



ΕΥΡΩΠΑΙΚΗ
ΕΝΩΣΗ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ
ΤΑΜΕΙΟ
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ



η περιφέρεια στο επίκεντρο της ανάπτυξης



**Υπουργείο Παιδείας και Θρησκευμάτων, Πολιτισμού και Αθλητισμού
ΓΓΕΤ – ΕΥΔΕ-ΕΤΑΚ**

Ε. Π. Ανταγωνιστικότητα και Επιχειρηματικότητα (ΕΠΑΝ ΙΙ), ΠΕΠ Μακεδονίας – Θράκης, ΠΕΠ Κρήτης και Νήσων Αιγαίου, ΠΕΠ Θεσσαλίας – Στερεάς Ελλάδας – Ηπείρου, ΠΕΠ Αττικής

Παραδοτέο 2.1: Εκτίμηση Σεισμικής Επικινδυνότητας

Παραδοτέο 2.1: Εκτίμηση Σεισμικής
Επικινδυνότητας

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΟΣ Ο.Τ.Μ. Α.Ε.
ΑΤΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ Α.Ε.

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2014

Περιεχόμενα

2.1.1 Μέθοδοι εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας	2
2.1.1.1 Αιτιοκρατική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας	3
2.1.1.2 Πιθανοτική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας.....	6
2.1.2 Μέθοδος Εκτίμησης της Σεισμικής Επικινδυνότητας σε Μητροπολιτικό Αυτοκινητόδρομο	9
2.1.3 Σεισμική Επικινδυνότητα της Ελλάδας.....	11
2.1.2.1 Νέος Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός	12
2.1.2.2 Πρόσφατα Ερευνητικά Αποτελέσματα	13
2.1.4 Εκτίμηση της Σεισμικής Επικινδυνότητας στην Ευρύτερη Περιοχή της Αττικής Οδού	16
2.1.5 Βιβλιογραφία.....	26

Π2.1 Εκτίμηση Σεισμικής Επικινδυνότητας

Το παρόν παραδοτέο περιλαμβάνει ανασκόπηση των κλασικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται διεθνώς για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας (αιτιοκρατικές και πιθανοτικές μέθοδοι) και τη διερεύνηση της εφαρμοσιμότητάς τους σε περιπτώσεις δικτύων αυτοκινητοδρόμων. Με βάση τη συγκριτική αξιολόγηση των δυο γενικών μεθόδων, προτείνεται η βέλτιστη προσέγγιση του προβλήματος της εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας σε περιπτώσεις αυτοκινητοδρόμων. Γίνεται μια σύντομη αναφορά σε προηγούμενες εργασίες εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας του ελλαδικού χώρου και τέλος περιγράφονται τα αποτελέσματα εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας με βάση την πιθανοτική μέθοδο για την ευρύτερη περιοχή της Αττικής Οδού (Α.Ο.).

Σημειώνεται ότι τα οριστικά αποτελέσματα του Παραδοτέου 2.1, όπως και αυτά του Παραδοτέου 2.3, θα διαμορφωθούν μετά την ολοκλήρωση της γεωτεχνικής χαρτογράφησης κατά μήκος του άξονα της Αττικής Οδού και θα προκύψουν από το συνδυασμό των αποτελεσμάτων εφαρμογής της πιθανοτικής και της αιτιοκρατικής μεθόδου.

Η εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εδαφοδυναμικής και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του ΑΠΘ με κύρια ερευνήτρια τη Δρ. Ζαφειρία Ρουμελιώτη και επιβλέποντα τον Καθηγητή Κυριαζή Πιτιλάκη. Συμμετείχαν επίσης οι Επίκουροι Καθηγητές Δημήτρης Πιτιλάκης και Αναστάσιος Αναστασιάδης, οι Δρ. Σωτήρης Αργυρούδης, Σταυρούλα Φωτοπούλου και οι υποψήφιοι διδάκτορες Εύη Ρήγα, Άννα Καρατζέτζου και Γρηγόρης Τσινίδης.

2.1.1 Μέθοδοι εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας

Υπάρχουν δύο γενικές μέθοδοι ανάλυσης της σεισμικής επικινδυνότητας: η **αιτιοκρατική μέθοδος** (deterministic) και η **πιθανοτική μέθοδος** (probabilistic). Η τελευταία είναι περισσότερο διαδεδομένη και χρησιμοποιείται ευρύτατα, ειδικά σε χώρες που έχουν πλούσιο και καταγεγραμμένο ιστορικό σεισμών. Και οι δυο μέθοδοι αποβλέπουν στην ποσοτική εκτίμηση παραμέτρων της σεισμικής επικινδυνότητας που να περιγράφουν την ένταση του σεισμικού κραδασμού στα πλαίσια των αντισεισμικών κανονισμών. Οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού είναι τυπικά η επιτάχυνση, η ταχύτητα, η μετακίνηση και τα αντίστοιχα ελαστικά - και τελευταία και ανελαστικά - φάσματα απόκρισης. Με την πιθανοτική μέθοδο, οι τιμές των παραμέτρων αυτών εκφράζονται για ορισμένη πιθανότητα υπέρβασης σε δεδομένο χρονικό διάστημα.

Η συγκριτική αξιολόγηση των αιτιοκρατικών και πιθανοτικών μεθοδολογιών εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας μιας θέσης ή ενός τεχνικού έργου είναι το αντικείμενο εντατικής ερευνητικής προσπάθειας πλήθους επιστημόνων που συχνά έχουν και αλληλοσυγκρουόμενες απόψεις. Σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική, η αιτιοκρατική προσέγγιση για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας είναι σαφώς καταλληλότερο εργαλείο σε περιπτώσεις «σημαντικών» έργων όπως πυρηνικά εργοστάσια, γέφυρες, φράγματα κ.λ.π. Ο κύριος λόγος είναι η μεγάλη περίοδος επανάληψης του «σεισμού σχεδιασμού» αυτών των έργων και η έλλειψη αξιόπιστου στατιστικού δείγματος για τόσο μεγάλες περιόδους, το οποίο είναι απαραίτητο για την εφαρμογή της πιθανοτικής μεθόδου. Επομένως η αιτιοκρατική μέθοδος είναι εξ'αντικειμένου η πλέον κατάλληλη αν όχι η μόνη εφαρμόσιμη. Τα σενάρια σεισμών που εξετάζονται στην αιτιοκρατική μέθοδο έχουν μια ξεκάθαρη φυσική βάση καθώς αφορούν συγκεκριμένες, γνωστές σεισμικές πηγές που περιγράφονται με βάση τον συγκερασμό διαθέσιμων γεωλογικών, γεωδαιτικών, γεωμορφολογικών, γεωφυσικών και σεισμολογικών στοιχείων, όπως και στοιχείων ιστορικής σεισμικότητας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα χρησιμοποιηθούν και οι δύο τεχνικές.

2.1.1.1 Αιτιοκρατική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας

Η αιτιοκρατική προσέγγιση του προβλήματος της εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας βασίζεται στη μελέτη συγκεκριμένων σεναρίων σεισμών, τα οποία επιλέγονται ως τα πλέον πιθανά ή αντιπροσωπευτικά για την εκάστοτε περιοχή μελέτης. Η επιλογή είναι κατά βάση υποκειμενική αν και σε κάποιο βαθμό μπορεί να τεκμηριωθεί και με τη συνδυασμένη χρήση της πιθανοτικής μεθόδου. Η αιτιοκρατική μέθοδος δεν στοχεύει στην ποσοτικοποίηση της συχνότητας εμφάνισης των σεισμών σε μια περιοχή, αλλά σε σενάρια σημαντικών σεισμικών πηγών και μεγεθών σεισμών που ενδέχεται να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες και απώλειες στη συγκεκριμένη περιοχή. Τα σενάρια αυτά είναι κατά κανόνα λίγα σε μια ορισμένη περιοχή και κατά συνέπεια υπάρχει η δυνατότητα να μελετηθούν λεπτομερώς.

Στην αιτιοκρατική μέθοδο υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας διακρίνονται τέσσερα βασικά στάδια (Reiter, 1990):

A. Προσδιορισμός των σεισμικών πηγών. Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία της ιστορικής και ενόργανης σεισμικότητας, αλλά και δεδομένα νεοτεκτονικά, γεωλογικά, γεωτεχνικά, γεωδαιτικά, μορφολογικά κ.α. γίνεται η κατά το δυνατόν πληρέστερη και λεπτομερέστερη περιγραφή των ενεργών σεισμικών πηγών στην ευρύτερη περιοχή μελέτης. Η περιγραφή των ενεργών σεισμικών πηγών περιλαμβάνει στοιχεία τόσο της γεωμετρίας τους, όσο και του σεισμικού δυναμικού τους. Με βάση το τελευταίο, επιλέγονται τελικά οι σεισμικές πηγές οι οποίες έχουν

επαρκές σεισμικό δυναμικό και βρίσκονται σε τέτοια απόσταση ώστε να μπορούν να προκαλέσουν αξία λόγου ισχυρή κίνηση του εδάφους στην περιοχή μελέτης.

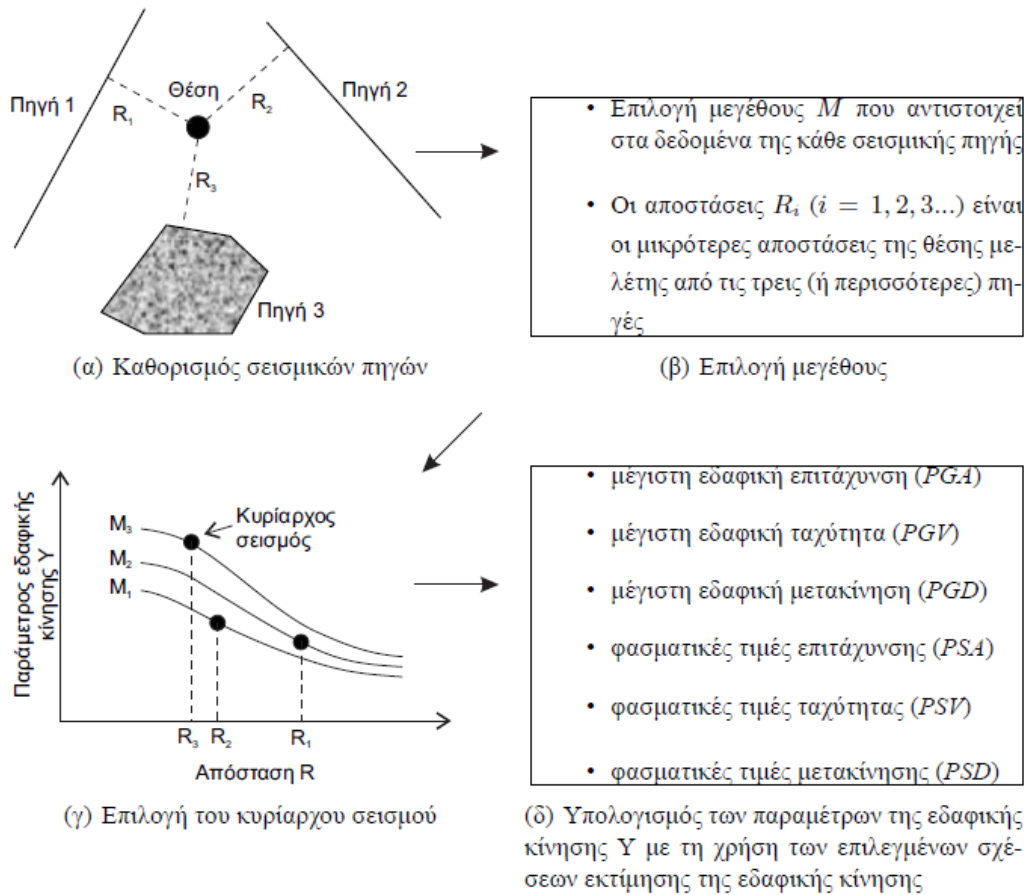
Β. Επιλογή του σεισμού «σχεδιασμού». Επιλογή του κυρίαρχου σεισμού, δηλαδή του σεισμού εκείνου που με βάση τις επικεντρικές αποστάσεις και το μέγιστο μέγεθος που αποδίδεται σε κάθε πηγή, αναμένεται να προκαλέσει τον ισχυρότερο εδαφικό κραδασμό στη θέση μελέτης. Οι εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης της ισχυρής εδαφικής κίνησης, και η αξιοπιστία τους παίζουν σημαντικό ρόλο στο στάδιο αυτό.

Γ. Επιλογή των παραμέτρων του εδαφικού κραδασμού. Τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης περιγράφονται με βάση μια ή περισσότερες παραμέτρους της ισχυρής εδαφικής κίνησης, με συνηθέστερες τη μακροσεισμική ένταση, τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα και μετακίνηση καθώς και τα αντίστοιχα ελαστικά φάσματα απόκρισης. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και άλλες παράμετροι όπως η ένταση Arias και η CAV.

Δ. Υπολογισμός της σεισμικής επικινδυνότητας.

Ο Reiter (1990) αναφέρεται στη δυνατότητα αλλαγής της σειράς των σταδίων Β και Γ καθώς ο σεισμός «σχεδιασμού» μπορεί να προσδιοριστεί ως αυτός που δίνει τις μέγιστες τιμές των παραμέτρων που έχουν επιλεγεί για την περιγραφή της εδαφικής κίνησης με βάση ορισμένη υιοθετημένη εμπειρική σχέση. Νεότερες επιστημονικές εργασίες (π.χ. Klügel et al., 2006) υπογραμμίζουν τη σημασία της παρέμβασης του χρήστη στη διαμόρφωση των επιμέρους βημάτων και τον συνυπολογισμό πρόσθετων παραμέτρων στον καθορισμό του σεισμού ή των σεισμών «σχεδιασμού», όπως είναι η πιθανότητα εμφάνισης φαινομένων κατευθυντικότητας της διάρρηξης, οι όροι κοντινού πεδίου στη μαθηματική περιγραφή της κυματικής διάδοσης και το αποτέλεσμα των τοπικών εδαφικών συνθηκών.

Στην αιτιοκρατική μέθοδο ο υπολογισμός των παραμέτρων της εδαφικής κίνησης (εδαφικός κραδασμός) μπορεί να γίνει είτε με βάση εμπειρικές σχέσεις (στάδιο Β), είτε μέσω του υπολογισμού της πλήρους ιστορίας της εδαφικής κίνησης, η οποία περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της σεισμικής πηγής, του δρόμου διάδοσης και των τοπικών εδαφικών συνθηκών στη θέση ενδιαφέροντος. Με τις σημερινές υπολογιστικές δυνατότητες, η προσομοίωση της εδαφικής κίνησης, ακόμα και με πολύπλοκα αναλυτικά μοντέλα και τρισδιάστατα προσομοιώματα της υπεδάφιας δομής, είναι εφικτή και δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις των εφαρμογών της μεθόδου όπου τα αποτελέσματα βασίζονται σε εκατοντάδες ή και χιλιάδες συνθετικές καταγραφές.



Σχήμα 2.1.1: Τα βασικά βήματα της αιτιοκρατικής μεθοδολογίας εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας (Πιτιλάκης, 2010).

Η αιτιοκρατική μέθοδος αποτελεί ίσως τη μόνη επιλογή σε περιπτώσεις που τα σεισμολογικά δεδομένα δεν επαρκούν για τη διαμόρφωση ενός ικανού στατιστικού δείγματος προκειμένου να εφαρμοσθεί ικανοποιητικά η πιθανοτική μέθοδος. Είναι επίσης το πιο διαδεδομένο εργαλείο, σε παγκόσμια κλίμακα, για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας σε θέσεις σημαντικών έργων, όπως είναι τα μεγάλα φράγματα, οι πυρηνικοί σταθμοί, οι υπόγειοι αποθηκευτικοί χώροι πυρηνικών αποβλήτων, οι μεγάλες γέφυρες κ.λπ., τα οποία σχεδιάζονται για μεγάλο μέσο χρόνο ζωής, που συνήθως υπερβαίνει τη διάρκεια των διαθέσιμων καταλόγων σεισμικότητας. Στη κατηγορία των σημαντικών έργων μπορούμε να δεχθούμε ότι ανήκουν και οι μεγάλοι αυτοκινητόδρομοι, που είναι το αντικείμενο μελέτης του παρόντος ερευνητικού προγράμματος.

Η αιτιοκρατική μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές περιπτώσεις για υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας σε ολόκληρη περιοχή με τη σύνταξη κατάλληλων χαρτών (π.χ. Aoudia et al., 2000; Parvez et al., 2003). Σε αυτές τις περιπτώσεις, το μέγιστο, χωρικά, μέγεθος λαμβάνεται από τους υπάρχοντες καταλόγους σεισμικότητας και καθώς χρησιμοποιείται μόνο η πληροφορία για τα

μεγαλύτερα μεγέθη που έχουν παρατηρηθεί ανά περιοχή, τα αποτελέσματα είναι πολύ λιγότερο εξαρτώμενα από την πληρότητα των καταλόγων σεισμικότητας.

Ένα πιθανό προτέρημα της αιτιοκρατικής μεθόδου έναντι της πιθανοτικής είναι η ίδια η φύση της, δηλαδή ότι βασίζεται σε παρατηρήσεις και καταγραφές και αξιοποιεί το σύνολο της πληροφορίας που παρέχουν διαφορετικοί κλάδοι των γεωεπιστημών και των επιστημών του μηχανικού σε μια περιοχή. Τα ομοιώματα (σεισμικής πηγής, δομής του υπεδάφους, τοπικών εδαφικών συνθηκών) που χρησιμοποιούνται στους σχετικούς κώδικες υπολογισμού περιγράφονται με όλο και μεγαλύτερη ακρίβεια και μπορούν να αναπαραχθούν/ ελεγχθούν από άλλους επιστήμονες. Από την άλλη πλευρά, τα λεπτομερή φυσικά ομοιώματα είναι εξ'αντικειμένου δύσκολο να εκτιμηθούν με ακρίβεια και οι μαθηματικοί υπολογισμοί καθιστούν την αιτιοκρατική μέθοδο πιο πολύπλοκη και σε αρκετές περιπτώσεις περισσότερο χρονοβόρα, σε σχέση πάντα με την πιθανοτική μέθοδο,.

Το κύριο πρόβλημα των αιτιοκρατικών μεθόδων συνδέεται με τις διάφορες αβεβαιότητες που αναφέρονται σε όλα τα στάδια ανάλυσης. Η αντιμετώπιση των αβεβαιοτήτων αυτών (τυχηματικής και επιστημικής φύσης) είναι κεφαλαιώδους σημασίας στο τελικό προϊόν που δεν είναι άλλο από την αξιόπιστη εκτίμηση του σεισμικού φορτίου σχεδιασμού. Οι τεχνικές «λογικής δένδρου» (π.χ. Stepp et al., 2001; Budnitz et al., 2007; Bommer and Scherbaum, 2008; Scherbaum and Kuehn, 2011; Coppersmith et al., 2009) τυγχάνουν ευρύτατης εφαρμογής για τη διαχείριση των επιστημικής φύσης αβεβαιοτήτων, που συνδέονται για παράδειγμα με την επιλογή των εμπειρικών σχέσεων εκτίμησης της ισχυρής εδαφικής ταλάντωσης (GMPE) ή των ομοιωμάτων προσομοίωσης της σεισμικής πηγής και της διαδρομής των σεισμικών κυμάτων. Αποτελούν μια καλή και αποδεκτή λύση. Απεναντίας οι τυχηματικές αβεβαιότητες αποτελούν πάντοτε ένα τεράστιο και δυσεπίλυτο πρόβλημα παρόλη την μεγάλη προόδο που έχει επιτευχθεί τα τελευταία χρόνια.

2.1.1.2 Πιθανοτική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας

Η πιθανοτική μέθοδος εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας βασίζεται στην πρωτοποριακή δημοσίευση του Cornell (1968), ενώ συστηματική περιγραφή και σχολιασμός της γίνεται σε σχετική τεχνική έκθεση του EERI (1989). Από το 1968 και μετά, η μέθοδος έχει αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό και ιδιαίτερα στο κομμάτι που αφορά τη διαχείριση των αβεβαιοτήτων των παραμέτρων που εισάγονται στους σχετικούς κώδικες υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας.

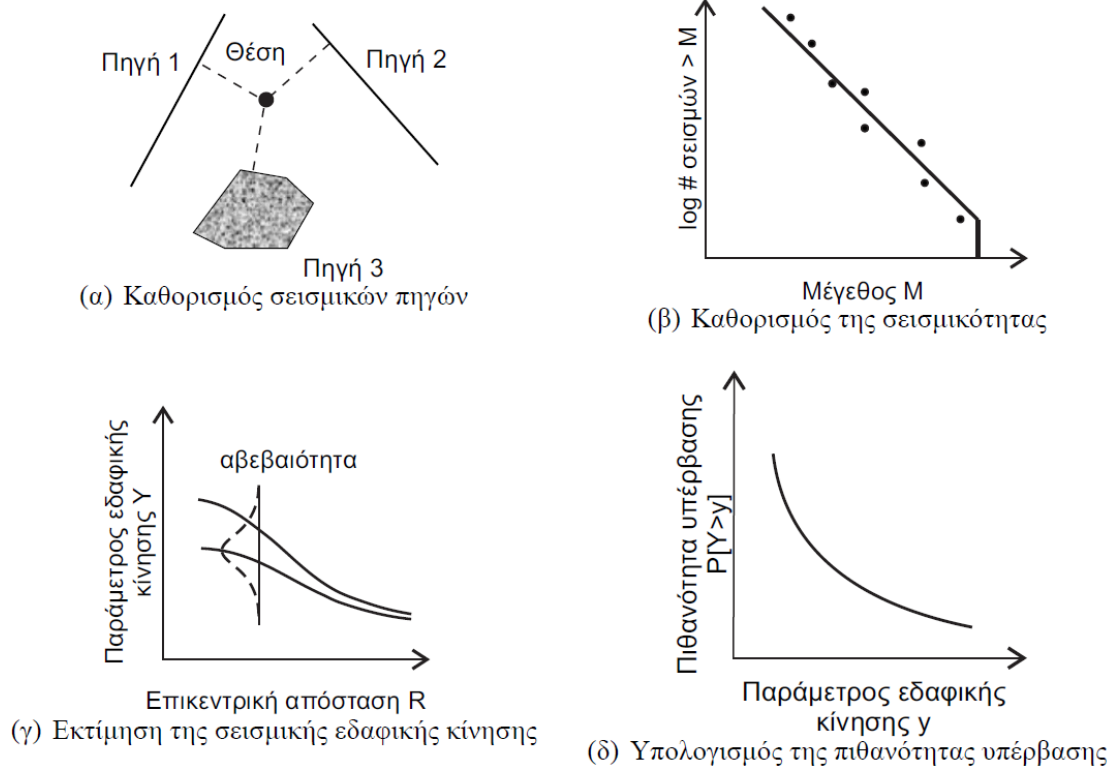
Η πιθανοτική ανάλυση της σεισμικής επικινδυνότητας αποτελεί τον καλύτερο τρόπο να ληφθούν υπόψη και να ποσοτικοποιηθούν οι αβεβαιότητες στην εκτίμηση των διαφόρων παραγόντων που καθορίζουν σε μια θέση τη σεισμική επικινδυνότητα. Περιλαμβάνει συνήθως:

- τον υπολογισμό της πιθανότητας υπέρβασης μιας προκαθορισμένης τιμής της εδαφικής παραμέτρου που εξετάζεται (επιτάχυνση, ταχύτητα κ.λ.π.) στη συγκεκριμένη θέση και για συγκεκριμένο σεισμικό γεγονός και
- τον υπολογισμό της πιθανότητας υπέρβασης της εδαφικής παραμέτρου που εξετάζεται στη συγκεκριμένη θέση, για το σύνολο των σεισμικών πηγών που επηρεάζουν την εξεταζόμενη θέση.

Όπως και η αιτιοκρατική προσέγγιση, η πιθανοτική μέθοδος μπορεί να αναλυθεί σε τέσσερα στάδια (Σχήμα 2.1.2):

1. Καθορισμός των σεισμικών πηγών, της σεισμικότητάς τους και της αντίστοιχης πιθανοτικής κατανομής σε κάθε πηγή. Σε αντίθεση με την αιτιοκρατική μέθοδο που δέχεται πιθανότητα 100% να συμβεί ο χαρακτηριστικός σεισμός σε κάθε πηγή και 0% σε κάθε άλλη θέση, στην πιθανοτική μέθοδο υποτίθεται μια συγκεκριμένη κατανομή πιθανότητας. Οι σεισμικές πηγές περιγράφονται ως γραμμικά στοιχεία, ως συστοιχίες γραμμικών στοιχείων (π.χ. ομάδα παράλληλων ρηγμάτων) ή, συνηθέστερα, ως επιφάνειες «ομοιόμορφης σεισμικότητας». Συνήθως για τις «επιφανειακές» πηγές γίνεται υπόθεση μιας ομοιόμορφα κατανεμημένης πιθανότητας, που σημαίνει ότι κάθε σημείο της «επιφανειακής» πηγής έχει την ίδια πιθανότητα να δώσει τον συγκεκριμένο σεισμό.

2. Καθορισμός της σεισμικότητας της κάθε πηγής. Αυτός μπορεί να γίνει με τη συνηθισμένη σχέση των Gutenberg-Richter, η οποία εκφράζει τον αριθμό σεισμών μεγέθους μεγαλύτερου ή ίσου του M ως προς το αντίστοιχο μέγεθος M , την τεχνική των ακραίων τιμών (extreme values) κ.α. Στο στάδιο αυτό καθοριστικό ρόλο παίζει η ποιότητα και η πληρότητα των δεδομένων στους διαθέσιμους καταλόγους σεισμικότητας της υπό εξέταση περιοχής. Οι κατάλογοι αυτοί θα πρέπει να εμπλουτιστούν, κατά το δυνατόν, με στοιχεία της ιστορικής σεισμικότητας της περιοχής μελέτης και να απαλλαγθούν από εξαρτημένα γεγονότα (προσεισμούς, μετασεισμούς) καθώς η παρουσία τους μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υπερεκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας (10-20%). Στον καθορισμό της σεισμικότητας μιας πηγής εντάσσεται και ο καθορισμός του μέγιστου μεγέθους που μπορεί να προκύψει από αυτήν, όπως και του ελάχιστου μεγέθους, δηλαδή του μεγέθους εκείνου κάτω από το οποίο δεν αναμένονται βλάβες στη θέση μελέτης.

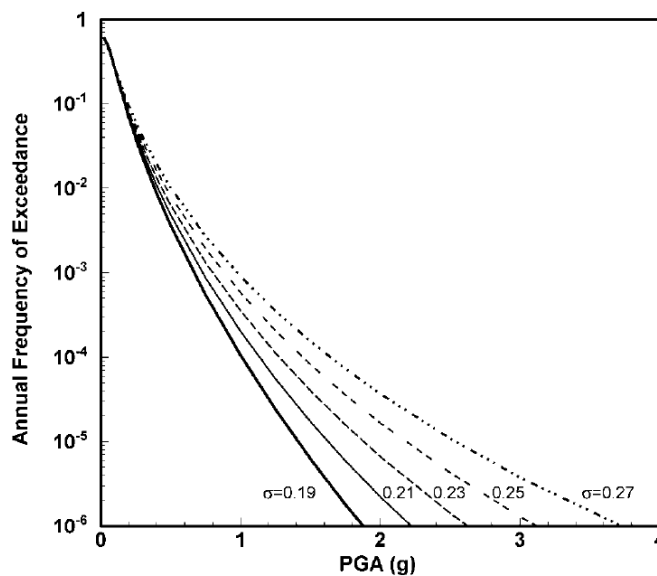


Σχήμα 2.1.2: Τα βασικά βήματα της πιθανοτικής μεθοδολογίας εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας (Πιτιλάκης, 2010).

3. Εκτίμηση/επιλογή της κατάλληλης εμπειρικής σχέσης για την πρόβλεψη της εδαφικής κίνησης. Η εμπειρική σχέση που θα επιλεγεί παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος, όπως εξίσου σημαντικό ρόλο παίζουν και οι αβεβαιότητες που χαρακτηρίζουν την κάθε σχέση. Στο Σχήμα 2.1.3 συγκρίνονται οι καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας που υπολογίστηκαν για μια φανταστική θέση με βάση μια συγκεκριμένη εμπειρική σχέση υπολογισμού της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), αλλά με διαφορετικές τιμές για την τυπική απόκλιση της εμπειρικής σχέσης. Το αποτέλεσμα του μεγέθους της αβεβαιότητας στους υπολογισμούς με βάση την εμπειρική σχέση αποτυπώνεται ιδιαίτερα έντονα στις μεγάλες περιόδους επανάληψης. Η επιρροή της συγκεκριμένης αβεβαιότητας στα αποτελέσματα της πιθανοτικής μεθόδου μελετάται συστηματικά τα τελευταία χρόνια (π.χ., Anderson and Brune, 1999; Atkinson, 2006; Strasser et al., 2009; Al Atik et al., 2010; Rodriguez-Marek et al., 2011) και γίνεται προσπάθεια ερμηνείας και ελαχιστοποίησής της προκειμένου να σταθεροποιηθούν, κατά τον μέγιστο δυνατό βαθμό, τα αποτελέσματα της μεθόδου.

4. Εκτίμηση της πιθανότητας υπέρβασης μιας καθορισμένης τιμής της εξεταζόμενης εδαφικής παραμέτρου (π.χ. μέγιστη εδαφική επιτάχυνση) σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται αναλυτικά στα περισσότερα βιβλία γενικής σεισμολογίας και τεχνικής σεισμολογίας (π.χ. Πιτιλάκης, 2010).

Τα τελευταία χρόνια, οι εφαρμογές της πιθανοτικής μεθόδου περιλαμβάνουν συχνά ένα πρόσθετο, πέμπτο στάδιο, αυτό της αποάθροισης (disaggregation) της σεισμικής επικινδυνότητας ή αντίστοιχων μεθόδων (π.χ. Ishikawa and Kameda, 1988; Klügel et al., 2006). Η αποάθροιση της σεισμικής επικινδυνότητας για μια συγκεκριμένη θέση, αποτελεί τη διαδικασία υπολογισμού της συνεισφοράς κάθε ενός από τα πιθανά ζεύγη τιμών μεγέθους – απόστασης στη συνολική επικινδυνότητα της θέσης μελέτης. Το ζεύγος τιμών M-R (ή τα ζεύγη, στην περίπτωση που εντοπιστούν περισσότερα του ενός μέγιστα) μπορεί να θεωρηθούν ότι ορίζουν ένα σενάριο σεισμού που εμφανίζεται ως πιο πιθανό για τη συγκεκριμένη θέση και για συγκεκριμένη περίοδο επανάληψης. Μέσω του σταδίου αυτού, η πιθανοτική μέθοδος συγκλίνει με την αιτιοκρατική.



Σχήμα 2.1.3: Καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας που έχουν υπολογιστεί με βάση μια συγκεκριμένη εμπειρική σχέση υπολογισμού της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), αλλά με διαφορετικές τιμές για την τυπική απόκλιση, σ , της σχέσης (Bommer and Abrahamson, 2006).

2.1.2 Μέθοδος Εκτίμησης της Σεισμικής Επικινδυνότητας σε Μητροπολιτικό Αυτοκινητόδρομο

Ένα σημαντικό έργο, όπως είναι ένας μητροπολιτικός αυτοκινητόδρομος, δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί με τον ίδιο τρόπο που αντιμετωπίζεται ένα κοινό οικοδομικό έργο. Από την άλλη πλευρά, και παρά τη ραγδαία ανάπτυξη των μεθόδων εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας τις τελευταίες δεκαετίες, δεν υπάρχει ακόμα μια ενιαία και παγκοσμίως αποδεκτή αξιολόγηση των διαφόρων μεθόδων ανάλογα με τη φύση και τη σημαντικότητα του κάθε έργου. Κάθε έργο είναι μοναδικό καθώς μοναδικά είναι και το σεισμοτεκτονικό του περιβάλλον, ο

βαθμός γνώσης των σεισμικών πηγών που το απειλούν, η πληρότητα των καταλόγων σεισμικότητας της ευρύτερης περιοχής και η γνώση των ιδιαιτεροτήτων της διάδοσης της σεισμικής κίνησης στην περιοχή του έργου.

Οι δυο προσεγγίσεις, αιτιοκρατική και πιθανοτική, έχουν διαφορές και παρουσιάζουν μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα, τα οποία αναλύθηκαν εν συντομία παραπάνω. Στις διάφορες εφαρμογές γίνεται, κατά κανόνα, επιλογή της μιας από τις δυο μεθόδους με βάση κάποια ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια που συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1.1. Τα κριτήρια αυτά έχουν προκύψει, μετά από κατάλληλες προσαρμογές και τροποποιήσεις, από μια αρχική πρόταση του McGuire (2001).

Πίνακας 2.1.1: Κριτήρια επιλογής μεταξύ αιτιοκρατικής (ΑΜ) και πιθανοτικής (ΠΜ) μεθόδου για την ανάλυση της σεισμικής επικινδυνότητας (Πιπιλάκης, 2011).

Αντικείμενο	Απόφαση	Κύρια Επιλογή
Κοινά οικοδομικά έργα	Ποσοτική	ΠΜ
Μελέτες ενίσχυσης/αποκατάστασης	Ποσοτική	ΠΜ
Ασφαλιστικές μελέτες	Ποσοτική	ΠΜ
Βιομηχανικές υποδομές/δίκτυα	Ποιοτική/Ποσοτική	ΑΜ-ΠΜ
Οργάνωση/Διαχείριση	Ποιοτική	ΑΜ
Σχέδια μετασεισμικής αποκατάστασης	Ποιοτική	ΑΜ
Σχέδια διαχείρισης σεισμικής κρίσης	Ποιοτική/Ποσοτική	ΑΜ-ΠΜ

Παρά τη συνήθη πρακτική της επιλογής μιας μεθόδου, η εμπειρία των τελευταίων δεκαετιών έχει δείξει ότι στην πραγματικότητα οι δυο μέθοδοι είναι συμπληρωματικές και ειδικά στις περιπτώσεις σημαντικών έργων θα πρέπει να εξετάζονται ταυτόχρονα και συνδυαστικά. Η αιτιοκρατική ανάλυση μεμονωμένων σεναρίων σεισμών μπορεί να ελέγξει/τεκμηριώσει τα αποτελέσματα της πιθανοτικής ανάλυσης. Από την άλλη πλευρά, η πιθανοτική μέθοδος, στην εξελιγμένη της μορφή όπου ποσοτικοποιούνται οι αβεβαιότητες που υπεισέρχονται στο τελικό προϊόν, μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στην επιλογή των σεναρίων των σεισμών που θα εξεταστούν με την αιτιοκρατική ανάλυση.

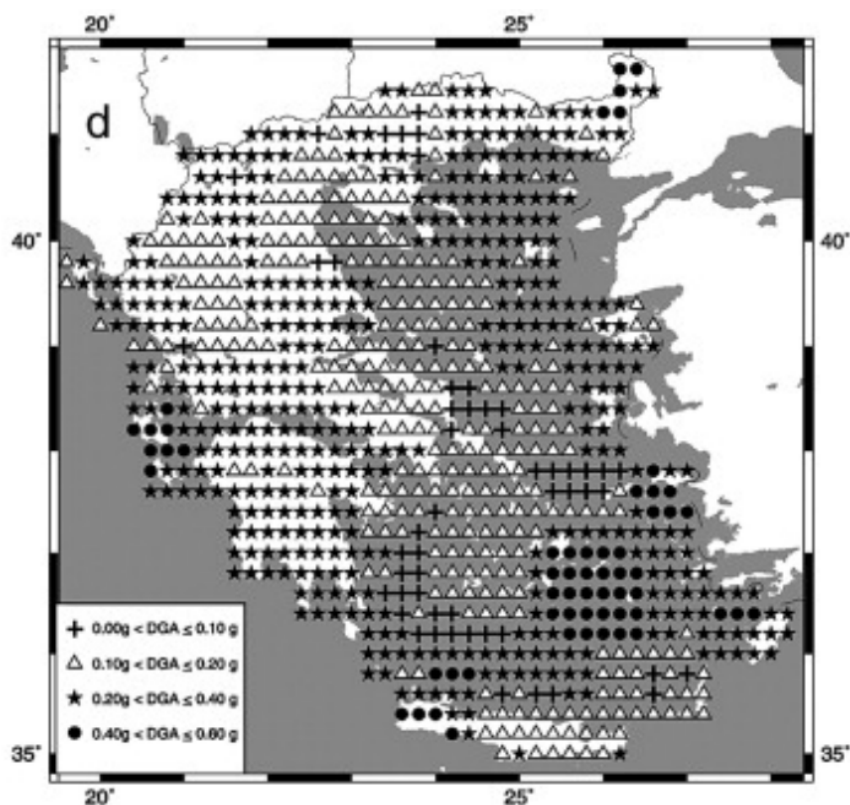
Ειδικά στην περίπτωση του συγκεκριμένου αυτοκινητόδρομου, αφενός μεν η σημαντικότητα του έργου, αφετέρου δε τα διάφορα ερωτηματικά που προέκυψαν κατά τη σεισμική ακολουθία του σεισμού του 1999 σχετικά με την επάρκεια του σεισμικού δείγματος, θα επέβαλε την εφαρμογή της αιτιοκρατικής μεθόδου. Ωστόσο, επειδή το βασικό χαρακτηριστικό ενός αυτοκινητοδρόμου είναι το μεγάλο μήκος του, είναι σχεδόν βέβαιο ότι τα διάφορα τμήματά του θα απειλούνται σε διαφορετικό βαθμό από τις διάφορες «γραμμικές» σεισμικές πηγές (ρήγματα) που

ενδέχεται να υπάρχουν στην εγγύτητα του έργου. Αυτό δυσχεραίνει την εφαρμογή της αιτιοκρατικής μεθόδου καθώς επιβάλλει τη διερεύνηση μεγαλύτερου αριθμού σεναρίων σεισμών απ'ότι θα χρειαζόταν για ένα μικρότερο τεχνικό έργο όπως, για παράδειγμα, μια γέφυρα. Επομένως στην περίπτωση που εξετάζουμε (Αττική Οδός) είναι εξίσου σημαντική και η εφαρμογή της πιθανοτικής μεθόδου για την καλύτερη γνώση της επικινδυνότητας της ευρύτερης περιοχής, η οποία θα βοηθήσει στην επιλογή των σεναρίων σεισμών που θα πρέπει να εξεταστούν σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια με την αιτιοκρατική ανάλυση. Αυτό μπορεί να γίνει με τη μεθοδολογία της αποάθροισης (de-aggregation) της σεισμικής επικινδυνότητας, η οποία στην ουσία αναδεικνύει τα σενάρια εκείνα (με το μορφή ζευγών μεγάλους-απόστασης) που καθορίζουν στο μεγαλύτερο βαθμό τη σεισμική επικινδυνότητα για ορισμένη περίοδο επανάλληψης.

Για τις εφαρμογές του παρόντος ερευνητικού προγράμματος και με βάση τη λογική που αναπτύχθηκε παραπάνω, επιλέχθηκε να γίνει συνεκτίμηση των αποτελεσμάτων της πιθανοτικής μεθόδου και της αιτιοκρατικής μεθόδου. Τα αποτελέσματα της πιθανοτικής μεθόδου για την ευρύτερη περιοχή μελέτης του παρόντος έργου περιγράφονται στη συνέχεια στο ανά χείρας παραδοτέο, ενώ τα αποτελέσματα της μελέτης συγκεκριμένων σεναρίων σεισμών με την εφαρμογή της αιτιοκρατικής μεθόδου περιλαμβάνονται στο Παραδοτέο 2.3.

2.1.3 Σεισμική Επικινδυνότητα της Ελλάδας

Το θέμα της εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας στον ελληνικό χώρο έχει αποτελέσει το αντικείμενο αρκετών εργασιών από το 1970 και μετά. Αποτέλεσμα των εργασιών αυτών είναι διάφοροι χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας με εξεταζόμενη παράμετρο τη μακροσεισμική ένταση (Papaioannou, 1984; Papazachos et al., 1985; Papaioannou, 1986; Papaioannou and Papazachos, 2000) ή τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση και ταχύτητα (Algermissen et al., 1976; Drakopoulos and Makropoulos, 1983; Papazachos et al., 1990; Papazachos et al., 1993; Margaris, 1994; Koutrakis et al., 2002; Burton et al., 2002). Οι περισσότεροι από τους χάρτες αυτούς έχουν υπολογιστεί για μέση τιμή του χρόνου επαναφοράς ίση με 475 ή 975 χρόνια. Ωστόσο, ο αντισεισμικός σχεδιασμός σημαντικών έργων απαιτεί την εξέταση πιθανών εδαφικών κινήσεων με ακόμα μεγαλύτερη μέση περίοδο επανάλληψης. Προς την κατεύθυνση αυτή οι Moratto et al. (2007) εφάρμοσαν τη μεθοδολογία αιτιοκρατικής εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας των Costa et al. (1993) και παράγααν χάρτες διαφόρων παραμέτρων της εδαφικής κίνησης (π.χ., Σχήμα 2.1.4).

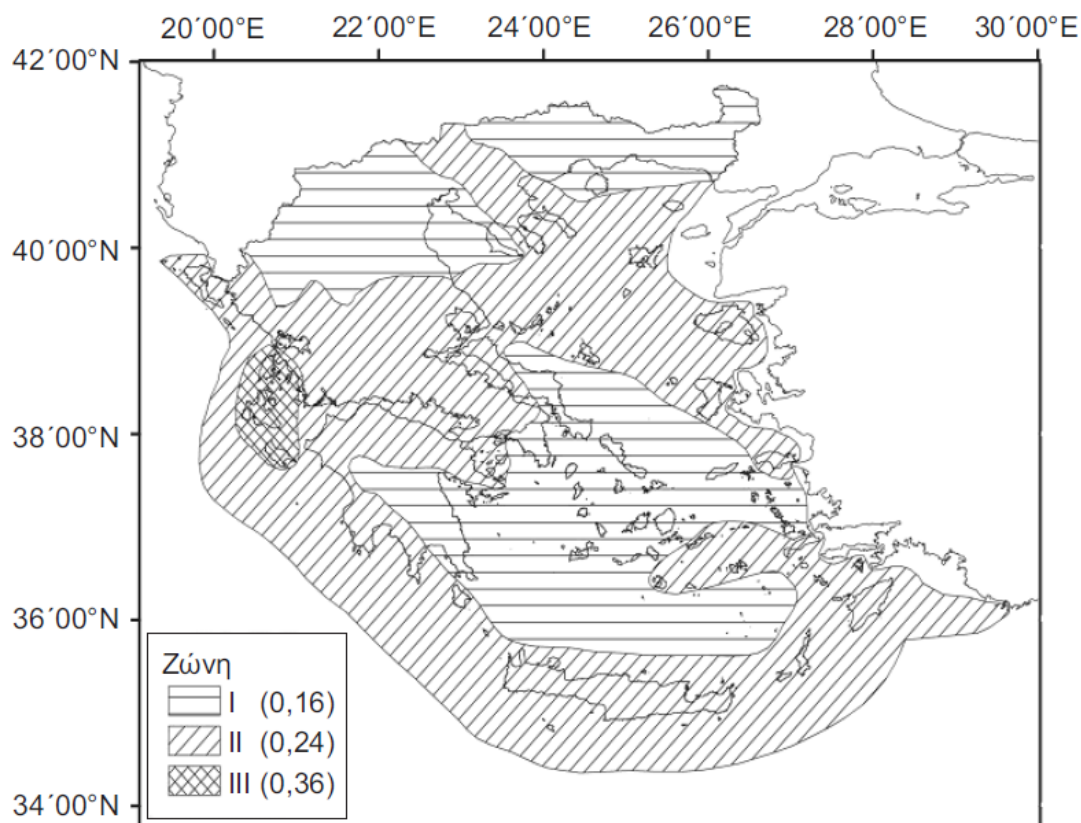


Σχήμα 2.1.4: Χάρτης γεωγραφικής κατανομής των προτεινόμενων τιμών σχεδιασμού (εδαφική επιτάχυνση σε g), όπως προέκυψαν από εφαρμογή αιτιοκρατικής μεθοδολογίας από τους Moratto et al. (2007).

2.1.2.1 Νέος Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός

Η πιο πρόσφατη αναθεώρηση του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΑΚ, 2000) περιελάμβανε και μια σημαντική αναθεώρηση του χάρτη της σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας. Οι προηγούμενες τέσσερις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας συμπύχθηκαν σε τρεις και πλέον ο χάρτης έχει τη μορφή του Σχήματος 2.1.5. Στον χάρτη της σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας δίνονται οι τιμές σχεδιασμού της κορυφαίας εδαφικής επιτάχυνσης για τον αντισεισμικό σχεδιασμό συνηθισμένων τεχνικών έργων και κτιρίων. Οι τιμές της ισχυρής εδαφικής κίνησης σχεδιασμού έχουν υπολογισθεί με την υπόθεση μέσων εδαφικών συνθηκών σκληρού και σχετικά δύσκαμπτου εδάφους. Οι προτεινόμενες τιμές έχουν πιθανότητα υπέρβασης 10% σε 50 χρόνια, δηλαδή οι αντίστοιχοι σεισμοί έχουν μέση περίοδο επανάληψης 475 χρόνια. Χάρτες αυτού του είδους και προορισμού είναι εκ των πραγμάτων πολύ γενικοί και δίνουν μια αδρή εικόνα της γεωγραφικής κατανομής και της έντασης της ισχυρής εδαφικής κίνησης. Η επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών δεν λαμβάνεται υπόψη. Ο κάθε μελετητής οφείλει να προσαρμόσει κατάλληλα τις τιμές αυτές στις πραγματικές εδαφικές συνθήκες του κάθε έργου, εφόσον κρίνει ότι η επιρροή των εδαφικών συνθηκών αναμένεται να είναι σημαντική. Η ενιαία χρήση ενός μοναδικού συντελεστή

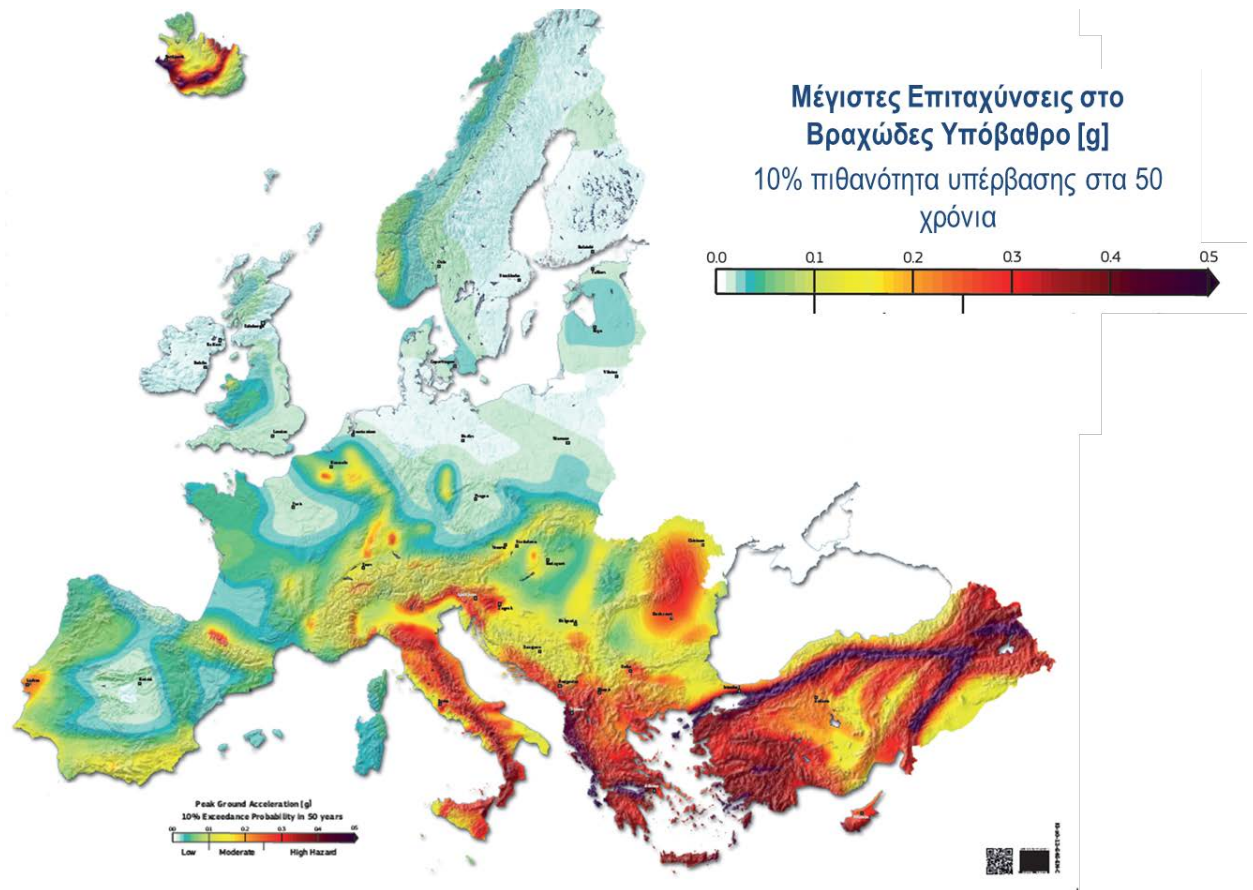
εδαφικής επιτάχυνσης σχεδιασμού, ανεξάρτητα από τις τοπικές εδαφικές συνθήκες, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες αδυναμίες του ΕΑΚ.



Σχήμα 2.1.5: Χάρτης Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας (ΕΑΚ 2000)

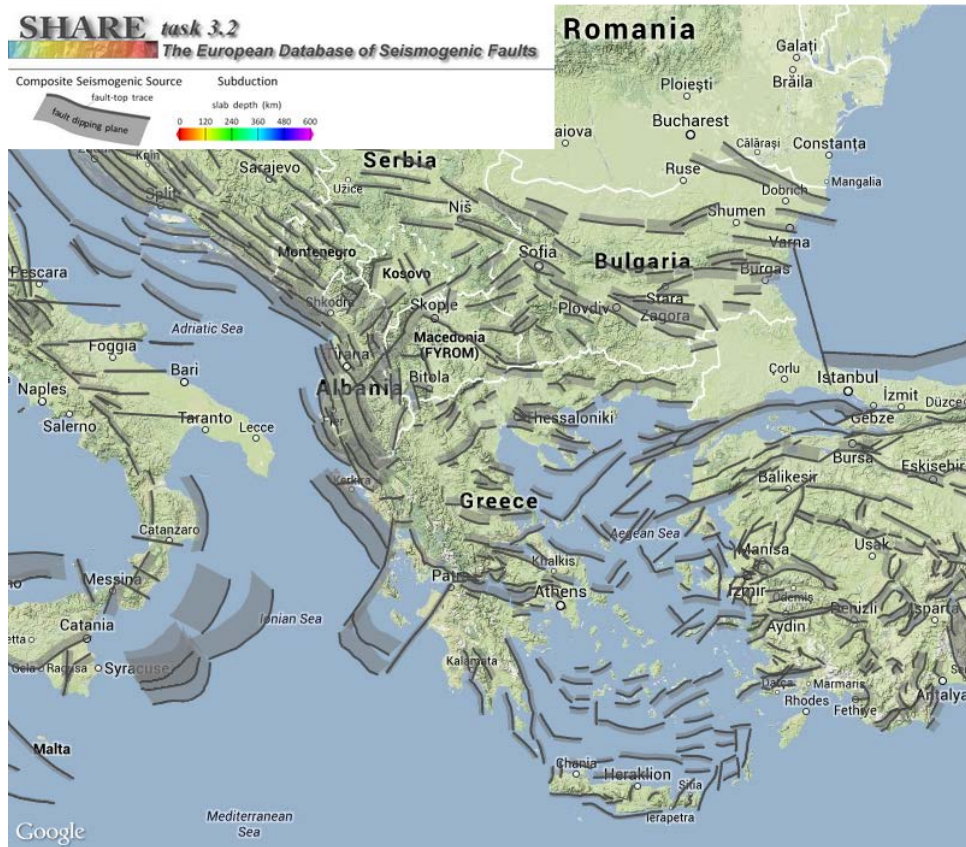
2.1.2.2 Πρόσφατα Ερευνητικά Αποτελέσματα

Η σεισμική επικινδυνότητα του ελλαδικού χώρου επαναπροσδιορίστηκε πρόσφατα στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Προγράμματος SHARE (<http://www.share-eu.org/>). Στόχος του προγράμματος ήταν η επανεκτίμηση, με τα πλέον σύγχρονα εργαλεία, της σεισμικής επικινδυνότητας ολόκληρου του ευρωπαϊκού χώρου με ομοιόμορφο τρόπο και χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα γεωγραφικά σύνορα των χωρών. Παράδειγμα των παραδοτέων του ερευνητικού προγράμματος SHARE αποτελεί ο χάρτης του Σχήματος 2.1.6 όπου φαίνεται η κατανομή των τιμών της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης στο βραχύδες υπόβαθρο όπως υπολογίστηκαν για 10% πιθανότητα υπέρβασης στα 50 χρόνια.

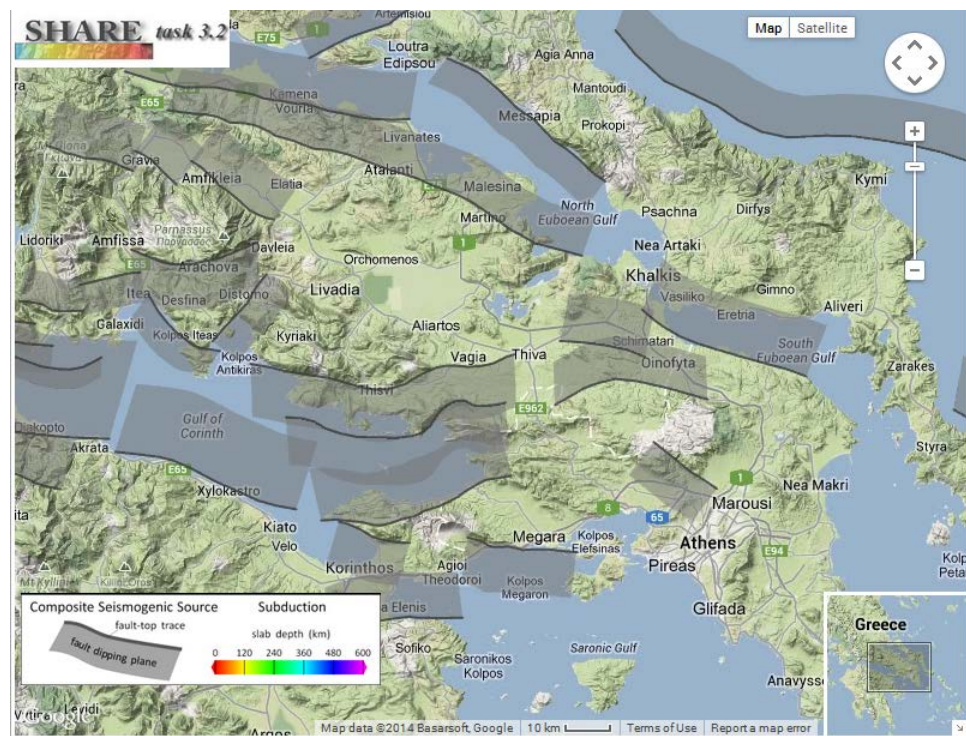


Σχήμα 2.1.6: Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας του ευρωπαϊκού χώρου (SHARE, 2013).

Ο χάρτης της σεισμικής επικινδυνότητας της Ευρώπης του SHARE είναι το αποτέλεσμα μιας μακρόχρονης προσπάθειας ομογενοποίησης των διάφορων εθνικών σεισμολογικών καταλόγων και των επιμέρους βάσεων με διαφορετικές περιγραφές των σεισμικών πηγών. Ο χάρτης των σεισμικών πηγών της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου, όπως αυτές έχουν εισαχθεί στη σχετική βάση δεδομένων του SHARE (<http://diss.rm.ingv.it/share-edsf/>) απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1.7, ενώ στο ίδιο Σχήμα περιλαμβάνεται σε μεγέθυνση χάρτης των πηγών στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής Οδού (Α.Ο.).



α)



β)

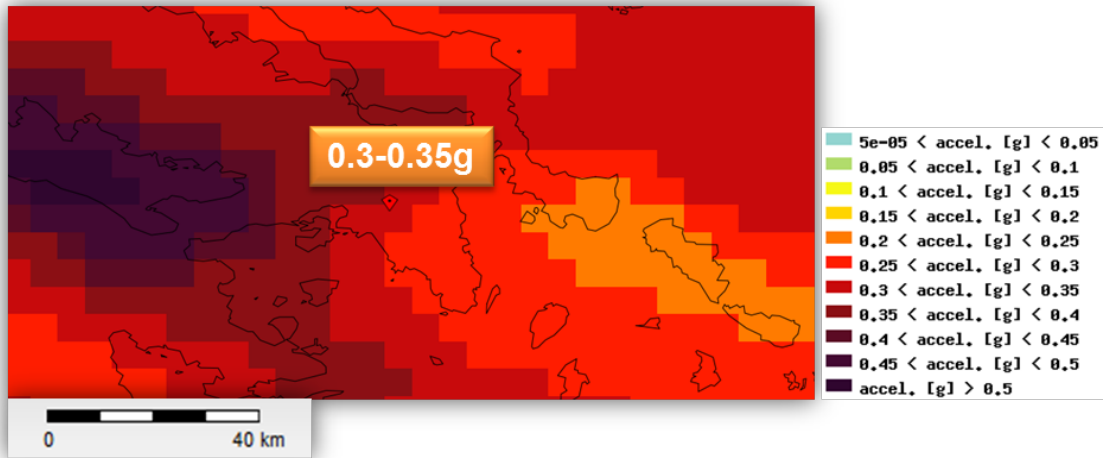
Σχήμα 2.1.7: Σεισμικές πηγές που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων του ερευνητικού προγράμματος SHARE. Επάνω: για την ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου, Κάτω: σε μεγέθυνση για την ευρύτερη περιοχή της Α.Ο.

2.1.4 Εκτίμηση της Σεισμικής Επικινδυνότητας στην Ευρύτερη Περιοχή της Αττικής Οδού

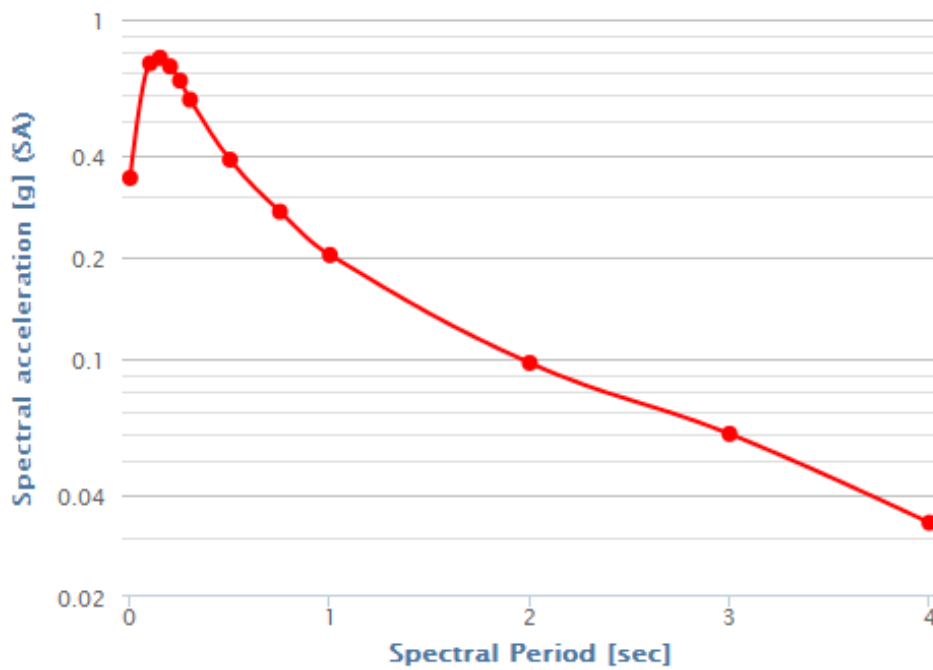
Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα της πιθανοτικής εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής Οδού. Οι εκτιμήσεις αυτές έχουν προκύψει από τη μεθοδολογία που προτάθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος SHARE, η οποία χρησιμοποιεί τη μέθοδο του «λογικού δέντρου» (logic tree) (π.χ. Budnitz et al., 2007; Stepp et al., 2001; Coppersmith et al., 2009), με σκοπό την ποσοτικοποίηση της επιστημικής (epistemic) αβεβαιότητας, δηλαδή, της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται λόγω ελλιπούς γνώσης των παραμέτρων του μοντέλου. Το πρόβλημα, δηλαδή, της περιγραφής της σεισμικότητας μιας περιοχής και της πρόβλεψης των χαρακτηριστικών παραμέτρων του εδαφικού κραδασμού διερευνούνται με τουλάχιστον τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις, σε κάθε υποσύνολο αποτελεσμάτων αποδίδεται ορισμένη βαρύτητα (συνήθως με υποκειμενικά κριτήρια) και το τελικό προϊόν προκύπτει από τη συνεκτίμηση όλων των υποσυνόλων.

Στο Σχήμα 2.1.8 παρουσιάζονται η κατανομή της εκτιμώμενης μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης στην ευρύτερη περιοχή της Α.Ο. για περίοδο επανάληψης 475 χρόνια και ένα παράδειγμα ελαστικού φάσματος σχεδιασμού επιτάχυνσης, που αντιστοιχεί σε μια θέση στο μέσο περίπου του μήκους του αυτοκινητοδρόμου. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για περιόδους επανάληψης 975 και 2475 χρόνια παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.1.9 και 2.1.10, αντίστοιχα.

Από τους χάρτες των σχημάτων, 2.1.8 και 2.1.9, γίνεται σαφές ότι η Α.Ο. διατρέχει ζώνες με διαφορετικά επίπεδα σεισμικού κραδασμού για τις δύο περιόδους επανάληψης που εξετάζονται (475 και 975 χρόνια). Στον χάρτη του Σχήματος 2.1.11 παρουσιάζεται σε μεγέθυνση η περιοχή του αυτοκινητοδρόμου, ενώ με διαφορετικά χρώματα σημειώνονται τα τμήματα της Α.Ο. που αντιστοιχούν σε διαφορετικές ζώνες εκτιμώμενης μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης. Σε γενικές γραμμές, για τα 475 χρόνια η σεισμική επικινδυνότητα εμφανίζεται μεγαλύτερη στο δυτικό τμήμα του άξονα της Α.Ο., με μέγιστες επιταχύνσεις της τάξης των 0.35-0.4g, και μειώνεται προς τα ανατολικά, όπου οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις υπολογίζονται στα 0.25-0.3g.

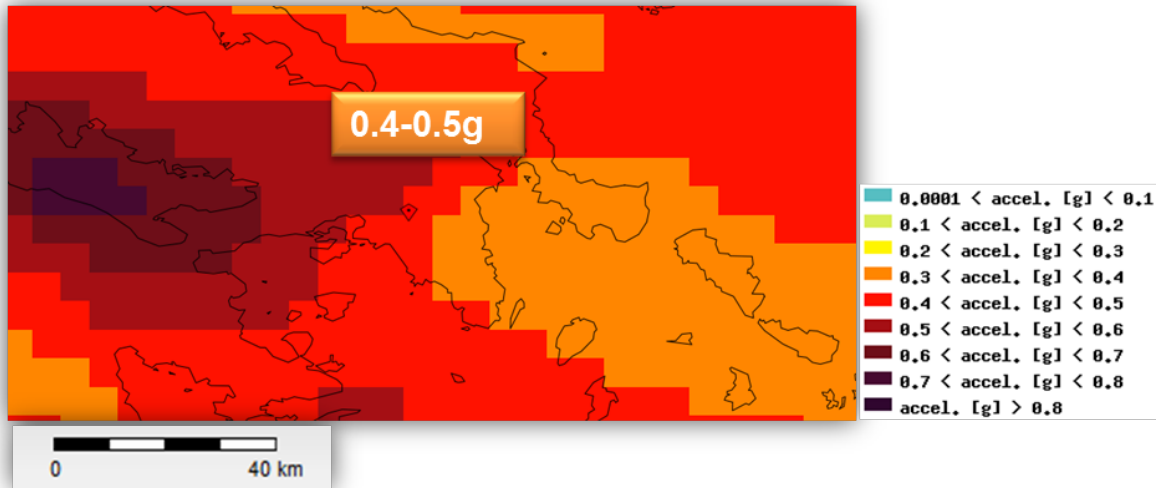


α)

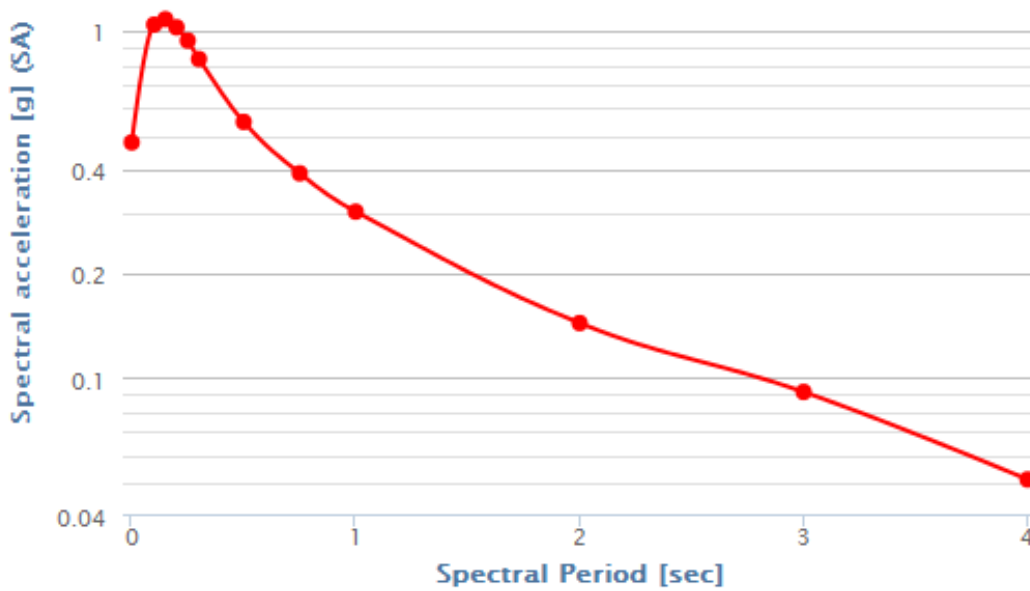


β)

Σχήμα 2.1.8: α) Κατανομή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης σε συνθήκες βράχου στην ευρύτερη περιοχή της Α.Ο. όπως υπολογίστηκε με βάση το SHARE. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε περίοδο επανάληψης $T=475$ χρόνια. β) Ομοιόμορφο φάσμα ελαστικής απόκρισης (UHS) σε συνθήκες επιφανειακής έξαρσης βραχώδους υποβάθρου στο κεντρικό τμήμα της Α.Ο.

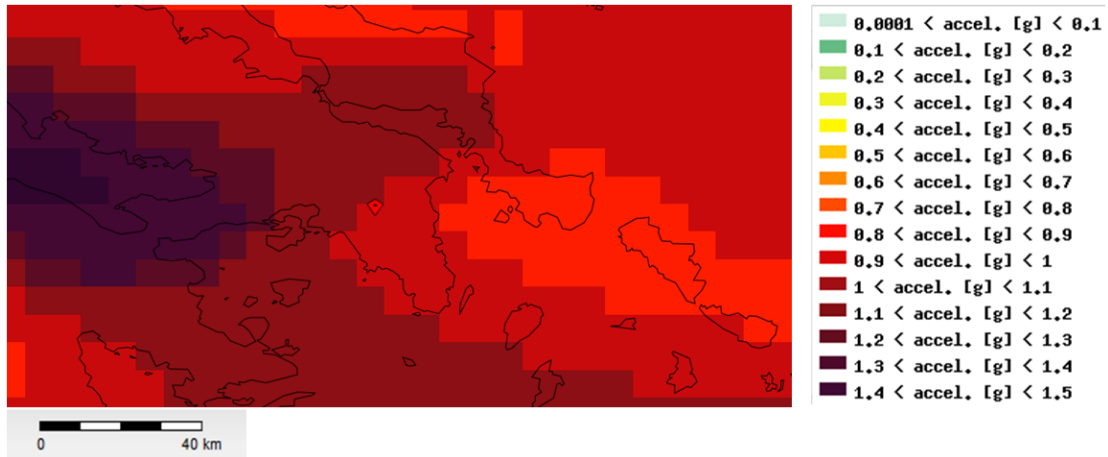


α)

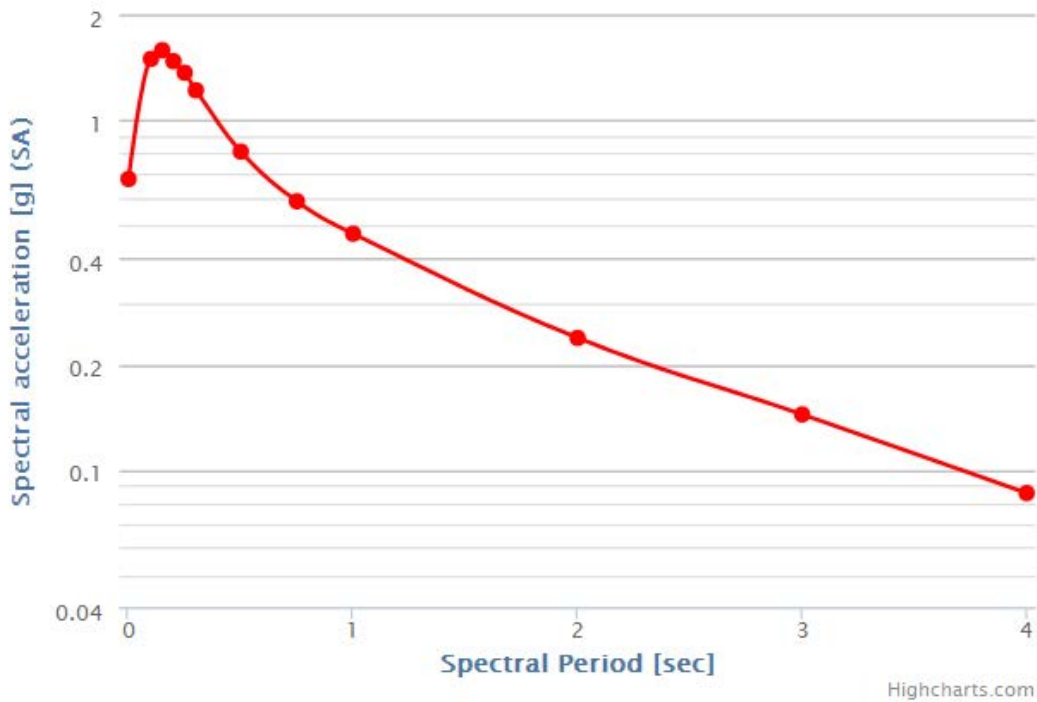


β)

Σχήμα 2.1.9: α) Κατανομή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης σε συνθήκες βράχου στην ευρύτερη περιοχή της Α.Ο. όπως υπολογίστηκε με βάση το SHARE. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε περίοδο επανάληψης $T=975$ χρόνια. β) Ομοιόμορφο φάσμα ελαστικής απόκρισης (UHS) σε συνθήκες επιφανειακής έξαρσης βραχώδους υποβάθρου στο κεντρικό τμήμα της Α.Ο.

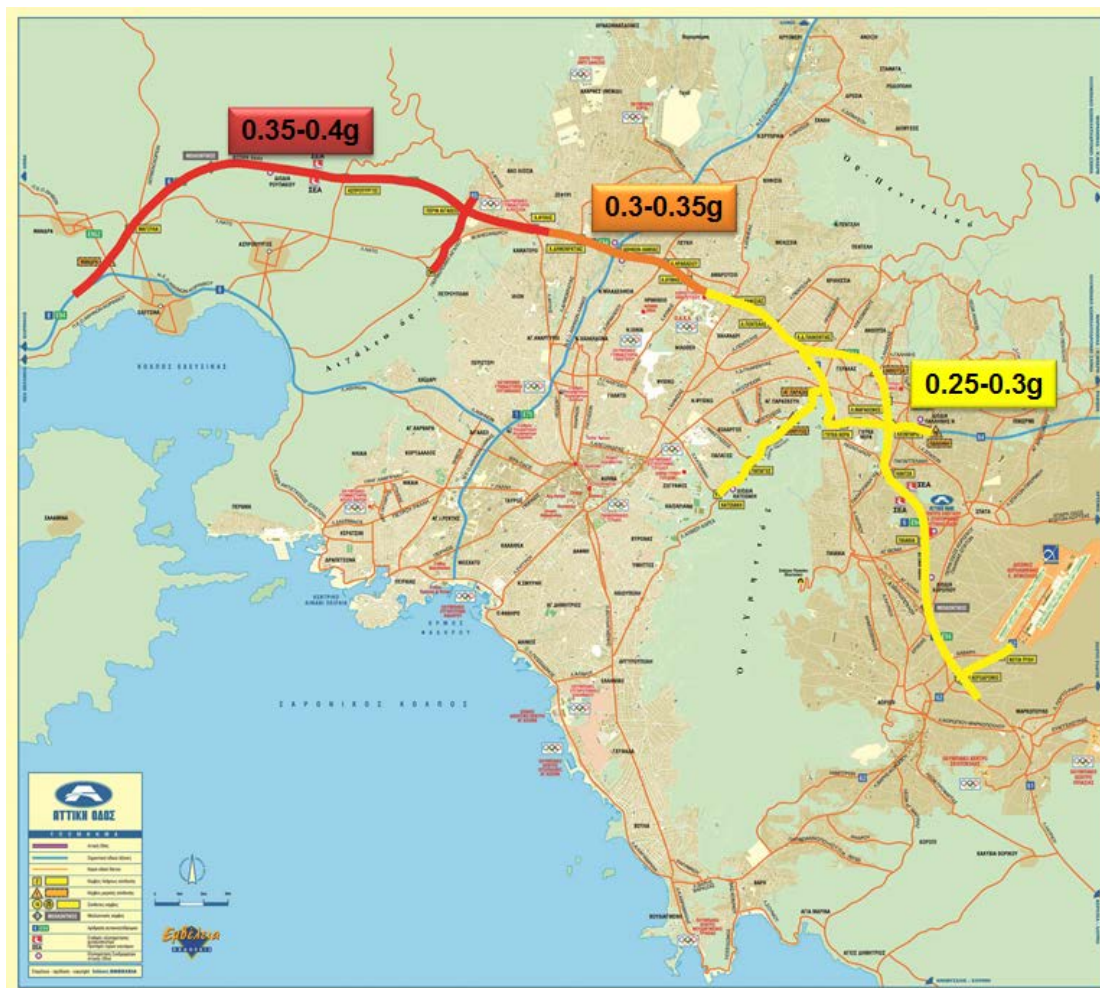


α)



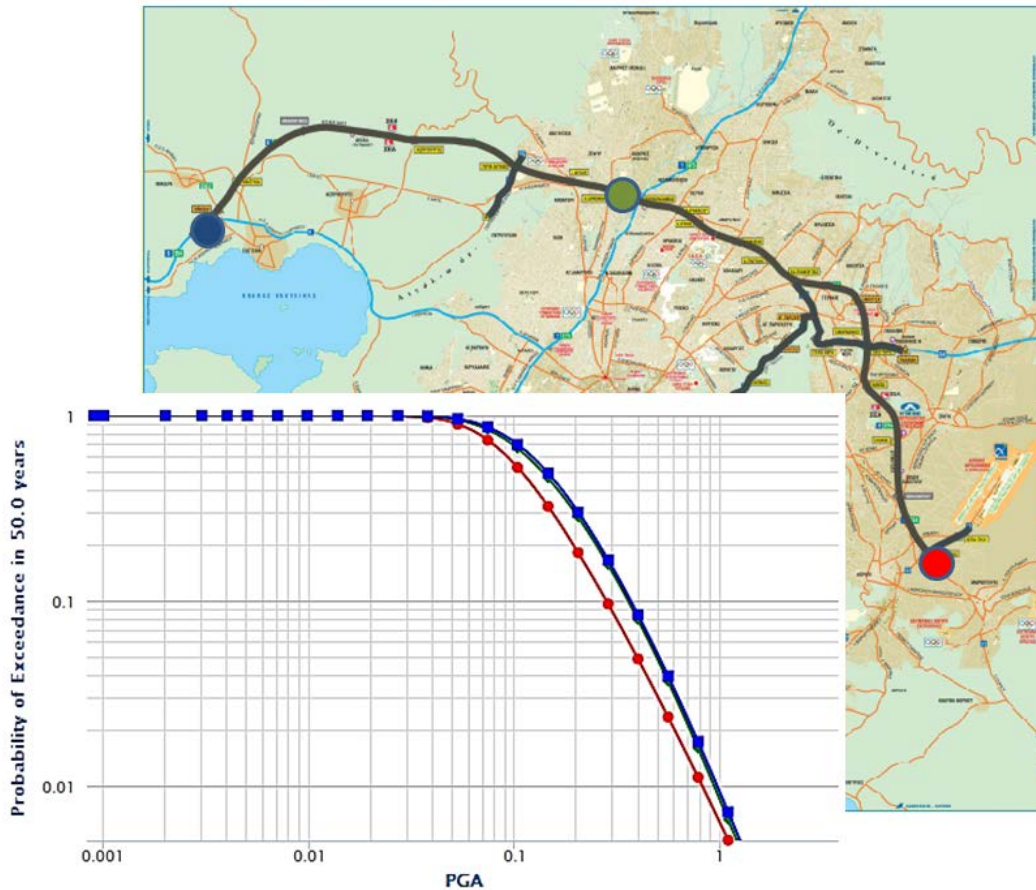
β)

Σχήμα 2.1.10: : α) Κατανομή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης σε συνθήκες βράχου στην ευρύτερη περιοχή της Α.Ο. όπως υπολογίστηκε με βάση το SHARE. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε περίοδο επανάληψης $T=2475$ χρόνια. β) Ομοιόμορφο φάσμα ελαστικής απόκρισης (UHS) σε συνθήκες επιφανειακής έξαρσης βραχώδους υποβάθρου στο κεντρικό τμήμα της Α.Ο.



Σχήμα 2.1.11: Αναμενόμενη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση σε συνθήκες βράχου κατά μήκος της Α.Ο. από σεισμό με περίοδο επανάληψης τα $T=475$ χρόνια (αποτελέσματα ερευνητικού προγράμματος SHARE).

Στο Σχήμα 2.1.12 γίνεται σύγκριση των καμπυλών σεισμικής επικινδυνότητας σε τρία σημεία της Α.Ο., όπου γίνεται και πάλι εμφανής η διαφοροποίηση της αναμενόμενης εδαφικής κίνησης κατά μήκος του άξονα του αυτοκινητοδρόμου.



Σχήμα 2.1.12: Καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας για τρία σημεία της Α.Ο., οι οποίες αντιστοιχούν σε σεισμό με περίοδο επανάληψης τα $T=475$ χρόνια (αποτελέσματα με βάση το ερευνητικό πρόγραμμα SHARE).

Σε ότι αφορά στη συνεκτίμηση του αποτελέσματος των τοπικών εδαφικών συνθηκών στη μεθοδολογία προσδιορισμού της σεισμικής επικινδυνότητας, αυτή πραγματοποιείται μέσω πολλαπλασιασμού του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού που υπολογίζεται σε συνθήκες βράχου (βλ. Σχήματα 2.1.8-2.1.11) με κατάλληλους συντελεστές εδαφικής ενίσχυσης. Οι συντελεστές που περιλαμβάνει ο Ευρωκώδικας 8 (EC8) για τις τέσσερις κατηγορίες εδάφους Β, C, D και E, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.2. Στον ίδιο πίνακα δίνονται και οι πιο πρόσφατες, βελτιωμένες τιμές των συντελεστών ενίσχυσης που προτάθηκαν στο πλαίσιο του SHARE (Pitilakis et al. 2012).

Εκτός των συντελεστών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.2 και οι οποίοι αναφέρονται σε σημερινή κατηγοριοποίηση των εδαφών, υπάρχει και μια ακόμα πιο πρόσφατη κατηγοριοποίηση σύμφωνα με την δημοσίευση των Pitilakis et al. (2013) όπου προτείνεται ένα νέο σύστημα κατηγοριοποίησης των εδαφών στο πλαίσιο του EC8 με αντίστοιχους συντελεστές φασματικής ενίσχυσης εξαρτώμενους και από την περίοδο.

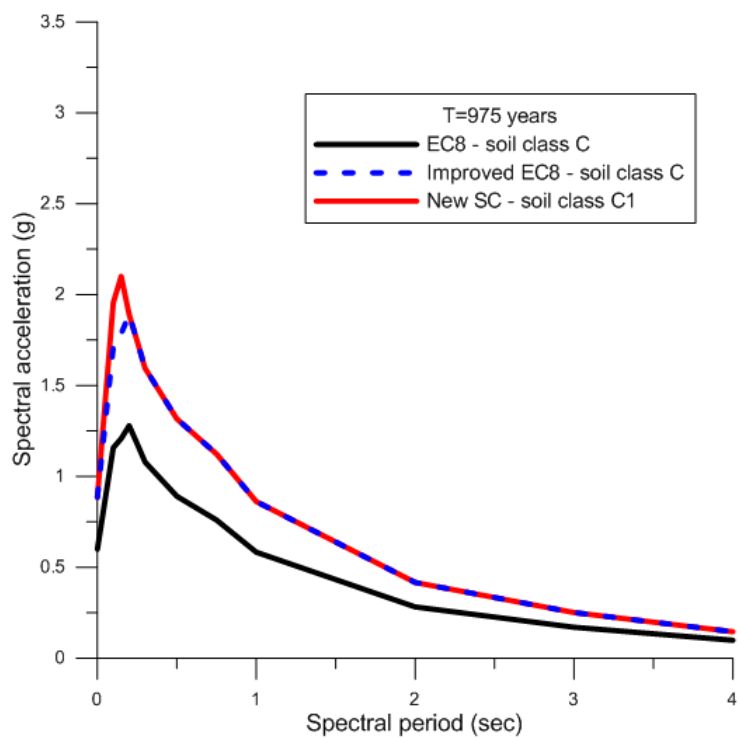
Πίνακας 2.1.2: Συντελεστές φασματικής ενίσχυσης για τις τέσσερις κατηγορίες εδάφους του EC8, όπως περιλαμβάνονται στην τρέχουσα έκδοση του Ευρωκώδικα και όπως τροποποιήθηκαν στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος SHARE (Pitilakis et al., 2012).

EC8 Κατηγορία Εδάφους	Τύπος 2 ($M_s \leq 5.5$)		Τύπος 1 ($M_s > 5.5$)	
	SHARE	EC8	SHARE	EC8
B	1.40	1.35	1.30	1.20
C	2.10	1.50	1.70	1.15
D	2.20*	1.80	1.60*	1.35
E	1.60	1.60	1.40**	1.40

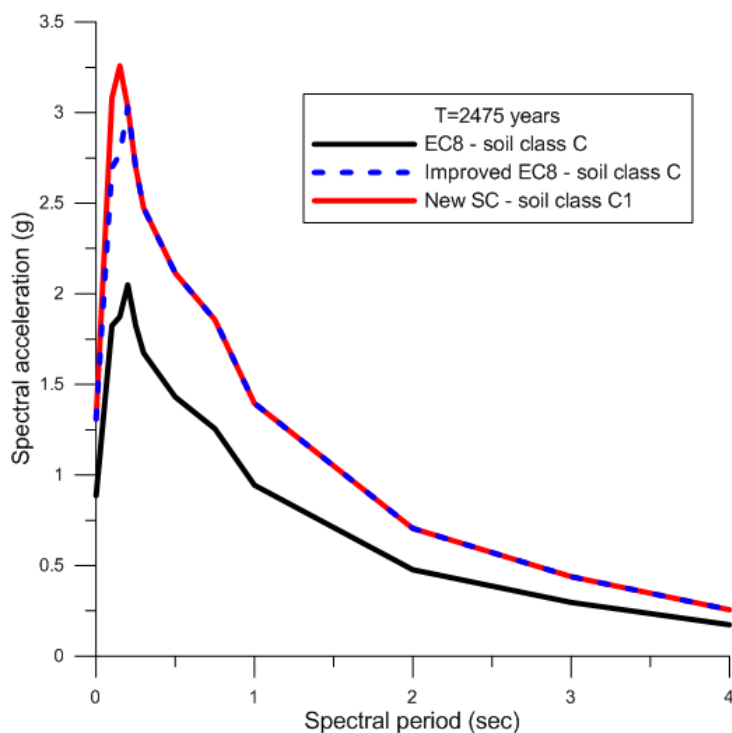
* περιορισμένα δεδομένα

** υπολογισμένοι με βάση καταγραφές της ισχυρής εδαφικής κίνησης του Kik-Net στην επιφάνεια και τον βράχο

Τα τελικά ελαστικά φάσματα απόκρισης λαμβάνοντας υπόψη και την επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών παρουσιάζονται για μια κατηγορία εδάφους ενδεικτικά στα σχήματα 2.1.13 έως 2.1.15. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 2.1.13 συγκρίνονται τα ελαστικά φάσματα απόκρισης σχεδιασμού που προέκυψαν από τη χρήση των τριών διαφορετικών συντελεστών ενίσχυσης (για έδαφος κατηγορίας C κατά τον Ευρωκώδικα 8) που προαναφέρθηκαν για το δυτικό τμήμα της Α.Ο. (Σχήμα 2.1.11, κόκκινο τμήμα) και για δυο περιόδους επανάληψης $T=975$ και $T=2475$ χρόνια.

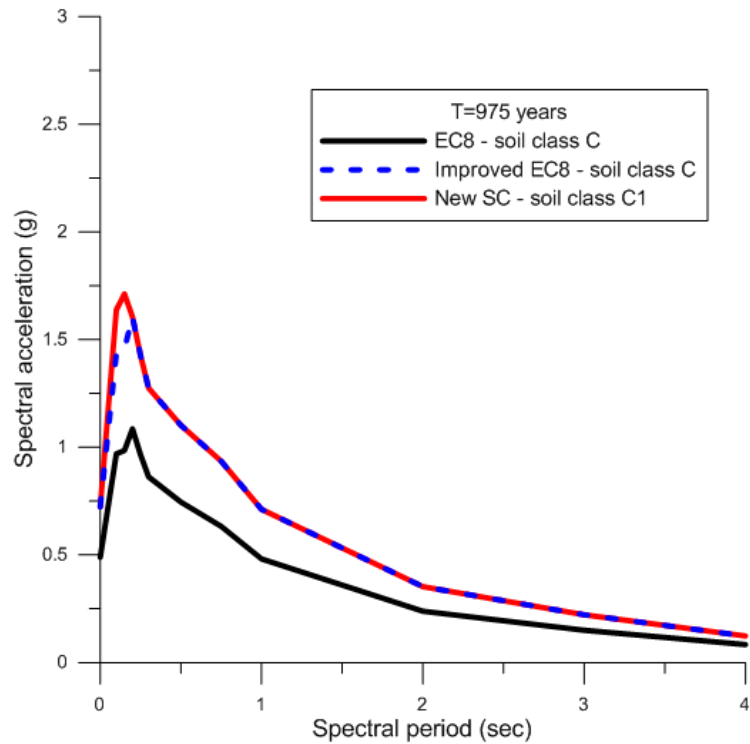


α)

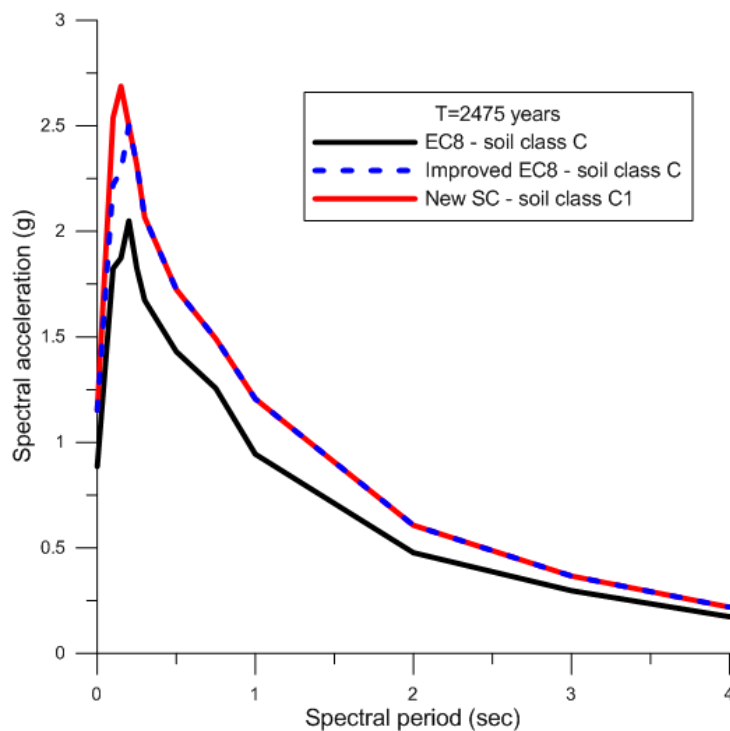


β)

Σχήμα 2.1.13: Φάσματα σχεδιασμού για το δυτικό τμήμα της Α.Ο. (Σχήμα 2.1.11, κόκκινο τμήμα) και για περιόδους επανάληψης $T=975$ χρόνια (α) και $T=2475$ χρόνια (β), όπως προέκυψαν μετά την τροποποίηση του ελαστικού φάσματος που υπολογίστηκε για επιφανειακές συνθήκες βράχου με βάση τους συντελεστές του Πίνακα 2.1.2 (μαύρη και μπλε διακεκομμένη γραμμή) και αυτούς που προτάθηκαν από τους Pitilakis et al. (2013) (κόκκινη γραμμή).

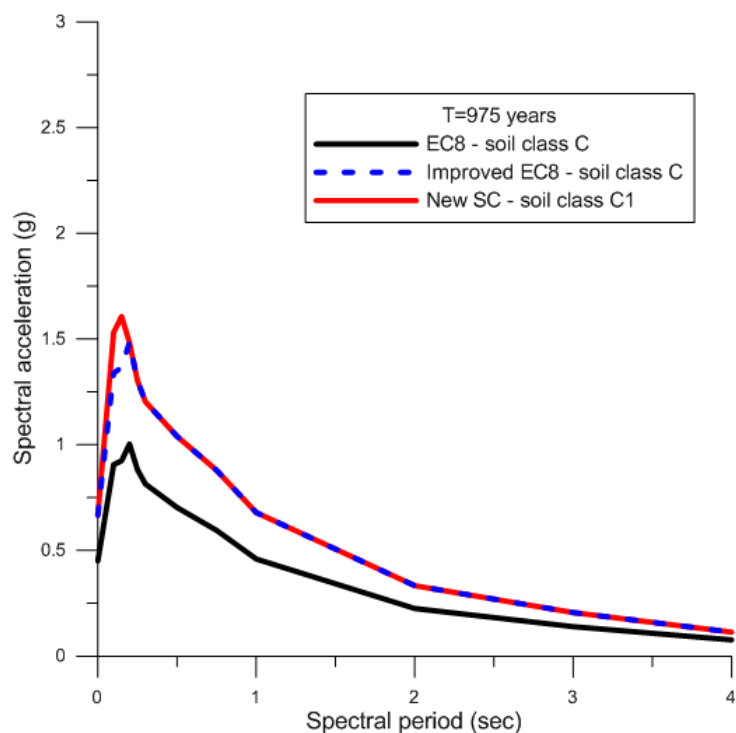


α)

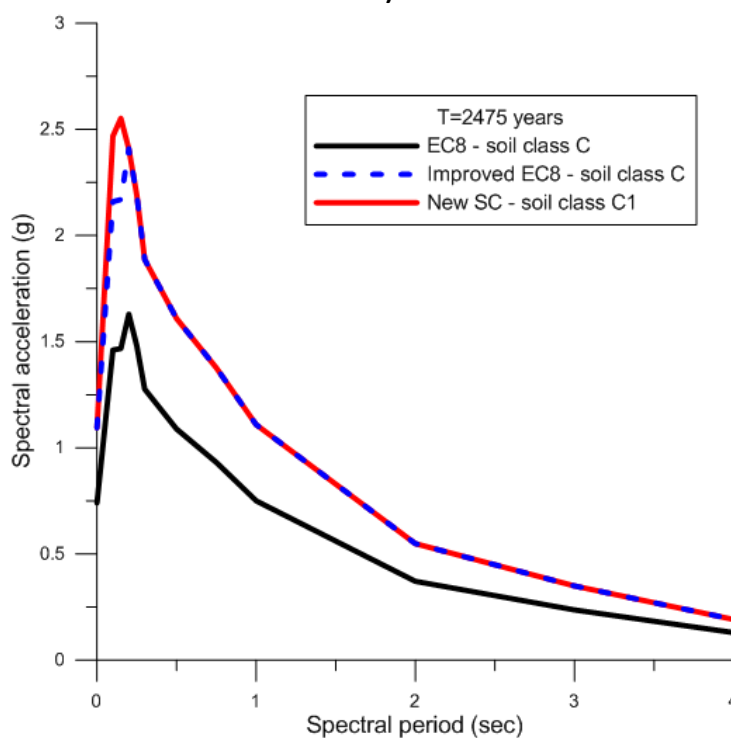


β)

Σχήμα 2.1.14: Φάσματα σχεδιασμού για το κεντρικό τμήμα της Α.Ο. (Σχήμα 2.1.11, πορτοκαλί τμήμα) και για περιόδους επανάληψης $T=975$ χρόνια (α) και $T=2475$ χρόνια (β), όπως προέκυψαν μετά την τροποποίηση του φάσματος που υπολογίστηκε για επιφανειακές συνθήκες βράχου με βάση τους συντελεστές του Πίνακα 2.1.2 και αυτούς που προτάθηκαν από τους Pitilakis et al. (2013).



α)



β)

Σχήμα 2.1.15: Φάσματα σχεδιασμού για το ανατολικό τμήμα της Α.Ο. (Σχήμα 2.1.11, κίτρινο τμήμα) και για περιόδους επανάληψης $T=975$ χρόνια (α) και $T=2475$ χρόνια (β), όπως προέκυψαν μετά την τροποποίηση του φάσματος που υπολογίστηκε για επιφανειακές συνθήκες βράχου με βάση τους συντελεστές του Πίνακα 2.1.2 και αυτούς που προτάθηκαν από τους Pitilakis et al. (2013).

2.1.5 Βιβλιογραφία

- Al Atik, L., N. Abrahamson, J.J. Bommer, F. Scherbaum, F. Cotton and N. Kuehn (2010). The variability of ground-motion prediction models and its components, *Seism. Res. Lett.* 81(5), 794 – 801.
- Algermissen, S.T., D.M. Perkins, W. Isherwood, D. Gordon, G. Reagor, C. Howard (1975). Seismic risk evaluation of the Balkan region, *Proc. Sem.: Seismic Zoning Maps, Skopje*, vol. 2 (1975), pp. 172–240.
- Anderson, J.G. and J. N. Brune (1999). Probabilistic seismic hazard analysis without the ergodic assumption, *Seism. Res. Lett.* 70, 19 – 28.
- Aoudia, A., F. Vaccari, P. Suhadolc and M. Meghraoui (2000). Seismogenic potential and earthquake hazard assessment in the tell atlas of Algeria, *Journal of Seismology* 4, 79-98.
- Atkinson, G.M. (2006). Single-station sigma, *Bull. Seism. Soc. Am.* 96(2), 446 – 455.
- Bommer, J.J. and N.A. Abrahamson (2006). Why do modern probabilistic seismic hazard analysis often lead to increased hazard estimates, *Bull. Seism. Soc. Am.* 96, 1967 – 1977.
- Bommer, J.J. and F. Scherbaum (2008). The use and misuse of logic trees in probabilistic seismic hazard analysis, *Earthquake Spectra* 24(4), 997-1009.
- Budnitz, R.J., G. Apostolakis, D.M. Boore, L.S. Cluff, K.J. Coppersmith, C.A. Cornell and P.A. Morris (1997). Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainty and use of experts. NUREG/CR6372. Nuclear Regulatory Commission, Washington, 256 pp.
- Burton, P.W., Y. Xu, G.A. Tselentis, E. Sokos and W. Aspinall (2002). Strong ground acceleration seismic hazard in Greece and neighboring regions, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 23 (2002), pp. 159–181
- Coppersmith, K., R.R. Youngs, and C. Sprecher (2009). Methodology of seismic source characterization for the PEGASOS project, Switzerland. *Swiss J. Geosci.*, 102, 91-105. Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.* 58, 1583 – 1606.
- Costa, G., G.F. Panza, P. Suhadolc, F. Vaccari (1993). Zoning of the Italian territory in terms of expected peak ground acceleration derived from complete synthetic seismograms, *J. Appl. Geophys.*, 30 (1993), pp. 149–160
- Drakopoulos, J., K. Makropoulos (1983). Seismicity and Hazard Analysis Studies in the Area of Greece, *Publ. Seism. Lab. Univ. of Athens*, vol. 1 (1983) 126 pp.
- EERI Committee on Seismic Risk (1989). The basics of seismic risk analysis. *Earthquake Spectra* 5, 675 - 702.
- Ishikawa, Y. and H. Kameda (1988). Hazard-consistent magnitude and distance for extended seismic risk analysis. *Proc. 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.2, Tokyo, Kyoto*, 89 – 94.
- Klügel, J.-U., Mualchin, L. and G.F. Panza (2006). A scenario-based procedure for seismic risk analysis, *Engineering Geology* 88, 1-22.

- Koutrakis, S.I., P.K. Koliopoulos, G.F. Karakaisis, B.N. Margaris, P.M. Hatzidimitriou (2002). Seismic hazard in Greece based on different strong ground motion parameters, *J. Earthq. Eng.*, 6 (2002), pp. 75–109
- Margaris, V.N. (1994). Azimuthal dependence of the seismic waves and its influence on the seismic hazard assessment in the area of Greece, PhD. Thesis, Univ. Thessaloniki, 324 pp. (in Greek, with an English abstract).
- Moratto, L., B. Orlecka-Sikora, G. Costa, P. Suhadolc, Ch. Papaioannou and C.B. Papazachos (2007). A deterministic seismic hazard analysis for shallow earthquakes in Greece, *Tectonophysics* 442, 66 – 82.
- Papaioannou, Ch.A. (1984). Attenuation of seismic intensities and seismic hazard in the area of Greece, PhD. Thesis, Univ. Thessaloniki, 200 pp. (in Greek, with an English abstract).
- Papaioannou, Ch.A. (1986) Seismic hazard assessment and long term earthquake prediction in Southern Balkan region. A. Vogel, K. Brandes (Eds.), *Proc. 2nd Int. Sem. on Earthquake Prognostics*, FU Berlin (1986), pp. 223–241
- Papaioannou, Ch.A., B.C. Papazachos (2000). Time-independent and time-dependent seismic hazard in Greece based on seismogenic sources, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90 (2000), pp. 22–33
- Papazachos, B.C., A.A. Kiratzi, P.M. Hatzidimitriou, Ch.A. Papaioannou, N.P. Theodulidis (1985). Regionalization of seismic hazard in Greece, *Proc. 12th Reg. Sem. on Earthq. Eng. EAEE–EPPO*, Halkidiki, Greece (1985) 12 pp.
- Papazachos, B.C., Ch.A. Papaioannou, D.J. Papastamatiou, V.N. Margaris, N.P. Theodulidis (1990). On the reliability of different methods of the seismic hazard assessment in Greece, *Nat. Hazards*, 3 (1990), pp. 141–151
- Papazachos, B.C., Ch.A. Papaioannou (1993). Long-term earthquake prediction in the Aegean area based on a time and magnitude predictable model, *Pure Appl. Geophys.*, 140 (1993), pp. 595–612
- Papazachos, B.C., Ch.A. Papaioannou, V. Margaris, N. Theodulidis (1993). Regionalization of seismic hazard in Greece based on seismic sources, *Nat. Hazards*, 8 (1993), pp. 1–18.
- Parvez, I.A., F. Vaccari and G.F. Panza (2003). A deterministic seismic hazard map of India and adjacent areas, *Geophysical Journal International* 155, 489-508.
- Πιτιλάκης, Κ. (2010). Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ. 716.
- Pitilakis, K., E. Riga and A. Anastasiadis (2012). Design spectra and amplification factors for Eurocode 8, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 10, No. 5, pp 1377-1400, DOI: 10.1007/s10518-012-9367-6.
- Pitilakis, K., E. Riga and A. Anastasiadis (2013). New code site classification, amplification factors and normalized response spectra based on a worldwide ground-motion database, *Bulletin of Earthquake Engineering*, DOI: 10.1007/s10518-013-9440-9.

- Reiter, L. (1990). Earthquake hazard analysis. Issues and insights, Columbia University Press, New York.
- Rodriguez-Marek, A., G.A. Montalva, F. Cotton and F. Bonilla (2011). Analysis of single-station standard deviation using the KiK-net Data, Bull. Seism. Soc. Am. 101(3), 1242 – 1258.
- Scherbaum, F. and M. Kuehn (2011). Logic tree branch weights and probabilities: summing up to one is not enough, Earthquake Spectra 27(4), 1237-1251.
- Stepp, J. C., I. Wong, J. Whitney, R. Quittmeyer, N. Abrahamson, G. Toro, R. Youngs, C. Coppersmith, J. Savy, T. Sullivan and Yucca Mountain PSHA Project Members (2001). Probabilistic seismic hazard analyses for ground-motions and fault displacement at Yucca Mountain, Nevada. Earthquake Spectra, 17, 113-151.
- Strasser, F.O., N.A. Abrahamson and J.J. Bommer (2009). Sigma: insights, and challenges, Seism. Res. Lett. 80(1), 40 – 56.