας (ΠΕΣΕ), η οποία λαμβάνει υπόψη όλες τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με τις πηγές των σεισμών, τον δρόμο διάδοσης του σεισμικού κύματος, αλλά και τις συνθήκες που επικρατούν στο σημείο παρατήρησης/ενδιαφέροντος (π.χ. γεωλογία). Στην παρούσα εργασία εξετάζονται διάφορες πτυχές της ΠΕΣΕ για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου (αξιοπιστία-ευρωστία, ευαισθησία στους κύριους παράγοντες που την ελέγχουν, κ.λπ.), με αξιοποίηση διαφορετικών μεθοδολογικών εργαλείων, όπως σύγχρονων σχετικών κωδίκων (Openquake), και μίας μεθόδου προσομοίωσης τύπου Monte Carlo, στο πλαίσιο της οποίας χρησιμοποιούνται συνθετικοί κατάλογοι σεισμικότητας.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Α.Π.Θ

ογίας

Στο πρώτο στάδιο της διατριβής μελετώνται οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την ΠΕΣΕ στον Ελληνικό χώρο. Για αυτόν τον σκοπό, γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των 5 κυριότερων μοντέλων επιφανειακών σεισμικών πηγών για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου, δηλαδή αυτών των Papazachos (1990) ή P1990, Papaioannou and Papazachos (2000) ή PP2000, Vamvakaris et al. (2016a) ή V2016, Woessner et al. (2015) ή ESHM13 και Danciu et al. (2021) ή ESHM20. Πιο συγκεκριμένα, τα μοντέλα εξετάζονται ως προς το επίπεδο σεισμικότητας με τον υπολογισμό της χωρικής κατανομής του συχνότερα παρατηρούμενου μεγίστου μεγέθους ανά έτος, *M*₁, ως προς τη μορφή των πηγών τους, τα είδη διαρρήξεων που θεωρείται ότι μπορεί να συμβούν σε αυτές, αλλά και το μέγιστο μέγεθος σεισμού, *M_{max}*, που μπορούν να φιλοξενήσουν. Επιπλέον, διενεργείται ΠΕΣΕ με βάση κάθε μοντέλο και αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Βάσει της συγκριτικής τους αξιολόγησης προτείνεται ένα λογικό δέντρο για την υλοποίηση υπολογισμών ΠΕΣΕ, με διαφορετικό βάρος για το κάθε μοντέλο.

Στο ίδιο πλαίσιο, γίνεται η σύγκριση 15 εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης (Ι.Σ.Κ.) ή GMPE που έχουν προταθεί για επιφανειακούς σεισμούς στον χώρο του Αιγαίου ή της Ευρώπης ή των Δυτικών ΗΠΑ (Καλιφόρνια), η οποία παρουσιάζει ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες του χώρου του Αιγαίου (μέσο πάχος φλοιού, ενεργό σεισμοτεκτονικό καθεστώς, παρόμοια μέση απόσβεση κ.λπ.) και για την οποία υπάρχει διαθέσιμος πολύ μεγάλος αριθμός δεδομένων. Οι σχέσεις αυτές -κατά χρονολογική σειρά- προτάθηκαν από τους: Skarlatoudis et al. (2003) ή Sk03, Danciu and Tselentis (2007) ή DT07, Cauzzi and Faccioli (2008) ή CF08, Bindi et al. (2011) ή Bi11, Abrahamson et al. (2014) ή ASK14, Boore et al. (2014) ή BSSA14, Campbell and Bozorgnia (2014) ή CB14, Chiou and Youngs (2014) ή CY14, Bindi et al. (2014) ή Bi14, Akkar et al. (2014a) ή Ak14, Derras et al. (2014) ή De14, Cauzzi et al. (2015) ή Ca15, Chousianitis et al. (2018) ή Ch18, Kotha et al. (2020) ή Ko20, Boore et al. (2021) ή Bo21. Με τη χρήση λογικών δέντρων στην ΠΕΣΕ, τόσο των μοντέλων σεισμικών πηγών, όσο και των GMPE, δημιουργείται ένας επικαιροποιημένος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου, στον οποίο η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) παίρνει τιμές έως 0.9 g. Από τη σύγκριση του επικαιροποιημένου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας με τον ΝΕΑΚ2003 παρατηρείται ότι τα περισσότερα σημεία χαρακτηρίζονται από 1.5 έως 2.5 φορές υψηλότερες τιμές PGA, γεγονός που δείχνει ότι στον ΝΕΑΚ2003 γίνεται σημαντική υποεκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Δεδομένου ότι πριν από τους υπολογισμούς της ΠΕΣΕ πρέπει να ληφθούν κάποιες αποφάσεις, οι οποίες συνήθως βασίζονται σε υποκειμενικά κριτήρια, όπως ο σχηματισμός των λογικών δέντρων του μοντέλου σεισμικών πηγών και των GMPE, ο ορισμός του ελαχίστου μεγέθους, Mmin, κ.ά., κρίθηκε αναγκαία η διενέργεια Ανάλυσης Ευαισθησίας. Στόχος ήταν να προσδιοριστούν οι εισαγόμενοι παράγοντες που ασκούν τη μεγαλύτερη επιρροή στα αποτελέσματά της ΠΕΣΕ και να μελετηθεί η χωρική (ή άλλη) μεταβλητότητά τους. Για τον λόγο αυτόν, έγινε μία Ανάλυση Ευαισθησίας τύπου OFAT (One Factor at A Time) σε 42 επιλεγμένες θέσεις, με εισαγόμενους παράγοντες το μοντέλο σεισμικών πηγών (Source model), την εμπειρική σχέση πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (GMPE), τον αριθμό των θεωρούμενων τυπικών αποκλίσεων σε αυτήν (std), τις σταθερές Gutenberg-Richter (G-R) a και b, το μέγιστο και το ελάχιστο μέγεθος (Mmax και Mmin, αντίστοιχα) και το κυρίαρχο είδος διάρρηξης (SoF). Η Ανάλυση Ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε για μία παράμετρο που ελέγχεται κυρίως από το υψίσυχνο φασματικό περιεχόμενο (PGA) και μία παράμετρο που επηρεάζεται από ενδιάμεσες (3-10 Hz) ή πιο χαμηλές (1-2 Hz) συχνότητες (μέγιστη εδαφική ταχύτητα ή PGV). Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι οι εισαγόμενοι παράγοντες που επηρεάζουν στον μέγιστο βαθμό τα αποτελέσματα της ΠΕΣΕ είναι κυρίως το μοντέλο πηγών (ιδίως οι αβεβαιότητες στις παραμέτρους G-R, *a* και *b*) και οι εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης Ι.Σ.Κ. (Ground Motion Prediction Equations-GMPE). Το Mmax επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό μόνον το PGV, ενώ έχει μικρότερη επίδραση στο PGA. Οι υπόλοιποι παράγοντες κρίνονται ως ήσσονος σημασίας. Επιπλέον, εξετάζεται η χωρική κατανομή της ευαισθησίας της ΠΕΣΕ για κάθε εισαγόμενο παράγοντα, και συσχετίζεται ποσοτικά κυρίως με το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας.

Για τις υπολογιστικές ανάγκες της παρούσας διατριβής δημιουργήθηκε ένας νέος κώδικας (σε γλώσσα MATLAB) παραγωγής συνθετικών καταλόγων σεισμικότητας και εκτίμησης της ΠΕΣΕ, με τη χρήση μιας μεθόδου προσομοίωσης τύπου Monte Carlo. Για τον υπολογισμό των διαφόρων ειδών αποστάσεων που θεωρούνται στις σχετικά πρόσφατα δημοσιευμένες GMPE (π.χ. ASK14, BSSA14, CB14, CY14, Ca15) δημιουργούνται και αξιολογούνται τρεις νέες σχέσεις στατιστικής μετατροπής μεταξύ των διαφόρων ειδών αποστάσεων: μετατροπή της επικεντρικής απόστασης (*R*_{epi}) σε απόσταση Joyner Boore (*R*_{JB}), μετατροπή της υποκεντρικής απόστασης (*R*_{hypo}) στην κοντινότερη από τη διάρρηξη απόσταση (*R*_{rup}) και μετατροπή της *R*_{epi} στην απόσταση μετρημένη κάθετα στην παράταξη (*R*_x). Τα αποτελέσματα της ΠΕΣΕ με τη χρήση αυτών των στατιστικών σχέσεων αξιολογήθηκαν και συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα στα οποία οι αποστάσεις υπολογίζονται γεωμετρικά (λαμβάνοντας υπόψη την πλήρη γεωμετρία του ρήγματος), διαδικασία που ανέδειξε μία γενικά καλή συμφωνία. Με αυτόν τον τρόπο πιστοποιείται ότι η χρήση στατιστικών σχέσεων για τη μετατροπή ειδών αποστάσεων είναι ασφαλής στις περιπτώσεις στις οποίες ο γεωμετρικός τους υπολογισμός δεν είναι εφικτός (π.χ. άγνωστη γεωμετρία ρήγματος) ή είναι πολύ απαιτητικός (π.χ. σε υπολογιστικούς πόρους).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Βασικό στόχο της διατριβής αποτέλεσε η μελέτη της αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας, δηλαδή η «αντίστροφη» διεργασία της ΠΕΣΕ, μέσω της οποίας υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά του πιο πιθανού σεισμού/ών (π.χ. μέγεθος, συντεταγμένες, απόσταση) που δύναται/δύνανται να προκαλέσει/ουν κίνηση η οποία υπερβαίνει το υπολογισμένο επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας ενός σημείου. Αυτή η γνώση είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για τη λήψη των σχετικών με τον αντισεισμικό σχεδιασμό αποφάσεων, καθώς ενδέχεται τα χαρακτηριστικά των σεισμών που προκαλούν π.χ. το ίδιο επίπεδο PGA σε διαφορετικές θέσεις ενδιαφέροντος (ή ακόμα και στην ίδια θέση) να είναι πολύ διαφορετικά. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της 3D και 4D αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας για 42 ενδεικτικές θέσεις του Ελληνικού χώρου, τα οποία προέκυψαν με τη χρήση των προαναφερθέντων μοντέλων σεισμικών πηγών ξεχωριστά, αλλά και με την αξιοποίηση του προτεινόμενου λογικού δέντρου. Αυτά δείχνουν ότι οι περισσότερες θέσεις επηρεάζονται κυρίως από σεισμούς που συμβαίνουν εντός της σεισμικής πηγής στην οποία ανήκουν, με μέγεθος M5.0-6.0 σε κοντινές αποστάσεις (έως 20 km), και από σεισμούς μεγαλύτερων μεγεθών (M>6.0) σε πιο μακρινές αποστάσεις (έως 50 km). Επιπλέον, πολλές θέσεις του Ελληνικού χώρου επηρεάζονται τόσο από κοντινούς σεισμούς (έως 50 km) που γίνονται εντός της πηγής στην οποία ανήκουν, όσο και από πιο μακρινούς σεισμούς (έως 100 km) μεγαλύτερου μεγέθους (M>7.0). Οι απομακρυσμένες αυτές πηγές ανήκουν σε σεισμοτεκτονικές ζώνες που περιγράφουν γνωστές μεγάλες τεκτονικές δομές της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου, όπως τη ζώνη κατάδυσης του Ν. Αιγαίου (εξωτερικό Ελληνικό τόξο) ή το δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης της Τάφρου του Β. Αιγαίου.

Τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη λήψη αποφάσεων σχετικών με την ΠΕΣΕ, ιδίως στην κατεύθυνση του προσδιορισμού των παραγόντων και των επιστημονικών εξελίξεων για τη μείωση της επιστημικής αβεβαιότητας. Παράλληλα, παρέχουν ένα χρήσιμο εργαλείο για την εφαρμογή εξελιγμένων σχέσεων GMPE στην εκτίμηση της ΠΕΣΕ, και εμπλουτίζουν τις υφιστάμενες γνώσεις για τη σεισμική επικινδυνότητα της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου, καθώς αναδεικνύουν προβλήματα στα σημερινά χρησιμοποιούμενα επίπεδα, φέρνοντας στο προσκήνιο την ανάγκη αναθεώρησης του τρέχοντος κανονιστικού πλαισίου. Τέλος, τα αποτελέσματα της αποάθροισης είναι ιδιαιτέρως χρήσιμα στη διενέργεια Αιτιοκρατικής Εκτίμησης Σεισμικής Επικινδυνότητας (ΑΕΣΕ) σε τοπικό επίπεδο (π.χ. για τα κύρια σενάρια που αναδεικνύονται από την





Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

δλογίας

ABSTRACT

In the first place, the main factors that control PSHA are studied. Within this context, a comparative evaluation of the 5 main areal seismic source models available for the broader Aegean area is performed, i.e. those of Papazachos (1990) or P1990, Papaioannou and Papazachos (2000) or PP2000, Vamvakaris et al. (2016a) or V2016, Woessner et al. (2015) or ESHM13 $\kappa\alpha\iota$ Danciu et al. (2021) or ESHM20. More specifically, the models are examined regarding their seismicity rate by calculating the spatial distribution of the mean annual magnitude, M_1 , in terms of source shapes, the type of ruptures that occur within each source and their maximum earthquake magnitude, M_{max} . PSHA is conducted with the use of all considered seismic source models and their advantages and disadvantages are highlighted. Based on their comparative evaluation, a source model logic tree is proposed.

Within the same context, we perform a comparison of 15 Ground Motion Prediction Equations (GMPE) that have been created for surface events in the broader Aegean area, in the European area and in the western USA (California), which presents quite similar properties to the Aegean area (average crustal thickness, active seismotectonic regime, similar average attenuation, etc.) and for which a significant amount of data is available. These GMPE (in chronological order) are those of: Skarlatoudis et al. (2003) or Sk03, Danciu and Tselentis (2007) or DT07, Cauzzi and Faccioli (2008) or CF08, Bindi et al. (2011) or Bi11, Abrahamson et al. (2014) or ASK14, Boore et al. (2014) or BSSA14, Campbell and Bozorgnia (2014) or CB14, Chiou and Youngs (2014) or CY14, Bindi et al. (2014) or Bi14, Akkar et al. (2014a) or Ak14, Derras et al. (2014) or De14, , Cauzzi et al. (2015) or Ca15, Chousianitis et al. (2018) or Ch18, Kotha et al. (2020) or Ko20, Boore et al. (2021) or Bo21. An updated seismic hazard map is created for the broader Aegean area, with the use of the source model and GMPE logic trees, in which the Peak Ground Acceleration (PGA) parameter takes values up to 0.9 g. From the comparison of the updated seismic hazard map with NEAK2003, it appears that the latter significantly underestimates the seismic hazard, since most points are characterized by 1.5 to 2.5 times lower PGA values.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- 88

Before conducting PSHA calculations several rather subjective decisions must be made, such as the formulation of the source model and the GMPE logic trees, the definition of the minimum considered event magnitude, M_{min} , etc. To avoid the inevitable subjectivity of these criteria, a sensitivity analysis was carried out, to determine the controlling factors that affect PSHA results, as well as to study their spatial variability. For this reason, an OFAT (One Factor at A Time) sensitivity analysis was carried out in 42 selected sites. The controlling factors considered are the seismic source model (Source Model), the GMPE (GMPE), the number of standard deviations considered at their application (std), the Gutenberg-Richter (G-R) constants a and b, the maximum and minimum magnitude considered (M_{max} and M_{min} , respectively) and the dominant rupture type (SoF). Sensitivity analysis was performed for a parameter controlled primarily by the high-frequency spectral content (Peak Ground Acceleration or PGA) and a parameter affected by intermediate (3-10Hz) or even lower (1-2Hz) frequencies (Peak Ground Velocity or PGV). The analysis of the results shows that the controlling factors that mainly affect the PSHA results are the Source model (especially the uncertainties in the G-R parameters, a and b) and the GMPE. M_{max} mostly affects PGV, while having an almost negligible effect on PGA. The other factors are generally of minor importance. In addition, the spatial distribution of PSHA sensitivity on each input factor is examined and is quantitatively related to the level of seismic hazard.

For the computational needs of this thesis, two codes were created, one to produce synthetic seismicity catalogs and one for the PSHA calculations, with the use of the Monte Carlo simulation method. To account for the different types of distances from the seismic source considered in the recently published GMPE (e.g. ASK14, BSSA14, CB14, CY14, Ca15) three new statistical conversion relations between the different types of distances are created and evaluated: conversion of epicentral distance (R_{epi}) to Joyner Boore distance (R_{JB}), conversion of hypocentral distance (R_{hypo}) to rupture distance (R_{rup}) and conversion of R_{epi} to the distance measured perpendicular to the strike of the fault (R_x). PSHA results using these statistical relationships were compared and evaluated with PSHA results evaluated by calculating the distances geometrically (taking fault geometry into account), showing a generally good agreement. In this way, we verified that the use of statistical distance conversion relations is a safe approach for those cases where their geometrical calculation is not possible (e.g. unknown fault geometry) or is very demanding (e.g. in computing resources).

The main objective of the thesis was the seismic hazard deaggregation, i.e. the "reverse" process of PSHA, through which the characteristics of the most possible earthquake/s (e.g. size, coordinates, distance) that may result in strong ground motion exceeding the calculated level of seismic hazard of a site. This knowledge is particularly critical for seismic design decisions, since the earthquakes characteristics

that may cause e.g. the same PGA level at different sites of interest (or even at the same site) can be very different. The results of 3D and 4D seismic hazard deaggregation regarding 42 indicative sites of the Greek area are presented, both using the above-mentioned seismic source models separately, along with the proposed source model logic tree. The results show that most sites are mainly affected by earthquakes occurring within the seismic source to which they belong, with a magnitude of M5.0-6.0 at close distances (up to 20 km) and by earthquakes of larger magnitudes (M>6.0) at farther distances (up to 50 km). In addition, many sites are affected both by nearby earthquakes (up to 50 km) occurring within the source to which they belong and by more distant earthquakes (up to 100 km) of large magnitude (M>7.0). These remote sources belong to seismotectonic zones that describe large, well-known tectonic structures of the broader Aegean area, such as the S. Aegean subduction zone (outer Hellenic arc) or the dextral horizontal strike slip fault of the N. Aegean Trough.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

The results of this thesis can significantly contribute to decision-making related to PSHA, especially in the direction of determining the factors and scientific developments for the reduction of epistemic uncertainty. At the same time, they provide a useful tool for the application of recently published GMPE to the PSHA estimation. In addition, they contribute to the knowledge regarding the seismic hazard of the broader Aegean area, since the results highlight problems of the currently employed levels, which indicates the need to revise the current regulatory framework. Finally, the results of the deaggregation are particularly useful both for carrying out Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA) at a local level (e.g., for the main scenarios that emerge from the deaggregation analysis), as well as for the seismic design of conventional or special infrastructure.



Η παρούσα διδακτορική διατριβή με τίτλο Πιθανολογική εκτίμηση και αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας του Ελληνικού χώρου με τη συγκριτική αξιολόγηση αριθμητικών μεθόδων και αναλύσεων με τη χρήση συνθετικών καταλόγων υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του δεύτερου κύκλου του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Κύριο στόχο της διατριβής αποτελεί η διερεύνηση των προϋποθέσεων για τη δημιουργία ενός επικαιροποιημένου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου, η αποάθροισή της, και η διενέργεια Ανάλυσης Ευαισθησίας της σεισμικής επικινδυνότητας σε διάφορους παράγοντες που τη διαμορφώνουν.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Α.Π.Θ

ωλογίας

Στο **1° Κεφάλαιο** περιγράφονται οι βασικές αρχές της σεισμικής επικινδυνότητας και οι τρόποι υπολογισμού της, με έμφαση στην Πιθανολογική Εκτίμηση της Σεισμικής Επικινδυνότητας (ΠΕΣΕ). Γίνεται παρουσίαση της αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας και των τρόπων με τους οποίους αυτή μπορεί να γίνει. Τέλος, περιγράφονται τα κύρια τεκτονικά στοιχεία και η σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής μελέτης, δηλαδή του Ελληνικού χώρου.

Στο **2° Κεφάλαιο** γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των διαθέσιμων για την περιοχή μελέτης μοντέλων επιφανειακών σεισμικών πηγών, καθώς και των κυριότερων πρόσφατα δημοσιευμένων εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης, με σκοπό τον σχηματισμό των τελικών λογικών δέντρων της ΠΕΣΕ που θα συμβάλλουν στη μέγιστη μείωση της επιστημικής αβεβαιότητας. Αυτά τα λογικά δέντρα χρησιμοποιούνται για τον σχηματισμό ενός επικαιροποιημένου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας των επιφανειακών σεισμών για τον Ελληνικό χώρο, ο οποίος παρουσιάζεται στο τέλος του κεφαλαίου και συγκρίνεται με τον ΝΕΑΚ2003.

Το **3° Κεφάλαιο** αφορά στην Ανάλυση Ευαισθησίας των υπολογισμών ΠΕΣΕ στους παράγοντες που καθορίζουν τη σεισμική επικινδυνότητα. Γίνεται περιγραφή των ορισμών της Ανάλυσης Ευαισθησίας και των τρόπων εργασίας για την επίτευξή της, ενώ δίνεται έμφαση στην Ανάλυση Ευαισθησίας τύπου OFAT, η οποία διενεργήθηκε στην παρούσα διατριβή. Γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της και των συμπερασμάτων που εξάγονται από αυτά.

Στο **4° Κεφάλαιο** παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας των αλγορίθμων παραγωγής συνθετικών σεισμικών καταλόγων και διενέργειας ΠΕΣΕ με μια μέθοδο προσομοίωσης τύπου Monte Carlo. Επιπλέον, γίνεται λεπτομερής περιγραφή όλων των ειδών αποστάσεων μεταξύ της σεισμικής πηγής και του σημείου ενδιαφέροντος, και παρουσιάζονται τρεις νέες σχέσεις στατιστικής μετατροπής ενός είδους αποστάσεως σε κάποιο άλλο οι οποίες δημιουργήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Στο 5° Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας για πολυάριθμες θέσεις της περιοχής μελέτης, τόσο βάσει μεμονωμένων μοντέλων σεισμικών πηγών, όσο και με χρήση του λογικού τους δέντρου, όπως αυτό προτείνεται στο δεύτερο κεφάλαιο. Βάσει των αποτελεσμάτων αυτών γίνεται αξιολόγηση των μοντέλων σεισμικών πηγών.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στο **6° Κεφάλαιο** περιλαμβάνονται η σύνοψη της εργασίας, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτήν και προτάσεις για μελλοντική εργασία στο αντικείμενο.

Στο σημείο αυτό θέλω να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν και έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Πρώτα από όλα, ιδιαίτερη μνεία οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή και μέντορά μου κ. Κώστα Παπαζάχο για τον ρόλο του στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας, αλλά και για τη συμβολή του στην έως τώρα σταδιοδρομία μου. Τον ευχαριστώ θερμά για την ανάθεση του θέματος, την καθοδήγηση, την ενθάρρυνση και την πολύτιμη βοήθειά του. Ο τρόπος εργασίας του, η αφοσίωσή του στην επιστήμη μας και κυρίως ο χαρακτήρας του αποτελούν πηγή έμπνευσης και πρότυπο για εμένα. Η πολύπλευρη υποστήριξή του —όχι μόνον σε επιστημονικό, αλλά και σε προσωπικό επίπεδο καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών— και οι ευκαιρίες που απλόχερα μου προσέφερε υπήρξαν πραγματικά πολύτιμες.

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τα υπόλοιπα μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, η συνεργασία μου με τα οποία είχε ξεκινήσει πριν από την έναρξη εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής: τον κ. **Βασίλειο Μάργαρη**, Διευθυντή Ερευνών του ΙΤΣΑΚ-ΟΑΣΠ, για τις εύστοχες παρατηρήσεις του και για τις ιδέες που μου έδωσε. Επιπλέον, τον ευχαριστώ για τις συμβουλές, για τις επιστημονικές υποδείξεις του, καθώς και για το γεγονός ότι ήταν πάντα πρόθυμος να μου προσφέρει ουσιαστική βοήθεια σε οποιοδήποτε πρόβλημα ή ανάγκη προέκυπτε.

Ευχαριστώ θερμά τον κ. **Χρήστο Παπαϊωάννου**, Διευθυντή Ερευνών του ΙΤΣΑΚ-ΟΑΣΠ, για την εξαιρετική συνεργασία μας, για τις επιστημονικές του υποδείξεις και παρατηρήσεις, και επειδή μου ανέθεσε την πρώτη μου ερευνητική εργασία ως Σεισμολόγου. Επίσης, εκτιμώ βαθύτατα το προσωπικό ενδιαφέρον που εξέφραζε για προβλήματα που αντιμετώπισα, επιστημονικού αλλά και προσωπικού χαρακτήρα.

Ακόμη, ευχαριστώ τα υπόλοιπα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής (Καθηγητές, Παναγιώτη Χατζηδημητρίου, Βασίλειο Καρακώστα, Εμμανουήλ Σκορδύλη και Αναστάσιο Σέξτο), για την τιμή που μου έκαναν να συμμετάσχουν σε αυτήν και για τις παρατηρήσεις και διορθώσεις τους επί του τελικού κειμένου της διατριβής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στα μέλη του Τομέα Γεωφυσικής, Δ.Ε.Π., Ε.Δ.Ι.Π. και στους Υποψήφιους Διδάκτορες για την ομαλή και αρμονική συνεργασία μας. Ειδικά ευχαριστώ τον επιστήθιο φίλο **Νίκο Χατζή**, με τον οποίο μοιραζόμασταν καθημερινά όλες τις ευχάριστες στιγμές και τις δυσκολίες των μεταπτυχιακών μας σπουδών, όπως και τους υπόλοιπους φίλους και συγκατοίκους στο γραφείο για το ευχάριστο κλίμα που επικρατούσε: τον Δημήτρη Χορόζογλου, τη Νεκταρία Διαμαντή, τον Πρόδρομο Λούβαρη, τον Δημήτρη Οικονόμου και τον Χρήστο Κουρούκλα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τελευταίες αλλά εξίσου σημαντικές είναι οι ευχαριστίες μου προς την οικογένειά μου, χωρίς την οποία θα ήταν αδύνατο να ολοκληρώσω τις σπουδές μου: τους γονείς μου **Σταύρο** και **Ευαγγελία** και την αδελφή μου **Ασπασία** για την ηθική και οικονομική υποστήριξή τους, και κυρίως για την αμέριστη αγάπη τους σε όλη τη διάρκεια της ζωής μου. Τους εκφράζω την αγάπη μου και τον θαυμασμό μου.

Αθανασία Κερκένου





ΠΕΡΙΛΗΥ	νн		VIII	
ABSTRAC	ст		XII	
ΠΡΟΛΟΓ	ΟΣ		XVI	
ΚΕΦΑΛΑ	10 1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1	
1.1.	ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ		2	
1.2.	ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΜΕΤΡΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ			
1.3.	ΑΙΤΙΟΚΡΑΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ (ΑΕΣΕ)			
1.4.	ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ (ΠΕΣΕ)			
1.4.	1.	Χωρική αβεβαιότητα	9	
1.4.2.		Αβεβαιότητα μεγέθους	11	
1.4.3.		Χρονική αβεβαιότητα	15	
1.4.4.		Εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης (GMPE)	16	
1.4.5.		Πιθανολογικοί υπολογισμοί και καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας	19	
1.4.6.		Λογικά Δέντρα και Διαχείριση Αβεβαιοτήτων	21	
1.5.	ΠΕΣΕ	ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΥΠΟΥ MONTE CARLO	22	
1.6.	ΠΕΣΕ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ (GUMBEL)			
1.7.	ΛΟΓΙ	ΣΜΙΚΑ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΕΣ ΠΕΣΕ	26	
1.8.	АПО	ΑΘΡΟΙΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ	30	
1.9.	ΠΕΡΙ	ΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	36	
1.9.1. Σεισμοτεκτονικό καθεστώς της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου		36		
1.9.2.		Παλαιότερες έρευνες σεισμικής επικινδυνότητας για την Ελλάδα	40	
1.9.	3.	Χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας για την Ελλάδα	41	
1.10.	ΣΤ	ΟΧΟΙ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	44	
ΚΕΦΑΛΑ	IO 2.	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ	KAI	
ΑΠΟΣΒΕ	ΣΗΣ ΤΙ	ΙΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΥΡΥΤΕΡΟ ΧΩΡΟ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ	47	
2.1.	MON	ΙΤΕΛΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ	47	
2.2.	MON	ΙΤΕΛΑ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΒΑΘΟΥΣ	71	
2.3.	ΣΥΓΚ	ΡΙΣΗ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΕΣΕ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΜΟΝΤΕΛΟ	74	
2.4.	ΕΠΙΚ	ΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΥΠΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΓΕΝΕΣΗΣ	79	
2.5.	ΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΙΣΧΥΡΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ 80			
2.6. EYPYT	ΔΗΜ ΈΡΟ Χ	ΙΟΥΡΓΙΑ ΤΕΛΙΚΟΥ ΛΟΓΙΚΟΥ ΔΕΝΤΡΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΠΕΣΕ ΓΙΑ ΤΟΝ ΩΡΟ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ	94	

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη ΟΕΟΣΡΑΓΤΟΓΙ 2.7. ΝΕΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΑΥΝΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΥΡΥΤΕΡΟ ΧΟΡΟ ΤΟΥ	
μαιταιογωλογίας	96
2.7.1. Σύγκριση του νέου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας με τον ΝΕΑΚ2003	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΠΕΣΕ	105
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	105
3.2. ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	108
3.3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΟΓΑΤ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	110
3.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	114
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΕΣΕ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΛΟΓΩΝ	133
4.1. ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΛΟΓΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ	133
4.1.1. Αριθμός συνθετικών σεισμών ανά ζώνη και ανά πληρότητα μεγέθους	134
4.1.2. Χρονική κατανομή συνθετικών σεισμών	135
4.1.3. Χωρική κατανομή συνθετικών σεισμών	136
4.1.4. Κατανομή βαθών συνθετικών σεισμών	138
4.1.5. Κατανομή μεγεθών συνθετικών σεισμών	139
4.1.6. Λοιπά στοιχεία διαρρήξεων των συνθετικών καταλόγων	141
4.2. ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ ΤΩΝ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨ ΤΗΣ ΙΣΧΥΡΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ	νΗΣ 142
4.2.1. Είδη αποστάσεων και γεωμετρικός τους υπολογισμός	142
4.2.2. Υπολογισμός της Rrup με χρήση παραμετρικών εξισώσεων και σύγκριση τον γεωμετρικό υπολογισμό της	με 146
4.2.3. Νέες στατιστικές σχέσεις μετασχηματισμού αποστάσεων με χρήση συνθετικών δεδομένων	148
4.2.4. Σύγκριση ΠΕΣΕ με γεωμετρικό και στατιστικό υπολογισμό αποστάσεων .	156
4.3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΕΣΕ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ	160
4.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΕΣΕ ΑΠΟ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ OPENQUAKE ΚΑΙ ΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	162
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΑΘΡΟΙΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ	165
5.1. ΑΠΟΑΘΡΟΙΣΗ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥΣ ΚΑΤΑΛΟΓΟΥΣ	165
5.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΩΝ ΘΕΣΕΩΝ	167
5.3. ΣΥΝΟΨΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	184
5.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΣΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΠΟΑΘΡΟΙΣΗΣ .	193
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	195
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	209
ПАРАРТНМА А	229
ПАРАРТНМА В	237



Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ΦΡΔΣ

Α.Π.Θ

Ο Ελληνικός χώρος αποτελεί μια εξαιρετικά σεισμογενή περιοχή. Τα αποτελέσματα των σεισμών, όπως οι θάνατοι, οι βλάβες στις τεχνικές κατασκευές και οι οικονομικές επιπτώσεις, είναι ευρέως γνωστά και προβληματίζουν συχνά τις κοινωνίες που διαβιούν σε σεισμογενή περιβάλλοντα. Επομένως, αποτελεί ζήτημα ζωτικής σημασίας η προστασία τους από τους σεισμούς. Η Τεχνική Σεισμολογία αποτελεί τον κλάδο της Σεισμολογίας που ασχολείται με τον υπολογισμό της έντασης των σεισμικών κινήσεων οι οποίες δύνανται να πλήξουν μια περιοχή, με στόχο την αποκόμιση αποτελεσμάτων που θα αξιοποιούνται μετέπειτα στον ορθολογικό αντισεισμικό σχεδιασμό των κτιρίων. Ασχολείται με τη μελέτη του συνόλου των παραγόντων που επηρεάζουν τη σεισμική κίνηση, δηλαδή τη σεισμική πηγή, τον δρόμο διάδοσης του σεισμικού κύματος και τις εδαφικές συνθήκες του τελικού σημείου παρατήρησης (κτίριο, περιοχή ενδιαφέροντος κ.λπ.).

Με τον όρο σεισμική επικινδυνότητα περιγράφεται η αναμενόμενη τιμή κάποιου σεισμικού μεγέθους (π.χ. ένταση, επιτάχυνση κ.λπ.) με συγκεκριμένη πιθανότητα υπέρβασης για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου έχουν γίνει πολλές μελέτες σεισμικής επικινδυνότητας με διαφορετικές μεθόδους (στοχαστικές και πιθανολογικές), οι οποίες αξιοποίησαν την τεχνογνωσία της εποχής υλοποίησής τους. Αυτές προσδιορίζουν την επιρροή τριών βασικών παραγόντων στη σεισμική κίνηση: των χαρακτηριστικών των σεισμικών πηγών, του δρόμου διάδοσης (π.χ. εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης) και των εδαφικών συνθηκών του σημείου ενδιαφέροντος (π.χ. ταχύτητα εγκαρσίων κυμάτων στα πρώτα 30 m βάθους, γραμμική και μη-γραμμική απόκριση του εδάφους κ.λπ.). Τα τελευταία χρόνια έχει διεξαχθεί πλήθος νέων μελετών οι οποίες προσομοιάζουν πολλούς παράγοντες που επηρεάζουν τη σεισμική κίνηση και οι οποίοι δεν έχουν ληφθεί υπόψη σε παλαιότερες έρευνες, με αποτέλεσμα ο χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας να χρήζει επικαιροποίησης, όπως αναλύεται και σε επόμενο κεφάλαιο. Στόχος της παρούσας διατριβής είναι η δημιουργία ενός επικαιροποιημένου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας για τον Ελληνικό χώρο, με τη χρήση των υφιστάμενων και νέων μοντέλων σεισμικών πηγών και εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης (Ι.Σ.Κ.), έπειτα από τη λεπτομερή συγκριτική αξιολόγησή τους.

Ένα ακόμη στοιχείο που δεν έχει μελετηθεί επαρκώς για την Ελλάδα είναι η αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας, δηλαδή ο λεπτομερής προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των σεισμών που επηρεάζουν τα μεγαλύτερα αστικά κέντρα, όπως το μέγεθος, οι αποστάσεις και οι σεισμικές πηγές από τις οποίες προέρχονται. Η αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας αποτελεί ένα από τα βασικά αντικείμενα μελέτης της παρούσας διατριβής. Τέλος, δεν έχει γίνει ποτέ για τον Ελληνικό χώρο Ανάλυση Ευαισθησίας της σεισμικής επικινδυνότητας σε σχέση με τους παράγοντες που την καθορίζουν, προκειμένου να εντοπιστούν οι πιο σημαντικοί και να βοηθήσουν τον εκάστοτε ερευνητή να λάβει αποφάσεις σχετικές με τις μελέτες σεισμικής επικινδυνότητας, οι οποίες συχνά βασίζονται στα δικά του υποκειμενικά κριτήρια. Στην παρούσα διατριβή γίνεται για πρώτη φορά Ανάλυση Ευαισθησίας και αναδεικνύονται παράγοντες στους οποίους πρέπει αφενός να δίνεται περισσότερη σημασία και αφετέρου να επικεντρωθεί η σχετική έρευνα.

1.1. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ως σεισμικός κίνδυνος, *R* (seismic risk), ορίζεται ο αναμενόμενος βαθμός σεισμικής βλάβης που μπορεί να πλήξει μια τεχνική κατασκευή. Αυτός εξαρτάται από τις σεισμικές κινήσεις οι οποίες αναμένεται να ασκηθούν στα όρια της τεχνικής κατασκευής (σεισμική επικινδυνότητα) και από την απόκριση της ίδιας της κατασκευής σε αυτές (τρωτότητα). Με τον όρο σεισμική επικινδυνότητα, *H* (seismic hazard), περιγράφεται η αναμενόμενη τιμή σεισμικής έντασης, *Y*, σε έναν τόπο, η οποία αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και έχει μια συγκεκριμένη πιθανότητα υπέρβασης. Ως σεισμική ένταση μπορεί να νοηθεί είτε η μακροσεισμική ένταση είτε κάποια παράμετρος της σεισμικής κίνησης (π.χ. ο λογάριθμος της εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας ή μετάθεσης, φασματικές τιμές κ.λπ.). Τέλος, ως *τρωτότητα, V* (vulnerability), μιας τεχνικής κατασκευής νοείται ο αναμενόμενος τρόπος απόκρισής της στις σεισμικές κινήσεις. Αυτή εξαρτάται κυρίως από τα τεχνικά της χαρακτηριστικά, όπως τη γεωμετρία της, την ποιότητα και το είδος των υλικών, την ιδιοπερίοδο, την πλαστιμότητα και τον παράγοντα απόσβεσης.

Η σχέση που δείχνει την εξάρτηση του σεισμικού κινδύνου από τη σεισμική επικινδυνότητα και τη σεισμική τρωτότητα είναι η εξής:

$$R = H * V \tag{1.1}$$

όπου, *, το σύμβολο της συνέλιξης. Από αυτή τη σχέση είναι φανερό ότι η μείωση του σεισμικού κινδύνου, δηλαδή των επιπτώσεων των σεισμών, μπορεί να επιτευχθεί με μείωση της τρωτότητας των σεισμικών κατασκευών, εφόσον η σεισμική επικινδυνότητα έχει φυσικά αίτια σχετιζόμενα με τις ιδιότητες της σεισμικής πηγής, του δρόμου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων και της θέσης της κατασκευής. Η μείωση της σεισμικής τρωτότητας επιτυγχάνεται με τη λεπτομερή μελέτη των αναμενόμενων σεισμικών κινήσεων. Για αυτόν τον λόγο, η αξιόπιστη εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας έχει πρωταρχική σημασία για τον αντισεισμικό σχεδιασμό. ..2. ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΜΕΤΡΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Η σεισμική επικινδυνότητα μιας περιοχής εξαρτάται από το επίπεδο σεισμικότητάς της, το οποίο -όταν θεωρείται ότι οι κύριοι σεισμοί ακολουθούν κατανομή Poisson, δηλαδή είναι χρονικά ανεξάρτητοι- περιγράφεται συνήθως από τον Νόμο κατανομής μεγεθών Gutenberg-Richter (G-R) ή από ανάλογες ποσοτικές σχέσεις. Σύμφωνα με αυτόν, ο αριθμός, N_t, των σεισμών μεγέθους μεγαλύτερου ή ίσου της τιμής *M* (σε χρονικό διάστημα *t* ετών) σχετίζεται με το μέγεθος των σεισμών με την εξής σχέση:

$$logN_t = a_t - bM \tag{1.2}$$

όπου, a, b, οι σταθερές G-R.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Α.Π.Θ

ήμα Γεωλογίας

Η σταθερά *α* περιγράφει το συνολικό επίπεδο σεισμικότητας της περιοχής, δηλαδή όσο υψηλότερη είναι η τιμή της, τόσο υψηλότερο είναι και το επίπεδο σεισμικότητας. Η τιμή της εξαρτάται από το χρονικό διάστημα *t* και από το εμβαδόν (*S*) της περιοχής στην οποία αναφέρεται. Η σταθερά *b* εξαρτάται κυρίως από τα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά της περιοχής, όπως τις μηχανικές ιδιότητες του φλοιού στον χώρο της εστίας του σεισμού και τις σχετικές τάσεις, και συνήθως παίρνει τιμές μεταξύ -0.8 και -1.2.

Για το χρονικό διάστημα ενός έτους, η εξίσωση (1.2) γράφεται:

$$logN_1 = a_1 - bM \tag{1.3}$$

όπου, a_1 , η ανηγμένη παράμετρος, a_t , για διάστημα ενός έτους ($a_1=a_t$ - logt).

Πολλές φορές επιδιώκεται η συγκριτική αξιολόγηση του επιπέδου σεισμικότητας δύο περιοχών. Σε αυτές τις περιπτώσεις γίνεται αναγωγή της παραμέτρου *a* σε χρονικό διάστημα ενός έτους (*a*₁), αλλά και σε ίδια μονάδα εμβαδού (π.χ. 10⁴ km²), καθώς η παράμετρος *a* εξαρτάται και από αυτό. Επομένως, η σχέση (1.3) αποκτά την εξής μορφή:

$$\log N^* = a^* - bM \tag{1.4}$$

όπου, N^* , ο αριθμός των σεισμών μεγέθους M ή μεγαλύτερου που συμβαίνουν σε μία μονάδα χρόνου και εμβαδού (π.χ. 1 έτος και 10^4 km²). Ισχύει ότι $a^* = a_1 - logS = a - logt - logS + logS^{ref}$, όπου, S^{ref} , η επιφάνεια αναγωγής (π.χ. $S^{ref} = 10^4$ km²).

Ανάλογες σχέσεις ισχύουν και όταν θεωρείται μια οποιαδήποτε παράμετρος σεισμικής έντασης, Υ, αντί του μεγέθους, όπως η μακροσεισμική ένταση και οι λογάριθμοι της επιτάχυνσης, της ταχύτητας και της μετάθεσης. Η παράμετρος Υ παίρνει τιμές οι οποίες ακολουθούν τον νόμο G-R. Επομένως, κατ' αναλογία, για το χρονικό διάστημα ενός έτους μπορεί να γραφεί ότι:

$$logN_1 = a_1 - bY \tag{1.5}$$

Υπάρχουν δύο βασικά μέτρα ποσοτικής απεικόνισης της σεισμικής επικινδυνότητας. Σύμφωνα με το πρώτο, ως μέτρο σεισμικής επικινδυνότητας ενός τόπου ορίζεται η πιθανότητα, *P*, η ένταση της σεισμικής κίνησης να υπερβεί μια προκαθορισμένη τιμή της, *y*, σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα (π.χ. ενός έτους). Σύμφωνα με το δεύτερο, το μέτρο της σεισμικής επικινδυνότητας ορίζεται ως η τιμή, *Y*, της σεισμικής κίνησης η οποία έχει προκαθορισμένη πιθανότητα υπέρβασης σε ορισμένο χρονικό διάστημα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στην εξίσωση (1.5) ο όρος a_1 παριστάνει τον λογάριθμο του ετήσιου αριθμού, N_1 , των σεισμών που προκαλούν ένταση μεγαλύτερη ή ίση μιας προκαθορισμένης τιμής. Επομένως, ισχύει ότι $logN_1 = a_1$ ή

$$N_1 = 10^{a1}$$
(1.6)

Ως μέση περίοδος επανάληψης, Τ, των σεισμών που προκαλούν ένταση Υ ή μεγαλύτερη ορίζεται το αντίστροφο της συχνότητας των σεισμών, δηλαδή του μέσου ετήσιου αριθμού Ν₁.

$$T = 1/N_1$$
 (1.7)

Εκτός από τη σχέση κατανομής των εντάσεων (σχέση 1.5) χρησιμοποιείται και η κατανομή Poisson για τον προσδιορισμό της σεισμικής επικινδυνότητας, δηλαδή της πιθανότητας υπέρβασης, *P*_t, της τιμής *Y* σε ορισμένο χρονικό διάστημα *t*. Η χρήση της κατανομής Poisson υποδηλώνει ότι οι κύριοι σεισμοί θεωρούνται τυχαία σεισμικά γεγονότα. Σύμφωνα με αυτήν, η πιθανοτική κατανομή του αριθμού, *n*, των σεισμών που προκαλούν σεισμική κίνηση ορισμένης έντασης σε ένα έτος δίνεται από τη σχέση

$$f(nt) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!}$$
(1.8)

όπου, f(nt), είναι η πιθανότητα να συμβεί n αριθμός σεισμών στη μονάδα του χρόνου και, λ, ο μέσος αριθμός σεισμών στη μονάδα του χρόνου. Όπως αναφέρθηκε, η εφαρμογή της κατανομής Poisson υποθέτει ότι οι κύριοι σεισμοί αποτελούν χωρικά και χρονικά ανεξάρτητα γεγονότα και ότι η πιθανότητα να συμβούν δύο σεισμοί ταυτόχρονα στον ίδιο χώρο τείνει στο μηδέν.

Από τις σχέσεις (1.5) και (1.8) αποδεικνύεται ότι η πιθανότητα υπέρβασης, *P*_t, μιας τιμής *Y* σε χρονικό διάστημα *t* ετών δίνεται από τη σχέση:

$$P_t = 1 - exp(-t/T)$$
 (1.9)

Από τη σχέση (1.9) φαίνεται ότι η πιθανότητα υπέρβασης της τιμής Υ σε χρονικό διάστημα ίσο με τη μέση περίοδο επανάληψής της (*t=T*) είναι ίση με 0.632.

Μία ακόμη ποσότητα που χρησιμοποιείται συχνά στη σεισμική επικινδυνότητα αποτελεί η συχνότερα παρατηρούμενη μέγιστη ένταση, *Υ*, σε μια περιοχή σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα *t* και δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{\mathbf{Y}}_{t} = \frac{a_{1}}{b} + \frac{\log t}{b}$$
(1.10)

Αν στη σχέση (1.10) θεωρηθεί διάστημα ενός έτους (t=1) προκύπτει ο τύπος της συχνότερα παρατηρούμενης ετήσιας μέγιστης έντασης, \bar{Y}_1 :

$$\bar{\mathbf{Y}}_1 = \frac{a_1}{b} \tag{1.11}$$

Τέλος, η τιμή της έντασης, *Y*_t, η οποία έχει συγκεκριμένη πιθανότητα υπέρβασης σε χρονικό διάστημα *t* δίνεται από τη σχέση:

$$Y_t = \frac{loge}{b} (lnN_1 t - ln[-ln(1 - P_t)])$$
(1.12)

Ο υπολογισμός της σεισμικής επικινδυνότητας μίας θέσης ενδιαφέροντος γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με δύο είδη αναλύσεων, την Αιτιοκρατική (ΑΕΣΕ – Αιτιοκρατική Εκτίμηση Σεισμικής Επικινδυνότητας) και την Πιθανολογική (ΠΕΣΕ – Πιθανολογική Εκτίμηση Σεισμικής Επικινδυνότητας). Και οι δύο παρουσιάζονται στη συνέχεια.

1.3. ΑΙΤΙΟΚΡΑΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ (ΑΕΣΕ)

Η Αιτιοκρατική Εκτίμηση της Σεισμικής Επικινδυνότητας (ΑΕΣΕ) αποτελεί την ιστορικά πρώτη σχετική προσέγγιση. Βασίζεται συνήθως στην ιδέα προσδιορισμού του χειρότερου σεναρίου, δηλαδή του πιο καταστροφικού σεισμού που πιθανώς θα πλήξει μια περιοχή. Ωστόσο, η επιλογή του χειρότερου σεναρίου πολλές φορές αποδεικνύεται δύσκολη, καθώς επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες και συχνά εμπεριέχει μεγάλες αβεβαιότητες.

Κατά τη διενέργεια μιας ΑΕΣΕ ακολουθούνται τέσσερα βήματα (Reiter, 1990):

- 1. Προσδιορισμός των σεισμικών πηγών.
- 2. Προσδιορισμός του χειρότερου σεναρίου του σεισμού.
- Εφαρμογή μιας εμπειρικής σχέσης πρόβλεψης της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης (Ι.Σ.Κ.).
- Υπολογισμός της τιμής της έντασης της παραμέτρου που εξετάζεται (π.χ. μακροσεισμική ένταση - Ι_{MM}, μέγιστη εδαφική επιτάχυνση - PGA, ταχύτητα -PGV ή μετάθεση - PGD, μέγιστη φασματική επιτάχυνση - PSA κ.λπ.).

Οι σεισμικές πηγές μπορούν να είναι σημειακές, γραμμικές (ρήγματα) ή επιφανειακές. Συνήθως προτιμώνται οι επιφανειακές σεισμικές πηγές, διότι η ακρίβεια ενός σημείου ή μιας σεισμικής γραμμής (π.χ. ρήγματα) ενδεχομένως δεν αντικατοπτρίζει τη γνώση της ενεργού τεκτονικής (ή την έλλειψή της), π.χ. του μηχανισμού των σεισμών (Green and Hall, 1994). Η επιλογή του χειρότερου σεισμού που κάθε πηγή δύναται να προκαλέσει είναι συχνά υποκειμενική και εξαρτάται συν τοις άλλοις από το είδος της κατασκευής η οποία δυνητικά θα καταρρεύσει εξαιτίας

αυτού του σεισμού. Για κατασκευές που έχουν μικρή επικινδυνότητα, χειρότερος σεισμός θεωρείται αυτός που αναμένεται να συμβεί κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Ως σεισμοί σχεδιασμού επιλέγονται συνήθως αυτοί που έχουν αναμενόμενη μέση περίοδο επανάληψης 475 ετών. Όσον αφορά τις κατασκευές μεγάλης σημαντικότητας, χειρότερος σεισμός θεωρείται αυτός που έχει το μέγιστο μέγεθος (*M_{max}*) το οποίο μπορεί να προκαλέσει η σεισμική πηγή. Με υποκειμενικά κριτήρια γίνεται επίσης η επιλογή του είδους της απόστασης μεταξύ της σεισμικής πηγής και του σημείου για το οποίο επιχειρείται η ΑΕΣΕ (επικεντρική απόσταση, υποκεντρική απόσταση, κοντινότερη από τη διάρρηξη απόσταση κ.λπ.).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Θεμελιώδες αρχικό στάδιο αποτελεί η επιλογή του μεγίστου μεγέθους, Mmax, που μπορεί να συμβεί στο κοντινότερο στο σημείο μελέτης ρήγμα ή σε όποια άλλη σεισμική πηγή έχει επιλεγεί. Παρόλο που θεωρητικά φαντάζει μια εύκολη διαδικασία, στην πράξη ενδέχεται να προκύψουν δυσκολίες, διότι τα περισσότερα σημεία δεν επηρεάζονται από μία σεισμική πηγή μόνον, αλλά από πολλές οι οποίες έχουν ετερογενή χαρακτηριστικά. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα παρατίθεται στο Σχήμα 1.3.1, στο οποίο παρουσιάζεται ένα σημείο που βρίσκεται κοντά σε δύο ρήγματα. Το πρώτο ρήγμα απέχει 10 km και έχει M_{max} ίσο με 6.5 και το δεύτερο βρίσκεται σε απόσταση 20 km, με M_{max} ίσο με 7.5 (Σχήμα 1.3.1a). Στο Σχήμα 1.3.1b φαίνεται ότι από το μικρότερο ρήγμα προκύπτουν μεγαλύτερα πλάτη φασματικών επιταχύνσεων στις μικρές περιόδους, ενώ στο μεγαλύτερο ρήγμα τα μεγαλύτερα φασματικά πλάτη αντιστοιχούν στις μεγάλες περιόδους. Ως εκ τούτου, στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν είναι εφικτός ο προσδιορισμός ενός μοναδικού σεισμού, επειδή η θεώρηση ενός μέσου φάσματος δεν αντιστοιχεί σε καμία πραγματική σεισμική πηγή. Μία επιπλέον δυσκολία προκύπτει στον χαρακτηρισμό του Mmax όταν γίνεται χρήση επιφανειακής σεισμικής πηγής (είτε επειδή οι σεισμικές πηγές που επηρεάζουν το σημείο παρατήρησης δεν είναι πλήρως προσδιορισμένες είτε για άλλους λόγους), καθώς σε αυτήν την περίπτωση ο σεισμός με το μέγιστο μέγεθος θεωρητικά γίνεται ακριβώς στην τοποθεσία του σημείου παρατήρησης (απόσταση 0 km), χωρίς να λαμβάνεται υπόψη πόσο πιθανό ή σπάνιο είναι να συμβεί εκεί κάποιος σεισμός. Τέλος, πολλές φορές η γνώση του *Μ_{max}* είναι ελλιπής, λόγω των περιορισμένων δεδομένων (π.χ. νεοτεκτονικών ή σεισμολογικών).



Σχήμα 1.3.1 a) Παράδειγμα από δύο σεισμικές πηγές (Fault A και B) που επηρεάζουν τη σεισμική επικινδυνότητα μιας θέσης (Site), b) Φάσμα επιτάχυνσης που προκύπτει από την κάθε πηγή για τη θέση ενδιαφέροντος (Baker, 2013).

Ακόμη μεγαλύτερη δυσκολία από τον προσδιορισμό του Mmax του χειρότερου σεναρίου σεισμού παρουσιάζει ο προσδιορισμός της μέγιστης έντασης που μπορεί να οφείλεται σε αυτό. Ο υπολογισμός της έντασης γίνεται συνήθως με τις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της *Ι.Σ.Κ.* (Ground Motion Prediction Equations – GMPE), οι οποίες είναι μαθηματικές σχέσεις που λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά της διάρρηξης, του δρόμου διάδοσης και των εδαφικών συνθηκών και παράγουν το αποτέλεσμα της σεισμικής επικινδυνότητας, δηλαδή την ένταση στο σημείο παρατήρησης (μέση τιμή) με το αντίστοιχο σφάλμα. Εντούτοις, συχνά οι πραγματικοί σεισμοί εμφανίζουν διασπορά γύρω από τις μέσες τιμές που υπολογίζουν οι εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. Στο Σχήμα 1.3.2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αυτού του είδους, από τον σεισμό του 1999 στο Chi-Chi της Ταϊβάν. Πρόκειται για τις τιμές φασματικής επιτάχυνσης για περίοδο ίση με 1 s σε συνάρτηση με την κοντινότερη στη διάρρηξη απόσταση. Οι παρατηρήσεις για αποστάσεις 1-3 km κυμαίνονται μεταξύ 0.15 g και 1 g, δηλαδή σχεδόν μίας τάξης μεγέθους. Η μαύρη καμπύλη αντιστοιχεί στις μέσες τιμές που υπολογίστηκαν από τη εμπειρική σχέση πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. που χρησιμοποιήθηκε, ενώ οι διακεκομμένες καμπύλες αντιστοιχούν σε μία τυπική απόκλιση (1σ) επάνω και κάτω από τη μέση τιμή. Η κατανομή της διακύμανσης των παρατηρήσεων γύρω από τη μέση τιμή ακολουθούν κανονική κατανομή. Στον προσδιορισμό της μέγιστης εδαφικής κίνησης που μπορεί να προκαλέσει ο χειρότερος σεισμός συνήθως θεωρείται σφάλμα ίσο με μία τυπική απόκλιση (1σ), γεγονός που σημαίνει ότι το 16% των δυσμενέστερων παρατηρήσεων δεν λαμβάνονται υπόψη, παρόλο που η κανονική κατανομή (θεωρητικά) δεν έχει όρια.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



<u>Σχήμα 1.3.2</u> Παράδειγμα φασματικών τιμών που υπολογίστηκαν για τον σεισμό Chi-Chi της Ταϊβάν (1999) και σύγκριση με τη διασπορά των πραγματικών παρατηρήσεων (Baker, 2013).

Είναι φανερό ότι οποιαδήποτε τιμή *M_{max}* και οποιαδήποτε τιμή μέγιστης έντασης και αν επιλεγούν, δεν αντιστοιχούν απόλυτα στο χειρότερο δυνατό σενάριο. Ακόμη και αν προσδιοριστεί ένας σεισμός του οποίου η επιλογή είναι θεωρητικά πολύ καλά τεκμηριωμένη, το αποτέλεσμα του υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας είναι πολύ ευάλωτο σε αποφάσεις που ελήφθησαν σχετικά με το επιλεγμένο σενάριο. Επιπλέον, η επιλογή αυτή δεν περιέχει πληροφορίες σχετικές με την πιθανότητα να συμβεί αυτός ο χειρότερος σεισμός, και μάλιστα στο σημείο στο οποίο υπολογίζεται ότι θα συμβεί. Ένα επιπρόσθετο μειονέκτημά της είναι ότι δεν εκτιμά την επιρροή των αβεβαιοτήτων που υπάρχουν σε καθένα από τα τέσσερα στάδιά της. Για τους παραπάνω λόγους η ΑΕΣΕ δεν προτιμάται συχνά, με αποτέλεσμα τις τελευταίες δεκαετίες η επιστημονική κοινότητα να έχει στρέψει το ενδιαφέρον της σε μεθόδους που βασίζονται σε πιθανολογικά σενάρια.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

1.4. ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ (ΠΕΣΕ)

Η Πιθανολογική Εκτίμηση της Σεισμικής Επικινδυνότητας (ΠΕΣΕ) επιλύει σε μεγάλο βαθμό τα προβλήματα της ΑΕΣΕ, επειδή, σε αντίθεση με εκείνη, συμπεριλαμβάνει τις αβεβαιότητες στον υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας. Αναπτύχθηκε αρχικά από τον Cornell (1968) και το πρώτο σύγχρονο πρόγραμμα για ηλεκτρονικούς υπολογιστές που την αξιοποιεί δημιουργήθηκε από τον McGuire (1976). Παρόλο που η συμπερίληψη των αβεβαιοτήτων καθιστά τους υπολογισμούς περίπλοκους, τα τελικά αποτελέσματα είναι πιο αξιόπιστα και αντιπροσωπευτικά. Η μέθοδος αξιοποιεί όλους τους πιθανούς σεισμούς όλων των μεγεθών και οποιασδήποτε απόστασης που μπορούν να προκαλέσουν αξιόλογη σεισμική κίνηση στο σημείο παρατήρησης, μαζί με τις αντίστοιχες πιθανότητες υπέρβασής της, προκειμένου να υπολογίσει το επίπεδο της αντίστοιχης έντασης της σεισμικής κίνησης.

Η ΠΕΣΕ διενεργείται σε τέσσερα βασικά βήματα (Reiter, 1990), τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 1.4.1:

- Προσδιορισμός όλων των πιθανών σεισμικών πηγών που μπορούν να πλήξουν το σημείο παρατήρησης, και της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της απόστασης κάθε πηγής.
- 2. Προσδιορισμός της κατανομής μεγεθών των σεισμών για κάθε πηγή.
- Εφαρμογή της εμπειρικής σχέσης πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. και των αβεβαιοτήτων της.
- 4. Κατασκευή της καμπύλης σεισμικής επικινδυνότητας με τη χρήση του Θεωρήματος Συνολικής Πιθανότητας (Total Probability Theorem).



Σχήμα 1.4.1 Τα τέσσερα στάδια της ΠΕΣΕ (Reiter, 1990). Επάνω αριστερά: Χαρακτηρισμός των πιθανών σεισμικών πηγών και των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας της απόστασης μεταξύ της πηγής και του σημείου. Επάνω δεξιά: Κατανομή μεγεθών για κάθε πηγή. Κάτω αριστερά: Εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. Κάτω δεξιά: Καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας.

1.4.1. Χωρική αβεβαιότητα

Ο χαρακτηρισμός των σεισμικών πηγών έγκειται στον προσδιορισμό των χωρικών χαρακτηριστικών τους και της χωροχρονικής κατανομής των σεισμών που μπορούν να λάβουν χώρα σε αυτές. Καθένα από αυτά τα χαρακτηριστικά περιέχει αβεβαιότητες. Οι σεισμικές πηγές ορίζονται με βάση τα διαθέσιμα γεωλογικά, γεωφυσικά και σεισμικά χαρακτηριστικά και δεδομένα. τεκτονικά, Πιο συγκεκριμένα, η γεωμετρία των σεισμικών πηγών εξαρτάται από τις τεκτονικές διεργασίες που οδήγησαν στον σχηματισμό τους. Για παράδειγμα, οι σεισμοί που σχετίζονται με ηφαιστειακή δραστηριότητα συνήθως προέρχονται από σεισμογενή μέρη των ηφαιστείων, τα οποία είναι τόσο μικρά ώστε πολλές φορές θεωρούνται σημειακές σεισμικές πηγές. Επίπεδα ρηγμάτων που είναι καλά προσδιορισμένα και μπορούν να γεννήσουν σεισμούς σε διαφορετικά σημεία τους θεωρούνται συχνά ως επιφανειακές πηγές δύο διαστάσεων (2D). Περιοχές που περικλείουν πολλά ρήγματα ή χαρακτηρίζονται από χαμηλή ή ενδιάμεση σεισμικότητα, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατος ο λεπτομερής προσδιορισμός τους, είναι δυνατόν να χαρακτηριστούν ως τρισδιάστατες ογκομετρικές πηγές. Στην ΠΕΣΕ χρησιμοποιούνται πολλά είδη σεισμικών πηγών (σημειακές, γραμμικές, επιφανειακές, σεισμικότητας υποβάθρου, περιφερειακές κ.λπ.). Στις αναλύσεις σεισμικής επικινδυνότητας ο χαρακτηρισμός των σεισμικών πηγών δεν εξαρτάται μόνον από τις πραγματικές

διαστάσεις ή το σχήμα τους, αλλά και από τη σχετική θέση (απόσταση) της πηγής και του σημείου ενδιαφέροντος. Μερικά παραδείγματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.4.2. Στο Σχήμα 1.4.2a απεικονίζεται ένα μικρό ρήγμα το οποίο βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από το σημείο παρατήρησης, συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί σημειακή πηγή. Στο Σχήμα 1.4.2b το βάθος του ρήγματος είναι μικρό, με αποτέλεσμα οι διακυμάνσεις του βάθους να μην επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την υποκεντρική απόσταση, επομένως -για να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί- αυτή η δισδιάστατη επιφανειακή σεισμική πηγή μπορεί να θεωρηθεί ως γραμμική. Τέλος, επειδή τα δεδομένα για την πηγή στο Σχήμα 1.4.2c δεν είναι αρκετά για τον λεπτομερή προσδιορισμό της, αυτή θεωρείται ως ογκομετρική.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 1.4.2 Παραδείγματα διαφορετικών ειδών σεισμικών πηγών: a) σημειακή, b) γραμμική και, c) τρισδιάστατη επιφανειακή ή ογκομετρική (Kramer, 1996).

Εκτός από τον χαρακτηρισμό των σεισμικών πηγών, το πρώτο βήμα της ΠΕΣΕ περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function, PDF) των αποστάσεων, *f(R)*. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η χωρική κατανομή των εστιών των πηγών θεωρείται ομογενής, δηλαδή ότι όλα τα σημεία της σεισμικής πηγής έχουν την ίδια πιθανότητα να φιλοξενήσουν κάποιον σεισμό. Υπάρχει η δυνατότητα θεώρησης μη-ομογενούς χωρικής κατανομής, όταν είναι διαθέσιμες οι σχετικές πληροφορίες (π.χ. μοντέλα μεταφοράς τάσεων, χρονικά εξαρτημένα μοντέλα σεισμικότητας κ.λπ.). Ωστόσο, η ομογενής χωρική κατανομή της σεισμικότητας μέσα στην πηγή δεν μεταφράζεται οπωσδήποτε και σε ομογενή κατανομή της απόστασης μεταξύ της πηγής και του σημείου παρατήρησης, επειδή οι εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. χρησιμοποιούν διαφορετικά είδη αποστάσεων, αλλά και λόγω της γεωμετρίας των πηγών. Για αυτόν το λόγο, οι αβεβαιότητες των αποστάσεων περιγράφονται με τις κατάληλες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας πιθανότητας.

Μερικά παραδείγματα υπολογισμού της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.4.3. Στο Σχήμα 1.4.3a η απόσταση μεταξύ του σημείου ενδιαφέροντος και της σεισμικής πηγής συμβολίζεται ως r_s . Δεδομένου ότι πρόκειται για την απόσταση R μεταξύ δύο σημείων, η πιθανότητα να ισχύει ότι $R=r_s$ ισούται με τη μονάδα, ενώ η πιθανότητα $R \neq r_s$ είναι μηδενική. Στο Σχήμα 1.4.3b δίνεται η PDF της απόστασης για μια γραμμική πηγή. Η πιθανότητα ένας σεισμός να συμβεί στο τμήμα του ρήγματος μεταξύ των σημείων L=l και L=l+dl είναι ίση με την πιθανότητα να συμβεί μεταξύ των αποστάσεων R=r και R=r+dr, δηλαδή ισχύει ότι:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

$$f_L(l)dl = f_R(r)dr \tag{1.13}$$

Όπου, $f_L(l)$ και $f_R(r)$, οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για τις μεταβλητές L και R, αντίστοιχα. Από τη σχέση (1.13) προκύπτει ότι:

$$f_R(r) = f_L(l) \frac{dl}{dr}$$
(1.14)

Δεδομένης της παραδοχής της ομογενούς κατανομής των σεισμών στο ρήγμα, ισχύει ότι $f_L(l) = l/L_f$. Επειδή $l^2 = r^2 - r^2_{min}$, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της απόστασης *R* δίνεται από τη σχέση:

$$f_R(r) = \frac{r}{L_f \sqrt{r^2 - r^2_{min}}}$$
(1.15)

Για τις ζώνες με περίπλοκη γεωμετρία (Σχήμα 1.4.3c) προτιμώνται οι αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας έναντι των αναλυτικών. Συνήθως ο υπολογισμός γίνεται με διαχωρισμό της σεισμικής πηγής σε μικρότερα τμήματα-όγκους, εκτίμηση της απόστασης *R* για το κέντρο καθενός από αυτά και δημιουργία ενός τελικού ιστογράμματος.



Σχήμα 1.4.3 Παραδείγματα υπολογισμού της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (PDF) της απόστασης για a) σημειακή σεισμική πηγή, b) γραμμική σεισμική πηγή και, c) επιφανειακή σεισμική πηγή (Kramer, 1996).

1.4.2. Αβεβαιότητα μεγέθους

Το δεύτερο βήμα περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της κατανομής μεγεθών για κάθε πηγή. Οι Gutenberg and Richter (1944) μελέτησαν για πρώτη φορά την κατανομή των μεγεθών των σεισμών (παράδειγμα στο Σχήμα 1.4.4) και κατέληξαν στην εξής εξίσωση (*Νόμος Κατανομής Μεγεθών G-R*):

$log_{10}\lambda_m = a - bm$

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

(1.16)

όπου, λ_m, ο ρυθμός των σεισμών μεγέθους μεγαλύτερου του m, και a, b οι σταθερές [σταθερές G-R, βλ. και σχέση (1.3)]. Η σταθερά α είναι ενδεικτική του συνολικού ρυθμού σεισμικότητας μιας περιοχής (η ποσότητα 10^a αντιστοιχεί στον μέσο ετήσιο αριθμό σεισμών μεγέθους Μ≥0) και η σταθερά b αντιστοιχεί στη σχετική αναλογία των μικρών προς τους μεγάλους σεισμούς. Οι σταθερές αυτές υπολογίζονται με στατιστικές μεθόδους (ελάχιστα τετράγωνα, μέθοδος ακραίων τιμών κ.λπ.), οι οποίες εφαρμόζονται σε μια βάση δεδομένων σεισμικότητας της σεισμικής πηγής ενδιαφέροντος. Για τον σχηματισμό της (κατάλογος σεισμών) γίνεται συνήθως συνδυασμός της ιστορικής και της ενόργανης σεισμικότητας. Σε αυτήν τη διαδικασία ανακύπτουν αρκετά προβλήματα, όπως οι ενδεχόμενες διαφορετικές κλίμακες μεγέθους στις οποίες αναφέρονται και οι οποίες απαιτούν κατάλληλες μετατροπές. Επίσης, στις περισσότερες περιοχές υπάρχουν χρονικά εξαρτημένοι σεισμοί (προσεισμοί και μετασεισμοί), οι οποίοι κατά την ΠΕΣΕ συνήθως αγνοούνται, λόγω της παραδοχής ότι η σεισμική επικινδυνότητα οφείλεται σε διακριτές και ανεξάρτητες μεταξύ τους εκλύσεις σεισμικής ενέργειας. Επιπλέον, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η πληρότητα του καταλόγου. Η ιστορική σεισμικότητα έχει συνήθως πολύ μεγαλύτερο μέγεθος πληρότητας από την ενόργανη, ενώ μικροί σεισμοί ενδέχεται να μην καταγράφονται λόγω φυσικών αιτίων. Η λανθασμένη θεώρηση της πληρότητας μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα της κλίσης της ευθείας G-R, με αποτέλεσμα την υποεκτίμηση του ετήσιου ρυθμού των σεισμών μικρού μεγέθους και την υπερεκτίμηση του ρυθμού των σεισμών μεγάλου μεγέθους.



Σχήμα 1.4.4 Νόμος κατανομής μεγεθών G-R, ο οποίος περιγράφεται από τη Σχέση (1.15) για την περίπτωση που δεν υπάρχει ανώτερο όριο μεγέθους m (συνεχής ευθεία) και για την περίπτωση που ορίζεται κάποιο ανώτατο όριο μεγέθους m (διακεκομμένη καμπύλη) (Baker, 2013).

Η Αθροιστική Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας (Cumulative Distribution Function, CDF) υπολογίζεται με βάση τη Σχέση (1.16), περιγράφει τα μεγέθη σεισμών που είναι υψηλότερα από ένα ελάχιστο μέγεθος m_{min} και προσδιορίζεται ως εξής:

$$F_{M}(m) = P(M \le m | M > m_{min})$$

$$= \frac{P \upsilon \theta \mu \delta \varsigma \sigma \varepsilon \iota \sigma \mu \delta \upsilon \mu \varepsilon m_{min} < M \le m}{P \upsilon \theta \mu \delta \varsigma \sigma \varepsilon \iota \sigma \mu \delta \upsilon \mu \varepsilon m_{min} < M}$$

$$= \frac{\lambda_{m_{min}} - \lambda_{m}}{\lambda_{m_{min}}}$$

$$= \frac{10^{a-bm_{min}} - 10^{a-bm}}{10^{a-bm_{min}}}$$

$$= 1 - 10^{-b(m-m_{min})}, \quad m > m_{min}$$
(1.17)

όπου, *F_M(m)*, η CDF του *M*. Η Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας (Probability Density Function, PDF) του *M* γίνεται με υπολογισμό της παραγώγου της CDF, οδηγώντας στη σχέση:

$$f_M(m) = \frac{d}{dm} F_M(m)$$

= $\frac{d}{dm} [1 - 10^{-b(m - m_{m,in})}]$ (1.18)
= $b \ln(10) 10^{-b(m - m_{min})}$, $m > m_{min}$

όπου, *f_M(m)*, η PDF για το *M*.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Οι Σχέσεις (1.17) και (1.18) προκύπτουν από τη Σχέση (1.16), στην οποία θεωρητικά δεν υπάρχει ανώτερο όριο μεγέθους. Αυτό σημαίνει ότι, για παράδειγμα, στην Περιειρηνική ζώνη (Circumpacific belt, Σχήμα 1.4.5) θα μπορούσε να συμβαίνει ένας σεισμός μεγέθους 10 με μέσο ετήσιο ρυθμό υπέρβασης ίσο με 0.02 ανά έτος (ο οποίος αντιστοιχεί σε περίοδο επανάληψης μόλις 50 ετών), παρόλο που μεγέθη αυτής της τάξεως δεν έχουν παρατηρηθεί ποτέ. Στην πραγματικότητα (στη φύση) υπάρχει ένα φυσικό όριο στο μέγεθος των σεισμών, το οποίο οφείλεται στις μέγιστες δυνατές διαστάσεις των διαρρήξεων. Αν προσδιοριστεί το μέγιστο μέγεθος, *m_{max}*, τότε οι εξισώσεις (1.17) και (1.18) γίνονται αντίστοιχα:

$$F_M(m) = \frac{1 - 10^{-b(m - m_{min})}}{1 - 10^{-b(m_{max} - m_{min})}}, \quad m_{min} < m < m_{max}$$
(1.19)

$$f_M(m) = \frac{b \ln(10) 10^{-b(m-m_{min})}}{1 - 10^{-b(m_{max} - m_{min})}}, \quad m_{min} < m < m_{max}$$
(1.20)



<u>Σχήμα 1.4.5</u> Εφαρμογή του νόμου κατανομής μεγεθών G-R σε παγκόσμια δεδομένα σεισμικότητας (Kramer, 1996).

Η κατανομή G-R δεν είναι η μοναδική που περιγράφει την κατανομή των μεγεθών των σεισμών, δεδομένου ότι υπάρχει πληθώρα κατανομών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί αυτής. Για παράδειγμα, το μοντέλο του Χαρακτηριστικού Σεισμού (Schwartz and Coppersmith, 1984) υποστηρίζει ότι σε κάποια ρήγματα συμβαίνει ένας χαρακτηριστικός σεισμός συγκεκριμένου μεγέθους ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Το γεγονός αυτό έχει παρατηρηθεί από τη μελέτη παλαιοσεισμικών δεδομένων, η οποία έχει δείξει ότι μεμονωμένα τμήματα του ρήγματος τείνουν να ολισθαίνουν κατά περίπου ίδια απόσταση σε κάθε κύριο σεισμό. Επομένως, τα ρήγματα έχουν την τάση να φιλοξενούν κατά διαστήματα σεισμούς του ίδιου μεγέθους με τιμή κοντά στο Mmax, και απόκλιση περίπου μισής μονάδας (Kramer, 1996), οι οποίοι είναι γνωστοί ως χαρακτηριστικοί σεισμοί. Γεωλογικά στοιχεία δείχνουν ότι ο χαρακτηριστικός σεισμός συγκεκριμένου μεγέθους συμβαίνει πιο συχνά από όσο προσδιορίζει ο νόμος κατανομής μεγεθών G-R. Συνήθως, το μοντέλο του χαρακτηριστικού σεισμού επιλέγεται όταν είναι επιθυμητή η ΠΕΣΕ για συγκεκριμένα σημεία που απειλούνται από λίγα γνωστά ρήγματα, αντί για περιοχές μεγάλων διαστάσεων.

Άλλες κατανομές μεγεθών αποτελούν η τετραγωνική εξίσωση των Merz and Cornell (1973) και η τροποποίηση του νόμου G-R με συμπερίληψη της ολίσθησης του ρήγματος από τους Lomnitz-Adler and Lomnitz (1979). Τροποποιήσεις που βασίζονται στο μοντέλο χαρακτηριστικού σεισμού έχουν προταθεί από τους Wesnousky (1994) και Shen-Chyun Wu et al (1995). Επίσης, υπάρχει μια γενικευμένη PDF κατανομής μεγεθών, η οποία περιγράφει τα μικρότερα μεγέθη με εκθετική
κατανομή και τα κοντινά στον χαρακτηριστικό σεισμό μεγέθη με ομογενή κατανομή (Youngs and Coppersmith, 1985). Στην εργασία του Utsu (1999) παρουσιάζονται λεπτομερώς οι πολυάριθμες τροποποιήσεις της κατανομής G-R που έχουν προταθεί, ανάμεσα στις οποίες συγκαταλέγονται η κατανομή Pareto, η πεπερασμένη (truncated) κανονική κατανομή και η πεπερασμένη λογαριθμοκανονική κατανομή, η κωνική κατανομή Pareto (tapered Pareto distribution) και η κατανομή gamma. Οι τελευταίες (μαζί με την κατανομή των χαρακτηριστικών σεισμών) αναλύονται με περισσότερη λεπτομέρεια στις εργασίες του Kagan (Kagan, 1993, 2002). Για την εφαρμογή στην ΠΕΣΕ διαφορετικών της G-R κατανομών αρκεί να αντικατασταθεί η Σχέση (1.18) με τη CDF της επιθυμητής πιθανοτικής κατανομής.

1.4.3. Χρονική αβεβαιότητα

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ο υπολογισμός της πιθανότητας να συμβεί ένας καταστρεπτικός σεισμός σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο προϋποθέτει τη γνώση του ρυθμού γένεσης σεισμών σε συνάρτηση με τον χρόνο. Τα σεισμολογικά δεδομένα υποδεικνύουν περιορισμένη έως μηδαμινή συσχέτιση των κύριων σεισμών με τον χρόνο. Η υπόθεση της τυχαίας κατανομής των σεισμών σε συνάρτηση με τον χρόνο ευνοεί τη χρήση απλών μοντέλων πιθανοτήτων, ωστόσο δεν είναι σύμφωνη με τη Θεωρία της Ελαστικής Ανάπαλσης.

Η χρονική κατανομή των σεισμών κατά κανόνα περιγράφεται με το μοντέλο Poisson, το οποίο βασίζεται στις εξής παραδοχές:

- Ο αριθμός των σεισμών που συμβαίνουν σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα είναι ανεξάρτητος από τον αριθμό εκείνων που συμβαίνουν σε κάποιο άλλο χρονικό διάστημα.
- Η πιθανότητα να συμβεί ένας σεισμός σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα είναι ανάλογη της διάρκειάς του.
- Η πιθανότητα να συμβούν περισσότεροι από ένας σεισμοί σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα είναι αμελητέα.

Επομένως, πρόκειται για ένα πιθανοτικό μοντέλο «χωρίς μνήμη» του χρόνου, του μεγέθους και του επικέντρου οποιουδήποτε προηγούμενου σεισμού.

Η πιθανότητα της τυχαίας μεταβλητής *N* (αριθμός των επαναλήψεων ενός συγκεκριμένου σεισμού κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου) δίνεται από τη σχέση:

$$P[N=n] = \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!}$$
(1.21)

όπου, μ, ο μέσος όρος των επαναλήψεων του σεισμού κατά το δεδομένο χρονικό διάστημα. Από τη σχέση (1.21) φαίνεται ότι τα χρονικά διαστήματα που μεσολαβούν

μεταξύ των σεισμών είναι εκθετικά κατανεμημένα. Η πιθανότητα Poisson που χαρακτηρίζει τη χρονική κατανομή των σεισμών στην ΠΕΣΕ δίνεται από την εξίσωση:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

$$P[N = n] = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!}$$
(1.22)

όπου, λ, ο μέσος ρυθμός που συμβαίνει ο συγκεκριμένος σεισμός και, t, η χρονική περίοδος.

Η πιθανότητα να συμβεί τουλάχιστον ένας σεισμός κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου *t* δίνεται από τη σχέση:

$$P[N \ge 1] = 1 - P[N = 0] = 1 - e^{-\lambda t}$$
(1.23)

ενώ η πιθανότητα υπέρβασης (τουλάχιστον κατά μία φορά) ενός συγκεκριμένου μεγέθους σεισμού (*m*) στο χρονικό διάστημα *t* δίνεται από τη σχέση:

$$P[N \ge 1] = 1 - e^{-\lambda_m t}$$
(1.24)

Εκτός της κατανομής Poisson, η χρονική κατανομή των σεισμών περιγράφεται και από άλλα μοντέλα. Σύμφωνα με τη Θεωρία της Ελαστικής Ανάπαλσης, οι σεισμοί συμβαίνουν όταν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο επίπεδο τάσεων στο ρήγμα, συνεπώς αν γίνει σεισμός μεγάλου μεγέθους, η πιθανότητα να συμβεί και ένας ακόμη με παρόμοιο μέγεθος και μικρή χρονική διαφορά από τον πρώτο είναι μειωμένη. Μερικά χρονικά εξαρτημένα μοντέλα (τα οποία δέχονται ότι ο ρυθμός σεισμικότητας εξαρτάται από τον χρόνο) αποτελούν τα μη-ομογενή μοντέλα Poisson, οι κατανομές gamma και Weibull (χρήση κατανομών χρόνων άφιξης των φάσεων των κυμάτων), τα μαρκοβιανά μοντέλα, τα ημι-μαρκοβιανά μοντέλα κ.λπ. Τα μοντέλα αυτού του τύπου προτιμώνται σπανιότερα και κυρίως σε περιπτώσεις στις οποίες ο σεισμικός κίνδυνος προέρχεται από μία μοναδική πηγή (ρήγμα) η οποία παρουσιάζει συμπεριφορά που περιγράφεται από τον χαρακτηριστικό σεισμό και στην οποία το χρονικό διάστημα που έχει παρέλθει από τον πιο πρόσφατο σεισμό είναι μεγαλύτερο από το μέσο χρονικό διάστημα μεταξύ των σεισμών. Λόγω απλότητας, ευχέρειας και έλλειψης των απαιτούμενων δεδομένων που υποστηρίζουν τη χρήση πιο περίπλοκων μοντέλων χρονικής κατανομής, συνήθως η ΠΕΣΕ διενεργείται με χρησιμοποίηση του μοντέλου Poisson.

1.4.4. Εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης (GMPE)

Το τρίτο βήμα της ΠΕΣΕ απαιτεί την εφαρμογή μίας ή περισσότερων εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης (Ι.Σ.Κ.). Η εμπειρική σχέση πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. αποτελεί ένα μοντέλο το οποίο υπολογίζει την ένταση της σεισμικής κίνησης (PGA, PGV, PSA κ.λπ.) ως αποτέλεσμα πολλών παραγόντων, όπως του μεγέθους του σεισμού (*M*), της απόστασης μεταξύ του σεισμού και του σημείου ενδιαφέροντος (*R*), του είδους διάρρηξης (*SoF*), των εδαφικών συνθηκών του σημείου ενδιαφέροντος (*SC*) κ.λπ. Το μέγεθος και το είδος της διάρρηξης περιγράφουν τις επιδράσεις της σεισμικής πηγής, η απόσταση περιγράφει την οφειλόμενη στην επίδραση του δρόμου διάδοσης διακύμανση των πλατών των κυμάτων, και οι εδαφικές συνθήκες περιγράφουν την επίδραση της συμπεριφοράς του εδάφους στην ένταση της σεισμικής κίνησης. Σημειώνεται ότι ο όρος «σχέση απόσβεσης» θεωρείται πλέον ξεπερασμένος, δεδομένου ότι η απόσβεση αποτελεί έναν μόνον από τους παράγοντες που εξετάζουν τα συγκεκριμένα μοντέλα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η ανάπτυξη αυτών των μοντέλων γίνεται συνήθως με στατιστική παλινδρόμηση βάσεων δεδομένων που περιλαμβάνουν παρατηρημένες εντάσεις των σεισμικών κινήσεων του εδάφους, με σχετική διακύμανση οφειλόμενη σε τυχαιότητα σχετική με τον μηχανισμό γένεσης των διαρρήξεων και τις ετερογένειες της πηγής, του δρόμου διάδοσης και των εδαφικών συνθηκών. Ένα παράδειγμα γενικευμένης εξίσωσης μιας εμπειρικής σχέσης πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. αποτελεί η Σχέση (1.25) η οποία προέρχεται από τη Θεωρία Σεισμικής Πηγής (Earthquake Source Theory -Joyner and Boore, 1981).

$$Y = exp(f(M) \cdot f(R) \cdot f(SC) \cdot f(SoF))$$
(1.25)

Η παράμετρος (Υ) που εξετάζεται είναι μια λογαριθμο-κανονικά κατανεμημένη τυχαία μεταβλητή. Η γενικευμένη μορφή της εξίσωσης είναι η εξής (λογαριθμική μέση τιμή μ, του In[Y]):

$$ln(\Upsilon) = \theta(M, R, SC, SoF) + \varepsilon \cdot \sigma_{lnv}$$
(1.26)

όπου, ϑ(M, R, SC, SoF), η γενική εξίσωση που περιγράφει τον συνδυασμό των επιδράσεων f(M), f(R), f(SC) και f(SoF). Παρομοίως, σ_{lny} είναι η τυπική απόκλιση (σ) και ε η μεταβλητή που περιγράφει τον αριθμό των τυπικών αποκλίσεων σ επάνω (θετική τιμή ε) ή κάτω (αρνητική τιμή ε) από την υπολογιζόμενη λογαριθμική μέση τιμή, μ. Επομένως, η παράμετρος ε αντιπροσωπεύει την παρατηρούμενη διακύμανση του ln(Y). Οι GMPE προσομοιώνουν τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων έντασης της σεισμικής κίνησης κανονικοποιημένες (conditioned) στις ανεξάρτητες μεταβλητές που αξιοποιήθηκαν για τη δημιουργία τους. Εφόσον ο λογάριθμος της λογαριθμοκανονικής τιμής ακολουθεί κανονική κατανομή, οι πιθανότητες η παράμετρος Y να υπερβεί διάφορες τιμές y (πιθανότητα υπέρβασης), υπολογίζονται από την PDF της κανονικής κατανομής, σύμφωνα με τη σχέση:

$$P(Y > y|_{m,r,sc,sof}) = \int_{y}^{\infty} \frac{1}{\sigma_{lnY}\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{lny-\mu}{\sigma_{lny}}\right)^{2}\right], \qquad y \ge 0$$
(1.27)

Από το ολοκλήρωμα της Σχέσης (1.27) προκύπτει η κανονική PDF $f_Y(y|_{m,r,sc,sof})$. Η Σχέση (1.27) μπορεί επίσης να αναπαρασταθεί με την κανονικοποιημένη κανονική κατανομή πιθανότητας (standard normal probability distribution) της παραμέτρου ε , f_{ε} (ε), με μηδενική μέση τιμή και μία τυπική απόκλιση:

$$P(Y > y|_{m,r,sc,sof}) = \int_{e^*}^{\infty} f_{\varepsilon}(\varepsilon)d\varepsilon$$
(1.28)

Η Σχέση (1.28) ερμηνεύεται από το Σχήμα 1.4.6: όταν η παράμετρος ε έχει μηδενική τιμή, η υπολογιζόμενη παράμετρος έντασης έχει πιθανότητα υπέρβασης ίση με 50%. Για αυτόν τον λόγο, αν η τιμή της ε αντικατασταθεί από το 0 στη Σχέση (1.26), θα προκύψει η μέση καμπύλη. Όταν η τιμή της παραμέτρου ε ισούται με 1 (σφάλμα 1σ), η πιθανότητα υπέρβασης ισούται με ≈16%. Το γεγονός ότι η παράμετρος ε ακολουθεί κανονική κατανομή είναι σημαντικό για τον υπολογισμό του ποσοστού αβεβαιότητας στην εκτίμηση της τιμής της παραμέτρου Υ.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 1.4.6 Κανονικοποιημένη κανονική κατανομή πιθανότητας της παραμέτρου ε και πιθανότητες υπέρβασης (Sucuoğlu et al., 2014).

Στο Σχήμα 1.4.7 φαίνονται οι τιμές της παραμέτρου PGA σε συνάρτηση με την απόσταση. Με κύκλους σηματοδοτούνται οι πραγματικές παρατηρήσεις για μεγέθη που κυμαίνονται μεταξύ **M**6.0 και **M**7.0, και η κόκκινη συνεχής καμπύλη αντιστοιχεί στις τιμές που υπολογίζονται από μία GMPE. Οι κόκκινες διακεκομμένες καμπύλες αντιστοιχούν στις εκτιμήσεις του PGA με σφάλμα ±1σ, συνεπώς η πιθανότητα υπέρβασης του PGA είναι περίπου ίση με 16% για την καμπύλη που αντιστοιχεί σε σφάλμα +1σ, ενώ για την καμπύλη σφάλματος -1σ ισούται περίπου με 84%. Η αύξηση της απόστασης οδηγεί σε μείωση της πιθανότητας υπέρβασης.



Σχήμα 1.4.7 Καμπύλες μέσης τιμής PGA (συνεχής) και τιμών με σφάλμα ±1σ (διακεκομμένες), όπως υπολογίζονται από μία GMPE. Με κύκλους σηματοδοτούνται οι πραγματικές παρατηρήσεις, η διασπορά των οποίων έχει κανονική κατανομή (Sucuoğlu et al., 2014).

1.4.5. Πιθανολογικοί υπολογισμοί και καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το τελευταίο στάδιο της ΠΕΣΕ αποτελεί η διενέργεια πιθανολογικών υπολογισμών, οι οποίοι συνδυάζουν τις προαναφερθείσες αβεβαιότητες για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας. Συνήθως, τα αποτελέσματα της ΠΕΣΕ παρουσιάζονται με τη βοήθεια των καμπυλών σεισμικής επικινδυνότητας, οι οποίες είναι ενδεικτικές της ετήσιας πιθανότητας υπέρβασης διαφορετικών τιμών της εξεταζόμενης παραμέτρου εδαφικής κίνησης. Οι καμπύλες αυτές μπορούν να αξιοποιηθούν στον υπολογισμό της πιθανότητας υπέρβασης για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Η διαδικασία που απαιτείται για την παραγωγή μιας καμπύλης σεισμικής επικινδυνότητας είναι απλή. Αρχικά, υπολογίζεται η πιθανότητα υπέρβασης μιας συγκεκριμένης τιμής, *y*, της παραμέτρου σεισμικής κίνησης, *Y*, για έναν πιθανό σεισμό συγκεκριμένου μεγέθους, *M*, σε μια πιθανή τοποθεσία της σεισμικής πηγής και στη συνέχεια αυτή πολλαπλασιάζεται με την πιθανότητα να συμβεί αυτός ο συγκεκριμένος σεισμός σε αυτήν τη συγκεκριμένη θέση. Η ίσια διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα πιθανά μεγέθη σεισμών και για όλες τις πιθανές θέσεις, και στο τέλος αθροίζονται οι σχετικές πιθανότητες.

Η πιθανότητα υπέρβασης της τιμής, *y*, της παραμέτρου, *Y*, για έναν σεισμό υπολογίζεται από το *Θεώρημα Συνολικής Πιθανότητας* (Total Probability Theorem):

$$P[Y > y] = P[Y > y|\mathbf{X}]P[\mathbf{X}] = \int P[Y > y|\mathbf{X}]f_X(\mathbf{X})dx$$
(1.29)

όπου, **X**, το διάνυσμα των τυχαίων μεταβλητών που επηρεάζουν την παράμετρο Y. Οι κύριες ποσότητες του **X** συνήθως είναι το μέγεθος, *M*, και η απόσταση, *R*. Θεωρώντας ότι τα *M* και *R* είναι ανεξάρτητα, η πιθανότητα υπέρβασης ισούται με:

$$P[Y > y] = \int \int P[Y > y|m, r] f_M(m) f_R(r) dm dr$$
(1.30)

όπου η P[Y>y|m,r] υπολογίζεται από την GMPE και οι, $f_M(m)$ και $f_R(r)$, είναι οι PDF του μεγέθους και της απόστασης, αντίστοιχα.

Όταν ένα σημείο επηρεάζεται από N_s σεισμικές πηγές, με v_i [=exp(a_i - b_im_o)] μέσο ρυθμό υπέρβασης του μεγέθους κατωφλιού (threshold) m_o για κάθε πηγή, ο συνολικός μέσος ρυθμός υπέρβασης (total average exceedance rate) για την περιοχή δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_{y} = \sum_{i=1}^{N_{S}} v_{i} \int \int P[Y > y | m, r] f_{M_{i}}(m) f_{R_{i}}(r) dm dr$$
(1.31)

Με σκοπό την απλοποίηση των υπολογισμών, συνήθως το διπλό ολοκλήρωμα της Σχέσης (1.31) αναλύεται σε επιμέρους αθροίσματα. Πιο συγκεκριμένα, το εύρος του μεγέθους και των αποστάσεων χωρίζεται σε N_M και N_R τμήματα, αντίστοιχα, επομένως η Σχέση (1.31) γίνεται:



όπου, $m_j=m_0+(j-0.5)(m_{max}-m_0)/N_M$, $r_k=r_{min}+(k-0.5)(r_{max}-r_{min})/N_R$, $\Delta m=(m_{max}-m_0)/N_M$ και $\Delta r=(r_{max}-r_{min})/N_R$. Με αυτόν τον τρόπο θεωρείται ότι κάθε πηγή παράγει μόνο N_M σεισμούς με μέγεθος m_j , σε αποκλειστικά N_R διακριτές αποστάσεις, r_k . Έτσι, η Σχέση (1.32) γίνεται:

$$\lambda_{y} = \sum_{i=1}^{N_{S}} \sum_{j=1}^{N_{M}} \sum_{k=1}^{N_{R}} v_{i} P[Y > y | m_{j}, r_{k}] P[M = m_{j}] P[R = r_{k}]$$
(1.33)

Η ακρίβεια των υπολογισμών αυξάνεται με την αύξηση της διακριτοποίησης, δηλαδή του αριθμού των *N_M* και *N_R*. Η Σχέση (1.33) χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά στην ΠΕΣΕ, καθώς συνδυάζει τον ρυθμό σεισμικότητας, όλους τους πιθανούς συνδυασμούς μεγεθών και αποστάσεων των σεισμών και την κατανομή της προκαλούμενης από τους σεισμούς έντασης σεισμικής κίνησης. Το τελικό αποτέλεσμα (ρυθμός υπέρβασης τιμών της παραμέτρου) είναι χρήσιμο στην αντισεισμική μηχανική και είναι δυνατόν να προσδιοριστεί ακόμη και για πολύ υψηλά επίπεδα έντασης (με πολύ χαμηλή πιθανότητα υπέρβασης) που δεν έχουν καταγραφεί ακόμη στις πραγματικές παρατηρήσεις. Ένα παράδειγμα καμπύλης σεισμικής επικινδυνότητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.4.8, στο οποίο απεικονίζεται ο μέσος ετήσιος ρυθμός υπέρβασης των τιμών PGA από 0.1 g έως 2.2 g.



Σχήμα 1.4.8 Καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας για το PGA (Baker, 2013).

1.4.6. Λογικά Δέντρα και Διαχείριση Αβεβαιοτήτων

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Α.Π.Θ Οι αβεβαιότητες που λαμβάνονται υπόψη κατά την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες (Budnitz et al., 1997; Bommer, 2003): την κυβευτική (aleatory) και την επιστημική (epistemic). Η κυβευτική αναφέρεται στις αβεβαιότητες που οφείλονται στην τυχαιότητα της φύσης. Ένα παράδειγμα της πιο σημαντικής στην ΠΕΣΕ κυβευτικής αβεβαιότητας είναι η διασπορά που σχετίζεται με τις GMPE. Η κυβευτική αβεβαιότητα μπορεί να μετρηθεί μόνο με την προσαρμογή κατανομών στις πραγματικές παρατηρήσεις, και δεν μπορεί να μειωθεί. Από την άλλη πλευρά, η επιστημική αναφέρεται στην αβεβαιότητα που οφείλεται στην ατελή (ακόμη ελλιπή) επιστημονική γνώση διαφόρων παραμέτρων, όπως το Mmax μιας πηγής, το είδος του μοντέλου κατανομής σεισμών που την περιγράφει καλύτερα κ.λπ. Ο περιορισμός της επιστημικής αβεβαιότητας είναι εφικτός, δεδομένου ότι αφορά στην περιγραφή και εκτίμηση φυσικών μεγεθών από τον άνθρωπο. Η διάκριση της κυβευτικής από την επιστημική αβεβαιότητα δεν είναι πάντα σαφής, καθώς λόγω της εξέλιξης της επιστήμης και του συνακόλουθου εμπλουτισμού της γνώσης για τους σεισμούς ενδέχεται ορισμένες αβεβαιότητες να μετατραπούν από κυβευτικές σε επιστημικές.

Εξαιτίας των αβεβαιοτήτων, αρκετές φορές η επιλογή των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων ενός μοντέλου που πρόκειται να αξιοποιηθεί στην ΠΕΣΕ είναι δυσχερής. Τα λογικά δέντρα (logic trees) αποτελούν ένα εργαλείο το οποίο διευκολύνει τη διαχείριση και την ποσοτικοποίηση των επιστημικών αβεβαιοτήτων. Χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στην ΠΕΣΕ από τους Kulkarni et al. (1984), και στη συνέχεια έγιναν αναπόσπαστο στοιχείο της (Coppersmith and Youngs, 1986; Reiter, 1990; Kramer, 1996; Scherbaum et al., 2005). Εντούτοις, αξίζει να σημειωθεί ότι είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και στο πλαίσιο διεξαγωγής της ΑΕΣΕ.

Το λογικό δέντρο ευνοεί τη χρήση διαφορετικών μοντέλων, καθένα εκ των οποίων έχει συγκεκριμένο βάρος, το οποίο ερμηνεύεται ως η σχετική πιθανότητα αυτό να είναι το σωστό. Το άθροισμα αυτών των βαρών πρέπει να είναι ίσο με τη μονάδα. Λεπτομερείς οδηγίες για την κατασκευή των λογικών δέντρων για τις GMPE και την αποφυγή συνηθισμένων παρανοήσεων και λαθών έχουν δοθεί από τους Bommer et al. (2005). Σε καθένα από τα βήματα για τα οποία υπάρχει επιστημική αβεβαιότητα γίνεται πρόσθεση επιμέρους κλάδων για κάθε μία από τις εναλλακτικές επιλογές. Έπειτα, γίνονται οι υπολογισμοί ΠΕΣΕ για όλους τους πιθανούς κλάδους (σενάρια) του λογικού δέντρου και παράγεται μία καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας για τον καθένα. Το βάρος κάθε καμπύλης προσδιορίζεται από τον πολλαπλασιασμό των βαρών των κλάδων από τους οποίους αυτή υπολογίστηκε. Για κάθε προστιθέμενο κλάδο στο λογικό δέντρο ο αριθμός των υπολογισμών αυξάνεται ραγδαία, επομένως προτείνεται η αποφυγή χρήσης κλάδων μεταξύ με πολύ μικρές διαφορές των σεναρίων. Τα σενάρια που αντιπροσωπεύονται από τους κλάδους του λογικού δέντρου πρέπει να περιέχουν το συνολικό εύρος των φυσικών πιθανοτήτων που ενδέχεται να έχει κάθε παράμετρος,

χωρίς ωστόσο αυτό να σημαίνει ότι η συμπερίληψη εξαιρετικά σπάνιων ή απίθανων σεναρίων (με μικρό βάρος) δεν είναι συνετή.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στο Σχήμα 1.4.9 φαίνεται ένα παράδειγμα λογικού δέντρου το οποίο αναδεικνύει την αβεβαιότητα στην επιλεγόμενη GMPE, στη θεωρούμενη κατανομή μεγεθών και στο *M_{max}*. Συνολικά περιέχονται 12 διαφορετικά σενάρια, (2x2x3, δηλαδή αριθμός GMPE x αριθμός κατανομών μεγέθους x αριθμός μεγίστων μεγεθών). Η σχετική πιθανότητα κάθε σεναρίου ισούται με το γινόμενο της πιθανότητάς του επί τις πιθανότητες των κλάδων που οδηγούν σε αυτό. Για παράδειγμα, η πιθανότητα του σεναρίου GMPE = Derras et al., 2014, Magnitude Distribution = Gutenberg-Richter, Maximum Magnitude = 6.2 είναι ίση με 0.45x0.70x0.5 = 0.1575. Υπενθυμίζεται ότι το άθροισμα των βαρών κάθε επιπέδου πρέπει να είναι ίσο με τη μονάδα.



Σχήμα 1.4.9 Παράδειγμα λογικού δέντρου που περιέχει αβεβαιότητες για την εφαρμοζόμενη GMPE, την επιλεγόμενη κατανομή μεγεθών και την τιμή του μεγίστου μεγέθους.

1.5. ΠΕΣΕ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΥΠΟΥ MONTE CARLO

Οι μέθοδοι τύπου Monte Carlo εφαρμόζονται σε πολλούς τομείς λόγω της ικανότητάς τους να επεξεργάζονται και να επιλύουν σύνθετα προβλήματα. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της μεθόδου Monte Carlo είναι ο μεγάλος βαθμός ευελιξίας και προσαρμοστικότητας που παρέχει στον ερευνητή. Αποτελεί στατιστική μέθοδο, δηλαδή χρησιμοποιεί δείγματα με σκοπό να εξαγάγει συμπεράσματα για έναν πληθυσμό. Βασίζεται σε δύο μαθηματικά θεωρήματα, τον Νόμο των Μεγάλων Αριθμών (Law of Large Numbers) και το Θεώρημα Κεντρικού Ορίου (Central Limit Theorem). Οι μέθοδοι Monte Carlo αποτελούνται από τέσσερα βήματα (Dunn and Shultis, 2022):

- 1. προσδιορισμός των εισαγόμενων παραμέτρων.
- 2. Τυχαία γένεση τιμών για τις εισαγόμενες παραμέτρους, βάσει της PDF τους.
- 3. Διενέργεια αιτιοκρατικών (ντετερμινιστικών) υπολογισμών των παραμέτρων.
- 4. Άθροιση των αποτελεσμάτων.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Α.Π.Θ

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί και στην ΠΕΣΕ. Αναλυτικότερα, τα πρώτα τρία βήματα της ΠΕΣΕ παραμένουν ίδια, καθώς η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στο τέταρτο βήμα αντί του υπολογισμού των αριθμητικών ολοκληρώσεων (Musson, 2000). Βασίζεται στη δημιουργία συνθετικών καταλόγων σεισμικότητας -δηλαδή στην ελεγχόμενη παραγωγή τυχαίων αριθμών που ακολουθούν συγκεκριμένες κατανομές- με βάση τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται, τα οποία περιγράφουν τη χρονική κατανομή και την κατανομή των μεγεθών των σεισμών που συμβαίνουν σε μια σεισμική πηγή. Για παράδειγμα, τα μεγέθη των συνθετικών σεισμών παράγονται από τυχαίους αριθμούς που ακολουθούν την PDF (ή τη CDF) της κατανομής G-R. Έπειτα, με την εφαρμογή κάποιας GMPE γίνεται ο υπολογισμός της έντασης (PGA, PGV, PSA κ.λπ.) της σεισμικής κίνησης που προκαλείται από κάθε σεισμό στο σημείο ενδιαφέροντος. Τέλος, προσδιορίζονται οι πιθανότητες υπέρβασης με την απλή καταμέτρηση των σεισμών που προκαλούν ένταση η οποία υπερβαίνει μια συγκεκριμένη κρίσιμη τιμή.

Για παράδειγμα (Musson, 2000), 10⁵ προσομοιώσεις 100 ετών σεισμικότητας (10⁵ κατάλογοι διάρκειας 100 ετών) αντιστοιχούν σε 10⁷ έτη σεισμικών δεδομένων. Αν γίνει τοποθέτηση των προκαλούμενων εντάσεων κατά αύξουσα σειρά σε μια λίστα, ο προσδιορισμός της τιμής με ετήσια πιθανότητα υπέρβασης ίση με 10⁻⁴ γίνεται με απλή επιλογή της 1001^{ης} τιμής. Κατά κανόνα, ο συνθετικός κατάλογος χωρίζεται σε υποδιαστήματα χρονικής διάρκειας ίσης με την επιθυμητή περίοδο επανάληψης, *T*, και από αυτούς τους σεισμούς επιλέγεται εκείνος που προκαλεί τη μέγιστη τιμή έντασης στο σημείο παρατήρησης. Στη συνέχεια, οι μέγιστες τιμές κατατάσσονται σε αύξουσα σειρά και επιλέγεται αυτή με την επιθυμητή πιθανότητα υπέρβασης.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου έναντι εκείνης των ολοκληρώσεων είναι η παραγωγή μεγάλου πληθυσμού δεδομένων και η διευκόλυνση της διαδικασίας αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας για οποιαδήποτε πιθανότητα υπέρβασης (μέθοδος που αναδεικνύει τις κατανομές μεγέθους και αποστάσεων στις οποίες οφείλεται η σεισμική επικινδυνότητα και αναλύεται παρακάτω), δεδομένου ότι οι απαιτούμενες πληροφορίες είναι συγκεντρωμένες στους συνθετικούς καταλόγους καθ' όλη τη διάρκεια των αναλύσεων. Οι υπολογισμοί χαρακτηρίζονται από διαφάνεια, διότι τα βήματα που ακολουθούνται (προσομοίωση μεγεθών, χρόνων, θέσεων των συνθετικών σεισμών και εφαρμογή των GMPE) είναι *εμφανή* και *«αυθόρμητα»* (straightforward and intuitive). Η στατιστική ανάλυση για τη δημιουργία καμπυλών επαναλήψεων της διαδικασίας παραγωγής συνθετικών καταλόγων μπορεί να γίνει συμπερίληψη εναλλακτικών και επιπρόσθετων αβεβαιοτήτων που αφορούν διαφορετικά μοντέλα σεισμικών πηγών, αβέβαιες παραμέτρους της κατανομής G-R και επιλογή διαφορετικών GMPE. Από την άλλη πλευρά, η συμπερίληψη διαφορετικών αβεβαιοτήτων των εισαγόμενων παραμέτρων κατά την εφαρμογή της μεθόδου αριθμητικών ολοκληρώσεων ενδέχεται να καταστεί προβληματική, διότι ο αριθμός των συνδυασμών ενός λογικού δέντρου αυξάνεται εκθετικά και το βάρος κάθε κλάδου επιλέγεται με υποκειμενικά κριτήρια. Στη μέθοδο Monte Carlo κάθε προσομοίωση περιέχει μια τιμή που προέρχεται από την κατανομή της παραμέτρου. Ακόμη, η διακριτοποίηση των μη-κανονικών (non-Gaussian) πιθανοτικών κατανομών ενδέχεται να είναι δύσκολη (Atkinson and Goda, 2013), ενώ η τεχνική Monte Carlo απαιτεί μόνο την περιγραφή του μοντέλου για τη διαδικασία της προσομοίωσης και όχι την ικανότητα να το ολοκληρώσει. Η μέθοδος Monte Carlo αποτελεί τον μοναδικό τρόπο ανάλυσης του σεισμικού κινδύνου πολλαπλών θέσεων (multiplelocation hazard), για παράδειγμα της ταυτόχρονης κίνησης διαφορετικών σημείων κατά μήκος μιας εκτεταμένης επικράτειας (extended territory) λόγω ενός συγκεκριμένου σεισμού (Zahran et al., 2015). Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση σεισμικού ρίσκου και διευκολύνει την επιλογή του χαρακτηριστικού σεισμού στην περίπτωση διεξαγωγής ΑΕΣΕ.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ένα από τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου συνιστά το ενδεχόμενο μηπλήρους αντιπροσώπευσης των σεισμών πολύ μικρής πιθανότητας στους συνθετικούς καταλόγους, εξαιτίας της τυχαιότητας των αριθμών, με αποτέλεσμα από διαφορετικές επαναλήψεις του ίδιου υπολογισμού να προκύπτουν ελαφρώς διαφοροποιημένα αποτελέσματα. Το πρόβλημα της αστάθειας λύνεται με την αύξηση των επαναλήψεων, η οποία ωστόσο αναδεικνύει το δεύτερο μειονέκτημα: πολλές φορές οι υπολογισμοί είναι αργοί, ιδιαιτέρως όταν επιχειρείται η παραγωγή χαρτών σεισμικής επικινδυνότητας ή όταν τα αξιοποιούμενα λογικά δέντρα είναι πολύ περίπλοκα.

Οι πρώτες εφαρμογές της μεθόδου προσομοίωσης Monte Carlo στην ΠΕΣΕ έγιναν από τους Shapira (1983) και Johnson and Koyanagi (1988). Οι μεταγενέστερες εφαρμογές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες (Weatherill and Burton, 2010): Η πρώτη (Ebel and Kafka, 1999) αντιστοιχεί στην προσομοίωση των συνθετικών καταλόγων σεισμών με τυχαία δειγματοληψία (με αντικατάσταση) της παρατηρούμενης σεισμικότητας (Ebel and Kafka, 1999; Hagos et al., 2006; Bourne et al., 2014, 2015). Γίνεται επαναδειγματοληψία ενός πραγματικού σεισμικού καταλόγου, με σκοπό την κατασκευή ενός συνθετικού καταλόγου μεγάλης διάρκειας. Η μέθοδος αυτή θεωρεί ότι τα μεγέθη και οι θέσεις των εστιών μπορούν να επιλεγούν από τον πραγματικό κατάλογο ανεξάρτητα, και προϋποθέτει ότι αυτός έχει διάρκεια ικανή να αντιπροσωπεύσει τον μέσο ρυθμό σεισμικότητας των μεγεθών. Τα επίκεντρα τοποθετούνται τυχαία σε οποιαδήποτε κατεύθυνση γύρω από αυτά των επιλεγμένων σεισμών, έως μια προκαθορισμένη μέγιστη απόσταση, *r*. Δεν είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός σεισμικών ζωνών, ούτε ο υπολογισμός σταθερών G-R. Η δεύτερη περιλαμβάνει την προσομοίωση των συνθετικών καταλόγων σεισμών με τυχαία δειγματοληψία από την ομογενή χωρική κατανομή των σεισμικών πηγών και με χρήση της CDF της επιθυμητής κατανομής μεγεθών, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Συνήθως, επιλέγεται η δεύτερη προσέγγιση (Musson, 1999a, 1999b; Cramer et al., 2002; Beauval and Scotti, 2004; Wiemer et al., 2009; Weatherill and Burton, 2010; Sokolov and Wenzel, 2011; Atkinson and Goda, 2013; Zahran et al., 2015; Kowsari et al., 2017; Rehman et al., 2018; Silacheva et al., 2018; Mosca et al., 2022).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Έχουν προταθεί μερικές ακόμη εναλλακτικές προσεγγίσεις. Οι Han and Choi (2008) δημιούργησαν μια ομαλοποιημένη χωρική PDF για τη θέση των σεισμών και έφτιαξαν έναν συνθετικό κατάλογο βάσει αυτής. Οι Ansari et al. (2015) πρότειναν έναν τρόπο γένεσης επικέντρων με τη συνδρομή της ανάλυσης ασαφούς ομαδοποίησης (fuzzy clustering analysis), ο οποίος διασφαλίζει τη διατήρηση των χωρικών χαρακτηριστικών των πραγματικών σεισμών.

Η μέθοδος ολοκληρώσεων Cornell-McGuire και η μέθοδος προσομοιώσεων τύπου Monte Carlo παράγουν ανάλογα αποτελέσματα. Στο Σχήμα 1.5.1 παρουσιάζονται οι τιμές PGA που προκύπτουν από τη χρήση της μεθόδου Monte Carlo (*PGA_{synth}*) σε συνάρτηση με αυτές που προκύπτουν από τη μέθοδο ολοκληρώσεων (*PGA_{EqRISK}*) για περίοδο επανάληψης 10 (αριστερά) και 476 (δεξιά) ετών, σε επιλεγμένα σημεία του ελληνικού χώρου (Βαμβακάρης, 2010). Αξίζει να σημειωθεί ότι για περίοδο 476 ετών οι τιμές *PGA_{EqRISK}* είναι 5-8% υψηλότερες από τις *PGA_{synth}*.



Σχήμα 1.5.1 Τιμές PGA που προκύπτουν από τη μέθοδο προσομοίωσης τύπου Monte Carlo σε συνάρτηση με αυτές που προκύπτουν από τη μέθοδο ολοκληρώσεων Cornell-McGuire για περίοδο επανάληψης 10 (αριστερά) και 476 (δεξιά) ετών (Βαμβακάρης, 2010).

1.6. ΠΕΣΕ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ (GUMBEL)

Στο ιστόγραμμα των μεγίστων τιμών έντασης της σεισμικής κίνησης που επιλέγονται κατά την επεξεργασία Monte Carlo μπορεί να εφαρμοστεί η κατανομή

ακραίων τιμών της πρώτης (τύπος 1) ή της τρίτης (τύπος 3) ασύμπτωτης Gumbel (Gumbel, 1958). Η Θεωρία των Ασυμπτώτων υποστηρίζει ότι οι ακραίες τιμές τείνουν σε κάποιο όριο με ασυμπτωτική συμπεριφορά και ακολουθούν τρεις τύπους κατανομής, οι οποίοι περιγράφουν την πιθανότητα ενός μεγέθους να είναι το μέγιστο σε διάρκεια ενός έτους. Ο πρώτος και ο τρίτος τύπος αναφέρονται στις μέγιστες τιμές και ο δεύτερος στις ελάχιστες, επομένως δεν εφαρμόζεται σε υπολογισμούς σεισμικής επικινδυνότητας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή αυτής της κατανομής είναι πιο ακριβή για τους πολύ μεγάλους σεισμούς, καθώς αυτοί είναι δυσκολότερο να αγνοηθούν συγκριτικά με τους μικρότερους (Rao et al., 1997). Οι αβεβαιότητες των μοντέλων σεισμικών πηγών δεν περιέχονται σε αυτήν τη μέθοδο υπολογισμού ΠΕΣΕ, εφόσον δεν είναι απαραίτητη η χρήση σεισμικών πηγών. Επίσης, η συγκεκριμένη κατανομή δεν εξαρτάται υπερβολικά από την πληρότητα του σεισμικού καταλόγου (Burton, 1979; Burton et al., 2004). Η χρήση της τείνει να περιορίζει τους μετασεισμούς του καταλόγου. Η εφαρμογή της κατανομής Gumbel στα πειραματικά αποτελέσματα της Monte Carlo τα εξομαλύνει, καθώς αυτά χαρακτηρίζονται από τυχαιότητα. Έχει δειχθεί ότι η κατανομή Gumbel τύπου 3 περιγράφει καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα. Αποτελεί έναν εναλλακτικό τρόπο ΠΕΣΕ ο οποίος έχει εφαρμοστεί σε έρευνες παγκόσμιας κλίμακας (Tsapanos and Burton, 1991), αλλά και για πολλές μεμονωμένες χώρες όπως η Ελλάδα (Makropoulos, 1978; Drakopoulos and Makropoulos, 1983; Makropoulos and Burton, 1985; Papaioannou, 1984, 1986; Burton et al., 2003; Sakkas et al., 2010), η Ινδία (Burton, 1979; Rao et al., 1997), το Πακιστάν (Rehman et al., 2018), η Μαλαισία (Adnan et al., 2005), το Ιράν (Bastami and Kowsari, 2014), το Ιράκ (Ameer et al., 2004), η Κίνα (Cole et al., 2008; Cole and Burton, 2008), η Βουλγαρία (Burton and Bayliss, 2013) και η Τουρκία (Bayrak et al., 2009).

1.7. ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΕΣ ΠΕΣΕ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Από τις απαρχές της σύλληψης της ΠΕΣΕ έως σήμερα έχει δημιουργηθεί πληθώρα αλγορίθμων και κωδίκων που διενεργούν τους υπολογισμούς της. Ορισμένοι από αυτούς ακολουθούν τη μέθοδο Cornell-McGuire και άλλοι τη μέθοδο προσομοιώσεων τύπου Monte Carlo. Οι κώδικες διαφοροποιούνται σε πολλά σημεία: στον τρόπο περιγραφής των σεισμικών πηγών, στον τρόπο υπολογισμού των αποστάσεων μεταξύ πηγής και σημείου παρατήρησης, στις διαθέσιμες εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. κ.λπ.

Ο πρώτος σημαντικός κώδικας δημιουργήθηκε από τον McGuire και ονομάστηκε EQRISK (McGuire, 1976). Ακολουθεί τη μέθοδο ολοκληρώσεων, είναι γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και θεωρεί επιφανειακές σεισμικές πηγές. Στη συνέχεια, γράφηκε το πρόγραμμα FRISK μια τροποποιημένη επέκταση του EQRISK η οποία θεωρεί και γραμμικές σεισμικές πηγές (ρήγματα) και συμπεριλαμβάνει τις επιδράσεις της διάρρηξης. Έκτοτε έχουν κυκλοφορήσει πολλές τροποποιημένες εκδοχές του κώδικα με εισαγωγή νέων υπολογιστικών δυνατοτήτων. Τις σημαντικότερες από αυτές αποτελούν οι κώδικες EZFRISK και FRISK88 (προγράμματα της Risk Engineering Inc.).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Έπειτα από την εισαγωγή των λογικών δέντρων στην ΠΕΣΕ, αναπτύχθηκε το λογισμικό PRISK (Woo, 1985), το οποίο με τη σειρά του τροποποιήθηκε και αναπτύχθηκε περισσότερο (NORSAR). Η νέα έκδοση ονομάστηκε NPRISK. Βασίστηκε στα προγράμματα EQRISK και FRISK και είχε τη δυνατότητα να λαμβάνει υπόψη λογικά δέντρα και τρισδιάστατα ρήγματα με καμπυλότητες πρώτης τάξεως (first order curvatures) στις κατευθύνσεις της παράταξης και της γωνίας κλίσης (Rafi and Hyder, 2006).

Το πρόγραμμα SEISRISK αναπτύχθηκε από τους Bender and Perkins. Η πρώτη έκδοση (SEISRISK I) δεν δημοσιεύθηκε ποτέ, διότι γρήγορα δημιουργήθηκε η δεύτερη και εμφανώς βελτιωμένη έκδοση, SEISRISK II (Bender and Perkins, 1982). Πέντε χρόνια αργότερα παρουσιάστηκε η τρίτη έκδοση, η SEISRISK III (Bender and Perkins, 1987), η οποία παρουσίαζε ορισμένες διαφορές από τις άλλες δύο, με πιο αξιοσημείωτη την ενσωμάτωση της κανονικής χωρικής κατανομής των επικέντρων αντί της ομογενούς σε μια σεισμική πηγή. Ακολουθούσε τη μέθοδο Cornell-McGuire και γράφηκε σε FORTRAN. Αρχικά σχεδιάστηκε για χρήση αποκλειστικά σε υπερυπολογιστές παλαιού τύπου, ενώ στη συνέχεια έγιναν τροποποιήσεις που της επέτρεψαν να λειτουργεί και σε προσωπικούς υπολογιστές (Arnold, 1989).

Το 1986 αναπτύχθηκε το πρόγραμμα CRISIS (Ordaz, 1991) σε γλώσσα FORTRAN, το οποίο ακολουθούσε τη μέθοδο των ολοκληρώσεων και έδινε στον χρήστη τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί γραμμή εντολών. Δέκα χρόνια αργότερα κατασκευάστηκε η γραφική διασύνδεση χρήστη (Graphical User Interface – GUI) και μετονομάστηκε σε CRISIS99 (Ordaz et al., 1999). Βασική γλώσσα προγραμματισμού παρέμεινε η FORTRAN, ενώ τα γραφικά χαρακτηριστικά γράφηκαν σε Visual Basic. Η χρήση δύο γλωσσών προγραμματισμού οφειλόταν στο γεγονός ότι εκείνη την εποχή η Visual Basic ήταν υπολογιστικά αργή. Στη συγκεκριμένη εκδοχή έγινε ενσωμάτωση νέων δυνατοτήτων, όπως της εισαγωγής γραμμικών και σημειακών σεισμικών πηγών, της χρήσης κατανομής βαθών για κάθε σεισμική πηγή, της χρήσης της επιθυμητής κατανομής μεγεθών, του ορισμού κεκλιμένων επιφανειακών σεισμικών πηγών, της εφαρμογής διαφορετικών GMPE για κάθε πηγή, του ορισμού επιθυμητού αριθμού τυπικών αποκλίσεων στις GMPE και της παραγωγής χαρτών σεισμικής επικινδυνότητας και ομοιόμορφων φασμάτων σεισμικής επικινδυνότητας. Το 2007 έγινε ακόμη μία αναβάθμιση του προγράμματος, η CRISIS2007 (Ordaz et al., 2007). Στη νέα εκδοχή, οι υπολογισμοί και τα γραφικά γράφηκαν με μία ενιαία γλώσσα προγραμματισμού, τη Visual Basic.Net. Ανάμεσα στις νέες δυνατότητες του προγράμματος συγκαταλέγονταν η εισαγωγή της αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας και η συμπερίληψη των διαστάσεων της διάρρηξης. Έναν χρόνο μετά έγινε μία ακόμη αναβάθμιση, η CRISIS2008 (Ordaz et al., 2013), στην οποία συμπεριλήφθηκε η ανάλυση λογικών δέντρων και οι επιδράσεις των εδαφικών συνθηκών. Το 2014 (CRISIS2014) το πρόγραμμα έγινε ακόμη πιο γρήγορο, καθώς η

επεξεργασία παραλληλοποιήθηκε σε πολλούς επεξεργαστές (parallel processing). Το 2015 δημοσιεύθηκε το πρόγραμμα CRISIS2015 (Ordaz et al., 2015), το οποίο περιείχε περισσότερες επιλογές για τη μοντελοποίηση των σεισμικών πηγών και υβριδικές εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. Μία από τις τελευταίες εκδόσεις του προγράμματος ονομάζεται R-CRISIS και δημιουργήθηκε το 2017 από την εταιρεία ERN (Ordaz et al., 2017). Η πιο πρόσφατη, κατά τη συγγραφή της παρούσας διατριβής, έκδοση του λογισμικού ονομάζεται R-CRISIS V20 (Ordaz et al., 2021). Περισσότερες πληροφορίες παρέχονται στην ιστοσελίδα <u>https://www.r-crisis.com</u>.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στο δεύτερο μισό της δεκαετίας του 1990 δημιουργήθηκε το πρόγραμμα M3C από τον Roger Musson, και στα επόμενα χρόνια εξελίχθηκε. Χρησιμοποιείται έως σήμερα σε προγράμματα υπολογισμού σεισμικής επικινδυνότητας από το BGS (π.χ. Musson, 1999a, 2000 2012). Ο υπολογισμός της σεισμικής επικινδυνότητας γίνεται με τη μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo. Οι κατάλογοι σχηματίζονται από την παραγωγή τυχαίων αριθμών οι οποίοι ανήκουν σε συγκεκριμένες προκαθορισμένες κατανομές.

Ο κώδικας Ran_Haz (Ebel and Kafka, 1999) υπολογίζει τη σεισμική επικινδυνότητα με τη χρήση συνθετικών καταλόγων σεισμών (προσέγγιση Monte Carlo). Οι συνθετικοί κατάλογοι σχηματίζονται με επανα-δειγματοληψία ενός πραγματικού σεισμικού καταλόγου.

Το πρόγραμμα OHAZ [Oriented Hazard, (Zabukovec, 2000)] δίνει τη δυνατότητα χρήσης μιας προσέγγισης που κάνει ομαλοποίηση της χωρικής κατανομής των σεισμών στη σεισμική πηγή. Με βάση ένα απλό σεισμοτεκτονικό μοντέλο δημιουργεί χάρτες χωρικά ομαλοποιημένης σεισμικότητας. Οι κυριότερες εισαγόμενες παράμετροι είναι ο ρυθμός σεισμικότητας, λ, η τιμή της σταθεράς *b* και το M_{max}, και τα αποτελέσματα είναι οι τιμές των χωρικά ομαλοποιημέννου ουθμοί υπέρβασης συγκεκριμένων εντάσεων σεισμικής κίνησης και οι ετήσιοι ρυθμοί υπέρβασης συγκεκριμένη περίοδο επανάληψης. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από τον Frankel (1995) και απέφευγε τη χρήση σεισμικών ζωνών. Η πρώτη έκδοση του λογισμικού (OHAZ 2.0) γράφηκε σε γλώσσα Java και προσέφερε ένα περιβάλλον εργασίας (interface) φιλικό στον χρήστη, ενώ στη συνέχεια δημιουργήθηκε μια πιο γενικευμένη μορφή του (OHAZ 4.0) σε γλώσσα C++ Builder με σκοπό τη διενέργεια ταχύτερων υπολογισμών.

Το 2002 κυκλοφόρησε το πρόγραμμα NCHMP (Frankel et al., 2002). Έκτοτε έχει γίνει ανάπτυξη του προγράμματος με τη μετονομασία nchmp-haz (Powers, 2017). Το nchmp-haz χρησιμοποιείται για τις ανάγκες του προγράμματος NCHM (US National Seismic Hazard Model) και είναι γραμμένο σε Java. Διατίθεται στον παρακάτω σύνδεσμο: <u>GitHub - usgs/nshmp-haz</u>: <u>National Seismic Hazard Mapping Project</u> (NSHMP) Code.

Ο κώδικας OpenSHA (Field et al., 2003) δημιουργήθηκε από τα SCEC (Southern California Earthquake Center) και USGS (United States Geological Survey). Πρόκειται

για ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα, γραμμένο σε Java, το οποίο όμως έχει τη δυνατότητα να ενσωματώνει υπορουτίνες από διαφορετικές γλώσσες. Είναι κατάλληλο για ΑΕΣΕ και για ΠΕΣΕ. Ακολουθεί τη μέθοδο Cornell-McGuire, ωστόσο υπάρχει και η επιλογή χρήσης προσομοιώσεων. Το τελικό αποτέλεσμα εξάγεται από μια τροποποίηση της «κλασικής» εξίσωσης της μεθόδου ολοκληρώσεων. Το OpenSHA λειτουργεί με απευθείας υπολογισμό των πιθανοτήτων αντί του υπολογισμού τους έπειτα από την άθροιση των μέσων ετήσιων ρυθμών υπέρβασης, χρησιμοποιεί αθροίσματα διακριτών μεγεθών και αποστάσεων αντί των ολοκληρωμάτων τους, και συμπεριλαμβάνει το είδος διάρρηξης και τον υπολογισμό της σχετικής σεισμικής επικινδυνότητας κάθε διάρρηξης (αποάθροιση). Το πρόγραμμα και περισσότερες λεπτομέρειες αναφορικά με τη λειτουργία του βρίσκονται στην ιστοσελίδα <u>http://www.OpenSHA.org</u>.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το πρόγραμμα EQRM (Robinson et al., 2005, 2007) είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα, το οποίο δημιουργήθηκε από την Geo-Science Australia. Είναι γραμμένο σε γλώσσες Python και MATLAB. Δεν περιέχει GUI. Χρησιμοποιεί τη μέθοδο Monte Carlo, δηλαδή κάνει στοχαστικές προσομοιώσεις της σεισμικότητας. Παράγει χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας, καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας και ομοιόμορφα φάσματα σεισμικής επικινδυνότητας.

Το πρόγραμμα EqHaz (Assatourians and Atkinson, 2013) λειτουργεί με τη μέθοδο προσομοίωσης τύπου Monte Carlo, δηλαδή με παραγωγή συνθετικών καταλόγων σεισμικότητας. Είναι γραμμένο σε γλώσσα FORTRAN και αποτελεί λογισμικό ανοιχτού κώδικα. Παρέχει αρκετές επιλογές κατανομών μεγεθών, εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. και ειδών σεισμικών πηγών. Όσον αφορά τα ρήγματα, υπολογίζει τις αποστάσεις γεωμετρικά, ενώ τις επιφανειακές σεισμικές πηγές με στατιστικές σχέσεις μετατροπής. Ενδείκνυται εξίσου για τη διενέργεια ΑΕΣΕ και ΠΕΣΕ. Τα βήματα των υπολογισμών χωρίζονται σε τρεις επιμέρους κώδικες (EqHaz1, EqHaz2, EqHaz3). То πρόγραμμα υπάρχει στην ιστοσελίδα https://www.seismotoolbox.ca/EQHAZ.html.

Ένας ακόμη κώδικας είναι ο HAZ45 (Hale et al., 2018) και οι επεκτάσεις του (HAZ45.2, HAZ45.3, HAZ45b, HAZ38-URS, THAZ). Δημιουργήθηκε από τον Norman Abrahamson σε γλώσσα FORTRAN και χρησιμοποιείται από την Pacific Gas and Electric Co. Ακολουθεί τη μέθοδο Cornell-McGuire και κάνει τον υπολογισμό των αποστάσεων με στατιστικές μετατροπές. Το πρόγραμμα και λεπτομέρειες σχετικές με τη λειτουργία του διατίθενται στην ιστοσελίδα https://github.com/abrahamson/HAZ.

Μερικοί επιπλέον κώδικες που χρησιμοποιούνται κυρίως από εταιρείες και οργανισμούς είναι οι HazMapEQ (Fugro / Nuclear Regulatory Commission), PROSIT (Air Worldwide), RIZZO-HAZARD (RIZZO Associates), SISMIC (Arup), XCD55, HAZ51, TREE51 (Amec Foster Wheeler). Συγκρίσεις μεταξύ αυτών των κωδίκων (συμπεριλαμβανομένων του HAZ45 και των επεκτάσεών του) γίνονται στην έκθεση των Hale et al. (2018). Υπάρχει πληθώρα κωδίκων και λογισμικών που αξιοποιούνται πρωτίστως για αναλύσεις τρωτότητας, ωστόσο περιέχουν και την επιλογή της ανάλυσης σεισμικής επικινδυνότητας. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εξής: το HAZUS-MH (FEMA, σε γλώσσες Visual Basic 6 και C++), το HAZUS Canada ή HazCan (NRCan, σε Visual Basic 6 και C++), το Ergo (University of Illinois, σε Java), το SELENA (NORSAR, σε Matlab και C++), το CARPA (World Bank, σε Visual Basic.NET) και το ER2 (NRCan, CSSP, γραμμένο σε Java). Πρόκειται για λογισμικά ανοιχτού κώδικα, με εξαίρεση τα HAZUS-MH και ER2. Όλα τα λογισμικά περιέχουν GUI και ενδείκνυνται για ΑΕΣΕ και για ΠΕΣΕ. Η σύγκρισή τους παρουσιάζεται στην εργασία των Hosseinpour et al. (2021). Επιπλέον, υπάρχει ο κώδικας CEDIM (CEDIM, σε Visual Basic) ο οποίος περιέχει GUI και δεν αποτελεί λογισμικό ανοιχτού κώδικα, ο κώδικας MAEviz (MAE Center, σε Java) που περιέχει GUI και είναι ανοιχτού κώδικα, και ο κώδικας OpenRisk (SPA Risk, σε Java) που περιέχει GUI και δεν είναι λογισμικό ανοιχτού κώδικα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τέλος, το λογισμικό OpenQuake (Pagani et al., 2014; Silva et al., 2014) δημιουργήθηκε το 2014 στο πλαίσιο του GEM (Global Earthquake Model), το οποίο ιδρύθηκε το 2009 με σκοπό τον εμπλουτισμό της παγκόσμιας γνώσης για τη σεισμική τρωτότητα και τη μείωσή της. Αποτελεί ένα λογισμικό κατάλληλο για αναλύσεις σεισμικής επικινδυνότητας και για αναλύσεις σεισμικής τρωτότητας. Είναι λογισμικό ανοιχτού κώδικα (https://www.github.com/gem/oq-engine), γραμμένο στη γλώσσα προγραμματισμού Python. Αποτελεί ένα σύγχρονο εργαλείο με πολλές επιλογές για τον χρήστη. Μπορεί να κάνει ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας με τη μέθοδο Cornell-McGuire και με τη Monte Carlo. Παρέχει στον χρήστη πολλές επιλογές για τον ορισμό της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών των σεισμικών πηγών και των κατανομών μεγέθους, και πληθώρα εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (από τις παλαιότερες έως τις πιο σύγχρονες). Η διαχείριση των αβεβαιοτήτων γίνεται με χρήση λογικών δέντρων. Κάνει παραγωγή πληθώρας αποτελεσμάτων: χαρτών σεισμικής επικινδυνότητας, καμπυλών σεισμικής επικινδυνότητας, γραφημάτων αποάθροισης, συνθετικών καταλόγων σεισμικότητας κ.λπ. Περιέχει παραλληλοποιημένους υπολογισμούς, με αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας λειτουργίας του. Δεν περιέχει GUI. Διατίθεται στην ιστοσελίδα https://www.globalquakemodel.org/openquake. То συγκεκριμένο πρόγραμμα επιλέχθηκε για την ικανοποίηση μέρους των αναγκών της παρούσας διατριβής.

1.8. ΑΠΟΑΘΡΟΙΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Είναι παράδοξο το γεγονός ότι το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της ΠΕΣΕ, δηλαδή ο ταυτόχρονος υπολογισμός όλων των πιθανών συνδυασμών σεισμικών πηγών, μεγεθών, αποστάσεων και εντάσεων (Υ) της εδαφικής κίνησης που μπορούν να πλήξουν ένα σημείο, αποτελεί ταυτόχρονα και μειονέκτημά της. Έπειτα από την ολοκλήρωση των υπολογισμών προκύπτει (φυσικά και πηγαία) το ερώτημα: ποιο

από όλα τα σενάρια είναι πιθανότερο να προκαλέσει στο σημείο ένταση Υ>y (όπου, y, η τιμή της παραμέτρου για την οποία υπολογίζεται η πιθανότητα υπέρβασης);

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Παρά τα μειονεκτήματα της ΑΕΣΕ, υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους ο προσδιορισμός ενός σεισμού σχεδιασμού είναι σημαντικός, καθώς δίνει την αίσθηση του σεισμού που «επικρατεί» (κυριαρχεί) στον σεισμικό κίνδυνο στο επιθυμητό επίπεδο πιθανότητας. Αυτός μπορεί να σχετιστεί με κάποιο γνωστό ρήγμα ή σεισμική ζώνη και να του αποδοθούν χαρακτηριστικά όπως μέγεθος, απόσταση, αζιμούθιο και άλλες εστιακές παράμετροι (π.χ. πτώση τάσης). Επίσης, είναι δυνατή η διενέργεια πιο λεπτομερών αναλύσεων για τον σεισμό σχεδιασμού με δημιουργία χρονο-ιστοριών της σεισμικής κίνησης (π.χ. για μη-γραμμική δυναμική ανάλυση). Προκειμένου να απαντηθεί το συγκεκριμένο ερώτημα, χρησιμοποιείται η αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας (στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται με τον όρο deaggregation ή disaggregation). Τα αποτελέσματα της αποάθροισης ποικίλουν αναλόγως της παραμέτρου Υ που εξετάζεται [PGA, PGV, PSA(T)] και της περιόδου επανάληψης για την οποία γίνονται οι υπολογισμοί, με αποτέλεσμα να εξετάζονται περισσότεροι του ενός σεισμοί σχεδιασμού, ειδικά στις περιπτώσεις στις οποίες το σημείο ενδιαφέροντος επηρεάζεται από πολλαπλές σεισμικές πηγές (Iervolino et al., 2011).

Αρχικά, προτάθηκε η διενέργεια μίας «αναδρομικής» ΠΕΣΕ για τον προσδιορισμό του κυρίαρχου σεισμού για κάθε επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας (NRC, 1988). Βάσει αυτού, οι σεισμοί και οι εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. μπορούν να αναθεωρηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια, ώστε να αντιπροσωπεύουν τα χαρακτηριστικά του και στη συνέχεια να διενεργηθεί εκ νέου η ΠΕΣΕ με πιο ακριβή μοντέλα. Τα χαρακτηριστικά του κυρίαρχου σεισμών που προκάλεσαν τιμή Y > y για την περίοδο επανάληψης που είχε επιλεγεί. Η ιδέα των τιμών \overline{M} και \overline{R} προτάθηκε πρώτη φορά από τους McGuire and Shedlock (1981) για την ανάλυση των αβεβαιοτήτων της σεισμικής επικινδυνότητας.

Μία άλλη προσέγγιση του ζητήματος (Kameda et al., 1994a, 1994b; Ishikawa, 1988, 1991, 1994) πρότεινε τον ξεχωριστό για κάθε συχνότητα και για κάθε σεισμική πηγή προσδιορισμό των τιμών \overline{M} και \overline{R} , και τη μετέπειτα χρήση τους για τον υπολογισμό της έντασης της εδαφικής κίνησης. Η ένταση αυτή, ωστόσο, πρέπει στη συνέχεια να κλιμακωθεί (scaled), ώστε να δώσει το ίδιο πλάτος με την αρχική σεισμική κίνηση, αυτή δηλαδή που προκύπτει από την ΠΕΣΕ χωρίς καμία παρέμβαση. Αξίζει να σημειωθεί το μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης: δύο διαφορετικά ζεύγη \overline{M} και \overline{R} για δύο επιφανειακές σεισμικές πηγές είναι ενδεικτικά σεισμών που δεν έχουν την ίδια συχνότητα (target mean frequency of occurrence), επειδή προσδιορίζονται σε σχέση με κάθε πηγή.

Πρώιμες εργασίες αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας (Stepp et al., 1993; Chapman, 1995) έκαναν αποάθροιση της συνεισφοράς του μεγέθους, της απόστασης και της παραμέτρου ε (αριθμός θεωρούμενων τυπικών αποκλίσεων στην εφαρμοζόμενη εμπειρική σχέση πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ.). Παρόλα αυτά, δεν ανέφεραν

το ζήτημα της αβεβαιότητας στις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. και δεν έδειξαν τον τρόπο προσδιορισμού ενός μοναδικού κυρίαρχου σεισμού για ένα εύρος περιόδων φασμάτων απόκρισης (response spectrum periods). Προτάσεις για την επίλυση αυτών των ζητημάτων έδωσε για πρώτη φορά ο McGuire (1995). Δύο χρόνια αργότερα, οι Budnitz et al. (1997) υποστήριξαν ότι η αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της ΠΕΣΕ, έδωσαν οδηγίες σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο αυτή μπορεί να διενεργηθεί και παρουσίασαν σχετικά αποτελέσματα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το πρώτο βιβλίο στο οποίο εισήχθη ως έννοια η αποάθροιση είναι αυτό του Kramer (1996), ο οποίος πρότεινε ότι ο μέσος ετήσιος ρυθμός υπέρβασης μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του μεγέθους και/ή της απόστασης. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται εύκολα με την αφαίρεση του κατάλληλου όρου από τη Σχέση (1.33). Επομένως, ο μέσος ετήσιος ρυθμός υπέρβασης εκφράζεται ως συνάρτηση του μεγέθους από τη σχέση:

$$\lambda_{Y>y}(m_j) \approx P[M = m_j] \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{k=1}^{N_R} v_i P[Y > y | m_j, r_k] P[R = r_k]$$
(1.34)

Με παρόμοιο τρόπο, ως συνάρτηση της απόστασης δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_{Y>y}(r_k) \approx P[R = r_k] \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=1}^{N_M} v_i P[Y > y | m_j, r_k] P[M = m_j]$$
(1.35)

Ως συνάρτηση του μεγέθους και της απόστασης ταυτόχρονα υπολογίζεται από τη Σχέση:

$$\lambda_{Y>y}(m_j, r_k) \approx P[M = m_j] P[R = r_k] \sum_{i=1}^{N_s} v_i P[Y>y|_{m_j, r_k}]$$
(1.36)

OI Stepp et al. (1993) και Bazzurro and Cornell (1999) αξιοποίησαν και την παράμετρο ε στην αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας. Η παράμετρος αυτή είναι ενδεικτική της απόκλισης της έντασης από τη μέση τιμή που υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ., τακτική που ακολουθείται έως και σήμερα. Όπως φαίνεται και από τα αθροίσματα των Σχέσεων (1.34) έως (1.36), το εύρος των μεγεθών, των αποστάσεων και των τιμών της παραμέτρου ε χωρίζεται σε κελιά με πλάτος Δm , Δr και $\Delta \varepsilon$, αντίστοιχα. Στις περισσότερες περιπτώσεις (εξαιρουμένης της απόστασης, ορισμένες φορές) ως τιμή για κάθε κελί μεγέθους, απόστασης και παραμέτρου ε θεωρείται η κεντρική τιμή. Είναι σαφές ότι η ακρίβεια των υπολογισμών αυξάνεται όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των θεωρούμενων κελιών (διαστημάτων). Όταν ορίζονται τα διαστήματα αυτά, η αποάθροιση για N πηγές μπορεί να γίνει με την άθροιση της συνεισφοράς της τιμής $\lambda_{r>y}$ κάθε σεισμού σε κάθε κελί M-R- ε , και με την επακόλουθη διαίρεση αυτής της σώρευσης με τον μέσο ετήσιο ρυθμό υπέρβασης. Επομένως, αποτελεί το κανονικοποιημένο στη μονάδα άθροισμα όλων των τιμών $v_i P \left[Y > y \right]_{m_i, r_k} \right$ της εξίσωσης (1.36). Όταν

θεωρούνται διαστήματα μεγέθους (*M*) ή απόστασης (*R*) ή παραμέτρου ε (ε), μόνον, τότε η αποάθροιση είναι μονοδιάστατη (1D), ενώ όταν χρησιμοποιούνται διαστήματα μεγέθους-απόστασης (*M-R*) είναι δισδιάστατη (2D), και όταν χρησιμοποιούνται διαστήματα και για τις τρεις παραμέτρους (*M-R-ε*) είναι τρισδιάστατη (3D). Οι περιπτώσεις αυτές ονομάζονται *Περιθωριακές Συναρτήσεις Πιθανότητας* (marginal Probability Mass Function – PMF) στη θεωρία των πιθανοτήτων του συνδυασμού *M*, *M-R* και *M-R-ε*, αντίστοιχα, δεδομένου ότι στο σημείο ενδιαφέροντος ισχύει ότι Y>y.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Οι Bazzurro και Cornell (Bazzurro and Cornell, 1999) πρότειναν για πρώτη φορά την τετραδιάστατη (4D) αποάθροιση, στην οποία η συνεισφορά στη σεισμική επικινδυνότητα δεν μετράται βάσει των αποστάσεων *R*, αλλά βάσει των γεωγραφικών συντεταγμένων (γεωγραφικό μήκος - longitude ή lon και γεωγραφικό πλάτος - latitude ή lat). Ο τρόπος αυτός διευκολύνει την απευθείας απεικόνιση των πιο καταστροφικών σεισμών σε έναν χάρτη και τον προσδιορισμό των σεισμικών πηγών από τις οποίες αυτοί γεννήθηκαν (Σχήμα 1.8.1a). Στη συνέχεια, η σεισμική επικινδυνότητα μπορεί να αποαθροιστεί περαιτέρω βάσει της συνεισφοράς των *M* και ε.

Στις πρώιμες εργασίες σεισμικής επικινδυνότητας γινόταν χρήση των μέσων τιμών των M και R (\overline{M} και \overline{R}), καθώς αυτές είναι εύκολα κατανοητές και απλές στον υπολογισμό. Ωστόσο, το γεγονός ότι επηρεάζονται πολύ από ακραίες τιμές, με αποτέλεσμα να υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες δεν αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές συνθήκες, οδήγησε τις μεταγενέστερες εργασίες στην αξιοποίηση των επικρατουσών τιμών (modal) M^* και R^* , οι οποίες έχουν το επιπλέον πλεονέκτημα ότι αποτελούν τις πιο *πιθανές* τιμές. Επιπλέον, οι μέσες τιμές δεν αναδεικνύουν πιθανή ύπαρξη εξάρτησης μεταξύ των M και R, ενώ η χρήση των επικρατουσών τιμών της συνδυαστικής πιθανοτικής κατανομής M-R για την υπέρβαση της τιμής στόχου, y, τη δείχνουν. Ωστόσο, η εξάρτησή τους από τον ορισμό των διαστημάτων και του εύρους τους αποτελεί μειονέκτημά τους.

Το 2007 προτάθηκε μία νέα μέθοδος αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας (Pagani and Marcellini, 2007) η οποία, εκτός των *M*, *R* και *ε*, λαμβάνει υπόψη και τον αριθμό, *n*, των σεισμικών δονήσεων (Σχήμα 1.8.1b). Η αποάθροιση γίνεται με όρους πιθανοτήτων και υπάρχει η δυνατότητα γενίκευσης της προτεινόμενης μεθόδου, προκειμένου να κάνει και γεωγραφική αποάθροιση. Ένα από τα πλεονεκτήματά της αποτελεί το γεγονός ότι δείχνει αν η συνεισφορά στη σεισμική επικινδυνότητα προέρχεται από έναν μοναδικό σεισμό ή από περισσότερους. Η επιρροή της κλάσης του εδάφους στα αποτελέσματα αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας (Σχήμα 1.8.1c) εξετάστηκε από τον lervolino (2016), ο οποίος απέδειξε αναλυτικά ότι υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις, ανάλογα με την κατασκευή, τις GMPE και τη χρήση ή μη λογικού δέντρου, στις οποίες τα αποτελέσματα της αποάθροισης παραμένουν σταθερά, παρά την αλλαγή των εδαφικών συνθηκών.

Πρόσφατη επανεξέταση της μεθόδου της αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας (Cito and lervolino, 2022) στην οποία, για λόγους ευκολίας, αντί της πιθανότητας Y > y υπολογίζεται η πιθανότητα Y = y (occurrence deaggregation) με $Y \in (y, y+\delta y)$, όπου δy ένα αυθαίρετα καθορισμένο πεπερασμένο διάστημα, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας με βάση τα M και R είναι εφικτή χωρίς τον προσδιορισμό του δy . Η M-R αποάθροιση προσφέρει όλες τις πληροφορίες για τα σχετικά σενάρια στα οποία η ένταση αποκτά την τιμή y, συμπεριλαμβανομένων αυτών για την παράμετρο ε. Επίσης, η M-R-ε αποάθροιση αποτελεί μια εκφυλισμένη συνάρτηση, και ο προσδιορισμός της με τη χρήση του διαστήματος δy ενδέχεται να οδηγήσει σε παραπλανητικά αποτελέσματα. Τέλος, η αποάθροιση που περιέχει την παράμετρο ε είναι σημαντική όταν το πλάτος του διαστήματος δy ταυτίζεται με τη διακριτοποίηση του εύρους των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς, ωστόσο σε αυτήν την περίπτωση είναι ανάλογη με την αποάθροιση με όρους M-R.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Όταν η ΠΕΣΕ γίνεται με μεθόδους προσομοίωσης τύπου Monte Carlo, η αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας είναι μια πολύ απλή και εύκολη διαδικασία, απαλλαγμένη από τις δυσκολίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Μετά την επιλογή της μέγιστης τιμής της παραμέτρου Υ για κάθε υποκατάλογο διάρκειας ίσης με την εξεταζόμενη περίοδο επανάληψης και την κατανομή των μεγίστων σε φθίνουσα σειρά αρκεί η επιλογή των σεισμών που προκαλούν τιμή Υ≥γ. Αφού συγκεντρωθούν αυτοί οι σεισμοί, μπορεί να γίνει δημιουργία χαρτών με τη γεωγραφική κατανομή των επικέντρων τους και υπολογισμός των στατιστικών στοιχείων τους, όπως η μέση, η επικρατούσα και η κεντρική τιμή των *M*, *R* και *ε*.



Σχήμα 1.8.1 Παραδείγματα μελετών αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας: a) Αποάθροιση βάσει των γεωγραφικών συντεταγμένων (Bazzurro and Cornell, 1999), b) Αποάθροιση κατά μέγεθος, Μ, και αριθμό σεισμών, n, (Pagani and Marcellini, 2007) και, c) Μ-R αποάθροιση για εδαφικές συνθήκες (αριστερά) βράχου και (δεξιά) μαλακού εδάφους (Iervolino, 2016).

Στη βιβλιογραφία, η αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας παρουσιάζεται συνήθως μαζί με τα αποτελέσματα του υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας για τα σημεία ή την περιοχή ενδιαφέροντος, δεδομένου ότι η συγκεκριμένη διεργασία αποτελεί επέκταση της ΠΕΣΕ. Για τον Ελληνικό χώρο έχουν γίνει ορισμένες εφαρμογές αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας, οι περισσότερες από τις οποίες αφορούν συγκεκριμένες περιοχές. Οι Tselentis and Danciu (2010a) έκαναν 3D αποάθροιση (*M-R-ε*) της σεισμικής επικινδυνότητας για 52 μεγάλα αστικά κέντρα και παρουσίασαν αποτελέσματα για τις παραμέτρους PGA και PSA στα 0.2 s και 1.0 s (τιμές με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης για περίοδο επανάληψης 50 ετών, Σχήμα 1.8.2a). Στις περιοχές για τις οποίες έχει γίνει αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας συγκαταλέγονται οι Σπέτσες (Musson, 1999a), η Πάτρα (Danciu et al., 2007), η Ξάνθη (Roumelioti et al., 2017), η Λέσβος (Vavlas et al., 2019), η Θεσσαλονίκη [Trevlopoulos et al. (2020), Σχήμα 1.8.2b], η Κεφαλονιά (Kerkenou et al., 2022) και η Α. Μακεδονία-Θράκη (Sotiriadis et al., 2023). Τέλος, οι Slejko et al. (2021) έκαναν αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας για τις ανάγκες του αντισεισμικού σχεδιασμού ενός σημείου μεταξύ Ελλάδας και Αλβανίας στο οποίο λειτουργεί ένας συμπιεστής (compressor) του αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου TAP (Trans Adriatic Pipeline) που εκκινεί από την Τουρκία, διατρέχει την Ελλάδα και την Αλβανία και καταλήγει στην Ιταλία.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 1.8.2 Ενδεικτικά παραδείγματα μελετών αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας για τον Ελληνικό χώρο: a) Χάρτες με τη χωρική κατανομή των \overline{M} (αριστερά) και \overline{R} (δεξιά), όπως προκύπτουν από αποάθροιση της ΠΕΣΕ (PGA) 52 θέσεων (Tselentis and Danciu, 2010a) και, b) παρουσίαση για τη θέση της Θεσσαλονίκης (αριστερά) των δύο κύριων σεναρίων σεισμών (κέντρο) και των αποτελεσμάτων της M-R αποάθροισης της ΠΕΣΕ, με χρήση του λογισμικού OpenQuake (Trevlopoulos et al., 2020).

Η Ελλάδα αποτελεί μία από τις τεκτονικά και σεισμικά ενεργότερες περιοχές της Γης. Φιλοξενεί το 60% της ευρωπαϊκής και το 2% της παγκόσμιας σεισμικότητας, τη στιγμή που καταλαμβάνει μόλις το 0.09% της επιφάνειας του πλανήτη (Båth, 1983). Αποτελεί μια περιοχή στην οποία γίνονται ισχυροί σεισμοί, με μέγεθος που πολλές φορές ξεπερνά το 7.0 και με συχνότερα παρατηρούμενο μέγιστο μέγεθος επιφανειακών σεισμών για χρονικό διάστημα 10 ετών έως και 6.5 (Βαμβακάρης, 2010). Το σεισμοτεκτονικό της καθεστώς είναι ιδιαιτέρως περίπλοκο, καθώς επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση πολλών τεκτονικών πλακών.

1.9.1. Σεισμοτεκτονικό καθεστώς της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

1.9. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Τα κυριότερα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.9.1. Η Μεσογειακή πλάκα κινείται προς τα βόρεια και καταδύεται κάτω από τη μικροπλάκα του Αιγαίου κατά μήκος του Ελληνικού τόξου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία των τυπικών σεισμοτεκτονικών χαρακτηριστικών μιας ζώνης κατάδυσης, δηλαδή του εξωτερικού ιζηματογενούς τόξου (Ν. Πελοπόννησος, Κρήτη, Κάρπαθος, Ρόδος), με σεισμικότητα που προέρχεται από ανάστροφα ρήγματα, του εσωτερικού ηφαιστειακού τόξου (π.χ. Μέθανα, Μήλος, Σαντορίνη) και μιας οπισθότοξης περιοχής στην οποία κυριαρχεί το εφελκυστικό πεδίο τάσεων (Αιγαίο Πέλαγος). Η κατάδυση αυτή ξεκίνησε πριν από τουλάχιστον 100 Myr (Jolivet and Brun, 2010) και ταυτοποιήθηκε πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του 1970 (Caputo et al., 1970; Papazachos and Comninakis, 1969, 1971). Η καταδυόμενη πλάκα σχηματίζει τη ζώνη Benioff και βυθίζεται με κλίση 10°-20° στο δυτικό της τμήμα, και με μεγαλύτερη στο ανατολικό. Επίσης, παρουσιάζει οπισθοκύλιση προς την Αφρική (Le Pichon and Angelier, 1979).

Η μικροπλάκα της Ανατολίας ταυτοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1972 (McKenzie, 1972). Η δυτική κίνηση της μικροπλάκας αυτής λαμβάνει χώρα κατά μήκος του δεξιόστροφου ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης της Τάφρου του Β. Αιγαίου (NAT), γίνεται με φαινόμενη ταχύτητα 2-2.5 cm/yr (π.χ. Jackson and McKenzie, 1988) και διαχωρίζει τη μικροπλάκα του Αιγαίου από την Ευρασία (Taymaz et al., 1991). Οφείλεται εν μέρει στην κίνηση της Αραβικής πλάκας προς τα βόρεια σε σχέση με την Ευρασία (Taymaz et al., 1990; McClusky et al., 2003; Dilek and Pavlides, 2006), ενώ άλλα μοντέλα θεωρούν πιο σημαντικό τον ρόλο της βαρύτητας και της οπισθοκύλισης (rollback) της πλάκας της Μεσογείου (π.χ. Hatzfeld et al., 1997).

Η καταδυόμενη λιθόσφαιρα, σε συνδυασμό με την προς τα δυτικά κίνηση της μικροπλάκας της Ανατολίας, έχει ως αποτέλεσμα τη ΝΔ κίνηση της μικροπλάκας του Αιγαίου (π.χ. Papazachos, 1999; Taymaz et al., 2007), η οποία εφιππεύει την πλάκα της Ανατολικής Μεσογείου με σχετικά γρήγορο ρυθμό (≈3.5 cm/yr, σε σχέση με την Ευρασία), γρηγορότερο από αυτόν της κίνησης της μικροπλάκας της Ανατολίας προς τα δυτικά (Kahle et al., 1995; McClusky et al., 2000; Floyd et al., 2010). Η ΝΔ κίνηση του Αιγαίου διευκολύνεται από τις κινήσεις του δεξιόστροφου ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης της Κεφαλονιάς (CTF) και του αριστερόστροφου ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης της Ρόδου-RTF (Nocquet, 2012; Le Pichon and Kreemer, 2010).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Λόγω της οπισθοκύλισης της καταδυόμενης λιθόσφαιρας, το πεδίο τάσεων της οπισθοτόξιας περιοχής είναι εφελκυστικό με διεύθυνση BBΔ-NNA στα δυτικά που μετατρέπεται σε BBA-NNΔ στα ανατολικά (Mercier et al., 1989; Papazachos and Kiratzi, 1996; Meijer and Wortel, 1997; Jolivet et al., 2013), με αποτέλεσμα τον σχηματισμό κανονικών ρηγμάτων με περίπου A-Δ παράταξη (Van Hinsbergen and Schmid, 2012; Faccenna et al., 2014; Menant et al., 2016; Papazachos, 2019). Η λέπτυνση του φλοιού της μικροπλάκας του Αιγαίου που προκαλείται από εφελκυσμό ακολούθησε τη συμπιεστική φάση του Παλαιοκαίνου, η οποία δημιούργησε τις Διναρίδες και τις Ελληνίδες οροσειρές (Faccenna et al., 2014). Παράλληλα, βόρεια του ρήγματος της Κεφαλονιάς (CTF) γίνεται η σύγκρουση της αριστερόστροφα περιστρεφόμενης Απούλιας (Αδριατικής) μικροπλάκας με τα δυτικά παράλια της Αλβανίας και της Ελλάδας, προκαλώντας τον σχηματισμό ανάστροφων ρηγμάτων BBA-NNΔ διεύθυνσης.



Σχήμα 1.9.1 Χάρτης της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου με τα κυριότερα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά της (Papazachos, 2019). Οι μαύρες ισοπαχείς καμπύλες δείχνουν το πάχος του φλοιού. Τα διπλά διανύσματα αντίθετης φοράς δείχνουν τις εφελκυστικές τάσεις, όπως υπολογίστηκαν από δεδομένα μηχανισμών γένεσης σεισμών. Με κόκκινα τρίγωνα σημειώνονται τα πέντε κυριότερα ηφαιστειακά κέντρα του Νοτίου Αιγαίου. Οι μπλε διακεκομμένες καμπύλες γραμμές παρουσιάζουν τις ισοβαθείς της ζώνης Benioff. Με μαύρα έντονα βέλη παρουσιάζονται οι σχετικές με την Ευρασία κινήσεις των μικροπλακών. Τέλος, οι ζώνες ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης (NAF, NAT, CTF και RTF) οι οποίες αναδεικνύουν τη ΝΔ κίνηση της μικροπλάκας του Αιγαίου είναι σκιασμένες με κίτρινο χρώμα.

Στο Σχήμα 1.9.2 παρουσιάζονται τα κύρια νεοτεκτονικά ρήγματα της περιοχής μελέτης (Caputo et al., 2012) και το ενεργό πεδίο τάσεων που προσδιορίζεται από δεδομένα σεισμών (Papazachos and Kiratzi, 1996). Το Αιγαίο και η δυτική Ανατολία περιέχουν κυρίως κανονικά ρήγματα Α-Δ παράταξης, διεύθυνση η οποία είναι αναμενόμενη λόγω του περίπου Β-Ν διεύθυνσης εφελκυσμού που επικρατεί στην περιοχή. Εξαιρέσεις αποτελούν τα δεξιόστροφα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης των ζωνών ΝΑF, ΝΑΤ, και CTF και τα αριστερόστροφα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης της ζώνης RTF. Επίσης, εξαίρεση αποτελεί και μια στενή ζώνη Α-Δ εφελκυσμού με τη δημιουργία αντίστοιχων κανονικών ρηγμάτων Β-Ν διεύθυνσης κατά μήκος των Ελληνίδων οροσειρών, της Β. Κρήτης και της Ρόδου. Όπως προαναφέρθηκε, στα δυτικά παράλια της Αλβανίας και της Ελλάδας το πεδίο των τάσεων είναι συμπιεστικό. Στο εξωτερικό τόξο η συμπίεση οφείλεται στην κατάδυση της Ανατολικής Μεσογειακής λιθόσφαιρας κάτω από αυτήν του Αιγαίου. Βόρεια της ζώνης CTF το πεδίο των τάσεων είναι συμπιεστικό εξαιτίας της σύγκρουσης της Αδριατικής μικροπλάκας με αυτήν του Αιγαίου, με συνέπεια τον σχηματισμό ανάστροφων ρηγμάτων, όπως αναλύθηκε παραπάνω.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 1.9.2 Νεοτεκτονικά (σεισμικά και ενεργά) ρήγματα της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου (Caputo et al., 2012) και ενεργό πεδίο τάσεων από πληροφορίες μηχανισμών γένεσης σεισμών (Papazachos and Kiratzi, 1996). Τα μαύρα βέλη δείχνουν τις συμπιεστικές τάσεις, τα λευκά τις περίπου B-N διευθύνσεις εφελκυστικής τάσης, και τα μπλε τις Α-Δ διεύθυνσης συμπιεστικές τάσεις. Οι συντομογραφίες για τα ρήγματα ταυτίζονται με εκείνες στο Σχήμα 1.9.1 (Papazachos, 2019).

Η πολυπλοκότητα του σεισμοτεκτονικού καθεστώτος της περιοχής μελέτης απεικονίζεται και στη σεισμικότητά της. Στο Σχήμα 1.9.3 παρουσιάζονται οι σεισμοί με Μ≥5.0 που έχουν συμβεί στην περιοχή μελέτης από το 550 π.Χ έως το 2021. Η σεισμικότητα συγκεντρώνεται στο Ελληνικό τόξο και στις ζώνες των ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης, περιοχές που έχουν και αυξημένη σεισμική επικινδυνότητα, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια. Επίσης, υπάρχουν περιοχές με μειωμένη σεισμική δραστηριότητα, όπως η Θράκη (στην οποία, ωστόσο, υπάρχουν μεγάλα ρήγματα χαμηλής περιόδου επανάληψης) και το Κεντρικό-Νότιο Αιγαίο Πέλαγος. Συνέπεια των πολυάριθμων τεκτονικών κινήσεων που επηρεάζουν την ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου αποτελεί η αυξημένη σεισμική της επικινδυνότητα. Το ετήσιο μέγιστο μέγεθος είναι της τάξεως του 6.0-6.3 (Vamvakaris et al., 2016a). Στο εξωτερικό Ελληνικό τόξο μπορούν να συμβούν σεισμοί με μέγεθος έως Μ8.0 (π.χ. σεισμός 365 μ.Χ., Φαλάσαρνα) και η οπισθότοξη περιοχή μπορεί να φιλοξενήσει σεισμούς έως Μ7.5 (π.χ. σεισμός 1956, Αμοργός). Μικρότερου μεγέθους σεισμοί (Μ=6.0-7.0) δύνανται να προκαλέσουν κινήσεις με τιμές PGA έως και 1.0 g (π.χ. Αρκαλοχώρι 2021, M5.9) ή πολλούς θανάτους, όπως ο σεισμός της Χίου το 1881 (M6.5), εξαιτίας του οποίου σκοτώθηκαν περισσότεροι από 3500 άνθρωποι (Papazachos and Papazachou, 2003).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 1.9.3 Χάρτης με τα επίκεντρα των γνωστών σεισμών της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου με μέγεθος Μ≥5.0 για την περίοδο -550-2021. Τα δεδομένα προέρχονται από τον κατάλογο σεισμών του Σεισμολογικού Σταθμού του ΑΠΘ (<u>https://seismo.auth.gr</u>). Ο σεισμικός κατάλογος είναι πλήρης για τα εξής διαστήματα και μεγέθη: M>6.5 (1901), M>5.2 (1911), M>4.8 (1950) και M>4.5 (1964).

1.9.2. Παλαιότερες έρευνες σεισμικής επικινδυνότητας για την Ελλάδα

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η σεισμική επικινδυνότητα της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών ερευνών και εργασιών. Δυστυχώς δεν υπάρχουν πολλές λεπτομερείς μελέτες πριν από το 1980, καθώς εκείνη την περίοδο δεν υπήρχε δίκτυο επιταχυνσιογράφων που να καταγράφει την ισχυρή σεισμική κίνηση, ενώ η κατανόηση του σεισμοτεκτονικού καθεστώτος ήταν σχετικά περιορισμένη, ιδίως πριν από την εισαγωγή της Θεωρίας των Λιθοσφαιρικών Πλακών. Ο πρώτος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας για την Ελλάδα (χωρική κατανομή της μακροσεισμικής έντασης) για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε ποσοτική -και όχι ποιοτική- μέθοδος εκτίμησης δημιουργήθηκε από τους Galanopoulos and Delibasis (1972). Έκτοτε έχουν γίνει μελέτες με χρήση διαφόρων μεθόδων υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας.

Με τη μέθοδο Cornell-McGuire καθόρισαν τη σεισμική επικινδυνότητα για το σύνολο της περιοχής μελέτης (ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου) πολλοί ερευνητές (Algermissen et al., 1976; Papaioannou et al., 1985; Papazachos et al., 1985, 1993; Papaioannou, 1988; Μάργαρης, 1994; Papaioannou and Papazachos, 2000; Koutrakis et al., 2002; Tselentis et al., 2010; Tselentis and Danciu, 2010b). Τοπικού χαρακτήρα εκτιμήσεις της σεισμικής επικινδυνότητας έχουν γίνει από τους (Papoulia and Stavrakakis, 1990; Papoulia, 1992; Papoulia and Slejko, 1993; Roumelioti et al., 2017; Vavlas et al., 2019; Slejko et al., 2021; Kaviris et al., 2022a, 2022b, 2023; Sotiriadis et al., 2023).

Παρά την ευκολία της, με τη μέθοδο προσομοίωσης τύπου Monte Carlo έχουν γίνει λιγότερες εργασίες προσδιορισμού σεισμικής επικινδυνότητας για την Ελλάδα (Βαμβακάρης, 2010; Weatherill and Burton, 2010; Vamvakaris et al., 2016b; Kerkenou et al., 2021). Εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας με προσομοίωση τύπου Monte Carlo στην οποία χρησιμοποιήθηκε συνθετικός κατάλογος που δημιουργήθηκε με βάση τη μέθοδο των Ebel and Kafka (1999) έγινε το 2010 (Κόραβος, 2010).

Η μέθοδος των ακραίων τιμών (Gumbel) έχει χρησιμοποιηθεί αρκετές φορές για τον προσδιορισμό της σεισμικής επικινδυνότητας στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου (Makropoulos, 1978; Drakopoulos and Makropoulos, 1983; Papaioannou, 1984, 1986; Makropoulos and Burton, 1985; Tsapanos and Burton, 1991; Burton et al., 2003) και για μελέτες τοπικού χαρακτήρα (Pavlou et al., 2013, 2021). Αιτιοκρατική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας έχει γίνει από τους Moratto et al. (2007).

Ένας ακόμη τρόπος υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας περιέχει τη χρήση της στατιστικής Bayes (Bayesian statistics) και έχει αξιοποιηθεί εκτενώς και για την Ελλάδα. Μερικά παραδείγματα αποτελούν οι εργασίες των Stavrakakis (1984), Stavrakakis and Tselentis (1987), Stavrakakis and Drakopoulos (1995), Lyubushin et al. (2002), Tsapanos et al. (2003). Τοπικού χαρακτήρα μελέτες έχουν διεξαχθεί από τους Papoulia et al. (1996, 2001).

Εκτός από τις προαναφερθείσες μεθόδους, έχει γίνει χρήση και εναλλακτικών μεθόδων ή παραμέτρων για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας για την Ελλάδα και τις γειτονικές της περιοχές, όπως η της μεθόδου μεγίστης πιθανοφάνειας (Papadopoulos and Kijko, 1991; Tsapanos et al., 2004; Pavlides et al., 2009), καθώς και άλλων πιθανολογικών μεθόδων που δεν απαιτούν τον ορισμό ζωνών.

1.9.3. Χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας για την Ελλάδα

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ο πρώτος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας για τον Ελληνικό χώρο ήταν ο Τεχνικός Σεισμικός Χάρτης της Ελλάδος (Τεχνικά Χρονικά, τεύχος 184, 1939) που δημοσιεύθηκε το 1939. Έκτοτε, λόγω της ολοένα και αυξανόμενης γνώσης για θέματα σχετικά με τη σεισμικότητα, τη σεισμική επικινδυνότητα και την απόκριση των κατασκευών στις σεισμικές δονήσεις, έχει αναθεωρηθεί αρκετές φορές. Στη δεύτερη έκδοσή του (Ρουσόπουλος, 1956) συμπεριλήφθηκαν τα Δωδεκάνησα (Σχήμα 1.9.4, αριστερά). Ο Αντισεισμικός Κανονισμός του 1959 (Βασιλικό Διάταγμα 19/26.2.1959, ΦΕΚ 36Α) περιείχε έναν Πίνακα Χαρακτηρισμού Σεισμικότητας Οικισμών της Ελλάδος. Η πρώτη σημαντική σύγχρονη αναθεώρηση έγινε από τον Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) το 1986, μετά από τους καταστρεπτικούς σεισμούς του 1978 (Θεσσαλονίκη), 1980 (Μαγνησία), 1981 (Αλκυονίδες) και 1986 (Καλαμάτα). Σε αυτόν τον χάρτη έγινε ο διαχωρισμός των τεσσάρων ζωνών (I-IV), με τιμές PGA 0.12 g, 0.16 g, 0.24 g και 0.36 g (τιμές με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης για περίοδο επανάληψης 50 ετών, Σχήμα 1.9.4, δεξιά). Ο Νέος Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΝΕΑΚ) ψηφίστηκε το 1992. Ο χάρτης αυτός τροποποιήθηκε ελαφρώς το 1995 (ένταξη της Κοζάνης και των Γρεβενών στη ζώνη ΙΙ). Ο αναθεωρημένος Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ-2000) δημιουργήθηκε μετά από τους πολυάριθμους σεισμούς της δεκαετίας 1990, οι οποίοι προκάλεσαν πολλές καταστροφές (π.χ. Κοζάνη και Αίγιο 1995, Κόνιτσα 1996, Αθήνα 1999 κ.λπ.). Ο ισχύων έως και σήμερα (2023) χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας (ΝΕΑΚ2003) αποτελεί τροποποίηση του ΕΑΚ-2000, η οποία έγινε το 2003 και χωρίζει τον Ελληνικό χώρο σε τρεις ζώνες με τιμές 0.16 g, 0.24 g και 0.36 g (Σχήμα 1.9.5).



Σχήμα 1.9.4 (αριστερά) Τεχνικός Σεισμικός Χάρτης της Ελλάδος (Ρουσόπουλος, 1956) και, (δεξιά) Αναθεωρημένος Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας (Παπαζάχος και συν., 1989).



Σχήμα 1.9.5 Νέος χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας (ΝΕΑΚ2003).

121 ͲϼΫϪϪ Ο ΝΕΑΚ2003 βασίστηκε στα αποτελέσματα της συνεργασίας του Εργαστηρίου Σεισμολογίας ΕΚΠΑ (ΕΣ-ΕΚΠΑ), του Εργαστηρίου Γεωφυσικής ΑΠΘ (ΕΓ-ΑΠΘ), του Εργαστηρίου Σεισμολογίας Πανεπιστημίου Πατρών (ΕΣ-ΠΠ), του Ινστιτούτου Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ) και του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου ΕΑΑ (ΓΙ-ΕΑΑ). Οι υπολογισμοί έγιναν για εδαφικές συνθήκες «βράχου» (κατηγορία Β κατά UBC-1997) σε έναν κάνναβο σημείων 0.25°x0.25°. Ως μοντέλα επιφανειακών σεισμικών πηγών χρησιμοποιήθηκαν: το μοντέλο του Papazachos (1990), από τα ΓΙ-ΕΑΑ και ΕΣ-ΠΠ, το μοντέλο των Papaioannou and Papazachos (2000) από τα ΙΤΣΑΚ, ΕΣ-ΕΚΠΑ και ΕΣ-ΠΠ, καθώς και ένα υβριδικό μοντέλο που αποτελούσε συνδυασμό επιφανειακών σεισμικών πηγών και ομάδων ρηγμάτων, οι οποίες ταυτοποιήθηκαν από τους Papazachos et al. (2001), από τα ΙΤΣΑΚ και ΕΓ-ΑΠΘ. Επιπλέον, για τους επιφανειακούς σεισμούς χρησιμοποιήθηκαν οι εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. των: Makropoulos (1978) (ΓΙ-ΕΑΑ, ΕΣ-ΕΚΠΑ), Theodulidis (1988) (ΓΙ-ΕΑΑ), Theodulidis and Papazachos (1992) (ΓΙ-ΕΑΑ, ΕΣ-ΕΚΠΑ, ΕΣ-ΠΠ), Ambraseys (1995) (ΕΣ-ΕΚΠΑ), Ambraseys et al. (1996) (ΕΣ-ΠΠ) και Margaris et al. (2001) (ΓΙ-ΕΑΑ, ΙΤΣΑΚ, ΕΣ-ΠΠ). Για τον υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας εφαρμόστηκαν η μέθοδος Cornell-McGuire και η μέθοδος των ακραίων τιμών Gumbel. Ως τελική επιτάχυνση για κάθε σημείο υπολογισμού χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος (M.O.) PGA των πέντε φορέων (Papaioannou et al., 2006), ενώ για τα σημεία στα οποία η τιμή PGA ήταν εκτός του διαστήματος M.O.±1σ επαναλήφθηκε υπολογισμός του Μ.Ο. Από αυτόν τον υπολογισμό διαμορφώθηκε ο χάρτης που φαίνεται στο Σχήμα 1.9.6, βάσει του οποίου ορίστηκαν μετέπειτα οι τρεις ζώνες που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.9.5.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 1.9.6 Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας, όπως προκύπτει από τη μέση ΠΕΣΕ των πέντε φορέων (Papaioannou et al., 2006).

Από τις παραπάνω περιγραφές γίνεται εμφανής η ανάγκη αναθεώρησης του NEAK2003, καθώς έκτοτε έχει διενεργηθεί πλήθος νέων μελετών για τον ορισμό των σεισμικών πηγών και των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ., με φυσικό επακόλουθο οι υπολογισμοί που ολοκληρώθηκαν πριν από δύο δεκαετίες να θεωρούνται πλέον ξεπερασμένοι. Επιπλέον, παρόλο που η χωρική κατανομή των τριών ζωνών φαίνεται επιτυχημένη στο μεγαλύτερο μέρος της, οι τιμές που προτείνονται είναι ιδιαιτέρως χαμηλές (μέγιστη τιμή 0.36 g), κάτι που δεν ανταποκρίνεται σε καμία περίπτωση στην πραγματικότητα και επισημαίνεται από πολλές μεταγενέστερες εργασίες υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας (π.χ. Tselentis et al., 2010; Tselentis and Danciu, 2010b; Roumelioti et al., 2017; Vavlas et al., 2019; Kerkenou et al., 2021, 2022; Kaviris et al., 2022a, 2022b, 2023; Sotiriadis et al., 2023), καθώς και από τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, όπως παρουσιάζονται στη συνέχεια.

1.10. ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η δημιουργία ενός νέου επικαιροποιημένου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου, με τη χρήση προσφάτως δημοσιευμένων δεδομένων και την ενσωμάτωση λογικών δέντρων στους υπολογισμούς ΠΕΣΕ με σύγχρονα μοντέλα επιφανειακών σεισμικών πηγών και με νεότερες εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. Για τον σκοπό αυτόν, είναι απαραίτητη η μελέτη τους και η εύρεση των πλεονεκτημάτων και των αδυναμιών τους, προκειμένου να δημιουργηθούν λογικά δέντρα σεισμικών πηγών και εμπειρικές σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. τα οποία θα συμβάλουν στην κατά το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση των αβεβαιοτήτων. Από τη χρήση των νέων στοιχείων κρίνεται βέβαιη η αύξηση του επιπέδου σεισμικής επικινδυνότητας και πιθανή η μεταβολή της χωρικής της κατανομής.

Κύριο στόχο της παρούσας διατριβής αποτελεί η πραγματοποίηση Ανάλυσης Ευαισθησίας της ΠΕΣΕ στους διάφορους εισαγόμενους παράγοντες που την καθορίζουν, όπως το εφαρμοζόμενο μοντέλο σεισμικών πηγών, οι εμπειρικές σχέσεις πρόγνωσης της Ι.Σ.Κ., το ελάχιστο μέγεθος κ.λπ. Η Ανάλυση Ευαισθησίας αποτελεί αντικείμενο το οποίο δεν έχει διερευνηθεί για την ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου. Η εύρεση των παραγόντων που επηρεάζουν περισσότερο τη σεισμική επικινδυνότητα αναμένεται να διευκολύνει μελλοντικά τη λήψη των απαραίτητων αποφάσεων για τους υπολογισμούς της ΠΕΣΕ, με στόχο τη μείωση της υποκειμενικότητας των κριτηρίων στα οποία αυτές βασίζονται.

Δεύτερο σκοπό της διατριβής αποτελεί η μελέτη και η βελτίωση τεχνικών ζητημάτων που αφορούν την ΠΕΣΕ. Στο πλαίσιο της διατριβής γίνεται ΠΕΣΕ με τη μέθοδο προσομοίωσης τύπου Monte Carlo. Στόχος της προσέγγισης είναι η δημιουργία συνθετικών καταλόγων με συμπερίληψη των κυριότερων ειδών διάρρηξης των επιφανειακών σεισμικών πηγών και των στοιχείων της (μήκος, πλάτος, *Ζ_{ΤΟΡ}*), καθώς και με τροποποιημένες κατανομές μεγεθών. Δευτερεύων στόχος είναι η δημιουργία στατιστικών σχέσεων μετατροπής ενός είδους απόστασης σε κάποιο άλλο (π.χ. μετατροπή επικεντρικής απόστασης σε απόσταση Joyner-Boore) και η διερεύνηση του κατά πόσο επιταχύνονται ή επιβραδύνονται οι υπολογισμοί με χρήση τους έναντι του γεωμετρικού υπολογισμού των αποστάσεων, και αν από αυτές τις στατιστικές σχέσεις προκύπτουν αξιόπιστα αποτελέσματα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Επιπλέον, η εργασία αποσκοπεί στην αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας, η οποία αποτελεί επέκταση των εφαρμογών της ΠΕΣΕ και βοηθά στον προσδιορισμό των στοιχείων των σεισμών (μέγεθος, απόσταση, προέλευση) που συμβάλλουν περισσότερο στον σεισμικό κίνδυνο μιας περιοχής. Εκτός από την καθοριστική της συμβολή στον ορισμό σεισμών σχεδιασμού, η αποάθροιση αποτελεί και ένα σημαντικό εργαλείο σύγκρισης της αξιοπιστίας των μοντέλων σεισμικών πηγών. Μέσω της 3D και της 4D αποάθροισης γίνεται λεπτομερής περιγραφή της σεισμικής επικινδυνότητας μιας περιοχής. Τέλος, η αποάθροιση είναι ένα καθοριστικό βήμα για τον ορισμό των σεισμών σχεδιασμού στην ΑΕΣΕ.





Τα αποτελέσματα της ΠΕΣΕ καθορίζονται από τις βασικές γεωφυσικές παραμέτρους που την επηρεάζουν, κυρίως από το μοντέλο σεισμικών πηγών και από τις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης (GMPE). Για αυτόν τον λόγο, η επιλογή τους και η διαμόρφωση των λογικών δέντρων χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναλυτική συγκριτική αξιολόγηση των μοντέλων επιφανειακών σεισμικών πηγών και των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης (Ι.Σ.Κ.) που δημοσιεύθηκαν προσφάτως και αξιοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς σεισμικής επικινδυνότητας της παρούσας διατριβής. Επιπλέον, παρουσιάζεται το τελικό λογικό δέντρο των μοντέλων σεισμικών πηγών και των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ., καθώς και ο επικαιροποιημένος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου με βάση το συγκεκριμένο λογικό δέντρο. Τέλος, γίνεται σύγκριση του επικαιροποιημένου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας με τον ΝΕΑΚ2003 ως προς το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας και τη χωρική της κατανομή.

2.1. ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ

Για τις αναλύσεις ΠΕΣΕ χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά μοντέλα επιφανειακών σεισμικών πηγών, καθώς τα αποτελέσματά τους θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικά όσον αφορά τη χωρική μεταβολή του σεισμικού κινδύνου από τα αντίστοιχα που προκύπτουν από τα μοντέλα γραμμικών πηγών. Η απόφαση χρήσης αποκλειστικά επιφανειακών σεισμικών πηγών στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής βασίστηκε σε δύο κυρίως λόγους:

Α) Έχει παρατηρηθεί ότι τα μοντέλα γραμμικών πηγών τείνουν να εμφανίζουν υψηλές τιμές σεισμικής επικινδυνότητας επάνω ή πολύ κοντά στο ρήγμα, αλλά όχι στην περιοχή γύρω από αυτό. Ένα παράδειγμα χωρικής κατανομής της σεισμικής επικινδυνότητας με χρήση ενός «υβριδικού» μοντέλου σεισμικών πηγών, αποτελούμενου από επιφανειακές και από γραμμικές σεισμικές πηγές παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.1. Πρόκειται για το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε από το Εργαστήριο Γεωφυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και από το Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ) για τον ΝΕΑΚ2003. Παρατηρείται ότι το συγκεκριμένο μοντέλο σκιαγραφεί και υπερτονίζει τις ζώνες των κύριων ρηγμάτων. B) Τα κύρια ρήγματα του Ελληνικού χώρου δεν έχουν ταυτοποιηθεί-προσδιοριστεί ακόμη πλήρως, λόγω της σημαντικής έλλειψης ιστορικών, νεοτεκτονικών και παλαιοσεισμολογικών δεδομένων, αλλά και αποτελεσμάτων γεωφυσικών (π.χ. σεισμικών) δεδομένων πεδίου. Στο Σχήμα 2.1.2 παρουσιάζονται τα ρήγματα του ευρύτερου χώρου του Αιγαίου σύμφωνα με δύο βάσεις δεδομένων, την GreDaSS (Σχήμα 2.1.2, αριστερά, Γκανάς και συν., 2013) και τη βάση του ΝΟΑ (Σχήμα 2.1.2, δεξιά, Caputo et al., 2012). Παρατηρούνται πολλές και σημαντικές διαφορές μεταξύ των ρηγμάτων των δύο χαρτών (π.χ. στο ίχνος της κατάδυσης των ρηγμάτων της Κρήτης, το οποίο στην GreDaSS τοποθετείται πολύ πιο κοντά στην ηπειρωτική Ελλάδα από ό,τι στη βάση του ΝΟΑ, η ύπαρξη ή ανυπαρξία ρηγμάτων νότια της Χίου, η απουσία του ρήγματος της Ρόδου στον χάρτη της GreDaSS κ.λπ.), καθώς και στα επιμέρους χαρακτηριστικά τους. Επιπλέον, για ελάχιστα από τα ρήγματα είναι διαθέσιμοι οι ρυθμοί ολίσθησης ή σεισμικότητας οι οποίοι έχουν υπολογιστεί από δεδομένα πεδίου (π.χ. παλαιοσεισμολογικές τομές, γεωφυσικά δεδομένα κ.λπ.). Εξαιτίας των παραπάνω σημαντικών αβεβαιοτήτων που συνοδεύουν τις παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά των ρηγμάτων, η χρήση τους στο πλαίσιο της διατριβής θεωρήθηκε εξαιρετικά ανώριμη, ιδιαίτερα όταν εξετάζεται η σεισμικότητα ολόκληρου του Ελληνικού χώρου.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 2.1.1 a) «Υβριδικό» μοντέλο, αποτελούμενο από επιφανειακές σεισμικές πηγές και κύρια ρήγματα, b) Η χωρική κατανομή της σεισμικής επικινδυνότητας (τιμές PGA με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης για περίοδο επανάληψης 50 ετών) που προκύπτει από τη χρήση του (Παπαϊωάννου, 2001).



 Σχήμα 2.1.2
 Ρήγματα της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου από τις βάσεις δεδομένων a)

 GreDaSS
 (https://gredass.unife.it/, Caputo et al., 2012) και,

 b) NOA (https://zenodo.org/records/8075517, τροποποιημένο από Γκανάς et al., 2013).

Το βασικό κριτήριο για τον διαχωρισμό των σεισμικών πηγών συνήθως είναι η σεισμοτεκτονική τους ομοιογένεια, δηλαδή η παρόμοια χωρική κατανομή των επικέντρων των σεισμών τους, το επίπεδο σεισμικότητας (σταθερές Gutenberg-Richter ή G-R) να είναι ανάλογο (και σχεδόν σταθερό), τα ρήγματά τους να είναι παρόμοιου είδους κ.λπ. Επίσης, συνήθως είναι επιθυμητό το σχήμα της κάθε σεισμικής πηγής να είναι πολύγωνο (συχνά κυρτό), προκειμένου να είναι πιο εύκολη η επεξεργασία του.

Στην παρούσα διατριβή εξετάστηκαν πέντε μοντέλα επιφανειακών σεισμικών πηγών: τρία ελληνικά, δηλαδή μοντέλα που δημιουργήθηκαν από ελληνικές βάσεις δεδομένων, και δύο ευρωπαϊκά, τα οποία προτάθηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος ESHM (Seismic Hazard Harmonization in Europe, 2009-2013 -ESHM13 και ESHM20). Πιο συγκεκριμένα, τα ελληνικά μοντέλα είναι αυτά των Papazachos (1990), Papaioannou and Papazachos (2000) και Vamvakaris et al. (2016a), και τα ευρωπαϊκά αυτά των Woessner et al. (2015) και Danciu et al. (2021).

Μοντέλο του Papazachos (1990)

Το μοντέλο του Papazachos (1990) (P1990 στο εξής) αποτελείται από 36 σεισμικές πηγές (Σχήμα 2.1.3). Το πεδίο τάσεων της ζώνης 1 (1a, 1b, 1c) είναι συμπιεστικό, λόγω της σύγκρουσης της Απούλιας και της Ευρασιατικής πλάκας. Η σύγκρουση αυτή (διεύθυνση άξονα μέγιστης συμπίεσης P) γίνεται με διεύθυνση κάθετη στις ακτές. Η ζώνη 2 (2a, 2b) περικλείει ορισμένα από τα Ιόνια νησιά (Λευκάδα, Κεφαλονιά, Ζάκυνθος), τα οποία χαρακτηρίζονται από το υψηλότερο επίπεδο σεισμικότητας στον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου. Λόγω του διαφορετικού κυρίαρχου μηχανισμού γένεσης, χωρίστηκε σε δύο υπο-ζώνες: τα ρήγματα της Ζακύνθου είναι κυρίως ανάστροφα, εξαιτίας της κατάδυσης της Μεσογειακής λιθόσφαιρας κάτω από τη μικροπλάκα του Αιγαίου, ενώ η Κεφαλονιά έχει ένα μεγάλο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης το οποίο προκλήθηκε από τις δύο προαναφερθείσες τεκτονικές κινήσεις (σύγκρουση Απουλίας-Ευρασιατικής πλάκας και κατάδυση Μεσογειακής πλάκας).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η ζώνη 3 (3, 3A) αποτελεί το δυτικό κομμάτι του Ελληνικού τόξου. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης αυτού του μοντέλου, ο κατάλογος σεισμών ήταν πλήρης για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για την περιοχή που περικλείεται στην πηγή 3 (δεδομένου ότι βρίσκεται πιο κοντά στη στεριά), από ό,τι στην 3A, με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση της ζώνης 3 κατά αυτόν τον τρόπο. Η ζώνη 3A περιέχει κατά κύριο λόγο ανάστροφα ρήγματα, ενώ η ζώνη 3 περιέχει ανάστροφες διαρρήξεις που ανήκουν στο ανατολικό τμήμα της Μεσογειακής λιθόσφαιρας, και κανονικές οι οποίες προκαλούνται από την επέκταση της μικροπλάκας του Αιγαίου.

Η ζώνη 4 (4, 4A) αποτελεί το νοτιότερο τμήμα του Ελληνικού τόξου και χωρίζεται σε δύο πηγές για τους ίδιους ακριβώς λόγους με τη ζώνη 3, δηλαδή την πληρότητα του καταλόγου και το είδος των διαρρήξεων. Η ζώνη 4A περιλαμβάνει μόνον ανάστροφα ρήγματα, ενώ η πηγή 4 περιέχει και κανονικά. Η ζώνη 5 περικλείει 4 πηγές: τις 5a και 5b με κανονικά και ανάστροφα ρήγματα, την 5A με ανάστροφα ρήγματα και την 5B με κανονικά. Οι ζώνες 6 (6a, 6b) και 7 (7a, 7b) διαφοροποιούνται από το κυρίαρχο πεδίο τάσεων, επειδή στη ζώνη 6 αυτό είναι συμπιεστικό ενώ στη ζώνη 7 εφελκυστικό. Οι πηγές 6a, 6b, 7a και 7b έχουν τη συγκεκριμένη γεωμετρία λόγω του προσανατολισμού του πεδίου των τάσεων.

Η ζώνη 8 είναι μία από τις σημαντικότερες ζώνες του ευρύτερου χώρου του Αιγαίου, καθώς χαρακτηρίζεται από υψηλή σεισμικότητα και σεισμική επικινδυνότητα. Περιέχει τις πηγές 8a (Πατραϊκός Κόλπος), 8b (Κορινθιακός Κόλπος) και 8c (Σαρωνικός Κόλπος). Το πεδίο των τάσεων είναι εφελκυστικό και οι άξονες τάσης έχουν διεύθυνση σχεδόν B-N, συνεπώς τα ρήγματα είναι κανονικά με παράταξη A-Δ. Το επίπεδο σεισμικότητας είναι σταθερό για τις πηγές 8a και 8b (η διαίρεσή τους έγινε λόγω της μορφολογίας-τοπογραφίας της περιοχής) και αρκετά υψηλό, ενώ είναι χαμηλότερο στην πηγή 8c. Η ζώνη 9 περιλαμβάνει κυρίως κανονικές διαρρήξεις, και χωρίστηκε σε δύο πηγές (9a, 9b) για να συνάδει με την τοπογραφία της περιοχής.

Οι ζώνες 10 (Θεσσαλικός Κάμπος) και 11 (Ευβοϊκός και Μαλιακός Κόλπος) έχουν υψηλή σεισμικότητα και εφελκυστικό πεδίο τάσεων. Οι ζώνες 12 και 13 παρουσιάζουν περίπου ίδια σεισμικότητα και κυρίαρχο μηχανισμό κανονικού ρήγματος. Το όριο μεταξύ τους προέκυψε από γεωμορφολογικά στοιχεία.

Η ζώνη 14 απαρτίζεται από τέσσερις σεισμικές πηγές (14a, 14b, 14c, 14d) με παρόμοιο επίπεδο σεισμικότητας. Στις 14a και 14b υπάρχουν διαρρήξεις κανονικές
και οριζόντιας διεύθυνσης με δεξιόστροφη συνιστώσα ολίσθησης, και στην 14d μόνον κανονικές. Ο κυρίαρχος μηχανισμός γένεσης σεισμών για την πηγή 14c ήταν άγνωστος κατά τη συγγραφή της συγκεκριμένης εργασίας, διότι δεν είχε προηγηθεί σεισμός μεγάλου μεγέθους που να οδηγεί σε κάποιον αξιόπιστο μηχανισμό γένεσης. Οι πηγές 14a και 14b περιέχουν τα μεγαλύτερα παρακλάδια-απολήξεις του δεξιόστροφου ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης της Τάφρου του Βορείου Αιγαίου. Οι πηγές 14c και 14d παρουσιάζουν διαφορές σχετικές με την πληρότητα και την ποιότητα (ύπαρξη ή όχι ιστορικών σεισμών) των σεισμολογικών δεδομένων. Οι ζώνες 15 και 16 έχουν επίσης παρόμοια επίπεδα σεισμικότητας και ίδιο είδος διαρρήξεων (κανονικές και οριζόντιας μετατόπισης). Ο διαχωρισμός της περιοχής που περικλείουν έγινε για γεωμετρικούς λόγους. Ο ίδιος λόγος διαίρεσης ισχύει και στην περίπτωση της ζώνης 17 (17, 17a), η οποία περιέχει κανονικά ρήγματα Α-Δ παράταξης. Οι ζώνες 18 και 19 έχουν χαμηλότερο επίπεδο σεισμικότητας από την 17. Τέλος, θεωρήθηκε ότι οι υπόλοιπες πηγές περιλαμβάνουν σεισμικότητα υποβάθρου με σεισμούς μεγέθους μικρότερου ή ίσου του 6.1.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το βάθος των σεισμών αυτών των πηγών κυμαίνεται μεταξύ 0 km και 60 km, χωρίς να έχει προταθεί ιστόγραμμα (ομογενής κατανομή). Η παράμετρος *b* παίρνει τρεις τιμές (0.6, 0.8 και 1.0), και μειώνεται από το ΝΔ προς το BA τμήμα της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Hatzidimitriou et al. (1985). Μέγιστο αναμενόμενο μέγεθος για κάθε πηγή, *M_{max}*, θεωρήθηκε το μέγιστο μέγεθος σεισμού που είχε παρατηρηθεί έως τότε. Για τις ζώνες που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1.3 δεν ορίστηκαν τυπικοί μηχανισμοί γένεσης, παρόλο που ο διαχωρισμός τους έλαβε υπόψη τα σεισμοτεκτονικά στοιχεία.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, η σεισμικότητα υποβάθρου οριοθετήθηκε σε έξι ζώνες (Σχήμα 2.1.4), των οποίων τα χαρακτηριστικά προσδιορίστηκαν με βάση τις σταθερές που δίνονται στη σχετική δημοσίευση για τη συνολική σεισμικότητα υποβάθρου. Το *M_{max}* κάθε ζώνης υποβάθρου θεωρήθηκε ίσο με 6.1 και η παράμετρος *b* με 0.8. Τέλος, έγινε αναγωγή της παραμέτρου *a*₁ (τιμή σταθεράς *a* για ένα έτος) στο εμβαδόν που καταλαμβάνει κάθε πηγή υποβάθρου (ο Πίνακας 2.1.1 περιλαμβάνει τις σχετικές τιμές).

Αυτό το μοντέλο αποτέλεσε τη βάση για τον σχηματισμό των μοντέλων των Papaioannou and Papazachos (2000) (PP2000 στο εξής) και Vamvakaris et al. (2016a) (εφεξής V2016). Τα μεταγενέστερα μοντέλα δημιουργήθηκαν με επικαιροποιημένα δεδομένα σεισμικότητας, ως εκ τούτου περιέχουν περισσότερες πηγές και πρόσθετα στοιχεία που δεν υπάρχουν σε αυτό το μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα, το PP2000 καλύπτει με σεισμικές πηγές το σύνολο της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου και το V2016 περιέχει ζώνες μικρότερες και πιο λεπτομερώς χωρισμένες, ανάλογα με τα σεισμοτεκτονικά στοιχεία κάθε υποπεριοχής.



Σχήμα 2.1.3 Επιφανειακές σεισμικές πηγές του μοντέλου P1990 (Papazachos, 1990).



<u>Σχήμα 2.1.4</u> Οι πηγές σεισμικότητας υποβάθρου (B1-B6) που προσδιορίστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής για το μοντέλο P1990.

"OE	Ψηφιακή συλ Βιβλιοθή Ο σ Ρ Πίνακας 2.1.1	ονή ΙΚΠ Παράμετροι των	σεισμικών πηγι	ών υποβάθρου	(B1-B6, Σχήμα 2	2.1.4).
	Όνομα	φ(°), λ(°)	Εμβαδόν <i>S</i> (x10 ⁴ km²)	a1	b	M _{max}
	B1	21.00,38.90 21.00,38.10 21.40,37.80 23.80,35.70 23.30,35.30 26.50,35.00 27.60,36.00 26.90,36.50 25.20,36.20 24.80,36.60 26.90,37.10 25.90,38.00 25.00,38.80 23.70,38.90 23.50,38.90 23.10,38.20 23.40,38.00 23.90,37.50 23.50,37.10 22.90,37.60 22.40,38.00 21.40,38.00 21.40,38.00 21.40,38.00 21.40,38.50 22.80,38.50 22.30,38.90 22.00,38.90 21.50,38.90	12.5256	3.03	0.80	6.1
	В2	$\begin{array}{c} 17.50, 43.10\\ 18.00, 43.10\\ 17.70, 42.60\\ 18.00, 42.40\\ 19.40, 41.60\\ 19.20, 40.10\\ 20.30, 38.90\\ 20.00, 38.00\\ 18.00, 38.00\\ \end{array}$	12.4697	3.02	0.80	6.1
	B3	27.80,33.70 27.50,34.00 30.00,36.10 30.00,33.70	3.3803	2.46	0.80	6.1
	Β4	30.00,43.10 30.00,41.10 27.00,41.10 27.00,40.80 24.30,40.30 22.90,41.30 23.40,42.00 25.50,42.00 25.50,42.40 25.50,43.10	12.0723	3.01	0.80	6.1
	В5	25.50,43.10 25.50,42.40 23.00,42.40 22.40,41.60 22.20,41.20 24.00,40.10 23.00,39.70 21.40,39.70 20.80,40.50 20.80,42.00	10.0362	2.93	0.80	6.1

X B	^{ηφιακή} συλλα Ιβλιοθήι ΙδΡΔΣ΄	^{νή} κη ΤΟΣ"				
	I NE	20.30,42.00				
Differ Tur	ήμα Γεωλο	19.90,42.00				
1133373		18.00,43.10				
	Α.Π.Θ	6				
02 544	B6	38.00 20.00	6.8297	2.76	0.80	6.1
		37.40 19.80				•
		34.90 22.80				
		34.20 22.00				
		34.20 18.00				
		38.00 18.00				

Μοντέλο των Papaioannou and Papazachos (2000)

Το μοντέλο των Papaioannou and Papazachos (2000) ή PP2000 αποτελείται από 67 επιφανειακές σεισμικές πηγές (Σχήμα 2.1.5). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κύριο χαρακτηριστικό του είναι η πλήρης κάλυψη του ευρύτερου χώρου του Αιγαίου (αντίθετα με το P1990), δηλαδή η έλλειψη ζωνών υποβάθρου, αλλά και η χρήση γενικά μικρότερων χωρικά και πιο λεπτομερών ζωνών από το μοντέλο P1990. Όπως και με το P1990, για τις ζώνες στο Σχήμα 2.1.5 δεν ορίστηκαν τυπικοί μηχανισμοί γένεσης, παρόλο που ο διαχωρισμός τους έγινε βάσει των σεισμοτεκτονικών στοιχείων.



<u>Σχήμα 2.1.5</u> Επιφανειακές σεισμικές πηγές του μοντέλου PP2000 (Papaioannou and Papazachos, 2000).

Στο Σχήμα 2.1.6a φαίνεται η χωρική μεταβολή της διαφοράς των τιμών M_1 των δύο μοντέλων [$M_1(PP2000)-M_1(P1990)$], όπου, M_1 , το συχνότερα παρατηρούμενο μέγιστο μέγεθος ανά έτος σε μία περιοχή εμβαδού 10⁴ km² γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος. Το συχνότερα παρατηρούμενο μέγιστο μέγεθος ανά έτος υπολογίζεται από τον λόγο των σταθερών G-R, $a_1^{10000 \ km^2}/b$, δηλαδή τον λόγο της σταθεράς *a* ανηγμένης σε ένα έτος και σε εμβαδό 10⁴ km² προς τη σταθερά *b*. Οι μεγαλύτερες διαφορές τους (2.5-3.0 μονάδες) εντοπίζονται κυρίως στο Κεντρικό-Νότιο Αιγαίο και στη Β. Ελλάδα, δηλαδή στην περιοχή των ζωνών σεισμικότητας υποβάθρου του P1990. Στις υπόλοιπες περιοχές, οι τιμές του μοντέλου PP2000 είναι έως και 1.5 μονάδα υψηλότερες. Στο Σχήμα 2.1.6b παρουσιάζονται οι τιμές του μόσου ετήσιου μεγέθους, M_1 , του PP2000 σε συνάρτηση με τις αντίστοιχες τιμές του μοντέλου P1990. Και τα δύο σχήματα έχουν δημιουργηθεί με τη χρήση των τιμών ενός καννάβου σημείων με χωρικό βήμα 0.01°. Οι τιμές του PP2000 είναι συψηλότερες, με αποτέλεσμα η σεισμική επικινδυνότητα που υπολογίζεται βάσει αυτού του μοντέλου να έχει επίσης υψηλότερες τιμές.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 2.1.6 a) Χωρική κατανομή της διαφοράς των τιμών του M₁ (συχνότερα παρατηρούμενο μέγιστο μέγεθος ανά έτος και ανά 10⁴ km²) του μοντέλου P1990 από αυτές του PP2000. b) Οι τιμές του μέσου ετήσιου μεγέθους, M₁, που προκύπτουν από το μοντέλο PP2000 σε συνάρτηση με τις αντίστοιχες του μοντέλου P1990.

Μοντέλο των Vamvakaris et al. (2016a)

Το μοντέλο των Vamvakaris et al. (2016a) ή V2016 αποτελείται από 113 σεισμικές πηγές (Σχήμα 2.1.7). Οι ζώνες ομαδοποιούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, αναλόγως του επικρατέστερου είδους διάρρηξης: την N (normal), την T (thrust) και την S (strike slip). Βάσει άλλων κριτηρίων (π.χ. διεύθυνση διαρρήξεων, επίπεδο σεισμικότητας, κατανομή επικέντρων), κάθε κατηγορία χωρίζεται σε μικρότερες ομάδες (κατηγορία Ν: ομάδες Β, Ε, F, Η, J, Κ, L, κατηγορία Τ: ομάδες Α, D και κατηγορία S: ομάδες C, I). Στο μοντέλο αυτό ο διαχωρισμός των ζωνών είναι ακόμη πιο λεπτομερής, διότι τα διαθέσιμα δεδομένα σεισμικότητας ήταν περισσότερα, και αξιοποιήθηκαν οι διαθέσιμοι μηχανισμοί γένεσης και τα διαθέσιμα σεισμοτεκτονικά δεδομένα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 2.1.7 Επιφανειακές σεισμικές πηγές του μοντέλου V2016 (Vamvakaris et al., 2016a).

Μία από τις κυριότερες διαφορές αυτού του μοντέλου από τα προηγούμενα αποτελεί ο ορισμός των ζωνών με διεύθυνση B-N (ζώνες N-B), οι οποίες περιέχουν κανονικά ρήγματα με διεύθυνση B-N έως BBΔ-NNA. Οι ζώνες αυτές σηματοδοτούν το όριο μεταξύ των ανάστροφων ρηγμάτων των ζωνών T-A και των κανονικών ρηγμάτων A-Δ διεύθυνσης της ευρύτερης περιοχής της Βουλγαρίας και της B. Ελλάδας. Επιπλέον, είναι πιο στενές από τις ζώνες 21, 22, 23 και 38 του PP2000. Οι ζώνες των Ιονίων νησιών Λευκάδα, Κεφαλονιά και Ζάκυνθος (S-C, δεξιόστροφα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης) διαιρούνται σε ακόμη μικρότερα τμήματα, λόγω των παρατηρούμενων σεισμοτεκτονικών διαφορών μεταξύ του ανατολικού και του δυτικού τμήματός τους.

Οι ζώνες Τ-D ακολουθούν τη γενική παράταξη του εξωτερικού Ελληνικού τόξου. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι Τ-D12 και Τ-D10 περιέχουν το αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης της Ρόδου και τα παράλληλα ρήγματα στις Τάφρους του Πτολεμαίου και Πλινίου, και η μορφή τους βρίσκεται σε καλύτερη συμφωνία με τις αντίστοιχες του μοντέλου P1990 (τμήμα των 5A και 5b), παρά με τη ζώνη 20 του ΡΡ2000. Εκτός από αυτή τη μεγάλη ρηξιγενή ζώνη, οι ζώνες αυτές περιέχουν πληθώρα ανάστροφων διαρρήξεων, γεγονός που τις κατατάσσει στην κατηγορία Τ-D. Συγκριτικά με τα προγενέστερα μοντέλα, οι περιοχές της Β. Ελλάδας, της Β. Μακεδονίας και της Βουλγαρίας (ζώνες Ν-Ε) διαχωρίστηκαν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο V2016, με αποτέλεσμα να περικλείουν πολλές πηγές μικρότερης διάστασης. Κάποιες από αυτές περιλαμβάνουν συγκεκριμένα ρήγματα ή ομάδες ρηγμάτων. Ορισμένα παραδείγματα αποτελούν οι ζώνες Ν-Ε5 (ρήγμα της Κρέσνας, το οποίο προκάλεσε σεισμούς μεγέθους M6.7 το 1866 και M7.3 το 1904), N-E6 (ρήγμα Βαλαντόβο, M6.7 το 1931), Ν-Ε9 (ρήγμα Φιλιππούπολης-Πλοβντίβ, το οποίο προκάλεσε δύο ισχυρούς ιστορικούς σεισμούς μεγέθους **Μ**6.6 και **Μ**7.0, το 1750 και το 1928, αντίστοιχα), N-E14 (ρήγμα της Κοζάνης με δύο ισχυρούς σεισμούς, έναν μεγέθους M6.5 το 1695 και έναν μεγέθους M6.6 το 1995), N-E16 (περιέχει τα ρήγματα του Στίβου, του Σοχού και της Βόλβης) και Ν-Ε17 (ρήγμα της Ιερισσού, το οποίο «έσπασε» το 1932 από σεισμό μεγέθους M7.0). Άλλες πηγές περιβάλλουν περιοχές χωρίς αξιοσημείωτη σεισμική δραστηριότητα, όπως οι N-E4, N-E8, N-E18 και N-E24. Μία ακόμη διαφορά αυτού του μοντέλου από τα προηγούμενα αποτελεί ο ορισμός των ζωνών Ν-Η της ΒΔ Πελοποννήσου, οι οποίες περιέχουν κάποια δεξιόστροφα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης με ΒΑ-ΝΔ παράταξη (Κυπαρισσιακός Κόλπος, Ηλεία), σε αντίθεση με τα υπόλοιπα ρήγματα της ευρύτερης περιοχής (βόρεια εντοπίζονται κανονικά ρήγματα ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης και νότια τα ρήγματα έχουν διεύθυνση Β-Ν). Τα όρια των σεισμικά ήσυχων ζωνών του Κεντρικού και Νότιου Αιγαίου (Ν-J) καθορίστηκαν με βάση τα αντίστοιχα των σεισμικά ενεργών γειτονικών πηγών. Η Μήλος συνιστά ξεχωριστή ζώνη (N-J3), λόγω της αυξημένης τοπικής σεισμικής δραστηριότητας.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στο Σχήμα 2.1.8 φαίνεται η σύγκριση του συγκεκριμένου μοντέλου με τα P1990 (Σχήμα 2.1.8a, Σχήμα 2.1.8b) και PP2000 (Σχήμα 2.1.8c, Σχήμα 2.1.8d), δηλαδή η χωρική κατανομή της διαφοράς των τιμών M_1 (συχνότερα παρατηρούμενο μέγιστο μέγεθος ανά έτος και ανά 10⁴ km²), καθώς και η σύγκριση των τιμών M_1 των μοντέλων. Οι τιμές M_1 είναι παρόμοιες με αυτές του P1990 σε μεγάλο βαθμό. Εξαίρεση αποτελούν και πάλι τα σημεία που ανήκουν στις ζώνες σεισμικότητας υποβάθρου του P1990, στα οποία οι τιμές M_1 είναι έως και 3 μονάδες μεγαλύτερες. Επίσης, υψηλότερες τιμές M_1 απαντώνται και στη Δ. Τουρκία, όπου σημειώνεται διαφορά έως 2 μονάδων. Οι υπόλοιπες περιοχές παρουσιάζουν μικρή διαφορά, η οποία κυμαίνεται σε ένα τυπικό εύρος ±0.5 μονάδων. Όσον αφορά τη σύγκριση με το μοντέλο PP2000, οι τιμές των δύο μοντέλων είναι παρόμοιες στην πλειονότητα των εξεταζόμενων σημείων, με διαφορές από -0.5 έως 0.5 μονάδες.



Σχήμα 2.1.8 a) Χωρική κατανομή της διαφοράς των τιμών του M_1 (συχνότερα παρατηρούμενο μέγιστο μέγεθος ανά έτος και ανά 10^4 km²) του μοντέλου P1990 από αυτές του V2016, b) Οι τιμές του μέσου ετήσιου μεγέθους, M_1 , που προκύπτουν από το μοντέλο V2016 σε συνάρτηση με τις αντίστοιχες του P1990, c) Χωρική κατανομή της διαφοράς των τιμών M_1 του PP2000 από αυτές του V2016 και, d) Οι τιμές του μέσου ετήσιου μεγέθους, M_1 , που προκύπτουν από το μοντέλο V2016 σε συνάρτηση με τις αντίστοιχες του P1990, c) Χωρική κατανομή της διαφοράς των τιμών M_1 του PP2000 από αυτές του V2016 και, d) Οι τιμές του μέσου ετήσιου μεγέθους, M_1 , που προκύπτουν από το μοντέλο V2016 σε συνάρτηση με τις αντίστοιχες του μοντέλο V2016 σε συνάρτηση με τις αντίστοιχες του μοντέλου PP2000.

Moντέλο ESHM13 (Woessner et al., 2015)

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το μοντέλο ESHM13 (Woessner et al., 2015) δημιουργήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος SHARE (Seismic Hazard Harmonization in Europe, 2009-2013) και περιέχει σεισμικές ζώνες για την Ευρώπη και την Τουρκία. Στόχος των ερευνητών ήταν η ανάπτυξη ενός επικαιροποιημένου και ενοποιημένου ευρωπαϊκού μοντέλου, το οποίο θα στηριζόταν στις ίδιες μεθόδους υπολογισμού για όλες τις χώρες, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι δεν θα υπήρχαν απότομες διαφορές στα εθνικά σύνορα.

Βάσει διαφορετικών παραδοχών αναπτύχθηκαν τρία εναλλακτικά μοντέλα που περιγράφουν τη σεισμικότητα της περιοχής μελέτης: ένα μοντέλο επιφανειακών σεισμικών πηγών (AS), ένα μοντέλο στο οποίο η χρονική κατανομή της σεισμικότητας βασίζεται σε αυτήν του καταλόγου σεισμών του SHARE και η χωρική κατανομή της εξαρτάται από τον ρυθμό ολίσθησης των ρηγμάτων και από την πυκνότητα των σεισμών (SEIFA) και, τέλος, ένα μοντέλο που συνδυάζει τα ρήγματα με τη σεισμικότητα υποβάθρου (FSBG). Στο Σχήμα 2.1.9 φαίνεται η σύγκριση του ρυθμού σεισμικότητας των τριών μοντέλων (AS, SEIFA, FSBG), δηλαδή ο συνολικός ετήσιος ρυθμός σεισμικότητας σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανομή συχνότητας-μεγέθους του σεισμικού καταλόγου που χρησιμοποιήθηκε. Το μοντέλο AS προσαρμόζεται καλά για μεγέθη έως και M7.0, ενώ υπερεκτιμά ελαφρώς τα μεγέθη M7.0-8.0. Το μοντέλο SEIFA υποεκτιμά ελαφρώς τη σεισμικότητα για μεγέθη M4.5-7.5, ενώ προσαρμόζεται καλά στα πραγματικά δεδομένα για τα μεγαλύτερα μεγέθη. Το μοντέλο FSBG παρουσιάζει την αντίθετη εικόνα, με υπερεκτίμηση της σεισμικότητας στα μεγέθη Μ4.5-7.2 και χαμηλότερους ρυθμούς στα μεγαλύτερα μεγέθη. Στην παρούσα διατριβή, αναλύεται μόνο το μοντέλο των επιφανειακών σεισμικών πηγών και εξετάζονται οι ζώνες που εκτείνονται στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου. Η επιλογή του έγινε αφενός διότι περιγράφει καλύτερα τη σεισμικότητα για μεγαλύτερο εύρος δεδομένων, και αφετέρου για λόγους συνοχής, καθώς στην παρούσα εργασία εξετάζονται και χρησιμοποιούνται αποκλειστικά μοντέλα επιφανειακών σεισμικών πηγών.



Σχήμα 2.1.9 Ετήσια αθροιστική συχνότητα σεισμών σε συνάρτηση με το μέγεθος, για τα τρία μοντέλα (AS, SEIFA, FSBG). Με κόκκινο χρώμα φαίνεται η προσαρμογή του λογικού δέντρου των τριών μοντέλων (βάρη: AS=0.5, SEIFA=0.3, FSBG=0.2) το οποίο προτάθηκε από τους Woessner et al. (2015).

Ως μέγιστο μέγεθος (*M_{max}*) κάθε ζώνης ορίστηκε αυτό του μεγαλύτερου, χρονικά ανεξάρτητου, σεισμού που μπορεί να λάβει χώρα σε αυτή (Meletti et al., 2009). Στις περιοχές υψηλής σεισμικότητας, για τις οποίες είναι διαθέσιμα περισσότερα δεδομένα ενόργανης και ιστορικής σεισμικότητας, το μέγιστο μέγεθος προσδιορίστηκε κυρίως σύμφωνα με το μέγιστο παρατηρούμενο στον κατάλογο σεισμικότητας μέγεθος και από το μέγιστο αναμενόμενο μέγεθος σεισμού που είναι δυνατόν να προκληθεί με βάση τις διαστάσεις των ρηγμάτων. Υπολογίστηκαν τέσσερα μέγιστα μεγέθη για κάθε ζώνη (σταδιακή αύξηση κατά 0.2 μονάδες), τα οποία ενσωματώθηκαν -με το αντίστοιχο βάρος- σε ένα λογικό δέντρο.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το βάθος των επιφανειακών σεισμικών πηγών κυμαίνεται από 0 km έως 40 km. Για τη διαμόρφωση των ορίων των πηγών ελήφθησαν υπόψη τα πιο πρόσφατα μοντέλα επιφανειακών σεισμικών πηγών κάθε χώρας και το παλαιότερο Ευρω-Μεσογειακό μοντέλο των Jimenez et al. (2001). Σύμφωνα με τους Woessner et al. (2015), τα ήδη χαρτογραφημένα ρήγματα έπαιξαν κυρίαρχο ρόλο στη διαμόρφωση του σχήματος των ζωνών.

Η ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου καλύπτεται από 94 επιφανειακές σεισμικές πηγές (Σχήμα 2.1.10). Με κόκκινο χρώμα φαίνονται τα ίχνη των «σύνθετων» (complex) ανάστροφων ρηγμάτων που βρίσκονται στο Ελληνικό και στο Κυπριακό τόξο και περιγράφουν μέρος της ζώνης Benioff (βάθη 20-50 km για το Ελληνικό τόξο και 10-50 km για το Κυπριακό).

Το σχήμα των ζωνών μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με αυτό του μοντέλου PP2000 (π.χ. οι ζώνες της Ανατολικής Πελοποννήσου και του Κεντρικού Αιγαίου), αφού αυτό το μοντέλο ήταν το πιο πρόσφατα δημοσιευμένο κατά τη διάρκεια υλοποίησης του προγράμματος. Παρατηρούνται ορισμένες διαφορές, οι οποίες προκύπτουν κυρίως από το επίπεδο σεισμικότητας, διότι πηγές που είχαν παρόμοιο ή πολύ χαμηλό επίπεδο σεισμικότητας στο ESHM13 ενώθηκαν (π.χ. ζώνες 329, 330, 332, 375).

Ορισμένες ζώνες περικλείουν πολύ διαφορετικά ρήγματα, όπως η ζώνη 0_1, στην οποία εντοπίζονται τα κανονικά ρήγματα B-N παράταξης που διαχωρίζουν τα ανάστροφα ρήγματα των δυτικών παραλίων της Ελλάδας και της Αλβανίας και τα κανονικά ρήγματα Α-Δ παράταξης της Βουλγαρίας, της Μακεδονίας και της B. Μακεδονίας. Ένα ακόμη παράδειγμα αποτελεί η ζώνη 331, στην οποία συμπεριλαμβάνονται το ρήγμα της Κοζάνης με τα κανονικά ρήγματα της Θεσσαλίας. Επιπλέον, η ζώνη 321 περιέχει (από τα βόρεια προς τα νότια) δεξιόστροφα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης που σχετίζονται με το σεισμοτεκτονικό καθεστώς στην περιοχή της Κεφαλονιάς-Λευκάδας, κανονικά ρήγματα Α-Δ δυτικής παράταξης στην ευρύτερη περιοχή της Αιτωλοακαρνανίας και τον συνδυασμό κανονικών (BΔ-NA διεύθυνσης) και δεξιόστροφων ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης BA-ΝΔ παράταξης της ΒΔ Πελοποννήσου. Το συχνότερα παρατηρούμενο μέγιστο μέγεθος ανά έτος αυτών των περιοχών, σύμφωνα με το πιο πρόσφατο μοντέλο V2016, κυμαίνεται από 4.5 έως 5.0.



Σχήμα 2.1.10 Επιφανειακές σεισμικές πηγές του μοντέλου ESHM13. Με κόκκινο χρώμα φαίνονται τα ίχνη των «σύνθετων» (complex) ανάστροφων ρηγμάτων που περιγράφουν το επιφανειακό μέρος της κατάδυσης του Ν. Αιγαίου.

Στο Σχήμα 2.1.11 απεικονίζεται το μέγιστο μέγεθος, *M*_{max}, κάθε ζώνης του μοντέλου ESHM13 σε συνάρτηση με το μέγιστο μέγεθος των ζωνών των μοντέλων P1990 (Σχήμα 2.1.11a), PP2000 (Σχήμα 2.1.11b) και V2016 (Σχήμα 2.1.11c). Οι διαφορές των τιμών του μεγίστου μεγέθους (οι οποίες φτάνουν και τις 2 μονάδες) είναι παράδοξες, δεδομένου ότι οι Woessner et al. (2015) ισχυρίζονται ότι χρησιμοποιούν κατά βάση το μέγιστο παρατηρούμενο μέγεθος, όπως και τα ελληνικά μοντέλα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το Σχήμα 2.1.11 περιέχει τις χαμηλότερες τιμές *M*_{max} του λογικού δέντρου που χρησιμοποιήθηκε από το μοντέλο ESHM13 για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας -οι οποίες, ωστόσο, είχαν το μεγαλύτερο βάρος (ίσο με 0.5) στην πλειονότητα των ζωνών. Αξίζει να σημειωθεί η ύπαρξη πληθώρας ζωνών στις οποίες το μέγιστο μέγεθος ισούται με 8.0, τη στιγμή που οι μοναδικές περιοχές στις οποίες έχει παρατηρηθεί μέγεθος αυτής της τάξης είναι η Δυτική Κρήτη (σεισμός 365 μ.Χ. στα Φαλάσαρνα, M8.3, ζώνη 336 στο Σχήμα 2.1.10).



Σχήμα 2.1.11 Μέγιστο μέγεθος (M_{max}) του μοντέλου ESHM13 σε συνάρτηση με τις αντίστοιχες τιμές του μοντέλου a) P1990, b) PP2000 και, c) V2016.

Οι αστοχίες στον προσδιορισμό του μεγίστου μεγέθους κάθε ζώνης για το μοντέλο ESHM13 φαίνονται και από το γεγονός ότι δεν είναι σε συμφωνία με τις διαστάσεις των ρηγμάτων της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου. Σχεδόν σε όλες τις δημοσιεύσεις, ως το μεγαλύτερο ρήγμα θεωρείται αυτό της Ελαφονήσου, το οποίο έχει ανάστροφο μηχανισμό γένεσης -δεδομένου ότι ανήκει στην ελληνική Τάφρο, με μήκος 200 km. Αν εφαρμοστεί η σχέση των Wells and Coppersmith (1994) με αυτό το μήκος, το μέγιστο μέγεθος σεισμού που προκύπτει ισούται με 8.1. Το μέγεθος αυτό είναι το μεγαλύτερο που μπορεί να προκύψει (στη σπάνια περίπτωση διάρρηξης της συνολικής επιφάνειας του ρήγματος) και είναι συγκρίσιμο με το μέγιστο μέγεθος πολλών ζωνών του ESHM13. Το ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης της Αλοννήσου (ζώνη 376) έχει μήκος 24 km, επομένως το μέγιστο μέγεθος σεισμού που δύναται να προκαλέσει, βάσει της σχέσης βαθμονόμησης, ισούται με 6.4 (ιστορικά το μέγιστο παρατηρούμενο μέγεθος είναι 6.5), τη στιγμή που το ESHM13 θεωρεί ότι αυτό είναι ίσο με 8.0. Επίσης, το μέγιστο μέγεθος που δίνεται για τη Β. Σκύρο (ζώνη 396) είναι ίσο με 8.0, μολονότι το ρήγμα της έχει μήκος μόλις 23 km. Επιπλέον, για το ρήγμα της Λήμνου στη ζώνη 404 (μήκος 80 km, άρα μέγιστο μέγεθος 7.2) προσδιορίζει το μέγιστο μέγεθος στο 8.0. Παρατέθηκαν ορισμένα μόνο από πλήθος ανάλογων παραδειγμάτων, τα οποία πιστοποιούν ότι στην πλειονότητά τους τα μέγιστα μεγέθη του ESHM13 είναι εμφανώς υπερεκτιμημένα (όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1.11).

Μία ακόμη ιδιαίτερη αδυναμία του μοντέλου αποτελεί ο κυρίαρχος μηχανισμός γένεσης που προτείνεται για κάθε ζώνη, ο οποίος δεν είναι σε συμφωνία με την τεκτονική της κάθε περιοχής. Παρόλο που η παράταξη και η γωνία κλίσης των προτεινόμενων ρηξιγενών δομών εκτιμήθηκαν με ακρίβεια δεκαδικού της μοίρας, η γωνία του διανύσματος ολίσθησης λαμβάνει τρεις τιμές: -90° (για κανονικά ρήγματα), 90° (για ανάστροφα ρήγματα) και 180° (για ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης, είτε δεξιόστροφα είτε αριστερόστροφα), ενδεχομένως επειδή είναι απλώς ενδεικτικές του είδους του ρήγματος, για τη χρήση του στις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. Για κάθε ζώνη δίνονται ποσοστά και των τριών ειδών

ασυμφωνία μεταξύ των προτεινόμενων μηχανισμών γένεσης με την υπάρχουσα τεκτονική αξίζει να αναφερθεί η ζώνη 0_9, η οποία καλύπτει περιοχή που περικλείει τμήμα του βόρειου κλάδου του ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης της Τάφρου του Β. Αιγαίου, για την οποία προτείνεται κανονικός τύπος διάρρηξης, με βάρος 0.6, και διάρρηξη οριζόντιας μετατόπισης με βάρος μόνο 0.4. Η ζώνη 400 περιέχει τη Ρόδο, η οποία κυριαρχείται από ανάστροφα ρήγματα και αριστερόστροφα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης. Το ESHM13 θεωρεί ότι το είδος διάρρηξης είναι κατά 75% κανονικό, κατά 20% οριζόντιας μετατόπισης, ενώ η πιθανότητα να είναι ανάστροφο εκτιμάται μόλις στο 5%. Στη ζώνη 388 (δυτικό τμήμα του ηφαιστειακού τόξου, στο οποίο κυριαρχούν τα κανονικά ρήγματα) δίνει 25% πιθανότητα διάρρηξης οριζόντιας μετατόπισης και 25% πιθανότητα ανάστροφης διάρρηξης. Η ασυμφωνία μεταξύ του πραγματικού και του θεωρούμενου από το μοντέλο είδους διάρρηξης δεν προκαλεί μόνο την αύξηση των σφαλμάτων (επιστημική αβεβαιότητα) στα αποτελέσματα της ΠΕΣΕ, αλλά και αχρείαστη επιβάρυνση-παράταση του χρόνου υπολογισμού της, ιδίως όταν η περιοχή μελέτης είναι εκτενής.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ως προς το επίπεδο σεισμικότητας, το ESHM13 είναι παρόμοιο με το μοντέλο P1990, έχει ελαφρώς χαμηλότερες τιμές από το V2016, και σαφώς χαμηλότερες από το ΡΡ2000. Στο Σχήμα 2.1.12 απεικονίζεται η σύγκριση του συχνότερα παρατηρούμενου μεγίστου μεγέθους ανά έτος (M1) του ESHM13 με τα προαναφερθέντα ελληνικά μοντέλα. Τα Σχήματα 2.1.12a, 2.1.12c και 2.1.12d περιέχουν τη διαφορά των τιμών Μ1 των μοντέλων Ρ1990, ΡΡ2000 και V2016, αντίστοιχα, από τις τιμές M1 του ESHM13 (συχνότερα παρατηρούμενο μέγιστο μέγεθος ανά έτος και ανά 10⁴ km² – επιφάνεια 100 km x 100 km). Τα Σχήματα 2.1.12b, 2.1.12c και 2.1.12f παρέχουν τις τιμές M_1 του ESHM13 σε συνάρτηση με τις τιμές M1 των P1990, PP2000 και V2016, αντίστοιχα. Οι κυριότερες διαφορές του ESHM13 από το P1990 εντοπίζονται και πάλι στις περιοχές χαμηλής σεισμικότητας υποβάθρου (Κεντρικό και Νότιο Αιγαίο, Μακεδονία κ.λπ.), όπου οι τιμές Μ1 του ESHM13 είναι έως και 1.5 μονάδα υψηλότερες. Σε ό,τι αφορά τη σύγκριση με το μοντέλο PP2000, οι τιμές του ESHM13 είναι κατά περίπου 1 μονάδα χαμηλότερες στην ηπειρωτική Ελλάδα, ενώ υπάρχουν κάποιες περιοχές (π.χ. Αιγαίο Πέλαγος, Β. Μακεδονία) στις οποίες οι τιμές του ESHM13 είναι παρόμοιες, με απόκλιση ±0.5 μονάδων. Τέλος, οι τιμές του μοντέλου αυτού υπολείπονται των τιμών του V2016 έως και 1.5 μονάδα σχεδόν σε ολόκληρη την ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου.



Σχήμα 2.1.12 (αριστερά) Χωρική κατανομή της διαφοράς των τιμών του M₁ (συχνότερα παρατηρούμενο μέγιστο μέγεθος ανά έτος και ανά 10⁴ km²) των μοντέλων P1990, PP2000 και V2016 από αυτές του μοντέλου ESHM13 (a, c και e, αντίστοιχα). (δεξιά) Τιμές M₁ του μοντέλου ESHM13 σε συνάρτηση με αυτές των μοντέλων P1990, PP2000 και V2016 (b, d και f, αντίστοιχα).

Μοντέλο των Danciu et al. (2021)

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το μοντέλο των Danciu et al. (2021) ή ESHM20 δημιουργήθηκε με σκοπό την επικαιροποίηση των υπολογισμών ΠΕΣΕ για την Ευρω-Μεσογειακή περιοχή και είναι ο διάδοχος του ESHM13. Επίσης, αποτελεί βασικό στοιχείο για την επικαιροποίηση του Ευρωπαϊκού Αντισεισμικού Κανονισμού CEN EC8.

To ESHM20 αποτελείται από ένα μοντέλο επιφανειακών σεισμικών πηγών και από ένα μοντέλο το οποίο περιέχει συνδυασμό ενεργών ρηγμάτων και εξομαλυμένης σεισμικότητας υποβάθρου. Για την ανάπτυξή του χρησιμοποιήθηκαν ένας ενοποιημένος κατάλογος ενόργανης και ιστορικής σεισμικότητας, βάσεις δεδομένων ενεργών ρηγμάτων και καταγραφές της ισχυρής εδαφικής κίνησης. Λόγω της μεγάλης έκτασης της περιοχής μελέτης, προέκυψαν δυσκολίες σχετικές με την ανομοιογένεια της σεισμικότητας, καθώς σε ορισμένες περιοχές τα δεδομένα είναι λίγα έως ελάχιστα. Για την ιστορική σεισμικότητα (1000-1899) αξιοποιήθηκε ο κατάλογος EPICA, με ελάχιστο μέγεθος 4.0, ενώ για την ενόργανη σεισμικότητα (1900-2014) επικαιροποιήθηκε ο κατάλογος ΕΜΕC. Πιο συγκεκριμένα, έγινε επέκταση του καταλόγου έως το 2014 και προσθήκη σε αυτόν νέων εθνικών καταλόγων που προέκυψαν από πρόσφατες μελέτες, όπως αυτοί της Ιταλίας, της Γαλλίας, της Τουρκίας, της Ρουμανίας και της Σλοβενίας. Ως μέγεθος ορίστηκε το μέγεθος σεισμικής ροπής (M_w), ο υπολογισμός του οποίου έγινε με κατάλληλες σχέσεις αναγωγής. Το ελάχιστο μέγεθος του καταλόγου είναι ίσο με 3.5. Η βάση δεδομένων των ενεργών ρηγμάτων αποτελεί επικαιροποίηση της ευρωπαϊκής βάσης δεδομένων σεισμογενών ρηγμάτων EDSF13 (Basili et al., 2013) και περιέχει ρήγματα του φλοιού, αλλά και της κατάδυσης του Ν. Αιγαίου.

Το ESHM20 επικαιροποίησε τις πηγές του ESHM13 με βάση τα εθνικά μοντέλα και τις πρόσφατες εκτιμήσεις της σεισμικής επικινδυνότητας χωρών της Ευρώπης. Σύμφωνα με τους Danciu et al. (2021) τα εθνικά μοντέλα διατηρήθηκαν και ομογενοποιήθηκαν στα εθνικά σύνορα ή σε αλληλοεπικαλυπτόμενες πηγές. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, η αρχική πληροφορία (κατανομή βάθους, είδος διάρρηξης, μέγιστο μέγεθος κ.λπ.) διατηρήθηκε. Η χρονική κατανομή της σεισμικότητας ακολουθεί την εκθετική κατανομή Poisson (μοντέλο χωρίς μνήμη), και πιο συγκεκριμένα την κατανομή Gutenberg-Richter (G-R). Επίσης, ως εναλλακτική της συμπεριλαμβάνεται και η κατανομή Tapered Pareto, η οποία παρουσιάζει υψηλότερο ρυθμό μείωσης της συχνότητας σεισμών στα μεγάλα μεγέθη. Η κατανομή μπορεί να αξιοποιηθεί πρωτίστως σε πηγές οι οποίες δεν περιέχουν σεισμούς μεγέθους μεγαλύτερου του 5.0, καθώς η G-R τείνει να υπερεκτιμά τον ρυθμό σεισμικότητας μεταξύ των μεγεθών 5.0 και 6.0. Ο προσδιορισμός του μεγίστου μεγέθους κάθε ζώνης έγινε με τον ίδιο τρόπο με το ESHM13 (Meletti et al., 2009), με τη χρήση του νέου καταλόγου. Για κάθε ζώνη διατίθενται τρία πιθανά μέγιστα μεγέθη: το πρώτο, Mmax01, είναι το μέγιστο παρατηρούμενο, αυξημένο κατά 1σ, και το δεύτερο και το τρίτο προκύπτουν από την πρόσθεση 0.3 και 0.6 μονάδων στο *M_{max}01*, αντίστοιχα. Η τιμή 0.3 αποτελεί τη στατιστική αβεβαιότητα (σ) του μεγέθους του καταλόγου σεισμικότητας. Η πρόσθεση αυτής της τιμής δύο

φορές έχει ως αποτέλεσμα το υπολογιζόμενο μέγιστο μέγεθος να αντιστοιχεί σε επέκταση της ιστορικής καταγραφής κατά 4000-5000 χρόνια (Danciu et al., 2018). Τέλος, υπάρχουν τρία ζεύγη σταθερών *a* και *b* της σχέσης G-R, τα οποία αντιστοιχούν στο 16° (χαμηλότερο), στο 50⁶ (μεσαίο) και στο 84° (υψηλότερο) εκατοστημόριο.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Από τον συνδυασμό των τριών πιθανών ζευγών *a* και *b* με τα τρία πιθανά μέγιστα μεγέθη *M_{max}* για κάθε ζώνη προκύπτουν εννέα πιθανά σενάρια σεισμικότητας για καθεμιά εξ αυτών. Οι Danciu et al. (2021) χρησιμοποιούν ένα λογικό δέντρο το οποίο λαμβάνει υπόψη όλα τα μοντέλα που δημιούργησαν, δηλαδή τα εννέα σενάρια για τις επιφανειακές σεισμικές πηγές με θεωρούμενη κατανομή μεγεθών την G-R, τα τρία πιθανά σενάρια όταν χρησιμοποιείται η κατανομή Tapered Pareto, και τρία ακόμη πιθανά σενάρια όταν λαμβάνεται υπόψη το μοντέλο συνδυασμού ομαλοποιημένης σεισμικότητας και ενεργών ρηγμάτων. Το βάρος των δύο μοντέλων (επιφανειακών σεισμικών πηγών και συνδυασμού της ομαλοποιημένης σεισμικότητας με τα ενεργά ρήγματα) ισούται με 0.5. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκε μόνο το μοντέλο επιφανειακών σεισμικών πηγών και συνδοιασμού της μοντέλα, και τα βάρη που υιοθετήθηκαν αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο.

Οι σεισμικές πηγές που καλύπτουν τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου είναι 83 (Σχήμα 2.1.13). Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται τα ίχνη των σύνθετων (complex) ανάστροφων ρηγμάτων που περιγράφουν το επιφανειακό κομμάτι της κατάδυσης (βάθη 10-34 km για τη ζώνη Hea του Ελληνικού τόξου και 8-31 km για τη CyA του κυπριακού τόξου). Ο αριθμός των ζωνών είναι μικρότερος από αυτόν του ESHM13, επειδή αρκετές ενώθηκαν (π.χ. η περιοχή που ανήκει στις ζώνες 404 και 415 του ESHM13 ενώθηκαν στη ζώνη T463 του ESHM20, η περιοχή της BA Πελοποννήσου που ανήκει στις ζώνες 0_6 και 325 του ESHM13 ενώθηκαν στη ζώνη G241, οι ζώνες Λευκάδας-Κεφαλονιάς 316 και 317 ενώθηκαν στη ζώνη G251, το Ν. Αιγαίο αποτελείται από μία ζώνη κ.λπ.), με αποτέλεσμα κάποιες από αυτές να περιέχουν πολύ διαφορετικά μεταξύ τους ρήγματα, όπως η ζώνη T479 στη Póδo.

Για τις συγκρίσεις του ESHM20 με τα προαναφερθέντα μοντέλα, από τα εννέα πιθανά σενάρια συνδυασμών *a-b* και M_{max} επιλέχθηκε το σενάριο το οποίο περιέχει τις μέσες (πιο πιθανές) τιμές *a-b*, και τις μικρότερες (επίσης πιο πιθανές) τιμές M_{max} ($M_{max}O1$), προκειμένου να αποφευχθούν τα ακραία σενάρια και επειδή ο συγκεκριμένος συνδυασμός έχει μεγαλύτερο βάρος στο λογικό δέντρο των Danciu et al. (2021). Στο Σχήμα 2.1.14 παρουσιάζεται η σύγκριση των μεγίστων μεγεθών, M_{max} , των ζωνών του ESHM20 με τα αντίστοιχα μεγέθη των υπόλοιπων μοντέλων. Όπως και με την περίπτωση του ESHM13, το ESHM20 έχει πολύ υψηλότερες τιμές M_{max} από τα ελληνικά μοντέλα P1990, PP2000 και V2016 (Σχήμα 2.1.14a-c), καθώς οι τιμές του είναι παρόμοιες με αυτές του ESHM13 (Σχήμα 2.1.14d). Σημειώνεται ότι, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, το M_{max} είναι ικανό να επηρεάσει τα αποτελέσματα των υπολογισμών σεισμικής επικινδυνότητας έως και ~16% για την παράμετρο PGA, και έως και ~27% για την παράμετρο PGV.



Σχήμα 2.1.13 Επιφανειακές σεισμικές πηγές του μοντέλου ESHM20. Με κόκκινο χρώμα φαίνονται τα ίχνη των «σύνθετων» (complex) ανάστροφων ρηγμάτων που περιγράφουν το επιφανειακό μέρος της κατάδυσης του Ν. Αιγαίου.



Σχήμα 2.1.14 Το μέγιστο μέγεθος (M_{max}) του μοντέλου ESHM20 (M_{max}01) σε συνάρτηση με τις αντίστοιχες τιμές του μοντέλου a) P1990, b) PP2000, c) V2016 και, d) ESHM13.

Παρόμοια προβλήματα με το ESHM13 ανακύπτουν και όσον αφορά το κυρίαρχο είδος διάρρηξης των ζωνών. Για τη ζώνη G251 (Κεφαλονιά-Λευκάδα, περιοχή με ρήγματα ανάστροφα και οριζόντιας μετατόπισης) το ESHM20 δίνει 60% πιθανότητα το κυριότερο είδος διάρρηξης να είναι κανονικό, και από 20% πιθανότητα να είναι ανάστροφο και οριζόντιας μετατόπισης. Τα ίδια ποσοστά εκτιμά και για τη ζώνη G256 (Κέρκυρα). Στη ζώνη G241 (Πατραϊκός, Κορινθιακός, Σαρωνικός Κόλπος, με κανονικά ρήγματα Α-Δ κυρίως παράταξης) θεωρεί ότι υπάρχει μόλις 60% πιθανότητα το κυρίαρχο είδος διάρρηξης να είναι κανονικό και 40% πιθανότητα να είναι οριζόντιας μετατόπισης. Για τη ζώνη G244 (περιοχή από την Ασπροβάλτα έως την Αλεξανδρούπολη, με μερικά από τα μεγαλύτερα κανονικά ρήγματα της χώρας) ορίζει 60% πιθανότητα κανονικού είδους διάρρηξης, 20% ανάστροφου και 20% οριζόντιας μετατόπισης. Για τη ζώνη Τ463 (Θάλασσα του Μαρμαρά, Ελλήσποντος) δίνει 40% πιθανότητα κανονικών ρηγμάτων, 10% ανάστροφων και μόλις 50% οριζόντιας μετατόπισης. Υπάρχουν πολλά ακόμη παρόμοια παραδείγματα ζωνών στις οποίες το υφιστάμενο είδος διάρρηξης έχει βάρος της τάξης του 0.5-0.6, ενώ οι συντάκτες του μοντέλου ESHM20 δίνουν σχετικά μεγάλο βάρος και στα υπόλοιπα είδη διάρρηξης, χωρίς αιτιολόγηση. Όπως αναλύεται στο Κεφάλαιο 3 (Ανάλυση Ευαισθησίας), το θεωρούμενο είδος διάρρηξης κατά την εφαρμογή των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. δύναται να μεταβάλει τα αποτελέσματα των υπολογισμών σεισμικής επικινδυνότητας έως και ~12% στην παράμετρο PGA και έως και ~8% στην παράμετρο PGV, επομένως ανακρίβειες στον προσδιορισμό του οδηγούν σε πρόσθετα σφάλματα στην ΠΕΣΕ.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στο Σχήμα 2.1.15 φαίνεται η σύγκριση του συχνότερα παρατηρούμενου μεγίστου μεγέθους ανά έτος (M_1 , ανά 10⁴ km² - περιοχή 100 km x 100 km) του ESHM20 με τα μοντέλα P1990 και PP2000. Οι τιμές M_1 του ESHM20 υπερβαίνουν αυτές του P1990 (Σχήμα 2.1.15b) κυρίως στη Β. Ελλάδα και στο Κεντρικό Αιγαίο, όπου η διαφορά ανέρχεται στις 3 μονάδες (Σχήμα 2.1.15a). Η σύγκριση με τις τιμές του PP2000 (Σχήμα 2.1.15d) δείχνει ότι το επίπεδο σεισμικότητας είναι παρόμοιο στα δύο μοντέλα, ενώ η χωρική κατανομή της διαφοράς των μέσων ετήσιων μεγεθών (Σχήμα 2.1.15c) αναδεικνύει το γεγονός ότι στη Β. Ελλάδα και στις δυτικές ακτές της Τουρκίας τα M_1 του ESHM20 είναι κατά 1-1.5 μονάδα υψηλότερα από αυτά του PP2000. Στις υπόλοιπες περιοχές η διαφορά κυμαίνεται από -0.5 έως 0.5 μονάδες.

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τα μοντέλα V2016 και ESHM13 παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1.16. Το ESHM20 παρουσιάζει ελαφρώς υψηλότερες τιμές από το V2016 (Σχήμα 2.1.16b), οι διαφορές των οποίων κυμαίνονται μεταξύ -0.5 και 0.5 μονάδων για το σύνολο, σχεδόν, της περιοχής μελέτης (Σχήμα 2.1.16a). Όπως αναμενόταν, παρουσιάζει παρόμοιες τιμές με το ESHM13 (Σχήμα 2.1.16d), καθώς σχεδόν σε ολόκληρη τη χώρα τα μεγέθη τους αποκλίνουν από -0.5 έως 0.5 μονάδες (Σχήμα 2.1.16c).



<u>Σχήμα 2.1.15</u> a) Χωρική κατανομή της διαφοράς των τιμών του M_1 (συχνότερα παρατηρούμενο μέγιστο μέγεθος ανά έτος και ανά 10^4 km²) του μοντέλου P1990 από αυτές του μοντέλου ESHM20, b) Τιμές του M_1 που προκύπτουν από το μοντέλο ESHM20 σε συνάρτηση με τις αντίστοιχες του P1990, c) Χωρική κατανομή της διαφοράς των τιμών M_1 του μοντέλου PP2000 από αυτές του μοντέλου ESHM20 και, d) Τιμές του M_1 που προκύπτουν από το μοντέλο ESHM20.



Σχήμα 2.1.16 α) Χωρική κατανομή της διαφοράς των τιμών M_1 (συχνότερα παρατηρούμενο μέγιστο μέγεθος ανά έτος και ανά 10^4 km²) του μοντέλου V2016 από αυτές του μοντέλου ESHM20, b) Τιμές του M_1 που προκύπτουν από το μοντέλο ESHM20 σε συνάρτηση με τις αντίστοιχες του μοντέλου V2016, c) Χωρική κατανομή της διαφοράς των τιμών M_1 του μοντέλου ESHM13 από αυτές του μοντέλου ESHM20 και, d) Τιμές του M_1 που προκύπτουν από το μοντέλου ESHM13 από αυτές του μοντέλου ESHM20 και, d) Τιμές του M_1 που προκύπτουν από το μοντέλου ESHM13 από αυτές του μοντέλου ESHM20 και, d) Τιμές του M_1 που προκύπτουν από το μοντέλου ESHM13 από αυτές του μοντέλου ΕSHM20 και.

2.2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΒΑΘΟΥΣ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ύήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

Οι σεισμοί ενδιαμέσου βάθους (60-180 km) αποτελούν περίπου το 5% των σεισμών που λαμβάνουν χώρα στον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου. Οι εστίες τους τοποθετούνται αμφιθεατρικά, κατά μήκος του Ελληνικού τόξου (ζώνη Benioff). Παρόλο που οι μεγάλοι σεισμοί βάθους (μεγέθους **M**7.0-8.0) είναι σπάνιοι, όποτε συμβαίνουν κρίνονται ως εξόχως επικίνδυνοι, καθώς παράγουν σεισμικά κύματα με μεγάλη περίοδο και πλάτος, και χαμηλό ρυθμό απόσβεσης. Συνεπώς, είναι σε θέση να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό τη σεισμική επικινδυνότητα της Ν. Ελλάδας.

Τα βάθη των σεισμών σχηματίζουν δύο μεγάλες ζώνες, μία εξωτερική (Α. Πελοπόννησος – Β. Κρήτη – βόρεια της Καρπάθου – Ρόδος) και μία εσωτερική (Σχήμα 1.9.1, Μέθανα – Μήλος – Σαντορίνη – Νίσυρος). Στην εξωτερική συμβαίνουν κυρίως σεισμοί βάθους 70-100 km, και στην εσωτερική τα βάθη κυμαίνονται από 100 έως 160 km. Το μέγεθος των σεισμών της εξωτερικής ζώνης (Μ≥7.5) είναι υψηλότερο από αυτό της εσωτερικής. Μία ακόμη διαφορά των δύο ζωνών αποτελεί η κλίση της κατανομής των σεισμών με το βάθος, διότι στο εξωτερικό κομμάτι η κλίση της ζώνης Benioff (περίπου 10°) είναι μικρότερη από αυτήν του εσωτερικού (περίπου 38°), πιθανότατα λόγω της αναδίπλωσης της Μεσογειακής λιθόσφαιρας με την υπερκείμενη λιθόσφαιρα του Αιγαίου. Οι περισσότεροι σεισμοί λαμβάνουν χώρα στα σημεία συνάντησης των δύο ζωνών (Papazachos, 1990; Knapmeyer, 1999; Papazachos et al., 2005; Meier et al., 2004, 2007).

Έως σήμερα έχουν δημοσιευθεί τέσσερα μοντέλα σεισμικών πηγών βάθους (Σχήμα 2.2.1). Το Σχήμα 2.2.1a δημιουργήθηκε από τον Papazachos (1990) και συνιστά το πρότυπο του μοντέλου των Papaioannou and Papazachos (2000), το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 2.2.1b. Στο μοντέλο αυτό, η εξωτερική και η εσωτερική ζώνη περιγράφονται από δύο επιμέρους ζώνες (1a, 1b, 1c και 2a, 2b, 2c, αντίστοιχα). Η εξωτερική ζώνη υπόκειται σε ισχυρότερες τάσεις από ό,τι η εσωτερική, δεδομένης της παραμόρφωσης που προκύπτει από την επαφή της Μεσογειακής λιθόσφαιρας με αυτήν του Αιγαίου. Οι Papaioannou and Papazachos (2000) χρησιμοποιούν τις ίδιες ζώνες, με τη διαφορά ότι διαιρούν την 1a σε δυο επιμέρους ζώνες, τις D1 και D2. Η τιμή της παραμέτρου b είναι σταθερή και ίση με 0.56 για τις εξωτερικές ζώνες (δηλαδή τις 1a, 1b, 1c και D1, D2, D3, D4) και με 0.75 για τις εσωτερικές (2a, 2b, 2c και D5, D6, D7). Η διαφορά αυτή συμφωνεί με το γεγονός ότι η εξωτερική ζώνη υφίσταται ισχυρότερες τάσεις. Μεταξύ των δύο μοντέλων υπάρχουν διαφορές ως προς το μέγιστο μέγεθος των ζωνών (το οποίο ταυτίζεται με το μέγιστο παρατηρούμενο μέγεθος), δεδομένου ότι η τροποποίηση των Papaioannou and Papazachos (2000) έγινε μία δεκαετία αργότερα. Πιο συγκεκριμένα, ο Papazachos (1990) προτείνει μέγιστα μεγέθη ίσα με 7.9, 8.2 και 8.0 για τις εξωτερικές ζώνες 1a, 1b, 1c, αντίστοιχα, και για τις εσωτερικές 7.1. Από την άλλη πλευρά, οι Papaioannou and Papazachos (2000) προτείνουν μέγιστο μέγεθος για τις ζώνες D1 έως D7 ίσο με 7.5, 7.5, 7.8, 7.5, 7.0, 7.0 και 6.2, αντίστοιχα. Επομένως, τα μέγιστα μεγέθη των δύο

μοντέλων κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 6.2 και 8.2, με τα μικρότερα μεγέθη να εντοπίζονται στις εσωτερικές ζώνες.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 2.2.1 Ζώνες για τους σεισμούς ενδιαμέσου βάθους της ζώνης Benioff του Ν. Αιγαίου: a) Papazachos (1990), b) Papaioannou and Papazachos (2000), c) ESHM13 και, d) ESHM20. Με μπλε χρώμα στα c και d φαίνονται τα ίχνη των σύνθετων ανάστροφων ρηγμάτων που περιγράφουν το πιο επιφανειακό κομμάτι της ζώνης Benioff.

Στο Σχήμα 2.2.1c παρουσιάζονται οι ζώνες κατάδυσης του ESHM13 που ανήκουν στην περιοχή μελέτης, διότι το πρόγραμμα προσδιόρισε ζώνες για τα τόξα της Ελλάδας, της Κύπρου και της Καλαβρίας, και για τη Βράντσεα (Vrancea) της Ρουμανίας. Το ESHM13 αναπαριστά το επιφανειακό τμήμα της κατάδυσης με ανάστροφα σύνθετα ρήγματα βάθους 20-50 km, τα όρια των οποίων σημειώνονται με μπλε χρώμα. Το βαθύτερο μέρος της κατάδυσης περιγράφεται από σεισμικές πηγές με βάθη που κυμαίνονται μεταξύ των 50 km και των 160 km και ομογενή κατανομή σεισμικότητας. Στα σύνθετα ρήγματα και στις ζώνες το μέγιστο μέγεθος παίρνει τις τιμές 8.3, 8.5, 8.7 και 8.9, με βάρος 0.5, 0.2, 0.2 και 0.1, αντίστοιχα. Η τιμή της παραμέτρου *b* ισούται με 0.9 σε όλα τα σύνθετα ρήγματα και σε όλες τις ζώνες. Οι ζώνες που περιγράφουν την κατάδυση επεκτείνονται προς τη Δ. Πελοπόννησο και τα Ιόνια νησιά, σε αντίθεση με τα δημοσιευμένα μοντέλα της ζώνης Benioff (Knapmeyer, 1999; Papazachos et al., 2000; Meier et al., 2007; Kkallas et al., 2018).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το ESHM20 προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά της κατάδυσης με τρόπο παρόμοιο με το ESHM13, δηλαδή με σύνθετα ανάστροφα ρήγματα για το επιφανειακό τμήμα και με ζώνες για τους σεισμούς βάθους. Το σεισμογενές στρώμα του σύνθετου ρήγματος του Ελληνικού τόξου εκτείνεται σε βάθη 9-38 km. Η τιμή της παραμέτρου *b* ισούται με 1.07 και του *M_{max}* με 8.8. Οι αντίστοιχες τιμές για τις ζώνες βάθους είναι ίσες με 0.9 και 7.7. Το βάθος των ζωνών είναι πιο ακριβές από αυτό των ζωνών του ESHM13 και παίρνει τιμές μεταξύ 80 και 120 km για την GRIS050, και μεταξύ 120 km και 160 km για την GRIS140. Ωστόσο, το κατώτερο βάθος των σύνθετων ρηγμάτων είναι πολύ μικρότερο από το ανώτερο βάθος των ζωνών, με αποτέλεσμα τη δημιουργία σεισμικού κενού στο διάστημα βαθών μεταξύ 38 km και 80 km. Η κατανομή των σεισμών θεωρείται ομογενής.

Στο Σχήμα 2.2.1d παρουσιάζονται οι ζώνες σεισμών ενδιαμέσου βάθους του μοντέλου ESHM20. Είναι εμφανές ότι η έκτασή τους είναι πολύ μεγάλη, αξιοσημείωτα εκτενέστερη από το σύνολο των ζωνών των υπόλοιπων μοντέλων. Επιπλέον, τα όριά τους δεν συμφωνούν με καμία από τις προγενέστερες μελέτες για τη γεωμετρία της ζώνης Benioff του Ελληνικού τόξου. Η ζώνη GRIS140 (βάθος 120-160 km) περιλαμβάνει περιοχές στις οποίες δεν έχουν παρατηρηθεί σεισμοί ενδιαμέσου βάθους (βλ. και Σχήμα 1.9.3), όπως τη Ζάκυνθο, την Ήπειρο, τη Β. Θεσσαλία και τις Β. Κυκλάδες. Η ίδια παρατήρηση γίνεται και στη ζώνη GRIS050, καθώς περικλείει περιοχές όπως η Κεφαλονιά και η Δ-ΝΔ Πελοπόννησος. Επιπλέον, καταλαμβάνει μεγάλη έκταση προς τον Νότο (έως το γεωγραφικό πλάτος των 32°), ενώ στα υπόλοιπα μοντέλα και στις δημοσιευμένες μελέτες το νοτιότερο τμήμα της κατάδυσης βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος περίπου 34.0°-34.5°.

Σύμφωνα με τους Danciu et al. (2021) τα όρια των ζωνών κατάδυσης για την Ελλάδα προέρχονται σε μεγάλο βαθμό από την εργασία των Hayes et al. (2018), και από άλλες μελέτες σχετικές με τις ζώνες κατάδυσης. Οι Hayes et al. (2018) δημιούργησαν το μοντέλο Slab2 με στόχο να περιγράψουν το σύνολο των ζωνών κατάδυσης της Γης. Στο Σχήμα 2.2.2 απεικονίζεται η παγκόσμια κατανομή των ζωνών κατάδυσης του Slab2 με ένθετο το τμήμα της Ελλάδας σε μεγέθυνση. Είναι σαφές ότι τα όρια πάρθηκαν σχεδόν αυτούσια από τη συγκεκριμένη εργασία [σημειώνεται ότι οι Hayes et al. (2018) *δεν* συμπεριλαμβάνουν την ευρύτερη περιοχή των Ιωαννίνων στις ζώνες βάθους, όπως οι Danciu et al. (2021)], χωρίς να ληφθεί υπόψη αφενός ότι οι Hayes et al. (2018) εργάζονται σε παγκόσμια κλίμακα, αφετέρου ότι στον Πίνακα του Παραρτήματός τους -στον οποίο παραθέτουν βασικά χαρακτηριστικά των ζωνών όπως τα άνω και κάτω όριά τους, το πλάτος τους κ.λπ.δηλώνουν ότι τα αποτελέσματα για τα μικρά τόξα της Ελλάδας, της Καλαβρίας και της Κύπρου βασίζονται σε λίγους σεισμούς (<50), επομένως είναι φτωχά οριοθετημένα (poorly constrained). Το Ελληνικό τόξο καταλαμβάνει ελάχιστη έκταση του πλανήτη, ωστόσο σε ευρωπαϊκό επίπεδο συνιστά (μαζί με το Κυπριακό τόξο και το τόξο της Καλαβρίας) ένα πολύ ιδιαίτερο και μοναδικό σεισμοτεκτονικό καθεστώς. Ως εκ τούτου, μία προφανής αδυναμία του μοντέλου είναι η έλλειψη της λεπτομερειακής οριοθέτησης των ζωνών που το περιγράφουν, ειδικά εφόσον υπήρχε το προηγούμενο των χωρικά πιο περιορισμένων ζωνών του ESHM13.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 2.2.2 Παγκόσμια χωρική κατανομή των ζωνών κατάδυσης. Στο ένθετο σχήμα φαίνονται τα όρια του Ελληνικό τόξου (τροποποιημένο από Hayes et al., 2018).

2.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΕΣΕ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΜΟΝΤΕΛΟ

Στο Σχήμα 2.3.2 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της παραμέτρου PGA (τιμή με πιθανότητα υπέρβασης 10.0% για μέση περίοδο επανάληψης 50 ετών) για κάθε μοντέλο επιφανειακών σεισμικών πηγών. Στην περίπτωση του ESHM13 χρησιμοποιήθηκε ένα λογικό δέντρο με όλα τα πιθανά σενάρια M_{max}, και για το ESHM20 αξιοποιήθηκε το λογικό δέντρο με τα εννέα πιθανά σενάρια συνδυασμών a, b και M_{max}, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.1. Στα μοντέλα αυτά χρησιμοποιήθηκαν και οι ζώνες που περιγράφουν το επιφανειακό κομμάτι της κατάδυσης. Οι υπολογισμοί έγιναν για έναν κάνναβο σημείων με βήμα 0.2° κατά γεωγραφικό μήκος και πλάτος. Επειδή στη συγκεκριμένη εφαρμογή διερευνάται η επίδραση του μοντέλου σεισμικών πηγών στα αποτελέσματα της ΠΕΣΕ και γίνεται η σύγκριση όλων των αποτελεσμάτων, επιλέχθηκε μία μοναδική GMPE, αυτή των Boore et al. (2021). Η συγκεκριμένη σχέση είναι, κατά τη συγγραφή της παρούσας διατριβής, η πιο πρόσφατα δημοσιευμένη για την Ελλάδα και βασίζεται σε παραδοχές της σχέσης των Boore et al. (2014). Η ανάλυση των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. παρουσιάζεται στην ενότητα 2.5. Τέλος, σημειώνεται ότι θεωρήθηκαν εδαφικές συνθήκες βράχου (*Vs₃₀*=800 m/s).

Στο Σχήμα 2.3.2a παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ΠΕΣΕ του μοντέλου P1990. Οι τιμές PGA κυμαίνονται από 0 g έως 1.0 g, με τις υψηλότερες να βρίσκονται στην περιοχή της Κεφαλονιάς και της Λευκάδας. Στα ανάστροφα ρήγματα των δυτικών ακτών της Αλβανίας και της Ελλάδας, καθώς και σε αυτά της ζώνης κατάδυσης, οι τιμές μεταβάλλονται μεταξύ των 0.5 g και 0.7 g. Σε παρόμοιο επίπεδο βρίσκονται οι τιμές των ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης της Τάφρου του Β. Αιγαίου. Σχετικά υψηλές τιμές PGA (0.5 g έως 0.7 g) απαντώνται και στα κανονικά ρήγματα της Θεσσαλίας, της Εύβοιας και της ΒΑ Πελοποννήσου. Οι τιμές των υπόλοιπων περιοχών της ηπειρωτικής Ελλάδας και της Τουρκίας κυμαίνονται μεταξύ των 0.3 g και 0.5 g. Χαμηλότερα επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας (0.1-0.3 g) έχουν το Κεντρικό Αιγαίο, η Φλώρινα, η Έδεσσα, η Νάουσα κ.λπ., και η Β. Μακεδονία.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



<u>Σχήμα 2.3.1</u> Τα λογικά δέντρα σεναρίων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή των μοντέλων ESHM13 και ESHM20.

Το Σχήμα 2.3.2b αναφέρεται στη χωρική κατανομή ΠΕΣΕ βάσει του μοντέλου PP2000. Σε συμφωνία με το γεγονός ότι το PP2000 παρουσιάζει το υψηλότερο επίπεδο σεισμικότητας, οι τιμές PGA που προκύπτουν είναι εξαιρετικά υψηλές, πλησιάζοντας τα 1.3-1.4 g. Τιμές υψηλότερες από 1.0 g εμφανίζονται στα Ιόνια νησιά (Κεφαλονιά, Λευκάδα, Ζάκυνθος) και στα παράλια της ΝΔ Κρήτης. Τιμές έως 1.0 g παρατηρούνται και στα κανονικά ρήγματα της ΒΑ Πελοποννήσου (Πάτρα, Αίγιο). Ολόκληρη η περιοχή μελέτης παρουσιάζει τιμές υψηλότερες από εκείνες του μοντέλου P1990, με χαρακτηριστικά παραδείγματα τις πόλεις της Μακεδονίας και της Θράκης, το σύνολο της Β. Μακεδονίας και τα παράλια της Δ. Τουρκίας.

Το Σχήμα 2.3.2c αντιστοιχεί στην ΠΕΣΕ του μοντέλου V2016. Σε γενικές γραμμές, η χωρική κατανομή και το επίπεδο των τιμών είναι παρόμοια με αυτά του μοντέλου P1990. Ωστόσο, το V2016 επισημαίνει αρκετές περιοχές με υψηλότερη σεισμική επικινδυνότητα (0.5-0.6 g έναντι των 0.2 g του P1990), όπως η Κοζάνη, η Καστοριά και η Πτολεμαΐδα. Επίσης, σε αντίθεση με τα προηγούμενα μοντέλα διαφοροποιεί στο επίπεδο της σεισμικής επικινδυνότητας της Θεσσαλίας και της ΒΑ Πελοποννήσου, καθώς υπολογίζει χαμηλότερες τιμές μεταξύ τους. Το ίδιο ισχύει για την Εύβοια και τη Χαλκιδική (0.4 g).

Στο Σχήμα 2.3.2d παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου ESHM13. Είναι προφανής η σημαντική υποεκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας σχεδόν για το σύνολο της περιοχής μελέτης. Οι υψηλότερες τιμές PGA είναι της τάξεως των 0.9 g και τοποθετούνται στη Ζάκυνθο. Στην Κεφαλονιά η τιμή είναι χαμηλότερη (0.8 g), ενώ η Λευκάδα έχει παρόμοιο επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας με τα παράλια της Δ. Αλβανίας και της Ελλάδας, με τιμή περίπου 0.6 g. Το σύνολο της περιοχής μελέτης, με εξαίρεση τη ΒΑ Πελοπόννησο, τη Θάλασσα του Μαρμαρά και το δυτικό τμήμα του Ελληνικού τόξου, παρουσιάζει σεισμική επικινδυνότητα μεταξύ των 0.3 g και 0.4 g, χωρίς σημαντικές χωρικές διαφοροποιήσεις. Παρά το γενικευμένο χαμηλό επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας, η περιοχή του Κεντρικού-Νοτίου Αιγαίου εμφανίζει υψηλότερες τιμές από αυτές των μοντέλων Ρ1990 και V2016. Τέλος, κατά μήκος του Ελληνικού τόξου η σεισμική επικινδυνότητα υποεκτιμάται.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στο Σχήμα 2.3.2e παρατίθενται τα αποτελέσματα για το μοντέλο ESHM20, τα οποία αναδεικνύουν μια «ρηξικέλευθη» άποψη σχετικά με τη χωρική κατανομή της σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας. Το μοντέλο αυτό αποτυγχάνει να προσδώσει στην Κεφαλονιά, τη Ζάκυνθο και τη Λευκάδα το υψηλότερο επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας. Εντούτοις, στη θαλάσσια περιοχή ΝΔ της Ζακύνθου προκύπτουν τιμές PGA 0.75-0.80 g, πιθανότατα λόγω των ζωνών του επιφανειακού τμήματος της κατάδυσης. Σύμφωνα με το μοντέλο, την περιοχή με την υψηλότερη σεισμική επικινδυνότητα του ευρύτερου χώρου του Αιγαίου αποτελεί το δυτικό τμήμα του Ελληνικού τόξου (θαλάσσιος χώρος ΝΑ της Κρήτης, της Καρπάθου και της Ρόδου) με τιμή PGA έως και 1.0 g. Όπως προκύπτει και από το ESHM13, οι περισσότερες περιοχές έχουν τιμή PGA κυμαινόμενη μεταξύ των 0.4 g και 0.5 g, χωρίς ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις ως προς τη χωρική κατανομή, κυρίως στην ηπειρωτική Ελλάδα. Εξαίρεση αποτελούν η ΝΑ Πελοπόννησος και, σε αντίθεση με το ESHM13, η Λέσβος και η Χίος. Ακόμη, τιμές έως και 0.6 g εμφανίζονται στα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης της Θάλασσας του Μαρμαρά και της Λήμνου. Τόσο το ESHM20 όσο και το ESHM13 αποτυγχάνουν να παραστήσουν σωστά τα αποτελέσματα στην ΠΕΣΕ από τους δύο κλάδους των ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης της Τάφρου του Β. Αιγαίου, εφόσον ο νότιος απουσιάζει, ενώ ο βόρειος παρουσιάζεται με μικρότερες διαστάσεις από τις πραγματικές.

Από τα παραπάνω συμπαιρένεται ότι οι σχετικές με τη χωρική κατανομή της σεισμικής επικινδυνότητας αστοχίες που παρουσιάζουν το Σχήμα 2.3.2d και το Σχήμα 2.3.2e -ενδεχομένως και οι χαμηλότερες τιμές σεισμικής επικινδυνότητας, αφού το επίπεδο σεισμικότητάς τους δεν διαφέρει σημαντικά από τα υπόλοιπα μοντέλα, Σχήμα 2.1.12, Σχήμα 2.1.15, Σχήμα 2.1.16- οφείλονται πρωτίστως στον προβληματικό ορισμό του κυρίαρχου είδους διάρρηξης των πηγών των μοντέλων ESHM13 και ESHM20, καθώς η εμπειρική σχέση πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. δεν εφαρμόζεται με τους σωστούς εισαγόμενους παράγοντες. Επιπλέον, η σεισμική επικινδυνότητα ενός τόπου διαμορφώνεται από τον συνδυασμό των σταθερών G-R, *α* και *b*, και από το *M_{max}* ως εκ τούτου, και δεδομένου του μεγάλου *M_{max}* των ESHM13 και ESHM20, πιθανότατα τα χαμηλά επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας να οφείλονται στις τιμές των παραμέτρων G-R. Το μοντέλο PP2000 παράγει τα πιο συντηρητικά αποτελέσματα, ενώ αυτά των P1990 και V2016 είναι παρόμοια, με το μοντέλο V2016 να παρουσιάζει μεγαλύτερη χωρική λεπτομέρεια. Η εικόνα για το PGV (Σχήμα 2.3.3) είναι σε μεγάλο βαθμό παρόμοια.



Σχήμα 2.3.2 Χωρική κατανομή της τιμής PGA σε g (πιθανότητα υπέρβασης 10.0% για περίοδο επανάληψης 50 ετών) για τα μοντέλα: a)P1990, b) PP2000, c) V2016, d) ESHM13 και, e) ESHM20.



Σχήμα 2.3.3 Χωρική κατανομή της τιμής PGV (πιθανότητα υπέρβασης 10.0% για περίοδο επανάληψης 50 ετών) για τα μοντέλα: a)P1990, b) PP2000, c) V2016, d) ESHM13 και, e) ESHM20.

2.4. ΕΠΙΚΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΥΠΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΓΕΝΕΣΗΣ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ιήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

Λόγω των υπολογιστικών αναγκών της παρούσας διατριβής, κρίθηκε απαραίτητη η προσθήκη χαρακτηριστικών μηχανισμών γένεσης για κάθε ζώνη. Η εργασία αυτή έγινε με βάση κυρίως το μοντέλο V2016. Σε κάποιες περιπτώσεις οι μηχανισμοί επικαιροποιήθηκαν σύμφωνα με τα αποτελέσματα πρόσφατων μελετών (π.χ. T-D8, N-F3), ενώ σε άλλες υπολογίστηκε ένας μέσος μηχανισμός γένεσης. Για τις περισσότερες ζώνες προσδιορίστηκαν περισσότεροι του ενός χαρακτηριστικοί μηχανισμοί γένεσης, σε καθέναν εκ των οποίων δόθηκε ένα βάρος, ανάλογα με τη συχνότητα εμφάνισης των μηχανισμών γένεσης ισχυρών σεισμών (M>5.0) σε κάθε ζώνη. Για τις περιοχές χαμηλής σεισμικότητας (π.χ. T-D2, T-D3), ορίστηκαν ως χαρακτηριστικοί μηχανισμοί γένεσης εκείνοι των γειτονικών ζωνών, αφού ελήφθησαν υπόψη και τα διαθέσιμα νεοτεκτονικά στοιχεία. Ο υπολογισμός των στοιχείων (παράταξη, κλίση, διάνυσμα ολίσθησης) του βοηθητικού επιπέδου του ρήγματος, στις περιπτώσεις που αυτά δεν ήταν διαθέσιμα, έγινε με κατάλληλη υπορουτίνα σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB. Η μετατροπή της παράταξης και της γωνίας κλίσης των κινηματικών αξόνων Ρ και Τ σε επίπεδα μηχανισμών γένεσης (παράταξη, γωνία κλίσης και διάνυσμα ολίσθησης) έγινε με τη χρήση των υπορουτίνων του πακέτου FPSPACK (Gasperini and Vannucci, 2003). Στο Παράρτημα Α παρατίθενται τα στοιχεία των χαρακτηριστικών μηχανισμών γένεσης, η ζώνη στην οποία αυτοί ανήκουν για τα μοντέλα V2016, P1990 και PP2000, και οι αντίστοιχες αναφορές. Τα επίπεδα που επιλέχθηκαν για τις αναλύσεις επισημαίνονται με έντονα (bold) γράμματα. μοντέλα ESHM13 Тα και ESHM20 δεν συμπεριλαμβάνονται, καθώς ήδη περιέχουν χαρακτηριστικές διαρρήξεις για κάθε ζώνη, με το αντίστοιχο βάρος.



Σχήμα 2.4.1 Τυπικοί μηχανισμοί γένεσης σε κάθε ζώνη του μοντέλου V2016 (μπλε χρώμα: κανονικοί, κόκκινο: ανάστροφοι, πράσινο: οριζόντιας μετατόπισης).

2.5. ΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΙΣΧΥΡΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ΚΙΝΗΣΗΣ

Με την παρέλευση των ετών έχουν κατά καιρούς προταθεί πολυάριθμες εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ., οι οποίες αντιστοιχούν στην επιστημονική γνώση της εποχής της δημιουργίας τους. Για παράδειγμα, οι αρχικές εμπειρικές σχέσεις είχαν απλή μορφή και συνήθως λάμβαναν υπόψη μόνο ένα είδος απόστασης μεταξύ της σεισμικής πηγής και του σημείου ενδιαφέροντος (επικεντρική ή υποκεντρική). Στη συνέχεια άρχισαν να εισάγονται νέοι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την ένταση της σεισμικής κίνησης, όπως το είδος της διάρρηξης, το είδος του εδάφους και ο κορεσμός των μεγεθών (παράγοντας M²). Επίσης, το σφάλμα, σ, σε πολλές σχέσεις θεωρήθηκε εξαρτημένο από το μέγεθος. Αργότερα, προστέθηκαν επιπλέον παράμετροι, όπως η ανελαστική απόκριση του εδάφους και η ενίσχυση που εξαρτάται από το τέμαχος (άνω ή κάτω) του ρήγματος στο οποίο εντοπίζεται το σημείο ενδιαφέροντος. Σήμερα η επιστημονική κοινότητα στρέφεται προς τη χρήση των λεγόμενων μη εργοδικών (non ergodic) εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. Πρόκειται για απλές μαθηματικές σχέσεις, στο αποτέλεσμα των οποίων προστίθενται επιπλέον παράγοντες (π.χ. επίδραση της σεισμικής πηγής, επίδραση του δρόμου διάδοσης) με τιμή η οποία ποικίλλει αναλόγως της γεωγραφικής περιοχής στην οποία ανήκει το σημείο παρατήρησης, κάτι που ισχύει και για το σφάλμα τους. Η πλήρης ανάλυση των υφιστάμενων εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. για το χρονικό διάστημα 1964-2021 γίνεται από τον Douglas (2022).

Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής επιλέχθηκαν 15 εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ.: Skarlatoudis et al. (2003) ή Sk03 (μαζί με τις διορθώσεις που παρουσιάζονται στην εργασία των Skarlatoudis et al., 2007), Danciu and Tselentis (2007) ή DT07, Cauzzi and Faccioli (2008) ή CF08, Bindi et al. (2014, 2011) ή Bi14 και Bi11 αντίστοιχα, Derras et al. (2014) ή De14, Akkar et al. (2014a) ή Ak14, Abrahamson et al. (2014) ή ASK14, Boore et al. (2014) ή BSSA14, Campbell and Bozorgnia (2014) ή CB14, Chiou and Youngs (2014) ή CY14, Cauzzi et al. (2015) ή Ca15, Chousianitis et al. (2018) ή Ch18, Kotha et al. (2020) ή Ko20 και Boore et al. (2021) ή Bo21. Επιπλέον, στους πρωταρχικούς υπολογισμούς αξιοποιήθηκε και η σχέση των Theodulidis and Papazachos (1992a, 1992b), ωστόσο αφαιρέθηκε από τους τελικούς υπολογισμούς λόγω της παλαιότητάς της. Οι σχέσεις ASK14, BSSA14, CB14 και CY14 είναι αμερικανικές και δημιουργήθηκαν από την ίδια βάση δεδομένων (Ancheta et al., 2014), στο πλαίσιο του προγράμματος NGA-West2 (Next Generation Attenuation of Ground Motions) του Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). Οι σχέσεις CF08 και Ca15 εξήχθησαν από παγκόσμιες βάσεις δεδομένων, ενώ οι Bi11, Bi14, De14 και Ak14 από ευρωπαϊκές. Οι Bi14, De14 και Ak14 αναφέρονται στην ίδια βάση δεδομένων, τη RESORCE (Akkar et al., 2014b). Τοπικού χαρακτήρα σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. αποτελούν οι Sk03, DT07, Ch18 και Bo21, καθώς δημιουργήθηκαν από ελληνικές βάσεις δεδομένων. Η σχέση Bo21

βασίστηκε στην BSSA14, ώστε να προσαρμοσθεί στα ελληνικά δεδομένα. Η Ko20 είναι η μοναδική μη-εργοδική σχέση πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. που δοκιμάστηκε.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- 88

Ο Πίνακας 2.5.1 περιέχει ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (GMPE), όπως το εύρος των μεγεθών και των αποστάσεων στα οποία αυτές μπορούν να εφαρμοστούν, το εύρος των συχνοτήτων στις οποίες αναφέρονται και τα είδη των διαρρήξεων που μπορούν να θεωρηθούν (SoF). Ως δείκτης της ποιότητας της GMPE αναγράφεται η ύπαρξη του παράγοντα κορεσμού των μεγεθών (παράγοντας M²) στη συνάρτηση ή η απουσία της, καθώς συνήθως στις παλαιότερες σχέσεις αυτός δεν περιέχεται. Επιπλέον, επισημαίνονται ορισμένα χαρακτηριστικά χρήσιμα κατά την πρακτική εφαρμογή των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ., για παράδειγμα τα είδη των αποστάσεων που περιέχονται σε καθεμία (τα οποία πρέπει να υπολογίζει ο χρήστης), ο παράγοντας εδαφικών συνθηκών (Π.Ε.Σ.) που λαμβάνεται υπόψη (π.χ. ταχύτητα Vs30), καθώς και αν είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του βάθους από το ανώτατο σημείο της διάρρηξης (Z_{TOP}) και των βαθών στα οποία η ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων (Vs) ισούται με 1.0 km/s ($Z_{1.0}$) και 2.5 km/s ($Z_{2.5}$). Αξίζει να σημειωθεί ότι στις αναφορές των σχέσεων που απαιτούν τον προσδιορισμό των βαθών Z_{1.0} και Z_{2.5} δίνονται εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού τους βάσει του Vs30, για στις περιπτώσεις στις οποίες αυτά δεν είναι γνωστά. Επίσης, στη στήλη «σ» αποσαφηνίζεται αν το σφάλμα της εκάστοτε εμπειρικής σχέσης πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. είναι σταθερά που δίνεται από τους δημιουργούς της ή αν εξαρτάται από άλλους παράγοντες (κυρίως από το μέγεθος) και υπολογίζεται για κάθε σεισμό. Στην τελευταία στήλη (Ε) αναφέρεται αν η GMPE είναι εργοδική ή όχι.

Οι πιο εξελιγμένες σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. είναι οι ASK14, BSSA14, CB14 και CY14, δεδομένου ότι λαμβάνουν υπόψη τους περισσότερους παράγοντες. Οι σχέσεις αυτές περιέχουν την έννοια της κατευθυντικότητας της διάρρηξης (CY14) και της ενίσχυσης αναλόγως του αν το σημείο ενδιαφέροντος βρίσκεται στο άνω ή στο κάτω τέμαχος του ρήγματος (ASK14, CB14, CY14). Μία επιπλέον διαφορά από τις υπόλοιπες σχέσεις αποτελεί το γεγονός ότι οι προαναφερθείσες συνυπολογίζουν την επίδραση της δομής βαθιάς λεκάνης. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η πολυπλοκότητα και η μεγαλύτερη συμπεριληπτικότητα των σχέσεων αυτών δεν συνεπάγεται απαραίτητα ότι παράγουν τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Στο Σχήμα 2.5.1 παρουσιάζεται η σύγκριση των σχέσεων ASK14, BSSA14, CB14 και CY14, για μεγέθη M=5.0-8.0 και για κανονική (N), ανάστροφη (R) και οριζόντιας μετατόπισης διάρρηξη (S). Θεωρήθηκε ρήγμα παράταξης B-N με κλίση 45° και ότι τα σημεία στα οποία υπολογίστηκε η τιμή της παραμέτρου PGA βρίσκονται κάθετα σε αυτό (A-Δ διεύθυνση) και στο άνω τέμαχος. Οι αποστάσεις *R_{JB}* των σημείων κυμαίνονται μεταξύ 0 km και 500 km. Για τον υπολογισμό των διαστάσεων της διάρρηξης αξιοποιήθηκαν οι σχέσεις των Wells and Coppersmith (1994). Ο υπολογισμός έγινε για εδαφικές συνθήκες βράχου (*Vs*₃₀=800 m/s). Τα βάθη *Z*_{1.0} και *Z*_{2.5} θεωρήθηκαν άγνωστα. Οι τιμές των GMPE είναι παρόμοιες για μεγέθη M=5.0-7.0 (Σχήμα 2.5.1a-i). Για **M**8.0 και κανονικό ρήγμα (Σχήμα 2.5.1j), η CB14 είναι εκτός ορίου μεγέθους εφαρμογής της σχέσης, επομένως η καμπύλη που αντιστοιχεί σε αυτήν δεν είναι αντιπροσωπευτική. Στα μεγέθη M=5.0, 6.0 και 8.0 σε αποστάσεις κοντινές στο ρήγμα (*R_{JB}* έως 10 km), η σχέση BSSA14 προβλέπει τις υψηλότερες τιμές PGA (Σχήμα 2.5.1a-f και Σχήμα 2.5.1j-l). Στο μικρότερο μέγεθος (**M**5.0) και για ενδιάμεσες αποστάσεις (10-100 km), οι υψηλότερες τιμές προκύπτουν από την ASK14 (Σχήμα 2.5.1a-c). Για μέγεθος **M**7.0 (Σχήμα 2.5.1g-i), οι GMPE πρακτικά ταυτίζονται. Τέλος, παρατηρείται σχεδόν πλήρης ταύτιση των τιμών στα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης για όλα τα μεγέθη.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Πίνακας 2.5.1 Βασικά χαρακτηριστικά των σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (GMPE) που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή. Στη δεύτερη και στην τρίτη στήλη αναγράφονται τα εύρη των μεγεθών (M_w) και των αποστάσεων (R) στα οποία μπορούν να εφαρμοστούν. Στην τρίτη στήλη αναγράφεται το εύρος των συχνοτήτων της φασματικής κίνησης που μπορεί να προσδιοριστεί από την καθεμιά. Στην τέταρτη στήλη («Είδ. R») δίνεται το είδος των αποστάσεων που περιλαμβάνεται σε αυτές. Η πέμπτη στήλη («Κορ. M²») αναδεικνύει την ύπαρξη (ή την απουσία) του παράγοντα κορεσμού των μεγεθών σε κάθε GMPE. Στη στήλη «SoF» αναγράφονται τα είδη των διαρρήξεων τα οποία λαμβάνονται υπόψη (U για άγνωστο τύπο διάρρηξης, N για κανονική διάρρηξη, R για ανάστροφη διάρρηξη και S για διάρρηξη οριζόντιας μετατόπισης). Η στήλη «Π.Ε.Σ.» επισημαίνει τον παράγοντα των εδαφικών συνθηκών που θεωρείται κατά την εφαρμογή της GMPE (π.χ. ταχύτητα Vs₃₀, κατηγοριοποίηση κλάσεων εδάφους κατά EC8 ή NEHPR, θεώρηση της 0.1 m/m κλίσης αναφοράς -slope). Η στήλη «σ (στ.)» δείχνει αν το σφάλμα της εμπειρικής σχέσης πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. αποτελεί κάποια σταθερά τιμή ή όχι. Στη δεύτερη περίπτωση αποτελεί συνάρτηση άλλων παραγόντων (συνήθως του μεγέθους) και υπολογίζεται για κάθε σεισμό ξεχωριστά. Οι στήλες Z_{1.0}, Z_{2.5} δείχνουν αν η GMPE απαιτεί τη γνώση των βαθών κάτω από το σημείο ενδιαφέροντος στα οποία ισχύει Vs = 1 km/s και Vs = 2.5 km/s, αντίστοιχα. Η στήλη Ζ_{τοΡ} αναφέρεται στην ανάγκη προσδιορισμού του βάθους του ανώτατου σημείου της διάρρηξης ή όχι. Τέλος, στη στήλη «Ε» διευκρινίζεται αν η GMPE είναι εργοδική ή μη-εργοδική.

GMPE	Εύρος M _w	Εύρος R (km)	T (s)	Είδ. R	Кор. <i>М</i> ²	SoF	Π.Ε.Σ.	σ (στ.)	Z _{1.0} (km)	Z _{2.5} (km)	Z _{TOP} (km)	E
ASK14	3.0-8.5	0-300	0.01-10	R _{rup} R _{JB} R _x R _{y0}	~	N,R, S	Vs ₃₀ (180-1000 m/s)	×	~	×	~	~
BSSA14	3.0-8.5	0-400	0.01-10	R _{JB}	\checkmark	U,N, R,S	Vs ₃₀ (150-1500 m/s)	x	\checkmark	x	x	~
CB14	3.3-7.5 (N) 3.3-8.0 (R) 3.3-8.5 (S)	0-300	0.01-10	R _{rup} R _x R _{y0}	×	N,R, S	Vs ₃₀ (150-1500 m/s)	×	×	\checkmark	~	~
CY14	3.5-8.0 (N,R) 3.5-8.5 (S)	0-300	0.01-10	R _{rup} R _{JB} R _x	\checkmark	N,R, S	Vs ₃₀ (180-1500 m/s)	x	\checkmark	x	\checkmark	~
CF08	5.0-7.2	15-150	0.05-20	R _{hypo}	x	U,N, R,S	Vs ₃₀ /EC8 class (A-D)	\checkmark	x	x	x	\checkmark
Ca15	4.5-7.9	0-150	0.01-10	R _{rup}	\checkmark	U,N, R,S	Vs ₃₀ /EC8 class (A-D)	\checkmark	×	×	x	\checkmark

-	pipni	loadi	cŋ										
Pe.	С	15	TOT	- 11									
	Bi11	4.0-6.9	0-200	0.04-2.0	R _{JB}	\checkmark	U,N, R,S	EC8 class (A-E)	\checkmark	x	x	x	~
N.S.	Bi14 A.	4.0-7.6	1-300	0.02-3.0	R _{JB} / R _{hypo}	\checkmark	U,N, R,S	Vs ₃₀ /EC8 class (A-D)	\checkmark	x	x	x	~
	De14	3.6-7.6	0-550	0.01-4.0	R _{JB}	x	N,R, S	Vs ₃₀	\checkmark	x	x	x	~
	Ak14	4.0-7.6	1-200	0.01-4.0	R _{JB} / R _{hypo} /R _{epi}	\checkmark	N,R, S	Vs ₃₀	\checkmark	x	×	x	~
	Ко20	3.0-7.4	1-545	0.01-8.0	R _{JB}	\checkmark	-	- / Vs ₃₀ (90-3000 m/s) / slope	\checkmark	x	x	x	×
	Sk03	4.5-7.0	1-160	-	R _{epi}	x	N,R, S	NEHRP class (B-D)	\checkmark	x	x	x	~
	DT07	4.5-6.9	3-136	0.1-4.0	R _{epi}	x	N,R, S	NEHRP class (B-D)	\checkmark	×	x	x	\checkmark
	Ch18	4.0-6.8	0-200	-	R _{epi}	×	U,N, R,S	NEHRP class (B-D)	\checkmark	x	×	×	\checkmark
	Bo21	4.0-8.0	1-300	.01-10.0	R _{JB}	\checkmark	U,N, R,S	Vs ₃₀ (150-1200 m/s)	x	x	x	x	~

Ψηφιακή συλλογή

Το Σχήμα 2.5.2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του ίδιου υπολογισμού, με τη διαφορά ότι τα βάθη $Z_{1.0}$ και $Z_{2.5}$ θεωρούνται γνωστά (10 km και 100 m, αντίστοιχα). Σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρείται ότι για μεγέθη M=6.0-8.0 (Σχήμα 2.5.2d-l) η σχέση CB14 (η οποία χρησιμοποιεί το βάθος Z_{2.5}) παράγει σημαντικά υψηλότερες τιμές σεισμικής επικινδυνότητας, σε όλο το εύρος των εξεταζόμενων αποστάσεων. Εξαιρείται το Σχήμα 2.5.2j (M8.0, N), καθώς η CB14 δεν εφαρμόζεται σε αυτό το μέγεθος στα κανονικά ρήγματα. Αντιθέτως, οι τιμές της ASK14 (η οποία λαμβάνει υπόψη το βάθος Z1.0) σημειώνουν πτωτική τάση σε όλα τα μεγέθη. Οι διαφορές αυτές πιθανότατα οφείλονται στη διαφορετική βαθμονόμηση των βαθών Z_{1.0} και Z_{2.5} που έγινε σε κάθε σχέση. Οι τιμές των BSSA14 και CY14 δεν επηρεάζονται σημαντικά από αυτήν την αλλαγή. Επομένως, οι μεταβολές αυτές -αναλόγως του αν τα βάθη αυτά θεωρούνται γνωστά ή όχι- πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχηματισμό του λογικού δέντρου των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ., επειδή επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας. Επιπλέον, η συμφωνία των τεσσάρων εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ., όταν οι τιμές αυτές θεωρούνται άγνωστες, δείχνει ότι ενδεχομένως ο ορισμός συγκεκριμένων τιμών για τα βάθη αυτά (για τις ASK14 και CB14) να προκαλεί αστάθειες στα αποτελέσματα.



Σχήμα 2.5.1 Σύγκριση των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. ASK14 (πράσινη καμπύλη), BSSA14 (μπλε καμπύλη), CB14 (κόκκινη καμπύλη) και CY14 (κυανή καμπύλη) για μέγεθος M=5.0 (a, b, c), 6.0 (d, e, f), 7.0 (g, h, i) και 8.0 (j, k, l) και για διάρρηξη κανονική [N] (a, d, g, j), ανάστροφη [R] (b, e, h, k) και οριζόντιας μετατόπισης [S] (c, f, I, I). Οι αποστάσεις (R_{JB}) κυμαίνονται μεταξύ 0 km και 500 km. Τα κανονικά και τα ανάστροφα ρήγματα έχουν κλίση 45°, ενώ τα οριζόντιας μετατόπισης είναι κατακόρυφα. Τα βάθη Z_{1.0} και Z_{2.5} θεωρούνται άγνωστα.



Σχήμα 2.5.2 Σύγκριση των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. ASK14 (πράσινη καμπύλη), BSSA14 (μπλε καμπύλη), CB14 (κόκκινη καμπύλη) και CY14 (κυανή καμπύλη) για μέγεθος M=5.0 (a, b, c), 6.0 (d, e, f), 7.0 (g, h, i) και 8.0 (j, k, l) και για διάρρηξη κανονική [N] (a, d, g, j), ανάστροφη [R] (b, e, h, k) και οριζόντιας μετατόπισης [S] (c, f, l, l). Οι αποστάσεις (R_{JB}) κυμαίνονται μεταξύ 0 km και 500 km. Τα κανονικά και τα ανάστροφα ρήγματα έχουν γωνία κλίσης 45°, ενώ τα οριζόντιας μετατόπισης είναι κατακόρυφα. Τα βάθη Z_{1.0} και Z_{2.5} θεωρούνται γνωστά και ίσα με 10 m και 100 m, αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 2.5.3 παρουσιάζονται οι τιμές PGA των τεσσάρων GMPE σε συνάρτηση με την απόσταση *R_x*, η οποία είναι ενδεικτική του τεμάχους του ρήγματος στο οποίο βρίσκεται το σημείο ενδιαφέροντος. Οι αρνητικές *R_x* αποστάσεις σηματοδοτούν το κάτω τέμαχος (foot wall), ενώ στο άνω τέμαχος το πρόσημο των αποστάσεων είναι θετικό. Ο υπολογισμός έγινε για σεισμό μεγέθους **M**6.5 για τα τρία είδη ρηγμάτων. Οι τιμές των *Z*_{1.0} και *Z*_{2.5} θεωρήθηκαν άγνωστες (Σχήμα 2.5.3a-c) και γνωστές (Σχήμα 2.5.3d-f). Όπως και στο Σχήμα 2.5.2,

παρατηρείται πολύ σημαντική αύξηση των τιμών της CB14 και μείωση αυτών της ASK14 μετά τον προσδιορισμό τιμών στα βάθη $Z_{1.0}$ και $Z_{2.5}$. Επιπλέον, φαίνεται ότι η CB14 επηρεάζεται και από τον παράγοντα τέμαχος (Hanging Wall, στο εξής *HW*). Στο Σχήμα 2.5.3a και στο Σχήμα 2.5.3b οι τιμές της είναι σημαντικά υψηλότερες (σε σχέση με τις υπόλοιπες) επάνω από το ρήγμα, κάτι που δεν παρατηρείται στην περίπτωση του ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης (Σχήμα 2.5.3c). Ο παράγοντας *HW* φαίνεται ότι επηρεάζει τις τιμές και στις περιπτώσεις στις οποίες τα $Z_{1.0}$ και $Z_{2.5}$ είναι γνωστά (Σχήμα 2.5.3d-e). Η επίδραση του *HW* υπονοείται και στην εργασία των Gregor et al. (2014), το θέμα της οποίας είναι η σύγκριση των σχέσεων NGA-West2. Παραδόξως, τα Σχήματα της συγκεκριμένης εργασίας (πλην ενός) αναφέρονται μόνο σε ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης, με αποτέλεσμα να δίνεται η λανθασμένη εντύπωση ότι η CB14 παράγει τιμές παρόμοιες με αυτές των υπόλοιπων σχέσεων. Στο μοναδικό σχήμα αυτής της εργασίας αυτής το οποίο αφορά διαφορετικό τύπο ρήγματος είναι φανερό ότι η CB14 παράγει σημαντικά υψηλότερες τιμές PGA.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 2.5.3 Σύγκριση των σχέσεων ASK14 (πράσινη καμπύλη), BSSA14 (μπλε καμπύλη), CB14 (κόκκινη καμπύλη) και CY14 (κυανή καμπύλη) σε κοντινές στο ρήγμα αποστάσεις R_x, προκειμένου να αναδειχθεί η επίδραση του τεμάχους του ρήγματος, για μέγεθος **M**6.5 και κανονικό (a, d), ανάστροφο (b, e) και οριζόντιας μετατόπισης (c, f) ρήγμα. Οι τιμές των βαθών Z_{1.0} και Z_{2.5} θεωρούνται είτε άγνωστες (a, b, c) είτε γνωστές (d, e, f).

Στο Σχήμα 2.5.4 δίνεται η σύγκριση των σχέσεων Ca15, Bi14, De14 και Ak14 για μεγέθη M=5.0-7.0 και για κάθε τύπο ρήγματος (κανονικό-Ν, ανάστροφο-R, οριζόντιας μετατόπισης-S). Επειδή καμία σχέση δεν εφαρμόζεται για μέγεθος **M**8.0, αυτό παραλείφθηκε. Με διακεκομμένη γραμμή σημειώνονται οι τιμές PGA που
αντιστοιχούν σε αποστάσεις εκτός των ορίων απόστασης στα οποία εφαρμόζεται κάθε GMPE. Οι τιμές PGA που υπολογίζονται βάσει αυτών των σχέσεων είναι παρόμοιες. Εξαίρεση αποτελεί η De14, η οποία παρουσιάζει πιο έντονη απόσβεση με την απόσταση συγκριτικά με τις υπόλοιπες (Σχήμα 2.5.4a-i). Επιπλέον, για μεγέθη M=5.0-6.0 και μικρές αποστάσεις (έως 10 km) παράγει τις υψηλότερες τιμές (Σχήμα 2.5.4a-g), ενώ οι χαμηλότερες τιμές στο ίδιο εύρος μεγεθών και αποστάσεων προκύπτουν από την Ca15. Για μεγαλύτερες αυτή δίνει τις υψηλότερες τιμές. Η εικόνα της Ca15 (χαμηλότερος ρυθμός απόσβεσης) ενδεχομένως οφείλεται στο γεγονός ότι είναι η μοναδική από τις τέσσερις εξεταζόμενες σχέσεις στην οποία γίνεται χρήση της απόστασης *R*_{rup}, αντί της *R*_{JB} που θεωρείται στις υπόλοιπες.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 2.5.4 Τιμές PGA (g) που υπολογίζονται από τις Ca15 (μπλε καμπύλη), Bi14 (καφέ καμπύλη), De14 (ροζ καμπύλη) και Ak14 (πράσινη καμπύλη) για μεγέθη M = 5.0 (a, b, c), 6.0 (d, e, f) και 7.0 (g, h, i) και για κανονικό (N) ρήγμα (a, d, g), ανάστροφο (R) ρήγμα (b, e, h) και οριζόντιας μετατόπισης (S) ρήγμα (c, f, i) σε συνάρτηση με την απόσταση R_{JB}.. Με διακεκομμένες γραμμές παριστάνονται οι τιμές PGA (g) που αντιστοιχούν σε αποστάσεις εκτός των ορίων εφαρμοσιμότητας κάθε GMPE.

Οι τιμές PGA που υπολογίζονται από τις σχέσεις CF08, Bi11 και Ko20 σε συνάρτηση με την απόσταση, *R_{JB}*, φαίνονται στο Σχήμα 2.5.5, για μεγέθη M=5.0-7.0 και για κάθε τύπο ρήγματος. Με εξαίρεση τις καμπύλες για μέγεθος **M**7.0 σε

ανάστροφο ρήγμα (Σχήμα 2.5.5h), από την Κο20 προκύπτουν οι υψηλότερες τιμές PGA. Επιπλέον, η συγκεκριμένη σχέση παρουσιάζει πιο έντονη απόσβεση με την απόσταση, ωστόσο πρέπει να τονιστεί ότι οι CF08 και Bi11 δεν προτείνονται για υπολογισμούς που αφορούν αποστάσεις 300-500 km (για αυτόν το λόγο οι καμπύλες σε αυτές τις αποστάσεις είναι διακεκομμένες). Οι Ko20 και Bi11 λαμβάνουν υπόψη την απόσταση *R_{JB}*, ενώ η CF08 την υποκεντρική (*R_{hypo}*). Οι CF08 και Bi11 είναι προγενέστερες των Ca15 και Bi14, αντίστοιχα, και παράγουν μικρότερες τιμές PGA από αυτές. Η Ko20 αποτελεί μια μη-εργοδική σχέση με απλή μαθηματική μορφή, καθώς λαμβάνει υπόψη το μέγεθος, την απόσταση *R_{JB}* και το βάθος. Στη συνέχεια, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσθέσει επιπλέον παράγοντες οι οποίοι σχετίζονται με την περιοχή στην οποία βρίσκεται το σημείο ενδιαφέροντος (παράγοντας σημείου, παράγοντας γεωγραφικής περιοχής, παράγοντας σεισμού κ.λπ.).



Σχήμα 2.5.5 Τιμές PGA (g) που προκύπτουν από τις σχέσεις CF08 (πράσινη καμπύλη), Bi11 (κόκκινη καμπύλη) και Ko20 (μπλε καμπύλη) σε συνάρτηση με την απόσταση R_{JB}. Οι υπολογισμοί έγιναν για μεγέθη M=5.0 (a, b, c), 6.0 (d, e, f) και 7.0 (g, h, i), για κανονικό (a, d, g), ανάστροφο (b, e, h) και οριζόντιας μετατόπισης (c, f, i) ρήγμα. Με διακεκομμένες γραμμές παριστάνονται οι τιμές PGA που αντιστοιχούν σε αποστάσεις εκτός των ορίων εφαρμοσιμότητας κάθε GMPE.

Στο Σχήμα 2.5.6 παρουσιάζεται η σύγκριση των σχέσεων Sk03, DT07, Ch18 και Bo21, δηλαδή οι τιμές PGA που προκύπτουν από την εφαρμογή τους σε συνάρτηση με την απόσταση *R_{IB}*. Οι υπολογισμοί έγιναν για μεγέθη **M**5.0 έως **M**7.0 και για όλους τους τύπους ρηγμάτων. Σε όλα τα διαγράμματα οι σχέσεις Sk03 και DT07 πρακτικά ταυτίζονται, ενδεχομένως επειδή η μαθηματική τους μορφή είναι σχεδόν ίδια. Η σημαντικότερη διαφορά τους έγκειται στη δυνατότητα της DT07 να υπολογίζει ένα εύρος περιόδων PSA, ενώ η Sk03 αναφέρεται μόνο στα PGA και PGV. Σε πολλές περιπτώσεις (Σχήμα 2.5.6c, d, f, g, i) παρατηρείται ότι η σχέση Ch18 παράγει υψηλότερες τιμές PGA σε μεσαίες αποστάσεις (10-100 km). Επιπλέον, η Bo21 τείνει να υπολογίζει χαμηλότερες τιμές στις ίδιες αποστάσεις, όταν το ρήγμα είναι κανονικό ή οριζόντιας μετατόπισης (Σχήμα 2.5.6a, c, f, g, i). Η μεγαλύτερη ταύτιση των GMPE παρατηρείται στα ανάστροφα ρήγματα για όλα τα μεγέθη (Σχήμα 2.5.6b, e, h).



Σχήμα 2.5.6 Τιμές PGA (g) σε συνάρτηση με την απόσταση R_{IB}, όπως προκύπτουν από τις σχέσεις SkO3 (κόκκινη καμπύλη), DTO7 (κυανή καμπύλη), Ch18 (μπλε καμπύλη) και Bo21 (πράσινη καμπύλη). Με διακεκομμένες γραμμές παριστάνονται οι τιμές που αντιστοιχούν σε αποστάσεις εκτός των ορίων εφαρμοσιμότητας της GMPE. Τα σχήματα έγιναν για μεγέθη **M**5.0 (a, b, c), **M** 6.0 (d, e, f) και **M**7.0 (g, h, i) και για κανονικό (a, d, g), ανάστροφο (b, e, h) και οριζόντιας μετατόπισης (c, f, i) ρήγμα.

Για συγκριτικούς σκοπούς, στο Σχήμα 2.5.7 παρουσιάζονται οι τιμές PGA που υπολογίζονται από τις GMPE που εξετάστηκαν σε συνάρτηση με την απόσταση R_{JB}, για έναν «τυπικό» καταστροφικό σεισμό του Ελληνικού χώρου, μεγέθους M6.5, και για ρήγμα κανονικό (a), ανάστροφο (b) και οριζόντιας μετατόπισης (c). Παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία των τιμών των τριών σχημάτων σε αποστάσεις 10-30 km, οι οποίες αποτελούν τις συνηθέστερες αποστάσεις όπου εμφανίζονται οι καταστροφικότερες επιδράσεις των σεισμών. Εξαίρεση αποτελεί η Ch18, η οποία προβλέπει αρκετά υψηλότερες τιμές για το συγκεκριμένο εύρος αποστάσεων, ιδίως στις περιπτώσεις στις οποίες το ρήγμα είναι κανονικό και οριζόντιας μετατόπισης (Σχήμα 2.5.7a και Σχήμα 2.5.7c, αντίστοιχα). Σχετική ασυμφωνία των τιμών παρατηρείται στις μικρές αποστάσεις (έως 10 km) και στις πολύ μεγαλύτερες (200-500 km). Όσον αφορά τις τελευταίες, η ασυμφωνία κρίνεται φυσιολογική, καθώς πολλές εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. δεν εφαρμόζονται σε αυτές (διακεκομμένες γραμμές). Επίσης, τα επίπεδα των τιμών PGA σε αυτές είναι πολύ χαμηλά λόγω της απόσβεσης των σεισμικών κυμάτων, και δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Από την άλλη πλευρά, η ασυμφωνία στις μικρές αποστάσεις είναι πολύ σημαντική, δεδομένου ότι αυτές πλήττονται περισσότερο από τους σεισμούς. Για κανονικά ρήγματα (Σχήμα 2.5.7a), οι τιμές απέχουν έως 0.4 g, για ανάστροφα (Σχήμα 2.5.7b) έως 0.3 g, και για οριζόντιας μετατόπισης (Σχήμα 2.5.7c) παρατηρείται η μεγαλύτερη απόκλιση, έως 0.6 g. Αυτή εξηγείται εν μέρει από το γεγονός ότι πολλές GMPE δεν εφαρμόζονται σε αυτές τις αποστάσεις. Επιπλέον, πιθανότατα οφείλεται και στο γεγονός ότι οι GMPE δημιουργήθηκαν από ετερόκλητες βάσεις δεδομένων, καθώς και στις επιδράσεις κοντινού πεδίου (near field effects). Εκτός από την περίπτωση του ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης, οι υψηλότερες τιμές αυτών των αποστάσεων δίνονται από την Κο20. Άξια αναφοράς είναι η υποεκτίμηση των τιμών σε μεγάλο εύρος αποστάσεων (30-200 km) από την De14 σε όλους τους τύπους διαρρήξεων. Τέλος, οι πιο έντονες αποκλίσεις των καμπυλών εμφανίζονται στα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης.



Σχήμα 2.5.7 Τιμές PGA (g) σε συνάρτηση με την απόσταση R_{JB} (km) για **M**6.5 και: a) κανονική, b) ανάστροφη και, c) οριζόντιας μετατόπισης διάρρηξη, όπως υπολογίζεται από το σύνολο των GMPE που χρησιμοποιήθηκαν. Με διακεκομμένες γραμμές παριστάνονται οι τιμές που αντιστοιχούν σε αποστάσεις εκτός των ορίων εφαρμοσιμότητας κάθε GMPE.

Στο Σχήμα 2.5.8 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του PGA (τιμή με πιθανότητα υπέρβασης 10.0% σε περίοδο επανάληψης 50 ετών), η οποία υπολογίζεται με χρήση των GMPE και του μοντέλου V2016. Θεωρήθηκαν εδαφικές συνθήκες βράχου (Vs₃₀=800 m/s) και στις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. εφαρμόστηκε σφάλμα δύο τυπικών αποκλίσεων (2σ). Η Ko20 (Σχήμα 2.5.8b) παρουσιάζει σημαντικά υψηλότερες τιμές σεισμικής επικινδυνότητας από όλες τις υπόλοιπες σχέσεις, με τιμές που ξεπερνούν το 1.0 g στην Κεφαλονιά και στον Κορινθιακό Κόλπο. Αυτή η εικόνα συνάδει με το γεγονός ότι η συγκεκριμένη σχέση υπολογίζει τις υψηλότερες τιμές σε κοντινές στη διάρρηξη αποστάσεις (1-10 km). Μία ακόμη σχέση από την οποία προκύπτουν υψηλότερα επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας συνιστά η De14 (Σχήμα 2.5.8i), πιθανώς διότι υπολογίζει υψηλότερες τιμές στα κανονικά ρήγματα (Σχήμα 2.5.4a-c), τα οποία είναι τα συχνότερα εμφανιζόμενα. Η σχέση Ch18 (Σχήμα 2.5.8m) παράγει παρόμοια αποτελέσματα με αυτήν για ολόκληρη την περιοχή μελέτης (εξαιρουμένης της Τουρκίας). Ακόμη, παρατηρείται ότι από τις παλαιότερες σχέσεις CF08 (Σχήμα 2.5.8j), Bi11 (Σχήμα 2.5.8k), DT07 (Σχήμα 2.5.8n) και Sk03 (Σχήμα 2.5.8o) παράγονται χαμηλότερες τιμές σεισμικής επικινδυνότητας για το σύνολο της εξεταζόμενης περιοχής. Οι μέγιστες τιμές τους κυμαίνονται μεταξύ των 0.6 g και 0.7 g στην περιοχή της Κεφαλονιάς. Οι μεταγενέστερες σχέσεις Ca15 (Σχήμα 2.5.8g), Bi14 (Σχήμα 2.5.8h) και Ak14 (Σχήμα 2.5.8l) προβλέπουν υψηλότερες τιμές PGA και με παρόμοια χωρική μεταβολή. Οι σχέσεις ASK14 (Σχήμα 2.5.8e), BSSA14 (Σχήμα 2.5.8f), CB14 (Σχήμα 2.5.8d) και CY14 (Σχήμα 2.5.8c) παρουσιάζουν παρόμοια μεταξύ τους επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας (δεδομένου ότι πρόκειται για υπολογισμούς σε συνθήκες βράχου και χωρίς τη συμπερίληψη των επιδράσεων βαθιάς λεκάνης), με τη CY14 να αποδίδει ελαφρώς χαμηλότερες τιμές στις περιοχές της Κεφαλονιάς και της Θάλασσας του Μαρμαρά. Τέλος, παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν από τη σχέση Bo21 (Σχήμα 2.5.8a).



Σχήμα 2.5.8 Χωρική κατανομή της τιμής της παραμέτρου PGA σε g (τιμή με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης για περίοδο επανάληψης 50 ετών) με χρήση των GMPE: a) Bo21, b) Ko20, c) CY14, d) CB14, e) ASK14, f) BSSA14, g) Ca15, h) Bi14, i) De14, j) CF08, k) Bi11, l) Ak14, m) Ch18, n) DT07 και, o) Sk03. Για την παραγωγή αυτών των χαρτών έγινε χρήση του μοντέλου σεισμικών πηγών V2016.

2.6. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΕΛΙΚΟΥ ΛΟΓΙΚΟΥ ΔΕΝΤΡΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΠΕΣΕ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΥΡΥΤΕΡΟ ΧΩΡΟ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στην ενότητα 2.5 παρουσιάστηκαν οι 15 εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή με διαφορετικούς συνδυασμούς (λογικά δέντρα) για κάθε σκοπό (υπολογισμός σεισμικής επικινδυνότητας για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου και Ανάλυση Ευαισθησίας - Κεφάλαιο 3). Ο σχηματισμός των λογικών δέντρων για την Ανάλυση Ευαισθησίας παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3.

υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας Για τον του Αιγαίου χρησιμοποιήθηκαν δύο λογικά δέντρα, ένα για τα μοντέλα σεισμικών πηγών και ένα για τις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (Σχήμα 2.6.1). Τα μοντέλα σεισμικών πηγών (Σχήμα 2.6.1a) χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες: τα ελληνικά (P1990, PP2000, V2016) και τα ευρωπαϊκά (ESHM13, ESHM20). Μεγαλύτερο βάρος δόθηκε στα πρώτα (0.65) λόγω των αδυναμιών των ευρωπαϊκών μοντέλων, όπως αυτές αναλύθηκαν στις ενότητες 2.1 και 2.2. Επιπλέον, το μεγαλύτερο βάρος από όλα τα μοντέλα δόθηκε στο V2016, διότι αποτελεί το πιο πρόσφατα δημοσιευμένο ελληνικό μοντέλο επιφανειακών σεισμικών πηγών και βάσει των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στην ενότητα 2.1 θεωρείται το πιο αξιόπιστο. Στα παλαιότερα μοντέλα των δύο κατηγοριών (P1990 για τα ελληνικά και ESHM13 για τα ευρωπαϊκά) δόθηκε το μικρότερο βάρος (από 0.10). Το βάρος του ESHM13 επιμερίστηκε σε τέσσερα διαφορετικά σενάρια (με τα βάρη που προτείνονται από τους Woessner et al., 2015), στα οποία μεταβάλλεται το *M_{max}* κάθε επιφανειακής σεισμικής πηγής. Στο μοντέλο ΡΡ2000 δόθηκε βάρος 0.20 (διπλάσιο από αυτό του Ρ1990), διότι -μολονότι από αυτό προκύπτει συντηρητικότερος υπολογισμός της σεισμικής επικινδυνότηταςθεωρείται πιο πλήρες από το Ρ1990, εφόσον περιέχει περισσότερες πηγές και καλύπτει το σύνολο της περιοχής μελέτης. Τέλος, στο μοντέλο ESHM20 δόθηκε βάρος ίσο με 0.25 (υψηλότερο από τα βάρη των ESHM13, P1990 και PP2000), επειδή είναι πιο πρόσφατο. Όπως και στην περίπτωση του ESHM13, το βάρος του επιμερίστηκε στα εννέα σενάρια διαφορετικών συνδυασμών a, b και Mmax, όπως προτείνεται από τους Danciu et al. (2021).

Τα βάρη στο λογικό δέντρο των GMPE (Σχήμα 2.6.1b) ορίστηκαν σύμφωνα με την εργασία των Sotiriadis and Margaris (2023), την πρώτη μελέτη που προτείνει λογικό δέντρο εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. για τον Ελληνικό χώρο βάσει ποσοτικών κριτηρίων, έναντι των ποιοτικών που αξιοποιούνται συνήθως. Πιο συγκεκριμένα, έγινε ανάλυση υπολοίπων (residual analysis) με τρεις διαφορετικές μεθόδους: της λογαριθμικής πιθανοφάνειας (log-likelihood approach, LLH), της πολυμεταβλητής LLH (multivariate LLH) και της *EDR* (Euklidean Distance-based Raking). Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, επιλέχθηκε το λογικό δέντρο με όλες τις σχέσεις που εξετάστηκαν και βαθμονομήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία (Bo21, Ko20, CY14, CB14, ASK14, De14, BSSA14, Ca15, Ak14, Bi14 και DT07), αντί αυτού των τριών σχέσεων που αποδείχθηκε ότι «ταιριάζουν» καλύτερα στα ελληνικά δεδομένα (Bo21, Ko20 και CY14), καθώς με μεγαλύτερο αριθμό GMPE λαμβάνεται υπόψη πιο πλήρως η σχετική επιστημική αβεβαιότητα.



Σχήμα 2.6.1 Τα λογικά δέντρα α) των μοντέλων σεισμικών πηγών και b) των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (GMPE) που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς της σεισμικής επικινδυνότητας του ευρύτερου χώρου του Αιγαίου.

2.7. ΝΕΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΥΡΥΤΕΡΟ ΧΩΡΟ ΤΟΥ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ΑΙΓΑΙΟΥ

Ο επικαιροποιημένος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7.1, στο οποίο φαίνεται η χωρική κατανομή των τιμών PGA (g) με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης, για περίοδο επανάληψης 50 ετών. Κατά την ΠΕΣΕ χρησιμοποιήθηκαν τα λογικά δέντρα της ενότητας 2.6. Οι υπολογισμοί έγιναν για έναν κάνναβο σημείων με βήμα 0.2° κατά γεωγραφικό μήκος και πλάτος. Θεωρήθηκαν εδαφικές συνθήκες βράχου (Vs30=800 m/s). Η επίδραση βαθιάς λεκάνης (βάθη Z_{1.0} και Z_{2.5}) δεν συμπεριλήφθηκε στους υπολογισμούς (άγνωστες τιμές $Z_{1.0}$ και $Z_{2.5}$), αφενός διότι αυτή δεν υπολογίζεται από όλες τις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. του λογικού δέντρου στο Σχήμα 2.6.1b, αφετέρου επειδή οι σχέσεις που τη λαμβάνουν υπόψη παρουσιάζουν αδυναμίες σχετικές με αυτήν (Σχήμα 2.5.3). Στις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. θεωρήθηκε σφάλμα δύο τυπικών αποκλίσεων (±2σ). Η ΠΕΣΕ διενεργήθηκε με μέθοδο προσομοίωσης τύπου Monte Carlo. Πιο συγκεκριμένα, τη χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 200 κατάλογοι διάρκειας 1000 ετών, με βάση το λογικό δέντρο στο Σχήμα 2.6.1a (20 κατάλογοι από το P1990, 40 κατάλογοι από το PP2000 κ.ο.κ). Για κάθε σημείο προέκυψαν 4000 δυσμενέστερα σενάρια - μέγιστες τιμές PGA (δεδομένου ότι από κάθε κατάλογο εξάγονται 20 μέγιστες τιμές για περίοδο επανάληψης 50 ετών), και επιλέχθηκε αυτή που έχει 10.0% πιθανότητα υπέρβασης. Ο τρόπος λειτουργίας του λογισμικού που αναπτύχθηκε για τις υπολογιστικές ανάγκες της παρούσας διατριβής εξηγείται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 4.

Οι τιμές PGA κυμαίνονται από σχεδόν 0.0 g έως 0.9 g. Η χωρική κατανομή της σεισμικής επικινδυνότητας συμφωνεί σε μεγάλο βαθμό με τα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου. Πιο συγκεκριμένα, η Κεφαλονιά και η Λευκάδα χαρακτηρίζονται από τα υψηλότερα επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας (0.6-0.9 g), καθώς επηρεάζονται άμεσα από το δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης της Κεφαλονιάς. Υψηλό επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας (0.7-0.8 g) παρουσιάζει επίσης ο Κορινθιακός Κόλπος, κυρίως στο δυτικό τμήμα του (Αίγιο, Ναύπακτος κ.λπ.). Από μέτρια επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας (0.4-0.6 g) χαρακτηρίζονται ως επί το πλείστον οι περιοχές που περικλείουν ανάστροφα ρήγματα (ΒΑ παράλια της Αλβανίας και της Ελλάδας και ζώνη κατάδυσης) και ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης (κλάδοι του ρήγματος της Τάφρου του Β. Αιγαίου) μεγάλου μήκους. Επιπλέον, παρόμοιες τιμές PGA παρουσιάζουν η Λέσβος, η Χίος και οι Σποράδες. Οι ηπειρωτικές περιοχές που χαρακτηρίζονται από μέτριας έντασης σεισμική επικινδυνότητα εντοπίζονται στη Στερεά Ελλάδα και στη ΝΑ Θεσσαλία. Τέλος, όπως αναμενόταν από το σύνολο των μοντέλων επιφανειακών σεισμικών πηγών που χρησιμοποιήθηκαν, τα χαμηλότερα επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας (0.1-0.3 g) της περιοχής μελέτης βρίσκονται στο Κεντρικό Αιγαίο, στη Θράκη και στη Β. Μακεδονία.



Σχήμα 2.7.1 Νέος, επικαιροποιημένος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας επιφανειακής σεισμικότητας για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου, με χρήση των λογικών δέντρων μοντέλων σεισμικών πηγών και GMPE που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6.1. Πρόκειται για τη χωρική μεταβολή των τιμών της παραμέτρου PGA (g) με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης σε περίοδο επανάληψης 50 ετών. Ο υπολογισμός έγινε για εδαφικές συνθήκες σκληρού βράχου (Vs₃₀=800 m/s).

2.7.1. Σύγκριση του νέου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας με τον ΝΕΑΚ2003

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση του επικαιροποιημένου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας με τον ΝΕΑΚ2003. Στο Σχήμα 2.7.2 παρουσιάζεται ο επικαιροποιημένος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας με τις ζώνες του ΝΕΑΚ2003 (Σχήμα 2.7.2a), δηλαδή η χωρική κατανομή των τιμών της παραμέτρου PGA (πιθανότητα υπέρβασης 10.0% για περίοδο επανάληψης 50 ετών) που προκύπτουν από τα τελικά λογικά δέντρα (Σχήμα 2.6.1), ο χάρτης του ΝΕΑΚ2003 (Σχήμα 2.7.2b), ο χάρτης με τον λόγο των τιμών PGA του επικαιροποιημένου χάρτη προς αυτές του ΝΕΑΚ2003 (Σχήμα 2.7.2c), και το ιστόγραμμά τους (Σχήμα 2.7.2d). Παρατηρείται συστηματική υποεκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας από τον ΝΕΑΚ2003 στο σύνολο, σχεδόν, της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου. Εξαιρείται η περιοχή χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας οι επικαιροποιημένες τιμές PGA είναι 0.5-1 φορά υψηλότερες από αυτές του ΝΕΑΚ2003. Σε όλες τις υπόλοιπες περιοχές οι επικαιροποιημένες τιμές είναι περίπου 1.5-2.5 φορές

υψηλότερες από τις αντίστοιχες του ΝΕΑΚ2003. Τέλος, οι περιοχές με την υψηλότερη σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής μελέτης (Κεφαλονιά και Δ. Κορινθιακός Κόλπος) παρουσιάζουν έως και 3.5 φορές υψηλότερη σεισμική επικινδυνότητα αυτά αναδεικνύονται στο αντίστοιχο ιστόγραμμα, το οποίο δείχνει ότι τα περισσότερα σημεία του Ελληνικού χώρου έχουν σεισμική επικινδυνότητα 1.5-2.5 φορές υψηλότερη από αυτήν που προβλέπει ο ΝΕΑΚ2003. Αυτή η μεγάλη απόκλιση τονίζει την αναγκαιότητα επικαιροποίησής του, διότι προκαλεί σοβαρή υποεκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας στον τρέχοντα αντισεισμικό σχεδιασμό, δεδομένου ότι η μέση τιμή της κατανομής του ιστογράμματος είναι ίση με 1.76±0.40.



Σχήμα 2.7.2 α) Επικαιροποιημένος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας που απεικονίζει τη χωρική κατανομή του PGA (τιμές με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης για περίοδο επανάληψης 50 ετών) για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου (Σχήμα 2.7.1). Με μαύρο περίγραμμα οριοθετούνται οι τρεις ζώνες του ΝΕΑΚ2003, b) Οι ζώνες του ΝΕΑΚ2003 με την αντίστοιχη τιμή σεισμικής επικινδυνότητας, c) Χάρτης με την αναλογία των τιμών PGA του επικαιροποιημένου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας (a) προς αυτές του ΝΕΑΚ2003 (b). Με μαύρο περίγραμμα οριοθετούνται οι τρεις ζώνες του ΝΕΑΚ2003, d) Ιστόγραμμα του λόγου των τιμών PGA του επικαιροποιημένου χάρτη προς αυτές του ΝΕΑΚ2003.

Προκειμένου να διευκρινιστεί ο βαθμός στον οποίον τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως μεταβάλλονται από την αλλαγή των βαρών στο λογικό δέντρο των σεισμικών πηγών, επαναλήφθηκε ο ίδιος υπολογισμός σεισμικής επικινδυνότητας για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου, αλλά με διαφορετικά βάρη. Στο νέο λογικό δέντρο τα μοντέλα χωρίστηκαν εκ νέου σε ελληνικά (P1990, PP2000 και V2016) και ευρωπαϊκά (ESHM13 και ESHM20). Στα παλαιότερα μοντέλα κάθε κατηγορίας (P1990, ESHM13) δόθηκε το μικρότερο βάρος, ωστόσο για το μοντέλο ESHM13 επιλέχθηκε μεγαλύτερο βάρος από των P1990 και PP2000, διότι είναι μεταγενέστερο. Το μεγαλύτερο βάρος δόθηκε στο ESHM20, καθώς είναι το νεότερο. Το κύριο κριτήριο για τον ορισμό των βαρών ήταν η ηλικία κάθε μοντέλου, χωρίς παράλληλα να ληφθούν υπόψη τα προβλήματά τους, όπως περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 2. Το νέο λογικό δέντρο σεισμικών πηγών (το οποίο χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για τον υπολογισμό που φαίνεται στο Σχήμα 2.7.3) έχει τα εξής βάρη: P1990 (0.05), PP2000 (0.10), V2016 (0.30), ESHM13 (0.15) και ESHM20 (0.40).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τα αποτελέσματα της χρήσης αυτού του λογικού δέντρου παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.7.3, το οποίο αποτυπώνει τον χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου (Σχήμα 2.7.3a), τον χάρτη με τη χωρική μεταβολή του λόγου των επικαιροποιημένων τιμών προς τις τιμές του ΝΕΑΚ2003 (Σχήμα 2.7.3c), καθώς και το ιστόγραμμά τους (Σχήμα 2.7.3d). Οι τιμές PGA που προκύπτουν από το νέο λογικό δέντρο είναι ελαφρώς χαμηλότερες από τις αντίστοιχες στο Σχήμα 2.7.2, επειδή τα ευρωπαϊκά μοντέλα καταλαμβάνουν το 55% του συνολικού βάρους. Οι διαφορές παρατηρούνται κυρίως στην Κεφαλονιά και στην Τάφρο του Β. Αιγαίου, ωστόσο δεν κρίνονται ιδιαιτέρως σημαντικές. Οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των δύο ιστογραμμάτων (Σχήμα 2.7.2d και Σχήμα 2.7.3d) είναι σχεδόν ίδιες. Επομένως, οι διαφορές αυτών των αποτελεσμάτων από τις τιμές του ΝΕΑΚ2003 είναι και σε αυτήν την περίπτωση μεγάλες, και παραμένουν ανεπηρέαστες από τις λεπτομέρειες του λογικού δέντρου του Σχήματος 2.6.1.

Ένα ακόμη ζήτημα το οποίο απαιτεί διερεύνηση αποτελεί η μεταβολή του επιπέδου σεισμικής επικινδυνότητας, όταν αλλάξει ο θεωρούμενος αριθμός τυπικών αποκλίσεων στην εφαρμογή των GMPE. Στο Σχήμα 2.7.4, στο Σχήμα 2.7.5 και στο Σχήμα 2.7.6 εμφανίζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα με χρήση των λογικών δέντρων του Κεφαλαίου 2 (όπως στο Σχήμα 2.7.2), με θεωρούμενο αριθμό αποκλίσεων στις GMPE ίσο με 3, 1 και 0, αντίστοιχα. Σε αντίθεση με όσα ισχύουν έπειτα από την αλλαγή των βαρών του λογικού δέντρου των σεισμικών πηγών, όταν μεταβάλλεται ο εφαρμοζόμενος αριθμός των τυπικών αποκλίσεων στην εφαρμοζόμενος αριθμός των τυπικών αποκλίσεων των GMPE, το επίπεδο της τελικής σεισμικής επικινδυνότητας διαφοροποιείται κατά πολύ. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση της μηδενικής τυπικής απόκλισης (ίδια με τους υπολογισμούς του ΝΕΑΚ2003), στην οποία οι επικαιροποιημένες τιμές είναι κατά μέσο όρο μόλις 14% υψηλότερες από αυτές του ΝΕΑΚ2003. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η προσαρμογή του ΝΕΑΚ2003 στη σύγχρονη πρακτική των 2 και 3 τυπικών αποκλίσεων στις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. θα απαιτήσει σημαντική αύξηση των τιμών σχεδιασμού, εκτός αν αυτή υλοποιηθεί με

διαφορετικό τρόπο (σταδιακά, με χαμηλότερο επίπεδο τυπικών αποκλίσεων, με χρήση «ενεργών» τιμών κ.λπ.).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

А.П.С



Σχήμα 2.7.3 α) Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας που απεικονίζει τη χωρική κατανομή του PGA (τιμές με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης για περίοδο επανάληψης 50 ετών) για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου, με χρήση διαφορετικών βαρών στο λογικό δέντρο των μοντέλων σεισμικών πηγών (P1990: 0.10, PP2000: 0.10, V2016: 0.30, ESHM13: 0.15, ESHM20: 0.40). Με μαύρο περίγραμμα οριοθετούνται οι τρεις ζώνες του NEAK2003, b) Οι ζώνες του NEAK2003, με την αντίστοιχη τιμή σεισμικής επικινδυνότητας, c) Χάρτης με την αντάστοιχη τιμή σεισμικής επικινδυνότητας (a) προς αυτές του NEAK2003 (b). Με μαύρο περίγραμμα οριοθετούνται οι τρεις ζώνες του χάρτη τας συ NEAK2003, με την αντίστοιχη τιμή σεισμικής επικινδυνότητας, c) Χάρτης με την αντάστοιχη τιμή σεισμικής επικινδυνότητας, c) αυτές του NEAK2003 (b). Με μαύρο περίγραμμα οριοθετούνται οι τρεις ζώνες του NEAK2003 (b). Με μαύρο περίγραμμα οριοθετούνται οι τρεις ζώνες του NEAK2003, d) Ιστόγραμμα του λόγου των τιμών PGA του επικαιροποιημένου χάρτη προς αυτές του NEAK2003.



Σχήμα 2.7.4 a) Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας που απεικονίζει τη χωρική κατανομή του PGA (τιμές με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης για περίοδο επανάληψης 50 ετών) για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου, για την παραγωγή του οποίου θεωρήθηκε σφάλμα 3 τυπικών αποκλίσεων στην εφαρμογή των GMPE. Με μαύρο περίγραμμα απεικονίζονται οι τρεις ζώνες του ΝΕΑΚ2003, b) Οι ζώνες του ΝΕΑΚ2003 με την αντίστοιχη τιμή σεισμικής επικινδυνότητας, c) Χάρτης με την αναλογία των τιμών PGA του επικαιροποιημένου χάρτη σου χάρτη προς αυτές του ΝΕΑΚ2003 (b). Με μαύρο περίγραμμα οριοθετούνται οι τρεις ζώνες του ΝΕΑΚ2003, d) Ιστόγραμμα του λόγου των τιμών PGA του επικαιροποιημένου χάρτη προς αυτές του ΝΕΑΚ2003.



Σχήμα 2.7.5 a) Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας που απεικονίζει τη χωρική κατανομή του PGA (τιμές με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης για περίοδο επανάληψης 50 ετών) για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου, για την παραγωγή του οποίου θεωρήθηκε σφάλμα 1 τυπικής απόκλισης στην εφαρμογή των GMPE. Με μαύρο περίγραμμα οριοθετούνται οι τρεις ζώνες του NEAK2003, b) Οι ζώνες του NEAK2003 με την αντίστοιχη τιμή σεισμικής επικινδυνότητας, c) Χάρτης με την αναλογία των τιμών PGA του επικαιροποιημένου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας (a) προς αυτές του NEAK2003 (b). Με μαύρο περίγραμμα οριοθετούνται οι τρεις ζώνες του NEAK2003, d) Ιστόγραμμα του λόγου των τιμών PGA του επικαιροποιημένου χάρτη προς αυτές του NEAK2003.



Σχήμα 2.7.6 a) Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας που απεικονίζει τη χωρική κατανομή του PGA (τιμές με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης για περίοδο επανάληψης 50 ετών) για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου, για την παραγωγή του οποίου θεωρήθηκε μηδενικό σφάλμα στην εφαρμογή των GMPE. Με μαύρο περίγραμμα οριοθετούνται οι τρεις ζώνες του ΝΕΑΚ2003, b) Οι ζώνες του ΝΕΑΚ2003 με την αντίστοιχη τιμή σεισμικής επικινδυνότητας, c) Χάρτης με την αναλογία των τιμών PGA του επικαιροποιημένου χάρτη σεισμικής επικινδυνότηται οι τρεις ζώνες του ΝΕΑΚ2003 (b). Με μαύρο περίγραμμα οριοθετούνται οι τρεις του τρεις ζώνες του ΝΕΑΚ2003 (b). Με μαύρο περίγραμμα οριοθετούνται οι χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας (a) προς αυτές του ΝΕΑΚ2003 (b). Με μαύρο περίγραμμα οριοθετούνται οι τρεις ζώνες του ΝΕΑΚ2003.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΠΕΣΕ

Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 1, τα αποτελέσματα της ΠΕΣΕ εξαρτώνται από πολυάριθμους παράγοντες σχετιζόμενους με την πηγή, τον δρόμο διάδοσης και τη θέση ενδιαφέροντος. Πριν από τη διενέργεια των υπολογισμών ΠΕΣΕ, είναι απαραίτητη η λήψη αποφάσεων αναφορικά με αυτούς τους παράγοντες, όπως το θεωρούμενο είδος σεισμικών πηγών (επιφανειακές, γραμμικές, σημειακές κ.λπ.), το επιλεγόμενο μοντέλο σεισμικών πηγών (ή το λογικό δέντρο από μοντέλα σεισμικών πηγών), το λογικό δέντρο των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης ή Ι.Σ.Κ. (κριτήρια επιλογής εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. και κατάταξή τους σε σειρά σημαντικότητας) κ.λπ. Οι επιλογές που σχετίζονται με τα επιμέρους χαρακτηριστικά του επιλεγμένου μοντέλου υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας εξαρτώνται από τον εκάστοτε ερευνητή και πολλές φορές υπαγορεύονται από υποκειμενικά κριτήρια. Για αυτόν τον λόγο, είναι αναγκαία η διερεύνηση της επιρροής που ασκεί κάθε παράγοντας στα τελικά αποτελέσματα, προκειμένου να αναδειχθούν αυτοί που ενδεχομένως πρέπει να επιλέγονται με αυστηρότερα κριτήρια και αυτοί που είναι ήσσονος σημασίας, επομένως δεν συνεισφέρουν μεγάλο σφάλμα στους υπολογισμούς. Ένα χρήσιμο εργαλείο για αυτόν τον σκοπό αποτελεί η Ανάλυση Ευαισθησίας.

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Α.Π.Θ

Σύμφωνα με το US Environmental Agency (EPA) (EPA, 2009), η ευαισθησία περιγράφει «τον βαθμό στον οποίο τα αποτελέσματα ενός μοντέλου επηρεάζονται από μεταβολές των εισαγόμενων παραμέτρων», και η Ανάλυση Ευαισθησίας ορίζεται ως «ο υπολογισμός της επιρροής των μεταβολών σε εισαγόμενες παραμέτρους ή υποθέσεις (συμπεριλαμβανομένων των ορίων και της λειτουργικής μορφής του μοντέλου) στα αποτελέσματα» (Borgonovo, 2017). Ένα μοντέλο μπορεί να έχει είτε αιτιοκρατικό (ντετερμινιστικό) είτε στοχαστικό-πιθανολογικό αποτέλεσμα. Θεωρείται ότι παράγει αιτιοκρατικό αποτέλεσμα, όταν μία συγκεκριμένη εισαγόμενη τιμή σε αυτό δίνει πάντα το ίδιο αποτέλεσμα, όσες φορές και αν επαναληφθεί ο υπολογισμός. Από την άλλη πλευρά, ένα μοντέλο παράγει στοχαστικό αποτέλεσμα, όταν από μία συγκεκριμένη εισαγόμενη τιμή ποροίος. Ως εκ τούτου, οι μέθοδοι ανάλυσης ευαισθησίας χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις αιτιοκρατικές και τις πιθανολογικές.

Προκειμένου να είναι τα αποτελέσματα μιας Ανάλυσης Ευαισθησίας αξιόπιστα και να μην απαντούν μερικώς ή, ακόμη χειρότερα, εσφαλμένα στο αρχικό ερώτημα, πρέπει στα πρώτα στάδια να ακολουθούνται ορισμένα «ρυθμιστικά» βήματα, όπως περιγράφονται από τους Borgonovo and Plischke (2016). Το πρώτο βήμα προς αυτήν

κατεύθυνση είναι η ιεράρχηση των προτεραιοτήτων των εισαγόμενων την παραμέτρων του μοντέλου, δηλαδή ο προσδιορισμός αυτών που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του. Αυτός εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, όπως το αν η ανάλυση γίνεται τοπικά ή καθολικά (globally). Σε μία τοπική Ανάλυση Ευαισθησίας, όπως αυτή που ακολουθείται στην παρούσα εργασία, γίνονται διακυμάνσεις των τιμών των εισαγόμενων παραμέτρων γύρω από μία προκαθορισμένη αρχική τιμή. Από την άλλη πλευρά, σε μία καθολική Ανάλυση Ευαισθησίας, ο ερευνητής ορίζει εύρη τιμών στις εισαγόμενες παραμέτρους με τις αντίστοιχες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας. Επίσης, έχει σημασία αν η έρευνα είναι σε στάδιο προγενέστερο ή μεταγενέστερο της λήψης αποφάσεων. Σε προγενέστερο στάδιο, είναι σημαντική η γνώση του εισαγόμενου παράγοντα ο οποίος είναι ικανός να προκαλέσει αλλαγή της προτιμώμενης μεθόδου, ενώ σε μεταγενέστερο στάδιο το ενδιαφέρον εστιάζεται στους παράγοντες που συγκεντρώνουν τη διαχειριστική προσοχή κατά τη διενέργεια της ανάλυσης. Το δεύτερο βήμα περιλαμβάνει τον ορισμό των εισαγόμενων παραμέτρων που έχουν σταθερή τιμή. Στο τρίτο βήμα αναλύεται η δομή του μοντέλου και διασαφηνίζεται η ύπαρξη ή η απουσία αλληλεπιδράσεων μεταξύ των εισαγόμενων παραμέτρων. Στο τέταρτο βήμα προσδιορίζεται η κατεύθυνση της μεταβολής του παραγόμενου αποτελέσματος. Η απλή ανάπτυξη ενός μοντέλου και η παθητική αποδοχή των αποτελεσμάτων του δεν είναι παραγωγική, καθώς η ανάδειξη του περιεχομένου του επιτυγχάνεται μόνο μέσω των δοκιμών του. Επίσης, είναι απαραίτητο να εξεταστεί αν η αύξηση των εισαγόμενων παραμέτρων δύναται να αυξήσει το αποτέλεσμα, και το αντίστροφο. Τέλος, το πέμπτο βήμα -το οποίο είναι απαραίτητο σε όλα τα προβλήματα βελτιστοποίησης- αποτελεί ο ορισμός της ευρωστίας-σταθερότητας (stability setting).

Στην περίπτωση της ΠΕΣΕ δεν απαιτείται ο προσδιορισμός κατανομών για τις εισαγόμενες παραμέτρους, συνεπώς επιλέγεται μια αιτιοκρατική μέθοδος ανάλυσης ευαισθησίας. Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε η μέθοδος ανάλυσης ευαισθησίας της μίας-παραμέτρου-τη-φορά ή OFAT (One Factor at A Time), τα αποτελέσματα της οποίας οπτικοποιήθηκαν γραφικά με τα διαγράμματα τυφώνα (tornado diagrams). Τα διαγράμματα αυτά επινοήθηκαν από τον Ronald Howard (Howard, 1988), έναν από τους θεμελιωτές της ανάλυσης ευαισθησίας ΟFAT και την κατασκευή ενός διαγράμματος τυφώνα παρουσιάζονται από τον Eschenbach (1992). Τα βασικά βήματα αναλύονται διεξοδικά στο πλαίσιο εργασίας του Porter (2016) και είναι τα εξής:

1. Επιλογή της υπολογιζόμενης μεταβλητής, y.

- 2. Προσδιορισμός των εισαγόμενων μεταβλητών x (x1, x2) κ.ο.κ.
- Δημιουργία της μαθηματικής σχέσης που συσχετίζει τη μεταβλητή y με τις x,y=f(x).
- Προσδιορισμός της συνιστώμενης τιμής για κάθε μεταβλητή x (x_{typ}), καθώς και των ορίων της (χαμηλότερη, x_{low}, και υψηλότερη, x_{high}, δυνατή τιμή).

- 5. Υπολογισμός της *βασικής* τιμής της μεταβλητής *y* με χρήση όλων των συνιστώμενων τιμών x (y_{baseline}=f(x_{1typ},x_{2typ},...).
- 6. Ορισμός της πρώτης εισαγόμενης μεταβλητής x (x₁) στο χαμηλότερο όριό της, με ταυτόχρονη διατήρηση της συνιστώμενης τιμής στις υπόλοιπες μεταβλητές, και υπολογισμός της μεταβλητής y (y_{1low}=f(x_{1low},x_{2typ},...).
- 7. Ορισμός της πρώτης εισαγόμενης μεταβλητής x στο υψηλότερο όριό της και υπολογισμός της μεταβλητής y (y_{1high}=f(x_{1high},x_{2typ},...).
- Υπολογισμός της διαφοράς των αποτελεσμάτων των βημάτων 6 και 7, δηλαδή της διακύμανσης της μεταβλητής *y* που προκαλείται από τη μεταβολή του παράγοντα *x*₁.
- Επαναφορά της πρώτης εισαγόμενης μεταβλητής στη συνιστώμενη τιμή της (x_{1typ}).
- 10. Επανάληψη των βημάτων 6-9 για κάθε εισαγόμενη μεταβλητή.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- 11. Κατανομή των εισαγόμενων παραμέτρων σε φθίνουσα σειρά, βάσει της διακύμανσής τους.
- 12. Κατασκευή του διαγράμματος τυφώνα (παράδειγμα στο Σχήμα 3.1.1), δηλαδή του οριζόντιου ραβδοδιαγράμματος του οποίου κάθε ράβδος αντιστοιχεί σε έναν παράγοντα x και κυμαίνεται μεταξύ των τιμών που αποκτά η παράμετρος y, όταν αυτός μεταβάλλεται στα άνω και κάτω όριά του. Η τοποθέτηση των ράβδων γίνεται σύμφωνα με την κατανομή τους κατά φθίνουσα σειρά διακύμανσης, με αποτέλεσμα το διάγραμμα να αποκτά τη χαρακτηριστική του μορφή που θυμίζει τυφώνα (tornado), στην οποία οφείλεται και το όνομά του. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στην τιμή της παραμέτρου y, όταν ο υπολογισμός της γίνεται με χρήση των συνιστώμενων τιμών x (ybaseline).



Σχήμα 3.1.1 Παράδειγμα διαγράμματος τυφώνα (tornado diagram) από την εργασία των Kastelic et al. (2016), το οποίο δείχνει με σειρά σημαντικότητας τους παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο την τιμή PGA ενός σημείου. Η γκρι γραμμή αντιστοιχεί στη βασική εκτιμώμενη τιμή του PGA. Ο παράγοντας που επηρεάζει περισσότερο τη σεισμική επικινδυνότητα της θέσης ενδιαφέροντος είναι ο FEM/GEO, δηλαδή το μοντέλο παραμόρφωσης. Η αλλαγή από το μοντέλο FEM στο μοντέλο GEO έχει ως αποτέλεσμα μεταβολή του PGA κατά περίπου 0.08 g (μήκος της ράβδου). Ο δεύτερος παράγοντας είναι η εφαρμοζόμενη εμπειρική σχέση πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (GMPE), ο οποίος δύναται να δώσει τιμές PGA 0.09-0.13 g (εύρος 0.04 g). Ο τρίτος παράγοντας αναφέρεται σε μεταβολές της σταθεράς μ (shear modulus), ενώ ο λιγότερο επιδραστικός παράγοντας είναι το γωνιακό μέγεθος (M_c).

Τα διαγράμματα τυφώνα είναι εύκολα κατανοητά και ερμηνεύσιμα και υποδεικνύουν στον αναλυτή τις παραμέτρους στις οποίες θα χρειαστεί να δώσει μεγαλύτερη προσοχή, να τις κατανοήσει και να τις ποσοτικοποιήσει όσο πιο σωστά μπορεί. Η μέθοδος εργασίας για την παραγωγή τους είναι απλή στην πράξη, καθώς απαιτεί τον ορισμό πιθανών ορίων των εισαγόμενων παραμέτρων και τον υπολογισμό της παραμέτρου y 2v+1 φορές, όπου, v, ο αριθμός των εισαγόμενων παραμέτρων x. Ωστόσο, δεν παρέχουν ακριβείς πιθανολογικές πληροφορίες. Επίσης, η βασική τιμή της παραμέτρου y δεν είναι πάντα ρεαλιστική ή αναμενόμενη, επειδή εξαρτάται από τον σχηματισμό του αρχικού μοντέλου, τα όρια των παραμέτρων και το κατά πόσο ακραία είναι. Έτσι, παρόλο που τα διαγράμματα αυτά παρέχουν μια γενική εικόνα για τις πιο επιδραστικές παραμέτρους, δεν είναι πάντα αξιόπιστα όσον αφορά τα επίπεδα των τιμών. Σε μια πιθανολογική ανάλυση, η παράμετρος y εκτιμάται ως μια αβέβαιη συνάρτηση των από κοινού διανεμημένων αβέβαιων εισαγόμενων παραμέτρων x, ή τουλάχιστον των σημαντικότερων, οι οποίες καταλαμβάνουν την κορυφή του διαγράμματος τυφώνα.

3.2. ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η Ανάλυση Ευαισθησίας OFAT και τα διαγράμματα τυφώνα χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλούς τομείς, στους οποίους συγκαταλέγονται η σεισμική επικινδυνότητα και η σεισμική τρωτότητα. Οι Cornell and Vanmarcke (1969) διερεύνησαν την ευαισθησία των καμπυλών σεισμικής επικινδυνότητας του PGA στο μέγεθος του σεισμού. Οι Youngs and Coppersmith (1985) εξέτασαν την επίδραση των μοντέλων επαναληψιμότητας (recurrence models) και του ρυθμού ολίσθησης των ρηγμάτων στις καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας. Οι Wang and Gao (1996) υπολόγισαν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων που επηρεάζουν τη σεισμική επικινδυνότητα, και πρότειναν την ιδέα της σχετικής αλληλεπίδρασης, για παράδειγμα τη σχετική αλληλεπίδραση μεταξύ του μεγίστου μεγέθους και του ετήσιου ρυθμού σεισμικότητας και μεταξύ του μεγίστου μεγέθους και της χωρικής κατανομής. Οι Rabinowitz et al. (1998) μελέτησαν την ευαισθησία των αποτελεσμάτων της ΠΕΣΕ στην επιστημική αβεβαιότητα των λογικών δέντρων που χρησιμοποιούνται, και πρότειναν τη διενέργεια της Ανάλυσης Ευαισθησίας πριν από τον σχηματισμό του τελικού λογικού δέντρου. Παρόμοια μέθοδο εργασίας με τους Rabinowitz et al. (1998) ως προς τον υπολογισμό της ευαισθησίας ακολούθησαν και οι Giner et al. (2002) σε μια εφαρμογή στην Ανατολική και στη Δυτική Ισπανία. Οι Akinci et al. (2009) εξέτασαν την ευαισθησία των αποτελεσμάτων σεισμικής επικινδυνότητας στη χρήση χρονικά εξαρτημένων μοντέλων (πιο συγκεκριμένα, αναφέρθηκαν στο μοντέλο BPT - Brownian Passage Time) για την περιοχή των Κεντρικών Απεννίνων. Οι Zahran et al. (2015) πραγματοποίησαν Ανάλυση Ευαισθησίας των αποτελεσμάτων της ΠΕΣΕ στο μοντέλο επιφανειακών σεισμικών πηγών (Σχήμα 3.2.1a), στο ελάχιστο και στο μέγιστο μέγεθος και στις εδαφικές συνθήκες για τη Σαουδική Αραβία. Οι Kastelic et al. (2016) αξιοποίησαν τη μέθοδο

της ανάλυσης ευαισθησίας για τον υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας σε σημεία των εξωτερικών Διναρίδων, προκειμένου να διερευνήσουν αν συνιστάται η χρήση μοντέλων παραμόρφωσης ρηγμάτων σε περιοχές με χαμηλό ρυθμό παραμόρφωσης. Για δύο σημεία στο Ισραήλ οι Avital et al. (2018) εφάρμοσαν Ανάλυση Ευαισθησίας της σεισμικής επικινδυνότητας σε διάφορους εισαγόμενους παράγοντες, μεταξύ των οποίων ο ρυθμός ολίσθησης, το *M_{max}* και οι εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. Το ίδιο θέμα έχει και η Ανάλυση Ευαισθησίας της Chovanová (2018) για την περιοχή Jaslovské Bohunice της Σλοβακίας, θέση στην οποία εδρεύει εργοστάσιο παραγωγής πυρηνικής ενέργειας, καθώς και αυτή των Aguilar-Meléndez et al. (2018) για τη Βαρκελώνη.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Έχει μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η αναμενόμενη ετήσια απώλεια (expected annualized loss) και η χείριστη ετήσια απώλεια για το Oakland της Καλιφόρνιας, όταν γίνονται αλλαγές στην πρόβλεψη των σεισμικών διαρρήξεων, στις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ., στο είδος του εδάφους και στο μοντέλο ευθραυστότητας (Grossi, 2000). Οι Porter et al. (2002) χρησιμοποίησαν την Ανάλυση Ευαισθησίας για να προσδιορίσουν τους παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο το κόστος επιδιόρθωσης ενός κτιρίου λόγω σεισμού, όπως τη φασματική επιτάχυνση, τη μάζα, την απόσβεση (damping) κ.λπ. Τέλος, οι Porter et al. (2012) πραγματοποίησαν Ανάλυση Ευαισθησίας ώστε να μειώσουν τις απολήξεις, δηλαδή τα ακραία μέλη, του λογικού δέντρου που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα UCERF2 (Σχήμα 3.2.1b), στο πλαίσιο του οποίου δημιουργήθηκε ένα χρονικά εξαρτώμενο μοντέλο πρόβλεψης σεισμικών διαρρήξεων (earthquake rupture forecast).



Σχήμα 3.2.1 Παραδείγματα ανάλυσης ευαισθησίας α) από τους Zahran et al. (2015): ο λόγος (Ratio) PGA_{SOFT}/PGA_{SHARP} και PGV_{SOFT}/PGV_{SHARP} όταν θεωρούνται διαφορετικά είδη ορίων στις σεισμικές πηγές για διαφορετικές περιόδους επανάληψης και για διαφορετικά κατώφλια απόστασης (threshold distance) και, b) από τους Porter et al. (2012): διάγραμμα τυφώνα για την ευαισθησία της αναμενόμενης ετήσιας απώλειας σε διάφορους παράγοντες, όπως η GMPE και το μοντέλο παραμόρφωσης.

3.3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΟΓΑΤ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής έγινε Ανάλυση Ευαισθησίας OFAT και δημιουργήθηκαν διαγράμματα τυφώνα για 42 θέσεις της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου, οι οποίες είτε αποτελούν μεγάλα αστικά κέντρα είτε παρουσιάζουν ιδιαίτερο σεισμολογικό ενδιαφέρον. Η εξαρτημένη μεταβλητή των υπολογισμών ήταν η παράμετρος ισχυρής σεισμικής κίνησης (PGA και PGV) με πιθανότητα υπέρβασης 10.0%, σε μέση περίοδο επανάληψης 50 ετών. Οι εισαγόμενοι παράγοντες που εξετάστηκαν, επειδή θεωρήθηκαν ιδιαιτέρως σημαντικοί για τα αποτελέσματα της ΠΕΣΕ, είναι οι εξής:

- το μοντέλο σεισμικών πηγών (Source model),
- η/οι εμπειρική/ές σχέση/εις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (GMPE),
- ο αριθμός των τυπικών αποκλίσεων, σ, που εφαρμόζεται στις GMPE (std),
- οι σταθερές G-R (*a* και *b*),

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

- το μέγιστο μέγεθος (*M_{max}*),
- το ελάχιστο μέγεθος (*M_{min}*),
- το κυρίαρχο είδος διάρρηξης (SoF).

Οι υπολογισμοί αναφέρονται σε συνθήκες βράχου (*Vs₃₀*=800 m/s), επομένως οι εδαφικές συνθήκες δεν λαμβάνονται υπόψη.

Κύριο σκοπό του παρόντος κεφαλαίου δεν αποτελεί ο υπολογισμός των PGA και PGV των εξεταζόμενων θέσεων, αλλά ο προσδιορισμός των παραγόντων που επηρεάζουν περισσότερο (ή λιγότερο) τη σεισμική τους επικινδυνότητα (με θεώρηση ακραίων σεναρίων). Συνεπώς, οι τιμές που παρουσιάζονται δεν είναι οι βέλτιστες, αλλά επιχειρούν να προσδιορίσουν το μέγιστο εύρος στο οποίο ενδέχεται να μεταβληθούν οι τιμές της ΠΕΣΕ.

Τα εξεταζόμενα μοντέλα σεισμικών πηγών είναι αυτά που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2, δηλαδή τα: Papazachos (1990) ή P1990, Papaioannou and Papazachos (2000) ή PP2000, Vamvakaris et al. (2016a) ή V2016, Woessner et al. (2015) ή ESHM13 και Danciu et al. (2021) ή ESHM20. Οι εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της I.Σ.Κ. που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτές των: Abrahamson et al. (2014) ή ASK14, Boore et al. (2014) ή BSSA14, Campbell and Bozorgnia (2014) ή CB14, Chiou and Youngs (2014) ή CY14, Bindi et al. (2011) ή Bi11, Cauzzi and Faccioli (2008) ή CF08, Boore et al. (2021) ή Bo21, (Chousianitis et al., 2018) ή Ch18, Danciu and Tselentis (2007) ή DT07 και Skarlatoudis et al. (2003) ή Sk03. Οι σχέσεις αυτές επιλέχθηκαν με σκοπό την πληρέστερη, κατά το δυνατό, περιγραφή των αβεβαιοτήτων. Πρόκειται για σχέσεις που δημιουργήθηκαν από διαφορετικές βάσεις δεδομένων και καλύπτουν μεγάλο χρονικό διάστημα (2003-2021). Οι ASK14, BSSA14, CB14 και CY14 είναι αμερικανικές, οι Bi11 και CF08 ευρωπαϊκές, και οι Sk03, DT07, Ch18 και Bo21 ελληνικές.

Για τον υπολογισμό των βασικών τιμών PGA και PGV (κατακόρυφος άξονας, Σχήμα 3.1.1) ορίστηκαν λογικά δέντρα για τα μοντέλα σεισμικών πηγών και για τις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (Σχήμα 3.3.1). Όσον αφορά το μοντέλο ESHM20, χρησιμοποιήθηκε το «μέσο» σενάριο, δηλαδή αυτό που περιέχει τον κύριο (μέσο) συνδυασμό τιμών σταθερών G-R (a και b) και τα αντίστοιχα M_{max} (μπλε διακλάδωση στο Σχήμα 3.3.2). Για τον ορισμό του βάρους κάθε μοντέλου (Σχήμα 3.3.1a) έγινε αρχικά ο διαχωρισμός τους σε ελληνικά (P1990, PP2000 και V2016) και ευρωπαϊκά (ESHM13 και ESHM20). Δεδομένων των συγκρίσεων και των αποτελεσμάτων του Κεφαλαίου 2, στα ελληνικά μοντέλα δόθηκε μεγαλύτερο βάρος (0.65) από ό,τι στα ευρωπαϊκά (0.35). Το V2016 αποτελεί (κατά τη συγγραφή της παρούσας διατριβής) το πιο πρόσφατα δημοσιευμένο μοντέλο επιφανειακών σεισμικών πηγών και θεωρείται (βάσει των αποτελεσμάτων του Κεφαλαίου 2) το πιο αξιόπιστο, επομένως του δόθηκε το μεγαλύτερο βάρος (0.35). Το υπόλοιπο βάρος (0.30) μοιράστηκε στα μοντέλα Ρ1990 και ΡΡ2000: στο Ρ1990 αποδόθηκε βάρος 0.10 λόγω παλαιότητας, και στο ΡΡ2000 βάρος 0.20. Στα ευρωπαϊκά μοντέλα εφαρμόστηκε επίσης το κριτήριο της παλαιότητας, συνεπώς το ESHM13 απέκτησε βάρος ίσο με 0.10, με αποτέλεσμα το ESHM20 να λάβει το υπόλοιπο 0.25. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή των βαρών επηρεάζει μόνο τη μέση «βασική» τιμή των PGA και PGV και όχι το εύρος διασποράς, το οποίο καθορίζει τη μορφή των διαγραμμάτων τυφώνα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Παρόμοιο σκεπτικό ακολουθήθηκε και για την ανάγκη ορισμού βαρών στο λογικό δέντρο των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (Σχήμα 3.3.1b), με ταυτόχρονη συμπερίληψη των κριτηρίων της εργασίας των Sotiriadis and Margaris (2023). Οι σχέσεις χωρίστηκαν σε αμερικανικές (NGA-West2: ASK14, BSSA14, CB14 και CY14), ευρωπαϊκές (Bi11 και CF08) και ελληνικές (Bo21, Ch18, DT07 και Sk03). Δόθηκε προτεραιότητα στις νεότερης γενιάς εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (Bo21 και NGA-West2), διότι έχουν προσδιοριστεί από πιο πρόσφατες βάσεις δεδομένων και λαμβάνουν υπόψη πιο αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσηςπεριγραφής της σεισμικής κίνησης. Η Bo21 αποτελεί τη νεότερη (κατά τη συγγραφή της παρούσας διατριβής) σχέση για τον Ελληνικό χώρο και έχει μαθηματικό τύπο παρόμοιο με αυτόν της BSSA14, επομένως της δόθηκε το μεγαλύτερο βάρος (0.20). Στις τέσσερις αμερικανικές σχέσεις (NGA-West2) αποδόθηκε το ίδιο βάρος (0.13), παρά τις μεταξύ τους διαφορές, διότι θεωρήθηκε ότι η υπερεκτίμηση της ΠΕΣΕ από την CB14 εξισορροπήθηκε από την υποεκτίμηση της σχέσης BSSA14. Το σύνολό τους καταλαμβάνει το 52% του συνολικού βάρους, σε συμφωνία με την προσέγγιση των Sotiriadis and Margaris (2023), στη μελέτη των οποίων οι σχέσεις αυτές αντιστοιχούν στο 48% του συνολικού βάρους (με διαφοροποιήσεις, ωστόσο, στα επιμέρους βάρη). Οι ευρωπαϊκές σχέσεις Bi11 και CF08 κατέλαβαν το 0.16 του συνολικού βάρους (σύμφωνα με το βάρος των αντίστοιχων ευρωπαϊκών σχέσεων των Sotiriadis and Margaris, 2023), το οποίο κατανεμήθηκε ισόποσα μεταξύ τους (0.08 έκαστη). Το υπόλοιπο βάρος (0.12) μοιράστηκε στις υπόλοιπες ελληνικές σχέσεις. Πιο συγκεκριμένα, τα βάρη των Ch18, DT07 και Sk03 ορίστηκαν 0.05, 0.04 και 0.03, αντίστοιχα, βάσει του χρόνου δημοσίευσής τους.



Σχήμα 3.3.1 Λογικά δέντρα: a) των μοντέλων σεισμικών πηγών και b) των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. που χρησιμοποιήθηκαν στο μέσο σενάριο της Ανάλυσης Ευαισθησίας OFAT.

Ο υπολογισμός των βασικών τιμών PGA και PGV έγινε με τη χρήση των λογικών δέντρων που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.3.1. Στις GMPE εφαρμόστηκαν τρεις τυπικές αποκλίσεις, ενώ το *M_{min}* θεωρήθηκε ίσο με 4.5, δεδομένου ότι οι μικρότεροι σεισμοί έχουν γενικά περιορισμένη επίδραση στην ΠΕΣΕ.

Στη συνέχεια, ορίστηκαν τα όρια των σεναρίων για κάθε εισαγόμενη παράμετρο, με εκ νέου υπολογισμό των PGA και PGV. Κατά την εξέταση της επίδρασης της παραμέτρου «GMPE» έγινε υπολογισμός της ΠΕΣΕ με χρήση κάθε εμπειρικής σχέσης πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. ξεχωριστά και ταυτόχρονη διατήρηση των υπόλοιπων παραμέτρων σταθερών. Η διαδικασία επαναλήφθηκε και για την παράμετρο *Source model* (μοντέλο σεισμικών πηγών), απλώς σε αυτήν την περίπτωση επιλέχθηκαν τα ακραία σενάρια από το λογικό δέντρο των εννέα συνολικά σεναρίων (κόκκινες διακλαδώσεις στο Σχήμα 3.3.2) κατά την εξέταση του μοντέλου ESHM20.



Σχήμα 3.3.2 Λογικό δέντρο των εννέα σεναρίων του ESHM20. Ως προτεινόμενη τιμή για το μοντέλο ESHM20 χρησιμοποιείται το σενάριο της μπλε διακλάδωσης. Κατά την εξέταση αυτού του μοντέλου, για τους υπολογισμούς OFAT της παραμέτρου «Source model», έγινε χρήση των ακραίων σεναρίων που αντιστοιχούν στις κόκκινες διακλαδώσεις.

Για την επίδραση της σταθεράς *α* εξετάστηκαν δύο ακραία σενάρια: η αφαίρεση 0.33 μονάδων από τη συνιστώμενη τιμή *α* κάθε πηγής (σε κάθε μοντέλο) και η πρόσθεση 0.33 μονάδων, τιμή η οποία αντιστοιχεί σε μεταβολή *σ*=±0.33, σε σχέση με τη μέση τιμή της *α*. Η παραπάνω μεταβλητότητα, η οποία αντιστοιχεί σε ~1.833≈2 (διπλασιασμός ή υποδιπλασιασμός του συνολικού αριθμού των σεισμών) βασίστηκε στο μέσο σφάλμα των τιμών *α* για την περιοχή από τους Vamvakaris et al. (2016a). Οι μεταβολές αυτές επηρεάζουν το συνολικό επίπεδο σεισμικότητας των σεισμικών πηγών (Σχήμα 3.3.3a).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στην περίπτωση της σταθεράς *b*, η αντίστοιχη τιμή ήταν 0.08 (τιμή περίπου ίση με 2*σ*, όπου, *σ*, το μέσο σφάλμα της παραμέτρου *b* για την περιοχή, σύμφωνα με τη μελέτη των Vamvakaris et al. (2016a). Η μεταβολή αυτή προκαλεί αλλαγή της κλίσης της ευθείας G-R (Σχήμα 3.3.3b), η οποία αναδεικνύει τη μεταβολή της αναλογίας μικρών και μεγάλων σεισμών. Επίσης, έγινε μία δοκιμή ακόμη σχετική με τις σταθερές G-R, η οποία σημειώνεται ως *b*' στη συνέχεια, και αντιστοιχεί σε ταυτόχρονη μεταβολή των παραμέτρων *a* και *b* (αύξηση της *a* κατά 0.33 με ταυτόχρονη μείωση της *b* κατά 0.08, και μείωση της *a* κατά 0.33 με ταυτόχρονη αύξηση της *b* κατά 0.08, τιμές περίπου ίσες με 2*σ*, όπου, *σ*, το μέσο σφάλμα των παραμέτρων *a* και *b* για την περιοχή από τη μελέτη των Vamvakaris et al. (2016a)



Σχήμα 3.3.3 Σχηματική αναπαράσταση των μεταβολών των παραμέτρων G-R που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση OFAT: a) a, b) b και c) b'.

Για τη διερεύνηση της επίδρασης του *M_{max}* υιοθετήθηκαν δύο προσεγγίσεις. Στην πρώτη, για το *M_{max}* θεωρήθηκε αυθαίρετη μεταβλητότητα 0.5 μονάδων, με οδηγό τις διαφορές που υπολογίστηκαν από τον Βαμβακάρη (2010) ανάμεσα στα σεισμολογικά και τα νεοτεκτονικά δεδομένα. Ανάλογη διαδικασία ακολουθήθηκε και για το *M_{min}*, το οποίο θεωρήθηκε ίσο με 4.0, 4.5 και 5.0 (4.5±0.5). Κατά την εξέταση της επίδρασης του κυρίαρχου είδους διάρρηξης θεωρήθηκαν τρία ακραία σενάρια, στα οποία όλες οι σεισμικές διαρρήξεις ήταν μόνο κανονικές ή μόνο ανάστροφες ή μόνο οριζόντιας μετατόπισης. Τέλος, για τη μεταβλητότητα των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (std) έγινε ακόμη μία δοκιμή με εφαρμογή 2 (αντί των 3) τυπικών αποκλίσεων. Για κάθε θέση ενδιαφέροντος έγιναν συνολικά 34 υπολογισμοί Ανάλυσης Ευαισθησίας OFAT (Σχήμα 3.3.4).



Σχήμα 3.3.4 Οι 42 θέσεις για τις οποίες πραγματοποιήθηκε Ανάλυση Ευαισθησίας τύπου ΟΓΑΤ στην παρούσα διατριβή.

3.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τα διαγράμματα τυφώνα που υπολογίστηκαν για το PGA και το PGV αναδεικνύουν τους πιο «επιδραστικούς» (καθοριστικούς) παράγοντες για τον Ελληνικό χώρο. Στο Σχήμα 3.4.2 και στο Σχήμα 3.4.3 παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά διαγράμματα τυφώνα για τις παραμέτρους PGA και PGV, αντιστοίχως.

Συνοπτικά, αναφορικά με το PGA, οι παράμετροι που φαίνεται να παίζουν τον πιο σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της σεισμικής επικινδυνότητας είναι (κατά σειρά σημαντικότητας): το μοντέλο σεισμικών πηγών, οι παράμετροι G-R *a* και *b* και οι εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. Οι σεισμικές πηγές (παράμετρος Source model) είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας και σεισμικής επικινδυνότητας (Κεφαλονιά, Σχήμα 3.4.2a) και σε περιοχές χαμηλής σεισμικότητας (Αθήνα, Σχήμα 3.4.2b και Ερμούπολη, Σχήμα 3.4.2c). Η μεγάλη διακύμανση των αποτελεσμάτων της Κεφαλονιάς οφείλεται κυρίως στο μοντέλο ESHM20, μερικά σενάρια του οποίου παράγουν πολύ χαμηλές τιμές ίσες με 0.43-0.47 g. Επίσης, είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας σε πολλές θέσεις για το PGV.

Ανεξαρτήτως της σειράς προταιρεότητάς τους για κάθε θέση, το μοντέλο σεισμικών πηγών, οι G-R σταθερές α και b και η εμπειρική σχέση πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (παράμετροι Source model, a, b και GMPE, αντίστοιχα) προκαλούν συγκρίσιμες μεταξύ τους μεταβολές (εύρος ράβδου στο διάγραμμα τυφώνα). Ήσσονος σημασίας παράμετροι είναι το μέγιστο μέγεθος, το είδος της διάρρηξης, ο αριθμός των εφαρμοζόμενων τυπικών αποκλίσεων στις GMPE, η ταυτόχρονη μεταβολή των G-R σταθερών και το ελάχιστο μέγεθος (M_{max} , SoF, std, b' και M_{min} , αντίστοιχα). Το M_{max} μεταβάλλει σε μικρότερο βαθμό τα αποτελέσματα, ωστόσο η επίδρασή του είναι μεγαλύτερη στο PGV (Σχήμα 3.4.3). Η συμπεριφορά αυτή και η σημασία της για τις πιο χαμηλόσυχνες κινήσεις, οι οποίες αντιπροσωπεύονται εν μέρει από το PGV, είναι αναμενόμενη λόγω του «κορεσμού» της απόσβεσης του PGA για μεγάλα μεγέθη (Σχήμα 3.4.1). Παρόλο που οι μεμονωμένες μεταβολές των α και b προκαλούν τις μεγαλύτερες μεταβολές της ΠΕΣΕ, δεν συμβαίνει το ίδιο όταν αυτές γίνονται ταυτόχρονα και συσχετισμένα, καθώς η μεταβλητότητα της παραμέτρου b' προκαλεί μικρές μεταβολές στις τιμές του PGA. Μάλιστα, στις περισσότερες περιπτώσεις παίζει μικρότερο ρόλο από την παράμετρο std (μεταβλητότητα GMPE). Ωστόσο, δεν ισχύει το ίδιο και για το PGV, καθώς για αυτό παίζει σημαντικότερο ρόλο (Σχήμα 3.4.3). Και πάλι η βασική αιτία είναι η σημαντικότερη επίδραση των μεγάλων μεγεθών των σεισμών, τα οποία επηρεάζουν κυρίως την παράμετρο PGV.



Σχήμα 3.4.1 Διαγράμματα της τιμής της παραμέτρου PSA (μέγιστη φασματική επιτάχυνση) με 5% απόσβεση σε συνάρτηση με την απόσταση R_{JB} για περίοδο 0.2 s (επάνω αριστερά), 1.0 s (επάνω δεξιά), 3.0 s (κάτω αριστερά) και 6.0 s (κάτω δεξιά) και για μεγέθη σεισμών 3.0-8.0 (Boore et al., 2014). Στις μικρότερες περιόδους (0.2 και 1.0 s) παρατηρείται κορεσμός των PSA στα μεγάλα μεγέθη (>6.0), ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο όταν η παράμετρος αναφέρεται σε πιο μικρές συχνότητες/μεγάλες περιόδους (3.0 s και 6.0s).

Αντίθετα, η παράμετρος M_{min} ασκεί αμελητέα επίδραση στα αποτελέσματα της ΠΕΣΕ, τουλάχιστον για το επίπεδο σεισμικότητας του Ελληνικού χώρου. Ο προσδιορισμός του ελαχίστου μεγέθους (*M_{min}*) για την ΠΕΣΕ αποτελεί μια απόφαση που θεωρητικά βασίζεται σε δύο κριτήρια: στους σεισμούς που μπορούν να παραβλεφθούν για τις κατασκευές που θα σχεδιαστούν (engineering purposes), οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μεγάλα πλάτη αλλά πολύ μικρή διάρκεια και δεν είναι ικανοί να προκαλέσουν καταστροφές και στην αποφυγή υποεκτίμησης της συμβολής σεισμών μικρού μεγέθους που προκαλούν κινήσεις υψηλής συχνότητας και μεγάλου πλάτους. Συνήθως θεωρείται παράγοντας ήσσονος σημασίας, διότι σχετίζεται με σεισμούς που δεν έχουν μεγάλη πιθανότητα να προκαλέσουν υψηλές τιμές σεισμικής επικινδυνότητας. Ωστόσο, ενδέχεται η επίδρασή του να είναι σημαντική λόγω του τρόπου υπολογισμού των πιθανοτήτων υπέρβασης. Πιο συγκεκριμένα, δεν αποκλείεται τα μικρά μεγέθη να έχουν υψηλό ετήσιο ρυθμό σεισμικότητας, ο οποίος να αντισταθμίζει τις χαμηλές πιθανότητες υπέρβασης που τα χαρακτηρίζουν. Η μείωση του μεγέθους Mmin οδηγεί στην αύξηση του PGA και του PGV, αλλά συνήθως σε μικρό έως μηδαμινό βαθμό (μέχρι ~4%). Άλλες εργασίες (Beauval and Scotti, 2004; Sokolov et al., 2009; Zahran et al., 2015) υποστηρίζουν ότι η επιρροή του μειώνεται, όταν αυξάνεται η περίοδος επανάληψης (στην παρούσα εργασία οι υπολογισμοί έγιναν μόνο για μία περίοδο επανάληψης, αυτή των 50 ετών), καθώς και ότι αυτή εξαρτάται από τη σχετική θέση του σημείου παρατήρησης και της σεισμικής πηγής, γεγονός που δεν πιστοποιείται από την παρούσα διατριβή, επειδή οι διακυμάνσεις που οφείλονται στο Mmin είναι πολύ μικρές. Ωστόσο, πιστοποιείται το γεγονός ότι οι μεταβολές του M_{min} δεν επιφέρουν καμία μεταβολή στο PGV, όπως φαίνεται σε όλα τα διαγράμματα τυφώνα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4.3 και σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι Beauval and Scotti (2004) ανέδειξαν το γεγονός ότι η επιρροή του Mmin σχετίζεται με την κλίση της ευθείας G-R, δηλαδή με την αναλογία μικρού προς μεγάλο μέγεθος σεισμών. Οι θέσεις ενδιαφέροντος με μεγαλύτερη κλίση της καμπύλης G-R είναι πιο ευαίσθητες στον προσδιορισμό του Mmin. Όταν οι κλίσεις είναι παρόμοιες, η επιρροή μειώνεται καθώς αυξάνεται ο ρυθμός σεισμικότητας, επομένως οι περιοχές χαμηλής σεισμικότητας επηρεάζονται περισσότερο. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν το γεγονός ότι το ελάχιστο μέγεθος επηρεάζει περισσότερο τους υπολογισμούς που σχετίζονται με την τρωτότητα των κατασκευών, παρά αυτούς που αφορούν τη σεισμική επικινδυνότητα (Bommer and Crowley, 2017). Η χρήση μικρού M_{min} μπορεί να αυξήσει την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας, αλλά να μη μεταβάλει αξιόλογα τον κίνδυνο έκθεσης (risk of exposure).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το μέγιστο μέγεθος, *M_{max}*, αποτελεί την πιο σημαντική από τις λιγότερο «επιδραστικές» (κρίσιμες) παραμέτρους (*M_{max}*, *SoF*, *b*', *std* και *M_{min}*). Επηρεάζει περισσότερο το PGV από το PGA, δηλαδή την παράμετρο σεισμικής κίνησης που χαρακτηρίζεται από χαμηλότερο συχνοτικό περιεχόμενο, μεταβάλλοντάς τη σημαντικά (~30%). Ο προσδιορισμός του *M_{max}* που μπορεί να λάβει χώρα σε μια σεισμική ζώνη είναι δύσκολος, επειδή συχνά στηρίζεται σε ελλιπή (μη πλήρη) σεισμολογικά και νεοτεκτονικά δεδομένα. Τα μοντέλα σεισμικών πηγών που

χρησιμοποιήθηκαν περιέχουν τιμές M_{max} οι οποίες προσδιορίστηκαν με διαφορετικούς τρόπους, ένας εκ των οποίων είναι η χρήση του μέγιστου ιστορικού σεισμού. Αυτός ο τρόπος, ωστόσο, χαρακτηρίζεται από αρκετά υψηλή αβεβαιότητα, συχνά μεγαλύτερη ή ίση με 0.5 μονάδες (Zahran et al., 2015), η οποία ενίοτε αυξάνεται όταν χρησιμοποιούνται παλαιοσεισμικά και σεισμοτεκτονικά δεδομένα. Στα μοντέλα ESHM13 και ESHM20 γίνεται σταδιακή αύξηση του Mmax κατά 0.2 μονάδες σε κάθε κλάδο του λογικού δέντρου (με διαφορετικές πιθανότητες), με σκοπό να «καλυφθεί» μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, γεγονός το οποίο επίσης αυξάνει την αβεβαιότητά του. Έχει αποδειχθεί ότι η ευαισθησία της σεισμικής επικινδυνότητας στον παράγοντα Mmax εξαρτάται από την περίοδο επανάληψης, ωστόσο σε πολύ μεγάλες περιόδους επανάληψης (10000 ετών) και συχνότητες άνω των 5 Hz η επίδρασή του είναι αμελητέα (Beauval and Scotti, 2004). Σε χαμηλότερες συχνότητες παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, διότι η γένεση του μέγιστου σεισμού είναι πολύ πιο πιθανή. Σε αντίθεση με το Mmin, η αύξηση της περιόδου επανάληψης οδηγεί σε ισχυρότερη επίδραση του Mmax στην ΠΕΣΕ. Όταν μεταβάλλεται το Mmax, ο αθροιστικός ρυθμός σεισμικότητας (cumulative seismicity rate) του ελαχίστου μεγέθους παραμένει σταθερός, επομένως η επίδραση του ρυθμού των σεισμών μικρότερου μεγέθους -οι οποίοι είναι πολυπληθέστεροι- δεν επηρεάζεται. Από το γεγονός ότι για παρόμοιες κλίσεις, b, της καμπύλης G-R η ευαισθησία στο Mmax αυξάνεται, συμπεραίνεται ότι η επιλογή του Mmax με τα μικρότερα δυνατά σφάλματα είναι ιδιαιτέρως σημαντική για περιοχές υψηλής σεισμικότητας. Η επιρροή του Mmax είναι ακόμη πιο έντονη στην επαγόμενη σεισμικότητα (induced seismicity) (Bommer and van Elk, 2017).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τα αποτελέσματα της ΠΕΣΕ δεν παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στη μεταβολή του είδους διάρρηξης (SoF). Το PGA επηρεάζεται περισσότερο από αυτόν τον παράγοντα συγκριτικά με το PGV (Σχήμα 3.4.2 και Σχήμα 3.4.3). Ο παράγοντας SoF αποτελεί μία χρήσιμη παράμετρο που αξιοποιείται από τις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ., επειδή μπορεί να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη βεβαιότητα από άλλες παραμέτρους (π.χ. *M_{max}*). Το σύνολο των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. εισαγωγή του στις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. ξεκίνησε μετά από το 2003 (Bommer et al., 2003), ενώ πλέον σε κάποιες σχέσεις παραλείπεται (μη-εργοδικές εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ., π.χ. Kotha et al., 2020). Η επίδραση του είδους διάρρηξης είναι μεγαλύτερη σε κοντινές στο ρήγμα αποστάσεις, ενώ φαίνεται να μειώνεται έντονα με την απόσταση, καθώς η σεισμική πηγή παίζει μικρότερο ρόλο σε μεγαλύτερες αποστάσεις λόγω γεωμετρικής διασποράς και απόσβεσης.



Σχήμα 3.4.2 Διαγράμματα τυφώνα (tornado diagrams) για την παράμετρο PGA: a) της Κεφαλονιάς, b) της Αθήνας, c) της Ερμούπολης, d) του Αιγίου, e) του Βόλου, f) των Χανίων, g) της Κομοτηνής, h) της Θεσσαλονίκης και, i) της Ρόδου, όπως υπολογίστηκαν στην παρούσα διατριβή, για πιθανότητα υπέρβασης 10.0% σε περίοδο επανάληψης 50 ετών.

Η κατανομή των λογαριθμικών υπολοίπων των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (ε) ακολουθεί κανονική κατανομή και θεωρητικά δεν έχει όρια. Ωστόσο, για πρακτικούς λόγους καθορίζονται κάποια πρακτικά όρια, προκειμένου να αποφευχθούν πολύ ακραίες τιμές. Συνήθως οι αρνητικές τιμές ε, οι οποίες μειώνουν τη μέση τιμή, δεν έχουν μεγάλη συνεισφορά στη σεισμική επικινδυνότητα, παρά μόνο σε πολύ υψηλές ετήσιες συχνότητες υπέρβασης. Επίσης, η συνεισφορά περισσότερων από 6 τυπικών αποκλίσεων στη σεισμική επικινδυνότητα είναι αμελητέα. Ως επί το πλείστον, οι μελέτες σεισμικής επικινδυνότητας διεξάγονται με χρήση 2 ή 3 τυπικών αποκλίσεων (π.χ. Avital et al., 2018). Ο θεωρούμενος αριθμός τους κατά την εφαρμογή των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. έχει σχετικά μικρή σημασία, όπως φαίνεται στο σύνολο των διαγραμμάτων τυφώνα που παρουσιάζονται. Θεωρήθηκαν δύο εναλλακτικά ακραία σενάρια (2 και 3 τυπικών αποκλίσεων), και για αυτόν τον λόγο η αντίστοιχη ράβδος «std» εκτείνεται αριστερά της μέσης τιμής (κατακόρυφος). Ενδεχομένως η δοκιμή περισσότερων ακραίων σεναρίων να είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της οφειλόμενης σε αυτόν τον παράγοντα διακύμανσης του PGA και του PGV, η οποία όμως θα παρέμενε μικρή.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Α.Π.Θ



Σχήμα 3.4.3 Διαγράμματα τυφώνα (tornado diagrams) για την παράμετρο PGV: a) του Πύργου, b) της Λευκάδας, c) των Ιωαννίνων, d) της Αλεξανδρούπολης, e) της Σάμου, f) του Ναυπλίου, g) της Φλώρινας, h) της Κοζάνης και, i) της Ικαρίας, όπως υπολογίστηκαν στην παρούσα διατριβή, για πιθανότητα υπέρβασης 10.0% σε περίοδο επανάληψης 50 ετών.

Οι μεταβολές των σταθερών G-R, δηλαδή οι αλλαγές στο επίπεδο και τον ρυθμό σεισμικότητας, προκαλούν τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις στη σεισμική επικινδυνότητα, και στις υψηλές (PGA) και στις ενδιάμεσες (PGV) συχνότητες. Η παράμετρος b είναι η πιο σημαντική, καθώς παίζει πρωτεύοντα ρόλο για το 66% των σημείων που εξετάστηκαν. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα δεν προκαλεί έκπληξη, δεδομένου ότι η μεταβολή της παραμέτρου b επηρεάζει την αναλογία μικρών και μεγάλων σεισμών. Η αύξησή της (μείωση κατά απόλυτη τιμή, Σχήμα 3.3.3b) προκαλεί μεγάλη αύξηση των τιμών σεισμικής επικινδυνότητας, καθώς η συνεισφορά των μεγάλων μεγεθών αυξάνεται ραγδαία. Αντίστοιχα, η μείωσή της ελαττώνει δραματικά την επίδραση των μεγάλων μεγεθών και αυξάνει ελαφρώς τη

συνεισφορά των μικρών, με αποτέλεσμα οι τιμές σεισμικής επικινδυνότητας να μειώνονται σε μεγάλο βαθμό. Η μεταβολή του ολικού επιπέδου σεισμικότητας των ζωνών (παράμετρος α) έχει πολύ σημαντική επίδραση (δεδομένου ότι συνήθως απαντάται στην τέταρτη θέση των διαγραμμάτων τυφώνα), αλλά ταυτόχρονα μικρότερη από αυτήν της κλίσης b. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η μεταβολή της προκαλεί αύξηση ή μείωση του «επιπέδου» στο Σχήμα 3.3.3a, δηλαδή της αθροιστικής συχνότητας των σεισμών όλων των μεγεθών (μικρών και μεγάλων). Από την άλλη πλευρά, η ταυτόχρονη μεταβολή των παραμέτρων *a* και *b* (παράμετρος *b'*), δηλαδή η αύξηση της αθροιστικής συχνότητας των σεισμών με ταυτόχρονη μείωση της συνεισφοράς των μεγάλων μεγεθών ή η μείωση της αθροιστικής συχνότητας με ταυτόχρονη αύξηση της συνεισφοράς των σεισμών μεγάλου μεγέθους (Σχήμα 3.3.3c), δεν επηρεάζει τόσο σημαντικά τα αποτελέσματα της σεισμικής επικινδυνότητας, ειδικά όσον αφορά το PGA. Το PGV είναι πιο ευαίσθητο σε αυτήν την αλλαγή, επειδή η παράμετρος b' έχει λίγο μικρότερη επίδραση από εκείνη του M_{max}. Αυτή η συμπεριφορά είναι λογική, αν ληφθεί υπόψη η επίδραση των μεγάλου μεγέθους σεισμών στις παραμέτρους που επηρεάζονται από χαμηλότερες συχνότητες, όπως περιγράφεται και στο Σχήμα 3.4.1. Η επίδραση της παραμέτρου είναι πάρα πολύ μικρή στο PGA, μικρότερη από την επίδραση της std και μεγαλύτερη από αυτήν της *M*_{min}.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η χρησιμοποιούμενη εμπειρική σχέση πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (GMPE) ασκεί πολύ μεγάλη επιρροή στους υπολογισμούς σεισμικής επικινδυνότητας. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, αν ληφθούν υπόψη: α) το γεγονός ότι αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό των τιμών PGA και PGV, με ταυτόχρονη συμπερίληψη παραγόντων που σχετίζονται με τη σεισμική πηγή, τον δρόμο διάδοσης και τις εδαφικές συνθήκες του σημείου παρατήρησης, και β) ότι οι εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. που εξετάστηκαν παρουσιάζουν πολύ μεγάλες διαφορές μεταξύ τους, διότι εξήχθησαν από διαφορετικές βάσεις δεδομένων, από διαφορετικά είδη αναλύσεων παλινδρόμησης και έλαβαν υπόψη διαφορετικούς παράγοντες, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τα θεωρούμενα είδη αποστάσεων μεταξύ πηγής και σημείου παρατήρησης. Επιπλέον, η διακύμανση των τιμών του PGA και του PGV λόγω της χρήσης διαφορετικών εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. εξαρτάται και από τον αριθμό των σχέσεων που εξετάζονται. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 3.4.4 (Αίγιο). Το Σχήμα 3.4.4a προέκυψε από το λογικό δέντρο που παρουσιάστηκε, ενώ για το Σχήμα 3.4.4b χρησιμοποιήθηκαν 6 GMPE, οι ASK14, BSSA14, CB14, CY14, Bi11 και CF08, και παραλείφθηκαν οι ελληνικές GMPE. Στην περίπτωση αξιοποίησης 10 εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (Σχήμα 3.4.4a) σε περίπτωση μεταβολής του GMPE το PGA κυμαίνεται μεταξύ των 0.45 g και 0.95 g, ενώ στην περίπτωση της χρήσης 6 εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (Σχήμα 3.4.4b), το PGA περιορίζεται στο εύρος τιμών 0.43-0.67 g. Στο Σχήμα 3.4.4b παρατηρούνται γενικά χαμηλότερες τιμές από ό,τι στο Σχήμα 3.4.4a, διότι για την παραγωγή του χρησιμοποιήθηκαν λιγότερα μοντέλα σεισμικών πηγών, τα οποία επηρεάζουν το σύνολο των εισαγόμενων παραμέτρων στην Ανάλυση Ευαισθησίας.



Σχήμα 3.4.4 Σύγκριση της διακύμανσης της παραμέτρου GMPE (μωβ χρώμα) στην Ανάλυση Ευαισθησίας του PGA για την πόλη του Αιγίου με χρήση a) 10 εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. και b) 6 εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ.

Οι ίδιες παρατηρήσεις σχετικά με την ετερογένεια και τον αριθμό ισχύουν και για τον παράγοντα «μοντέλο σεισμικών πηγών» (Source model), ο οποίος είναι κυρίαρχος σε πολλά από τα σημεία στα οποία διενεργήθηκε η Ανάλυση Ευαισθησίας. Οι διαφορές των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν αναλύθηκαν με λεπτομέρεια στο Κεφάλαιο 2. Και σε αυτήν την περίπτωση, η διακύμανση επηρεάζεται από τον αριθμό των μοντέλων (και των σεναρίων) που λαμβάνονται υπόψη. Το Σχήμα 3.4.5a δημιουργήθηκε βάσει του λογικού δέντρου μοντέλων επιφανειακών σεισμικών πηγών που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.1a, ενώ στους υπολογισμούς για το Σχήμα 3.4.5b δεν συμπεριλήφθηκε το μοντέλο ESHM20 (με τα αντίστοιχα σενάρια), με αποτέλεσμα η διακύμανση της ράβδου του Source model να είναι ίση με 0.26 g και 0.11 g, αντίστοιχα. Ο προσδιορισμός των σεισμικών ζωνών είναι μία δύσκολη διεργασία, διότι η συγκέντρωση και η ερμηνεία των διαθέσιμων στοιχείων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από υποκειμενικά κριτήρια. Ο χωρο-χρονικός ορισμός της σεισμικότητας και των τεκτονικών στοιχείων, από τον οποίον εξαρτάται ο ρυθμός σεισμικότητας, συνήθως χαρακτηρίζεται από υψηλή αβεβαιότητα, ιδίως στις περιοχές χαμηλής έως μέτριας σεισμικότητας. Τα όρια των σεισμικών πηγών ορίζουν τις περιοχές με διαφορετικό επίπεδο σεισμικότητας, ωστόσο υπάρχουν αρκετές περιοχές στις οποίες η υπόθεση της απότομης αλλαγής της σεισμικότητας δεν είναι ρεαλιστική, με αποτέλεσμα να προκύπτουν μεγάλες διαφορές στη σεισμική επικινδυνότητα μεταξύ σημείων που βρίσκονται σε κοντινές μεταξύ τους αποστάσεις. Τρόποι επίλυσης αυτού του προβλήματος έχουν προταθεί, μεταξύ άλλων, από τους Bender (1986) και Zahran et al. (2015).



<u>Σχήμα 3.4.5</u> Σύγκριση της διακύμανσης της παραμέτρου Source model στην Ανάλυση Ευαισθησίας του PGA για την πόλη της Μυτιλήνης (μωβ χρώμα) με χρήση: a) 4 μοντέλων επιφανειακών σεισμικών πηγών και b) 5 μοντέλων επιφανειακών σεισμικών πηγών.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων της ΠΕΣΕ στις διάφορες εισαγόμενες παραμέτρους. Για αυτόν τον σκοπό, υπολογίστηκε η ευαισθησία κάθε παραμέτρου ως ποσοστό, δηλαδή ως ο λόγος της μισής συνολικής διακύμανσής της με τη μέση τιμή της, ώστε να προκύψει μία ποσοτική ένδειξη της μέσης μεταβλητότητας. Στο Σχήμα 3.4.6 και στο Σχήμα 3.4.7 παρουσιάζεται η ευαισθησία της ΠΕΣΕ στον παράγοντα α και στον παράγοντα b, αντίστοιχα, σε συνάρτηση με τη βασική τιμή PGA και PGV για αυτήν (επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας). Στην περίπτωση του PGA (Σχήμα 3.4.6 και Σχήμα 3.4.7, αριστερά) παρατηρείται σαφής γραμμική συσχέτιση της ευαισθησίας στους παράγοντες a και b με το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας, με τα σημεία να βρίσκονται κοντά στην ευθεία ελαχίστων τετραγώνων. Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης (R) μεταξύ της ευαισθησίας στον παράγοντα a και του PGA (Σχήμα 3.4.6, αριστερά) είναι ίσος με 0.8 (ισχυρή συσχέτιση), ενώ μεταξύ της ευαισθησίας στον παράγοντα b και του PGA (Σχήμα 3.4.7, αριστερά) μειώνεται σε 0.6 (πιο ασθενής συσχέτιση). Αντιθέτως, στην περίπτωση του PGV (Σχήμα 3.4.6 και Σχήμα 3.4.7, δεξιά) δεν παρατηρείται εμφανής γραμμική συσχέτιση. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ποσοστά ευαισθησίας είναι σημαντικά υψηλότερα για την παράμετρο PGV.


Σχήμα 3.4.6 Διαγράμματα συσχέτισης της βασικής τιμής PGA (αριστερά) και PGV (δεξιά) με την ευαισθησία της ΠΕΣΕ (ποσοστό %) στην παράμετρο α σε κάθε θέση.



Σχήμα 3.4.7 Διαγράμματα συσχέτισης της βασικής τιμής PGA (αριστερά) και PGV (δεξιά) με την ευαισθησία της ΠΕΣΕ (ποσοστό %) στην παράμετρο b σε κάθε θέση].

Εμφανή γραμμική συσχέτιση της ευαισθησίας με το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας παρουσιάζει η παράμετρος *M_{max}*, τόσο για το PGA (Σχήμα 3.4.8a) όσο και για το PGV (Σχήμα 3.4.8b). Η διακύμανση της ευαισθησίας είναι μεγαλύτερη στο PGV από ό,τι στο PGA. Οι περιοχές που επηρεάζονται λιγότερο από μεταβολές του *M_{max}* είναι μέτριας προς υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας και ανήκουν κυρίως στο Ελληνικό τόξο (Καλαμάτα, Χανιά, Ηράκλειο, Σητεία, Κάρπαθος, Ρόδος κ.λπ., πράσινα πλαίσια στο Σχήμα 3.4.8), ενώ οι θέσεις με μεγαλύτερη ευαισθησία έχουν χαμηλή σεισμική επικινδυνότητα (Ερμούπολη, Ορεστιάδα, Κύθνος κ.λπ., κόκκινα πλαίσια στο Σχήμα 3.4.8).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 3.4.8 Διαγράμματα συσχέτισης της βασικής τιμής a) PGA και b) PGV με την ευαισθησία της ΠΕΣΕ (ποσοστό %) στην παράμετρο b σε κάθε θέση.

Από την άλλη πλευρά, δεν διαπιστώνεται ισχυρή γραμμική συσχέτιση της βασικής τιμής PGA και PGV και της ευαισθησίας στην παράμετρο Source model (μοντέλο σεισμικών πηγών, Σχήμα 3.4.9a και Σχήμα 3.4.9b, αντίστοιχα). Η οφειλόμενη στη μεταβλητότητα του μοντέλου σεισμικών πηγών ευαισθησία είναι μεγάλη και για τις δύο παραμέτρους (PGA και PGV). Η επιλογή του θεωρούμενου μοντέλου σεισμικών πηγών είναι πιο κρίσιμη για τις περιοχές χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας (Ερμούπολη, Ικαρία, Φλώρινα, Ορεστιάδα κ.λπ.), ενώ οι θέσεις με υψηλά επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας (Κεφαλονιά, Λευκάδα, Αίγιο, Κάρπαθος) φαίνεται ότι επηρεάζονται σε πολύ μικρότερο βαθμό. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και στην περίπτωση της ευαισθησίας της ΠΕΣΕ στη μεταβολή του κυρίαρχου είδους διάρρηξης (SoF), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4.10. Οι θέσεις που επηρεάζονται περισσότερο είναι οι περιοχές χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας (Ικαρία, Ερμούπολη, Φλώρινα, Ορεστιάδα, Κύθνος κ.λπ.), όσον αφορά και το PGA (Σχήμα 3.4.10a) και το PGV (Σχήμα 3.4.10b). Η μεταβλητότητα της ΠΕΣΕ λόγω των αλλαγών του παράγοντα SoF είναι μικρή (έως 10.4% για το PGA και έως 8.4% για το PGV). Τα αντίστοιχα σχήματα για τις υπόλοιπες παραμέτρους δεν παρουσιάζονται, είτε διότι δεν διακρίνεται κάποια συσχέτιση μεταξύ της ευαισθησίας και του επιπέδου σεισμικής επικινδυνότητας (π.χ. b', GMPE, std), είτε επειδή οι διακυμάνσεις είναι μικρές και άνευ ιδιαίτερης σημασίας (π.χ. M_{min}).



Σχήμα 3.4.9 Διαγράμματα συσχέτισης της βασικής τιμής a) PGA και b) PGV με την ευαισθησία της ΠΕΣΕ (ποσοστό %) στην παράμετρο Source model (μοντέλο σεισμικών πηγών) σε κάθε θέση.



Σχήμα 3.4.10 Διαγράμματα συσχέτισης της βασικής τιμής a) PGA και b) PGV με την ευαισθησία της ΠΕΣΕ (ποσοστό %) στην παράμετρο SoF (κυρίαρχο είδος διάρρηξης) σε κάθε θέση.

Στο Σχήμα 3.4.11 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της ευαισθησίας του PGA και του PGV στο μοντέλο σεισμικών πηγών. Και για τις δύο παραμέτρους φαίνεται ότι η ευαισθησία είναι υψηλότερη στις περιοχές χαμηλής σεισμικότητας, όπως στο Κεντρικό και Νότιο Αιγαίο (Κυκλάδες) και στη Θράκη. Η παράμετρος PGV παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία από την PGA, με ποσοστά που φτάνουν έως το

74% (με μέση μεταβλητότητα ~45%), τη στιγμή που η μέγιστη διακύμανση του PGA ισούται με 50% (με μέση μεταβλητότητα ~35%). Η μοναδική περιοχή για την οποία τα μοντέλα που εξετάστηκαν «συμφωνούν» μεταξύ τους είναι αυτή που περικλείει τη Ρόδο και την Κάρπαθο. Σε κάθε περίπτωση, από το Σχήμα 3.4.11 πιστοποιούνται οι μεγάλες διαφορές των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτίμηση της ΠΕΣΕ.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 3.4.11 Χωρική κατανομή της ευαισθησίας (μέσης σχετικής μεταβλητότητας) των: a) PGA και b) PGV στην παράμετρο Source Model (μοντέλο σεισμικών πηγών).

Η χωρική κατανομή της ευαισθησίας της ΠΕΣΕ στις ποσοτικές παραμέτρους της καμπύλης G-R, b και a, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.12. Όπως και στην περίπτωση του μοντέλου σεισμικών πηγών (Source Model), το PGV επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από τις διακυμάνσεις των παραμέτρων b και a από ό,τι το PGA. Η ευαισθησία του PGA στην παράμετρο b (Σχήμα 3.4.12a) κυμαίνεται μεταξύ 33% και 44%, ωστόσο διακρίνονται χωρικές διαφοροποιήσεις. Υψηλότερη μεταβλητότητα απαντάται στη Θράκη, η οποία αποτελεί περιοχή χαμηλής σεισμικότητας με μεγάλα, ωστόσο, ρήγματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλές περιόδους επανάληψης ισχυρών σεισμών. Υψηλή μεταβλητότητα (ευαισθησία) παρουσιάζουν τα νησιά του Κεντρικού-Νότιου Αιγαίου (Κυκλάδες), τα οποία είναι επίσης χαμηλής σεισμικότητας, ενώ έντονη επιρροή της εξεταζόμενης παραμέτρου διαφαίνεται στα Χανιά και στο Αίγιο, περιοχές μέτριας προς υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας. Τα χαμηλότερα ποσοστά απαντώνται στα νησιά του Κεντρικού Ιονίου (Λευκάδα, Κεφαλονιά κ.λπ.). Παρόμοια εικόνα παρουσιάζει και η ευαισθησία του PGV σε αυτήν την εισαγόμενη παράμετρο (Σχήμα 3.4.12b), ενώ τα ποσοστά σχετικής μεταβλητότητας (ευαισθησίας) είναι αριθμητικά υψηλότερα. Σχετικά με την ευαισθησία του PGA στην παράμετρο a (Σχήμα 3.4.12c), φαίνεται ότι -όπως και στην περίπτωση της παραμέτρου b- οι περιοχές που επηρεάζονται περισσότερο από τις

μεταβολές της είναι η Β. Ελλάδα και το Κεντρικό-Νότιο Αιγαίο. Η χωρική κατανομή της ευαισθησίας του PGV στην εξεταζόμενη παράμετρο (Σχήμα 3.4.12d) είναι ελαφρώς διαφοροποιημένη, με συγκέντρωση ιδιαιτέρως υψηλών ποσοστών (έως και ~37%) στα παράλια της Δ. Τουρκίας και στα νησιά του Α. Αιγαίου (Κως, Σάμος, Χίος και Μυτιλήνη).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 3.4.12 Χωρική κατανομή της ευαισθησίας (μέσης σχετικής μεταβλητότητας): a) του PGA στην παράμετρο b, b) του PGV στην παράμετρο b, c) του PGA στην παράμετρο a και, d) του PGV στην παράμετρο a.

Στο Σχήμα 3.4.13 απεικονίζεται η χωρική κατανομή της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων ΠΕΣΕ στις παραμέτρους *M_{max}* και *M_{min}*. Οι περιοχές που επηρεάζονται περισσότερο από τις μεταβολές του *M_{max}*, τόσο για το PGA (Σχήμα 3.4.13a) όσο και για το PGV (Σχήμα 3.4.13b), είναι χαμηλής σεισμικότητας και σεισμικής επικινδυνότητας (Θράκη, Κεντρικό-Νότιο Αιγαίο), ενώ τα μικρότερα

ποσοστά (6% και 14%, αντίστοιχα) συγκεντρώνονται στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα του Ελληνικού τόξου (Χανιά, Ηράκλειο, Κάρπαθος, Ρόδος) το οποίο χαρακτηρίζεται από μέτρια-υψηλή σεισμική επικινδυνότητα. Το Σχήμα 3.4.13c (PGA) και το Σχήμα 3.4.13d (PGV) αναδεικνύουν τη σχεδόν μηδενική μεταβολή των υπολογισμών ΠΕΣΕ από το οριζόμενο *M_{min}*. Είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι το PGV επηρεάζεται λιγότερο από μεταβολές του *M_{min}* από ό,τι το PGA, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες παραμέτρους. Πρακτικά, η επίδραση του *M_{min}* είναι αντίθετη από αυτήν του *M_{max}*, όπως επισημαίνεται και από άλλες εργασίες (Bender and Campbell, 1989; Bommer and Crowley, 2017).



Σχήμα 3.4.13 Χωρική κατανομή της ευαισθησίας: a) του PGA στην παράμετρο M_{max}, b) του PGV στην παράμετρο M_{max}, c) του PGA στην παράμετρο M_{min} και, d) του PGV στην παράμετρο M_{min}. Οι τιμές ευαισθησίας με το M_{min} (ιδίως του PGV) είναι πολύ μικρές, πρακτικά ασήμαντες.

Από το Σχήμα 3.4.14 (a και b) δεν προκύπτει κάποια συγκεκριμένη και ερμηνεύσιμη χωρική μεταβολή της ευαισθησίας της ΠΕΣΕ (PGA και PGV) στην παράμετρο *GMPE*. Τα Σχήματα αυτά, ωστόσο, αναδεικνύουν περιοχές στις οποίες οι εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. που χρησιμοποιήθηκαν στην Ανάλυση Ευαισθησίας παράγουν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα. Απουσία ερμηνεύσιμης χωρικής κατανομής της ευαισθησίας (μέσης σχετικής μεταβλητότητας της ΠΕΣΕ) παρατηρείται και για την παράμετρο *std* (Σχήμα 3.4.14c για το PGV), όμως είναι σαφές ότι οι περιοχές που επηρεάζονται περισσότερο από ενδεχόμενες μεταβολές της είναι τα νησιά του Ιονίου.



Σχήμα 3.4.14 Χωρική κατανομή της ευαισθησίας: a) του PGA στην παράμετρο GMPE, b) του PGV στην παράμετρο GMPE, c) του PGA στην παράμετρο std και, d) του PGV στην παράμετρο std.

Η χωρική κατανομή της ευαισθησίας της ΠΕΣΕ (Σχήμα 3.4.15a για το PGA και Σχήμα 3.4.15b για το PGV) στην παράμετρο b' διαφοροποιείται από αυτήν των παραμέτρων a και b, αφού η παράμετρος PGV είναι περισσότερο ευαίσθητη στις αλλαγές. Στο PGA και στο PGV, φαίνεται να υπάρχει μεγαλύτερη ευαισθησία στο BA τμήμα της περιοχής μελέτης (Αλεξανδρούπολη, Κομοτηνή, Μύρινα και Μυτιλήνη) και στα Χανιά. Η ευαισθησία της υπόλοιπης ηπειρωτικής Ελλάδας είναι μικρή. Όσον αφορά την ευαισθησία των υπολογισμών ΠΕΣΕ στην παράμετρο *SoF* (Σχήμα 3.4.15c για το PGA και Σχήμα 3.4.15d για το PGV) παρατηρείται παρόμοια χωρική κατανομή με την παράμετρο *M_{max}*, αλλά με μικρότερα ποσοστά, δηλαδή οι περιοχές που επηρεάζονται περισσότερο είναι εκείνες με χαμηλή σεισμικότητα (Θράκη και Κεντρικό-Νότιο Αιγαίο).



Σχήμα 3.4.15 Χωρική κατανομή της ευαισθησίας: a) του PGA στην παράμετρο b', b) του PGV στην παράμετρο b', c) του PGA στην παράμετρο SoF και, d) του PGV στην παράμετρο SoF.

Στην προσπάθεια να αποτιμηθεί η συνολική μεταβλητότητα των διαφόρων παραγόντων και οι επιπτώσεις τους στην ΠΕΣΕ, δημιουργήθηκαν τα σύνθετα θηκογράμματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4.16. Σε αυτά απεικονίζεται η συνολική διακύμανση της ευαισθησίας στις εισαγόμενες παραμέτρους και των 42 σημείων που εξετάστηκαν για το PGA (αριστερά) και το PGV (δεξιά). Πιο συγκεκριμένα, για κάθε θέση που μελετήθηκε επιλέχθηκε η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή PGA και PGV για κάθε εξεταζόμενο παράγοντα. Έπειτα, οι τιμές αυτές κανονικοποιήθηκαν σε σχέση με τη βασική (αναμενόμενη) τιμή για κάθε θέση. Τέλος, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των ελαχίστων και των μεγίστων κανονικοποιημένων τιμών των 42 σημείων που εξετάστηκαν για κάθε παράμετρο, και δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα θηκογράμματα, τόσο για τις θετικές, όσο και για τις αρνητικές αποκλίσεις από τη μέση τιμή.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τα θηκογράμματα του Σχήματος 3.4.16 δείχνουν τη σειρά επιρροής κάθε παράγοντα στην ΠΕΣΕ και τη διακύμανσή του για το σύνολο του Ελληνικού χώρου. Αποτελούν ένα «σύνθετο» διάγραμμα τυφώνα, στο οποίο παρατηρούνται διάφορα ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Ένα εξ αυτών είναι ότι ο παράγοντας του μοντέλου σεισμικών πηγών (*Source model*) καταλαμβάνει τη δεύτερη θέση στα θηκογράμματα, ωστόσο έχει τη μεγαλύτερη «εσωτερική» μεταβλητότητα, και στο PGA και στο PGV. Σχετικά μεγάλη εσωτερική μεταβλητότητα, αλλά σαφώς μικρότερη από αυτήν του μοντέλου σεισμικών πηγών (*SoF*). Η συνολική διακύμανση των τιμών όλων των παραγόντων είναι μεγαλύτερη στο PGV από ό,τι στο PGA, καθώς στο πρώτο η μέγιστη συνολική διακύμανση ισούται σχεδόν με 100%, ενώ στο PGA με 80%.

Και από τα δύο διαγράμματα του Σχήματος 3.4.16 καθίσταται σαφές ότι οι αβεβαιότητες των παραμέτρων G-R (*a* και *b*) και οι παράγοντες του μοντέλου πηγών (*Source model*) και εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (*GMPE*) αποτελούν τους πιο κρίσιμους παράγοντες στη διαμόρφωση της σεισμικής επικινδυνότητας. Μεταξύ των διαγραμμάτων για το PGA και το PGV παρατηρείται διαφορά στον παράγοντα *M_{max}*, ο ορισμός του οποίου είναι πολύ σημαντικότερος για το PGV, καθώς του ασκεί επιρροή συγκρίσιμη με τους παράγοντες *a*, *b*, *Source model* και *GMPE*, κάτι που δεν ισχύει στο PGA. Επιπλέον, η εσωτερική μεταβλητότητά του είναι μεγαλύτερη για το PGV, από ό,τι για το PGA. Επομένως, τα μέγιστα μεγέθη που υιοθετούνται σε ένα μοντέλο σεισμικών πηγών είναι πολύ πιο σημαντικά για τις κινήσεις χαμηλότερης συχνότητας. Για τον ίδιο λόγο, η επιρροή του παράγοντες συμβάλλουν πολύ λιγότερο στη διαμόρφωση της σεισμικής επικινδυνότητας για την εξεταζόμενη περίοδο επανάληψης για τον, υψηλής σεισμικότητας, ευρύτερο χώρο του Αιγαίου.







Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία ανάπτυξης και ο τρόπος λειτουργίας των κωδίκων παραγωγής συνθετικών σεισμικών καταλόγων και ΠΕΣΕ που αναπτύχθηκαν για να καλύψουν τις υπολογιστικές ανάγκες της παρούσας διατριβής. Για τη διενέργεια της ΠΕΣΕ επιλέχθηκε η μέθοδος προσομοίωσης τύπου Monte Carlo. Περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος παραγωγής συνθετικών καταλόγων. Κατά τη δημιουργία του κώδικα ΠΕΣΕ προέκυψαν ποικίλα ερωτήματα, κυρίως σχετικά με τον τρόπο ελάττωσης του χρόνου εκτέλεσης του προγράμματος. Ένα από τα σημαντικότερα είναι αν ο υπολογισμός των διαφόρων ειδών αποστάσεων πρέπει να γίνεται με γεωμετρικό τρόπο ή αν μπορούν να γίνουν στατιστικές μετατροπές ενός είδους απόστασης σε κάποιο άλλο. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σχετική διερεύνηση σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε προσέγγισης. Τέλος, παρέχονται σχήματα με συγκρίσεις των αποτελεσμάτων των συγκεκριμένων κωδίκων με τα αντίστοιχα από το ευρέως χρησιμοποιούμενο λογισμικό OpenQuake, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία τους.

4.1. ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΛΟΓΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ

Το πρώτο βήμα της μεθόδου προσομοίωσης τύπου Monte Carlo στην ΠΕΣΕ ήταν η δημιουργία συνθετικών καταλόγων σεισμών. Οι κατάλογοι αυτοί βασίστηκαν στα μοντέλα σεισμικών πηγών, στα οποία περιγράφονται οι ζώνες σεισμικότητας, ο ρυθμός σεισμικότητας κ.λπ. Τα συνθετικά δεδομένα παράχθηκαν με τη δημιουργία σειρών τυχαίων αριθμών οι οποίοι ακολουθούν τις επιθυμητές κατανομές. Για παράδειγμα, ο ορισμός των μεγεθών των σεισμών έγινε με παραγωγή τυχαίων αριθμών που ακολουθούν την κατανομή Gutenberg-Richter (G-R).

Όπως έχει ήδη αναλυθεί, σύμφωνα με την κατανομή G-R, ο αριθμός των σεισμών, *n*, μεγέθους *M±δM* που συμβαίνουν σε ορισμένο χώρο και χρονικό διάστημα συνδέεται με το μέγεθος με μια σχέση της μορφής *logn=a'-bM*, όπου, *a'* και *b*, κατάλληλες σταθερές. Αν αντί του αριθμού των σεισμών, *n*, χρησιμοποιηθεί η αθροιστική συχνότητα, *N*, των σεισμών μεγέθους ≥*M*, η σχέση παίρνει τη μορφή: *logN=a-bM*. Κατά την εφαρμογή αυτής της κατανομής μπορεί να θεωρηθεί είτε ότι αυτή τείνει στο ∞ (άπειρο), είτε ότι φράσσεται σε κάποιο μέγιστο μέγεθος *M*_{max}.

Όταν θεωρείται ότι υπάρχει μέγιστο μέγεθος, *M_{max}*, υπάρχουν δύο κύριες περιπτώσεις: είτε να θεωρηθεί γραμμική συσχέτιση μεταξύ του αθροιστικού αριθμού των σεισμών, *N*, με μέγεθος μεγαλύτερο του *M*, και του *M* (Σχήμα 4.1.1), είτε να θεωρηθεί γραμμική συσχέτιση μεταξύ του απλού αριθμού των σεισμών, *n*, με μέγεθος μεγαλύτερο του *M*, και του *M* (Σχήμα 4.1.2), είτε να θεωρηθεί γραμμική συσχέτιση μεταξύ του απλού αριθμού των σεισμών, *n*, με μέγεθος μεγαλύτερο του *M*, και του *M* (Σχήμα 4.1.2), είτε να θεωρηθεί γραμμική συσχέτιση μεταξύ του απλού αριθμού των σεισμών, *n*, με μέγεθος *M* (και κάποια αβεβαιότητα *δM*) και του *M* (Σχήμα 4.1.2). Στην πρώτη περίπτωση, η ευθεία G-R παρουσιάζει πολλούς «χαρακτηριστικούς» σεισμούς

(θεωρητικά άπειρους) κοντά στο *M_{max}* (Σχήμα 4.1.1, αριστερά). Η κλίση της ευθείας του διαγράμματος *logN=f(M)* (Σχήμα 4.1.1, δεξιά) είναι σταθερή, δηλαδή η σχέση είναι γραμμική. Στη δεύτερη περίπτωση, η καμπύλη *logN=f(M)* τείνει ασυμπτωτικά στο -∞, με σταδιακά αυξανόμενη κλίση (Σχήμα 4.1.2, δεξιά). Στην υφιστάμενη έκδοση του κώδικα παραγωγής συνθετικών καταλόγων υποστηρίζονται και οι δύο επιλογές. Λεπτομέρειες και για τις δύο πιθανοτικές κατανομές G-R δίνονται στο Παράρτημα Β.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 4.1.1 Κατανομές G-R του αριθμού, n, (αριστερά) και του αθροιστικού αριθμού των σεισμών, N, (δεξιά) όταν θεωρείται γραμμική μεταβολή του αθροιστικού αριθμού των σεισμών, N, μέχρι το μέγεθος M_{max}.



Σχήμα 4.1.2 Κατανομές G-R του αριθμού, n, (αριστερά) και του αθροιστικού αριθμού των σεισμών, N, (δεξιά) όταν θεωρείται γραμμική μεταβολή του αριθμού των σεισμών, n, μέχρι το μέγεθος M_{max}.

4.1.1. Αριθμός συνθετικών σεισμών ανά ζώνη και ανά πληρότητα μεγέθους

Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται αναλυτικά οι ποσοτικές σχέσεις που σχετίζονται με την κατανομή G-R, αναλόγως των σεναρίων που περιγράφηκαν προηγουμένως. Οι υπολογισμοί που παρουσιάζονται στη συνέχεια μπορούν να υλοποιηθούν ξεχωριστά για κάθε διάστημα χρονικής πληρότητας μεγεθών. Επιπλέον, ως ελάχιστο μέγεθος, *M*_{min}, μπορεί να θεωρηθεί το μέγεθος πληρότητας του συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος.

Στο πρώτο στάδιο, υπολογίζεται η αθροιστική συχνότητα των σεισμών (Ν₁) με μέγεθος *M>M_{min}*. Στην πρώτη περίπτωση (γραμμική μεταβολή του αθροιστικού αριθμού των σεισμών, *N*, μέχρι το μέγεθος *M_{max}*), αυτή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_1 = 10^{a_1 + bM_{min}} \tag{4.1}$$

ενώ στη δεύτερη (γραμμική μεταβολή του αριθμού των σεισμών, *n*, μέχρι το μέγεθος *M_{max}*) από τη σχέση:

$$N_1 = (1 - 10^{b(M_{max} - M_{min})}) 10^{a_1 + bM_{min}}$$
(4.2)

Σημειώνεται ότι το α₁ αναφέρεται στη σταθερά *α* για ένα έτος, καθώς και ότι η σταθερά *b* έχει αρνητική τιμή.

Έπειτα από τον παραπάνω υπολογισμό, η μέση περίοδος επανάληψης των σεισμών μεγέθους *M*>*M*_{min}, *t*₁, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$t_1 = \frac{1}{N_1}$$
(4.3)

ενώ ο αριθμός των σεισμών (N) με μέγεθος M>M_{min} σε χρονικό διάστημα, t, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N = \frac{t}{t_1} \tag{4.4}$$

όπου, t, το αναφερόμενο χρονικό διάστημα πληρότητας μεγέθους.

4.1.2. Χρονική κατανομή συνθετικών σεισμών

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στην περίπτωση της τυχαίας χρονικής κατανομής της σεισμικότητας, θεωρείται ότι οι συνθετικοί σεισμοί ακολουθούν τη γνωστή κατανομή Poisson. Η κατανομή αυτή εκφράζει την πιθανότητα (f) ενός δεδομένου αριθμού σεισμών (n) που συμβαίνουν σε ένα σταθερό διάστημα χρόνου (t) και σε συγκεκριμένο χώρο, αν αυτοί οι σεισμοί συμβαίνουν με γνωστό μέσο ρυθμό (λ) και είναι ανεξάρτητοι από το χρονικό διάστημα που έχει μεσολαβήσει από τον τελευταίο σεισμό (Haight, 1967). Η κατανομή Poisson δίνεται από την εξής σχέση:

$$f(nt) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!}$$
(4.5)

Η εφαρμογή της κατανομής Poisson υποθέτει ότι οι κύριοι σεισμοί αποτελούν χωρικά και χρονικά ανεξάρτητα γεγονότα και ότι η πιθανότητα να συμβούν δύο σεισμοί ταυτόχρονα στον ίδιο εξεταζόμενο χώρο (π.χ. μέσα σε μία σεισμική ζώνη) τείνει στο μηδέν.

Για την υλοποίηση των τυχαίων καταλόγων, ο χρόνος θεωρείται ίσος με μηδέν, και στη συνέχεια προστίθενται σταδιακά σε αυτόν νέοι χρόνοι (*t_{new}*), οι οποίοι είναι τυχαίοι, δηλαδή παράγονται από την κατανομή Poisson. Οι νέοι χρόνοι υπολογίζονται από τον πολλαπλασιασμό του χρόνου t₁ -περίοδος επανάληψης του *M_{min}* (μέγεθος πληρότητας για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα)- με τον νεπέριο λογάριθμο ενός τυχαίου αριθμού, *u*, της ομογενούς κατανομής που ανήκει στο διάστημα [0,1], δηλαδή από τη σχέση:

$$t_{new} = t_1 * \ln(u) \tag{4.6}$$

Η διαδικασία «πρόσθεσης» τυχαίων χρόνων περατώνεται όταν ο χρόνος γίνει ίσος ή ξεπεράσει τον χρόνο t (διάστημα πληρότητας) για τον οποίο μας ενδιαφέρει να δημιουργήσουμε τον κατάλογο. Στη συνέχεια, σε αυτούς προστίθεται το πρώτο έτος πληρότητας, προκειμένου να είναι χρονολογικώς ορθά τα παραγόμενα αποτελέσματα.

Στο Σχήμα 4.1.3 παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό ιστόγραμμα χρονικών διαστημάτων (σε έτη) που ακολουθούν κατανομή Poisson και μεσολαβούν μεταξύ δύο κύριων σεισμών, για μέση περίοδο επανάληψης t₁=0.31 έτη, όπως δημιουργήθηκε με τη Σχέση (4.6).



Σχήμα 4.1.3 Παράδειγμα ιστογράμματος χρονικών διαστημάτων (έτη) που μεσολαβούν μεταξύ δύο διαδοχικών σεισμών, το οποίο ακολουθεί εκθετική κατανομή (Poisson). Η μέση περίοδος επανάληψης των σεισμών στο συγκεκριμένο παράδειγμα (t₁) είναι 0.31 έτη.

4.1.3. Χωρική κατανομή συνθετικών σεισμών

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Για τον προσδιορισμό της χωρικής κατανομής των σεισμών, δηλαδή του γεωγραφικού πλάτους και του γεωγραφικού μήκους των επικέντρων, απαιτείται η παραγωγή σημείων εντός του πολυγώνου που σχηματίζουν τα όρια της σεισμικής πηγής. Γίνεται η παραδοχή της ομογενούς χωρικής κατανομής των σεισμών εντός της πηγής, δηλαδή δεχόμαστε ότι κάθε σημείο της έχει την ίδια πιθανότητα με τα υπόλοιπα να φιλοξενήσει κάποιον σεισμό. Η διαδικασία παραγωγής επικέντρων φαίνεται στο Σχήμα 4.1.4. Από το σχήμα της σεισμικής πηγής (Σχήμα 4.1.4a), δηλαδή από τα ελάχιστα και τα μέγιστα όρια των άκρων του πολυγώνου της, σχηματίζεται ένα ορθογώνιο το οποίο την περιέχει (Σχήμα 4.1.4b). Τα επίκεντρα ακολουθούν ομογενή κατανομή κατά γεωγραφικό μήκος και κατά γεωγραφικό πλάτος. Στη συνέχεια, τα συνθετικά μήκη και πλάτη υπολογίζονται από τους εξής τύπους: Lat
synth = $u * (Lat_{max} - Lat_{min}) + Lat_{min}$ (4.7)Lon
synth = $u * (Lon_{max} - Lon_{min}) + Lon_{min}$ (4.8)όπου, Lat
synth, το συνθετικό γεωγραφικό πλάτος, Lon
synth το συνθετικό γεωγραφικό
μήκος, Lat
max το μέγιστο γεωγραφικό πλάτος του πολυγώνου της πηγής, Lat
min το
ελάχιστο γεωγραφικό πλάτος του πολυγώνου της πηγής, Lon
max το μέγιστο
γεωγραφικό μήκος του πολυγώνου της πηγής, Lon
max το μέγιστο
γεωγραφικό μήκος του πολυγώνου της πηγής, Lon
max το μέγιστο
γεωγραφικό μήκος του πολυγώνου της πηγής, Lon
max το μέγιστο

του πολυγώνου της πηγής και, u, τυχαίος αριθμός στο διάστημα (0,1) που ακολουθεί

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

την ομογενή κατανομή. Οι αριθμοί αυτοί ορίζουν σημεία τα οποία βρίσκονται εντός του μπλε διακεκομμένου ορθογωνίου (Σχήμα 4.1.4c). Στη συνέχεια, γίνεται έλεγχος αν κάθε επίκεντρο εμπίπτει στο πολύγωνο της πηγής ή όχι. Αν δεν ανήκει σε αυτό, διαγράφεται και στη θέση του και παράγεται ένα νέο επίκεντρο, με σκοπό στο τέλος να παραχθεί ο επιθυμητός αριθμός επικέντρων μόνον εντός της πηγής (Σχήμα 4.1.4d). Προκειμένου να αποφευχθεί η χρονοβόρα διαδικασία ελέγχου της εντοπιότητας κάθε επικέντρου ξεχωριστά, επιλέχθηκε η παραγωγή δεκαπλάσιου αριθμού επικέντρων (10*N*), ο έλεγχος για όλα τα επίκεντρα ταυτόχρονα, και στη συνέχεια η διατήρηση μόνο *N* επικέντρων εντός του πολυγώνου και η απόρριψηδιαγραφή των υπόλοιπων (Σχήμα 4.1.4d). Μολονότι αυτή η διαδικασία δίνει την εντύπωση της «σπατάλης» υπολογιστικών πόρων, είναι πολύ πιο εύκολη και γρήγορη για τις σημερινές γλώσσες προγραμματισμού (π.χ. Matlab, Python), από τον έλεγχο κάθε σημείου ξεχωριστά.



Σχήμα 4.1.4 Διαδικασία παραγωγής συνθετικών επικέντρων. a) η σεισμική πηγή, b) ομογενής κατανομή των σημείων κατά γεωγραφικό μήκος (Longitude) και γεωγραφικό πλάτος (Latitude) και οριοθέτηση του ορθογωνίου (μπλε διακεκομμένες γραμμές) από τα ελάχιστα και μέγιστα όρια γεωγραφικού μήκους και πλάτους της σεισμικής πηγής, c) παραγωγή τυχαίων αριθμών που ακολουθούν την ομογενή κατανομή κατά γεωγραφικό μήκος και πλάτος εντός του ορθογωνίου, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό των τυχαίων σημείων-επικέντρων, d) τα τελικά συνθετικά επίκεντρα (μπλε σήμανση), έπειτα από την αφαίρεση των ευρισκόμενων εκτός της ζώνης (κόκκινη σήμανση).

Κατανομή βαθών συνθετικών σεισμών μήμα Γεωλογίας

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

4.1.4.

Το βάθος των επιφανειακών συνθετικών σεισμών δημιουργείται με βάση τα διαθέσιμα ιστογράμματα βαθών [ή συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας – f(x)] για τον Ελληνικό χώρο (παράδειγμα στο Σχήμα 4.1.5a). Για τα μοντέλα των Papazachos (1990) ή P1990, Papaioannou and Papazachos (2000) ή PP2000 και Vamvakaris et al. (2016a) ή V2016 χρησιμοποιήθηκαν κοινά ιστογράμματα, ενώ τα μοντέλα των Woessner et al. (2015) ή ESHM13 και Danciu et al. (2021) ή ESHM20 διαθέτουν δικά τους, τα οποία περιέχουν τρεις κλάσεις βαθών. Από κάθε ιστόγραμμα, το οποίο περιέχει την πιθανότητα γένεσης σεισμού σε ορισμένο βάθος, υπολογίστηκε η αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας [F(x)], η οποία εξ ορισμού εκτείνεται στο διάστημα [0,1] (Σχήμα 4.1.5b). Στη συνέχεια, έγινε γραμμική παρεμβολή των τιμών των πιθανοτήτων της f(x) και της F(x) ανά 1 km βάθους, ώστε να γίνουν πιο λεπτομερείς (Σχήμα 4.1.5c και Σχήμα 4.1.5d). Τέλος, τα βάθη των συνθετικών σεισμών δημιουργήθηκαν με παραγωγή τυχαίων αριθμών που ακολουθούν την ομογενή κατανομή στο διάστημα (0,1), οι οποίοι αντιστοιχούν σε κάποια τιμή της *F(x)* στο Σχήμα 4.1.5d. Ως βάθη θεωρούνται οι αντίστοιχες τιμές του άξονα x στο Σχήμα 4.1.5d.



Σχήμα 4.1.5 a) Παράδειγμα ιστογράμματος βάθους σεισμών ανά 5 km, b) Αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, F(x), του ιστογράμματος βάθους σεισμών ανά 5 km, c) Γραμμική παρεμβολή του ιστογράμματος του σχήματος (a) ανά 1 km βάθους και, d) Η αντίστοιχη F(x) του ιστογράμματος του σχήματος (c).

Ιστογράμματα διατίθενται για τις επιφανειακές ζώνες όλων των μοντέλων, καθώς και για τις ζώνες βάθους των μοντέλων ESHM13 και ESHM20. Για τις ζώνες μεγάλου βάθους των μοντέλων Ρ1990, ΡΡ2000 και V2016 και για τις ζώνες ανάστροφων ρηγμάτων του επιφανειακού τμήματος της κατάδυσης (interface) των ESHM13 και ESHM20 δημιουργήθηκαν πολυώνυμα υπολογισμού του βάθους βάσει της γεωγραφικής θέσης του σεισμού και της μορφής της καταδυόμενης πλάκας.

4.1.5. Κατανομή μεγεθών συνθετικών σεισμών

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στην πρώτη περίπτωση (γραμμική μεταβολή του αθροιστικού αριθμού των σεισμών, Ν, μέχρι το μέγεθος M_{max}), τα μεγέθη των συνθετικών σεισμών υπολογίζονται από τη σχέση:

$$M = M_{min} + \frac{1}{b * \ln(10)} \ln(u)$$
(4.9)

όπου, u, τυχαίος αριθμός της ομογενούς κατανομής που ανήκει στο διάστημα (0,1).

Στη δεύτερη περίπτωση (γραμμική μεταβολή του αριθμού των σεισμών, *n*, μέχρι το μέγεθος *M_{max}*) τα μεγέθη υπολογίζονται από τη σχέση:

$$M = M_{min} + \frac{1}{b * \ln(10)} \ln \left[1 - \left(1 - 10^{b(M_{max} - M_{min})} \right) u \right]$$
(4.10)

Η απόδειξη και των δύο σχέσεων παρατίθεται στο Παράρτημα Β.

Στο Σχήμα 4.1.6 παρουσιάζονται ενδεικτικά ιστογράμματα μεγεθών και οι αντίστοιχες ευθείες G-R για τις δύο περιπτώσεις (Σχήμα 4.1.6a και Σχήμα 4.1.6b για την πρώτη περίπτωση - χρήση της σχέσης (4.9), Σχήμα 4.1.6c και Σχήμα 4.1.6d για τη δεύτερη - σχέση (4.10)). Πρόκειται για έναν συνθετικό κατάλογο σεισμών, για την παραγωγή του οποίου χρησιμοποιήθηκε μία μόνο σεισμική πηγή και μία μόνο πληρότητα μεγεθών. Στα ιστογράμματα τα μεγέθη ακολουθούν εκθετική κατανομή. Είναι εμφανής η διαφορά των δύο καμπυλών G-R, καθώς στη δεύτερη περίπτωση τα σημεία τείνουν ασυμπτωτικά στο *M_{max}*, ενώ στην πρώτη τα σημεία τοποθετούνται σε ευθεία γραμμή μέχρι το μέγεθος *M_{max}* (το οποίο είναι ίσο με 7.2 στην πηγή που χρησιμοποιήθηκε για 4.1.6).

Στο Σχήμα 4.1.7 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα σχήματα για την περίπτωση ενός καταλόγου με πολλές σεισμικές πηγές και με πολλές πληρότητες. Ο συνθετικός κατάλογος προέκυψε από όλες τις πηγές του μοντέλου V2016 με τις εξής πληρότητες: **M**7.3 (1500-2014), **M**6.5 (1845-2014), **M**5.2 (1911-2014), **M**5.0 (1950-2014), **M**4.5 (1970-2014) και **M**4.2 (1981-2014). Αντίθετα με την περίπτωση του απλούστερου σεισμικού καταλόγου (Σχήμα 4.1.6), σε αυτά τα αποτελέσματα δεν διακρίνεται σαφώς η διαφορά των καμπυλών G-R των δύο περιπτώσεων, λόγω της ύπαρξης πολλών πληροτήτων και πολυάριθμων ζωνών.



Σχήμα 4.1.6 a) Ιστόγραμμα μεγεθών συνθετικού καταλόγου για την πρώτη περίπτωση (γραμμική μεταβολή του αθροιστικού αριθμού των σεισμών, Ν, μέχρι το μέγεθος M_{max}), b) Ευθεία G-R που αντιστοιχεί στο ιστόγραμμα του σχήματος (a), c) Ιστόγραμμα μεγεθών συνθετικού καταλόγου για τη δεύτερη περίπτωση (γραμμική μεταβολή του αριθμού των σεισμών, n, μέχρι το μέγεθος M_{max}) και, d) Ευθεία G-R αντίστοιχη του ιστογράμματος του σχήματος (c). Με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται το M_{max} της πηγής που χρησιμοποιήθηκε για το συγκεκριμένο παράδειγμα.



Σχήμα 4.1.7 Ιστόγραμμα μεγεθών συνθετικού καταλόγου για την πρώτη περίπτωση (γραμμική μεταβολή του αθροιστικού αριθμού των σεισμών, Ν, μέχρι το μέγεθος M_{max}), b) Ευθεία G-R που αντιστοιχεί στο ιστόγραμμα του σχήματος (a), c) Ιστόγραμμα μεγεθών συνθετικού καταλόγου για τη δεύτερη περίπτωση (γραμμική μεταβολή του αριθμού των σεισμών, n, μέχρι το μέγεθος M_{max}) και, d) Ευθεία G-R αντίστοιχη του ιστογράμματος του σχήματος (c).

4.1.6. Λοιπά στοιχεία διαρρήξεων των συνθετικών καταλόγων

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

μήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

Στο Σχήμα 4.1.8 απεικονίζονται τα βασικά γεωμετρικά στοιχεία των διαρρήξεων που χρησιμοποιούνται στους συνθετικούς καταλόγους. Βάσει των μεγεθών των σεισμών που συμπεριελήφθησαν στους συνθετικούς καταλόγους υπολογίστηκαν το μήκος (*L*) και το πλάτος (*W*) των διαρρήξεων των συνθετικών σεισμών με χρήση της κατάλληλης σχέσης των Wells and Coppersmith (1994), αναλόγως του τύπου της διάρρηξης. Ο υπολογισμός της επιφανειακής προβολής της διάρρηξης (τετράπλευρο *A'B'C'D'*), της προβολής του πλάτους της διάρρηξης στην επιφάνεια (*W*_s) και του βάθους του ανώτατου σημείου της διάρρηξης (*Z*_{TOP}) έγινε με κατάλληλες γεωμετρικές σχέσεις. Τέλος, έγινε προσαρμογή των στοιχείων κάθε ρήγματος με βάση τα στοιχεία των μηχανισμών γένεσης (παράταξη - *ζ*, γωνία κλίσης - *δ* και διάρρηξη βάσει των χαρακτηριστικών μηχανισμών γένεσης της εκάστοτε ζώνης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή του μηχανισμού γένεσης, αλλά και του επιπέδου του μηχανισμού (αν έγιναν αποδεκτά και τα δύο επίπεδα) έγινε με τη χρήση τυχαίων αριθμών, αναλόγως της πιθανοτικής κατανομής των ρηγμάτων κάθε ζώνης.



Σχήμα 4.1.8 Βασικά γεωμετρικά στοιχεία των συνθετικών διαρρήξεων που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε σεισμό των συνθετικών καταλόγων της παρούσας εργασίας. Το τετράπλευρο ABCD αντιπροσωπεύει την επιφάνεια του ρήγματος με μήκος L και πλάτος W, ενώ το τετράπλευρο A'B'C'D' αντιστοιχεί στην προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια της Γης, με πλάτος W_s. Η απόσταση του άνω άκρου του ρήγματος από την επιφάνεια της Γης ονομάζεται Z_{TOP}. Οι γωνίες της παράταξης, της γωνίας κλίσης και του διανύσματος ολίσθησης του ρήγματος παριστάνονται ως ζ, δ και λ, αντίστοιχα.

4.2. ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ ΤΩΝ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΙΣΧΥΡΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Για την εφαρμογή των σύγχρονων εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης ή Ι.Σ.Κ. (π.χ. NGA-West2) είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των ειδών αποστάσεων τα οποία λαμβάνουν υπόψη τον τύπο και τις διαστάσεις της σεισμικής πηγής (π.χ. απόσταση Joyner-Boore – *R_{JB}*, κοντινότερη απόσταση μεταξύ του σημείου παρατήρησης και της διάρρηξης – *R_{rup}* κ.λπ.), αφού οι σημειακές αποστάσεις (όπως η επικεντρική – *R_{epi}* και η υποκεντρική – *R_{hypo}*) θεωρούνται πλέον ξεπερασμένες. Η χρήση αυτών των ειδών αποστάσεων είναι πολύ σημαντική κυρίως σε περιπτώσεις στις οποίες οι θέσεις ενδιαφέροντος βρίσκονται κοντά στη σεισμική πηγή. Ο υπολογισμός τους μπορεί να γίνει είτε με γεωμετρικό τρόπο είτε με στατιστική μετατροπή ενός είδους απόστασης σε κάποιο άλλο (προσέγγιση που ακολουθείται από διάφορους κώδικες ΠΕΣΕ, όπως οι ΗΑΖο και ΗΑΖ45). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα είδη αυτών των αποστάσεων, ο γεωμετρικός τρόπος υπολογισμού τους και οι σχέσεις μετατροπής που δημιουργήθηκαν για τον στατιστικό υπολογισμό τους, με σκοπό τη σύγκριση των δύο τρόπων υπολογισμού και την επιλογή του βέλτιστου.

4.2.1. Είδη αποστάσεων και γεωμετρικός τους υπολογισμός

Έστω ότι γίνεται σεισμός σε κάποιο ρήγμα και είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των αποστάσεων μεταξύ αυτού και ενός σημείου παρατήρησης, *Σ* (Σχήμα 4.2.1, αριστερά). Στην περίπτωση αυτή, είναι γνωστό το μέγεθος του σεισμού (*M*), το βάθος του (*h*) και οι γεωγραφικές συντεταγμένες του επικέντρου (*φ* και λ). Επίσης, είναι γνωστές η παράταξη (ζ) και η γωνία κλίσης (δ) του ρήγματος, καθώς και οι γεωγραφικές συντεταγμένες του σημείου ενδιαφέροντος *Σ*. Από το μέγεθος του σεισμού είναι δυνατός ο υπολογισμός του μήκους (*L*) και του πλάτους (*W*) του τμήματος που διερρήχθη, με κάποια ενδεδειγμένη ημιεμπειρική σχέση. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε αυτή των Wells and Coppersmith (1994), επειδή έχει χρησιμοποιηθεί εκτενέστατα στη βιβλιογραφία και στις σχετικές μελέτες.

Αρχικά, γίνεται προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια της Γης (επιφανειακή προβολή, τετράπλευρο *ABΓΔ* στο Σχήμα 4.2.1, αριστερά). Για την απλούστευση των υπολογισμών γίνεται μετατροπή των γεωγραφικών συντεταγμένων των σημείων *A*, *B*, *Γ*, *Δ* (επιφανειακή προβολή του ρήγματος), *M* (μέσο του ρήγματος), *E* (επίκεντρο του σεισμού) και *Σ* (σημείο ενδιαφέροντος) σε καρτεσιανές. Στη συνέχεια, τα στοιχεία αυτά περιστρέφονται αριστερόστροφα κατά ζ μοίρες (παράταξη), ώστε το ρήγμα να προσανατολιστεί στη διεύθυνση Βορρά-Νότου (Σχήμα 4.2.1, δεξιά). Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει ένα σύστημα συντεταγμένων με κατακόρυφο άξονα (*Ox*) στη διεύθυνση Β-Ν και οριζόντιο άξονα (*Oy*) στη διεύθυνση Α-Δ. Το κέντρο του συστήματος βρίσκεται στο μέσο της γραμμικής προβολής της άνω πλευράς του

ρήγματος, δηλαδή στο σημείο Μ(0,0). Στο Σχήμα 4.2.1 απεικονίζονται η περιστροφή και η μορφή του τελικού συστήματος συντεταγμένων.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η περιστροφή αυτή διευκολύνει τον προσδιορισμό των συντεταγμένων των άκρων της επιφανειακής προβολής (σημεία *Α*, *Β*, *Γ*, Δ), καθώς αυτές αποτελούν πλέον συνάρτηση του μήκους, *L*, και του πλάτους, *W*. Έτσι, προκύπτουν οι συντεταγμένες των σημείων ως εξής: *A*(0,L/2) , *B*(W_s,L/2), *Γ*(W_s,-L/2) και Δ(0,-L/2), όπου, *W*_s, η επιφανειακή προβολή του πλάτους του ρήγματος, ίση με *W*cos(δ)*.



Σχήμα 4.2.1 Το σύστημα συντεταγμένων του ρήγματος πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) από την περιστροφή. Η πλευρά ΑΔ είναι η προβολή της άνω ακμής του ρήγματος, ενώ το ΑΒΓΔ είναι η επιφανειακή προβολή του. Με κόκκινο αστερίσκο (σημείο Ε) παριστάνεται το επίκεντρο του σεισμού, θεωρούμενο στο μέσο της διάρρηξης. Το σημείο Μ είναι το μέσο της ίσης με το μήκος του ρήγματος άνω πλευράς ΑΔ. Με Σ συμβολίζεται το τυχαίο σημείο ενδιαφέροντος.

Όταν το ρήγμα προσανατολίζεται στη διεύθυνση B-N, ο χώρος γύρω από αυτό χωρίζεται σε εννέα περιοχές-τμήματα (Kaklamanos et al., 2011) σε σχέση με το ρήγμα (Σχήμα 4.2.2). Αναλόγως της περιοχής στην οποία εντοπίζεται το σημείο ενδιαφέροντος, υπολογίζεται και η ζητούμενη απόσταση. Ακολουθούν μερικά παραδείγματα αποστάσεων *R*_{JB}, *R*_x, *R*_y και *R*_{y0}, ενώ ξεχωριστή ανάλυση θα γίνει για την απόσταση *R*_{rup}.



Σχήμα 4.2.2 Η επιφανειακή προβολή του ρήγματος (μπλε χρώμα) και οι εννέα περιοχές στις οποίες χωρίζεται η γειτονική περιοχή, σύμφωνα με τους Kaklamanos et al. (2011). Οι περιοχές αυτές αποτελούν το βασικό κριτήριο για τον υπολογισμό των αποστάσεων από τη σεισμική διάρρηξη.

Η απόσταση Joyner-Boore ή *R_{JB}* ορίζεται ως η ελάχιστη απόσταση μεταξύ του σημείου παρατήρησης και της προβολής του επιπέδου του ρήγματος στην επιφάνεια. Στις περιοχές 2, 4, 6 και 8 υπολογίζεται η κάθετη απόσταση μεταξύ του σημείου παρατήρησης και της εκάστοτε πλευράς της επιφανειακής προβολής, ενώ στις υπόλοιπες περιοχές μετράται η απόσταση μεταξύ αυτού και του κοντινότερου άκρου του ρήγματος (Σχήμα 4.2.3a). Αν το σημείο βρίσκεται εντός της επιφανειακής προβολής προβολής της διάρρηξης, η απόσταση αυτή γίνεται μηδενική.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η απόσταση *R_x* ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ του σημείου παρατήρησης και της γραμμικής προβολής του ρήγματος, δηλαδή της προβολής της άνω πλευράς του (πλευρά *AΔ* στο Σχήμα 4.2.1). Η απόσταση αυτή είναι ενδεικτική της θέσης του σημείου σε σχέση με το ρήγμα, καθώς είναι θετική όταν το σημείο βρίσκεται στο άνω τέμαχος (περιοχές 2, 3, 5, 6, 8 και 9, Σχήμα 4.2.3b) και αρνητική στην αντίθετη περίπτωση (περιοχές 1, 4 και 7, Σχήμα 4.2.3b).

Η απόσταση *R_{y0}* (Abrahamson et al., 2014) ορίζεται ως η κοντινότερη απόσταση μεταξύ του σημείου παρατήρησης και της επιφανειακής προβολής της διάρρηξης, μετρημένη παράλληλα στην παράταξη του ρήγματος (Σχήμα 4.2.3c). Στις περιοχές στις οποίες δεν γίνεται παράλληλη με την παράταξη μέτρηση (4, 5 και 6, Σχήμα 4.2.3c) η απόσταση αυτή είναι μηδενική. Επίσης, είναι μηδενική όταν το σημείο παρατήρησης εντοπίζεται στο κάτω τέμαχος (περιοχές 1, 4 και 7, Σχήμα 4.2.3c), καθώς η απόσταση αυτή ορίζεται μόνο στο άνω τέμαχος.

Η απόσταση *R_y* (Kaklamanos et al., 2011) ορίζεται ως η κοντινότερη απόσταση μεταξύ του σημείου παρατήρησης και της επιφανειακής προβολής της διάρρηξης, μετρημένη παράλληλα στην παράταξη του ρήγματος. Η διαφορά της από την απόσταση *R_{y0}* έγκειται στο γεγονός ότι ορίζεται και στο άνω και στο κάτω τέμαχος. Επομένως, όταν το σημείο παρατήρησης βρίσκεται στις περιοχές 1 ή 7 (Σχήμα 4.2.3d), η απόσταση *R_y* είναι διάφορη του μηδενός.

Η απόσταση *R_{rup}* ορίζεται ως η κοντινότερη απόσταση μεταξύ του σημείου παρατήρησης και της διάρρηξης. Υπάρχουν τρεις ενδεχόμενες σχετικές θέσεις του σημείου παρατήρησης και της διάρρηξης, όπως φαίνεται στην τομή στο Σχήμα 4.2.4a. Ο σχηματισμός των κάθετων προς το ρήγμα ημιευθειών με αρχικά σημεία το άνω και το κάτω άκρο του ρήγματος έχει ως αποτέλεσμα τον διαχωρισμό της περιοχής μελέτης σε τρεις ζώνες (A, B, Γ). Στις περιπτώσεις στις οποίες το σημείο παρατήρησης εντοπίζεται στις περιοχές Α και Γ, η *R_{rup}* ισούται με την απόσταση μεταξύ του σημείου αυτού και του άνω και κάτω άκρου του ρήγματος.

Στην περίπτωση της τρισδιάστατης θεώρησης της διάρρηξης, η διαδικασία υπολογισμού της *R_{rup}* είναι πιο περίπλοκη. Η γειτονική περιοχή του ρήγματος διαιρείται αναλόγως του κριτηρίου στο Σχήμα 4.2.4a, με αποτέλεσμα τον προσδιορισμό των ζωνών Α, Β και Γ (Σχήμα 4.2.4b). Αν το σημείο παρατήρησης βρίσκεται στις περιοχές 4, 5 και 6, η *R_{rup}* υπολογίζεται με τον τρόπο που περιγράφηκε στο Σχήμα 4.2.4a. Ωστόσο, αν το σημείο παρατήρησης εντοπίζεται σε κάποια από τις υπόλοιπες περιοχές, η ελάχιστη απόσταση από τη διάρρηξη προσδιορίζεται με τη χρήση παραμετρικών εξισώσεων.



Σχήμα 4.2.3 Επιφανειακή προβολή του ρήγματος (μπλε ορθογώνια) και οι αντίστοιχες αποστάσεις a) R_{JB}, b) R_x, c) R_{y0} και d) R_y, αναλόγως της περιοχής στην οποία ενδεχομένως βρίσκεται το σημείο παρατήρησης (μαύρες στιγμές). Οι αρνητικές R_x αποστάσεις (c) απεικονίζονται με γκρίζο χρώμα.



Σχήμα 4.2.4 a) Γεωμετρία του ρήγματος για τον υπολογισμό της R_{rup} σε δισδιάστατη δομή. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η διάρρηξη και με κόκκινο χρώμα φαίνονται οι τρεις περιοχές (Α, Β, Γ) που ορίζονται από τις κάθετες στη διάρρηξη ημιευθείες με αρχικά σημεία τα άκρα του ρήγματος, b) Οριοθέτηση των περιοχών Α, Β και Γ στον τρισδιάστατο χώρο.

4.2.2. Υπολογισμός της Rrup με χρήση παραμετρικών εξισώσεων και σύγκριση με τον γεωμετρικό υπολογισμό της

Έστω ότι μετατοπίζουμε το σύστημα κατά L/2 κατά τη διεύθυνση του άξονα Ox, δηλαδή στη διεύθυνση B-N, και πλέον ως σημείο A (Σχήμα 4.2.4, δεξιά) θεωρείται το σημείο (0,0). Θεωρούμε το σημείο A_{sub} με συντεταγμένες $A_{sub}(0,0,Z_{TOP})$, το οποίο συνιστά το άνω άκρο του ρήγματος που βρίσκεται κάτω από το σημείο A. Ακόμη, θεωρούμε το σημείο B_{sub} , το οποίο βρίσκεται κάτω από το σημείο B (κάτω άκρο του ρήγματος) και έχει συντεταγμένες $B_{sub}(0,W_s,Z_{TOP}+W_v)$, όπου, W_v , η παράλληλη στον κατακόρυφο άξονα κάθετος του πλάτους, ίση με $W^*sin(\delta)$. Τέλος, το σημείο Bτοποθετείται στην επιφάνεια και έχει συντεταγμένες B(x-(L/2),y,0). Η περιγραφόμενη γεωμετρία παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.5.



Σχήμα 4.2.5 Τα σημεία A_{sub}, B_{sub} και B, τα οποία τοποθετούνται στο επίπεδο YZ. Με κόκκινη στιγμή σηματοδοτείται το τυχαίο σημείο.

Ένα τυχαίο σημείο που ανήκει στο διάστημα *t*=[0,1] έχει συντεταγμένες *x(t),y(t),z(t),* όπου:

$$x(t) = 0$$

$$y(t) = W_S * t$$

$$z(t) = Z_{TOP} + W_V * t$$

Για την απόσταση, Δ, μεταξύ του τυχαίου σημείου και του σημείου Β ισχύει ότι:

$$\Delta^{2} = (x_{B} - x(t))^{2} + (y_{B} - y(t))^{2} + (z_{B} - z(t))^{2}$$
$$= (x - \frac{L}{2})^{2} + (y - W_{S} * t)^{2} + (Z_{TOP} + W_{V} * t)^{2}$$

Αν μηδενιστεί η μερική παράγωγος του Δ^2 ως προς *t* προκύπτει ότι:

$$t = \frac{y cos\delta - Z_{TOP} sin\delta}{W}$$
(4.11)

Επομένως, αρχικά υπολογίζεται η παράμετρος t με τη Σχέση (4.9), προκειμένου να βρεθεί η υποπερίπτωση στην οποία ανήκει το σημείο παρατήρησης.

Για 0≤t≤1 και

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- x>0 (περιοχές 2 και 3): Δ =
$$\left[\left(x - \frac{L}{2}\right)^2 + (y - W_s t)^2 + (Z_{TOP} + W_v t)^2\right]^{1/2}$$

x<0 (περιοχές 8 και 9, όπου οι συντεταγμένες του σημείου B είναι x+(L/2),y,0)

$$\Delta = \left[\left(x + \frac{L}{2} \right)^2 + (y - W_s t)^2 + (Z_{TOP} + W_v t)^2 \right]^{1/2}$$

- Για t<0: υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ του σημείου παρατήρησης και του σημείου (0,0,*Z*_{TOP}).
- t>1: υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ του σημείου παρατήρησης και του σημείου $(0, W_s, Z_{TOP} + W_v).$

Σύμφωνα με τους Kaklamanos et al. (2011) , για τον γεωμετρικό υπολογισμό της απόστασης R_{rup} μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω τύποι (κατά περίπτωση):

•
$$\Gamma \alpha \, \delta \neq 90^\circ$$
: $R_{rup} = \sqrt{R_{rup}'^2}$

• $\Gamma\iota\alpha \ \delta=90^{\circ} (\kappa \alpha \tau \alpha \kappa \delta \rho \upsilon \phi \circ \rho \eta \gamma \mu \alpha): R_{rup} = \sqrt{R_{JB}^{2} + Z_{TOP}^{2}}$ • $\Gamma\iota\alpha \ \delta \neq 90^{\circ}: R_{rup} = \sqrt{R_{rup}'^{2} + R_{y}^{2}},$ $\delta \pi \circ \upsilon: R_{rup}' = \begin{cases} \sqrt{R_{x}^{2} + Z_{TOP}^{2}}, & \gamma\iota\alpha \ R_{x} < Z_{TOP} tan\delta \\ R_{x} sin\delta + Z_{TOP} cos\delta, & \gamma\iota\alpha \ Z_{TOP} tan\delta \le R_{x} \le Z_{TOP} tan\delta + W sec\delta \\ \sqrt{(R_{x} - W cos\delta)^{2} + (Z_{TOP} + W sin\delta)^{2}}, & \gamma\iota\alpha \ R_{x} > Z_{TOP} tan\delta + W sec\delta \end{cases}$

Στο Σχήμα 4.2.6 συγκρίνονται οι Rrup αποστάσεις που υπολογίστηκαν με την παραμετρική εξίσωση που παρουσιάστηκε παραπάνω, με εκείνες που προέκυψαν από τη χρήση των γεωμετρικών εξισώσεων των Kaklamanos et al. (2011). Όλα τα σημεία τοποθετούνται στη διχοτόμο, συνεπώς οι αποστάσεις αυτές είναι ταυτόσημες και καθίσταται δυνατή η επιλογή του τρόπου υπολογισμού της απόστασης *R_{rup}*.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 4.2.6 Τιμές των αποστάσεων R_{rup} που υπολογίστηκαν με χρήση της παραμετρικής εξίσωσης, συγκριτικά με αυτές που προέκυψαν από τις εξισώσεις των Kaklamanos et al. (2011). Οι τιμές αυτές αναφέρονται σε διάρρηξη με παράταξη 270°, κλίση 17°, μήκος 62 km και πλάτος 25 km. Το βάθος της εστίας του σεισμού θεωρήθηκε ίσο με 40 km.

4.2.3. Νέες στατιστικές σχέσεις μετασχηματισμού αποστάσεων με χρήση συνθετικών δεδομένων

Προκειμένου να διερευνηθεί κατά πόσο μειώνεται ο χρόνος εκτέλεσης των υπολογισμών της ΠΕΣΕ, καθώς και αν τα παραγόμενα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα, δημιουργήθηκαν τρεις στατιστικές σχέσεις μετατροπής ενός είδους απόστασης σε κάποιο άλλο (μετατροπή *Repi* σε *RJB*, *Rhypo* σε *Rrup* και *Repi* σε *Rx*). Έπειτα, υπολογίστηκε η ΠΕΣΕ του ευρύτερου χώρου του Αιγαίου με τη χρήση τους και συγκρίθηκε με την αντίστοιχη που προέκυψε με την αξιοποίηση του «κλασικού», γεωμετρικού, τρόπου υπολογισμού των αποστάσεων. Παρόμοιες σχέσεις (μετατροπής της *Repi* σε *RJB* και της *Rhypo* σε *Rrup*) έχουν προσδιοριστεί από τους Scherbaum et al. (2004), από τον Abrahamson στον κώδικα Haz45 και από το πρόγραμμα CEUS (Allen et al., 2004). Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία των σχέσεων αυτών, καθώς και η σύγκρισή τους με τις λοιπές διαθέσιμες σχέσεις.

Αρχικά, δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων η οποία περιέχει όλα τα είδη αποστάσεων. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τις αποστάσεις είναι το μέγεθος του σεισμού (*M*), η απόσταση μεταξύ της άνω ακμής του ρήγματος και της επιφάνειας της Γης (*Z*_{TOP}), η γωνία κλίσης (δ), η επικεντρική απόσταση (*Dist*) μεταξύ του κέντρου της προβολής της άνω ακμής του ρήγματος (σημείο *M*, Σχήμα 4.2.1, δεξιά) και του σημείου, καθώς και η γωνία (ϑ) μεταξύ του άξονα *Ox* (Boppáς) και του σημείου παρατήρησης.

Για τον προσδιορισμό των σχέσεων δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων με όλα τα είδη των αποστάσεων (*R_{epi}*, *R_{hypo}*, *R_{JB}*, *R_{rup}*, *R_x*, *R_y*, *R_{y0}*). Οι αποστάσεις αυτές υπολογίστηκαν με γεωμετρικό τρόπο για όλους τους συνδυασμούς των παρακάτω χαρακτηριστικών:

- Διαρρήξεις μεγέθους M3.5 έως M8.5.
- Απόσταση *Ζ*_{TOP} 0-50 km.
- Γωνία κλίσης δ 5-90°.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Αποστάσεις *Dist* 0-500 km.
- Γωνία μεταξύ του άξονα Ox (Βορράς) και του σημείου παρατήρησης (ϑ) από -90° (το σημείο βρίσκεται δυτικά του ρήγματος) έως 90° (το σημείο βρίσκεται ανατολικά του ρήγματος).

Η μορφή των σχέσεων που δημιουργήθηκαν βασίστηκε σε αυτήν του Abrahamson στον κώδικα Haz45, η οποία χρησιμοποιεί μία απλή γραμμική σχέση της μορφής *y=bx* για επικεντρικές αποστάσεις μικρότερες από *L*/2, ενώ για αποστάσεις μεγαλύτερες από *L*/2 αξιοποιεί ένα πολυώνυμο μεγαλύτερου βαθμού.

$$R_{JB}{}^{Abr} = \begin{cases} \frac{1}{1.57} R_{epi} & , R_{epi} < \frac{L}{2} \\ R_{epi} - 0.625 \left(\frac{L}{2}\right) \left[1 - \frac{1}{1.5 \left(\frac{R_{epi}}{L/2}\right)^{1.5} + 1} \right] & , R_{epi} > \frac{L}{2} \end{cases}$$

Η σχέση αυτή τροποποιήθηκε. Αρχικά, επαναπροσδιορίστηκε η κρίσιμη απόσταση, L/2, αφού παρατηρήθηκε ότι η απόσταση αυτή επηρεάζεται από το είδος της διάρρηξης. Πιο συγκεκριμένα, όταν το ρήγμα είναι οριζόντιας μετατόπισης και επιδιώκεται η μετατροπή της R_{epi} σε R_{JB} , η απόσταση αυτή υποδιπλασιάζεται, ενώ υποδεκαπλασιάζεται όταν η R_{epi} μετατρέπεται σε R_x . Αυτή η μείωση πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι το μήκος των ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης είναι συνήθως μεγαλύτερο από αυτό των κανονικών και των ανάστροφων ρηγμάτων. Η πεποίθηση αυτή πιστοποιείται επιπλέον από το γεγονός ότι η κρίσιμη απόσταση βεν επηρεάζεται από τον τύπο του ρήγματος στην περίπτωση μετατροπής της R_{hypo} σε R_{rup} . Επιπλέον, προστέθηκε μία ακόμη παράμετρος (ο εκθέτης δ), και για τις αποστάσεις που δεν υπερβαίνουν την κρίσιμη απόσταση προσδιορίστηκε ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού, καθώς αυτό έδινε καλύτερη προσαρμογή στα συνθετικά δεδομένα. Οι σταθερές υπολογίστηκαν με μη-γραμμική μέθοδο αντιστροφής ελαχίστων τετραγώνων.

Παρακάτω, παρατίθενται οι σχέσεις μετατροπής (Σχέση 4.12-4.14), ο Πίνακας των σταθερών τους (Πίνακας 4.2.1) και τα αντίστοιχα Σχήματα. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.2.7, στο Σχήμα 4.2.9 και στο Σχήμα 4.2.11 οι μπλε ράβδοι (μπάρες) αντιστοιχούν στη μέση τιμή των συνθετικών αποστάσεων *R_{JB}*, *R_{rup}* και *R_x*, αντίστοιχα (μαζί με τις αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις), και τα κόκκινα σημεία επισημαίνουν

την τιμή που προσδιορίστηκε από τις ανάλογες Σχέσεις (Σχέσεις 4.12, 4.13 και 4.14, αντίστοιχα). Αξίζει να σημειωθεί ότι μικρές διαφορές μεταξύ της υπολογισμένης και της συνθετικής απόστασης δεν ασκούν μεγάλη επιρροή στη σεισμική επικινδυνότητα, καθώς στις περισσότερες εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. η απόσταση αποτελεί υπόρριζη ποσότητα, πολλαπλασιασμένη με κάποια σταθερά που μειώνει την τιμή της. Στο Σχήμα 4.2.8 και στο Σχήμα 4.2.10 αναδεικνύεται η σύγκριση μεταξύ των αποστάσεων της παρούσας εργασίας και αυτών που προέκυψαν από τις υπόλοιπες διαθέσιμες εξισώσεις. Πιο συγκεκριμένα, για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκε μία εξίσωση μετατροπής της Repi σε RJB του Norman Abrahamson (Haz45) και τρεις από το πρόγραμμα CEUS (Σχήμα 4.2.8). Για τη μετατροπή της R_{hypo} σε R_{rup}, και ο Abrahamson, και το CEUS δημιούργησαν μία εξίσωση (Σχήμα 4.2.9). Από αυτά τα Σχήματα φαίνεται ότι η προσαρμογή των συγκεκριμένων εξισώσεων δεν είναι καλή στις κοντινές αποστάσεις, τόσο στην περίπτωση υπολογισμού της R_{JB}, όσο και στην περίπτωση προσδιορισμού της R_{rup}. Επιπλέον, παρατηρείται μεγάλη διακύμανση των συνθετικών δεδομένων, κυρίως στην περίπτωση της απόστασης R_x (Σχήμα 4.2.11).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

$$R_{JB} = \begin{cases} AR_{epi} + \left[\left(\frac{\varepsilon}{L}\right)(1-A) - \alpha\left(\frac{L}{\varepsilon}\right)^{\delta-2}\left(\frac{\beta}{\beta+1}\right)\right]R_{epi}^{2} & , R_{epi} < \frac{L}{\varepsilon} \\ R_{epi} - \alpha\left(\frac{L}{\varepsilon}\right)^{\delta} \left[1 - \frac{1}{\beta\left(\frac{R_{epi}}{L/\varepsilon}\right)^{\gamma} + 1}\right] & , R_{epi} > \frac{L}{\varepsilon} \end{cases}$$

$$R_{rup} = \begin{cases} AR_{hypo} + \left[\left(\frac{\varepsilon}{L}\right)(1-A) - \alpha\left(\frac{L}{\varepsilon}\right)^{\delta-2}\left(\frac{\beta}{\beta+1}\right)\right]R_{hypo}^{2} & , R_{hypo} < \frac{L}{\varepsilon} \\ R_{hypo} - \alpha\left(\frac{L}{\varepsilon}\right)^{\delta} \left[1 - \frac{1}{\beta\left(\frac{R_{hypo}}{L/\varepsilon}\right)^{\gamma} + 1}\right] & , R_{hypo} > \frac{L}{\varepsilon} \end{cases}$$

$$(4.13)$$

$$\left(AR_{hypo} + \left[\left(\frac{\varepsilon}{L}\right)(1-A) - \alpha\left(\frac{L}{\varepsilon}\right)^{\delta-2}\left(-\frac{\beta}{\beta-1}\right)\right]R_{hypo}^{2} & R_{hypo} < \frac{L}{\varepsilon} \end{cases}$$

$$R_{x} = \begin{cases} AR_{epi} + \left[\left(\frac{\varepsilon}{L}\right)(1-A) - \alpha\left(\frac{L}{\varepsilon}\right)^{\delta^{-1}}\left(\frac{\beta}{\beta+1}\right)\right]R_{epi}^{2} & , R_{epi} < \frac{L}{\varepsilon} \\ R_{epi} - \alpha\left(\frac{L}{\varepsilon}\right)^{\delta} \left[1 - \frac{1}{\beta\left(\frac{R_{epi}}{L/\varepsilon}\right)^{\gamma} + 1}\right] & , R_{epi} > \frac{L}{\varepsilon} \end{cases}$$
(4.14)

<u>Πίνακας 4.2.1</u> Οι σταθερές των τρ	ιών σχέσεων σ	στατιστικής μετατρο	οπής των αποστα	ίσεων για
κάθε τύπο ρήγματος.				

$R_{JB} = f(R_{epi})$									
	α	β	γ	δ	ε	А			
Normal	0.99391	2.6949	1.3871	0.93292	2	0.1875			
Reverse	0.92038	2.4261	1.4438	0.94563	2	0.2543			
Strike Slip	1.6473	0.5125	1.8914	0.93487	4	0.3138			
$R_{rup} = f(R_{hypo})$									
	α	β	γ	δ	ε	Α			
Normal	5.3373	0.053571	0.40107	0.90061	0.4	0.5613			
Reverse	6.0018	0.053571	0.40578	0.86958	0.4	0.5601			
Strike Slip	6.7117	0.053571	0.43	0.82654	0.4	0.6004			

150

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

5

ſ		Rx = f(Repi)							
1	Junua Few	λονίαις	β	γ	δ	ε	Α		
1	Normal	2.5532	0.16703	1.201	1.002	0.002	0.6321		
2	Reverse	5.2678	0.072809	1.122	1.0049	0.002	0.6319		
ĩ	Strike Slip	1.801	0.25346	1.2961	1.00260	0.001	0.6317		



Σχήμα 4.2.7 Υπολογισμός των αποστάσεων R_{JB} από τις αποστάσεις R_{epi} (κόκκινα σημεία) με την εφαρμογή της Σχέσης (4.12), και η προσαρμογή τους στις μέσες τιμές των δεδομένων (μπλε ράβδοι) για μεγέθη **M**5.0 (a, b, c), **M**6.0 (d, e, f), **M**7.0 (g, h, i) και **M**8.0 (j, k, l) και για κανονική (a, d, g, j), ανάστροφη (b, e, h, k) και οριζόντιας μετατόπισης (c, f, l, l) διάρρηξη.



Σχήμα 4.2.8 Σύγκριση των R_{JB} αποστάσεων από κάθε πολυώνυμο και προσαρμογή του στις μέσες τιμές των δεδομένων (μπλε ράβδοι), για μεγέθη **M**7.0 (a, b, c) και **M**8.0 (d, e, f) και για κανονική (a, d), ανάστροφη (b, e) και οριζόντιας μετατόπισης (c, f) διάρρηξη. Διατίθενται τρεις σχέσεις μετατροπής από το πρόγραμμα CEUS (CEUS1 – μαύρα σημεία, CEUS2 - ροζ σημεία και CEUS4 – κυανά σημεία). Τα πράσινα σημεία (Haz45) αντιστοιχούν στα αποτελέσματα της σχέσης του Abrahamson. Τέλος, με κόκκινα σημεία επισημαίνονται οι τιμές που προέκυψαν από τη Σχέση (4.12) της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 4.2.9 Υπολογισμός αποστάσεων R_{rup} από τις αποστάσεις R_{hypo} (κόκκινα σημεία) με την εφαρμογή της Σχέσης (4.13), και η προσαρμογή τους στις μέσες τιμές των δεδομένων (μπλε ράβδοι) για μεγέθη **M**5.0 (a, b, c), **M**6.0 (d, e, f), **M**7.0 (g, h, i) και **M**8.0 (j, k, l) και για κανονική (a, d, g, j), ανάστροφη (b, e, h, k) και οριζόντιας μετατόπισης (c, f, l, l) διάρρηξη.



Σχήμα 4.2.10 Σύγκριση των R_{rup} αποστάσεων από κάθε πολυώνυμο και προσαρμογή του στις μέσες τιμές των δεδομένων (μπλε ράβδοι), για μεγέθη **M**7.0 (a, b, c) και **M**8.0 (d, e, f) και για κανονική (a, d), ανάστροφη (b, e) και οριζόντιας μετατόπισης (c, f) διάρρηξη. Από το πρόγραμμα CEUS διατίθεται μία σχέση στατιστικής μετατροπής (CEUS3 – μαύρα σημεία). Τα πράσινα σημεία (Haz45) αντιστοιχούν στα αποτελέσματα της σχέσης του Abrahamson. Τέλος, με κόκκινα σημεία επισημαίνονται οι τιμές που προέκυψαν από τη Σχέση (4.13) της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 4.2.11 Υπολογισμός αποστάσεων R_x από τις αποστάσεις R_{epi} (κόκκινα σημεία) με την εφαρμογή της Σχέσης (4.14), και η προσαρμογή τους στις μέσες τιμές των δεδομένων (μπλε ράβδοι) για μεγέθη **M**5.0 (a, b, c), **M**6.0 (d, e, f), **M**7.0 (g, h, i) και **M**8.0 (j, k, l) και για κανονική (a, d, g, j), ανάστροφη (b, e, h, k) και οριζόντιας μετατόπισης (c, f, l, l) διάρρηξη.

4.2.4. Σύγκριση ΠΕΣΕ με γεωμετρικό και στατιστικό υπολογισμό αποστάσεων

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Α.Π.Θ

Για να διερευνηθεί η αξιοπιστία των στατιστικών σχέσεων μετατροπής των αποστάσεων και η συμβολή τους στη μείωση του υπολογιστικού χρόνου της ΠΕΣΕ, πραγματοποίηθηκαν ορισμένες συγκρίσεις χαρτών σεισμικής επικινδυνότητας. Η επιλογή των GMPE για αυτές έγινε πρωτίστως με γνώμονα το είδος της απόστασης που χρησιμοποιείται κατά την εφαρμογή τους. Επιλέχθηκαν οι σχέσεις Bo21 (*R_{JB}*), Ca15 (*R_{rup}*) και CY14 (*R_{JB}*, *R_{rup}* και *R_x*). Η ΠΕΣΕ (τιμές PGA με πιθανότητα υπέρβασης 10.0% για περίοδο επανάληψης 50 ετών) έγινε με τις εισαγόμενες παραμέτρους (κάνναβος σημείων, εδαφικές συνθήκες, επίδραση βαθιάς λεκάνης, αριθμός και διάρκεια συνθετικών καταλόγων, κ.λπ.) που χρησιμοποιήθηκαν κατά την παραγωγή του νέου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου, όπως περιγράφονται στην ενότητα 2.7. Η μοναδική διαφορά ήταν η αξιοποίηση των προαναφερθεισών GMPE για κάθε χάρτη έναντι του λογικού δέντρου των GMPE. Για κάθε GMPE ολοκληρώθηκαν δύο υπολογισμοί σεισμικής επικινδυνότητας, ένας με γεωμετρικό υπολογισμό των αποστάσεων και ένας με τις κατάλληλες στατιστικές σχέσεις μετατροπής της ενότητας 4.2.3.

Στο Σχήμα 4.2.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ΠΕΣΕ με χρήση της σχέσης Bo21, για την οποία απαιτείται ο υπολογισμός της απόστασης *R_{JB}*. Στο Σχήμα 4.2.12a φαίνεται η χωρική μεταβολή των τιμών PGA που προκύπτουν όταν αυτή υπολογίζεται γεωμετρικά (*PGA_{Geom.}*), και στο Σχήμα 4.2.12b παρέχονται οι τιμές PGA που ευρίσκονται όταν η απόσταση *R_{epi}* μετατρέπεται σε *R_{JB}* (*PGA_{stat.}*, Σχέση 4.12). Το Σχήμα 4.2.12c δείχνει το διάγραμμα των τιμών *PGA_{stat.}* σε συνάρτηση με τις τιμές *PGA_{Geom.}*, από 0.1 g και άνω. Τέλος, το Σχήμα 4.2.12d αποτελεί το ιστόγραμμα της διαφοράς του νεπέριου λογαρίθμου των τιμών *PGA_{stat.}* από τις *PGA_{Geom.}*. Στο Σχήμα 4.2.13 και στο Σχήμα 4.2.14 παρουσιάζονται τα ίδια αποτελέσματα για τις σχέσεις Ca15 και CY14, αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 4.2.12 (σχέση Bo21, απόσταση *R_{JB}*) παρατηρείται η υποεκτίμηση των τιμών *PGA_{Stat.}* σε σχέση με τις *PGA_{Geom.}*, ιδίως των υψηλότερων από 0.4 g. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται σε περιοχές υψηλότερης σεισμικής επικινδυνότητας, όπως στην Κεφαλονιά και στο Ελληνικό τόξο. Η μέγιστη διαφορά τους παρατηρείται σε ελάχιστα σημεία και ισούται με 0.15 g. Τα περισσότερα σημεία διαφέρουν έως και 0.04 g. Η χρονική διάρκεια υπολογισμού των τιμών *PGA_{Geom.}* ήταν κατά 8% μεγαλύτερη από αυτήν των τιμών *PGA_{Stat.}*. Το ιστόγραμμα της διαφοράς των λογαρίθμων των τιμών PGA ακολουθεί κανονική κατανομή, με μέση τιμή 0.089±0.057.



Σχήμα 4.2.12 a) Χωρική μεταβολή των τιμών PGA που προκύπτουν από τον γεωμετρικό υπολογισμό της απόστασης R_{JB} (PGA_{Geom.}) κατά την εφαρμογή της σχέσης Bo21, b) Χωρική κατανομή των τιμών PGA που προκύπτουν από εφαρμογή της Σχέσης (4.12) για τον υπολογισμό των αποστάσεων R_{JB} (PGA_{Stat.}), c) Διάγραμμα των τιμών PGA_{stat.} σε συνάρτηση με τις τιμές PGA_{Geom.}, d) Ιστόγραμμα της σχετικής διαφοράς των τιμών In(PGA_{stat.}) από τις In(PGA_{Geom.}).

Οι διαφορές μεταξύ των τιμών PGA_{Stat.} και PGA_{Geom.} είναι μικρότερες όταν υπολογίζεται η R_{rup}, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2.13 (ΠΕΣΕ με χρήση της σχέσης Ca15). Σε αυτήν την περίπτωση προκύπτουν τιμές PGA_{Stat.} ελαφρώς υψηλότερες από τις PGA_{Geom.}, με τη μέγιστη διαφορά τους να ανέρχεται στα 0.05 g. Οι περισσότερες τιμές έχουν διαφορά 0-0.04 g. Με τη χρήση της Σχέσης (4.13) οι υπολογισμοί επιταχύνθηκαν κατά 10%. Χωρικά, οι κυριότερες διαφορές παρατηρούνται κυρίως στα μεγάλα ρήγματα (Ελληνικό τόξο και κλάδοι του ρήγματος της Ανατολίας στην Τάφρο του Β. Αιγαίου). Το ιστόγραμμα της διαφοράς των λογαρίθμων των τιμών PGA, PGA_{Geom.}-PGA_{Stat.}, ακολουθεί κανονική κατανομή, με μέση τιμή -0.081±0.021.



Σχήμα 4.2.13 α) Χωρική μεταβολή των τιμών PGA που προκύπτουν από τον γεωμετρικό υπολογισμό της απόστασης R_{rup} (PGA_{Geom.}) κατά την εφαρμογή της σχέσης Ca15, b) Χωρική κατανομή των τιμών PGA που προκύπτουν από την εφαρμογή της Σχέσης (4.13) για τον υπολογισμό των αποστάσεων R_{rup} (PGA_{stat.}), c) Διάγραμμα των τιμών PGA_{stat.} σε συνάρτηση με τις τιμές PGA_{Geom}, d) Ιστόγραμμα της σχετικής διαφοράς των τιμών In(PGA_{stat.}) από τις In(PGA_{Geom}).

Στο Σχήμα 4.2.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ΠΕΣΕ με εφαρμογή της σχέσης CY14 για την οποία απαιτούνται οι αποστάσεις *R_{JB}*, *R_{rup}* και *R_x*. Οι τιμές *PGA_{stat}*. είναι ελαφρώς υψηλότερες από τις *PGA_{Geom}*. κυρίως στα σημεία του Ελληνικού τόξου (ανάστροφα ρήγματα). Η κατανομή των τιμών *In(PGA_{Geom})-In(PGA_{stat}*.) είναι κανονική, με μέση τιμή -0.053±0.024. Η μέγιστη διαφορά ισούται με 0.03 g, τιμή που μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Σε αυτήν την περίπτωση, η χρονική διάρκεια της ΠΕΣΕ με γεωμετρικό υπολογισμό των αποστάσεων ήταν κατά 7% μεγαλύτερη από αυτήν με τη χρήση των Σχέσεων (4.12), (4.13) και (4.14).


Σχήμα 4.2.14 a) Χωρική μεταβολή των τιμών PGA που προκύπτουν από τον γεωμετρικό υπολογισμό των αποστάσεων R_{JB}, R_{rup} και R_x (PGA_{Geom.}) κατά την εφαρμογή της σχέσης CY14, b) Χωρική κατανομή των τιμών PGA που προκύπτουν από την εφαρμογή των Σχέσεων (4.12)-(4.14) για τον υπολογισμό των αποστάσεων R_{JB}, R_{rup} και R_x (PGA_{Stat.}), c) Διάγραμμα των τιμών PGA_{Stat.} σε συνάρτηση με τις τιμές PGA_{Geom}, d) Ιστόγραμμα της σχετικής διαφοράς των τιμών In(PGA_{Stat.}) από τις In(PGA_{Geom}).

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν δείχνουν ότι οι στατιστικές σχέσεις μετατροπής ειδών αποστάσεων λειτουργούν ικανοποιητικά και οδηγούν σε αξιόπιστα αποτελέσματα ΠΕΣΕ. Τα σφάλματα που εισάγουν στα τελικά αποτελέσματα είναι σχετικά μικρά και ανεκτά. Η μείωση της διάρκειας των υπολογισμών είναι μικρή, καθώς κυμαίνεται από 7% έως 10%. Το ποσοστό αυτό είναι ακόμη μικρότερο, όταν διενεργείται ΠΕΣΕ για λιγότερα σημεία και για μικρότερες περιοχές (αντί των 3366 σημείων που καλύπτουν το σύνολο της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου στον κάνναβο που χρησιμοποιήθηκε). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα ενδεχομένως εξαρτώνται από τη μαθηματική εξίσωση των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. που χρησιμοποιούνται κάθε

φορά, δηλαδή από το κατά πόσο οι αποστάσεις επηρεάζουν την τελική τιμή του επιπέδου σεισμικής επικινδυνότητας. Επιπλέον, ο προσδιορισμός της σχετικής με την επιφανειακή προβολή του ρήγματος περιοχής στην οποία βρίσκεται το σημείο ενδιαφέροντος (Σχήμα 4.2.2) εξακολουθεί να είναι απαραίτητος, ακόμη και αν γίνεται χρήση στατιστικών σχέσεων μετατροπής, διότι αυτή η περιοχή αποτελεί το βασικό κριτήριο για τον καθορισμό της τιμής και του προσήμου της απόστασης *R_x*, καθώς και για την απόφαση αν οι αποστάσεις *R_y* και *R_{y0}* είναι μηδενικές ή πρέπει να προσδιοριστούν. Βάσει των παραπάνω, η χρήση των στατιστικών σχέσεων μετατροπής ειδών αποστάσεων προτείνεται ως λύση μόνον όταν ο γεωμετρικός τους υπολογισμός είναι πρακτικά αδύνατος (π.χ. αδυναμία προσδιορισμού της γεωμετρίας του ρήγματος).

4.3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΕΣΕ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Για την κάλυψη των υπολογιστικών αναγκών της παρούσας διατριβής έγινε ανάπτυξη ενός κώδικα ΠΕΣΕ με τη χρήση μεθόδου προσομοίωσης τύπου Monte Carlo, σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB. Ο κώδικας δίνει τη δυνατότητα προσαρμογής των κατανομών Gumbel τύπου 1 και τύπου 3 στα αποτελέσματα και πραγματοποιεί αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας. Στο Σχήμα 4.3.1 παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας του.

Αρχικά, παράγεται ο επιθυμητός αριθμός συνθετικών καταλόγων σύμφωνα με το λογικό δέντρο των μοντέλων σεισμικών πηγών. Κάθε μοντέλο έχει ένα συγκεκριμένο βάρος το οποίο αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο αριθμό συνθετικών καταλόγων που δημιουργούνται από αυτό (Σχήμα 4.3.1a). Στη συνέχεια, βάσει του λογικού δέντρου των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (GMPE) υπολογίζεται η τιμή της παραμέτρου Υ από κάθε συνθετικό σεισμό. Κατ' αναλογίαν με το λογικό δέντρο των μοντέλων σεισμικών πηγών, οι GMPE έχουν ένα συγκεκριμένο βάρος, επομένως εφαρμόζονται σε συγκεκριμένο αριθμό σεισμών του συνθετικού καταλόγου (Σχήμα 4.3.1b). Έπειτα, ο κατάλογος χωρίζεται σε μικρότερους υποκαταλόγους, οι οποίοι έχουν χρονική διάρκεια ίση με την περίοδο επανάληψης για την οποία γίνεται η ΠΕΣΕ. Από κάθε υποκατάλογο επιλέγεται η μέγιστη τιμή Y (Ymax), δηλαδή επιλέγεται το χειρότερο δυνατό σενάριο - ο πιο καταστροφικός σεισμός που μπορεί να πλήξει το σημείο ενδιαφέροντος (Σχήμα 4.3.1c). Τέλος, συγκεντρώνονται οι μέγιστες τιμές, τοποθετούνται σε αύξουσα σειρά και επιλέγεται αυτή με την επιθυμητή πιθανότητα υπέρβασης (Y_{final}, Σχήμα 4.3.1d). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλα τα σημεία για τα οποία πρόκειται να προσδιοριστεί το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας. Για την αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας επιλέγονται όλοι οι σεισμοί που προκαλούν τιμή σεισμικής έντασης μεγαλύτερη από την Y_{final} (Σχήμα 4.3.1d, τιμές εντός της κόκκινης αγκύλης).

Κατά την εφαρμογή των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής επιλέχθηκε ο γεωμετρικός υπολογισμός των διαφόρων ειδών αποστάσεων, διότι από αυτόν προκύπτει η πραγματική απόσταση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο χρόνος εκτέλεσης των υπολογισμών δεν διαφέρει σημαντικά από τον απαιτούμενο για τον υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας με στατιστικές σχέσεις μετατροπής των ειδών αποστάσεων.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 4.3.1 Τρόπος λειτουργίας του κώδικα ΠΕΣΕ που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. a) Δημιουργία καταλόγων συνθετικών σεισμών βάσει του λογικού δέντρου των μοντέλων σεισμικών πηγών, b) Υπολογισμός των τιμών της παραμέτρου Υ για κάθε σεισμό με χρήση του λογικού δέντρου των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (GMPE), c) Διαχωρισμός του καταλόγου σε μικρότερους υποκαταλόγους χρονικής διάρκειας ίσης με την περίοδο επανάληψης, και επιλογή της μέγιστης τιμής της παραμέτρου Υ για καθέναν από αυτούς, d) Συγκέντρωση των μεγίστων τιμών Υ (Ymax) των υποκαταλόγων, τοποθέτησή τους σε αύξουσα σειρά και επιλογή της τιμής η οποία έχει την επιθυμητή πιθανότητα υπέρβασης.

4.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΕΣΕ ΑΠΟ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ OPENQUAKE ΚΑΙ ΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

88

Στην παρούσα διατριβή, οι εκτιμήσεις και η αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας του ευρύτερου χώρου του Αιγαίου πραγματοποιήθηκαν μέσω του κώδικα που περιγράφεται στην ενότητα 4.3. Εξαίρεση αποτελούν οι υπολογισμοί του Κεφαλαίου 3 (Ανάλυση Ευαισθησίας), οι οποίοι έγιναν με χρήση του λογισμικού OpenQuake. Για τους υπολογισμούς αυτούς προστέθηκαν οι παλαιότερες ελληνικές GMPE στον πηγαίο κώδικα του OpenQuake. Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζεται μία σύγκριση των αποτελεσμάτων σεισμικής επικινδυνότητας (τιμές PGA με πιθανότητα υπέρβασης 10.0% για περίοδο επανάληψης 50 ετών), όπως αυτά προκύπτουν από τον κώδικα της διατριβής και από το λογισμικό OpenQuake. Η σύγκριση αυτή είναι απαραίτητη, προκειμένου να διασφαλιστεί η αξιοπιστία και η ομοιογένεια των αποτελεσμάτων της παρούσας διατριβής. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται αποτελούν μία ενδεικτική σύγκριση, καθώς ο αριθμός των δοκιμών που διενεργήθηκαν ήταν πολύ μεγάλος, προκειμένου να διασφαλιστεί η εγκυρότητα του νέου κώδικα υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας. Πιο συγκεκριμένα, συγκρίσεις πραγματοποιούνταν κάθε φορά που εισαγόταν ένα νέο μοντέλο σεισμικών πηγών ή μία νέα GMPE στον κώδικα, ή όποτε κρινόταν απαραίτητη η διερεύνηση της επιρροής συγκεκριμένων παραγόντων των GMPE.

Ο λόγος για τον οποίο οι υπολογισμοί της παρούσας διατριβής δεν υλοποιήθηκαν μόνο με το λογισμικό OpenQuake, το οποίο είναι ένα εξαιρετικό και εύκολο στη χρήση εργαλείο υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας, ήταν οι αδυναμίες της τότε τελευταίας έκδοσής του (v3.11.3.1) στη χωρική αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας, με αποτέλεσμα ο σεισμικός κίνδυνος μιας περιοχής να εμφανίζεται ως προερχόμενος από σεισμούς τοποθετημένους κάθετα στην παράταξη των κύριων τεκτονικών δομών αντί κατά μήκος τους. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.1, στο οποίο φαίνεται η χωρική αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας των Χανίων, δηλαδή η τοποθεσία των σεισμών που μπορούν να προκαλέσουν εδαφική κίνηση η οποία υπερβαίνει το επίπεδο της σεισμικής επικινδυνότητάς τους. Τα Χανιά βρίσκονται πολύ κοντά στα κανονικά ρήγματα της Κρήτης και στα ανάστροφα ρήγματα του Ελληνικού τόξου, τα οποία στο συγκεκριμένο σημείο έχουν παράταξη ΒΑ-ΝΔ (ζώνη Τ-D7 στο Σχήμα 4.4.1). Επομένως, ο σεισμικός κίνδυνος για την πόλη αναμένεται να προέρχεται εν μέρει από τις γειτονικές της ζώνες και εν μέρει από σεισμούς που λαμβάνουν χώρα σε ολόκληρη την επιφάνεια της ζώνης T-D7, η οποία έχει κύρια διεύθυνση ίδια με την παράταξη των ανάστροφων ρηγμάτων της περιοχής (Σχήμα 4.4.1a). Από την άλλη πλευρά, η αποάθροιση με το λογισμικό OpenQuake (έκδοση v3.11.3.1) τοποθετεί τους σεισμούς της ζώνης Τ-D7 που προκαλούν κίνηση που υπερβαίνει το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας των Χανίων σε διεύθυνση BA-NΔ (Σχήμα 4.4.1b), δηλαδή σχεδόν κάθετα στην αναμενόμενη διεύθυνση και μόνο στο κέντρο της ζώνης T-D7. Πρόκειται για μη ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Ο σημαντικότερος σκοπός της ανάπτυξης ενός κώδικα υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας είναι η δυνατότητα του ερευνητή να ασκεί απόλυτο έλεγχο και να έχει πλήρη γνώση όλων των βημάτων της επεξεργασίας και των διαδικασιών της υλοποίησής τους, ιδίως όταν προτιμάται μια ανώτερη γλώσσα προγραμματισμού, όπως η MATLAB. Δυστυχώς, η διαδικασία αυτή καθίσταται σχεδόν αδύνατη σε έναν εκτενή κώδικα *ανοιχτής πηγής* (open source), με αποτέλεσμα να υπάρχει δυσκολία στην κατανόηση και στην τροποποίησή του.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 4.4.1 Ενδεικτικό παράδειγμα αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας με το μοντέλο V2016 για τα Χανιά με χρήση α) του νέου κώδικα σεισμικής επικινδυνότητας και b) του προγράμματος OpenQuake. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στη σχετική χωρική πιθανότητα γένεσης σεισμού αποάθροισης, δηλαδή σεισμού ικανού να προκαλέσει σεισμική κίνηση που υπερβαίνει το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας του σημείου ενδιαφέροντος. Είναι σαφής η τοποθέτηση της χωρικής κατανομής της πιθανότητας κάθετα στην κύρια διεύθυνση της ζώνης Τ-D7 (ανάστροφα ρήγματα της ζώνης κατάδυσης) στα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής.

Στο Σχήμα 4.4.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα των τιμών PGA που υπολογίζονται από τον νέο κώδικα ΠΕΣΕ με τη μέθοδο προσομοίωσης τύπου Monte Carlo σε συνάρτηση με αυτές που προκύπτουν από το OpenQuake. Η ΠΕΣΕ της παραμέτρου PGA υπολογίστηκε για την ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου, με χρήση του μοντέλου V2016, της GMPE De14 και αριθμό θεωρούμενων αποκλίσεων το 2. Μεταξύ των αποτελεσμάτων παρατηρείται καλή συμφωνία. Στο Σχήμα 4.4.3 φαίνεται το ιστόγραμμα του σχετικού σφάλματος του νεπέριου λογαρίθμου των τιμών PGA [(*In(PGA)-In(PGA_{OQ})*]/*In(PGA_{OQ})*] το οποίο δείχνει αυτήν την καλή συμφωνία (μέση τιμή της κατανομής του σχετικού σφάλματος: -0.047 ± 0.106).



Σχήμα 4.4.2 Οι τιμές PGA όπως προκύπτουν από τον νέο κώδικα υπολογισμού σεισμικής επικινδυνότητας με χρήση του μοντέλου V2016 και της GMPE De14, σε συνάρτηση με αυτές που υπολογίζονται από το λογισμικό OpenQuake (PGA_{OQ}) για την ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου (πιθανότητα υπέρβασης 10.0% για περίοδο επανάληψης 50 ετών).



<u>Σχήμα 4.4.3</u> Ιστόγραμμα σχετικού σφάλματος του νεπέριου λογαρίθμου των τιμών PGA, όπως υπολογίστηκαν από τον νέο κώδικα ΠΕΣΕ και από το λογισμικό OpenQuake.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΑΘΡΟΙΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Η αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας αποτελεί ένα χρήσιμο επιπλέον βήμα στην ΠΕΣΕ, το οποίο υλοποιεί την «αντίστροφη» διεργασία, δηλαδή προσδιορίζει τις σεισμικές πηγές, τα μεγέθη και τις αποστάσεις των σεισμών οι οποίοι συμβάλλουν περισσότερο στη σεισμική επικινδυνότητα του σημείου ενδιαφέροντος. Για αυτόν το λόγο, αποτελεί μια μέθοδο ιδιαίτερης σημασίας για τον αντισεισμικό σχεδιασμό. Το θεωρητικό υπόβαθρο, οι προγενέστερες έρευνες αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας και οι τρόποι με τους οποίους πραγματοποιείται, αναλύθηκαν στην ενότητα 1.8. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του τρόπου εργασίας για την αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας, ενδεικτικών αποτελεσμάτων της για διάφορες θέσεις του Ελληνικού χώρου, καθώς και των συμπερασμάτων που προκύπτουν από αυτήν.

5.1. ΑΠΟΑΘΡΟΙΣΗ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥΣ ΚΑΤΑΛΟΓΟΥΣ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Α.Π.Θ

Στην παρούσα διατριβή, ο προσδιορισμός της σεισμικής επικινδυνότητας και η αποάθροισή της έγιναν με τη μέθοδο προσομοίωσης τύπου Monte Carlo. Η αποάθροιση μπορεί να πραγματοποιηθεί έπειτα από τη συγκέντρωση των μεγίστων τιμών Y (Ymax) κάθε υποκαταλόγου (δηλαδή κάθε τμήματος του καταλόγου με χρονική διάρκεια ίση με την επιθυμητή περίοδο επανάληψης) και την κατάταξή τους κατά αύξουσα σειρά (Σχήμα 4.3.1d). Από αυτήν τη διαδικασία σχηματίζεται ένα ιστόγραμμα που ακολουθεί την κατανομή Gumbel (Σχήμα 5.1.1). Κατά την αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας επιλέγονται οι σεισμοί που προκαλούν τις τιμές Y που βρίσκονται στην «ουρά» του ιστογράμματος. Πρόκειται για τιμές υψηλότερες από το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας (τιμή με την επιθυμητή πιθανότητα υπέρβασης για την περίοδο επανάληψης των υπολογισμών), με μικρότερη πιθανότητα υπέρβασης από αυτό. Αντιστοιχούν στους πιο καταστροφικούς σεισμούς, οι οποίοι ωστόσο είναι πιο απίθανο να συμβούν κατά τη διάρκεια της περιόδου επανάληψης.

Εκτός από τη χωρική κατανομή των σεισμών που επιλέγονται, η οποία είναι ενδεικτική των σεισμικών πηγών που επηρεάζουν το σημείο ενδιαφέροντος, εξετάζονται οι κατανομές των μεγεθών τους (*M*), των αποστάσεών τους (*R*) και της παραμέτρου ε (μέση τιμή και κεντρική τιμή). Δεδομένου ότι η μέση τιμή επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από ακραίες τιμές, δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην κεντρική τιμή (τιμή που βρίσκεται στη μέση, δηλαδή το 50% των παρατηρήσεων έχουν μικρότερη τιμή και το 50% των παρατηρήσεων έχουν μεγαλύτερη τιμή είναι η πιο πιθανή τιμή της κατανομής, αυτή δηλαδή που επαναλαμβάνεται συχνότερα. Στην περίπτωση της ΠΕΣΕ με συνθετικούς καταλόγους, οι κατανομές των μεγεθών και των αποστάσεων συνίστανται από

διακριτές τιμές, επομένως οι επικρατούσες τιμές δεν έχουν ιδιαίτερη φυσική σημασία, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

А.П.Ө



Σχήμα 5.1.1 Συγκέντρωση των μεγίστων τιμών της παραμέτρου Υ για κάθε υποκατάλογο διάρκειας ίσης με την περίοδο επανάληψης για την οποία προσδιορίζεται η σεισμική επικινδυνότητα και τοποθέτησή τους σε αύξουσα σειρά (αριστερά). Ιστόγραμμα των τιμών αυτών, το οποίο ακολουθεί κατά προσέγγιση την κατανομή Gumbel, τιμή με την επιθυμητή πιθανότητα υπέρβασης (Y_{final}), η οποία αποτελεί το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας για το συγκεκριμένο σημείο (δεξιά). Οι τιμές που βρίσκονται εντός των κόκκινων πλαισίων, του καταλόγου (αριστερά) και του ιστογράμματος (δεξιά) είναι υψηλότερες από την Y_{final}, και έχουν μικρότερη πιθανότητα υπέρβασης. Οι σεισμοί που περιλαμβάνονται σε αυτά τα διαστήματα επιλέγονται για περαιτέρω ανάλυση κατά την αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας.

Η αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας διενεργήθηκε για 42 επιλεγμένες θέσεις του Ελληνικού χώρου (Σχήμα 3.3.4, Κεφάλαιο 3). Εξετάστηκε περίοδος επανάληψης 50 ετών και επιλέχθηκαν οι σεισμοί με πιθανότητα υπέρβασης μικρότερη από 10.0%. Χρησιμοποιήθηκαν 200 κατάλογοι διάρκειας 1000 ετών, επομένως για κάθε θέση ενδιαφέροντος προέκυψαν 4000 μέγιστες τιμές, εκ των οποίων αποσπάστηκαν οι 400. Για συγκριτικούς σκοπούς, οι υπολογισμοί έγιναν τόσο για κάθε μοντέλο σεισμικών πηγών (Papazachos (1190) ή P1990, Papaioannou and Papazachos (2000) ή PP2000, Vamvakaris et al. (2016a) ή V2016, Woessner et al. (2015) ή ESHM13 και Danciu et al. (2021) ή ESHM20), όσο και με χρήση του λογικού δέντρου σεισμικών πηγών (LT) που ορίστηκε για την ΠΕΣΕ του ευρύτερου χώρου του Αιγαίου (Σχήμα 2.6.1a). Επιπλέον, εφαρμόστηκαν 11 εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης (Ι.Σ.Κ.) ή GMPE, σύμφωνα με το λογικό δέντρο στο Σχήμα 2.6.1b, και θεωρήθηκε σφάλμα έως 2 τυπικών αποκλίσεων (-2≤ε≤2). Οι υπολογισμοί έγιναν για εδαφικές συνθήκες βράχου (*Vs₃₀*=800 m/s), χωρίς να ληφθούν υπόψη τυχόν επιδράσεις βαθιάς λεκάνης.

5.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΩΝ ΘΕΣΕΩΝ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ιήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας τεσσάρων σημείων ενδιαφέροντος. Σύμφωνα με αυτά, τα περισσότερα σημεία επηρεάζονται κατά κύριο λόγο από σεισμούς που συμβαίνουν σε σχετικά μικρές αποστάσεις (με ακτινική διάταξη γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος ή όχι). Ωστόσο, αρκετές από τις θέσεις ενδιαφέροντος επηρεάζονται άμεσα από τις κύριες τεκτονικές δομές της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου (π.χ. ρήγμα της Τάφρου του Β. Αιγαίου, ζώνη κατάδυσης κ.λπ.).

Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ενός σημείου που επηρεάζεται κυρίως από κοντινούς σεισμούς, οι οποίοι διατάσσονται ακτινικά γύρω από αυτό, δηλαδή κατά πάσα πιθανότητα γεννώνται μόνο στην πηγή στην οποία ανήκει, αποτελεί η Σάμος. Πρόκειται για μία περιοχή με μέτρια προς υψηλή σεισμική επικινδυνότητα, ίση με 0.39 g (η χρήση των διαφορετικών μοντέλων σεισμικών πηγών προκαλεί τη διακύμανση της τιμής από 0.33 έως 0.43 g). Στο Σχήμα 5.2.1 παρουσιάζονται οι χάρτες με τα επίκεντρα των σεισμών αποάθροισης, όπως προκύπτουν με χρήση του λογικού δέντρου σεισμικών πηγών (Σχήμα 5.2.1a) και με εφαρμογή κάθε μοντέλου ξεχωριστά (Σχήμα 5.2.1b-f). Είναι εμφανές ότι τα επίκεντρα απέχουν έως 50 km από το σημείο ενδιαφέροντος, με εξαίρεση την περίπτωση εφαρμογής του μοντέλου ESHM20 (Σχήμα 5.2.1f), κατά την οποία ορισμένα εντοπίζονται και σε μεγαλύτερες αποστάσεις (έως και 100 km). Η ομογενής κατανομή των επικέντρων γύρω από τη Σάμο είναι έκδηλη και στο Σχήμα 5.2.2, στο οποίο απεικονίζεται η σχετική πιθανότητα τοποθέτησης επικέντρου σεισμού αποάθροισης στον χώρο γύρω από τη Σάμο για κάθε σενάριο χρήσης μεμονωμένων μοντέλων σεισμικών πηγών (Σχήμα 5.2.2b-f) και του συνδυασμού τους (Σχήμα 5.2.2a).

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό των σεισμών αποάθροισης είναι το γεγονός ότι όσο αυξάνεται το μέγεθός τους αυξάνεται και η απόσταση, δεδομένου ότι οι επιδράσεις των σεισμών μεγαλύτερου μεγέθους εκτείνονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Τα ελληνικά μοντέλα (P1990 - Σχήμα 5.2.1b, PP2000 - Σχήμα 5.2.1c και V2016 - Σχήμα 5.2.1d) περιέχουν σεισμούς με μεγέθη M3.5 (σε μηδενικές από το σημείο παρατήρησης αποστάσεις) έως M<7.0. Τα ευρωπαϊκά μοντέλα (ESHM13 -Σχήμα 5.2.1e και ESHM20 - Σχήμα 5.2.1f) συμπεριλαμβάνουν και σεισμούς μεγέθους M7.0-8.0, με αυτούς του ESHM20 να είναι πολυπληθέστεροι από του ESHM13. Όπως είναι φυσικό, η εμφάνιση πολυάριθμων σεισμών μεγέθους M>7.0 στα ευρωπαϊκά μοντέλα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού τους και στα αποτελέσματα με χρήση του LT (Σχήμα 5.2.1a).

Οι διαφορές μεταξύ των κυριότερων μεγεθών και αποστάσεων των σεισμών φαίνονται με μεγαλύτερη ευκρίνεια στο Σχήμα 5.2.3, στο οποίο παρατίθενται τα διαγράμματα σχετικής πιθανότητας συνδυασμού μεγέθους-απόστασης. Στο Σχήμα 5.2.3a (διάγραμμα LT) παρατηρείται ότι οι σεισμοί αποάθροισης έχουν μέγεθος M3.5-7.5, σε αποστάσεις έως 40 km. Ο σεισμός που είναι πιθανότερο να την πλήξει, δηλαδή να προκαλέσει μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) υψηλότερη των 0.39 g, έχει μέγεθος **M**5.5-6.0, σε απόσταση 5-10 km. Τα υπόλοιπα διαγράμματα σε αυτό το Σχήμα (τα οποία αναφέρονται στην εφαρμογή των διαφορετικών μοντέλων σεισμικών πηγών) συμφωνούν με το αποτέλεσμα του LT, καθώς ο σεισμός που προβάλλουν ως πιθανότερο έχει το ίδιο μέγεθος και απόσταση. Εξαίρεση αποτελεί το διάγραμμα του μοντέλου ESHM20 (Σχήμα 5.2.3f), σύμφωνα με το οποίο ο πιθανότερος σεισμός έχει μέγεθος **M**5.5-6.5, σε απόσταση 5-20 km από το σημείο ενδιαφέροντος, αποτέλεσμα το οποίο βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με τους χάρτες των επικέντρων και της σχετικής χωρικής πιθανότητας (Σχήμα 5.2.1f και Σχήμα 5.2.2f, αντίστοιχα).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 5.2.1 Χάρτες με τους σεισμούς αποάθροισης: a) του λογικού δέντρου σεισμικών πηγών (LT) και των μοντέλων b) P1990, c) PP2000, d) V2016, e) ESHM13 και, f) ESHM20 για τη Σάμο. Σε κάθε χάρτη αναφέρεται η σεισμική επικινδυνότητα της Σάμου (τιμή PGA με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης σε περίοδο επανάληψης 50 ετών).



Σχήμα 5.2.2 Σχετική χωρική πιθανότητα εμφάνισης σεισμού αποάθροισης γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος (Σάμος, μαύρος αστερίσκος) για: a) το λογικό δέντρο σεισμικών πηγών (LT) και τα μοντέλα b) P1990, c) PP2000, d) V2016, e) ESHM13 και, f) ESHM20.



Σχήμα 5.2.3 Διαγράμματα με τη σχετική πιθανότητα συνδυασμού μεγέθους-απόστασης (επικεντρικής) των σεισμών αποάθροισης για τη Σάμο, όπως προκύπτουν με χρήση: a) του λογικού δέντρου σεισμικών πηγών (LT) και των μοντέλων b) P1990, c) PP2000, d) V2016, e) ESHM13 και, f) ESHM20.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών δείχνουν την ύπαρξη πολλών θέσεων που επηρεάζονται κυρίως από κοντινούς σεισμούς οι οποίοι δεν κατανέμονται ακτινικά γύρω από αυτές, αλλά προέρχονται από διαφορετικές σεισμικές πηγές. Η τοποθέτηση των επικέντρων επηρεάζεται κυρίως από τη γεωμετρία των σεισμικών πηγών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας θέσεων αποτελούν τα Ιωάννινα. Το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας της πόλης είναι μέτριο προς υψηλό και ισούται με 0.39 g (τιμή LT). Τα μοντέλα σεισμικών πηγών συμφωνούν μεταξύ τους ως προς το επίπεδο σεισμικότητας, καθώς όλα παράγουν τιμές που κυμαίνονται μεταξύ των 0.37 g και 0.45 g. Στο Σχήμα 5.2.4 παρουσιάζονται οι χάρτες των επικέντρων των σεισμών αποάθροισης. Σε τρία μοντέλα (PP2000 - Σχήμα 5.2.4c, V2016 - Σχήμα 5.2.4d και ESHM13 - Σχήμα 5.2.4e) παρατηρείται ότι οι περισσότεροι σεισμοί μεγάλου μεγέθους (M≥6.0) που πλήττουν τα Ιωάννινα προέρχονται κυρίως από τα δυτικά και τοποθετούνται παράλληλα με τα δυτικά παράλια, σε διεύθυνση BΔ-NA. Τα μοντέλα P1990 (Σχήμα 5.2.4b) και ESHM20 (Σχήμα 5.2.4f) διαφοροποιούνται, καθώς δεν διατάσσουν τα επίκεντρα με ένα συγκεκριμένο μοτίβο. Στα αποτελέσματα του λογικού δέντρου (Σχήμα 5.2.4a) η διάταξη των περισσότερων σεισμών μεγέθους Μ≥6.0 εντοπίζεται στα δυτικά του σημείου παρατήρησης, ωστόσο υπάρχουν και κάποιοι σεισμοί μεγαλύτερου μεγέθους στα ανατολικά και σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Ο σεισμοί αυτοί προέρχονται από τα μοντέλα ESHM13 και ESHM20.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Н ανομοιογενής κατανομή των επικέντρων γύρω από τα Ιωάννινα αποτυπώνεται ευκρινέστερα στο Σχήμα 5.2.5, το οποίο αποτελείται από χάρτες με τη σχετική πιθανότητα εμφάνισης σεισμών αποάθροισης στη γειτνίαση του σημείου ενδιαφέροντος. Η σχετική πιθανότητα χαρακτηρίζεται από ανομοιογενή χωρική κατανομή σε όλους τους χάρτες, με εξαίρεση αυτούς των μοντέλων Ρ1990 (Σχήμα 5.2.5b) και ESHM20 (Σχήμα 5.2.5f). Όπως και στην περίπτωση της Σάμου, σημειώνονται εμφανείς διαφοροποιήσεις μεταξύ των μεγεθών και των αποστάσεων των διαφόρων μοντέλων. Σύμφωνα με τα ελληνικά μοντέλα, οι σεισμοί εκτείνονται σε αποστάσεις έως περίπου 50 km, οι οποίες είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες των ευρωπαϊκών μοντέλων που φτάνουν έως και 70 km. Όσον αφορά τα μεγέθη των σεισμών, στα ευρωπαϊκά μοντέλα αυτά είναι γενικώς μεγαλύτερα, με εμφάνιση περισσότερων σεισμών μεγέθους Μ>7.0. Οι παρατηρήσεις αυτές ισχύουν και για τα διαγράμματα σχετικής πιθανότητας συνδυασμού μεγέθους-απόστασης σεισμών αποάθροισης στο Σχήμα 5.2.6, από το οποίο διαπιστώνεται ότι το εύρος των μεγεθών και των αποστάσεων είναι μεγαλύτερο στα ευρωπαϊκά μοντέλα από ό,τι στα ελληνικά. Επιπλέον, σύμφωνα με αυτά τα διαγράμματα αυτά, ο πιθανότερος σεισμός που δύναται να προκαλέσει μέγιστη εδαφική επιτάχυνση υψηλότερη των 0.39 g έχει μέγεθος M5.5-6.2 και ενδέχεται να συμβεί σε απόσταση 5-10 km, κατά πάσα πιθανότητα δυτικά των Ιωαννίνων.



Σχήμα 5.2.4 Χάρτες με τους σεισμούς αποάθροισης: a) του λογικού δέντρου σεισμικών πηγών (LT) και των μοντέλων b) P1990, c) PP2000, d) V2016, e) ESHM13 και, f) ESHM20 για τα Ιωάννινα. Σε κάθε χάρτη αναφέρεται η σεισμική επικινδυνότητα των Ιωαννίνων (τιμή PGA με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης σε περίοδο επανάληψης 50 ετών).



Σχήμα 5.2.5 Σχετική χωρική πιθανότητα εμφάνισης σεισμού αποάθροισης γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος (Ιωάννινα, μαύρος αστερίσκος) για: a) το λογικό δέντρο σεισμικών πηγών (LT) και τα μοντέλα b) P1990, c) PP2000, d) V2016, e) ESHM13 και, f) ESHM20.



Σχήμα 5.2.6 Διαγράμματα με τη σχετική πιθανότητα συνδυασμού μεγέθους-απόστασης (επικεντρικής) των σεισμών αποάθροισης για τα Ιωάννινα, όπως προκύπτουν με χρήση: a) του λογικού δέντρου σεισμικών πηγών (LT) και των μοντέλων b) P1990, c) PP2000, d) V2016, e) ESHM13 και, f) ESHM20.

Πολλά σημεία που βρίσκονται σχετικά κοντά σε μεγάλες κυρίαρχες τεκτονικές δομές της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου επηρεάζονται τόσο από κοντινούς σεισμούς, οι οποίοι οφείλονται στα κοντινά τους ρήγματα, όσο και από πιο μακρινούς. Επιπλέον, οι μακρινοί σεισμοί επηρεάζουν θέσεις χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας. Οι ισχυρότεροι σεισμοί που συμβαίνουν σε μεγάλες αποστάσεις προκαλούν κίνηση με ένταση μεγαλύτερη από το χαμηλό επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας των κοντινών σεισμών, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι γίνονται αισθητοί ή προκαλούν καταστροφές σε αυτές τις περιοχές. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα θέσης με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αποτελούν τα Χανιά. Δέχονται σεισμικές επιταχύνσεις από τα, κυρίως κανονικά, ρήγματα της Κρήτης που βρίσκονται στη γειτονική τους περιοχή (π.χ. ρήγματα Β-Ν παράταξης στη χερσόνησο Ροδωπού κ.λπ.) και από τα μεγάλα ανάστροφα ρήγματα του ΝΔ τμήματος του κατώτερου Ελληνικού τόξου. Επιπλέον, συνιστούν μία περιοχή για την οποία σημειώνονται αρκετές ασυμφωνίες μεταξύ των μοντέλων σεισμικών πηγών, τόσο ως προς το επίπεδο της σεισμικής επικινδυνότητας, όσο και στα αποτελέσματα της αποάθροισης. Βάσει των αποτελεσμάτων με χρήση του λογικού δέντρου σεισμικών πηγών (LT), τα Χανιά συγκαταλέγονται στις περιοχές μέτριας σεισμικής επικινδυνότητας, με τιμή PGA ίση με 0.35 g, η οποία ωστόσο διαφοροποιείται αρκετά, αναλόγως του μοντέλου σεισμικών πηγών που αξιοποιείται κάθε φορά (0.21-0.50 g). Σε κάθε περίπτωση, η πραγματική σεισμική επικινδυνότητα των Χανίων είναι σίγουρα υψηλότερη από την τιμή που υπολόγισε η παρούσα εργασία, καθώς στη διαμόρφωσή της συντελούν σε κάποιον βαθμό και οι σεισμοί ενδιαμέσου βάθους.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στο Σχήμα 5.2.7 παρουσιάζονται οι χάρτες με τα επίκεντρα των σεισμών αποάθροισης. Η χωρική κατανομή των σεισμών που προτείνεται από το μοντέλο Ρ1990 δεν κρίνεται ρεαλιστική (Σχήμα 5.2.7b), διότι σύμφωνα με αυτό τα Χανιά ανήκουν στις περιοχές σεισμικότητας υποβάθρου, με αποτέλεσμα να διαγράφονται έντονα οι γειτονικές σεισμικές πηγές. Το μοντέλο υποστηρίζει ότι, εκτός των κοντινών τους σεισμών, τα Χανιά επηρεάζονται από σεισμούς που συμβαίνουν πιο νότια στη ζώνη κατάδυσης, καθώς και ΒΔ τους. Η τιμή σεισμικής επικινδυνότητας είναι χαμηλή (0.21 g), συνεπώς είναι εύκολο να γίνει στη συγκεκριμένη περιοχή κάποιος σεισμός ικανός να προκαλέσει κίνηση που την υπερβαίνει. Από αυτούς τους σεισμούς προκύπτει το Σχήμα 5.2.8b, στο οποίο φαίνονται οι τρεις πιο «επικίνδυνες» για τα Χανιά περιοχές. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 5.2.9b φαίνεται ότι ορίζονται τρεις «σεισμοί σχεδιασμού», εκ των οποίων μεγαλύτερη σχετική πιθανότητα έχει ο μεγέθους M4.5-5.0 σε απόσταση 40-90 km. Στο ίδιο εύρος αποστάσεων και με ελαφρώς μικρότερη σχετική πιθανότητα ενδέχεται να συμβεί σεισμός με M6.0-7.5. Τέλος, υπάρχει μικρή πιθανότητα το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας να υπερβληθεί από σεισμό μεγέθους **M**5.5 σε απόσταση 0-20 km.

Η χωρική κατανομή των σεισμών, σύμφωνα με τα υπόλοιπα μοντέλα και με το λογικό δέντρο τους, είναι παρόμοια ως προς τον χωρισμό των σεισμών αποάθροισης σε δύο ομάδες: μία με μικρότερα μεγέθη σε πολύ κοντινές στα Χανιά αποστάσεις, και μία πιο απομακρυσμένη με μεγαλύτερα μεγέθη. Οι μακρινοί σεισμοί κατανέμονται κατά μήκος της ζώνης κατάδυσης. Στο μοντέλο PP2000 (Σχήμα 5.2.7c, Σχήμα 5.2.8c), οι σεισμοί που προέρχονται από τη σεισμική πηγή η οποία καλύπτει μερικώς τη ζώνη κατάδυσης είναι πολυπληθέστεροι από αυτούς που τοποθετούνται στα Χανιά, με αποτέλεσμα η σχετική πιθανότητα τα Χανιά να πληγούν από μία από τις δύο αυτές περιοχές να είναι περίπου ίδια. Τα μεγέθη των απομακρυσμένων σεισμών κυμαίνονται μεταξύ M6.0 και M7.0 και των κοντινών από M5.0 έως M6.0. Βάσει του διαγράμματος στο Σχήμα 5.2.9c, προτείνονται δύο πιθανότεροι σεισμοί: ο πρώτος είναι μεγέθους M5.0-6.0 και απέχει 0-20 km, και ο

δεύτερος (και πιο πιθανός) έχει μέγεθος **M**7.0-7.5 και ενδέχεται να συμβεί σε απόσταση 30-90 km. Το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας ισούται με 0.37 g, αποτέλεσμα το οποίο συμφωνεί με την τάση του συγκεκριμένου μοντέλου να παράγει γενικώς υψηλότερα επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας (ενότητα 2.3).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 5.2.7 Χάρτες με τους σεισμούς αποάθροισης: a) του λογικού δέντρου σεισμικών πηγών (LT) και των μοντέλων b) P1990, c) PP2000, d) V2016, e) ESHM13 και, f) ESHM20 για τα Χανιά. Σε κάθε χάρτη αναφέρεται η σεισμική επικινδυνότητα των Χανίων (τιμή PGA με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης σε περίοδο επανάληψης 50 ετών).

Το μοντέλο V2016 προτείνει επίσης δύο ομάδες σεισμών που προκαλούν επιτάχυνση υψηλότερη από 0.24 g (Σχήμα 5.2.7d). Το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας είναι χαμηλό, σε συμφωνία με το P1990. Όπως και με το PP2000, η πρώτη ομάδα αποτελείται από σεισμούς μεγέθους **M**3.5-6.0 σε μικρές από τα Χανιά

αποστάσεις (έως 20 km), και η δεύτερη από μεγαλύτερους σεισμούς (**M**6.0-8.0) σε αποστάσεις έως και 100 km, κατά μήκος της ζώνης κατάδυσης. Οι σεισμοί της δεύτερης ομάδας είναι σημαντικά λιγότεροι τόσο από αυτούς της πρώτης ομάδας, όσο και από αυτούς της δεύτερης ομάδας του μοντέλου PP2000, επομένως η σχετική τους πιθανότητα (χωρικά) είναι μικρότερη (Σχήμα 5.2.8d). Σε αντίθεση με το PP2000, υπάρχουν μερικοί σεισμοί με μέγεθος M≥8.0. Από το Σχήμα 5.2.9d προκύπτουν δύο χαρακτηριστικοί σεισμοί. Ο πρώτος έχει μέγεθος **M**4.5-6.3 σε αποστάσεις 0-30 km, ενώ ο δεύτερος χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο μέγεθος (**M**7.0-8.0) σε μεγαλύτερες αποστάσεις (40-100 km).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το μοντέλο ESHM13 παρουσιάζει πολύ λίγους σεισμούς αποάθροισης σε μεγάλες αποστάσεις από τα Χανιά, με αποτέλεσμα να δίνεται η λανθασμένη εικόνα ότι η συμβολή της ζώνης κατάδυσης στη σεισμική επικινδυνότητα είναι σχεδόν ανύπαρκτη (Σχήμα 5.2.7e και Σχήμα 5.2.8e). Οι σεισμοί μεγάλου μεγέθους (M7.0-8.0) γίνονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις (έως και 150 km). Τα επίκεντρα των σεισμών με μέγεθος Μ≥8.0 βρίσκονται σε περιοχές όπου στην πραγματικότητα δεν έχουν εκδηλωθεί σεισμοί παρόμοιου μεγέθους και των οποίων η γένεση θεωρείται απίθανη, βάσει των ρηξιγενών τους ζωνών (Ν. Πελοπόννησος και Κεντρική Κρήτη). Η τιμή PGA με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης σε περίοδο επανάληψης 50 ετών ισούται με 0.31 g. Αντίθετα, το ESHM20 παρουσιάζει δύο ομάδες σεισμών, όπως και στα PP2000 και V2016 (Σχήμα 5.2.7f και Σχήμα 5.2.8f). Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχουν περισσότεροι σεισμοί μεγέθους M≥8.0 σε περιοχές όπου θεωρείται απίθανο να συμβούν (π.χ. Ν. Πελοπόννησος, Κύθηρα). Τα επίκεντρα των μεγαλύτερων σεισμών τοποθετούνται παράλληλα με τη ζώνη κατάδυσης αλλά βορειότερα από αυτήν, με αποτέλεσμα να προκύπτουν μη-ρεαλιστικά σενάρια. Επιπλέον, η ύπαρξη μεγάλου πλήθους σεισμών με μέγεθος Μ≥8.0 οδηγεί στην υπερεκτίμηση του επιπέδου σεισμικής επικινδυνότητας, με τιμή PGA (0.50 g), πολύ υψηλότερη από αυτήν που υπολογίζεται από τη χρήση των υπόλοιπων μοντέλων σεισμικών πηγών. Από τα διαγράμματα των ESHM13 και ESHM20 (Σχήμα 5.2.9e και Σχήμα 5.2.9f, αντίστοιχα) παρατηρείται ότι η σεισμική επικινδυνότητα των Χανίων οφείλεται σε σεισμούς μεγέθους M5.0-8.0 σε αποστάσεις έως 60 km.



Σχήμα 5.2.8 Σχετική χωρική πιθανότητα εμφάνισης σεισμού αποάθροισης γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος (Χανιά, μαύρος αστερίσκος) για: a) το λογικό δέντρο σεισμικών πηγών (LT) και τα μοντέλα b) P1990, c) PP2000, d) V2016, e) ESHM13 και, f) ESHM20.

Η αποάθροιση με τη χρήση λογικού δέντρου σεισμικών πηγών (Σχήμα 5.2.7a, Σχήμα 5.2.8a και Σχήμα 5.2.9a) παρέχει αποτελέσματα τα οποία συμφωνούν με τα περισσότερα μοντέλα, παρά τις επιμέρους διαφορές τους. Σύμφωνα με αυτά (Σχήμα 5.2.9a), το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας των Χανίων μπορεί να υπερβληθεί κυρίως από σεισμούς που συμβαίνουν σε κοντινές αποστάσεις (έως 40 km) με μέγεθος **M**5.0-6.5. Ακόμη, είναι πιθανό να υπερβληθεί και από σεισμούς μεγαλύτερου μεγέθους (**M**7.0-8.0) που λαμβάνουν χώρα σε πιο μακρινές αποστάσεις (40-100 km). Οι απομακρυσμένοι σεισμοί προέρχονται κυρίως από τη ζώνη κατάδυσης (Σχήμα 5.2.8a). Ωστόσο, στο Σχήμα 5.2.7a καταγράφεται η ύπαρξη μερικών σεισμών μεγέθους Μ≥8.0 σε περιοχές που δεν έχουν τη δυναμική να τους γεννήσουν, λόγω του μεγάλου βάρους του μοντέλου ESHM20 στο λογικό δέντρο των σεισμικών πηγών.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 5.2.9 Διαγράμματα με τη σχετική πιθανότητα συνδυασμού μεγέθους-απόστασης (επικεντρικής) των σεισμών αποάθροισης για τα Χανιά, όπως προκύπτουν με χρήση: a) του λογικού δέντρου σεισμικών πηγών (LT) και των μοντέλων b) P1990, c) PP2000, d) V2016, e) ESHM13 και, f) ESHM20.

Μία άλλη περιοχή που επηρεάζεται από κοντινούς και από μακρινούς σεισμούς είναι η Αλεξανδρούπολη. Το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας της πόλης είναι χαμηλό (0.22 g), καθώς ανήκει σε μία τεκτονικά ήσυχη γεωτεκτονική ενότητα (Θράκη). Η περιοχή χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη ρηγμάτων μεγάλου μήκους με μεγάλες περιόδους επανάληψης, και από τη σχετικά μικρή της απόσταση από τον βόρειο κλάδο του δεξιόστροφου ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης της Τάφρου του Β. Αιγαίου.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.10 και στο Σχήμα 5.2.11, όλα τα μοντέλα συμφωνούν ότι το σημείο ενδιαφέροντος επηρεάζεται από δύο τουλάχιστον σεισμικές πηγές, δηλαδή υπάρχουν δύο ομάδες σεισμών ικανών να προκαλέσουν σεισμική επιτάχυνση υψηλότερη από το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής. Στην πρώτη εντάσσονται κυρίως σεισμοί που συμβαίνουν σε κοντινές στην Αλεξανδρούπολη αποστάσεις (έως 50 km) με μεγέθη M3.5-6.0. Η δεύτερη περιέχει μεγάλους σεισμούς (M≥7.0) που λαμβάνουν χώρα στην Τάφρο του B. Αιγαίου σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 50 km. Η χωρική κατανομή των επικέντρων επηρεάζεται καθοριστικά από τα όρια, το σχήμα και το μέγεθος των σεισμικών πηγών. Στα μοντέλα P1990 (Σχήμα 5.2.10b), ESHM13 (Σχήμα 5.2.10e) και ESHM20 (Σχήμα 5.2.10f) οι σεισμοί αποάθροισης εκτείνονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις, διότι οι σεισμικές πηγές έχουν μεγάλο μέγεθος, σε αντίθεση με αυτές των μοντέλων PP2000 (Σχήμα 5.2.10c) και V2016 (Σχήμα 5.2.10d). Επιπλέον, στα μοντέλα PP2000 και V2016 οι σεισμοί με μέγεθος M≥7.0 είναι λιγότεροι από τους αντίστοιχους των υπόλοιπων χαρτών. Όπως και στην περίπτωση των Χανίων, παρατηρείται ότι τα επίκεντρα των μακρινών σεισμών των μοντέλων ESHM13 και ESHM20 έχουν διάταξη παράλληλη με τον κλάδο του ρήγματος της Τάφρου του Β. Αιγαίου, αλλά βρίσκονται περίπου 30 km βορειότερα από αυτόν. Η μετατόπιση των επικέντρων έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλου αριθμού σεισμών μεγέθους Μ≥7.0 σε περιοχές με ρηξιγενείς δομές που δεν μπορούν να τους προκαλέσουν στην υποδειχθείσα συχνότητα. Ο μεγαλύτερος αριθμός των σεισμών αυτών των μεγεθών περιέχεται στα αποτελέσματα αποάθροισης βάσει του μοντέλου ESHM13. Η χωρική κατανομή της σχετικής πιθανότητας γένεσης σεισμού αποάθροισης των μεμονωμένων μοντέλων (Σχήμα 5.2.11b-f) και του λογικού δέντρου (Σχήμα 5.2.11a) είναι παρόμοια. Οι μακρινοί σεισμοί αποάθροισης των P1990 και ESHM13 καταλαμβάνουν ελαφρώς μεγαλύτερη έκταση. Επιπλέον, τα επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας που προκύπτουν από κάθε μοντέλο δεν παρουσιάζουν αξιοσημείωτες διαφορές.



Σχήμα 5.2.10 Χάρτες με τους σεισμούς αποάθροισης: a) του λογικού δέντρου σεισμικών πηγών (LT) και των μοντέλων b) P1990, c) PP2000, d) V2016, e) ESHM13 και, f) ESHM20 για την Αλεξανδρούπολη. Σε κάθε χάρτη αναφέρεται η σεισμική επικινδυνότητα της Αλεξανδρούπολης (τιμή PGA με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης σε περίοδο επανάληψης 50 ετών).

Στο Σχήμα 5.2.12 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σχετικής πιθανότητας για κάθε συνδυασμό μεγέθους-απόστασης των σεισμών αποάθροισης. Από αυτά προκύπτουν δύο σεισμοί σχεδιασμού (Σχήμα 5.2.12a). Ο πρώτος έχει μέγεθος **M**5.0-6.0 και συμβαίνει σε αποστάσεις έως 30 km από το σημείο ενδιαφέροντος. Το μέγεθος του δεύτερου κυμαίνεται στο εύρος **M**6.5-7.5, και ενδέχεται να γίνει σε απόσταση 40-80 km. Το πλήθος των μεγάλων σεισμών (**M**7.0-M8.0) των μοντέλων ESHM13 και ESHM20 είναι άξιο αναφοράς (Σχήμα 5.2.12e και Σχήμα 5.2.12f, αντίστοιχα). Τα διαγράμματα αυτά βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με τους χάρτες αποάθροισης, καθώς τα μοντέλα P1990, ESHM13 και ESHM20 παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος αποστάσεων.



Σχήμα 5.2.11 Σχετική χωρική πιθανότητα εμφάνισης σεισμού αποάθροισης γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος (Αλεξανδρούπολη, μαύρος αστερίσκος) για: a) το λογικό δέντρο σεισμικών πηγών (LT) και τα μοντέλα b) P1990, c) PP2000, d) V2016, e) ESHM13 και, f) ESHM20.

Η αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας αναδεικνύει διάφορα προβλήματα και αστοχίες των μοντέλων σεισμικών πηγών. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από το μοντέλο σεισμικών πηγών PP1990 δεν είναι ρεαλιστικά, επειδή εξαιτίας της παλαιότητάς του δεν καλύπτει ολόκληρο τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου με σεισμικές πηγές. Από την άλλη πλευρά, τα αποτελέσματα των ESHM13 και ESHM20 είναι συντηρητικά, διότι τα μέγιστα μεγέθη των πηγών τους έχουν πολύ υψηλές τιμές. Επιπλέον, οι μεγάλες τεκτονικές δομές και οι σεισμοί που τους αναλογούν εντοπίζονται σε διαφορετικές θέσεις από αυτές στις οποίες βρίσκονται στην πραγματικότητα. Αυτές οι αστοχίες επηρεάζουν τα αποτελέσματα της αποάθροισης με χρήση του λογικού δέντρου σεισμικών πηγών, με σοβαρότερο πρόβλημα την εμφάνιση μεγάλων σεισμών σε περιοχές που δεν έχουν τα ανάλογα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά.



Σχήμα 5.2.12 Διαγράμματα με τη σχετική πιθανότητα συνδυασμού μεγέθους-απόστασης (επικεντρικής) των σεισμών αποάθροισης για την Αλεξανδρούπολη, όπως προκύπτουν με χρήση: a) του λογικού δέντρου σεισμικών πηγών (LT) και των μοντέλων b) P1990, c) PP2000, d) V2016, e) ESHM13 και, f) ESHM20.

5.3. ΣΥΝΟΨΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

Εκτός από τη χωρική κατανομή των επικέντρων, τη χωρική κατανομή της σχετικής πιθανότητας ύπαρξης σεισμού αποάθροισης γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος και τη σχετική πιθανότητα κάθε συνδυασμού μεγέθους-απόστασης των σεισμών, εξετάστηκαν δύο κύρια μέτρα θέσης. Αυτά ήταν η μέση τιμή και η κεντρική τιμή των κατανομών του μεγέθους, των επικεντρικών αποστάσεων και της παραμέτρου ε για κάθε θέση.

Στο Σχήμα 5.3.1 παρουσιάζεται το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας (τιμή PGA με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης για περίοδο επανάληψης 50 ετών) για κάθε θέση, όπως αυτό προκύπτει από την εφαρμογή του λογικού δέντρου των μοντέλων σεισμικών πηγών (LT) και από τη χρήση κάθε μοντέλου ξεχωριστά. Τα σημεία είναι τοποθετημένα κατά φθίνουσα σειρά σεισμικής επικινδυνότητας. Παρατηρείται ότι τα μοντέλα PP2000 και ESHM20 είναι πιο συντηρητικά, καθώς υπερεκτιμούν τη σεισμική επικινδυνότητα στο σύνολο σχεδόν των σημείων που εξετάστηκαν. Αντιθέτως, το ESHM13 την υποεκτιμά σε όλα τα σημεία. Το μοντέλο P1990 τείνει να υποεκτιμά σημαντικά τη σεισμική επικινδυνότητα κυρίως στις περιοχές χαμηλής σεισμικότητας. Οι τιμές του V2016 είναι ενδιάμεσες και πιο κοντινές στις τιμές του λογικού δέντρου (PGALT), δεδομένου ότι σε αυτό το μοντέλο έχει δοθεί το μεγαλύτερο βάρος (0.35). Η μέγιστη διαφορά μεταξύ των τιμών PGA των μοντέλων ισούται με 0.5 g (Κεφαλονιά). Το εύρος είναι σχετικά μεγάλο στη Λευκάδα, στο Αίγιο, στη Χαλκίδα και στην Κοζάνη (διαφορά 0.3-0.4 g). Επομένως, με εξαίρεση την Κοζάνη, οι κυριότερες ασυμφωνίες μεταξύ των μοντέλων ως προς το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας εκδηλώνονται κυρίως σε περιοχές υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας. Το γεγονός ότι οι τιμές έχουν σχετικά μεγάλη διακύμανση στην Κοζάνη ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι, σε αντίθεση με το Ρ1990, τα μοντέλα PP2000 και V2016 δημιουργήθηκαν μετά από τον μεγάλο σεισμό που συνέβη εκεί (Μ6.6, 1995).



Σχήμα 5.3.1 Επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας (τιμή PGA με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης σε περίοδο επανάληψης 50 ετών) για κάθε σημείο ενδιαφέροντος.

184

Οι σχετικές διαφορές της προκύπτουσας από κάθε μοντέλο τιμής PGA από την τιμή PGALT αναδεικνύονται στο Σχήμα 5.3.2, το οποίο παρουσιάζει τον λόγο PGA/PGALT για κάθε σημείο. Από τα αποτελέσματα είναι εμφανές ότι τα μοντέλα PP2000 και ESHM20 υπερεκτιμούν τη σεισμική επικινδυνότητα κατά περίπου 1.2-1.4 φορές. Πιο συγκεκριμένα, το ESHM20 υπερεκτιμά το PGA σε πολλά σημεία, κυρίως σε αυτά που ανήκουν σε περιοχές χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας (σημείο 25 και έπειτα, Σχήμα 5.3.2). Για την Ικαρία (σημείο 37), η τιμή που προκύπτει από το συγκεκριμένο μοντέλο είναι κατά 1.9 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του LT. Ένα αξιοσημείωτο εύρημα της αποάθροισης είναι ότι η Ικαρία συνιστά χαρακτηριστικό παράδειγμα θέσης που επηρεάζεται από πλήθος κοντινών και απομακρυσμένων σεισμικών πηγών σε όλα τα μοντέλα που εξετάστηκαν, εκτός από το ESHM20, στο οποίο οι σεισμοί αποάθροισης βρίσκονται σε μικρές αποστάσεις και τα μεγέθη τους είναι μεγαλύτερα. Το μοντέλο ΡΡ2000 υπερεκτιμά τη σεισμική επικινδυνότητα σε όλα τα σημεία ενδιαφέροντος, με εξαίρεση την Κοζάνη (σημείο 27) και την Ικαρία. Το ESHM13 την υποεκτιμά κατά περίπου 1.25-1.6 φορές σε όλα τα σημεία. Το P1990 κάνει υποεκτίμηση έως και 5 φορές (π.χ. Κοζάνη και Φλώρινα) σε σημεία που ανήκουν στις ζώνες σεισμικότητας υποβάθρου.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 5.3.2 Ο λόγος των τιμών PGA όπως προκύπτουν από κάθε μοντέλο σεισμικών πηγών ξεχωριστά προς το PGA που προκύπτει από χρήση του λογικού δέντρου των μοντέλων σεισμικών πηγών (PGA_{LT}).

Στο Σχήμα 5.3.3 εμφανίζονται τα μέτρα θέσης, δηλαδή η μέση τιμή (*M_{Mean}*, Σχήμα 5.3.3a) και η κεντρική τιμή (*M_{Median}*, Σχήμα 5.3.3b) των κατανομών του μεγέθους, *M*, των σεισμών αποάθροισης για κάθε σημείο ενδιαφέροντος, όπως προκύπτουν από τη χρήση κάθε μοντέλου σεισμικών πηγών ξεχωριστά, και από την εφαρμογή του λογικού τους δέντρου. Οι κεντρικές τιμές είναι υψηλότερες από τις μέσες κατά περίπου 0.1 σε όλα τα σημεία, επομένως οι κατανομές του *M* είναι ελαφρώς ασύμμετρες, με μεγαλύτερο πλήθος τιμών στα μεγάλα μεγέθη. Τα σημεία

είναι τοποθετημένα κατά φθίνουσα σειρά σεισμικής επικινδυνότητας (τιμών PGA_{LT}). Τα μέτρα θέσης παρουσιάζουν φθίνουσα τάση, συνεπώς το υψηλό επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας οδηγεί και σε μεγάλες τιμές μέσης και κεντρικής τιμής του Μ, και αντίστροφα. Τόσο στην περίπτωση της μέσης, όσο και στης κεντρικής τιμής, το μοντέλο V2016 παράγει χαμηλότερες τιμές από τα υπόλοιπα, για το σύνολο σχεδόν των σημείων παρατήρησης. Αυτές ενδεχομένως οφείλονται στο μέγεθος των πηγών αυτού του μοντέλου, το οποίο είναι μικρότερο από των υπόλοιπων, και στις μεγαλύτερες τιμές της σταθεράς b, δηλαδή στη μεγαλύτερη αναλογία των μικρών προς τους μεγάλους σεισμούς. Οι τιμές των υπόλοιπων μοντέλων είναι υψηλότερες από αυτές του LT στα περισσότερα σημεία. Τα μοντέλα συμφωνούν ως προς τις περιοχές στις οποίες υπολογίζονται οι χαμηλότερες και οι υψηλότερες τιμές M_{Mean} και M_{Median}, ασχέτως της αριθμητικής τους τιμής και της διακύμανσής τους. Μερικά παραδείγματα θέσεων με τις χαμηλότερες τιμές μέτρων θέσης αποτελούν η Ερμούπολη (σημείο 42), η Κύθνος (σημείο 41), η Νάξος (σημείο 39), η Μήλος (σημείο 38) και η Ικαρία (σημείο 37). Θέσεις στις οποίες τα μέτρα θέσης κάθε μοντέλου έχουν τις υψηλότερες τιμές αποτελούν η Κεφαλονιά (σημείο 1), η Λευκάδα (σημείο 2), το Αίγιο (σημείο 3) και η Κέρκυρα (σημείο 5).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Όσον αφορά τη μέση και την κεντρική τιμή, παρατηρείται μεγαλύτερη ασυμφωνία μεταξύ των τιμών κάθε μοντέλου στις περιοχές μέτριας-χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας (σημείο 22 και έπειτα). Η διακύμανση των μέσων τιμών για κάθε σημείο κυμαίνεται από 0.1 έως 1 μονάδες. Οι υψηλότερες διαφορές (0.9-1.0 μονάδες) εμφανίζονται στα Χανιά (σημείο 25), στην Κασσανδρεία (σημείο 28) και στις Σέρρες (σημείο 32). Η ίδια παρατήρηση ισχύει και για την κεντρική τιμή. Σε αυτήν την περίπτωση, η διακύμανση για κάθε σημείο κυμαίνεται μεταξύ 0.3 και 1.3 μονάδων. Οι υψηλότερες διαφορές (>0.9 μονάδες) παρατηρούνται στα Χανιά (σημείο 22), στις Σέρρες (σημείο 32) και στην Αλεξανδρούπολη (σημείο 35). Η μεγάλη διαφοροποίηση των τιμών στα Χανιά οφείλεται στο μοντέλο ΡΡ2000, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.2. Στα υπόλοιπα σημεία, οι διαφορές προκύπτουν κυρίως από το μοντέλο Ρ1990 για τις περιοχές χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας που ανήκουν στις ζώνες σεισμικότητας υποβάθρου, τις οποίες η αποάθροιση εμφανίζει να επηρεάζονται κυρίως από μεγάλους σεισμούς με επίκεντρα στις γειτονικές πηγές.



Σχήμα 5.3.3 a) Η μέση τιμή (M_{Mean}) και b) η κεντρική τιμή (M_{Median}) του μεγέθους, M, των σεισμών αποάθροισης για κάθε σημείο ενδιαφέροντος.

Στο Σχήμα 5.3.4 παρουσιάζονται τα μέτρα θέσης (μέση τιμή - Σχήμα 5.3.4a και κεντρική τιμή - Σχήμα 5.3.4b) των κατανομών της επικεντρικής απόστασης, *Repi*, μεταξύ των σεισμών αποάθροισης και των σημείων ενδιαφέροντος, όπως προκύπτουν από την αποάθροιση με χρήση των μεμονωμένων μοντέλων σεισμικών πηγών και με εφαρμογή του LT, για κάθε σημείο. Σε αντίθεση με το Σχήμα 5.3.3, παρατηρείται ότι οι μέσες τιμές των *Repi* είναι ελαφρώς υψηλότερες από τις κεντρικές. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, καθώς οι μικρού μεγέθους σεισμοί που γίνονται σε μικρές αποστάσεις είναι πολυπληθέστεροι, επομένως οι κατανομές των αποστάσεων είναι ελαφρώς ασύμμετρες, με μεγαλύτερο πλήθος παρατηρήσεων στις μικρότερες τιμές. Επιπλέον, παρατηρείται αύξουσα τάση των μέτρων θέσης όσο μειώνεται το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας του σημείου παρατήρησης. Παρόλο που η μέση και η κεντρική τιμή δεν περιγράφουν πλήρως τη σεισμική

σημείο επηρεάζεται από μακρινούς σεισμούς, άρα από περισσότερες της μίας σεισμικές πηγές. Ορισμένες από τις περιοχές στις οποίες όλα τα μοντέλα αποδίδουν χαμηλότερες τιμές μέτρων θέσης είναι η Αλεξανδρούπολη (σημείο 35), η Ορεστιάδα (σημείο 40) και η Νάξος (σημείο 39), ενώ υψηλότερες τιμές σημειώνονται στη Σαντορίνη (σημείο 22), στη Θεσσαλονίκη (σημείο 24) και στη Σκύρο (σημείο 19).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Με εξαίρεση το μοντέλο Ρ1990, η διακύμανση των τιμών ανά θέση εμφανίζεται ελαφρώς μεγαλύτερη για τα σημεία χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας στα διαγράμματα της μέσης και της κεντρικής τιμής. Οι τιμές του μοντέλου Ρ1990 είναι πολύ υψηλότερες από αυτές των υπόλοιπων μοντέλων για τα σημεία χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας (σημείο 15 και σημεία 23 και έπειτα), όπως αναμένεται από την επιφάνεια των σεισμικών πηγών που το απαρτίζουν. Παρόλα αυτά, οι τιμές του LT δεν επηρεάζονται πολύ από αυτές τις ακραίες τιμές, διότι το μοντέλο αυτό έχει βάρος μόλις 10%. Συστηματικά υψηλότερες τιμές μέτρων θέσης παρουσιάζουν τα μοντέλα ESHM13 και ESHM20, ενώ χαμηλότερες τιμές χαρακτηρίζουν τα PP2000 και V2016. Οι σεισμικές πηγές των τελευταίων είναι μικρότερου εμβαδού από τις αντίστοιχες των πρώτων, παράγοντας ο οποίος ενδεχομένως συμβάλλει στη διαμόρφωση των αποστάσεων. Οι μέσες και οι κεντρικές τιμές των Repi κυμαίνονται από 10 έως 20 km. Εξαιρουμένου του μοντέλου P1990, από το οποίο προκύπτουν αποτελέσματα που δεν είναι πιθανό να συμβούν στην πραγματικότητα, οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις μεταξύ των τιμών των μοντέλων καταγράφονται στην Αλεξανδρούπολη (σημείο 35, 35 km), στη Λευκάδα (σημείο 2, 25 km), στη Μήλο (σημείο 38, 20-25 km) και στο Ηράκλειο (σημείο 29, 20-25 km), δηλαδή κυρίως σε σημεία χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας που επηρεάζονται από σεισμούς που συμβαίνουν σε πολλαπλές απομακρυσμένες πηγές.



Σχήμα 5.3.4 a) Η μέση τιμή (Repi_{Mean}) και b) η κεντρική τιμή (Repi_{Median}) της επικεντρικής απόστασης, R_{epi}, των σεισμών αποάθροισης για κάθε σημείο ενδιαφέροντος.

Στο Σχήμα 5.3.5 παρουσιάζεται η μέση τιμή (Σχήμα 5.3.5a) και η κεντρική τιμή (Σχήμα 5.3.5b) της παραμέτρου ε των σεισμών αποάθροισης από κάθε μοντέλο σεισμικών πηγών και από το λογικό τους δέντρο για κάθε σημείο που εξετάστηκε. Η παράμετρος ε αποτελεί την τυχαία μεταβλητή της κανονικής κατανομής με την οποία πολλαπλασιάζεται το σφάλμα της εμπειρικής σχέσης πρόβλεψης της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης (Ι.Σ.Κ). Οι τιμές της κεντρικής τιμής είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από αυτές της μέσης τιμής, με τη μέση διαφορά να ισούται περίπου με 0.1. Στους υπολογισμούς θεωρήθηκε σφάλμα ±2σ. Όπως αναμενόταν, οι τιμές των μέτρων θέσης κυμαίνονται από 0.9 έως 1.7, καθώς η αύξηση της τιμής της παραμέτρου ε συνεπάγεται αύξηση της τιμής του PGA. Αξιοσημείωτη είναι η σαφής σχέση των τιμών των μέτρων θέσης της παραμέτρου ε με το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας του σημείου ενδιαφέροντος. Πιο συγκεκριμένα, όσο πιο υψηλό

της παραμέτρου ε. Τα μοντέλα PP2000 και V2016 υπολογίζουν συστηματικά υψηλότερες μέσες και κεντρικές τιμές, σε αντίθεση με τις συστηματικά χαμηλότερες των ESHM13 και ESHM20. Η διακύμανση των τιμών των μοντέλων είναι περίπου σταθερή και ίση με 0.2. Επομένως, στην περίπτωση που είναι επιθυμητός ο ορισμός ενός σεισμού σχεδιασμού για τη διενέργεια ΑΕΣΕ συμβατής με τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, ως καταλληλότερη τιμή της παραμέτρου ε προτείνεται το 1.4 αν η επιλεγμένη περιοχή χαρακτηρίζεται από υψηλή σεισμική επικινδυνότητα, και το 1.1 αν το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας είναι χαμηλό.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



<u>Σχήμα 5.3.5</u> a) Η μέση τιμή (ε_{Mean}) και b) η κεντρική τιμή (ε_{Median}) της τιμής της παραμέτρου ε των σεισμών αποάθροισης για κάθε σημείο ενδιαφέροντος.

Στο Σχήμα 5.3.6 παρουσιάζονται οι χάρτες με τη χωρική κατανομή των τιμών μέτρων θέσης για το μέγεθος, *M*, την επικεντρική απόσταση, *R*_{epi}, και την παράμετρο

ε, όπως αυτές προκύπτουν από τη χρήση του λογικού δέντρου των μοντέλων σεισμικών πηγών.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

λ.П.Θ

Αναφορικά με το *M*, οι μέσες και οι κεντρικές τιμές (Σχήμα 5.3.6a και Σχήμα 5.3.6b, αντίστοιχα) είναι χαμηλές (5.6-5.8) στις περιοχές με χαμηλό επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας, όπως το Κεντρικό Αιγαίο και μέρος της Μακεδονίας. Στη Θράκη οι τιμές είναι μεσαίες προς υψηλές (5.9-6.1) διότι, παρόλο που πρόκειται για περιοχή χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας και σεισμικότητας, περιέχει μεγάλα ρήγματα. Υψηλές τιμές μεγεθών (6.2-6.5) εμφανίζονται στις περιοχές που γειτονεύουν με τους κλάδους του δεξιόστροφου ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης της Τάφρου του Β. Αιγαίου, κατά μήκος της Κεφαλονιάς. Φαίνεται ότι η χωρική κατανομή των μέτρων θέσης του μεγέθους των σεισμικότητας και τη γένεση ισχυρών σεισμών στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου.

Όσον αφορά τη χωρική κατανομή της μέσης και της κεντρικής τιμής της *R*_{epi} (Σχήμα 5.3.6c και Σχήμα 5.3.6d, αντίστοιχα) η εικόνα που προκύπτει είναι «αντίθετη» από της κατανομής του *M*. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι περισσότερες περιοχές επηρεάζονται από σεισμούς που γίνονται σε κοντινές τους αποστάσεις (έως 15 km). Χαμηλότερες τιμές χαρακτηρίζουν τη Θράκη, το Κεντρικό Αιγαίο και την Κρήτη. Και οι τρεις είναι περιοχές χαμηλού έως μετρίου επιπέδου σεισμικής επικινδυνότητας, το οποίο μπορεί να υπερβληθεί σχετικά εύκολα και από πιο απομακρυσμένους σεισμούς.

Η χωρική κατανομή της μέσης (Σχήμα 5.3.6e) και της κεντρικής τιμής (Σχήμα 5.3.6f) της παραμέτρου ε βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με τη σεισμικότητα και τη σεισμική επικινδυνότητα του ευρύτερου χώρου του Αιγαίου, με εμφάνιση χαμηλών τιμών στο Κεντρικό Αιγαίο και τη Θράκη, υψηλών τιμών στην Κεφαλονιά, τη Λευκάδα και τη Β. Πελοπόννησο, και ενδιάμεσων τιμών στις υπόλοιπες περιοχές. Αυτό σημαίνει ότι όταν το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας μίας περιοχής είναι χαμηλό, αρκεί οι τιμές της παραμέτρου ε να είναι μικρότερες ώστε να προκύψει τιμή PGA που το υπερβαίνει. Όταν το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας είναι υψηλό, συμβαίνει το αντίθετο, καθώς τιμές PGA που μπορούν να το υπερβούν

Οι χάρτες των μέτρων θέσης του *M* και του *R*_{epi} (Σχήμα 5.3.6a-d) επισημαίνουν την τάση των σεισμών αποάθροισης, ωστόσο σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χαρακτηρίσουν με μοναδικό τρόπο τη σεισμική επικινδυνότητα μιας περιοχής. Η αποάθροιση ανέδειξε το γεγονός ότι τα σημεία συνήθως επηρεάζονται είτε από κοντινούς σεισμούς όλων των μεγεθών είτε από συνδυασμό σεισμών μικρού μεγέθους σε κοντινές αποστάσεις και μεγάλου μεγέθους σε απομακρυσμένες αποστάσεις. Στη δεύτερη περίπτωση, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός περισσότερων του ενός σεισμών σχεδιασμού, με τιμές *M* και *R*_{epi} διάφορες των μέτρων θέσης. Από την άλλη πλευρά, δεδομένου ότι οι τιμές της παραμέτρου ε ανήκουν εξ ορισμού στην κανονική κατανομή, οι χάρτες των μέτρων θέσης της (Σχήμα 5.3.6e, Σχήμα 5.3.6f) μπορούν να ληφθούν υπόψη για τον ορισμό σεισμών σχεδιασμού.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 5.3.6 Χάρτες με τη χωρική κατανομή: a) της μέσης τιμής του μεγέθους M (M_{Mean}), b) της κεντρικής τιμής του μεγέθους M (M_{Median}), c) της μέσης τιμής της επικεντρικής απόστασης R_{epi} (Repi_{Mean}), d) της κεντρικής τιμής της επικεντρικής απόστασης R_{epi} (Repi_{Median}), e) της μέσης τιμής της παραμέτρου ε (ε_{Mean}) και, f) της κεντρικής τιμής της παραμέτρου ε (ε_{Median}), όπως προκύπτουν από τη χρήση του λογικού δέντρου των μοντέλων σεισμικών πηγών. Με μαύρες κουκκίδες αναγράφονται τα σημεία ενδιαφέροντος.

5.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΣΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ΑΠΟΑΘΡΟΙΣΗΣ

Στο Σχήμα 5.4.1 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας της παρούσας διατριβής με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τους Tselentis and Danciu (2010a) ή TD10. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν 22 κοινές θέσεις και υπολογίστηκαν με το μοντέλο PP2000, το οποίο χρησιμοποιούν και οι εν λόγω συγγραφείς. Παρουσιάζονται οι μέσες τιμές του μεγέθους (Σχήμα 5.4.1a), της απόστασης (Σχήμα 5.4.1b) και της παραμέτρου ε (Σχήμα 5.4.1c), διότι οι TD10 υπολόγισαν επιπλέον και τις επικρατούσες τιμές (mode), μέθοδος που δεν εφαρμόστηκε στην παρούσα διατριβή. Στα σχήματα παρατηρούνται συστηματικά υψηλότερες τιμές μεγεθών και αποστάσεων στους TD10, ενώ οι τιμές της παραμέτρου ε είναι σημαντικά χαμηλότερες. Με δεδομένο ότι τα αποτελέσματα βασίζονται στο ίδιο μοντέλο σεισμικών πηγών, και τη μεγάλη διαφορά των μέσων τιμών της ε, είναι εμφανές ότι οι διαφορές αυτές οφείλονται στις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. που χρησιμοποιήθηκαν στη διενέργεια των υπολογισμών ΠΕΣΕ των δύο εργασιών. Οι ΤD10 εφάρμοσαν, όπως είναι φυσικό, παλαιότερες εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (Margaris et al., 2002; Skarlatoudis et al., 2003; Danciu and Tselentis, 2007), ενώ στην παρούσα διατριβή έγινε χρήση ένδεκα σημαντικά διαφορετικών εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι οι τιμές αποάθροισης επηρεάζονται έντονα από το μοντέλο σεισμικών πηγών, αλλά και από τις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (GMPE). Κατά συνέπεια δεν είναι εφικτή, έστω και η προσεγγιστική, χρήση των αποτελεσμάτων ενός μόνο μοντέλου σεισμικών πηγών ή μίας GMPE και είναι προτιμότερη η αξιοποίηση αποτελεσμάτων λογικών δέντρων, τα οποία διασφαλίζουν μικρότερη επιστημική αβεβαιότητα.



Σχήμα 5.4.1 Αποτελέσματα αποάθροισης της σεισμικής επικινδυνότητας της εργασίας των Tselentis and Danciu (2010a) για 22 θέσεις του Ελληνικού χώρου, σε συνάρτηση με αυτά της παρούσας εργασίας: a) για τη μέση τιμή του Μεγέθους (M_{Mean}), b) για τη μέση τιμή της απόστασης (R_{Mean}) και, c) για τη μέση τιμή της παραμέτρου ε (ε_{Mean}).


ΒΙβλιοθήκη ΟΕ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

> Στην παρούσα διατριβή έγινε προσπάθεια μελέτης των βασικών παραγόντων που επηρεάζουν την επικαιροποίηση του χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου με Πιθανολογική Εκτίμηση της Σεισμικής Επικινδυνότητας (ΠΕΣΕ). Για τον σκοπό αυτό, έγινε μελέτη των υφιστάμενων μοντέλων επιφανειακών σεισμικών πηγών και των πρόσφατα δημοσιευμένων εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης ή Ι.Σ.Κ. (GMPE), διότι αποτελούν παράγοντες που καθορίζουν τα αποτελέσματα της ΠΕΣΕ. Η διατριβή επικεντρώθηκε αποκλειστικά στα αποτελέσματα που αφορούν τους επιφανειακούς σεισμούς του Ελληνικού χώρου.

> Εξετάστηκαν πέντε μοντέλα επιφανειακών σεισμικών πηγών, αυτά των Papazachos (1990), Papaioannou and Papazachos (2000), Vamvakaris et al. (2016a), Woessner et al. (2015) και Danciu et al. (2021) ή P1990, PP2000, V2016, ESHM13 και ESHM20, αντίστοιχα. Τα τρία πρώτα είναι ελληνικά, ενώ τα υπόλοιπα ευρωπαϊκά. Για τη σύγκριση των μοντέλων σεισμικών πηγών υπολογίστηκε το συχνότερα παρατηρούμενο μέγιστο μέγεθος ανά έτος (M_1), δηλαδή ο λόγος των σταθερών a_1/b (Gutenberg-Richter) των σεισμικών πηγών, για επιφάνεια 10⁴ km². Εκτός από τον ρυθμό σεισμικότητας, αξιολογήθηκαν και άλλα χαρακτηριστικά των μοντέλων, όπως το σχήμα, το μέγιστο μέγεθος (M_{max}) και το είδος των διαρρήξεων που περιέχουν.

- Όλα τα μοντέλα παρουσιάζουν τιμές *M*¹ κατά 60-70% υψηλότερες από αυτές του μοντέλου P1990 στις περιοχές στις οποίες αυτό θεωρεί ότι υπάρχει σεισμικότητα υποβάθρου (Κεντρικό και Νότιο Αιγαίο, περιοχές της Μακεδονίας). Οι τιμές *M*¹ του μοντέλου PP2000 είναι έως και 30% υψηλότερες από αυτές των υπόλοιπων μοντέλων. Οι τιμές *M*¹ των μοντέλων P1990 και V2016 είναι παρόμοιες στο μεγαλύτερο τμήμα της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου. Το μοντέλο ESHM13 παρουσιάζει έως και 30% χαμηλότερες τιμές από αυτές των V2016. Το μοντέλο ESHM20 έχει παρόμοιες τιμές *M*¹ με αυτές των V2016 και ESHM13. Αξίζει να τονιστεί ότι αυτή είναι η γενική εικόνα της σύγκρισης των τιμών *M*¹ των μοντέλων, και ότι μεταξύ τους υπάρχουν πολλές διαφορές τοπικού χαρακτήρα. Αυτές παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 και ευθύνονται για τις διαφορές στην τελική σεισμική επικινδυνότητα των μοντέλων αυτών.
- Το ESHM13 παρουσιάζει ορισμένες «αστοχίες» στο σχήμα των επιφανειακών σεισμικών πηγών, αφού πολλές ζώνες περιλαμβάνουν ρήγματα πολύ διαφορετικά ως προς το είδος, την παράταξη και το μέγεθος των σεισμών που προκαλούν, επειδή ανήκουν σε διαφορετικές σεισμοτεκτονικές ενότητες. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι πηγές 0_1, 331 και 321 (Σχήμα 2.1.10). Η ίδια παρατήρηση ισχύει και για το μοντέλο ESHM20, στο

οποίο οι πηγές περιέχουν επίσης πολύ διαφορετικά, ως προς το είδος, ενεργά ρήγματα (π.χ. πηγή T479, Σχήμα 2.1.13).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Το μέγιστο μέγεθος, *M_{max}*, των πηγών του ESHM13 και του ESHM20 είναι πολύ υψηλό και δεν αντιστοιχεί ούτε στο μέγεθος του μέγιστου παρατηρούμενου σεισμού ούτε στις διαστάσεις των ρηξιγενών δομών που περιέχουν. Τα *M_{max}* αυτών των πηγών υπερβαίνουν έως και 1.7 (ESHM13) και 1.8 (ESHM20) μονάδες τα αντίστοιχα των ελληνικών μοντέλων επιφανειακών σεισμικών πηγών. Εκτός από τις επιφανειακές πηγές, το *M_{max}* είναι σημαντικά υπερεκτιμημένο (και από τα δύο μοντέλα) και στις ζώνες σεισμών ενδιαμέσου βάθους του Ν. Αιγαίου.
- Στο μοντέλο ESHM13, το θεωρούμενο ως κυρίαρχο είδος διάρρηξης παρουσιάζει είτε πλήρη αναντιστοιχία με τα παρατηρούμενα σεισμοτεκτονικά στοιχεία είτε, όταν αυτά είναι σωστά, έχουν μικρότερο βάρος από όσο θα έπρεπε, δηλαδή υπάρχει ταυτόχρονη συμπερίληψη και άλλων ειδών διαρρήξεων οι οποίες δεν έχουν συστηματικά παρατηρηθεί στις περιοχές αυτές. Παραδείγματα πηγών με σημαντικά προβλήματα στο κυρίαρχο είδος διάρρηξης ή σωστού κυρίαρχου είδους διάρρηξης αλλά με μικρότερο ποσοστό συμμετοχής αποτελούν οι ζώνες 414, 0_9, 400 και 388 (Σχήμα 2.1.10).
- Το μοντέλο ESHM20 συνήθως δίνει πολύ μικρότερο βάρος στο κυρίαρχο είδος διάρρηξης κάθε σεισμικής πηγής από αυτό που παρατηρείται στα σεισμολογικά και νεοτεκτονικά στοιχεία. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα πηγών οι οποίες, ενώ στην πραγματικότητα περιέχουν μόνον ένα είδος διάρρηξης, θεωρούνται ικανές να περιέχουν πολύ περισσότερα και με διαφορετικό βάρος το καθένα. Παραδείγματα τέτοιων πηγών αποτελούν οι ζώνες G251, G256, G241, G244 και T463 (Σχήμα 2.1.13).
- Οι πηγές των σεισμών ενδιαμέσου βάθους του ESHM20 έχουν σοβαρές αδυναμίες, με γεωμετρία που δεν μοιάζει καθόλου με εκείνη της ζώνης Benioff του Ελληνικού χώρου, συνεπώς η χρήση τους πρέπει να αποφεύγεται. Η έκτασή τους είναι πολύ μεγάλη, με αποτέλεσμα να καλύπτουν πολλές περιοχές στις οποίες δεν υπάρχει πιθανότητα να συμβεί σεισμός ενδιαμέσου βάθους, τουλάχιστον με βάση την παρατηρούμενη ιστορική και ενόργανη σεισμικότητα, όπως την Κέρκυρα και τα Ιωάννινα,. Το πρόβλημα αυτό συναντάται και στις αντίστοιχες ζώνες του ESHM13, ωστόσο σε πολύ μικρότερο βαθμό.

Με σκοπό τη σύγκρισή τους, υλοποιήθηκαν υπολογισμοί ΠΕΣΕ με χρήση κάθε μοντέλου σεισμικών πηγών ξεχωριστά. Υπολογίστηκαν οι τιμές PGA με πιθανότητα υπέρβασης 10.0% σε περίοδο επανάληψης 50 ετών. Οι υπολογισμοί έγιναν για το σύνολο της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου, για εδαφικές συνθήκες βράχου (ταχύτητα Vs₃₀=800 m/s), με χρήση της GMPE των Boore et al. (2021), δηλαδή της πιο πρόσφατα δημοσιευμένης GMPE για τον Ελληνικό χώρο.

 Για τη διενέργεια ΠΕΣΕ με χρήση ενός μοναδικού μοντέλου επιφανειακών σεισμικών πηγών προτείνεται η χρήση του μοντέλου V2016, διότι παράγει αναμενόμενες τιμές σεισμικής επικινδυνότητας (μέγιστες τιμές έως 1.0 g στην Κεφαλονιά) και λαμβάνει υπόψη περισσότερες σεισμοτεκτονικές λεπτομέρειες τοπικού χαρακτήρα. Για παράδειγμα, πρόκειται για το μοναδικό μοντέλο το

οποίο αποδίδει χαμηλότερες τιμές στην παράμετρο PGA για την περιοχή μεταξύ του ρήγματος της Ν. Θεσσαλίας και Κορινθιακού Κόλπου (π.χ. περιοχή Λαμίας κ.λπ.). Το μοντέλο Ρ1990 είναι το παλαιότερο, και το γεγονός ότι δεν καλύπτει το σύνολο της περιοχής μελέτης με σεισμικές πηγές αποτελεί πρόβλημα, καθώς υποεκτιμάται η σεισμική επικινδυνότητα σε αρκετές περιπτώσεις (π.χ. περιοχή Καστοριάς, Πτολεμαΐδας, Κεντρικής Πελοποννήσου κ.λπ.). Το μοντέλο ΡΡ2000 προβλέπει εξαιρετικά υψηλές τιμές σεισμικής επικινδυνότητας (έως 1.36 g), μολονότι η χωρική του κατανομή δεν παρουσιάζει εμφανή προβλήματα. Το μοντέλο ESHM13 εμφανίζει σημαντικές αστοχίες, καθώς η χωρική κατανομή της σεισμικής επικινδυνότητας είναι ασύμβατη με τα ιστορικά στοιχεία σεισμικότητας και βλαβών του Ελληνικού χώρου. Τα υψηλότερα επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας (0.9 g) παρατηρούνται στη Ζάκυνθο αντί της Κεφαλονιάς. Παράλληλα, δεν καταγράφει διαφοροποιήσεις της σεισμικής επικινδυνότητας στην ηπειρωτική Ελλάδα (σχεδόν ομογενής χωρικά κατανομή, με τιμές PGA ~0.3-0.4 g), εκτός από τον Κορινθιακό Κόλπο. Επιπλέον, υποεκτιμά σημαντικά τη σεισμική επικινδυνότητα σε κυρίαρχες τεκτονικές δομές, όπως στη ζώνη κατάδυσης του Ν. Αιγαίου και στο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης της Τάφρου του Β. Αιγαίου. Η χωρική κατανομή της σεισμικής επικινδυνότητας που προκύπτει από το ESHM20 είναι πιο σωστή από αυτήν του ESHM13, όπως και οι τιμές της. Ωστόσο, και αυτό το μοντέλο έχει αστοχίες, αφού αποτυγχάνει να κάνει σωστή πρόβλεψη της σεισμικής επικινδυνότητας, καθώς τοποθετεί το υψηλότερο επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας (~1.0 g) στη Λευκάδα. Τέλος, ούτε εμφανίζει σημαντικές διαφοροποιήσεις στο επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας της ηπειρωτικής Ελλάδας, καθώς δεν περιέχει πολλές λεπτομέρειες τοπικού χαρακτήρα, όντας μέρος ενός γενικευμένου ευρωπαϊκού μοντέλου.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Βάσει των παραπάνω παρατηρήσεων και αποτελεσμάτων, για τη δημιουργία του επικαιροποιημένου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου, στο πλαίσιο της διατριβής χρησιμοποιήθηκε το εξής λογικό δέντρο μοντέλων σεισμικών πηγών: P1990 (0.10), PP2000 (0.20), V2016 (0.35), ESHM13 (0.10), ESHM20 (0.25). Τα βάρη των ESHM13 και ESHM20 επιμερίζονται στα επιμέρους σενάρια με διαφορετικά μέγιστα μεγέθη (*M_{max}*) και διαφορετικούς συνδυασμούς *a*, *b* και *M_{max}*, αντίστοιχα, όπως προτείνονται από τους δημιουργούς τους.

Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, έγινε μελέτη και συγκριτική αξιολόγηση 15 δημοσιευμένων GMPE. Αυτές είναι οι εξής: ASK14 (Abrahamson et al., 2014), BSSA14 (Boore et al., 2014), CB14 (Campbell and Bozorgnia, 2014), CY14 (Chiou and Youngs, 2014), Bi11 (Bindi et al., 2011), Bi14 (Bindi et al., 2014), CF08 (Cauzzi and Faccioli, 2008), Ca15 (Cauzzi et al., 2015), Ak14 (Akkar et al., 2014a), De14 (Derras et al., 2014), Ko20 (Kotha et al., 2020), Sk03 (Skarlatoudis et al., 2007, 2003), DT07 (Danciu and Tselentis, 2007), Ch18 (Chousianitis et al., 2018) και Bo21 (Boore et al., 2021). Οι ποσοτικές συγκρίσεις έγιναν για σημεία κάθετα στην

παράταξη του ρήγματος και στο μέσο αυτού, σε απόσταση Joyner-Boore (*R_{JB}*) 0-500 km, θεωρώντας ρήγμα με γωνία κλίσης 45°, για ταχύτητα *Vs₃₀* 800 m/s. Θεωρήθηκαν μεγέθη **M**5.0-8.0 και όλα τα είδη διαρρήξεων (κανονικό-N, ανάστροφο-R και οριζόντιας μετατόπισης-S).

- Η σύγκριση των τεσσάρων αμερικανικών GMPE του προγράμματος NGA-West2 (ASK14, BSSA14, CB14 και CY14) έδειξε ότι σε μικρές αποστάσεις (*R_{JB}*≤10 km) η BSSA14 υπολογίζει τις υψηλότερες τιμές. Σε ενδιάμεσες αποστάσεις (10<*R_{JB}*≤100 km) και μικρά μεγέθη (M5.0) οι υψηλότερες τιμές σεισμικής επικινδυνότητας προέρχονται από την ASK14. Όσον αφορά τις διαρρήξεις S όλων των μεγεθών, οι τέσσερις σχέσεις πρακτικά ταυτίζονται.
- Όταν γίνεται συμπερίληψη του υπολογισμού της επίδρασης βαθιάς λεκάνης (ορισμός βαθών Z_{1.0} και Z_{2.5} (m), στα οποία η ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων -V_S- ισούται με 1.0 km/s και με 2.5 km/s, αντίστοιχα), οι τιμές της CB14 (χρήση του Z_{2.5}) σε μεγέθη M6.0-8.0 σε όλες τις αποστάσεις είναι σημαντικά υπερεκτιμημένες, με αποτέλεσμα να μην προβλέπουν ρεαλιστικό επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας. Επιπλέον, σε όλα τα μεγέθη οι τιμές της ASK14 είναι υποεκτιμημένες. Οι BSSA14 και CY14 παραμένουν ανεπηρέαστες.
- Οι τιμές της CB14 αυξάνονται πολύ σε σχέση με αυτές των υπόλοιπων GMPE στην περίπτωση στην οποία το σημείο ενδιαφέροντος βρίσκεται στο άνω τέμαχος του ρήγματος (επίδραση του παράγοντα HW). Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές της επηρεάζονται πολύ στα κανονικά και στα ανάστροφα ρήγματα, τα οποία είναι πολυπληθέστερα στον Ελληνικό χώρο (ιδίως τα πρώτα). Όταν η διάρρηξη είναι οριζόντιας ολίσθησης, δεν παρατηρείται η ίδια τάση των τιμών.
- Δεν προτείνεται η χρήση της CB14, διότι παράγει πολύ συντηρητικά αποτελέσματα στις κανονικές και στις ανάστροφες διαρρήξεις και επηρεάζεται πολύ στην περίπτωση της θεώρησης τοπικών επιδράσεων βαθιάς λεκάνης.
- Γενικά, η χρήση του υπολογισμού της επίδρασης βαθιάς λεκάνης πρέπει να γίνει με πολύ προσεκτική μελέτη των σχέσεων που θα χρησιμοποιηθούν, διότι οδηγεί σε επισφαλή αποτελέσματα για κάποιες GMPE.
- Οι σχέσεις Ca15, Bi14, De14 και Ak14 παράγουν παρόμοιες τιμές σεισμικής επικινδυνότητας. Η De14 παρουσιάζει πιο έντονη απόσβεση με την απόσταση, ενώ ο ρυθμός απόσβεσης της Ca15 (στην οποία γίνεται χρήση της κοντινότερης απόστασης μεταξύ του σημείου παρατήρησης και της διάρρηξης -*R_{rup}* αντί της *R_{JB}*) είναι χαμηλότερος.
- Από όλες τις σχέσεις που εξετάστηκαν, η Κο20 παρουσιάζει την πιο έντονη απόσβεση με την απόσταση για τον Ελληνικό χώρο. Επιπλέον, προβλέπει τις υψηλότερες τιμές σεισμικής επικινδυνότητας σε κοντινές αποστάσεις (έως 5 km).
- Τα αποτελέσματα των σχέσεων CF08 και Bi11 χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες τιμές από αυτές των μεταγενέστερών τους Ca15 και Bi14.
- Οι σχέσεις Sk03 και DT07 παράγουν σχεδόν πανομοιότυπα αποτελέσματα.
- Οι υψηλότερες τιμές σεισμικής επικινδυνότητας (σε σύγκριση με όλες τις υπόλοιπες που αξιολογήθηκαν) προκύπτουν από τη σχέση Ch18, ιδίως όταν η

διάρρηξη είναι κανονική ή οριζόντιας μετατόπισης, σε ενδιάμεσες αποστάσεις (10<*R*_{/B}≤100 km).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

> Οι κυριότερες ασυμφωνίες στο σύνολο των GMPE παρατηρούνται στις πολύ μικρές αποστάσεις (*R_{JB}*≤10 km). Σημειώνονται διαφορές μεταξύ των τιμών έως 0.4 g στα κανονικά ρήγματα, έως 0.3 g στα ανάστροφα ρήγματα, και υψηλότερες (έως 0.6 g) στα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης. Στα τελευταία παρατηρείται μεγαλύτερη διακύμανση, ενδεχομένως διότι το πλήθος τους είναι μικρότερο από αυτό των κανονικών και των ανάστροφων ρηγμάτων.

Για να γίνει η σύγκριση των τιμών και της χωρικής κατανομής της σεισμικής επικινδυνότητας που προσδιορίζεται με χρήση αυτών των GMPE διενεργήθηκε μία σειρά υπολογισμών ΠΕΣΕ για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου με το μοντέλο σεισμικών πηγών V2016, σε συνδυασμό με κάθε GMPE ξεχωριστά, για εδαφικές συνθήκες βράχου (*Vs*₃₀=800 m/s). Η παράμετρος *ε* των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (θεωρούμενος αριθμός τυπικών αποκλίσεων, ο οποίος ακολουθεί κανονική κατανομή) πήρε τυχαίες τιμές στο διάστημα [-2,2] (±2σ).

- Η σεισμική επικινδυνότητα που προκύπτει με χρήση της σχέσης Κο20 είναι σημαντικά υπερεκτιμημένη και παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές μεταξύ όλων. Οι τιμές PGA υπερβαίνουν το 1.0 g στην Κεφαλονιά και στον Κορινθιακό Κόλπο. Το υψηλότερο επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι αυτή η σχέση προβλέπει τις υψηλότερες τιμές στις κοντινές (*R_{JB}*≤10 km) αποστάσεις.
- Υψηλές τιμές σεισμικής επικινδυνότητας -αλλά χαμηλότερες από της Ko20προκύπτουν επιπλέον από τις σχέσεις Ch18 και De14, ιδιαίτερα στις περιοχές όπου το είδος των διαρρήξεων είναι κανονικό.
- Οι σχέσεις Ca15, Bi14 και Ak14 υπολογίζουν τιμές σεισμικής επικινδυνότητας ελαφρώς χαμηλότερες από τις προηγούμενες και με παρόμοια χωρική κατανομή.
- Η εφαρμογή των παλαιότερων GMPE (CF08, Bi11, DT07, Sk03) αποδίδει μικρότερες τιμές σεισμικής επικινδυνότητας, με μέγιστη τιμή μεταξύ των 0.6 και 0.7 g, στην Κεφαλονιά.
- Η σεισμική επικινδυνότητα που υπολογίζεται από τις σχέσεις του NGA-West2 (ASK14, BSSA14, CB14, CY14) και από την Bo21 (τροποποίηση της BSSA14 προσαρμοσμένη στα ελληνικά δεδομένα) είναι παρόμοια ως προς τις τιμές και ως προς τη χωρική κατανομή. Εξαίρεση αποτελεί η CY14, από την οποία προκύπτουν λίγο χαμηλότερες τιμές PGA για την Κεφαλονιά και τη Θάλασσα του Μαρμαρά.
- Για τη δημιουργία του επικαιροποιημένου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου (χωρική κατανομή των τιμών PGA με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης σε περίοδο επανάληψης 50 ετών) χρησιμοποιήθηκε το λογικό δέντρο των GMPE με τα βάρη που προτείνουν οι Sotiriadis and Margaris (2023) και είναι το εξής: Bo21 (0.17), Ko20 (0.15), CY14 (0.13), CB14 (0.11),

ASK14 (0.10), De14 (0.09), BSSA14 (0.08), Ca15 (0.07), Ak14 (0.04), Bi14 (0.03), DT07 (0.03).

Ο επικαιροποιημένος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας για την ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου (χωρική κατανομή των τιμών PGA με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης σε περίοδο επανάληψης 50 ετών, Σχήμα 2.7.1) δημιουργήθηκε με τη χρήση των λογικών δέντρων μοντέλων σεισμικών πηγών και GMPE που προσδιορίστηκαν βάσει των προαναφερθέντων αποτελεσμάτων και παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6.1. Η ΠΕΣΕ έγινε με τη μέθοδο προσομοίωσης τύπου Monte Carlo. Χρησιμοποιήθηκαν 200 συνθετικοί κατάλογοι 1000ετούς διάρκειας (4000 μέγιστες τιμές PGA ανά σημείο). Οι υπολογισμοί έγιναν σε έναν κάνναβο σημείων 0.2°x0.2° για εδαφικές συνθήκες βράχου (*Vs₃₀*=800 m/s) και με θεωρούμενο σφάλμα 2 τυπικών αποκλίσεων (±2σ).

- Οι τιμές PGA κυμαίνονται μεταξύ των 0 και 0.9 g. Το μεγαλύτερο επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας (0.6-0.9 g) εντοπίζεται στην Κεφαλονιά, στη Λευκάδα και στον Κορινθιακό Κόλπο (0.7-0.8 g). Μέτριο επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας (0.4-0.6 g) παρατηρείται στα ανάστροφα ρήγματα των δυτικών παραλίων της Αλβανίας και της Ελλάδας, στα ανάστροφα ρήγματα κατά μήκος της ζώνης κατάδυσης, στους κλάδους του δεξιόστροφου ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης της Τάφρου του Β. Αιγαίου και σε άλλες περιοχές, όπως η Στερεά Ελλάδα, η ΝΑ Θεσσαλία, η Λέσβος, η Χίος και οι Σποράδες. Τέλος, από χαμηλό επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας (έως 0.3 g) χαρακτηρίζονται το Κεντρικό Αιγαίο, η Θράκη, η Β. Μακεδονία και περιοχές της Μακεδονίας.
- Η σύγκριση του επικαιροποιημένου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας με τον ΝΕΑΚ2003 δείχνει ότι ο δεύτερος υποεκτιμά σε μεγάλο βαθμό τη σεισμική επικινδυνότητα σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης. Στα περισσότερα σημεία του Ελληνικού χώρου οι τιμές του επικαιροποιημένου χάρτη είναι 1.5-2.5 φορές μεγαλύτερες από αυτές του ΝΕΑΚ2003. Εξαίρεση αποτελεί η περιοχή του Κεντρικού-Νοτίου Αιγαίου, όπου οι διαφορές είναι μικρότερες, δηλαδή 0.5-1.0 φορά υψηλότερες από τις τιμές του ΝΕΑΚ2003. Τέλος, οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται στις περιοχές υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας (Κεφαλονιά, Κορινθιακός Κόλπος, κ.λπ.), στις οποίες οι επικαιροποιημένες τιμές είναι έως και 3.5 φορές υψηλότερες από αυτές του ΝΕΑΚ2003.

Για τη διευκόλυνση της λήψης αποφάσεων κατά την υλοποίηση μίας μελέτης ΠΕΣΕ στον Ελληνικό χώρο, κρίθηκε απαραίτητη η πραγματοποίηση Ανάλυσης Ευαισθησίας της σεισμικής επικινδυνότητας στους εισαγόμενους παράγοντες. Ως εισαγόμενοι παράγοντες θεωρήθηκαν το μοντέλο σεισμικών πηγών (Source model), η εφαρμοζόμενη εμπειρική σχέση πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. (GMPE), ο αριθμός των θεωρούμενων τυπικών αποκλίσεων στις GMPE (std), οι αβεβαιότητες των σταθερών *α* και *b* (G-R), το ελάχιστο θεωρούμενο μέγεθος (M_{min}), το μέγιστο μέγεθος των σεισμικών πηγών (*M_{max}*) και το είδος των διαρρήξεων (*SoF*). Επιπλέον, εξετάστηκε και ο παράγοντας *b'*, ο οποίος αντιστοιχεί στην αβεβαιότητα του συνδυασμού των σταθερών *a* και *b*. Πραγματοποιήθηκε Ανάλυση Ευαισθησίας τύπου OFAT (One Factor at A Time). Οι υπολογισμοί έγιναν για τις παραμέτρους PGA και PGV (τιμές με 10.0% πιθανότητα υπέρβασης σε περίοδο επανάληψης 50 ετών) σε 42 θέσεις σεισμολογικού ενδιαφέροντος, και τα αποτελέσματα απεικονίστηκαν με *διαγράμματα τυφώνα* (tornado diagrams).

- Οι παράγοντες που ασκούν τη μεγαλύτερη επιρροή στη σεισμική επικινδυνότητα είναι οι: b, Source model, GMPE και a. Μικρότερη επιρροή σημειώνουν οι παράγοντες M_{max}, b', SoF, std και M_{min}.
- Ο παράγοντας μοντέλο σεισμικών πηγών (Source model) αποτελεί μία από τις επιδραστικότερες παραμέτρους. Η αλλαγή του είναι ικανή να επιφέρει μεταβολή του PGA από 15% έως 55% και του PGV από 18% έως 73%. Αυτή η μεγάλη διακύμανση των τιμών είναι αναμενόμενη και απορρέει από τις πολυάριθμες διαφορές των μοντέλων σεισμικών πηγών. Η χωρική κατανομή της ευαισθησίας του PGA και του PGV στον παράγοντα Source model είναι παρόμοια. Παρατηρείται υψηλότερη ευαισθησία στις περιοχές χαμηλής έως μέτριας σεισμικής επικινδυνότητας (Κυκλάδες, Θράκη, Φλώρινα, Κοζάνη). Χαμηλότερη ευαισθησία είναι ενδεικτική πιθανής συμφωνίας μεταξύ των μοντέλων -σε μικρό βαθμό, δεδομένης της υψηλής διακύμανσης- και παρατηρείται στην Κάρπαθο, στη Ρόδο και σε περιοχές της Δ. Ελλάδας (π.χ. Λευκάδα και Καλαμάτα). Τέλος, σημειώνεται ότι οι ακραίες τιμές των διαγραμμάτων τυφώνα κάθε σημείου που εξετάστηκε παρουσιάζουν εξαιρετικά μεγάλη διακύμανση για αυτόν τον παράγοντα (Σχήμα 3.4.16).
- Ο παράγοντας GMPE επηρεάζει περισσότερο το PGA (26-37%) από ό,τι το PGV (30%-37.5%). Αποτελεί παράγοντα μείζονος σημασίας και για τις δύο παραμέτρους, καθώς συνήθως καταλαμβάνει τη δεύτερη ή την τρίτη θέση στα διαγράμματα τυφώνα. Η χωρική κατανομή της ευαισθησίας της σεισμικής επικινδυνότητας στον παράγοντα GMPE δείχνει ότι δεν υπάρχει συσχέτισή της με το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας. Επιπλέον, η χωρική κατανομή της ευαισθησίας της παραμέτρου PGA παρουσιάζει αρκετές διαφορές από αυτήν της παραμέτρου PGV και επισημαίνει τις περιοχές στις οποίες οι GMPE παράγουν παρόμοια ή διαφορετικά αποτελέσματα.
- Ο παράγοντας b (αβεβαιότητα σχετική με την κλίση της ευθείας G-R, δηλαδή την αναλογία μικρών προς μεγάλους σεισμών) παίζει τον κυριότερο ρόλο στο 66% των σημείων που εξετάστηκαν. Το αποτέλεσμα αυτό ισχύει και για το PGA και για το PGV. Η ευαισθησία του πρώτου κυμαίνεται από 33% έως 44% και του δεύτερου από 44% έως 58.5%. Υπάρχει σχεδόν γραμμική συσχέτιση μεταξύ της ευαισθησίας της παραμέτρου PGA στην παράμετρο b και του επιπέδου σεισμικής επικινδυνότητας του σημείου ενδιαφέροντος, ενώ δεν παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά για την παράμετρο PGV. Αυτό πιστοποιείται και από την εξέταση της χωρικής κατανομής της ευαισθησίας, στην οποία φαίνεται ότι οι περιοχές χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας όπως η Θράκη και το Κεντρικό

Αιγαίο είναι πιο ευαίσθητες στις μεταβολές του *b*, ενώ οι περιοχές υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας (Κεφαλονιά, Λευκάδα) παρουσιάζουν μικρότερη μεταβλητότητα.

- Ο παράγοντας *a* (μεταβολή του επιπέδου σεισμικότητας) παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της σεισμικής επικινδυνότητας. Οι μεταβολές του επιφέρουν την αλλαγή του PGA κατά 23%-32% και του PGV κατά 29%-36.5%. Όπως και για την παράμετρο *b*, προκύπτει γραμμική συσχέτιση μεταξύ της ευαισθησίας του PGA στην παράμετρο *a* και του επιπέδου σεισμικής επικινδυνότητας, η οποία δεν παρατηρείται στο PGV. Η χωρική κατανομή της παραμέτρου *b*, δηλαδή οι περιοχές χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας (Θράκη, Κεντρικό Αιγαίο, Φλώρινα) επηρεάζονται περισσότερο από όσο επηρεάζονται εκείνες με υψηλό επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας (Κεφαλονιά, Λευκάδα).
- Ο παράγοντας *M_{max}* συμβάλλει σημαντικά στη διαμόρφωση της σεισμικής επικινδυνότητας στην παράμετρο PGV. Η επίδρασή του στην παράμετρο PGA είναι πολύ μικρότερη, σε συμφωνία με το γεγονός ότι στους σεισμούς μεγάλου μεγέθους υπάρχει κορεσμός του PGA. Προκαλεί μεταβολές του PGV από 14% έως 27%, και του PGA από 6% έως 15.5%. Η επιλογή του *M_{max}* επηρεάζει περισσότερο τις σεισμικές δονήσεις χαμηλής συχνότητας. Η χωρική κατανομή της ευαισθησίας του PGA και του PGV στο *M_{max}* είναι παρόμοια. Όπως και στην περίπτωση των σταθερών G-R, οι περιοχές χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας (Θράκη, Κεντρικό Αιγαίο) είναι πιο ευαίσθητες στις αλλαγές του *M_{max}*. Τη μικρότερη ευαισθησία, ωστόσο, παρουσιάζουν τα σημεία που ανήκουν στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα της ζώνης κατάδυσης στο εξωτερικό Ελληνικό τόξο (Χανιά, Ηράκλειο, Σητεία, Κάρπαθος, Ρόδος).
- Ο παράγοντας b' (μεταβολές των σταθερών a και b με τρόπο ώστε ο ρυθμός σεισμικότητας για συγκεκριμένο μέγεθος να παραμένει σταθερός) παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το M_{max}, καθώς επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό το PGV από το PGA. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η μεταβολή του b' συνεπάγεται μεταβολή των μεγάλων μεγεθών, στα οποία το PGA παρουσιάζει κορεσμό σε αντίθεση με το PGV. Κρίνεται ως μία από τις λιγότερο επιδραστικές παραμέτρους. Το PGV μεταβάλλεται από 6% έως 14.2%, ενώ το PGA από 3.2% έως 7.0%. Όσον αφορά στη χωρική της κατανομή, μεγαλύτερη ευαισθησία παρατηρείται στη Θράκη και στα Χανιά.
- Ο παράγοντας M_{min} ασκεί την ελάχιστη επιρροή στα αποτελέσματα και έχει την αντίθετη λειτουργία από τον παράγοντα M_{max}, καθώς επηρεάζει περισσότερο το PGA από ό,τι το PGV. Στην πράξη, η αλλαγή του M_{min} δεν αλλάζει καθόλου τα αποτελέσματα, καθώς τα PGA και PGV παρουσιάζουν αμελητέα (0.3%-3.6% και 0%-0.5%, αντίστοιχα). Η χωρική κατανομή της ευαισθησίας σε αυτόν τον παράγοντα δείχνει μια μικρή επίδραση στις Κυκλάδες. Κατά συνέπεια, η αύξηση του θεωρούμενου M_{min} για επιτάχυνση της χρονικής διάρκειας των υπολογισμών της ΠΕΣΕ είναι μία ασφαλής επιλογή για τον Ελληνικό χώρο.
- Ο παράγοντας SoF εντάσσεται στους λιγότερο επιδραστικούς, δεδομένου ότι η αλλαγή του είναι ικανή να προκαλέσει μεταβολή 8%-10% της παραμέτρου PGA

και 6.4%-7.8% της παραμέτρου PGV. Όπως διαπιστώθηκε και για άλλους παράγοντες, οι περιοχές στις οποίες το είδος διάρρηξης ασκεί τη μεγαλύτερη επίδραση είναι οι χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας (π.χ. Κυκλάδες, Θράκη κ.λπ.).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Ο παράγοντας std δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα σεισμικής επικινδυνότητας. Η μεταβολή του PGA κυμαίνεται από 5.6% έως 7.6% και του PGV από 4.5% έως 5.5%. Όπως παρατηρείται και με τον παράγοντα GMPE, η παράμετρος PGA παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία σε αυτόν από ό,τι η παράμετρος PGV. Η χωρική κατανομή της ευαισθησίας αμφότερων του PGA και του PGV δείχνει ότι ο παράγοντας αυτός ασκεί μεγαλύτερη επιρροή στις περιοχές υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας (Κεφαλονιά και Λευκάδα).
- Τα τροποποιημένα διαγράμματα τυφώνα στα οποία αποτυπώνονται οι μέγιστες μεταβολές (θετικές και αρνητικές) της ευαισθησίας για το σύνολο των θέσεων που εξετάστηκαν (Σχήμα 3.4.16) δείχνουν ότι η παράμετρος PGV επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από ό,τι η παράμετρος PGA. Η ευαισθησία της παραμέτρου PGV στους εισαγόμενους παράγοντες κυμαίνεται από -40% έως 60%, ενώ της παραμέτρου PGA κυμαίνεται μεταξύ του -30% και του 50%.

Για τις υπολογιστικές ανάγκες της παρούσας διατριβής δημιουργήθηκαν προγράμματα παραγωγής συνθετικών καταλόγων σεισμικότητας και διενέργειας ΠΕΣΕ με τη μέθοδο προσομοίωσης τύπου Monte Carlo. Ένα ζήτημα τεχνικής φύσεως που ανακύπτει συχνά κατά την εφαρμογή των νεότερων (κυρίως) GMPE είναι η ύπαρξη της δυνατότητας και η εύρεση του καλύτερου τρόπου υπολογισμού των διαφορετικών ειδών αποστάσεων από το ρήγμα (επικεντρική ή Repi, υποκεντρική ή R_{hypo}, Joyner Boore ή R_{JB}, κοντινότερη στη διάρρηξη ή R_{rup}, μετρημένη κάθετα στην παράταξη ή R_x και μετρημένες παράλληλα στην παράταξη ή R_y και R_{y0}). Ο υπολογισμός τους μπορεί να γίνει είτε γεωμετρικά (πραγματικές αποστάσεις) είτε με στατιστικές σχέσεις μετατροπής ενός είδους αποστάσεως σε κάποιο άλλο. Σε αυτό το πλαίσιο, δημιουργήθηκαν τρεις νέες σχέσεις μετατροπής ειδών αποστάσεων (μετατροπή της R_{epi} σε R_{JB} , της R_{hypo} σε R_{rup} και της R_{epi} σε R_x), διερευνήθηκε το επίπεδο της μείωσης της χρονικής διάρκειας των υπολογισμών ΠΕΣΕ και αξιολογήθηκε η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της σεισμικής επικινδυνότητας. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ΠΕΣΕ για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου, με χρήση των εξής GMPE: Bo21 (R_{JB}), De14 (R_{rup}) και CY14 (R_{JB}, R_{rup}, R_x), τόσο με γεωμετρικό υπολογισμό των αποστάσεων (PGA_{Geom.}) όσο και με χρήση των νέων στατιστικών σχέσεων μετατροπής (PGAstat.).

- Η χρήση των στατιστικών σχέσεων μετατροπής ειδών αποστάσεων επιταχύνει τους υπολογισμούς κατά 7%-10%, τουλάχιστον στον κώδικα που χρησιμοποιήθηκε.
- Οι τιμές PGA_{stat.} είναι ελαφρώς υπερεκτιμημένες συγκριτικά με τις PGA_{Geom.}, (κατά 0.03-0.04 g), εκτός από την περίπτωση του στατιστικού υπολογισμού της *R_{JB}* (σχέση Bo21), στην οποία οι τιμές *PGA_{stat.}* είναι ελαφρώς υποεκτιμημένες (έως 0.04 g).

Η χωρική κατανομή της σεισμικής επικινδυνότητας που υπολογίζεται με βάση τις στατιστικές σχέσεις μετατροπής αποστάσεων είναι παρόμοια με αυτήν που προκύπτει από τον γεωμετρικό τους υπολογισμό. Μικρές διαφορές παρατηρούνται κυρίως στις περιοχές με μεγάλα ρήγματα (Κεφαλονιά, ζώνη κατάδυσης, ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης της Τάφρου του Β. Αιγαίου).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

 Η χρήση των στατιστικών σχέσεων μετατροπής προτείνεται μόνο σε περιπτώσεις στις οποίες είναι αδύνατος ο γεωμετρικός υπολογισμός των διαφορετικών ειδών αποστάσεων από το ρήγμα (π.χ. άγνωστη γεωμετρία ρηγμάτων).

Σημαντικό κομμάτι της ΠΕΣΕ αποτελεί η αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας, δηλαδή η εύρεση του σεισμού ή των σεισμών που συμβάλλουν περισσότερο στη σεισμική επικινδυνότητα. Πραγματοποιήθηκε αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας για τις 42 θέσεις των οποίων η Ανάλυση Ευαισθησίας προηγήθηκε. Χρησιμοποιήθηκαν το λογικό δέντρο σεισμικών πηγών (LT) που προτείνεται στην παρούσα διατριβή και κάθε μοντέλο σεισμικών πηγών ξεχωριστά. Έγινε 4D αποάθροιση (κατά γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος, μέγεθος-*M* και παράμετρο ε) και 3D αποάθροιση (κατά μέγεθος, επικεντρική απόσταση-*R* και παράμετρο ε).

- Τα περισσότερα σημεία επηρεάζονται κυρίως από σεισμούς που γίνονται σε κοντινές αποστάσεις (έως 50 km). Συνήθως οι μικρότεροι σεισμοί (έως M<6.0) συμβαίνουν σε αποστάσεις 20-30 km, ενώ οι σεισμοί μεγαλύτερου μεγέθους απαντώνται και σε μεγαλύτερες αποστάσεις (έως 50 km). Η κυκλική διάταξη των επικέντρων γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος είναι ενδεικτική ότι αυτό επηρεάζεται κυρίως από μία σεισμική πηγή, αυτή στην οποία ανήκει το σημείο ενδιαφέροντος. Για αυτά τα σημεία αρκεί να οριστεί ένας μόνο σεισμός σχεδιασμού και τα μέτρα θέσης (μέση τιμή και διάμεσος) των κατανομών των *M* και *R* των σεισμών αποάθροισης θεωρούνται αντιπροσωπευτικά.
- Πολλά σημεία (π.χ. Χανιά, Ηράκλειο, Ιωάννινα, Αλεξανδρούπολη, Ορεστιάδα) επηρεάζονται τόσο από κοντινούς σεισμούς (όλα τα μεγέθη σε αποστάσεις έως 50 km), όσο και από πιο απομακρυσμένους σεισμούς (έως 150 km) μεγάλου μεγέθους (M7.0-8.0). Οι κοντινοί σεισμοί συνήθως προέρχονται από την πηγή στην οποία ανήκει το σημείο παρατήρησης, ενώ οι μακρινοί γεννώνται σε άλλες σεισμικές πηγές, οι οποίες συνήθως περιγράφουν τις κύριες μεγάλες τεκτονικές δομές της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου (ανάστροφα ρήγματα κατά μήκος της ζώνης κατάδυσης, κλάδοι του δεξιόστροφου ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης της Τάφρου του Β. Αιγαίου, κ.λπ.). Σε αυτές τις περιπτώσεις, για τη σωστή περιγραφή του σεισμικού κινδύνου είναι απαραίτητος ο ορισμός περισοότερων του ενός σεισμών σχεδιασμού. Τα μέτρα θέσης των κατανομών Μ και R των σεισμών αποάθροισης δεν είναι αντιπροσωπευτικά και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια.

 Επιπλέον σημεία τα οποία επηρεάζονται από πολλαπλές σεισμικές πηγές και απομακρυσμένους σεισμούς αποτελούν οι περιοχές οι οποίες έχουν χαμηλό επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας (π.χ. Ερμούπολη, Ικαρία, Μήλος κ.λπ.).

- Η αποάθροιση αναδεικνύει σε μεγάλο βαθμό τις αδυναμίες των μοντέλων σεισμικών πηγών. Τα αποτελέσματα του μοντέλου Ρ1990 έχουν μεγάλες διαφορές από αυτά των υπόλοιπων μοντέλων, κυρίως λόγω της μεγάλης έκτασης που καταλαμβάνει η θεωρούμενη σεισμικότητα υποβάθρου στην περιοχή μελέτης. Η γεωγραφική κατανομή των επικέντρων αποάθροισης δεν αντιστοιχεί σε ιδιαιτέρως ρεαλιστικά σενάρια. Η λανθασμένη θεώρηση του κυριότερου είδους διάρρηξης των πηγών στα μοντέλα ESHM13 και ESHM20 έχει ως αποτέλεσμα την εσφαλμένη τοποθέτηση των επικέντρων των μακρινών σεισμών που επηρεάζουν το σημείο ενδιαφέροντος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα Χανιά και η Αλεξανδρούπολη, όπου οι σεισμοί που προέρχονται από τη ζώνη κατάδυσης και από την Τάφρο του Β. Αιγαίου, αντίστοιχα, τοποθετούνται βορειότερα από την πραγματική θέση των τεκτονικών δομών. Τέλος, υπάρχουν πολλές αστοχίες οι οποίες σχετίζονται με τα Mmax των μοντέλων ESHM13 και ESHM20, τα οποία εμφανίζουν σεισμούς αποάθροισης μεγέθους Μ≥8.0 σε περιοχές στις οποίες οι τεκτονικές συνθήκες δεν επιτρέπουν τη γένεσή τους (π.χ. Καλαμάτα, Κύθηρα, Πύργος). Αυτά τα μοντέλα -κυρίως το ESHM20- αποδίδουν μεγαλύτερο πλήθος σεισμών αποάθροισης μεγέθους Μ≥7.0.
- Τα μέτρα θέσης των κατανομών του *M* των σεισμών αποάθροισης που προκύπτουν από τη χρήση του λογικού δέντρου και από κάθε μοντέλο σεισμικών πηγών ξεχωριστά βρίσκονται σε συμφωνία με το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας. Όσο χαμηλότερο είναι το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας τόσο χαμηλότερες είναι οι τιμές των μέτρων θέσης, και αντίστροφα. Οι τιμές τους στο λογικό δέντρο που χρησιμοποιήθηκε κυμαίνονται από 5.6 έως 6.4, με συχνότερα εμφανιζόμενα τα μεγέθη M6.0-6.1. Οι κεντρικές τιμές είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από τις μέσες. Οι τιμές που ελήφθησαν από το μοντέλο V2016 είναι οι χαμηλότερες, ενώ οι μεγαλύτερες αριθμητικές ασυμφωνίες παρατηρούνται μεταξύ των μοντέλων στις περιοχές μέτριας προς χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας.
- Τα μέσα μέτρα θέσης των κατανομών της απόστασης (R) των σεισμών αποάθροισης των μεμονωμένων μοντέλων σεισμικών πηγών και του λογικού δέντρου που χρησιμοποιήθηκε δεν βρίσκονται σε συμφωνία με το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας, καθώς μεγάλες τιμές μέσων αποστάσεων απαντώνται σε σημεία χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας, και αντίστροφα. Οι τιμές τους κυμαίνονται από 10 έως 20 km (λογικό δέντρο), με τις κεντρικές τιμές να είναι ελαφρώς χαμηλότερες από τις μέσες. Όπως και στις περιοχές χαμηλής σεισμικής επικινδυνότερη στις περιοχές χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας. Οι χαμηλότερες τιμές μέσων θέσης ανά σημείο προκύπτουν συστηματικά από τα μοντέλα PP2000 και V2016 και οι υψηλότερες από τα ESHM13 και ESHM20.

Τα μέτρα θέσης των κατανομών της παραμέτρου ε των σεισμών αποάθροισης των μοντέλων σεισμικών πηγών και του λογικού τους δέντρου έχουν σαφή συσχέτιση με το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας. Υψηλότερες τιμές μέσων τιμών της παραμέτρου ε προκύπτουν στις περιοχές υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας, και αντίστροφα. Κατά μέσο όρο, οι περιοχές υψηλής προς μέτριας σεισμικής επικινδυνότητας έχουν κεντρική τιμή ε~1.5, ενώ η κεντρική τιμή των περιοχών με μέτρια προς χαμηλή σεισμική επικινδυνότητα είναι ε~1.0. Σε αντίθεση με τις κατανομές των αποστάσεων, τα μοντέλα PP2000 και V2016 παρουσιάζουν συστηματικά υψηλότερες τιμές μέτρων θέσης, ενώ αυτές που προκύπτουν από τα ESHM13 και ESHM20 είναι συστηματικά χαμηλότερες.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η παρούσα διατριβή αξιολόγησε τα διαθέσιμα στοιχεία των τριών (περίπου) τελευταίων δεκαετιών και τα χρησιμοποίησε για την παραγωγή ενός επικαιροποιημένου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαθέσιμων μοντέλων επιφανειακών σεισμικών πηγών για τη συγκεκριμένη περιοχή. Επιπλέον, παρουσιάζουν τις διαφορές μεταξύ επιλεγμένων και σχετικά πρόσφατα δημοσιευμένων εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ. και αξιόπιστα αποτελέσματα σεισμικής αναδεικνύουν αυτές ου παράγουν επικινδυνότητας. Ο επικαιροποιημένος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου βασίζεται σε πέντε μοντέλα σεισμικών πηγών και σε ένδεκα εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της Ι.Σ.Κ., προκειμένου να επιτευχθεί η πλήρης περιγραφή και συμπερίληψη της επιστημικής αβεβαιότητας των υπολογισμών ΠΕΣΕ. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τόσο τις χωρικές, όσο και τις αριθμητικές διαφορές του επιπέδου της σεισμικής επικινδυνότητας από τον ΝΕΑΚ2003, καθώς και την άμεση ανάγκη επικαιροποίησής του.

Η Ανάλυση Εευαισθησίας της παρούσας διατριβής πραγματοποιείται πρώτη φορά για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου και αναδεικνύει τους παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο τη σεισμική επικινδυνότητα, προκειμένου αυτοί να ορίζονται και να επιλέγονται στο εξής με μεγαλύτερη προσοχή από τους ερευνητές και να μειωθεί η επιστημική αβεβαιότητα. Επιπλέον, λύνει μερικώς το ζήτημα του υπολογισμού τριών ειδών αποστάσεων, όταν αυτός δεν μπορεί να γίνει γεωμετρικά. Τέλος, από την αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με τον σχηματισμό σεισμών σχεδιασμού για πολλές θέσεις σεισμολογικού ενδιαφέροντος. Τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής μπορούν να αξιοποιηθούν κατά τη λήψη αποφάσεων σχετικών με τη διενέργεια μελετών σεισμικής επικινδυνότητας για τον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου, στη μελέτη της σεισμικής επικινδυνότητας του συνόλου της περιοχής και στον ορισμό κατάλληλων σεισμών σχεδιασμού.

Αρκετά στοιχεία της εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας στον Ελληνικό χώρο χρήζουν μελλοντικής διερεύνησης. Η ενσωμάτωση των σεισμών ενδιαμέσου βάθους στους υπολογισμούς της ΠΕΣΕ αναμένεται να αυξήσει τη σεισμική επικινδυνότητα στις περιοχές που βρίσκονται στη ζώνη κατάδυσης, ιδίως στο εξωτερικό Ελληνικό τόξο. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής βασίζονται σε μοντέλο χρονικά ανεξάρτητης σεισμικότητας. Ως εκ τούτου, παραμένει ανοιχτό το ερώτημα κατά πόσο μπορούν αυτά να μεταβληθούν, αν εφαρμοστεί κάποιο χρονικά εξαρτημένο μοντέλο σεισμικότητας. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ΠΕΣΕ στην οποία η κατανομή των επικέντρων εντός της πηγής δεν θεωρείται ομογενής, ιδίως στα μοντέλα που περιέχουν σεισμικές πηγές μεγάλου μεγέθους (ESHM13 και ESHM20), αξιοποιώντας πληροφορίες για τις κύριες ζώνες ρηγμάτων του Ελληνικού χώρου. Το ζήτημα της επίδρασης της δομής βαθιάς λεκάνης στα αποτελέσματα της σεισμικής επικινδυνότητας αξίζει περαιτέρω διερεύνηση, διότι οι έως τώρα προσπάθειες αξιοποίησής του δεν έχουν αποδώσει σταθερά αποτελέσματα για ορισμένες GMPE. Τέλος, είναι δυνατή η τροποποίηση των υπαρχόντων και η εισαγωγή νέων παραγόντων στην Ανάλυση Ευαισθησίας της ΠΕΣΕ (π.χ. το βάθος των σεισμών, το είδος των χρησιμοποιούμενων αποστάσεων από τη σεισμική εστία κ.λπ).





- Abrahamson, N.A., Silva, W.J., Kamai, R., 2014. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. Earthq. Spectra 30, 1025–1055.
- Adnan, A., Hendriyawan, Marto, A., Irsyam, M., 2005. Seismic Hazard Assessment for Peninsular Malaysia Using Gumbel Distribution Method. J. Teknol. 42, 57–73.
- Aguilar-Meléndez, A., Ordaz, M.G., De la Puente, J., Pujades, L., Barbat, A., Rodríguez-Lozoya, H.E., Monterrubio-Velasco, M., Escalante Martínez, J.E., Campos-Rios, A., 2018. Sensitivity analysis of seismic parameters in the probabilistic seismic hazard assessment (PSHA) for Barcelona applying the new R-crisis. Comput. y Sist. 22, 1099–1122.
- Akinci, A., Galadini, F., Pantosti, D., Petersen, M., Malagnini, L., Perkins, D., 2009. Effect of time dependence on probabilistic seismic hazard maps and deaggregation for the Central Apennines, Italy. Bull. Seismol. Soc. Am. 99, 585– 610.
- Akkar, S., Sandıkkaya, M.A., Bommer, J.J., 2014a. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. Bull. Earthq. Eng. 12, 359–387.
- Akkar, S., Sandıkkaya, M.A., Şenyurt, M., Sisi, A.A., Ay, B., Traversa, P., Douglas, J., Cotton, F., Luzi, L., Hernandez, B., Godey, S., 2014b. Reference database for seismic ground-motion in Europe (RESORCE). Bull. Earthq. Eng. 12, 311–339.
- Algermissen, S.T., Perkins, D.M., Isherwood, W., Cordon, D., Reagor, G., Howard, C., 1976. Seismic risk evaluation of the Balkan region. In: Proc. Sem. Seismic Zoning Maps. pp. 172–240.
- Allen, G., Smith, M., Way, E., Square, K., 2004. CEUS Ground Motion Project Final Report. EPRI.
- Ambraseys, N.N., 1995. The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe. Earthq. Eng. Struct. Dyn. 24, 467–490.
- Ambraseys, N.N., Simpson, K.A., Bommer, J.J., 1996. Prediction of horizontal response spectra in Europe. Earthq. Eng. Struct. Dyn. 25, 371–400.
- Ameer, A.S., Sharma, M.L., Wason, H.R., Alsinawi, S.A., 2004. Seismic Hazard Characterization and Risk Evaluation Using Gumbel's Method of Extremes (G1 and G3) and G-R Formula for Iraq. In: 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver.
- Ancheta, T.D., Darragh, R.B., Stewart, J.P., Seyhan, E., Silva, W.J., Chiou, B.S.J., Wooddell, K.E., Graves, R.W., Kottke, A.R., Boore, D.M., Kishida, T., Donahue, J.L., 2014. NGA-West2 Database. Earthq. Spectra 30, 989–1005.
- Ansari, A., Firuzi, E., Etemadsaeed, L., 2015. Delineation of seismic sources in probabilistic seismic-hazard analysis using fuzzy cluster analysis and Monte Carlo simulation. Bull. Seismol. Soc. Am. 105, 2174–2191.

Arnold, E.P., 1989. Program SEISRISK III adapted to personal computers. Open-File Report 89-557.

- Assatourians, K., Atkinson, G.M., 2013. EqHaz: An open-source probabilistic seismichazard code based on the Monte Carlo simulation approach. Seismol. Res. Lett. 84, 516–524.
- Atkinson, G.M., Goda, K., 2013. Probabilistic seismic hazard analysis of civil infrastructure, Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems. Woodhead Publishing Limited.
- Avital, M., Kamai, R., Davis, M., Dor, O., 2018. The effect of alternative seismotectonic models on PSHA results - A sensitivity study for two sites in Israel. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 18, 499–514.
- Baker, J.W., 2013. Introduction To Probabilistic Seismic Hazard Analysis. White Pap. Version 2.0.1, 79.
- Basili, R., Kastelic, V., Demircioglu, M.B., Garcia Moreno, D., Nemser, E.S., Petricca, P., Sboras, S.P., Besana-Ostman, G.M., Cabral, J., Camelbeeck, T., Caputo, R., Danciu, L., Domac, H., Fonseca, J., Gurcia-Mayordomo, J., Giardini, D., Glavatovic, B., Gulen, L., Ince, Y., Pavlides, S., Sesetyan, K., Tarabusi, G., Tiberti, M.M., Utkucu, M., Valensise, G., Vanneste, K., Vilanova, S., Wössner, J., 2013. European Database of Seismogenic Faults (EDSF) [WWW Document]. URL https://edsf13.ingv.it/
- Bastami, M., Kowsari, M., 2014. Seismicity and seismic hazard assessment for greater Tehran region using Gumbel first asymptotic distribution. Struct. Eng. Mech. 49, 355–372.
- Båth, M., 1983. The Seismology of Greece. Tectonophysics 98, 165–208.
- Bayrak, Y., Cinar, H., Tsapanos, T., Öztürk, S., Koravos, G., 2009. Earthquake hazard assessment for different regions in and around Turkey based on Gutenberg-Richter parameters by the least square method. J. Appl. Funct. Anal.
- Bazzurro, P., Cornell, C.A., 1999. Disaggregation of seismic hazard. Bull. Seismol. Soc. Am. 89, 501–520.
- Beauval, C., Scotti, O., 2004. Quantifying sensitivities of PSHA for France to earthquake catalog uncertainties, truncation of ground-motion variability, and magnitude limits. Bull. Seismol. Soc. Am. 94, 1579–1594.
- Bender, B., 1986. Modeling source zone boundary uncertainty in seismic hazard analysis. Bull. Seismol. Soc. Am. 76, 329–341.
- Bender, B., Campbell, K.W., 1989. A note on the selection of minimum magnitude for use in seismic hazard analysis. Bull. Seismol. Soc. Am. 79, 199–204.
- Bender, B., Perkins, D., 1982. SEISRISK II: A computer program for seismic hazard estimation. Open File Report 82-293.
- Bender, B., Perkins, M., 1987. SEISRISK III: A computer program for seismic hazard estimation. U.S. Geological Survey Bulletin No 1772.

Bindi, D., Massa, M., Luzi, L., Ameri, G., Pacor, F., Puglia, R., Augliera, P., 2014. Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods up to 3.0 s using the RESORCE dataset. Bull. Earthq. Eng. 12, 391–430.

- Bindi, D., Pacor, F., Luzi, L., Puglia, R., Massa, M., Ameri, G., Paolucci, R., 2011. Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database. Bull. Earthq. Eng. 9, 1899–1920.
- Bommer, J.J., 2003. Uncertainty about the uncertainty in seismic hazard analysis. Eng. Geol. 70, 165–168.
- Bommer, J.J., Crowley, H., 2017. The purpose and definition of the minimum magnitude limit in PSHA calculations. Seismol. Res. Lett. 88, 1097–1106.
- Bommer, J.J., Douglas, J., Strasser, F.O., 2003. Style-of-faulting in ground-motion prediction equations. Bull. Earthq. Eng. 1, 171–203.
- Bommer, J.J., Scherbaum, F., Bungum, H., Cotton, F., Sabetta, F., Abrahamson, N.A., 2005. On the use of logic trees for ground-motion prediction equations in seismic-hazard analysis. Bull. Seismol. Soc. Am. 95, 377–389.
- Bommer, J.J., van Elk, J., 2017. Comment on "the maximum possible and the maximum expected earthquake magnitude for production-induced earthquakes at the gas field in groningen, the netherlands" by gert zöller and matthias holschneider. Bull. Seismol. Soc. Am. 107, 1564–1567.
- Boore, D.M., Stewart, J.P., Seyhan, E., Atkinson, G.M., 2014. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. Earthq. Spectra 30, 1057–1085.
- Boore, D.M., Stewart, J.P., Skarlatoudis, A.A., Seyhan, E., Margaris, B., Theodoulidis, N., Scordilis, E., Kalogeras, I., Klimis, N., Melis, N.S., 2021. A ground-motion prediction model for shallow crustal earthquakes in greece. Bull. Seismol. Soc. Am. 111, 857–874.
- Borgonovo, E., 2017. Sensitivity Analysis: An Introduction for the Management Scientist, International Series in Operations Research & Management Science.
- Borgonovo, E., Plischke, E., 2016. Sensitivity analysis: A review of recent advances. Eur. J. Oper. Res. 248, 869–887.
- Bourne, S.J., Oates, S.J., Bommer, J.J., Dost, B., Van Elk, J., Doornhof, D., 2015. A monte carlo method for probabilistic hazard assessment of induced seismicity due to conventional natural gas production. Bull. Seismol. Soc. Am. 105, 1721–1738.
- Bourne, S.J., Oates, S.J., Van Elk, J., Doornhof, D., 2014. A seismological model for earthquakes induced by fluid extraction from a subsurface reservoir. J. Geophys. Res. Solid Earth 119, 8991–9015.
- Budnitz, R.J., Apostolakis, G., Boore, D.M., Cluff, L.S., Coppersmith, K.J., Cornell, C.A., Morris, P.A., 1997. Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis :

Guidance on Uncertainty and Use of Experts., NUREG/CR-6372, US Nuclear Regulatory Commission.

- Burton, P.W., 1979. Seismic risk in southern Europe through to India examined using Gumbel's third distribution of extreme values. Geophys. J. R. astr. Soc. 59, 249–280.
- Burton, P.W., Bayliss, T.J., 2013. Seismic hazard across Bulgaria and neighbouring areas: Extreme magnitude recurrence and strong ground shaking. Nat. Hazards 68, 1155–1201.
- Burton, P.W., Xu, Y., Qin, C., Tselentis, G.A., Sokos, E., 2004. A catalogue of seismicity in Greece and the adjacent areas for the twentieth century. Tectonophysics 390, 117–127.
- Burton, P.W., Xu, Y., Tselentis, G.A., Sokos, E., Aspinall, W., 2003. Strong ground acceleration seismic hazard in Greece and neighboring regions. Soil Dyn. Earthq. Eng. 23, 159–181.
- Campbell, K.W., Bozorgnia, Y., 2014. NGA-West2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5% Damped Linear Acceleration Response Spectra. Earthq. Spectra 30, 1087–1115.
- Caputo, M., Panza, G.F., Postpischl, D., 1970. Deep structure of the Mediterranean basin. J Geophys Res 75, 4919–4923.
- Caputo, R., Chatzipetros, A., Pavlides, S., Sboras, S., 2012. The greek database of seismogenic sources (GreDaSS): State-of-the-art for northern greece. Ann. Geophys. 55, 859–894.
- Cauzzi, C., Faccioli, E., 2008. Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. J. Seismol. 12, 453–475.
- Cauzzi, C., Faccioli, E., Vanini, M., Bianchini, A., 2015. Updated predictive equations for broadband (0.01–10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records. Bull. Earthq. Eng. 13, 1587–1612.
- Chapman, M.C., 1995. A probabilistic approach to ground-motion selection for engineering design. Bull. Seismol. Soc. Am. 85, 937–942.
- Chiou, B.S.J., Youngs, R.R., 2014. Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. Earthq. Spectra 30, 1117–1153.
- Chousianitis, K., Del Gaudio, V., Pierri, P., Tselentis, G.A., 2018. Regional groundmotion prediction equations for amplitude-, frequency response-, and durationbased parameters for Greece. Earthq. Eng. Struct. Dyn. 47, 2252–2274.
- Chovanová, M.Z., 2018. Sensitivity study of the seismic hazard analysis of the locality of Jaslovské Bohunice. Comenius University in Bratislava.
- Cito, P., Iervolino, I., 2022. On occurrence disaggregation of probabilistic seismic hazard. Earthq. Eng. Struct. Dyn. 51, 3296–3303.

Cole, S.W., Burton, P.W., 2008. Comparative Analysis Of The Seismic Hazard Of Central China. In: 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE). Beijing.

- Cole, S.W., Xu, Y., Burton, P.W., 2008. Seismic hazard and risk in Shanghai and estimation of expected building damage. Soil Dyn. Earthq. Eng. 28, 778–794.
- Coppersmith, K.J., Youngs, R.R., 1986. Capturing uncertainty in probabilistic seismic hazard assessments within intraplate tectonic environments. In: Proceedings If the 3rd US National Conference on Earthquake Engineering. Vol. 1, p. 301-312.
- Cornell, C.A., 1968. Engineering Seismic Risk Analysis. Bull. Seismol. Soc. Am. 58, 1583–1606.
- Cornell, C.A., Vanmarcke, E.H., 1969. The Major Influences on Seismic Risk. In: Proc. of the 4th World Conference on Earthquake Engineering. pp. 69–83.
- Cramer, C.H., Wheeler, R.L., Mueller, C.S., 2002. Uncertainty analysis for seismic hazard in the southern Illinois basin. Seismol. Res. Lett. 73, 792–805.
- Danciu, L., Nandan, S., Reyes, C., Basili, R., Weatherill, G., Beauval, C., Rovida, A., Vilanova, S., Sesetyan, K., Bard, P.-Y., Cotton, F., Wiemer, S., Giardini, D., 2021. The 2020 update of the European Seismic Hazard Model: Model Overview 1–121.
- Danciu, L., Şeşetyan, K., Demircioglu, M., Gülen, L., Zare, M., Basili, R., Elias, A., Adamia, S., Tsereteli, N., Yalçın, H., Utkucu, M., Khan, M.A., Sayab, M., Hessami, K., Rovida, A.N., Stucchi, M., Burg, J.P., Karakhanian, A., Babayan, H., Avanesyan, M., Mammadli, T., Al-Qaryouti, M., Kalafat, D., Varazanashvili, O., Erdik, M., Giardini, D., 2018. The 2014 Earthquake Model of the Middle East: seismogenic sources. Bull. Earthq. Eng. 16, 3465–3496.
- Danciu, L., Sokos, E., Tselentis, G., 2007. Deaggregation of the Regional Seismic Hazard : City of Patras, Greece. In: Proceedings of the 1st IASME/WSEAS International Conference on Geology and Seismology (GES'07). pp. 57–63.
- Danciu, L., Tselentis, G.A., 2007. Engineering Ground Motion Parameters Attenuation Relationships For Greece. Bull. Seismol. Soc. Am. 97, 162–183.
- Derras, B., Bard, P.Y., Cotton, F., 2014. Towards fully data driven ground-motion prediction models for Europe. Bull. Earthq. Eng. 12, 495–516.
- Dilek, Y., Pavlides, S., 2006. Postcollisional tectonics and magmatism in the Mediterranean region and Asia. Geological Society of America, Special Papers, 409.
- Douglas, J., 2022. Ground Motion Prediction Equations 1964-2021, Department of Civil and Environmental Engineering University of Strathclyde. Glasgow. United Kingdom. pp. 678.
- Drakopoulos, J., Makropoulos, K., 1983. Seismicity and Hazard analysis studies in the area of Greece. Publ. Seism. Lab. Univ. Athens 1, 126.
- Dunn, W.L., Shultis, J.K., 2022. Exploring Monte Carlo methods. Elsevier.

Ebel, J.E., Kafka, A.L., 1999. A Monte Carlo approach to seismic hazard analysis. Bull. Seismol. Soc. Am. 89, 854–866.

- EPA, U., 2009. Guidance on the Development, Evaluation, and Application of Environmental Models [WWW Document]. URL www.epa.gov/crem
- Eschenbach, T.G., 1992. Spiderplots versus Tornado Diagrams for Sensitivity Analysis. Interfaces (Providence). 22, 40–46.
- Faccenna, C., Becker, T.W., Auer, L., Billi, A., Boschi, L., Brun, J.P., Capitanio, F.A., Funiciello, F., Horvàth, F., Jolivet, L., Piromallo, C., Royden, L., Rossetti, F., Serpelloni, E., 2014. Reviews of Geophysics Mantle dynamics in the Mediterranean. Rev. Geophys. 52, 283–332.
- Fassoulas, C., Kilias, A., Mountrakis, D., 1994. Postnappe stacking extension and exhumation of high-pressure/low-temperature rocks in the island of Crete, Greece. Tectonics 13, 127–138.
- Field, E., Jordan, T.H., Cornell, C.A., 2003. OpenSHA: A Developing Communitymodeling environment for Seismic Hazard Analysis. Seismol. Res. Lett. 74, 406– 419.
- Floyd, M.A., Billiris, H., Paradissis, D., Veis, G., Avallone, A., Briole, P., McClusky, S., Nocquet, J.M., Palamartchouk, K., Parsons, B., England, P.C., 2010. A new velocity field for Greece: Implications for the kinematics and dynamics of the Aegean. J. Geophys. Res. Solid Earth 115, 1–25.
- Frankel, A., 1995. Mapping seismic hazard in the central and eastern United States. Seismol. Res. Lett. 66, 8–21.
- Frankel, A.D., Petersen, M.D., Mueller, C.S., Haller, K.M., Wheeler, R.L., Leyendecker,
 E. V, Wesson, R.L., Harmsen, S.C., Cramer, C.H., Perkins, D.M., Rukstales, K.S.,
 2002. Documentation for the 2002 Update of the National Seismic Hazard
 Maps, Open-file report 02-420, US Geological Survey.
- Galanopoulos, A.G., Delibasis, N., 1972. Map of maximum observed intensities in Greece (period 1800-1970). University of Athens.
- Gasperini, P., Vannucci, G., 2003. FPSPACK: A package of FORTRAN subroutines to manage earthquake focal mechanism data. Comput. Geosci. 29, 893–901.
- Giner, J.J., Molina, S., Jauregui, P., 2002. Advantages of using sensitivity analysis in seismic hazard assessment: A case study of sites in Southern and Eastern Spain. Bull. Seismol. Soc. Am. 92, 543–554.
- Green, R.A., Hall, W.J., 1994. AN OVERVIEW OF SELECTED SEISMIC HAZARD ANALYSIS METHODOLOGIES. Civ. Eng. Stud. SRS 592, 95.
- Gregor, N., Abrahamson, N.A., Atkinson, G.M., Boore, D.M., Bozorgnia, Y., Campbell, K.W., Chiou, B.S.J., Idriss, I.M., Kamai, R., Seyhan, E., Silva, W., Stewart, J.P., Youngs, R., 2014. Comparison of NGA-West2 GMPEs. Earthq. Spectra 30, 1179– 1197.
- Grossi, P., 2000. Quantifying the uncertainty in seismic risk and loss estimation. In:

EuroConference on Global Change and Catastrophe Risk Management: Earthquake Risks in Europe, IIASA. Laxenburg, p. 247.

Gumbel, E.J., 1958. Statistics of extremes. Dover Publications Edition 2004.

- Gutenberg, B., Richter, C.F., 1944. Frequency of earthquakes in California. Bull. Seismol. Soc. Am. 34, 185–188.
- Hagos, L., Arvidsson, R., Roberts, R., 2006. Application of the spatially smoothed seismicity and Monte Carlo methods to estimate the seismic hazard of eritrea and the surrounding region. Nat. Hazards 39, 395–418.
- Haight, F.A., 1967. Handbook of the Poisson Distribution. John Wiley & Sons. New York.
- Hale, C., Abrahamson, N., Bozorgnia, Y., 2018. Probabilistic Seismic Hazard Analysis
 Code Verification, PEER Report 2018/03. Pacific Earthquake Engineering
 Research Center. Headquarters at the University of California, Berkeley.
- Han, S.W., Choi, Y.S., 2008. Seismic hazard analysis in low and moderate seismic region-Korean peninsula. Struct. Saf. 30, 543–558.
- Hatzfeld, D., Martinod, J., Bastet, G., Gautier, P., 1997. the contribution of gravitational potential energy Karitsa f Kattavia. J. Geophys. Res. 102, 649–659.
- Hatzidimitriou, P.M., Papadimitriou, E.E., Mountrakis, D.M., Papazachos, B.C., 1985. The seismic parameter b of the frequency-magnitude relation and its association with the geological zones in the area of Greece. Tectonophysics 120, 141–151.
- Hayes, G.P., Moore, G.L., Portner, D.E., Hearne, M., Flamme, H., Furtney, M., Smoczyk, G.M., 2018. Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. Science (80-.). 362, 58–61.
- Hosseinpour, V., Saeidi, A., Nollet, M.J., Nastev, M., 2021. Seismic loss estimation software: A comprehensive review of risk assessment steps, software development and limitations. Eng. Struct. 232.
- Howard, R.A., 1988. Decision Analysis : Practice and Promise. Manage. Sci. 34, 679–695.
- Iervolino, I., 2016. Soil-invariant seismic hazard and disaggregation. Bull. Seismol. Soc. Am. 106, 1900–1907.
- Iervolino, I., Chioccarelli, E., Convertito, V., 2011. Engineering design earthquakes from multimodal hazard disaggregation. Soil Dyn. Earthq. Eng. 31, 1212–1231.
- Ishikawa, Y., 1988. Hazard-consistent magnitude and distance for extended seismic risk analysis. In: Proceeding of the 9th World Conference on Earthquake Engineering. pp. 89–94.
- Ishikawa, Y., 1991. Probability-based determination of specific scenario earthquakes. In: Proceedings of the 4th International Conference on Seismic Zonation (4ICSZ). pp. 3–10.

Ishikawa, Y., 1994. Scenario earthquakes vs probabilistic seismic hazard analysis. In: Proceedings of the 6th International Conference on Structural Safety and Reliability. pp. 2139–2146.

- Jackson, J., McKenzie, D., 1988. The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East. Geophys. J. 93, 45–73.
- Jimenez, M.J., Giardini, D., Grünthal, G., SESAME, W.G., 2001. Unified seismic hazard modelling throughout the Mediterranean region. Boll. di Geofis. Teor. ed Appl. 42, 3–18.
- Johnson, C.E., Koyanagi, R.Y., 1988. A Monte-Carlo approach applied to the estimation of seismic hazard for the state of Hawaii. Seismol. Res. Lett. 59, 1–18.
- Jolivet, L., Brun, J.P., 2010. Cenozoic geodynamic evolution of the Aegean. Int. J. Earth Sci. 99, 109–138.
- Jolivet, L., Faccenna, C., Huet, B., Labrousse, L., Le Pourhiet, L., Lacombe, O., Lecomte, E., Burov, E., Denèle, Y., Brun, J.P., Philippon, M., Paul, A., Salaün, G., Karabulut, H., Piromallo, C., Monié, P., Gueydan, F., Okay, A.I., Oberhänsli, R., Pourteau, A., Augier, R., Gadenne, L., Driussi, O., 2013. Aegean tectonics: Strain localisation, slab tearing and trench retreat. Tectonophysics 597–598, 1–33.
- Joyner W.B., Boore D.M., 1981. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion reccords including records from the 1979 Imperial Valley, Califonia, Earthquake. Bull. Seismol. Soc. Am. 71, 2011–2038.
- Kagan, Y.Y., 1993. Statistics of characteristic earthquakes. Bull. Seismol. Soc. Am. 83, 7–24.
- Kagan, Y.Y., 2002. Seismic moment distribution revisited: II. Moment conservation principle. Geophys. J. Int. 149, 731–754.
- Kahle, H.G., Müller, M. V., Geiger, A., Danuser, G., Mueller, S., Veis, G., Billiris, H., Paradissis, D., 1995. The strain field in northwestern Greece and the Ionian Islands: results inferred from GPS measurements. Tectonophysics 249, 41–52.
- Kaklamanos, J., Baise, L.G., Boore, D.M., 2011. Estimating unknown input parameters when implementing the NGA ground-motion prediction equations in engineering practice. Earthq. Spectra 27, 1219–1235.
- Kameda, H., Ishikawa, Y., Li, W., 1994a. Probability based determination of scenario earthquakes. In: Seismic Risk Assessment of Urban Facilities in a Sedimentary Region. pp. 67–85.
- Kameda, H., Loh, C.H., Nakajima, M., 1994b. A comparative study in Japan and Taiwan by means of probabilistic scenario earthquakes. In: Proc. of 4th KAIST-NTU-KU Tri-Lateral Seminar/Workshop on Civil Engineering. pp. 27–37.
- Karakostas, V.G., Papadimitriou, E.E., Karakaisis, G.F., Papazachos, C.B., Scordilis, E.M., Vargemezis, G., Aidona, E., 2003. The 2001 Skyros, Northern Aegean,

Greece, earthquake sequence: Off - fault aftershocks, tectonic implications, and seismicity triggering. Geophys. Res. Lett. 30, 12-1-12–4.

Kastelic, V., Carafa, M.M.C., Visini, F., 2016. Neotectonic deformation models for probabilistic seismic hazard: A study in the External Dinarides. Geophys. J. Int. 205, 1694–1709.

- Kaviris, G., Zymvragakis, A., Bonatis, P., Kapetanidis, V., Spingos, I., Mavroulis, S., Kotsi, E., Lekkas, E., Voulgaris, N., 2023. A Logic-Tree Approach for Probabilistic Seismic Hazard Assessment in the Administrative Region of Attica (Greece). Appl. Sci. 13, 7553.
- Kaviris, G., Zymvragakis, A., Bonatis, P., Kapetanidis, V., Voulgaris, N., 2022a. Probabilistic and Scenario-Based Seismic Hazard Assessment on the Western Gulf of Corinth (Central Greece). Appl. Sci. 12, 11152.
- Kaviris, G., Zymvragakis, A., Bonatis, P., Sakkas, G., Kouskouna, V., Voulgaris, N., 2022b. Probabilistic Seismic Hazard Assessment for the Broader Messinia (SW Greece) Region. Pure Appl. Geophys. 179, 551–567.
- Kerkenou, A., Papazachos, C., Margaris, B., Papaioannou, C., 2022. Seismic hazard deaggregation with the use of random catalogues: An application for the broader Aegean area. In: Proceedings of the 16th International Congress of the Geological Society of Greece. pp. 193–194.
- Kerkenou, A., Papazachos, C.B., Margaris, B.N., Papaioannou, C.A., 2021. Application of One Factor analysis in Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA): An example from the broader Aegean area. In: Proc. of the Virtual 37th General Assembly of the European Seismological Commission (ESC2021). p. 269.
- Kiratzi, A., Louvari, E., 2003. Focal mechanisms of shallow earthquakes in the Aegean Sea and the surrounding lands determined by waveform modelling: A new database. J. Geodyn. 36, 251–274.
- Kiratzi, A.A., 2002. Stress tensor inversions along the westernmost North Anatolian Fault Zone and its continuation into the North Aegean Sea. Geophys. J. Int. 151, 360–376.
- Kkallas, C., Papazachos, C.B., Boore, D., Ventouzi, C., Margaris, B.N., 2018. Historical intermediate-depth earthquakes in the southern Aegean Sea Benioff zone: modeling their anomalous macroseismic patterns with stochastic groundmotion simulations. Bull. Earthq. Eng. 16, 5121–5150.
- Knapmeyer, M., 1999. Geometry of the Aegean Benioff zones. Ann. di Geofis. 42, 27– 38.
- Kotha, S.R., Weatherill, G., Bindi, D., Cotton, F., 2020. A regionally-adaptable groundmotion model for shallow crustal earthquakes in Europe, Bulletin of Earthquake Engineering. Springer Netherlands.
- Koutrakis, S.I., Karakaisis, G.F., Hatzidimitriou, P.M., Koliopoulos, P.K., Margaris, V.N., 2002. Seismic hazard in Greece based on different strong ground motion parameters. J. Earthq. Eng. 6, 75–109.

Kowsari, M., Halldorsson, B., Snæbjörnsson, J.Þ., 2017. On the Probabilistic Seismic Hazard Estimate for Húsavík, North Iceland on the basis of Monte Carlo Methods. 16th World Conf. Earthq. Eng. Paper no. 2823.

Kramer, S., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Pearson Education India.

- Kulkarni, R.B., Youngs, R.R., Coppersmith, K.J., 1984. Assessment of confidence intervals for results of seismic hazard analysis. In: Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering. p. Vol. 1, pp. 263–270.
- Le Pichon, X., Angelier, J., 1979. The hellenic arc and trench system: A key to the neotectonic evolution of the eastern mediterranean area. Tectonophysics 60, 1–42.
- Le Pichon, X., Kreemer, C., 2010. The miocene-to-present kinematic evolution of the eastern mediterranean and middle east and its implications for dynamics. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 38, 323–351.
- Lomnitz-Adler, J., Lomnitz, C., 1979. A modified form of the Gutenberg-Richter Magnitude-Frequency relation. Bull. Seismol. Soc. Am. 69, 1209–1214.
- Lyubushin, A.A., Tsapanos, T.M., Pisarenko, V.F., Koravos, G.C., 2002. Seismic hazard for selected sites in Greece: A Bayesian estimate of seismic peak ground acceleration. Nat. Hazards 25, 83–98.
- Makropoulos, K.C., 1978. Statistics of large earthquake magnitude and an evaluation of Greek seismicity. Ph.D. Thesis. University of Edinburgh, 193pp.
- Makropoulos, K.C., Burton, P.W., 1985. Seismic hazard in Greece. II. Ground acceleration. Tectonophysics 117.
- Margaris, B., Papazachos, B., Papaioannou, C., Theodulidis, N., Kalogeras, I., Skarlatoudis, A., 2001. Empirical attenuation relationships of the horizontal strong motion from the surface earthquakes of the Greek region. In: Proc. of the 2nd National Conference of Anti-Seismic Engineering and Technical Seismology. pp. 27–36.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksöz, M.N., Veis, G., 2000. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. J. Geophys. Res. Solid Earth 105, 5695–5719.
- McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben Sari, D., Tealeb, A., 2003. GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions. Geophys. J. Int. 155, 126–138.
- McGuire, R.K., 1976. FORTRAN computer program for seismic risk analysis. No. 76-67. US Geol. Surv.
- McGuire, R.K., 1995. Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes:

closing the loop. Bull. - Seismol. Soc. Am. 85, 1275–1284.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

McGuire, R.K., Shedlock, K.M., 1981. Statistical uncertainties in seismic hazard evaluations in the United States. Bull. Seismol. Soc. Am. 71, 1287–1308.

- McKenzie, D., 1972. Active Tectonics of the Mediterranean Region. Geophys. J. R. Astron. Soc. 30, 109–185.
- Meier, T., Becker, D., Endrun, B., Rische, M., Bohnhoff, M., Stöckhert, B., Harjes, H.P., 2007. A model for the hellenic subduction zone in the area of Crete based on seismological investigations. Geol. Soc. Spec. Publ. 291, 183–199.
- Meier, T., Rische, M., Endrun, B., Vafidis, A., Harjes, H.P., 2004. Seismicity of the Hellenic subduction zone in the area of western and central Crete observed by temporary local seismic networks. Tectonophysics 383, 149–169.
- Meijer, P.T., Wortel, M.J.R., 1997. Present-day dynamics of the Aegean region: A model analysis of the horizontal pattern of stress and deformation. Tectonics 16, 879–895.
- Meletti, C., D'Amico, V., Martinelli, F., 2009. SHARE D3.3 Homogeneous determination of maximum magnitude. Brusseles.
- Menant, A., Jolivet, L., Vrielynck, B., 2016. Kinematic reconstructions and magmatic evolution illuminating crustal and mantle dynamics of the eastern Mediterranean region since the late Cretaceous. Tectonophysics 675, 103–140.
- Mercier, J.L., Sorel, D., Vergely, P., Simeakis, K., 1989. Extensional tectonic regimes in the Aegean basins during the Cenozoic. Basin Res. 2, 49–71.
- Merz, H.A., Cornell, C.A., 1973. Seismic risk analysis based on a quadratic magnitudefrequency law. Bull. Seismol. Soc. Am. 63, 1999–2006.
- Moratto, L., Orlecka-Sikora, B., Costa, G., Suhadolc, P., Papaioannou, C., Papazachos, C.B., 2007. A deterministic seismic hazard analysis for shallow earthquakes in Greece. Tectonophysics 442, 66–82.
- Mosca, I., Sargeant, S., Baptie, B., Musson, R.M.W., Pharaoh, T.C., 2022. The 2020 national seismic hazard model for the United Kingdom, Bulletin of Earthquake Engineering. Springer Netherlands.
- Mountrakis, D., Kilias, A., Pavlaki, A., Fassoulas, C., Thomaidou, E., Papazachos, C., Papaioannou, C., Roumelioti, Z., Benetatos, C., Vamvakaris, D., 2012. Neotectonic study of the Western Crete and implications for seismic hazard assessment. J. Virtual Explor. 42.
- Musson, R.M.W., 1999a. Determination of design earthquakes in seismic hazard analysis through monte carlo simulation. J. Earthq. Eng. 3, 463–474.
- Musson, R.M.W., 1999b. Probabilistic seismic hazard maps for the North Balkan region. Ann. di Geofis.
- Musson, R.M.W., 2000. The use of Monte Carlo simulations for seismic hazard assessment in the U.K. Ann. di Geofis.

Musson, R.M.W., 2012. PSHA validated by quasi observational means. Seismol. Res. Lett. 83, 130–134.

- Nocquet, J.M., 2012. Present-day kinematics of the Mediterranean: A comprehensive overview of GPS results. Tectonophysics 579, 220–242.
- NRC, 1988. Probabilistic seismic hazard analysis. Rept. of the Panel on Seismic Hazard Analysis. National Academy Press. Washington. D.C., 97.
- Ordaz, M., 1991. CRISIS. Brief description of program CRISIS. Institute of Solid Earth Physics. University of Bergen. Norway, Internal Report, pp. 16.
- Ordaz, M., Aguilar, A., Arboleda, J., 1999. CRISIS99. Program for computing seismic hazard. UNAM.
- Ordaz, M., Aguilar, A., Arboleda, J., 2007. CRISIS2007. Program for computing seismic hazard. UNAM.
- Ordaz, M., Martinelli, F., Aguilar, A., Arboleda, J., Meletti, C., D'Amico, V., 2015. CRISIS2015. Program for computing seismic hazard.
- Ordaz, M., Martinelli, F., Aguilar, A., Arboleda, J., Meletti, C., D'Amico, V., 2017. R-CRISIS. Program and platform for computing seismic hazard.
- Ordaz, M., Martinelli, F., D'Amico, V., Meletti, C., 2013. CRISIS2008: A flexible tool to perform probabilistic seismic hazard assessment. Seismol. Res. Lett. 84, 495–504.
- Ordaz, M., Salgado-Gálvez, M.A., Giraldo, S., 2021. R-CRISIS: 35 years of continuous developments and improvements for probabilistic seismic hazard analysis. Bull. Earthq. Eng. 19, 2797–2816.
- Pagani, M., Marcellini, A., 2007. Seismic-hazard disaggregation: A fully probabilistic methodology. Bull. Seismol. Soc. Am. 97, 1688–1701.
- Pagani, M., Monelli, D., Weatherill, G., Danciu, L., Crowley, H., Silva, V., Henshaw, P., Butler, L., Nastasi, M., Panzeri, L., Simionato, M., Vigano, D., 2014. Openquake engine: An open hazard (and risk) software for the global earthquake model. Seismol. Res. Lett. 85, 692–702.
- Papadopoulos, G.A., Kijko, A., 1991. Maximum likelihood estimation of earthquake hazard parameters in the Aegean area from mixed data. Tectonophysics 185, 277–294.
- Papaioannou, C., Karakaisis, G., Latoussakis, I., Makropoulos, K., Stavrakakis, G., Tselentis, G.A., Gkazetas, G., Fardis, M., Mountrakis, D., Kostikas, C., 2006. Introduction on the Seismological Data and Their Elaboration for the Compilation of the new Seismic Hazard Zoning map of Greece. In: Proc. of the 5th Panhellenic Assembly of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, TEE. pp. 1–8.
- Papaioannou, C.A., 1984. Attenuation of seismic intensities and seismic hazard in the area of Greece. Ph.D. Thesis. Aristotle University of Thessaloniki. 200pp.

Papaioannou, C.A., 1986. Seismic hazard assessment and long term earthquake prediction in southern Balkan region. In: 2nd Int. Reg. Sem. on Earthq. Prognostics. Berlin, pp. 223–241.

- Papaioannou, C.A., 1988. Seismic hazard assessment for the area of Greece. In: Proc. Symp. New Development Seismol. Geophys. Of the Area of Greece. pp. 277–291.
- Papaioannou, C.A., Hatzidimitriou, P.M., Papazachos, B.C., Theodulidis, N.P., 1985. Seismic hazard assessment for southern Balkan region based on seismic sources. In: Proc. of the 3rd Int. Symp. Analysis of Seismicity and Seismic Risk. pp. 349–400.
- Papaioannou, C.A., Papazachos, B.C., 2000. Time-independent and time-dependent seismic hazard in Greece based on seismogenic sources. Bull. Seismol. Soc. Am. 90, 22–33.
- Papazachos, B.C., 1990. Seismicity of the Aegean and surrounding area. Tectonophysics 178, 287–308.
- Papazachos, B.C., Comninakis, P.E., 1969. Geophysical features of the Greek island arc and eastern Mediterranean ridge. In: CR Seances Conf. Reunie Madrid. pp. 74–75.
- Papazachos, B.C., Comninakis, P.E., 1971. Geophysical and tectonic features of the Aegean Arc. J. Geophys. Res. 76, 8517–8533.
- Papazachos, B.C., Dimitriadis, S.T., Panagiotopoulos, D.G., Papazachos, C.B., Papadimitriou, E.E., 2005. Deep structure and active tectonics of the southern Aegean volcanic arc. Dev. Volcanol. 7, 47–64.
- Papazachos, B.C., Karakostas, V.G., Papazachos, C.B., Scordilis, E.M., 2000. The geometry of the Wadati-Benioff zone and lithospheric kinematics in the Hellenic arc. Tectonophysics 319, 275–300.
- Papazachos, B.C., Kiratzi, A.A., Hatzidimitriou, P.M., Theodulidis, N.P., 1985. Regionalization of seismic hazard in Greece. In: Proc. of the 12th Reg. Sem. on Earthq. Eng. EAEE_EPPO. p. 12.
- Papazachos, B.C., Mountrakis, D.M., Papazachos, C.B., Tranos, M.D., Karakaisis, G.F., Savvaidis, A.S., 2001. The faults which have caused the known major earthquakes in Greece and surrounding region between the 5th century BC and today. In: Proc. of the 2nd National Conference of Anti-Seismic Engineering and Technical Seismology. Vol. 1726. pp. 17–26.
- Papazachos, B.C., Papaioannou, C.A., 1999. Lithospheric boundaries and plate motions in the Cyprus area. Tectonophysics 308, 193–204.
- Papazachos, B.C., Papaioannou, C.A., Margaris, B.N., Theodulidis, N.P., 1993. Regionalization of seismic hazard in Greece based on seismic sources. Nat. Hazards 8, 1–18.
- Papazachos, B.C., Papazachou, C., 2003. The earthquakes of Greece. Ziti, pp.273 (in



Papazachos, C.B., 1999. Seismological and GPS evidence for the Aegean-Anatolia interaction. Geophys. Res. Lett. 26, 2653–2656.

- Papazachos, C.B., 2019. Deep structure and active tectonics of the South Aegean volcanic arc. Elements 15, 153–158.
- Papazachos, C.B., Kiratzi, A., 1996. A detailed study of the active crustal deformation in the Aegean and surrounding area. Tectonophysics 253, 129–153.
- Papoulia, J., Stavrakakis, G., Papanikolaou, D., 2001. Bayesian estimation of strong earthquakes in the Inner Messiniakos fault zone, southern Greece, based on seismological and geological data. J. Seismol. 5, 233–242.
- Papoulia, J.E., 1992. An application of Cornell's classical approach to seismic hazard analysis of Volos, central Greece. Bull. Geol. Soc. Greece 27, 223–232.
- Papoulia, J.E., Slejko, D., 1993. Hazard assessment of two Greek regions with different seismotectonic knowledge. In: 11 Conv. Ann. Del. Gruppo Naz. Geof. Della Terra Solida. pp. 7–18.
- Papoulia, J.E., Stavrakakis, G.N., 1990. Attenuation laws and seismic hazard assessment. Nat. Hazards 3, 49–58.
- Papoulia, J.E., Stavrakakis, G.N., Kavadas, S., 1996. A linear and Bayesian source model for seismic hazard estimation along subduction zones. Bull. Geol. Soc. Greece 6, 186–192.
- Pavlides, S., Tsapanos, T., Zouros, N., Sboras, S., Koravos, G., Chatzipetros, A., 2009. Using active fault data for assessing seismic hazard: a case study from NE Aegean sea, Greece. In: Proc. of the 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering. pp. 1–14.
- Pavlou, K., Kaviris, G., Chousianitis, K., Drakatos, G., Kouskouna, V., Makropoulos, K., 2013. Seismic hazard assessment in Polyphyto Dam area (NW Greece) and its relation with the "unexpected" earthquake of 13 May 1995 (M s = 6.5, NW Greece). Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 13, 141–149.
- Pavlou, K., Kaviris, G., Kouskouna, V., Sakkas, G., Zymvragakis, A., Sakkas, V., Drakatos, G., 2021. Minor seismic hazard changes in the broader area of Pournari artificial lake after the first filling (W. Greece). Results Geophys. Sci. 7, 100025.
- Porter, K., 2016. A Beginner's Guide To Fragility, Vulnerability, and Risk. Encycl. Earthq. Eng. 1–29.
- Porter, K.A., Beck, J.L., Shaikhutdinov, R. V., 2002. Sensitivity of building loss estimates to major uncertain variables. Earthq. Spectra 18, 719–743.
- Porter, K.A., Field, E.H., Milner, K., 2012. Trimming the UCERF2 Hazard logic tree. Seismol. Res. Lett. 83, 815–828.
- Powers, P.M., 2017. National Seismic [WWW Document]. Natl. Seism. Hazard Model

Proj. Comput. code. URL https://github.com/usgs/nshmp-haz

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Rabinowitz, N., Steinberg, D.M., Leonard, G., 1998. Logic trees, sensitivity analyses, and data reduction in probabilistic seismic hazard assessment. Earthq. Spectra 14, 189–201.

- Rafi, Z., Hyder, A., 2006. Seismic Hazard Analysis and Zonation for the northern Areas of Pakistan and Kashmir, Report Met. Depart.
- Rao, M.N., Rao, P.P., Kaila, K.L., 1997. The first and third asymptotic distributions of extremes as applied to the seismic source regions of India and adjacent areas. Geophys. J. Int. 128, 639–646.
- Rehman, K., Burton, P.W., Weatherill, G.A., 2018. Application of Gumbel I and Monte Carlo methods to assess seismic hazard in and around Pakistan. J. Seismol. 22, 575–588.
- Reiter, L., 1990. Earthquake Hazard Analysis Issues and Insights. Columbia University Press, New York.
- Robinson, D., Dhu, T., Row, P., 2007. EQRM: An open-source event-based earthquake risk modeling program. In: AGU Fall Meeting Abstracts.
- Robinson, D., Fulford, G., Dhu, T., 2005. EQRM: Geoscience Australia's Earthquake Risk Model., Technical Manual: Version 3.0.
- Roumelioti, Z., Benetatos, C., Kiratzi, A., Dreger, D., 2008. Near-Real Time Moment Tensors for Earthquakes in Greece provided by the Dept of Geophysics, Aristotle University of Thessaloniki (AUTH – solutions). Aristotle Univ. Thessaloniki, 1–14.
- Roumelioti, Z., Kiratzi, A., Margaris, B., Chatzipetros, A., 2017. Simulation of strong ground motion on near-fault rock outcrop for engineering purposes: the case of the city of Xanthi (northern Greece). Bull. Earthq. Eng. 15, 25–49.
- Sakkas, G., Kouskouna, V., Makropoulos, K., 2010. Seismic hazard analysis in the Ionian Islands using macroseismic intensities. Hell. J. Geosci. 45, 239.
- Scherbaum, F., Bommer, J.J., Bungum, H., Cotton, F., Abrahamson, N.A., 2005. Composite ground-motion models and logic trees: Methodology, sensitivities, and uncertainties. Bull. Seismol. Soc. Am. 95, 1575–1593.
- Scherbaum, F., Schmedes, J., Cotton, F., 2004. On the conversion of source-to-site distance measures for extended earthquake source models. Bull. Seismol. Soc. Am. 94, 1053–1069.
- Schwartz, D.P., Coppersmith, K.J., 1984. Fault behavior and characteristic earthquakes: examples from the Wasatch and San Andreas fault zones. J. Geophys. Res. 89, 5681–5698.
- Shapira, A., 1983. Potential earthquake risk estimations by application of a simulation process. Tectonophysics 95, 75–89.
- Shen-Chyun Wu, Cornell, C.A., Winterstein, S.R., 1995. A hybrid recurrence model

and its implication on seismic hazard results. Bull. - Seismol. Soc. Am. 85, 1–16.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Silacheva, N. V., Kulbayeva, U.K., Kravchenko, N.A., 2018. Probabilistic seismic hazard assessment of Kazakhstan and Almaty city in peak ground accelerations. Geod. Geodyn. 9, 131–141.

- Silva, V., Crowley, H., Pagani, M., Monelli, D., Pinho, R., 2014. Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment. Nat. Hazards 72, 1409–1427.
- Skarlatoudis, A.A., Papazachos, C.B., Margaris, B.N., Theodulidis, N., Papaioannou, C., Kalogeras, I., Scordilis, E.M., Karakostas, V., 2003. Empirical peak ground-motion predictive relations for shallow earthquakes in Greece. Bull. Seismol. Soc. Am. 93, 2591–2603.
- Skarlatoudis, A.A., Papazachos, C.B., Margaris, B.N., Theodulidis, N., Papaioannou, C., Kalogeras, I., Scordilis, E.M., Karakostas, V., 2007. Erratum: Empirical peak ground-motion predictive relations for shallow earthquakes in Greece (Bulletin of the Seismological Society of America). Bull. Seismol. Soc. Am. 97, 2219–2221.
- Slejko, D., Rebez, A., Santulin, M., Garcia-Pelaez, J., Sandron, D., Tamaro, A., Civile, D., Volpi, V., Caputo, R., Ceramicola, S., Chatzipetros, A., Daja, S., Fabris, P., Geletti, R., Karvelis, P., Moratto, L., Papazachos, C., Pavlides, S., Rapti, D., Rossi, G., Saraò, A., Sboras, S., Vuan, A., Zecchin, M., Zgur, F., Zuliani, D., 2021. Seismic hazard for the Trans Adriatic Pipeline (TAP). Part 1: probabilistic seismic hazard analysis along the pipeline. Bull. Earthq. Eng. 19, 3349–3388.
- Sokolov, V., Wenzel, F., 2011. Influence of ground-motion correlation on probabilistic assessments of seismic hazard and loss: Sensitivity analysis. Bull. Earthq. Eng. 9, 1339–1360.
- Sokolov, V.Y., Wenzel, F., Mohindra, R., 2009. Probabilistic seismic hazard assessment for Romania and sensitivity analysis: A case of joint consideration of intermediate-depth (Vrancea) and shallow (crustal) seismicity. Soil Dyn. Earthq. Eng. 29, 364–381.
- Sotiriadis, D., Margaris, B., 2023. Evaluation of the predictive performance of regional and global ground motion predictive equations against Greek strong motion data. Soil Dyn. Earthq. Eng. 165, 107656.
- Sotiriadis, D., Margaris, B., Klimis, N., Dokas, I.M., 2023. Seismic Hazard in Greece: A Comparative Study for the Region of East Macedonia and Thrace. GeoHazards 4, 239–266.
- Stavrakakis, G.N., 1984. Contribution of the Bayesian statistics in the seismic hazard assessment of Crete and the surroundings and strong ground motion modelling. Ph.D. thesis. Univ. of Athens.
- Stavrakakis, G.N., Drakopoulos, J., 1995. Bayesian probabilities of earthquake occurrences in Greece and surrounding areas. Pure Appl. Geophys. PAGEOPH 144, 307–319.

Stavrakakis, G.N., Tselentis, G.A., 1987. Bayesian probabilistic prediction of strong

earthquakes in the main seismogenic zones of Greece. Bolletino Di Geofis. Teor. Ed Appl. 113, 51–63.

- Stepp, J.C., Silva, W.J., McGuire, R.K., Sewell, R.W., 1993. Determination of earthquake design loads for a high level nuclear waste repository facility. In: No. CONF-9310102-VOL. 2.
- Sucuoğlu, H., Akkar, S., Halûk, S., Sinan, A., 2014. Basic Earthquake Engineering, Springer.
- Taymaz, T., Jackson, J., McKenzie, D., 1991. Active tectonics of the north and central Aegean Sea. Geophys. J. Int. 106, 433–490.
- Taymaz, T., Jackson, J., Westaway, R., 1990. Earthquake mechanisms in the Hellenic Trench near Crete. Geophys. J. Int. 102, 695–731.
- Taymaz, T., Yilmaz, Y., Dilek, Y., 2007. The geodynamics of the Aegean and Anatolia: introduction. Geological Society, London, Special Publications 291:1-16.
- Theodulidis, N., 1988. Response spectra for the earthquakes of the Greek region. In: Proc. of the 1st Symp. for the New Developments in Seismology and Geophysics of the Greek Region. pp. 225–240.
- Theodulidis, N.P., Papazachos, B.C., 1992a. Dependence of strong ground motion on magnitude-distance, site geology and macroseismic intensity for shallow earthquakes in Greece: I, Peak horizontal acceleration, velocity and displacement. Soil Dyn. Earthq. Eng. 11, 387–402.
- Theodulidis, N.P., Papazachos, B.C., 1992b. Dependence of strong ground motion on magnitude-distance, site geology and macroseismic intensity for shallow earthquakes in Greece: II, Horizontal pseudovelocity. Soil Dyn. Earthq. Eng. 13, 317–343.
- Trevlopoulos, K., Guéguen, P., Helmstetter, A., Cotton, F., 2020. Earthquake risk in reinforced concrete buildings during aftershock sequences based on period elongation and operational earthquake forecasting. Struct. Saf. 84, 101922.
- Tsapanos, T.M., Burton, P.W., 1991. Seismic hazard evaluation for specific seismic regions of the world. Tectonophysics 194, 153–169.
- Tsapanos, T.M., Mäntyniemi, P., Kijko, A., 2004. A probabilistic seismic hazard assessment for Greece and the surrounding region including site-specific considerations. Ann. Geophys. 47, 1678–1688.
- Tsapanos, T.M., Papadopoulos, G.A., Galanis, O.C., 2003. Time independent seismic hazard analysis of Greece deduced from Bayesian statistics. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 3, 129–134.
- Tselentis, G.A., Danciu, L., 2010a. Probabilistic seismic hazard assessment in Greece -Part 3: Deaggregation. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 10, 51–59.
- Tselentis, G.A., Danciu, L., 2010b. Probabilistic seismic hazard assessment in Greece -Part 1: Engineering ground motion parameters. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 10, 25–39.

Tselentis, G.A., Danciu, L., Sokos, E., 2010. Probabilistic seismic hazard assessment in Greece - Part 2: Acceleration response spectra and elastic input energy spectra. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 10, 41–49.

- Utsu, T., 1999. Representation and analysis of the earthquake size distribution: A historical review and some new approaches. Pure Appl. Geophys. 155, 509–535.
- Vamvakaris, D.A., Papazachos, C.B., Papaioannou, C.A., Scordilis, E.M., Karakaisis, G.F., 2016a. A detailed seismic zonation model for shallow earthquakes in the broader Aegean area. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 16, 55–84.
- Vamvakaris, D.A., Papazachos, C.B., Papaioannou, C.A., Scordilis, E.M., Karakaisis, G.F., 2016b. Seismic Hazard Assessment in the Broader Aegean Area Using Time-Independent Seismicity Models Based on Synthetic Earthquake Catalogs. Bull. Geol. Soc. Greece L, 1463–1472.
- Van Hinsbergen, D.J.J., Schmid, S.M., 2012. Map view restoration of Aegean-West Anatolian accretion and extension since the Eocene. Tectonics 31.
- Vavlas, N., Kiratzi, A., Margaris, B., Karakaisis, G., 2019. Probabilistic seismic hazard assessment (PSHA) for Lesvos island using the logic tree approach. Bull. Geol. Soc. Greece 55, 109–136.
- Wang, J., Gao, M.T., 1996. Parameter sensitivity analyses in seismic hazard. Acta Seismol. Sin. English Ed. 9, 629–634.
- Weatherill, G., Burton, P.W., 2010. An alternative approach to probabilistic seismic hazard analysis in the Aegean region using Monte Carlo simulation. Tectonophysics 492, 253–278.
- Wells, D.L., Coppersmith, K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. -Seismol. Soc. Am. 84, 974–1002.
- Wesnousky, S.G., 1994. The Gutenberg-Richter or characteristic earthquake distribution, which is it? Bull. Seismol. Soc. Am. 84, 1940–1959.
- Wiemer, S., Giardini, D., F\u00e4h, D., Deichmann, N., Sellami, S., 2009. Probabilistic seismic hazard assessment of Switzerland: Best estimates and uncertainties. J. Seismol. 13, 449–478.
- Woessner, J., Laurentiu, D., Giardini, D., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G., Valensise, G., Arvidsson, R., Basili, R., Demircioglu, M.B., Hiemer, S., Meletti, C., Musson, R.W., Rovida, A.N., Sesetyan, K., Stucchi, M., Anastasiadis, A., Akkar, S., Engin Bal, I., Barba, S., Bard, P.Y., Beauval, C., Bolliger, M., Bosse, C., Bonjour, C., Bungum, H., Carafa, M., Cameelbeeck, T., Carvalho, A., Campos-Costa, A., Coelho, E., Colombi, M., D'amico, V., Devoti, R., Drouet, S., Douglas, J., Edwards, B., Erdik, M., Fäh, D., Fonseca, J., Fotopoulou, S., Glavatovic, B., Gómez Capera, A.A., Hauser, J., Husson, F., Kastelic, V., Kästli, P., Karatzetzou, A., Kaviris, G., Keller, N., Kierulf, H.P., Kouskouna, V., Krishnamurty, R., Lang, D., Lemoine, A., Lindholm, C., Makropoulos, K., Manakou, M., Marmureanu, G., Martinelli, F., Garcia Mayordomo, J., Mihaljevic, J., Monelli, D., Garcia-Moreno, D., Nemser, E.,

Pagani, M., Pinho, R., Pisani, A.R., Pitilakis, D., Pitilakis, K., Poggi, V., Radulian, M., Riga, E., Sandikkaya, M.A., Segou, M., Siegert, R., Silva, V., Stromeyer, D., Sousa, L., Sørensen, M.B., Tellez-Arenas, A., Vanneste, K., Wahlstöm, R., Weatherill, G., Viganò, D., Vilanova, S., Yenier, E., Zulfikar, C., Adams, J., Bommer, J.J., Bonilla, F., Faccioli, E., Gülen, L., Koller, M., Pinto, A., Pinto, P., Papaioannou, C., Peruzza, L., Scherbaum, F., Scotti, O., Stirling, M., Theodoulidis, N., Wenk, T., Zschau, J., 2015. The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results. Bull. Earthq. Eng. 13, 3553–3596.

Woo, G., 1985. PRISK manual. Principia Mechanica LTD., LONDON.

- Youngs, R.R., Coppersmith, K.J., 1985. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 23, 125.
- Zabukovec, B., 2000. OHAZ A computer program for spatially smoothed seismicity approach. In: Seismicity Modelling in Seismic Hazard Mapping. Workshop Proccedings. Slovenia, pp. 135.
- Zahran, H.M., Sokolov, V., Youssef, S.E.H., Alraddadi, W.W., 2015. Preliminary probabilistic seismic hazard assessment for the Kingdom of Saudi Arabia based on combined areal source model: Monte Carlo approach and sensitivity analyses. Soil Dyn. Earthq. Eng. 77, 453–468.
- Βαμβακάρης, Δ.Α., 2010. Συμβολή στη μελέτη της χρονικά μεταβαλλόμενης σεισμικότητας και σεισμικής επικινδυνότητας. Διδακτορική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 498 σελ.
- Γκανάς, Α., Οικονόμου, Ι.Α., Τσιμή, Χ., 2013. NOAfaults: A digital database for active faults in Greece. Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας 47, 518–530.
- Κόραβος, Γ.Χ., 2010. Εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας στην Ελλάδα και στις γύρω περιοχές με τη χρήση ενός μοντέλου σεισμών σχεδιασμού. Διδακτορική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 352 σελ.
- Μάργαρης, Β., 1994. Αζιμουθιακή εξάρτηση των σεισμικών κυμάτων στον Ελληνικό χώρο και επίδρασή της στη σεισμική επικινδυνότητα. Διδακτορική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 324 σελ.
- Παπαζάχος, Β., Μακρόπουλος, Κ., Λατουσάκης, Γ., Θεοδουλίδης, Ν., 1989. Τελική έκθεση για το πρόγραμμα του ΟΑΣΠ "ΕΚΠΟΝΗΣΗ ΧΑΡΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ", Σελ.22 και 28 σχήμ.
- Παπαϊωάννου, Χ., 2001. Συλλογή και Επεξεργασία Σεισμολογικών Δεδομένων και Σύνταξη Νέου Χάρτη Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας Συμβατού με τον Ισχύοντα Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό και τον Ευρωκώδικα 8. Τελική Έκθεση. ΙΤΣΑΚ. σελ.68.
- Ρουσόπουλος, Α., 1956. Αντισεισμικαί Κατασκευαί. Β. Παπαχρυσάνθεμου, Έκδοσις 2α, Αθήναι, σελ. 431.





ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακας Α1 Χαρακτηριστικοί μηχανισμοί γένεσης για κάθε ζώνη των μοντέλων των Vamvakaris et al. (2016a) ή V2016, του Papazachos (1990) ή P1990 και των Papaioannou and Papazachos (2000) ή PP2000. Αναγράφονται τα στοιχεία των επιπέδων των μηχανισμών γένεσης, δηλαδή η παράταξη (ζ), η γωνία κλίσης (δ) και το διάνυσμα ολίσθησης (λ), των κινηματικών αξόνων P και T και το μοντέλο σεισμικών πηγών στο οποίο ανήκουν. Η τελευταία στήλη (A.) αντιστοιχεί στην αναφορά του κάθε χαρακτηριστικού μηχανισμού γένεσης. Αναφορές: (1) Papazachos and Papazachou (2003), (2) International Seismological Center (ISC) - <u>http://www.isc.ac.uk/</u>, (3) Kiratzi and Louvari (2003), (4) Kkallas et al. (2018), (5) Βαμβακάρης (2010), (6) Roumelioti et al. (2008), (7) National Observatory of Athens (NOA) - <u>https://bbnet.gein.noa.gr/HL/</u>, (8) Mountrakis et al. (2012), (9) Fassoulas et al. (1994), (10) Kiratzi (2002), (11) Karakostas et al. (2003), (12) Papazachos and Papaioannou (1999). Τα επίπεδα που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις της παρούσας διατριβής φαίνονται με έντονα γράμματα.

			Επίπεδο 1				Επίπεδο 2				Άξονας Ρ Άξονας Τ		Μοντέλο					
A/A	φ (°)	λ (°)	ζ(°)	δ (°)	λ (°)	Βάρος	ζ(°)	δ (°)	λ (°)	Βάρος	ζ(°)	δ (°)	ζ (°)	δ (°)	V2016	P1990	PP2000	Α.
						(%)				(%)								
1	42.04	19.05	325	29	85	100	151	61	93	0	239	16	68	74	T-A1	1a	1	1
2	41.21	19.70	332	27	93	50	149	63	88	0	240	18	55	72	T-A2	1b	2	1
3	40.80	19.67	355	27	93	50	172	63	88	0	263	18	78	72	T-A2	1b	3	1
4	40.34	19.45	320	27	93	33.33	137	63	88	0	228	18	43	72	T-A3	1b	3	1
5	40.20	19.43	309	27	93	33.33	126	63	88	0	217	18	32	72	T-A3	1b	3	1
6	40.30	20.06	339	27	93	33.33	156	63	88	0	247	18	62	72	T-A3	6b	4	1
7	39.65	20.12	300	43	90	50	120	47	90	0	210	2	30	88	T-A4	1c	4	1
8	39.41	20.56	337	43	113	50	127	51	70	0	231	4	336	74	T-A4	1c	4	1
9	39.70	19.73	310	35	90	100	130	55	90	0	220	10	40	80	T-A5	Back6	-	1
10	42.39	19.81	174	33	-68	25	328	60	-103	25	206	72	68	14	N-B1	Back5	21	2
11	42.60	19.82	16	60	-102	25	220	32	-70	25	257	72	115	14	N-B1	Back5	-	2
12	41.46	20.56	161	49	-87	100	336	41	-93	0	99	85	249	4	N-B2	7a	22	1
13	40.68	20.79	185	49	-87	100	1	41	-93	0	123	85	273	4	N-B3	7a	22	1
14	39.43	21.23	11	49	-87	50	186	41	-94	50	309	85	99	4	N-B4	7b	23	1



15	38.20	20.20	40	57	172	50	134	83	33	0	263	18	2	28	S-C1	Back2	-	1
16	37.58	20.53	310	18	118	50	101	74	81	0	198	29	359	60	S-C1	Back2	-	1
17	38.70	20.55	30	77	178	100	120	88	13	0	255	8	346	11	S-C2	2a	6	1
18	38.80	21.10	195	60	135	100	312	52	39	0	255	5	159	52	S-C3	2a	5	1
19	38.20	20.20	40	57	172	100	134	83	33	0	263	18	2	28	S-C4	2a	7	1
20	38.30	20.80	330	57	83	100	163	34	101	0	65	12	218	77	S-C5	2a	7	3
21	37.58	20.53	310	18	118	50	101	74	81	0	198	29	359	60	T-D1	Back2	-	1
22	36.78	21.40	320	32	106	50	121	59	80	0	218	14	6	74	T-D1	Back2	-	1
23	37.58	20.53	310	18	118	50	101	74	81	0	198	29	359	60	T-D2	3A	-	1
24	36.78	21.40	320	32	106	50	121	59	80	0	218	14	6	74	T-D2	3A	-	1
25	37.58	20.53	310	18	118	100	101	74	81	0	198	29	359	60	T-D3	3A	8, 11	1
26	36.78	21.40	320	32	106	100	121	59	80	0	218	14	6	74	T-D4	3A	9, 12	1
27	36.19	22.05	320	32	106	50	121	59	80	0	218	14	6	74	T-D5	Back2	-	1
28	35.22	23.23	315	17	99	50	126	73	87	0	218	28	32	62	T-D5	Back2	-	1
29	36.19	22.05	320	32	106	100	121	59	80	0	218	14	6	74	T-D6	3A	10, 13	1
30	35.22	23.23	315	17	99	100	126	73	87	0	218	28	32	62	T-D7	3A	14, 16	1
31	33.50	25.50	291	29	108	100	91	63	81	0	188	17	340	71	T-D8	-	-	4
32	34.00	25.50	291	29	108	100	91	63	81	0	188	17	340	71	T-D9	4A	17	4
33	34.50	26.75	209	65	-3	25	301	87	-155	25	168	19	72	15	T-D10	4A	19	4
34	35.00	27.25	147	73	-177	0	57	87	-17	50	11	14	103	10	T-D10	5a	19	4
35	34.50	29.00	258	53	-47	100	21	54	-132	0	230	57	139	0	T-D11	Back3		4
36	35.25	27.75	296	28	99	7.5	106	63	85	7.5	199	17	5	71	T-D12	5a	19	4
37	36.25	28.25	337	76	-176	42.5	246	86	-14	42.5	200	13	292	7	T-D12	5b	18	4
38	36.25	29.00	259	21	76	25	94	70	95	25	11	14	103	10	T-D13	5b	20	4
39	35.75	30.25	84	73	-7	25	176	83	-163	25	41	17	309	7	T-D13	5A	-	4
40	42.01	21.00	30	49	-87	50	205	41	-94	50	328	85	118	4	N-E1	Back5	21	1
41	42.33	22.73	256	53	-93	50	81	37	-86	50	151	82	348	8	N-E2	Back5	-	1
42	41.30	21.32	343	49	-87	50	158	41	-94	50	281	85	71	4	N-E3	Back5	22	1
43	41.30	21.32	343	49	-87	25	158	41	-94	25	281	85	71	4	N-E4	Back5	34	1


44	41.89	22.88	266	53	-93	25	91	37	-86	25	161	82	358	8	N-E4	Back5	34	1
45	41.89	22.88	266	53	-93	50	91	37	-86	50	161	82	358	8	N-E5	17a	31	1
46	41.30	22.50	270	53	-93	50	95	37	-86	50	165	82	2	8	N-E6	17	34	1
47	42.05	25.00	270	37	-84	50	83	53	-95	50	331	81	176	8	N-E7	19	31	1
48	42.05	25.00	270	37	-84	50	83	53	-95	50	331	81	176	8	N-E8	Back4	-	1
49	42.05	25.00	270	37	-84	50	83	53	-95	50	331	81	176	8	N-E9	19	30	1
50	42.05	25.00	270	37	-84	50	83	53	-95	50	331	81	176	8	N-E10	Back4	30	1
51	40.92	22.34	56	45	-84	50	228	45	-96	50	54	86	322	0	N-E11	Back5	34	1
52	40.92	22.34	56	45	-84	50	228	45	-96	50	54	86	322	0	N-E12	17	35	1
53	41.21	24.12	90	53	-93	100	275	37	-86	0	345	82	182	8	N-E13	18	33	1
54	40.07	21.75	237	45	-101	50	72	46	-79	50	61	82	155	1	N-E14	Back5	36	1
55	40.49	22.99	278	53	-93	50	103	37	-86	50	173	82	10	8	N-E15	Back5	36	1
56	40.67	23.21	275	46	-70	40	67	47	-110	0	264	76	171	1	N-E16	17	35	1
57	40.83	23.21	90	53	-93	40	275	37	-86	0	345	82	182	8	N-E16	17	35	1
58	40.65	23.46	286	37	-84	20	99	53	-95	0	347	81	192	8	N-E16	17	35	1
59	40.53	23.97	93	53	-93	50	278	37	-86	50	348	82	185	8	N-E17	17	35	1
60	40.20	23.04	228	69	-143	100	123	56	-26	0	90	41	353	8	N-E18	Back5	36	5
61	39.91	23.52	102	53	-93	100	287	37	-86	0	357	82	194	8	N-E19	14a	59	1
62	39.58	23.04	327	50	-82	100	135	41	-99	0	284	82	51	5	N-E20	14a	37	1
63	40.83	24.00	70	53	-93	100	255	37	-86	0	325	82	162	8	N-E21	18	33	1
64	40.53	23.97	93	53	-93	25	278	37	-86	25	348	82	185	8	N-E22	Back4	32	1
65	40.83	24.00	70	53	-93	25	255	37	-86	0	325	82	162	8	N-E22	Back4	32	1
66	41.13	25.44	90	53	-93	25	275	37	-86	0	345	82	182	8	N-E22	Back4	64	1
67	41.13	25.44	90	53	-93	100	275	37	-86	0	345	82	182	8	N-E23	18	32	1
68	41.13	25.44	90	53	-93	100	275	37	-86	0	345	82	182	8	N-E24	Back4	32	1
69	41.20	26.20	54	90	177	50	144	87	0	0	99	2	9	2	N-E25	Back4	32	1
70	41.37	27.04	90	53	-93	25	275	37	-86	25	345	82	182	8	N-E25	Back4	-	1
71	41.20	26.20	54	90	177	25	144	87	0	0	99	2	9	2	N-E26	Back4	-	1
72	41.37	27.04	90	53	-93	12.5	275	37	-86	12.5	345	82	182	8	N-E26	Back4	-	1



73	40.90	28.13	89	90	177	16.6	179	87	0	0	134	2	44	2	N-E26	Back4	-	1
74	40.84	29.05	110	70	-155	16.6	11	67	-22	0	331	32	240	2	N-E26	Back4	-	1
75	40.63	29.08	259	59	-103	16.8	103	33	-69	0	137	73	358	13	N-E26	Back4	-	1
76	39.56	21.84	89	43	-90	20	269	47	-90	0	179	88	359	2	N-F1	10	36	1
77	39.59	22.16	69	43	-90	20	249	47	-90	0	159	88	339	2	N-F1	10	36	1
78	39.61	22.42	291	47	-88	20	108	43	-92	0	236	88	20	2	N-F1	10	36	1
79	39.81	22.34	109	47	-88	20	286	43	-92	0	54	88	198	2	N-F1	10	36	1
80	39.70	21.60	90	43	-90	20	270	47	-90	0	180	88	0	2	N-F1	10	23	1
81	39.27	22.39	270	47	-88	50	87	43	-92	0	215	88	359	2	N-F2	10	37	1
82	39.10	21.65	76	50	-82	25	244	41	-99	0	33	82	160	5	N-F2	7b	38	1
83	39.29	22.96	82	43	-90	25	262	47	-90	0	172	88	352	2	N-F2	10	37	1
84	38.75	21.60	200	40	-121	50	58	57	-67	50	18	69	132	9	N-F3	-	-	6
85	38.89	22.17	282	47	-88	50	99	43	-92	0	227	88	11	2	N-F4	Back1	38 <i>,</i> 39	1
86	38.50	22.54	90	40	-90	50	270	50	-90	0	180	85	0	5	N-F4	Back1	39 <i>,</i> 43	1
87	38.79	22.80	282	47	-90	25	102	43	-90	0	192	88	12	2	N-F5	11	40	1
88	38.59	22.67	308	50	-70	25	98	44	-112	0	283	74	24	3	N-F5	11	39	1
89	38.49	23.07	125	50	-70	25	275	44	-112	0	100	74	201	3	N-F5	11	40	1
90	38.57	23.25	294	50	-70	25	84	44	-112	0	269	74	10	3	N-F5	11	40	1
91	38.39	23.83	93	40	-90	50	273	50	-90	50	183	85	3	5	N-F6	11	41, 55	1
92	38.75	22.30	200	40	-121	50	58	57	-67	50	18	69	132	9	N-F7	-	42	6
93	38.39	21.94	85	40	-125	50	307	58	-64	0	267	66	19	10	N-F8	8a	42	1
94	38.25	22.07	290	30	-79	50	97	61	-96	0	351	74	192	15	N-F8	8a	43	1
95	38.10	22.60	295	30	-79	50	102	61	-96	0	356	74	197	15	N-F9	8b	44	1
96	38.32	22.68	106	40	-90	50	286	50	-90	0	196	85	16	5	N-F9	8b	43	1
97	37.81	22.94	255	43	-100	50	89	48	-81	50	63	83	172	2	N-F10	8b	44	1
98	38.24	23.69	282	40	-90	50	102	50	-90	0	12	85	192	5	N-F11	11	41	1
99	38.16	23.55	119	57	-80	50	280	34	-105	0	59	76	202	11	N-F11	11	41	1
100	38.14	23.95	112	45	-82	50	280	45	-98	50	109	84	16	0	N-F12	Back1	51, 41	7
101	37.50	23.09	266	48	-78	33.33	68	43	-103	0	243	81	348	2	N-F13	8c	45	1



102	37.50	23.37	275	43	-100	33.33	109	48	-81	0	83	83	192	2	N-F13	8c	45	1
103	37.35	23.45	243	48	-78	33.34	45	43	-103	0	220	81	325	2	N-F13	8c	45	1
104	37.83	21.17	37	89	176	100	127	86	1	0	82	2	352	4	N-H1	2b	8	1
105	37.20	21.50	212	89	176	33.33	302	86	1	0	257	2	167	4	N-H2	3	9	1
106	37.33	22.00	245	57	159	33.33	347	73	35	0	113	10	210	37	N-H2	3	24	1
107	37.50	21.50	75	26	-121	33.334	289	68	-76	0	222	64	8	22	N-H2	3	24	5
108	37.13	21.93	358	47	-98	20	190	44	-82	0	200	84	94	2	N-L1	3	24	1
109	37.08	22.18	197	50	-80	20	2	41	-102	0	160	81	280	5	N-L1	3	24	1
110	37.08	22.40	340	47	-98	20	172	44	-82	0	182	84	76	2	N-L1	3	26	1
111	36.68	22.34	164	44	-79	20	329	47	-100	0	167	82	66	2	N-L1	3	25	1
112	36.73	22.53	346	47	-98	20	178	44	-82	0	188	84	82	2	N-L1	3	25	1
113	37.01	22.46	343	47	-98	66.7	175	44	-82	0	185	84	79	2	N-L2	Back1	26	1
114	36.68	22.34	164	44	-79	33.3	329	47	-100	0	167	82	66	2	N-L2	Back1	26	1
115	35.98	23.01	158	50	-80	50	323	41	-102	50	121	81	241	5	N-L3	3	25	1
116	35.50	23.70	188	45	-71	50	342	48	-108	0	181	77	85	2	N-L4	4	27	8
117	35.30	24.20	199	59	-78	50	357	33	-109	0	139	73	280	13	N-L4	4	27	8
118	35.50	23.70	188	45	-71	33.5	342	48	-108	0	181	77	85	2	N-L5	4	27	8
119	35.30	24.20	199	59	-78	33.5	357	33	-109	0	139	73	280	13	N-L5	4	27	8
120	35.80	25.75	69	86	13	33	338	77	176	0	203	6	294	12	N-L5	4	28	8
121	34.90	25.45	258	80	-14	50	350	76	170	0	214	17	305	2	N-L6	4	15	4
122	35.00	25.95	194	40	-86	25	9	50	-94	25	254	84	101	4	N-L6	4	15	4
123	35.50	24.10	192	50	-87	25	7	40	-94	25	129	85	280	5	N-L7	Back1	27	9
124	35.50	25.00	40	44	-90	50	220	46	-90	0	254	90	310	2	N-L7	-	28	9
125	35.30	26.10	12	47	-98	50	204	44	-82	50	214	84	108	2	N-L8	Back1	28	1
126	35.76	27.05	185	47	-98	50	17	44	-82	50	27	84	281	2	N-L9	Back1	29	1
127	39.26	23.86	40	77	175	50	131	85	13	0	265	6	356	13	S-I1	14a	59	1
128	39.75	24.38	225	89	-172	50	135	82	-1	0	90	6	360	5	S-I1	14a	59	1
129	39.01	23.34	120	50	-29	100	230	68	-136	0	93	46	351	11	S-12	10	40	10
130	39.08	24.22	140	70	-10	100	233	81	-160	0	98	21	5	7	S-13	14b	60	11



131	39.41	24.92	216	86	175	70	306	85	4	0	261	1	171	6	S-14	14b	60	1
132	39.12	24.56	89	56	-118	30	313	43	-55	0	305	66	199	7	S-14	14b	60	1
133	38.98	25.11	40	67	-166	100	304	77	-24	0	260	26	354	7	S-15	14b	60	1
134	38.49	25.46	229	84	-153	100	136	63	-7	0	96	23	360	14	S-16	13	56	1
135	39.49	26.46	74	46	-114	100	287	49	-67	0	266	73	1	2	S-17	14c	61	1
136	39.20	26.25	45	89	-172	50	315	82	-1	0	270	6	180	5	S-18	14c	61	1
137	38.84	26.37	116	32	-88	50	294	58	-91	0	200	77	25	13	S-18	14c	61	7
138	40.16	25.24	253	88	-170	50	163	80	-2	0	118	8	27	6	S-19	16	65	1
139	40.32	25.97	75	55	-145	50	323	62	-41	0	286	48	21	4	S-19	16	65	1
140	39.69	25.84	260	90	177	100	350	87	0	0	305	2	215	2	S-I10	14b	60	1
141	40.65	26.98	245	80	165	100	338	75	10	0	292	3	201	18	S-I11	16	66	1
142	40.24	27.60	240	70	-155	25	141	67	-22	0	101	32	10	2	S-I12	15	66	1
143	39.90	26.72	243	90	177	25	333	87	0	0	288	2	198	2	S-I12	16	66	1
144	39.86	27.30	233	70	-160	25	136	71	-21	0	94	28	185	1	S-I12	14d	66	1
145	40.06	28.02	287	46	-95	25	114	44	-85	0	124	86	21	1	S-I12	15	66	1
146	40.90	28.13	89	90	177	33.33	179	87	0	0	134	2	44	2	S-I13	15	67	1
147	40.84	29.05	110	70	-155	33.33	11	67	-22	0	331	32	240	2	S-I13	15	67	1
148	40.63	29.08	259	59	-103	33.34	103	33	-69	0	137	73	358	13	S-I13	15	67	1
149	40.70	30.00	91	76	179	33.33	181	89	14	0	315	9	47	11	S-I14	15	67	1
150	40.43	29.84	77	90	177	33.33	167	87	0	0	122	2	32	2	S-I14	15	67	1
151	40.30	28.20	273	46	-95	33.34	100	44	-85	0	110	86	7	1	S-I14	15	67	1
152	40.18	29.08	83	45	-90	70	263	45	-90	0	298	90	173	0	S-I15	15	67	1
153	40.04	28.55	236	90	177	30				0	281	2	191	2	S-I15	15	67	1
154	37.42	24.18	80	48	-78	50	242	43	-103	50	305	2	215	2	N-J1	Back1	51	1
155	36.00	25.00	84	73	-7	50	176	83	-163	50	41	17	309	7	N-J2	Back1	27	4
156	36.65	24.51	113	45	-89	50	293	45	-89	50	148	90	23	0	N-J3	Back1	46	4
157	36.73	25.99	65	40	-90	75	245	50	-90	25	155	85	335	5	N-J4	Back1	28	1
158	38.65	26.10	261	45	-155	25	153	73	-47	0	105	45	213	17	N-K1	13	56	1
159	38.29	26.20	82	45	-155	25	334	73	-47	0	286	45	34	17	N-K1	13	56	1



160	38.33	26.61	266	45	-115	12.5	119	50	-67	12.5	95	72	193	3	N-K1	13	56	1
161	38.06	27.01	238	85	-167	25	147	77	-5	0	103	13	12	6	N-K1	13	52, 53	1
162	38.38	27.05	256	45	-115	33.33	109	50	-67	0	85	72	183	3	N-K2	13	57	1
163	38.63	26.98	84	45	-115	33.33	297	50	-67	0	273	72	11	3	N-K2	13	56	1
164	38.54	27.53	294	45	-115	33.34	147	50	-67	0	123	72	221	3	N-K2	13	57	1
165	38.98	26.93	31	45	-115	50	244	50	-67	0	220	72	318	3	N-K3	14c	61	1
166	39.22	27.29	61	45	-115	50	274	50	-67	0	250	72	348	3	N-K3	14d	62	1
167	39.49	29.48	281	43	-94	100	106	47	-86	0	67	87	194	2	N-K4	14d	63	1
168	39.25	28.14	287	45	-115	33.33	140	50	-67	0	116	72	214	3	N-K5	14d	62	1
169	39.18	28.69	104	34	-90	33.33	284	56	-90	0	194	79	14	11	N-K5	14d	63	1
170	39.15	29.60	312	35	-90	33.34	132	55	-90	0	42	80	222	10	N-K5	14d	63	1
171	38.34	28.50	313	34	-90	50	133	56	-90	50	43	79	223	11	N-K6	13	58	1
172	37.71	26.87	91	45	-115	16.5	304	50	-67	16.5	280	72	18	3	N-K7	12	52, 53	1
173	37.63	27.21	73	45	-115	16.5	286	50	-67	16.5	262	72	0	3	N-K7	12	52, 53	1
174	38.06	27.01	238	85	-167	34	147	77	-5	0	103	13	12	6	N-K7	12	52, 53	1
175	37.99	27.45	244	45	-115	50	97	50	-67	0	73	72	171	3	N-K8	12	54	1
176	37.87	28.16	83	42	-99	50	275	49	-82	0	240	83	359	3	N-K8	12	52, 53	1
177	37.94	29.09	133	42	-99	25	325	49	-82	0	290	83	49	3	N-K9	12	54	1
178	37.79	28.96	292	42	-99	25	124	49	-82	0	89	83	208	3	N-K9	12	54	1
179	37.33	29.00	280	42	-99	25	112	49	-82	0	77	83	196	3	N-K9	12	50	1
180	37.80	29.80	248	35	-105	25	86	56	-80	0	28	76	169	11	N-K9	12	54	1
181	37.94	29.09	133	42	-99	25	325	49	-82	0	290	83	49	3	N-K10	-	-	1
182	37.79	28.96	292	42	-99	25	124	49	-82	0	89	83	208	3	N-K10	-	-	1
183	37.33	29.00	280	42	-99	25	112	49	-82	0	77	83	196	3	N-K10	-	-	1
184	37.80	29.80	248	35	-105	25	86	56	-80	0	28	76	169	11	N-K10	-	-	1
185	36.53	25.52	50	40	-90	50	230	50	-90	50	140	85	320	5	N-K11	9a	47	1
186	36.73	25.99	65	40	-90	75	245	50	-90	25	155	85	335	5	N-K12	9a	47	1
187	36.75	27.19	50	48	-78	25	212	43	-103	25	27	81	132	2	N-K13	9a	48	1
188	36.93	27.33	275	36	-85	25	89	54	-94	25	343	80	181	9	N-K13	9a	48	7



189	37.03	28.11	80	42	-99	50	272	49	-82	50	237	83	356	3	N-K14	9b	49	1
190	36.95	28.63	65	42	-99	50	257	49	-82	0	222	83	341	3	N-K15	9b	49	1
191	36.36	27.63	250	48	-78	50	52	43	-103	0	227	81	332	2	N-K15	5B	29	1
192	37.03	28.11	80	42	-99	50	272	49	-82	50	237	83	356	3	N-K16	9b	50	1
193	36.29	31.32	85	15	-102	50	278	76	-80	50	192	60	5	30	N-K17	-	-	12



Η πιο συνηθισμένη κατανομή των μεγεθών των σεισμών στη Σεισμολογία είναι η κατανομή Gutenberg-Richter (G-R), σύμφωνα με την οποία ο αριθμός των σεισμών (*n*) με μέγεθος *M±δM*/2, οι οποίοι συμβαίνουν σε ορισμένο χώρο και χρονικό διάστημα, συνδέεται με το μέγεθος με μια σχέση της μορφής *logn=a'-bm*, όπου *a'* και *b* κατάλληλες σταθερές. Αντί της σχέσης αυτής, συχνά χρησιμοποιείται η αθροιστική συχνότητα των σεισμών, *N*, αντί του πραγματικού αριθμού τους, οπότε αυτή παίρνει τη μορφή *logN=a-bm*. Και στις δύο περιπτώσεις ενδέχεται το μέγιστο μέγεθος είτε να είναι ελεύθερο (θεωρητικά έως και άπειρο) ή να φράσσεται σε ένα μέγιστο μέγεθος, *M_{max}*. Στη συνέχεια εξετάζονται και οι δύο περιπτώσεις της μορφής της κατανομής G-R και ο τρόπος με τον οποίο είναι δυνατόν να

Σύμφωνα με την αρχική υπόθεση, η συνάρτηση πυκνότητας των σεισμών χρησιμοποιώντας ένα διάστημα μεγεθών, dM, γύρω από το μέγεθος M, δίνεται από τη σχέση:

$$log\left(\frac{dn}{dM}\right) = a' - b'M \Rightarrow log(dn) - log(dM) = a' - b'M \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \log(dn) = (a' + \log(dM)) - b'M \Rightarrow$$
(B1)

 $\Rightarrow \log(dn) = a_n - b_n M$

όπου, dn, οι σεισμοί με μέγεθος [M,M+dM]. Η ποσότητα:

$$f = \frac{dn}{dM} \Rightarrow dn = p(M) * N_{tot} * dM = f * dM$$

είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, πολλαπλασιασμένη με τον συνολικό αριθμό των σεισμών, *N*tot, δηλαδή η συνάρτηση πυκνότητας αριθμού σεισμών.

<u>Περίπτωση 1</u>: Δεν θεωρούμε κάποιο μέγιστο μέγεθος, δηλαδή η σχέση G-R δεν είναι φραγμένη ($M_{max} \rightarrow \infty$). Σε αυτήν την περίπτωση, η αθροιστική συχνότητα των σεισμών με μέγεθος m>M, N(M), είναι:

$$N(M) = \int_{M}^{\infty} dn = \int_{M}^{\infty} f * dM = \int_{M}^{\infty} 10^{a'-b'M} dM \Rightarrow N(M) = \frac{1}{b} \int_{-\infty}^{a'-b'M} e^{ln10*x} dx \Rightarrow$$

$$\Rightarrow N(M) = \frac{1}{b' \ln 10} 10^{a'-b'M}$$

Επομένως, έπειτα από τη λογαρίθμηση της παραπάνω σχέσης, προκύπτει η γνωστή ευθεία G-R, της μορφής log*N* = *α-bM*:

$$\log N = \alpha' - \log(b' \ln 10) - b'M = a - bM$$
(B2)

όπου *b=b'* και *α=α'-log(b'ln10)*.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Α.Π.Θ

Οι σχέσεις (B1) και (B2) είναι οι κλασικές σχέσεις G-R που έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς στη Σεισμολογία και οι οποίες έχουν την ίδια κλίση, είτε χρησιμοποιείται ο αριθμός σεισμών *n* (σε διάστημα *dM*) είτε ο αθροιστικός αριθμός, *N*, όπως φαίνεται στο σχήμα B1. Προϋπόθεση είναι να μην υπάρχει μέγιστο μέγεθος σεισμού $(M_{max} \rightarrow \infty)$.



Σχήμα B2. Ευθείες G-R, όταν δεν υπάρχει μέγιστο μέγεθος Mmax.

Εύκολα φαίνεται ότι, αν επιθυμούμε η αθροιστική σχέση G-R, δηλαδή η αθροιστική συχνότητα των σεισμών με μέγεθος *m>M*, *N(M)*, να έχει αυτή τη μορφή:

$$N(M) = 10^{a-bM} [1 - H(M - M_{max})] \Rightarrow$$
$$logN = a - bM + log[1 - H(M - M_{max})]$$
(B3)

όπου, *Η*, η συνάρτηση Heaviside, τότε ο αριθμός *dn* των σεισμών με μέγεθος [*M*,*M*+*dM*], δίνεται από τη σχέση:

$$dn = p(M) * N_{tot} * dM = \frac{dF}{dM} * N_{tot} * dM$$
(B4)

όπου, *F(M)*, η αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Ασχέτως του ελαχίστου μεγέθους, *M_{min}*, που θα θεωρήσουμε για τον υπολογισμό του συνολικού αριθμού των σεισμών, *N_{tot}*, η σχέση (B4) οδηγεί σε μία σχέση της μορφής:

$$\log(dn) = (\alpha + \log(b \ln 10) + \log(dM)) - bM + \delta(M_{max} - M)$$
(B5)

όπου, δ(Mmax-M), η συνάρτηση δέλτα. Σε αυτήν την περίπτωση, η νέα τροποποιημένη σχέση G-R, logn=f(M), είναι ευθεία για μεγέθη M<M_{max} με ίδια κλίση με τη σχέση (B2), ενώ στην τιμή M_{max} απειρίζεται (Σχήμα B2).



Σχήμα B3. Μορφή σχέσεων G-R, όταν η αθροιστική πιθανοτική κατανομή των σεισμών, δηλαδή η σχέση *logN-M*, φράσσεται σε ένα μέγιστο μέγεθος *M_{max}*.

Περίπτωση 2: Αν θεωρήσουμε ότι η κατανομή της σχέσης (B1) είναι προς τα πάνω φραγμένη σε μία τιμή M_{max}, η σχέση (B1) πρέπει να γραφεί ως εξής:

$$\frac{dn}{dM} = f = 10^{a'-b'M} [1 - H(M - M_{max})]$$

$$\log\left(\frac{dn}{dM}\right) = a' - b'M + \log[1 - H(M - M_{max})]$$
(B6)

όπου, Η, η συνάρτηση Heaviside. Σε αυτήν την περίπτωση, η αθροιστική συχνότητα των σεισμών με μέγεθος m>M, N(M), δίνεται από τη σχέση:

$$N(M) = \int_{M}^{M_{max}} f dM = \frac{1}{b' \ln 10} \left[10^{a'-b'M} - 10^{a'-b'M_{max}} \right] =$$
$$= \frac{1}{b' \ln 10} 10^{a'-b'M} \left[1 - 10^{-b'(M_{max}-M)} \right]$$
(B7)

Μετά από τη λογαρίθμηση της παραπάνω σχέσης, προκύπτει μία μη-γραμμική σχέση, δηλαδή μία ευθεία της μορφής *logN=a-bM*, στην οποία προστίθεται ένας επιπλέον μη-γραμμικός όρος:

$$\log N = \alpha' - \log(b'^{\ln 10}) - b'M + \log[1 - 10^{-b'(M_{max} - M)}] \Rightarrow$$
$$\log N = \alpha - bM + \log[1 - 10^{-b(M_{max} - M)}]$$
(B8)

όπου b=b' και $\alpha=\alpha'-log(b'ln10)$. Σε αυτή την περίπτωση, η νέα τροποποιημένη σχέση G-R, logN = f(M), μοιάζει ευθεία για μεγέθη $M << M_{max}$ με ίδια κλίση με τη σχέση (B6), ενώ η κλίση της αυξάνεται σταδιακά όσο πλησιάζουμε στο M_{max} (Σχήμα B2).



Σχήμα Β4. Μορφή σχέσεων G-R, όταν η πιθανοτική κατανομή των σεισμών, δηλαδή η σχέση *logn-M*, φράσσεται σε ένα μέγιστο μέγεθος *M_{max}*.

Παρακάτω, παρουσιάζεται η διαδικασία που μπορεί να ακολουθηθεί για καθεμία από τις δύο περιπτώσεις κατανομής G-R, με σκοπό τη δημιουργία συνθετικού καταλόγου με τη χρήση τυχαίων αριθμών, ο οποίος θα ακολουθεί τις κατανομές αυτές.

<u>Περίπτωση 1 (*M_{max}*→∞ και αθροιστική κατανομή φραγμένη στο *M_{max}*):</u>

Έστω *M_{min}* το ελάχιστο μέγεθος του καταλόγου που θα χρησιμοποιήσουμε. Από τη σχέση (B2) ισχύει ότι:

$$N(M_{min}) = \frac{1}{b' \ln 10} 10^{a'-b'M_{min}}$$

Η πιθανότητα να συμβεί ένας σεισμός μεγέθους [M,M+dM] είναι:

$$p(M, M + dM) = \frac{dn(M)}{N(M_{min})} = b'^{\ln 10e^{-b' \ln 10(M - M_{min})}} dM = f_p(M) dM$$

όπου, $f_p(M)$, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Θέτοντας b' ln10= λ και M'=M-M_{min}, τότε:

$$f_n(M') = \lambda e^{-\lambda M'}$$

Έστω ότι, *p(x)*, η ομογενής κατανομή στο διάστημα [0,1] και, *p(y)*, μία άλλη κατανομή για την οποία ισχύει ότι:

$$|p(x)dx| = |p(y)dy| \Rightarrow p(y) = \left|\frac{dx}{dy}\right|p(x)$$

Θέτοντας:

$$y(x) = -\ln x \Rightarrow x = e^{-y}$$

προκύπτει ότι:

$$p(y) = e^{-y} dy$$

Επομένως, αν δημιουργούμε τυχαίους αριθμούς που ακολουθούν την ομογενή κατανομή, p(x), στο διάστημα [0,1] και στη συνέχεια υπολογίζουμε το y = -lnx, τότε αυτό θα ακολουθεί την κατανομή $f(y) = e^{-y}$. Εύκολα φαίνεται ότι αν $y(x) = -\frac{1}{2}lnx$, τότε $f(y) = \lambda e^{-\lambda y}$.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

$$y = -\frac{1}{\lambda} \ln x = -\frac{1}{b' \ln 10} \ln x \Rightarrow M' = M - M_{min} = -\frac{1}{b' \ln 10} \ln x \Rightarrow$$
$$\Rightarrow M = M_{min} - \frac{1}{b' \ln 10} \ln x$$
(B9)

όπου, x, τυχαίος αριθμός από την ομογενή κατανομή.

Εναλλακτικά, είναι δυνατή η αξιοποίηση της αθροιστικής συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, *F*. Με την ίδια προσέγγιση:

$$\frac{N(M)}{N(M_{min})} = 1 - F \Rightarrow F = 1 - \frac{N(M)}{N(M_{min})} = 1 - 10^{-b'(M - M_{min})} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \ln(1 - F) = -b' \ln 10 (M - M_{min}) \Rightarrow$$
$$\Rightarrow M = M_{min} - \frac{1}{b' \ln 10} \ln(1 - F)$$
(B10)

Η σχέση (B10) είναι ταυτόσημη με τη (B9): Επιλέγοντας ομογενή τυχαία νούμερα στο διάστημα [0,1] της αθροιστικής συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, *F*, η ποσότητα 1-*F* ακολουθεί επίσης ομογενή κατανομή στο διάστημα [0,1], οδηγώντας στις ίδιες τιμές του μεγέθους.

Η σχέση (B10) αποτελεί το βασικό εργαλείο που πρέπει να επιλέξουμε, όταν θέλουμε να έχουμε μία σχέση G-R η οποία θα είναι γραμμική για τον αθροιστικό αριθμό σεισμών, N(M), αλλά θα φράσσεται σε μία τιμή M_{max}. Σε αυτήν την περίπτωση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (B6), αγνοώντας όλες τις τιμές που δίνουν M>M_{max}.

Περίπτωση 2 (Κατανομή φραγμένη στο M_{max}):

Έστω *M_{min}* το ελάχιστο μέγεθος του καταλόγου που θα χρησιμοποιήσουμε. Από τη σχέση (B7) ισχύει ότι:

$$N(M_{min}) = \frac{1}{b' \ln 10} 10^{a'-b'M_{min}} \left[1 - 10^{-b'(M_{max}-M_{min})} \right]$$
(B11)

Θέτουμε:

$$k = 1 - 10^{-b'(M_{max} - M_{min})}$$
(B12)

Ο όρος k έχει πάντα τιμή μικρότερη της μονάδας, αλλά γενικά πολύ κοντά στη μονάδα. Για παράδειγμα, για b'=1, $M_{max}=7$ και $M_{min}=4$, η τιμή του k είναι 0.999.

Ομοίως, για ένα τυχαίο μέγεθος, Μ, η σχέση (Β7) γίνεται:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

$$N(M) = \frac{1}{b' \ln 10} 10^{a'-b'M} \left[1 - 10^{-b'(M_{max}-M)} \right]$$
(B13)

Από τις σχέσεις (B11) και (B13), και χρησιμοποιώντας τη σχέση (B12), η αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, *F*, δίνεται από τη σχέση:

$$F = 1 - \frac{N(M)}{N(M_{min})} \Rightarrow F = 1 - 10^{-b'(M-M_{min})} \frac{1 - 10^{-b}(M_{max} - M)}{k} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 10^{-b'(M-M_{min})} [1 - 10^{-b(M_{max} - M)}] = k(1 - F) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 10^{-b'(M-M_{min})} - 10^{-b'(M_{max} - M_{min})}$$

$$= k(1 - F) \xrightarrow{(1) - 10^{-b'(M_{max} - M_{min}) = k - 1}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 10^{-b'(M-M_{min})} = 1 - kF \Rightarrow$$

$$\Rightarrow M = M_{min} - \frac{1}{b' \ln 10} \ln(1 - kF)$$
(B14)

Η σχέση (B14) είναι αντίστοιχη και σχεδόν ίδια με τη σχέση (B10), με μόνη διαφοροποίηση την εισαγωγή του παράγοντα *k* της σχέσης (B12). Αυτός ο παράγοντας αρκεί για να δημιουργήσει τη φραγμένη κατανομή των τυχαίων αριθμών στο διάστημα [*M_{min}, M_{max}*].