

## Μελέτη της χρονικά ανεξάρτητης και εξαρτημένης σεισμικής επικινδυνότητας με τη χρήση συνθετικών καταλόγων

Time-independent and time-dependent seismic hazard  
study using synthetic catalogs

Δομίνικος ΒΑΜΒΑΚΑΡΗΣ<sup>1</sup>, Κωνσταντίνος ΠΑΠΑΖΑΧΟΣ<sup>1</sup>, Χρήστος  
ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ<sup>2</sup>, Εμμανουήλ ΣΚΟΡΔΥΛΗΣ<sup>1</sup>, Γεώργιος ΚΑΡΑΚΑΪΣΗΣ<sup>1</sup>

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση της χωροχρονικής κατανομής της σεισμικότητας στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας με τη χρήση τόσο χρονικά ανεξάρτητων όσο και χρονικά εξαρτημένων μοντέλων σεισμικότητας, εφαρμόζοντας ένα απλό μοντέλο πρόγνωσης κύριων σεισμών. Η διαδικασία εκτίμησης βασίζεται στη δημιουργία συνθετικών καταλόγων μέσα από μία διαδικασία Monte-Carlo, οι οποίοι έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με τη χωροχρονική και κατά μέγεθος κατανομή της σεισμικότητας. Οι κατάλογοι αυτοί χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της στατιστικής κατανομής των παραμέτρων της εδαφικής σεισμικής κίνησης σε κάθε θέση ενδιαφέροντος, εκτελώντας απ' ευθείας υπολογισμούς για το σύνολο των σεισμών κάθε συνθετικού καταλόγου. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται για την περιοχή του Ν. Αιγαίου, τόσο για χρονικά ανεξάρτητα μοντέλα (χρονική κατανομή Poisson), όσο και για χρονικά εξαρτημένα μοντέλα για τους κύριους σεισμούς. Τα αποτελέσματα δείχνουν σημαντικές διαφοροποιήσεις σε επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας ανάμεσα στα διάφορα τελικά μοντέλα, αναδεικνύοντας τη σημασία των υπολογισμών χρονικά εξαρτώμενης σεισμικής επικινδυνότητας

**ABSTRACT:** In the present work we study the effect of the spatiotemporal distribution of seismicity on the estimation of seismic hazard using both time-independent and time-dependent seismicity models, by employing a simple model for prediction of mainshocks. The estimation procedure is based on a Monte-Carlo procedure to create synthetic catalogues which have specific characteristics regarding their spatiotemporal and magnitude seismicity distributions. These catalogues are used to estimate the statistical distribution of the ground motion parameters for several sites of interest, by performing computations directly on all earthquakes of each catalogue. The computations are performed for S. Aegean, both for time-independent (Poisson time distribution), as well as time-dependent models for mainshocks. The results show significant differentiations regarding the seismic hazard levels between the different models, verifying the significance of performing computations for time-dependent hazard.

<sup>1</sup> Τομέας Γεωφυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, ΤΘ 352-1, ΤΚ 54124, Θεσσαλονίκη, e-mail: dom@geo.auth.gr

<sup>2</sup> Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ), ΤΘ 53 Φοίνικας, ΤΚ 55102, Θεσσαλονίκη.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κλασική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας βασίζεται κυρίως στην αντίληψη ότι η σεισμικότητα της μεταβάλλεται μόνο στο χώρο ενώ η χρονική της μεταβολή είναι τελείως τυχαία (κατανομή Poisson) και τα μεγέθη των σεισμών ακολουθούν εκθετική κατανομή (Gutenberg-Richter). Πληθώρα όμως στοιχείων δείχνουν πως η σεισμικότητα εμφανίζει χρονικές μεταβολές ενώ οι σεισμοί (ιδίως οι κύριοι) δεν μπορούν να θεωρηθούν γεγονότα που συμβαίνουν τυχαία στο χρόνο, δεν ακολουθούν δηλαδή, σε σχέση με το χρόνο γένεσής τους, την κατανομή Poisson.

Δυστυχώς, η βραχείας διάρκειας πρόγνωση σεισμών δεν φαίνεται προς το παρόν ως ένας εφικτός στόχος, λόγω της περιορισμένης επιστημονικής γνώσης στα θέματα των φυσικών νόμων που διέπουν τα πρόδρομα φαινόμενα και τους σχετικούς κύριους σεισμούς (Wyss, 1997). Η μακράς διάρκειας πρόγνωση συγκεκριμένων σεισμών σε ένα σεισμικό ρήγμα φαίνεται επίσης ως εξαιρετικά δύσκολη, αφού η φυσική διαδικασία που λαμβάνει χώρα σε ένα ρήγμα πριν τη γένεση ενός σεισμού χαρακτηρίζεται από διαδικασίες αιτιοκρατικού χάους και απαιτεί ακριβή γνώση της διαδικασίας ώστε να προβλεφθεί ο επόμενος ισχυρός σεισμός σε αυτό (Jaumé and Sykes, 1999). Όμως, υπάρχουν σημαντικά στοιχεία τα οποία δείχνουν ότι η μεσοπρόθεσμη πρόγνωση σεισμών (λίγα χρόνια ή δεκαετίες) είναι ελπιδοφόρα, λόγω των προγνωστικών ιδιοτήτων που έχει η προσεισμική σεισμικότητα, όπως δείχνει πληθώρα παρατηρήσεων και φυσικών μοντέλων τα οποία βασίζονται στη θεωρία του χάους (Evison, 2001).

Δύο από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά προσεισμικά μοντέλα αφορούν την παρατήρηση επιταχυνόμενης σεισμικής παραμόρφωσης σε μία ευρεία (κρίσιμη) περιοχή (π.χ. Tocher, 1959; Mogi, 1969; Papadopoulos, 1988, Sykes and Jaumé, 1990; Knoppoff et al., 1996; Robinson, 2000; Tzanis et al., 2000) και επιβραδυνόμενης προσεισμικής παραμόρφωσης στην ευρύτερη περιοχή της ζώνης διάρρηξης (ευρύτερη σεισμογενή περιοχή) (Wyss and Habermann, 1988; Scholz, 1988; Zöller et al., 2002; Jaumé, 1992, Bufe et al., 1994; Papazachos et al., 2004). Αυτό το μοντέλο που συνδυάζει διέγερση στην ευρύτερη περιοχή και σεισμική «ησυχία» στην μικρότερη σεισμογενή περιοχή καλείται παραδοσιακά ο δακτύλιος του Mogi (1969). Ο συνδυασμός επιταχυνόμενης γένεσης ενδιαμέσου μεγέθους σεισμών σε μία ευρεία (κρίσιμη) περιοχή και επιβραδυνόμενης γένεσης παρόμοιων σεισμών σε μία πιο μικρή (σεισμογενή περιοχή), των οποίων η χρονική κατανομή ακολουθεί ένα νόμο δύναμης έχει πρόσφατα αναπτυχθεί χρησιμοποιώντας ένα σύνολο ημι-εμπειρικών σχέσεων, οι οποίες έχουν προγνωστικές ιδιότητες (Papazachos et al., 2005, 2006).

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ελέγχεται η σημασία των εκτιμήσεων (προγνώσεων) κύριων σεισμών για τη σεισμική επικινδυνότητα, πραγματοποιώντας δύο βασικά βήματα.

Στο πρώτο βήμα πραγματοποιείται έλεγχος της συμβατότητας μίας νέας προτεινόμενης προσέγγισης υπολογισμού χρονικά ανεξάρτητης σεισμικής επικινδυνότητας, με κλασικούς αλγόριθμους. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκαν συνθετικοί κατάλογοι του Ελληνικού χώρου που περιέχουν σεισμούς οι οποίοι ακολουθούν την κατανομή Poisson στο χρόνο και χωρική κατανομή σύμφωνη με τη σεισμικότητα (σχέση Gutenberg-Richter). Τα αποτελέσματα δείχνουν πολύ καλή συμβατότητα με τα αποτελέσματα κλασικών αλγορίθμων υπολογισμού επικινδυνότητας (EQ-Risk, κλπ.). Παράλληλα, η προτεινόμενη προσέγγιση προσφέρει πρόσθετες δυνατότητες για την παραμετρική διερεύνηση των διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν τη σεισμική

επικινδυνότητα, αλλά και βελτιωμένου υπολογισμού της από πολύπλοκες σεισμικές πηγές (π.χ. ζώνη κατάδυσης, κλπ.).

Το δεύτερο βήμα αφορά τη δημιουργία σεισμικών καταλόγων οι οποίοι έχουν χωροχρονική συμπεριφορά συμβατή με μοντέλα μεσοπρόθεσμης πρόγνωσης που έχουν προταθεί πρόσφατα. Συγκεκριμένα, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη δυνατότητα χρησιμοποίησης των αποτελεσμάτων που βασίζονται σε μοντέλα επιταχυνόμενης-επιβραδυνόμενης σεισμικότητας πριν από τη γένεση σημαντικών καταστρεπτικών σεισμών (Parazachos and Parazachos, 2000, 2001, Parazachos et al., 2002, Parazachos, 2003, Parazachos et al., 2005). Τα αποτελέσματα ελέγχθηκαν και συγκρίνονται με αυτά της χρονικά ανεξάρτητης σεισμικής επικινδυνότητας για μικρά χρονικά διαστήματα (5-10 έτη). Οι διαφορές που προκύπτουν για συγκεκριμένα μοντέλα γένεσης κύριων σεισμών είναι συχνά σημαντικές, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της προτεινόμενης προσέγγισης.

## ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑΣ

Για τον καθορισμό της σεισμικότητας και της σεισμικής επικινδυνότητας χρησιμοποιούνται μοντέλα που μπορούν να διακριθούν σε γενικά σε δυο βασικές κατηγορίες: 1) Χρονικά ανεξάρτητα μοντέλα και 2) Χρονικά εξαρτημένα μοντέλα.

### Χρονικά Ανεξάρτητο Μοντέλο Σεισμικότητας

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος της σεισμικής επικινδυνότητας περιγράφεται από την εξίσωση (1):

$$Y_t = \frac{\ln N_o t}{\beta} - \frac{\ln[-\ln(1 - P_t)]}{\beta} \quad (1)$$

όπου  $Y_t$  είναι η παράμετρος της σεισμικής επικινδυνότητας, η οποία έχει πιθανότητα  $P_t$  να υπερβληθεί σε ορισμένο χρονικό διάστημα  $t$  ετών ενώ  $N_o$  και  $\beta$  είναι σταθερές οι οποίες υπολογίζονται από σχέσεις κατανομής της σεισμικής έντασης. Συνήθως οι σταθερές αυτές υπολογίζονται από την κατανομή θεωρητικών τιμών της έντασης όπως προκύπτουν αυτές με βάση τη χρήση καταλόγων σεισμών και σχέσεων απόσβεσης της σεισμικής έντασης με την απόσταση. Η διατύπωση αυτή υιοθετεί την άποψη ότι για τον υπολογισμό της τιμής της παραμέτρου  $Y_t$  της σεισμικής επικινδυνότητας οι σεισμοί ακολουθούν μια τυχαία κατανομή στο χρόνο (Poisson) και παράλληλα δεν εξαρτώνται χρονικά από τη σεισμική δράση του παρελθόντος. Η απλή μορφή του μοντέλου Poisson και η ευκολία με την οποία υπολογίζονται οι παράμετροι του, με μικρά σφάλματα, βοήθησαν ώστε να εφαρμοστεί ευρέως σε μεγάλο αριθμό μελετών σεισμικότητας και σεισμικής επικινδυνότητας κυρίως κατά το παρελθόν.

Συνήθως, θεωρείται ότι η σεισμικότητα μεταβάλλεται μόνο χωρικά και ότι η χρονική της μεταβολή σε ένα τόπο είναι τυχαία. Στην περίπτωση αυτή μιλάμε για «χρονικώς ανεξάρτητη σεισμικότητα» η οποία υπολογίζεται με βάση την υπόθεση ότι η

σεισμικότητα σε έναν τόπο εξαρτάται από τις τεκτονικές δυνάμεις που ασκούνται στην περιοχή. Η αναμενόμενη μελλοντική σεισμικότητα ωστόσο δεν εξαρτάται από το χρόνο γένεσης των προηγούμενων σεισμών στην περιοχή αυτή (μοντέλο χωρίς μνήμη). Εξαιρετικό ενδιαφέρον παρουσιάζει ο ποσοτικός καθορισμός της σεισμικότητας σε μια περιοχή, καθώς από αυτήν εξαρτάται άρρηκτα ο σεισμικός κίνδυνος και η σεισμική επικινδυνότητα. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να οριστούν μέτρα σεισμικότητας που ο υπολογισμός τους να είναι εύκολος και να εμπεριέχει μικρά σφάλματα.

Ο νόμος κατανομής των μεγεθών (Gutenberg and Richter, 1944), αλλά και η υπόθεση της τυχαίας κατανομής στο χρόνο (Poisson), αποτελούν τη βάση πάνω στην οποία είναι ορισμένα τα μέτρα της σεισμικότητας. Ο νόμος αυτός εκφράζεται με τη σχέση

$$\log N = a_t - bM \quad (1)$$

με την οποία συνδέεται η αθροιστική συχνότητα,  $N$ , εμφάνισης σεισμών με μέγεθος μεγαλύτερο ή ίσο του  $M$ , με το μέγεθος αυτό, για χρονικό διάστημα  $t$  ετών. Γενικά, είναι αποδεκτό, πως η τιμή της παραμέτρου  $b$  παρουσιάζει την τάση να μειώνεται πριν από τη γένεση ενός μεγάλου σεισμού (Mogi, 1985) ενώ η τιμή της παραμέτρου  $a$  περιγράφει το επίπεδο της σεισμικότητας. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή αυτή, τόσο υψηλότερο είναι και το επίπεδο της σεισμικότητας (Rundle, 1989; Turcotte, 1989, 1992). Στην πραγματικότητα όμως υπάρχουν αρκετές πρακτικές δυσκολίες στη χρήση της σχέσης (2) μεταξύ του μεγέθους και της συχνότητας εμφάνισης του.

Το χρονικά μη εξαρτημένο μοντέλο υπολογίζει μόνο τη μέση σεισμικότητα σε κάθε τόπο και συνεπώς ενδιαφερόμαστε μόνο για τη χωρική κατανομή της μέσης σεισμικότητας. Η χρονική εξάρτηση της σεισμικότητας θεωρείται τυχαία, άρα η αθροιστική σεισμικότητα μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο, δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$a_t = a_1 + \log t \quad (3)$$

όπου  $a_1$  η τιμή της σχέσης (2) για ένα έτος.

### **Χρονικά Εξαρτημένα Μοντέλα Σεισμικότητας**

Μελετώντας την χρονικά ανεξάρτητη σεισμικότητα, της σεισμικότητας δηλαδή που θεωρείται αμετάβλητη με το χρόνο, υποθέσαμε ότι ισχύει ο νόμος κατανομής των μεγεθών των Gutenberg-Richter (σχέσεις 2 και 3) με τις παραμέτρους  $a$  και  $b$  να είναι σταθερές και ανεξάρτητες του χρόνου, καθώς και ότι η χρονική κατανομή των σεισμών είναι τυχαία. Έτσι, ο υπολογισμός των μέτρων της σεισμικότητας σε μια περιοχή έγινε με επεξεργασία των δεδομένων με στατιστική μέθοδο χωρίς μνήμη (μοντέλο Poisson). Έχει διαπιστωθεί ωστόσο (π.χ. Papazachos, 1989), ότι υπάρχει χρονική μεταβολή της σεισμικής δράσης και ότι οι κύριοι σεισμοί δεν εμφανίζονται τυχαία στο χώρο και το χρόνο, αλλά επαναλαμβάνονται σε συγκεκριμένες περιοχές και με συγκεκριμένη χρονική συμπεριφορά.

Οι περίοδοι επανάληψης των μεγάλων σεισμών χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρον τις τελευταίες δεκαετίες για τη μελέτη της σεισμικής επικινδυνότητας και για την καλύτερη ερμηνεία της συμπεριφοράς των μεγάλων σεισμικών γεγονότων. Αξιοσημείωτη έρευνα έχει γίνει για τον υπολογισμό της περιόδου επανάληψης των σεισμών, αλλά και του

μεγέθους του επικείμενου κύριου σεισμού, καθώς αυτές οι δυο παράμετροι είναι θεμελιώδους σημασίας για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας.

Πολλές μελέτες τον τελευταίο αιώνα (Fedotov, 1965; Mogi, 1969; Shimazaki and Nakata, 1980; Sykes and Quittmeyer, 1981) συνηγορούν στην άποψη ότι η εμφάνιση των σεισμών είναι τελικά ένα χρονικά εξαρτημένο φαινόμενο και είναι αναγκαίο να γίνει ποσοτικός πλέον καθορισμός της χρονικά μεταβαλλόμενης σεισμικότητας, με βάση συγκεκριμένο μοντέλο που να προβλέπει κατάλληλες σχέσεις με τις οποίες θα υπολογίζονται τα μέτρα της χρονικά εξαρτημένης σεισμικότητας. Για παράδειγμα, το μοντέλο πρόγνωσης χρόνου (time-predictable model) σχετίζεται με τη μετάθεση σε ένα συγκεκριμένο ρήγμα κατά τον προηγούμενο σεισμό και αυτό είναι ενδεικτικό του αναμενόμενου χρόνου που μεσολαβεί μέχρι τη γένεση του επόμενου μεγάλου σεισμού, αφού μπορεί να προσδιοριστεί η τεκτονική φόρτιση.

Έχοντας κάνει εκτίμηση για τη χρονική μεταβολή των κυρίων σεισμών στις σεισμικές περιοχές και τη χρονική μεταβολή της σεισμικότητας των συνοδών σεισμών στις αντίστοιχες περιοχές, μπορεί να υπολογιστεί η χρονική μεταβολή ενός μέτρου της σεισμικής κίνησης (PGA, PGV, PGD,  $I_{MM}$ ) σε ορισμένη θέση, δηλαδή, να καθοριστεί η σεισμική επικινδυνότητα σε συνάρτηση με το χρόνο σε κάθε θέση.

## **ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΥΧΑΙΩΝ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΛΟΓΩΝ**

Για τη μελέτη της χωροχρονικής κατανομής της σεισμικότητας στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας χρησιμοποιείται ένα γενικευμένο μοντέλο πρόγνωσης του χρόνου και του μεγέθους των σεισμών που βασίζεται στη δημιουργία συνθετικών καταλόγων μέσα από μια διαδικασία στατιστικής προσομοίωσης Monte Carlo. Οι κατάλογοι αυτοί περιέχουν δεδομένα αρχικά μόνο για κύριους σεισμούς οι οποίοι ακολουθούν την κατανομή Poisson, χαρακτηρίζονται δηλαδή από τυχαιότητα στο χρόνο. Η πιθανότητα εμφάνισης παρουσιάζεται ίδια και σταθερή σε όλη την διάρκεια το διαστήματος που καλύπτουν οι κατάλογοι και δεν εξαρτάται από το σεισμικό παρελθόν της περιοχής. Σε ότι αφορά την κατανομή των επικέντρων στο χώρο, αυτή είναι σύμφωνη με τη σεισμικότητα της περιοχής όπως ορίζεται από τη νόμο κατανομής Gutenberg-Richter και τις παραμέτρους  $a$  και  $b$  για κάθε περιοχή.

### **Προσαρμογή καταλόγων για το νότιο Αιγαίο**

Για τον υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας στην ευρύτερη περιοχή του νοτίου Αιγαίου παρήχθησαν συνθετικοί κατάλογοι με σεισμούς μεγέθους  $M \geq 3.0$ . Οι κατάλογοι αυτοί δημιουργούνται για συγκεκριμένες ζώνες του νοτίου Ελληνικού χώρου όπως αυτές ορίζονται από τον Papazachos (1996) και χαρακτηρίζονται από τις παραμέτρους  $a$  και  $b$  που υπολογίστηκαν για αυτές, συνεκτιμώντας και τα μέγιστα μεγέθη σεισμών που κάθε ζώνη έχει τη δυνατότητα να δώσει (Πίνακας 1). Με βάση τα εστιακά βάθη και τους μηχανισμούς γένεσης των σεισμών, οι σεισμικές ζώνες έχουν χωριστεί σε τρεις μεγάλες κατηγορίες όπως παρουσιάζονται και στο χάρτη του σχήματος 1.

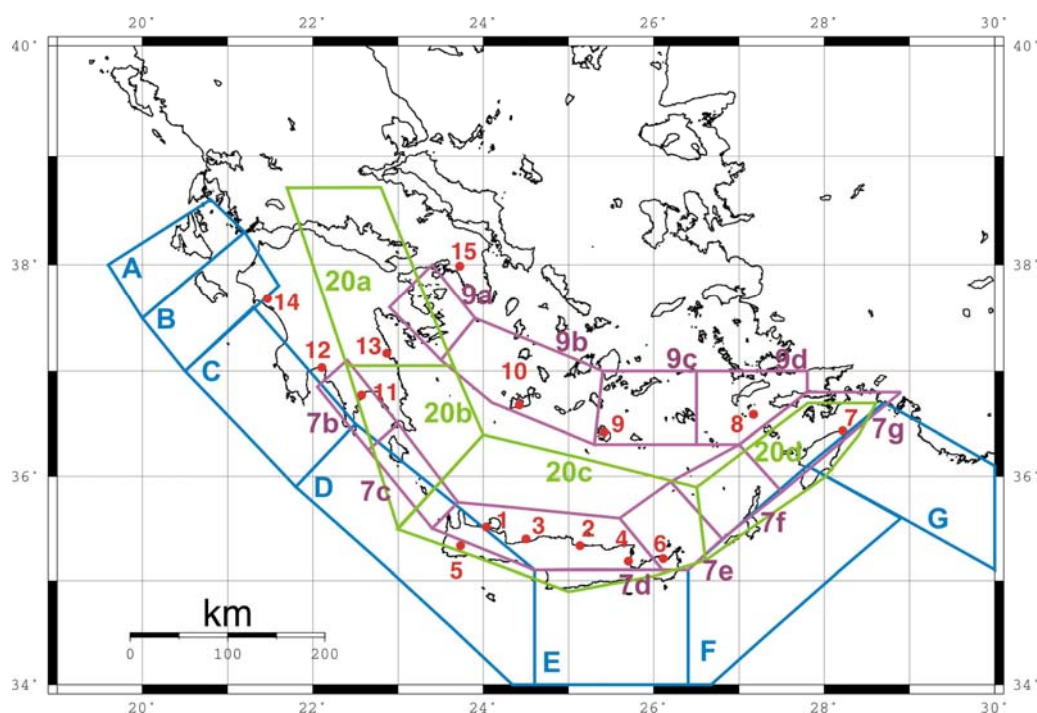
Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει επτά σεισμογόνες πηγές (A, B, C, D, E, F, G) κατά μήκος του κυρτού μέρους του ελληνικού τόξου, στην Ελληνική τάφρο. Οι σεισμοί που εντοπίζονται στις ζώνες αυτές είναι επιφανειακοί με εστιακά βάθη που κατανέμονται από 0 μέχρι 30 km και στην οποία έχουμε τη γένεση σεισμών στα ανάστροφα ρήγματα του Ελληνικού Τόξου. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει δέκα σεισμογόνες

επιφανειακών σεισμών πηγές του νοτίου Αιγαίου (7b,c,d,e,f,g, 9a,b,c,d) με μικρά εστιακά βάθη έως 10 km και οι οποίες χαρακτηρίζονται είτε από κυρίως Β-Ν κανονικά ρήγματα μικρού μήκους (Α-Δ εφελκυσμός, 7b,c,d,e,f,g) ή ρήγματα με γενική διεύθυνση Α-Δ που οφείλονται στο συνήθη Β-Ν εφελκυσμό του Αιγαίου (9a,b,c,d). Τέλος, η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει τέσσερις πηγές ισχυρών σεισμών ενδιάμεσου βάθους του νοτίου Αιγαίου, τα επίκεντρα των οποίων κατανέμονται σε μια ζώνη Benioff που έχει αμφιθεατρικό σχήμα και κλίνει από το κυρτό προς το κοίλο μέρος του Ελληνικού τόξου (Parazachos and Compninkis, 1969, 1971). Από τη ζώνη αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι τέσσερις εξωτερικές σεισμικές πηγές (20a,b,c,d) που περιλαμβάνουν σεισμούς με εστιακά βάθη από 40km που μεγαλώνουν σταδιακά έως τα 100 km προς το κοίλο μέρος του τόξου, ενώ παρουσιάζουν μεγέθη μέχρι 8.2.

**Πίνακας 1:** Παράμετροι σεισμικότητας και μέγιστο εμφανιζόμενο μέγεθος για κάθε μια από τις σεισμικές πηγές των επιφανειακών σεισμών της Ελληνικής τάφρου και του Ν. Αιγαίου και τις πηγές των σεισμών ενδιάμεσου βάθους του Ν. Αιγαίου αντίστοιχα, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Στην τελευταία στήλη εμφανίζεται ο λόγος  $a^*/\beta$  (όπου  $a^* = a_{1yr}^{10^4 km^2}$ ) ανηγμένος σε ένα έτος και  $10^4 km^2$  (πιθανότερο ετήσιο μέγιστο μέγεθος ανά  $10^4 km^2$  σε κάθε ζώνη).

<b>ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΤΑΦΡΟΥ</b>					
<b>ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΠΗΓΗ</b>		<b>b</b>	<b>a</b>	<b>Mmax</b>	<b>a*/b</b>
1	A	1,10	5,82	7,5	5,408
2	B	1,10	5,48	7,2	5,014
3	C	1,10	5,51	8,0	4,832
4	D	1,10	5,66	8,3	4,718
5	E	1,10	5,37	7,2	4,537
6	F	1,10	5,49	7,2	4,567
7	G	1,10	5,32	8,0	4,796
<b>ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΝΟΤΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ</b>					
<b>ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΠΗΓΗ</b>		<b>b</b>	<b>a</b>	<b>Mmax</b>	<b>a*/b</b>
1	7b	1,05	4,44	7,2	4,653
2	7c	1,05	4,38	7,2	4,524
3	7d	1,05	4,24	6,0	3,905
4	7e	1,05	4,74	6,5	4,740
5	7f	1,05	4,43	6,5	4,493
6	7g	1,05	4,81	6,8	4,151
7	9a	1,00	4,00	6,5	4,156
8	9b	1,00	3,97	6,4	3,909
9	9c	1,00	4,52	7,5	4,458
10	9d	1,00	4,54	7,0	4,690
<b>ΠΗΓΕΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΒΑΘΟΥΣ Ν. ΑΙΓΑΙΟΥ</b>					
<b>ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΠΗΓΗ</b>		<b>b</b>	<b>a</b>	<b>Mmax</b>	<b>a*/b</b>
1	20a	0,62	2,57	7,5	3,691
2	20b	0,62	2,25	7,5	3,376
3	20c	0,62	2,75	8,2	3,589
4	20d	0,62	2,71	8,0	4,153

Για τον ακριβέστερο προσδιορισμό της θέσης των επικέντρων στην καταδυόμενη ζώνη Benioff χρησιμοποιήθηκαν επίκεντρα και εστιακά βάρη ισχυρών σεισμών του νοτίου Αιγαίου χώρου (Parazachos et. al., 2000). Η ζώνη αυτή προσομοιάστηκε με μία κεκλιμένη επιφάνεια, χρησιμοποιώντας μία κατάλληλη παραβολική εξίσωση. Τέλος, για τη δημιουργία των συνθετικών καταλόγων, θεωρήθηκε πως το πάχος της ζώνης Benioff είναι περίπου 20km, μέσα στα οποία κατανέμονται οι εστίες σε κάθε περίπτωση. Με τον τρόπο αυτό υλοποιήθηκε η δημιουργία των συνθετικών καταλόγων που βασίζονται αποκλειστικά στις σεισμικές παραμέτρους (a, b και Mmax) κάθε σεισμικής πηγής που είναι ικανή να επηρεάσει περιοχές ενδιαφέροντος στο νότιο Αιγαίο, διασφαλίζοντας παράλληλα μια ρεαλιστική εικόνα ως προς το εστιακό βάθος των σεισμών ανά περιοχή.



**Σχήμα 1.** Χάρτης με τις 21 επιλεγμένες σεισμικές πηγές που επηρεάζουν τον ευρύτερο χώρο του νοτίου Αιγαίου και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Με μπλε χρώμα εμφανίζονται οι 7 ζώνες επιφανειακών σεισμών της Ελληνικής τάφρου, με μωβ χρώμα οι 10 ζώνες των επιφανειακών σεισμών του νοτίου Αιγαίου, ενώ με πράσινο χρώμα οι 4 ζώνες των σεισμών ενδιάμεσου βάθους. Στο ίδιο σχήμα διακρίνονται και 15 επιλεγμένες θέσεις ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για τις οποίες ενδεικτικά υπολογίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων σεισμικότητας.

## ΧΡΟΝΙΚΑ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΝΟΤΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ

Οι συνθετικοί κατάλογοι που παράγονται χρησιμοποιούνται από αλγόριθμο που δημιουργήθηκε ώστε να υπολογίζει σε επιλεγμένες θέσεις του χώρου του νοτίου Αιγαίου την τιμή της μακροσεισμική έντασης, ή τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, ταχύτητα και μετάθεση ( $I_{MM}$ , PGA, PGV και PGD αντίστοιχα),

Γενικά, η πιθανότητα υπέρβασης μίας ορισμένης τιμής της εδαφικής κίνησης για ένα συγκεκριμένο σεισμικό συμβάν υπολογίζεται από το θεώρημα της ολικής πιθανότητας:

$$P(Y > y) = \int P(Y > y | x) f(x) dx \quad (4)$$

όπου  $P$  είναι η πιθανότητα,  $Y$  η ένταση της εδαφικής κίνησης,  $y$  το επίπεδο έντασης της εδαφικής κίνησης για το οποίο εκτιμάται η πιθανότητα υπέρβασης,  $X$  είναι το άνωμα των τυχαίων μεταβλητών που επηρεάζουν τις τιμές του  $Y$  και η ολοκλήρωση γίνεται για όλα τα δυνατά αποτελέσματα της  $X$ . Για τον προσδιορισμό της πιθανότητας υπέρβασης της συγκεκριμένης εδαφικής κίνησης κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος, η παραπάνω πιθανότητα προσδιορίζεται με το μοντέλο εμφάνισης των σεισμικών συμβάντων στο χρόνο. Η πλέον κοινή επιλογή των μεταβλητών  $X$  είναι το μέγεθος του σεισμού,  $M$  και η απόσταση από την εστία  $R$ . Με αυτή την υπόθεση η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$P(Y > y) = \int_R \int_M P(Y > y | m, r) f(R) f(M) dm dr \quad (5)$$

η οποία αποτελεί έκφραση του θεωρήματος της ολικής πιθανότητας και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας σε μία θέση. Συγκεκριμένα, η σχέση (5) δίνει την πιθανότητα  $P(Y > y)$ , ώστε η τιμή της παραμέτρου της ισχυρής σεισμικής κίνησης να ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή  $y$ . Η ποσότητα  $P(Y > y | m, r)$  υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση (σχέση απόσβεσης), ενώ οι ποσότητες  $f(R)$  και  $f(M)$  αποτελούν τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας της απόστασης και του μεγέθους αντίστοιχα. Με βάση τη σχέση αυτή, η πιθανότητα εμφάνισης ενός σεισμού υπολογίζεται ως προς δύο συνεχείς ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές, το μέγεθος του σεισμού και την απόσταση της θέσης μελέτης από το επίκεντρο. Για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας με βάση τις μέγιστες τιμές της οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές σχέσεις απόσβεσης για κάθε κατηγορία σεισμικών πηγών. Για τις 7 επιφανειακές ζώνες της ελληνικής τάφρου και τις 10 επιφανειακές ζώνες του Ν. Αιγαίου χρησιμοποιήθηκε η σχέση (6) των Skarlatoudis et, al (2003) ενώ για τις 4 ζώνες ενδιάμεσου βάθους η σχέση (7) (Παπαζάχος, 1995)

$$\log a_{ga} = 1.07 + 0.45M - 1.35 \log(R + 6) + 0.09F + 0.06S + 0.286P \quad (6)$$

$$\ln a_{ga} = 0.80 + 1.13M - 0.97 \ln(R + 30) + 0.42S + 0.70P \quad (7)$$

όπου  $a_g$ , η τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης,  $M$ , το μέγεθος του σεισμού,  $R$ , η επικεντρική απόσταση,  $F$ , παράγοντας που σχετίζεται με το είδος των διαρρήξεων ( $F=0$  για κανονικά ρήγματα,  $F=1$  για ανάστροφα και οριζόντιας μετατόπισης),  $S$ , ένας παράγοντας που χαρακτηρίζει τις εδαφικές συνθήκες (0 για αλλουβιακές, 1 για σκληρό πέτρωμα) και  $P$ , μια παράμετρος που συνδέεται με τη χρήση ( $P=1$ ) ή μη ( $P=0$ ) ενός μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Standard Deviation). Οι κατάλογοι αυτοί περιέχουν σεισμούς που καλύπτουν χρονικό διάστημα 1000 ετών, περιέχοντας στην ουσία 100 υποκαταλόγους διάρκειας 10 ετών. Με τον υπολογισμό των νέων παραμέτρων των καμπυλών G-R για κάθε κατάλογο, αλλά και με την τοποθέτηση των επικέντρων των σεισμών στο χάρτη, πραγματοποιήθηκε έλεγχος των καταλόγων που δημιουργούνται ώστε να βεβαιωθεί ότι ικανοποιούν πλήρως τα κριτήρια που τέθηκαν και να διασφαλιστεί η αξιοπιστία τους.

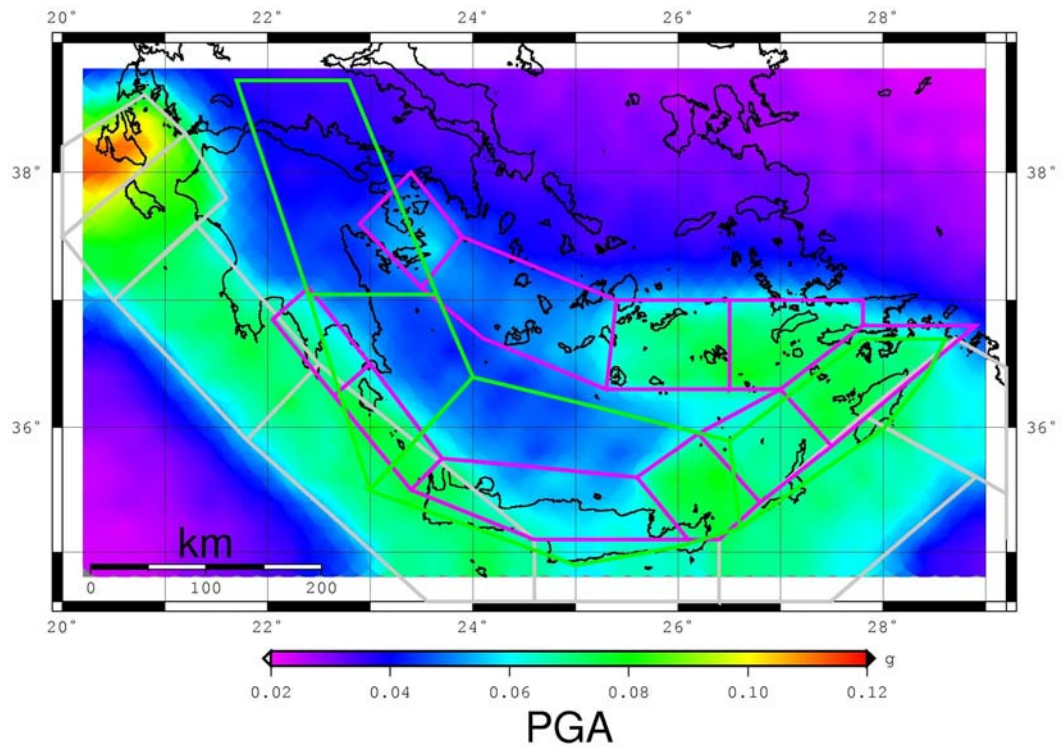
Η λογική με την οποία γίνεται ο υπολογισμός της σεισμικής επικινδυνότητας στον συγκεκριμένο αλγόριθμο διαφέρει από εκείνη που υιοθετείται σε κλασσικούς αλγόριθμους υπολογισμού σεισμικής επικινδυνότητας, όπως για παράδειγμα το EqRISK (McGuire, 1976) και αυτό γιατί πλέον δεν υπάρχει κανένα μοντέλο σεισμικών



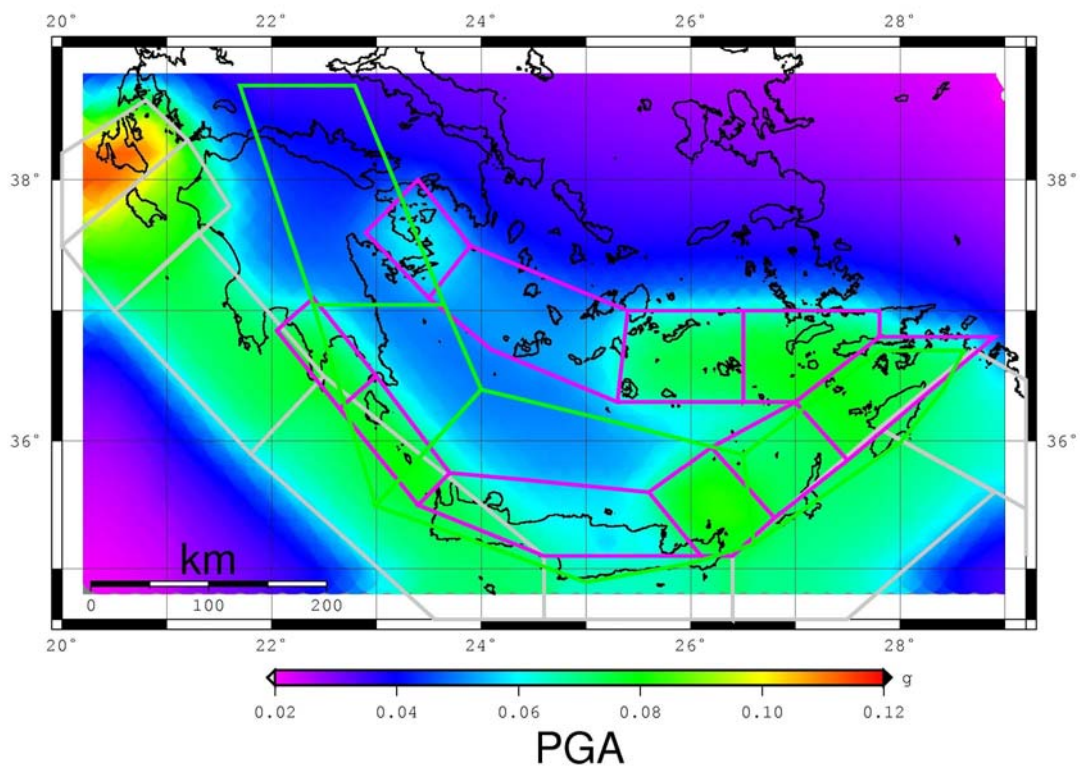
πηγών με την έννοια των ζωνών που περιγράφηκαν από το μοντέλο του Papazachos (1996). Στην περίπτωση μας ωστόσο, η πληροφορία που μεταφέρει το μοντέλο αυτών των σεισμικών ζωνών εμπεριέχεται μέσα στα δεδομένα των συνθετικών καταλόγων που δημιουργήθηκαν για μια χρονική περίοδο, καθώς αυτοί δημιουργήθηκαν με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους για κάθε ζώνη. Τα επίκεντρα των σεισμών των καταλόγων εντοπίζονται αποκλειστικά στις ζώνες αυτές και θεωρούνται ως σημειακές σεισμικές πηγές που σχετίζονται με συγκεκριμένο σεισμικό γεγονός. Για τον καθορισμό της σεισμικής επικινδυνότητας χρησιμοποιούνται όλοι οι σεισμοί των καταλόγων. Η παράμετρος της σεισμικής επικινδυνότητας (στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκε η μέγιστη τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, PGA) υπολογίστηκε για περίοδο επανάληψης 10 ετών. Έτσι, για κάθε σεισμό υπολογίζεται η μέγιστη τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης που μπορεί να επιφέρει στη συγκεκριμένη θέση, με βάση τις σχέσεις (6) ή (7) (ανάλογα με την περίπτωση), το μέγεθος και την απόσταση της θέσης από το επίκεντρο. Ακολούθως, για κάθε κατάλογο υπολογίζονται για περίοδο επανάληψης 10 ετών η μέγιστη, η ελάχιστη, η μέση, αλλά και η κεντρική τιμή του συνόλου των μεγίστων τιμών του PGA. Όπως είναι γνωστό η πιθανότητα να υπερβληθεί ορισμένη τιμή της έντασης,  $Y$ , σε χρονικό διάστημα ίσο με τη μέση περίοδο επανάληψης αυτής της τιμής είναι ίση με 63%, όταν το μοντέλο χρονικής κατανομής είναι τυχαίο (κατανομή Poisson). Κρίθηκε λοιπόν σκόπιμο από τον αλγόριθμο να υπολογιστεί η τιμή του PGA που αντιστοιχεί στο 63% του πληθυσμού της κεντρικής τιμής, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση με κλασσικά προγράμματα υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας.

Οι υπολογισμοί των αναμενόμενων μέσων μεγίστων τιμών της οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) πραγματοποιήθηκαν σε δίκτυο καννάβου που αποτελείται από 880 σημεία που απέχουν μεταξύ τους  $0.2^\circ$  τόσο σε γεωγραφικό πλάτος όσο και σε γεωγραφικό μήκος, καλύπτοντας έτσι ανά τέσσερα μια περιοχή περίπου  $500 \text{ km}^2$ . Για την εφαρμογή του νέου αλγορίθμου δημιουργήθηκαν συνθετικοί κατάλογοι που χρονικά περιέχουν σεισμούς για διάστημα περίπου 1000 ετών (1000-2002) ενώ χωρικά καλύπτουν και τις 21 ζώνες όπως αυτές παρουσιάστηκαν νωρίτερα. Οι κατάλογοι αυτοί χωρίστηκαν σε 200 υποκαταλόγους διάρκειας μιας δεκαετίας, αφού οι εκτιμήσεις έγιναν για περίοδο επανάληψης 10 ετών. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών με την προσθήκη μιας τυπικής απόκλισης στην σχέση απόσβεσης ( $P=1$ ) παρουσιάζονται ως συνάρτηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας (%g) στο χάρτη του σχήματος (2).

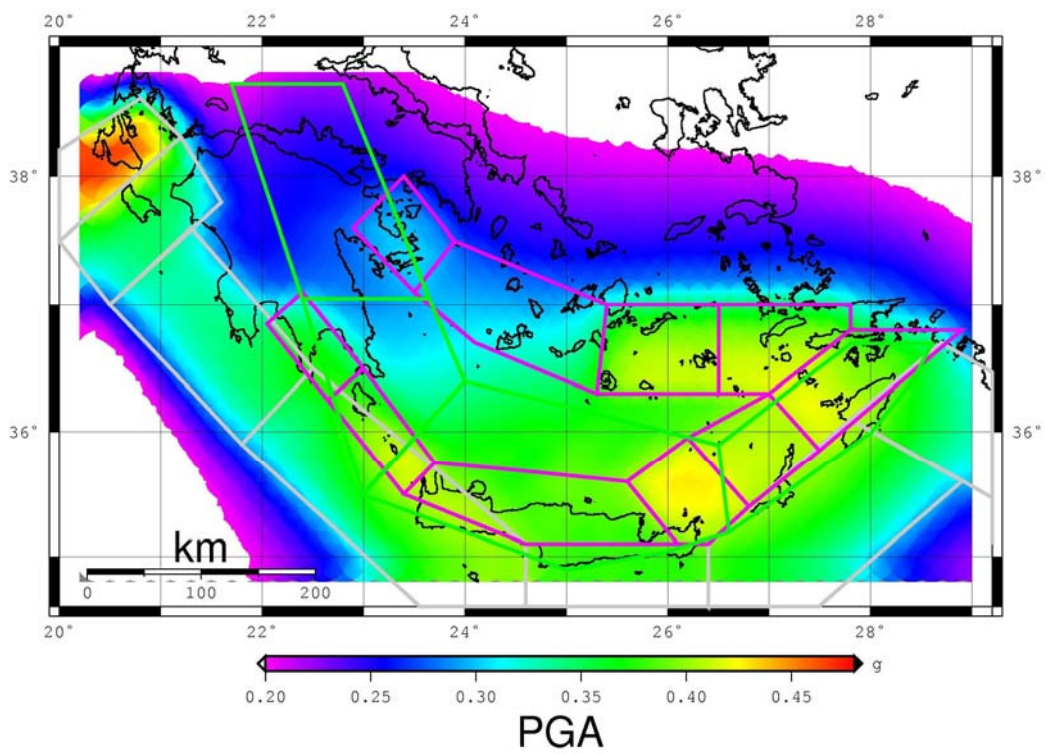
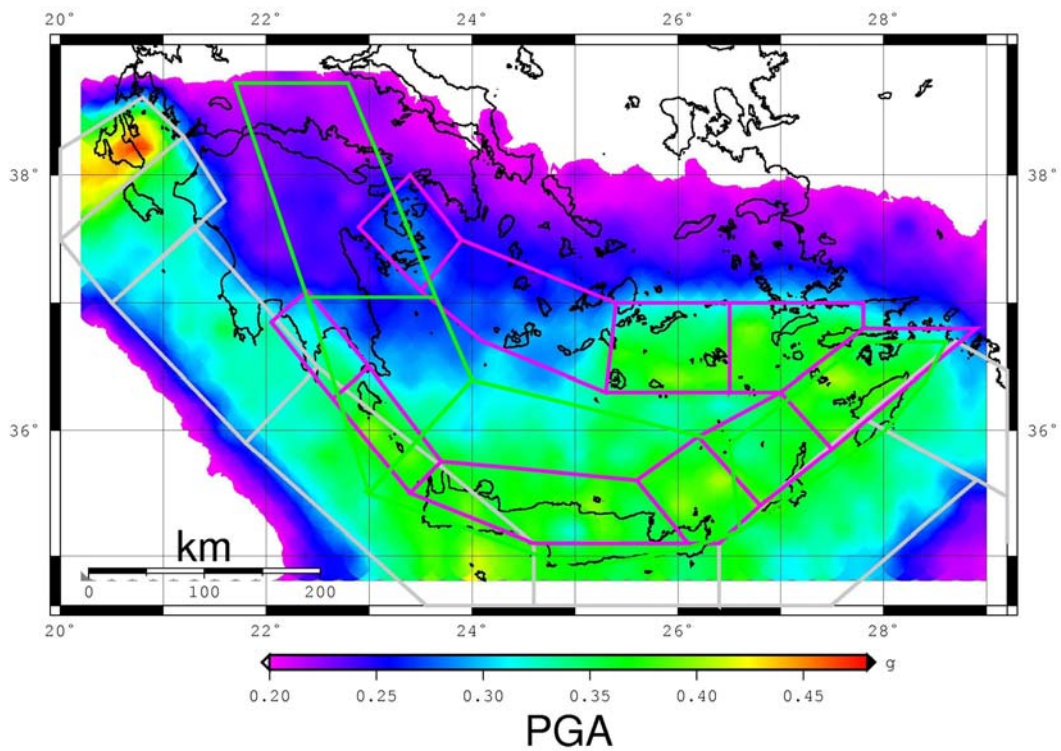
Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων έγινε σύγκριση με εκείνα που προέρχονται από τη χρήση κλασσικών αλγορίθμων υπολογισμού των παραμέτρων της σεισμικής επικινδυνότητας, όπως το EqRISK (McGuire, 1976). Βασισμένος στην ημιαιτιοκρατική μέθοδο του Cornell (1968), ο McGuire ανέπτυξε ένα πρόγραμμα H/Y εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας χρησιμοποιώντας σαν σεισμικές πηγές μόνο επιφάνειες. Η βασική παραδοχή του είναι ότι η σεισμικότητα μέσα σε κάθε σεισμική πηγή είναι ομογενής, δηλαδή ανεξάρτητα από την κατανομή των επικέντρων. Η πιθανότητα να συμβεί ένας σεισμός μέσα σε μία σεισμική πηγή είναι ίδια για όλες τις θέσεις. Βασικός νόμος ο οποίος ισχύει για την κατανομή των μεγεθών σε κάθε σεισμική πηγή είναι ο νόμος των Gutenberg-Richter (σχέση 2), ενώ οι υπολογισμοί γίνονται με βάση το «θεώρημα της ολικής πιθανότητας» (σχέση 4). Για τη μελέτη της σεισμικής επικινδυνότητας στις επιλεγμένες θέσεις του νοτίου ελληνικού χώρου χρησιμοποιήθηκε το ίδιο σεισμοτεκτονικό μοντέλο με τις 21 ζώνες και τις ίδιες σχέσεις απόσβεσης που περιγράφηκαν νωρίτερα για κάθε κατηγορία σεισμικών πηγών.



**Σχήμα 2.** Τιμές της αναμενόμενης μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA - %g) για περίοδο επανάληψης 10 ετών με τη χρήση 200 συνθετικών καταλόγων χρονικά ανεξάρτητης σεισμικότητας.



**Σχήμα 3.** Τιμές της αναμενόμενης μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) για περίοδο επανάληψης 10 ετών με τη χρήση του αλγορίθμου EQRISK και μοντέλου 21 σεισμικών πηγών



**Σχήμα 4.** Τιμές της αναμενόμενης μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) για περίοδο επανάληψης 476 ετών όπως προκύπτουν από τη χρήση του αλγορίθμου EQRISK (κάτω) και των συνθετικών καταλόγων (πάνω) για το μοντέλο των 21 σεισμικών πηγών του σχήματος (1).

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών των μέγιστων τιμών της εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) για τον ίδιο κάρναβο των 880 σημείων παρουσιάζονται στο χάρτη του σχήματος (3). Η εικόνα περιγράφει ξεκάθαρα την ισχυρή επίδραση των ζωνών που περιέχουν τους επιφανειακούς σεισμούς της ελληνικής τάφρου αλλά κι εκείνους του νοτίου Αιγαίου στα αποτελέσματα και ταυτόχρονα τη μικρή συνεισφορά των ζωνών με σεισμούς ενδιάμεσου βάθους. Παράλληλα, αναδεικνύεται το κεντρικό Ιόνιο ως η περιοχή με τις μεγαλύτερες αναμενόμενες τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης, κάτι που έρχεται σε συμφωνία με τις υψηλές τιμές του πιθανότερου ετήσιου μεγίστου μεγέθους ανά 10000 m<sup>2</sup> που εμφανίζει.

Τα αποτελέσματα αυτά αναφέρονται σε χρονικό διάστημα 10 ετών και όχι στο συνηθισμένο διάστημα των 476 ετών. Πρέπει να σημειωθεί, ότι το EqRISK θεωρεί όλες τις σεισμικές ζώνες, συμπεριλαμβανομένου και των ζωνών των σεισμών ενδιάμεσου βάθους, ως οριζόντιες επίπεδες επιφάνειες χωρίς «πάχος», δηλαδή με ομογενή μέσα στη ζώνη κατανομή σεισμών οι οποίοι βρίσκονται σε συγκεκριμένο βάθος. Στον προκειμένη περίπτωση και με βάση την κατανομή της σεισμικότητας οι επιφανειακές ζώνες του νοτίου Αιγαίου τοποθετήθηκαν σε βάθος 10 km, σε αντίθεση με τις επιφανειακές της ελληνικής τάφρου και τις ζώνες ενδιάμεσου βάθους που καθορίστηκαν στα 15 και 80 km, αντίστοιχα.

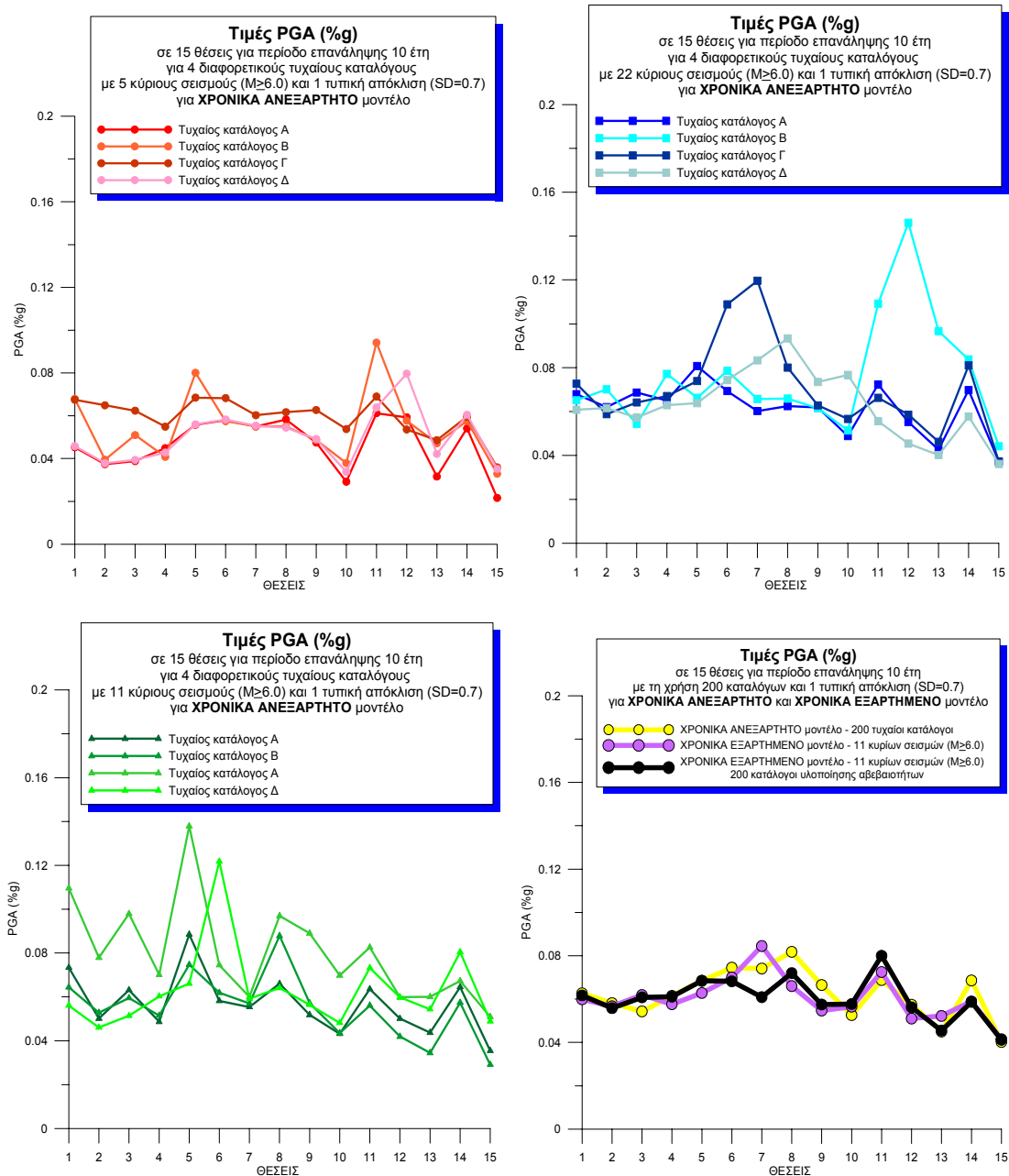
Τα αποτελέσματα για τους υπολογισμούς σε μικρές περιόδους επανάληψης (10 έτη), συγκρίνοντας τα με εκείνα που παρουσιάστηκαν νωρίτερα, παρουσιάζουν σχεδόν μηδενική διαφοροποίηση σε ότι αφορά τις τιμές του PGA, αναδεικνύοντας την ίδια χωρική κατανομή των μέγιστων αλλά και των ελάχιστων τιμών. Παράλληλα, για μεγάλες περιόδους επανάληψης (π.χ. 476 έτη) η σύγκριση των αποτελεσμάτων του EQRISK και της προτεινόμενης προσέγγισης δίνει επίσης συγκρίσιμες τιμές, όπως φαίνεται και από το σχήμα (4), κάτι που ενισχύει την άποψη πως οι δυο μεθοδολογίες εμφανίζουν ανάλογη συμπεριφορά σε όλο το εύρος των τιμών για την περίοδο επανάληψης.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η υπόθεση που υιοθετεί το EQRISK σχετικά με τη γεωμετρία, αλλά κυρίως το βάθος των σεισμικών πηγών είναι πολύ απλοποιητική για την περιοχή του ευρύτερου χώρου του νοτίου Αιγαίου. Αντίθετα, οι συνθετικοί κατάλογοι παρουσιάζουν μια εικόνα που συμβαδίζει περισσότερο με την πραγματικότητα, καθώς τόσο τα μεγέθη, όσο και κυρίως τα εστιακά βάθη, υπολογίζονται με τρόπο που συνεκτιμά τα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής, καθώς λαμβάνει υπόψη της παραμέτρους  $a$  και  $b$  της σχέσης Gutenberg-Richter, αλλά και το αμφιθεατρικό σχήμα της κεκλιμένης ζώνης Benioff. Έτσι λοιπόν επιλέχθηκε η χρήση πολλαπλών συνθετικών καταλόγων για τον υπολογισμό των αναμενόμενων τιμών της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης.

Ένα σημαντικό θέμα το οποίο αφορά τη σύγκριση αποτελεσμάτων χρονικά ανεξάρτητης και εξαρτημένης σεισμικότητας σχετίζεται με τη στατιστική διασπορά των αποτελεσμάτων. Για παράδειγμα, οι τιμές που παρουσιάζονται στα σχήματα (2), (3) και (4) αναφέρονται στο 63% της πιθανότητας, όμως υπάρχουν σενάρια τόσο δυσμενέστερα, όσο και πολύ πιο ευνοϊκά. Οι παράμετροι σεισμικότητας για το σύνολο των 21 σεισμικών πηγών δείχνουν πως ο ετήσιος αριθμός των αναμενόμενων σεισμών με μέγεθος  $M \geq 6.0$  στο χώρο αυτό είναι περίπου 1.06, δηλαδή περίπου 11 κύριοι σεισμοί με  $M \geq 6.0$  ανά δεκαετία. Για την καλύτερη κατανόηση της μεταβλητότητας των



αποτελεσμάτων και με βάση αυτή τη στατιστική εκτίμηση εξετάστηκαν τρία εναλλακτικά σενάρια. Έτσι, εκτός από το μέσο και πιθανότερο στατιστικά σενάριο που προβλέπει 11 (περίπου) σεισμούς με μέγεθος  $M \geq 6.0$  σε μία τυχαία 10ετία, μελετήθηκε η περίπτωση και δυο ακραίων σεναρίων όπου εμφανίζονται περίπου οι μισοί (5) και οι διπλάσιοι (22) τέτοιοι σεισμοί, αντίστοιχα. Για το σκοπό αυτό, από τους συνθετικούς καταλόγους επιλέχθηκαν ορισμένοι οι οποίοι περιέχουν συγκεκριμένο αριθμό σεισμών με μέγεθος  $M \geq 6.0$ .



**Σχήμα 5.** Σύγκριση τιμών του PGA για 4 τυχαίους καταλόγους με 5 (πάνω αριστερά), 22 (πάνω δεξιά) και 11 (κάτω αριστερά) κύριους σεισμούς με μέγεθος  $M \geq 6.0$  για περίοδο 10 ετών. Κάτω δεξιά παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν για ένα σενάριο πρόγνωσης 11 κύριων σεισμών ( $M \geq 6.0$ ) σε επιλεγμένες θέσεις, καθώς και το αποτέλεσμα 200 συνθετικών καταλόγων που προκύπτουν με βάση τις αβεβαιότητες του σεναρίου πρόγνωσης, σε σύγκριση με το αποτέλεσμα της χρονικά ανεξάρτητης επικινδυνότητας.

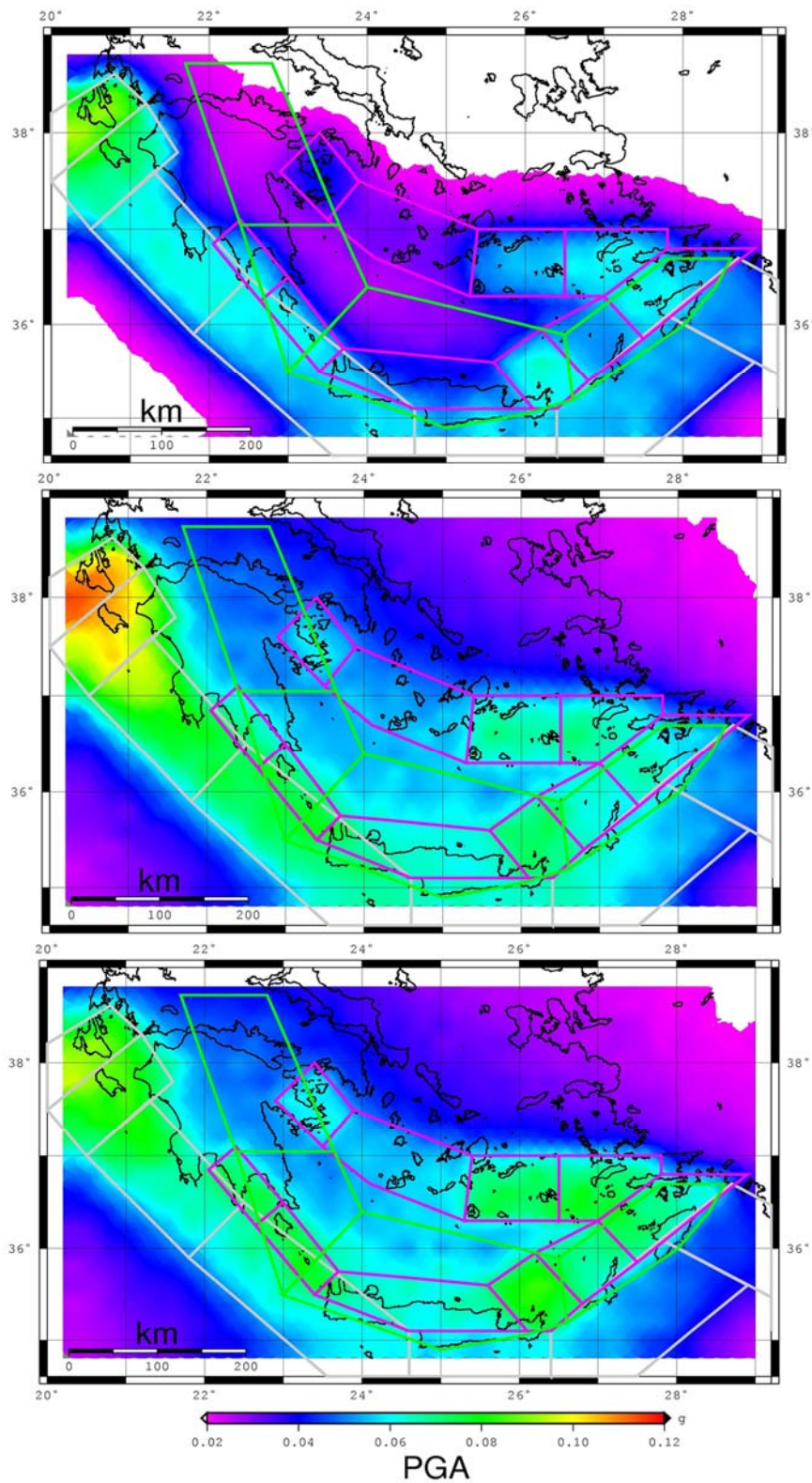
Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται οι τιμές αναμενόμενης μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης σε 15 επιλεγμένες θέσεις ενδιαφέροντος του νότιου ελληνικού χώρου που παρουσιάζονται στο σχήμα 1. Για τις θέσεις αυτές υπολογίστηκαν οι τιμές του PGA (%g) για μικρές περιόδους επανάληψης (10 έτη) και για τις τρεις αυτές εκδοχές (5, 11 και 22 σεισμοί με  $M \geq 6.0$ ) και επιλέχθηκαν για κάθε περίπτωση ενδεικτικά 4 τυχαίοι συνθετικοί κατάλογοι με ελάχιστο μέγεθος  $M_{\min}=3.0$  που περιέχουν όλοι από 5, 11 και 22 σεισμούς μεγέθους  $M \geq 6.0$ . (σχήμα 5, πάνω αριστερά, κάτω αριστερά και πάνω δεξιά, αντίστοιχα). Το μέσο αποτέλεσμα από όλους τους καταλόγους (το οποίο αντιστοιχεί στο σχήμα (2) παρουσιάζεται με την κίτρινη γραμμή στο κάτω δεξιά τμήμα του σχήματος (5)). Τα αποτελέσματα του σχήματος (5) δείχνουν πως σε αρκετές περιπτώσεις υπάρχουν θέσεις με σημαντικές διαφοροποιήσεις των τιμών, ακόμα και για διαφορετικές υλοποιήσεις των ίδιων συνθετικών καταλόγων με τον ίδιο αριθμό κύριων σεισμών (π.χ. θέσεις 1, 2, 3, 5 10 και 11 για το σενάριο των 5 «μεγάλων» σεισμών, θέσεις 6, 7, 11, 12 και 13 για τους 22 σεισμούς και οι θέσεις 1, 2, 3 4, 5, 6 και 9 για το μέσο και «πιθανότερο» ενδεχόμενο των 11 σεισμών με μέγεθος  $M \geq 6.0$ ). Αυτές οι διαφορές στις τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης «εξομαλύνονται» όταν εξεταστεί η κατανομή του τελικού «μέσου» μοντέλου, το οποίο συνεκτιμά το σύνολο 200 καταλόγων για μια 10ετία (κίτρινη γραμμή στο κάτω δεξιά σχήμα 5).

Στο σχήμα (6) παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, όπως προκύπτει από τους συνθετικούς καταλόγους οι οποίοι περιέχουν μόνο 5, 11 και 22 σεισμούς με  $M \geq 6.0$ , αντίστοιχα, με τυχαία χρονική κατανομή. Αν και όλοι οι κατάλογοι προέρχονται από το χρονικά ανεξάρτητο μοντέλο σεισμικότητας, είναι χαρακτηριστική η ομοιότητα του σεναρίου των 11 σεισμών με  $M \geq 6.0$  (μεσαίος χάρτης σχήματος 6) με το τελικό αποτέλεσμα από όλους τους συνθετικούς καταλόγους (σχήμα 2), ειδικά στις περιοχές των επιφανειακών ζωνών της Ελληνικής Τάφρου. Αυτή η ομοιότητα είναι ενδεικτική του ότι ο μέσος αναμενόμενος αριθμός σεισμών στην περιοχή ανά δεκαετία είναι αυτός του συγκεκριμένου σεναρίου με τους 11 ισχυρούς σεισμούς.

## **ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΧΡΟΝΙΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΝΟΤΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ**

Το μοντέλο των 21 σεισμικών πηγών (Parazachos, 1996) το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της χρονικά ανεξάρτητης σεισμικότητας και σεισμικής επικινδυνότητας εκπονήθηκε με βάση τη γνώση μεγάλου όγκου διαθέσιμων ιστορικών και ενόργανων σεισμολογικών δεδομένων και της δομής της περιοχής. Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να εξεταστεί ποσοτικά η επίδραση της περίπτωσης στην οποία θεωρείται ότι οι σεισμοί δε συμβαίνουν χρονικά ανεξάρτητα μεταξύ τους, αλλά ακολουθούν χρονικά εξαρτημένα μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά έχουν περισσότερη φυσική σημασία αφού πληθώρα παρατηρήσεων δείχνουν πως η σεισμικότητα εμφανίζει χρονικές μεταβολές ενώ οι σεισμοί με μεγάλα σχετικά μεγέθη δεν μπορούν να θεωρηθούν γεγονότα που συμβαίνουν τυχαία στο χρόνο, δεν ακολουθούν δηλαδή την κατανομή Poisson. Το μοντέλο Poisson, θα μπορούσε να διατηρηθεί λοιπόν για τους σχετικά μικρούς σεισμούς που δεν μπορούν να «προβλεφθούν» ως προς τη χρονική τους

κατανομή, αλλά να αντικατασταθεί για εκείνους με μεγαλύτερο μέγεθος (πχ  $M \geq 6.0$ ) από ένα άλλο μοντέλο που να προβλέπει μια συγκεκριμένη κατανομή στο χρόνο.



**Σχήμα 6.** Τιμές της αναμενόμενης μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) για περίοδο επανάληψης 10 ετών με τη χρήση συνθετικών καταλόγων και εφαρμογή μοντέλου χρονικά ανεξάρτητης σεισμικότητας χρησιμοποιώντας μόνο τους καταλόγους (σενάρια) που προβλέπουν 5 (επάνω), 11 (μεσαίο) και 22 (κάτω) σεισμούς με μέγεθος  $M \geq 6.0$  αντίστοιχα.

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε η χρήση τυχαίων συνθετικών καταλόγων που να συνδέονται με ένα χρονικά εξαρτημένο μοντέλο σεισμικότητας, να επηρεάζεται δηλαδή η γένεση των κύριων σεισμών από τη σεισμική ιστορία της περιοχής, αλλά και την ενδεχόμενη γένεση άλλων ισχυρών σεισμών κατά την εξεταζόμενη περίοδο. Σαν μία αρχική προσέγγιση στην προσπάθεια να εκτιμηθεί η συνεισφορά των μεγάλων σεισμών στη χρονικά εξαρτημένη σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής μελέτης, έγινε διαχωρισμός των σεισμών στους παραγόμενους συνθετικούς καταλόγους με βάση το μέγεθος τους. Έτσι, επιλέχθηκε οι σεισμοί με μέγεθος μικρότερο του 6.0 να συνεχίσουν να ακολουθούν εκθετική κατανομή (Gutenberg-Richter), κάτι το οποίο όμως δεν υιοθετήθηκε για τους μεγαλύτερους σεισμούς (με  $M \geq 6.0$ ) οι οποίοι θεωρήθηκε ότι είναι δυνατό να προβλεφθούν π.χ. με το μοντέλο επιταχυνόμενης-επιβραδυνόμενης σεισμικής παραμόρφωσης (Parazachos et al., 2006).

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι συνθετικοί κατάλογοι με σεισμούς μεγέθους  $M \leq 6.0$ , αλλά διαφοροποιήθηκε η σύνθεση των καταλόγων σε ότι αφορά τους σεισμούς με μεγέθη  $M \geq 6.0$ . Ακολουθώντας την προηγούμενη προσέγγιση, θεωρήθηκαν αρχικά 3 θεωρητικά σενάρια πρόγνωσης 5, 11 και 22 συγκεκριμένων κύριων σεισμών με μεγέθη ανάλογα με το δυναμικό της ζώνης στην οποία εντοπίζονται. Αυτοί οι σεισμοί θεωρήθηκε πως κατανέμονται σχετικά τυχαία μέσα στην επόμενη 10ετία και πως είναι εκείνοι που έχουν «προβλεφθεί» για τη 10ετία αυτή.

Για την ανάδειξη της επίδρασης του χρονικά εξαρτώμενου μοντέλου σεισμικότητας, τα επίκεντρα των κύριων αυτών σεισμών χωροθετήθηκαν σε ζώνες σχετικά χαμηλής σεισμικότητας δηλαδή σε σεισμικές ζώνες που παρουσιάζουν μικρές τιμές του λόγου της ανηγμένης στο 1 έτος και τα  $10000m^2$  παραμέτρου  $a$ , προς την παράμετρο  $b$ , περιγράφοντας έτσι ένα δυσμενές σενάριο όπου έχουμε μεγάλους σεισμούς σε περιοχές που δεν χαρακτηρίζονται από μεγάλη σεισμικότητα. Έτσι οι σεισμοί αυτοί κατανεμήθηκαν κατά κύριο λόγο στις ζώνες σεισμών ενδιαμέσου βάρους 20b, 20c και 20d (σχήμα 1), στις περισσότερες από τις ζώνες επιφανειακών σεισμών του νοτίου Αιγαίου (7c, 7d, 7f, 7g, 9a και 9b), καθώς και σε λίγες από τις ζώνες επιφανειακών σεισμών της ελληνικής τάφρου (D και F).

Για το σενάριο των 11 σεισμών με μέγεθος  $M \geq 6.0$ , τα αποτελέσματα για τις 15 θέσεις μελέτης παρουσιάζονται με τη μώβ γραμμή στο κάτω δεξιά τμήμα του σχήματος (5). Η επίπτωση του χρονικά εξαρτημένου μοντέλου σεισμικότητας (μοντέλο πρόγνωσης) στη σεισμική επικινδυνότητα σε σχέση με το χρονικά ανεξάρτητο μοντέλο σεισμικότητας (κίτρινη γραμμή στο ίδιο σχήμα) είναι εμφανής: Ορισμένες θέσεις (π.χ. 7-Ρόδος 3-Ρέθυμνο) παρουσιάζουν σημαντική αύξηση της τιμής επικινδυνότητας (περίπου 15%) ενώ άλλες (π.χ. 8-Νίσυρος, 9-Σαντορίνη και 14-Πύργος) σημαντική αντίστοιχη μείωση. Φυσικά οι μεταβολές αυτές αναφέρονται στο συγκεκριμένο σενάριο το οποίο έχει επιλεγεί ως σενάριο πρόβλεψης 11 κύριων ισχυρών ( $M \geq 6.0$ ) σεισμών.

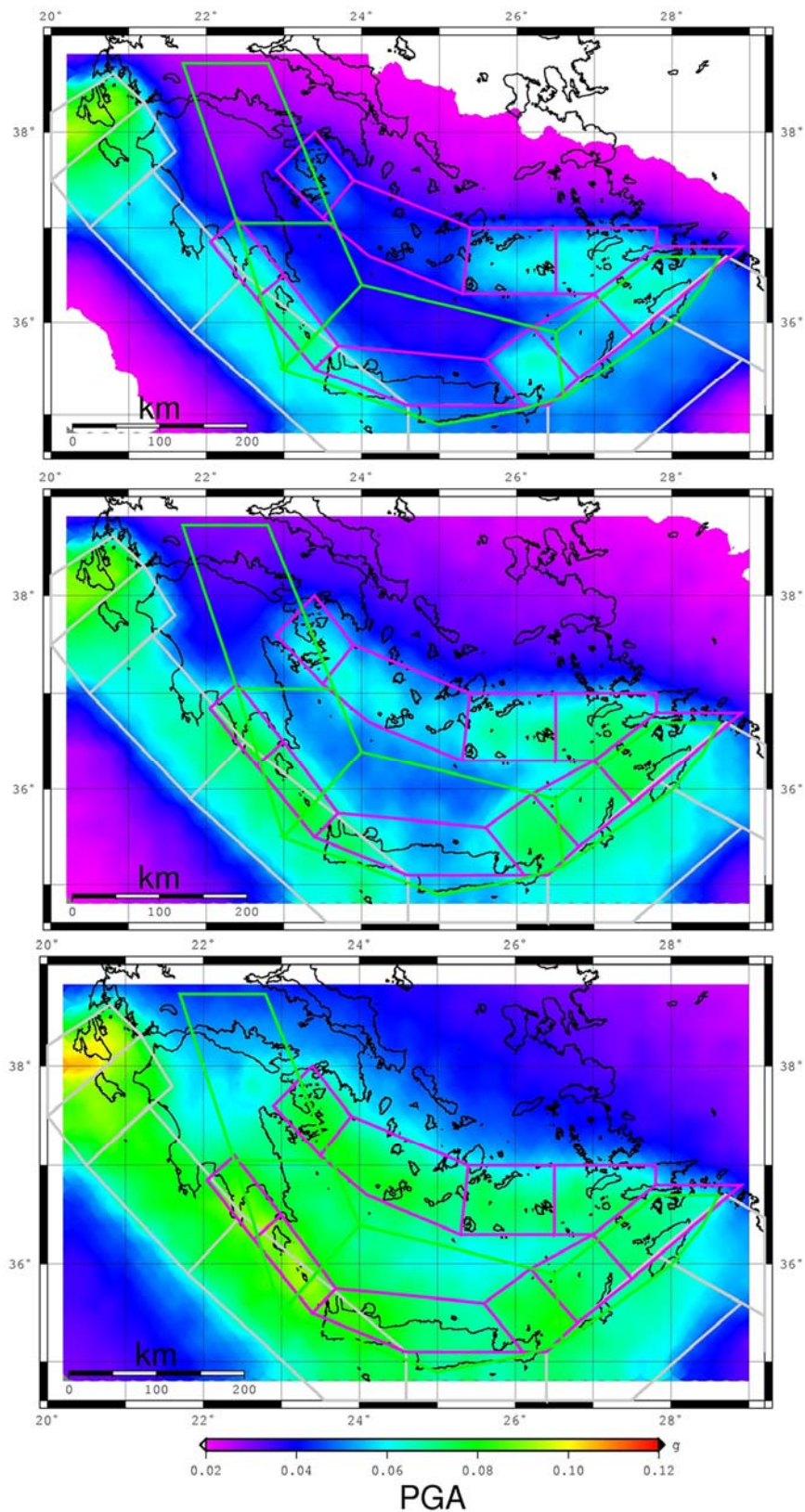
Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν ένα συγκεκριμένο σενάριο το οποίο θεωρείται απόλυτο, δηλαδή οι προβλεπόμενοι σεισμοί δεν έχουν καμία αβεβαιότητα σε σχέση με το μέγεθος, θέση και χρόνο γένεσης. Όμως, όλα τα προγνωστικά μοντέλα έχουν αβεβαιότητες, οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι αβεβαιότητες της πρόγνωσης οι οποίες αναφέρονται στο μοντέλο επιταχυνόμενης-επιβραδυνόμενης σεισμικής



παραμόρφωσης (Parazachos et al., 2006). Έτσι οι «μεγάλοι» σεισμοί αποτέλεσαν τη βάση για τη δημιουργία ισάριθμων καταλόγων κύριων ( $M \geq 6.0$ ) σεισμών, οι οποίοι κατανέμονται χρονικά στην ίδια δεκαετία με τον κάθε σεισμό που έχει «προβλεφθεί», θεωρώντας ένα τυπικό σφάλμα χρονικής κατανομής ίσο με 2,5 έτη. Παράλληλα, τα επίκεντρα τους κατανέμονται σε κάποια απόσταση από το προβλεπόμενο επίκεντρο με σφάλμα 150 km από τον αρχικό σεισμό, δεχόμενοι όμως ότι θα ανήκουν στην ίδια ομάδα σεισμικών ζωνών (Ελληνικού τόξου ή ενδιάμεσου βάθους ή εσωτερικές ζώνες Ν. Αιγαίου) και περιορισμένοι πάντα μέσα στα όρια των πηγών. Τέλος, οι συνθετικοί σεισμοί έχουν τυπικό σφάλμα 0.4 σε σχέση με το προβλεπόμενο μέγεθος, ικανοποιώντας πάντα τα κριτήρια του μέγιστου μεγέθους καθώς και του τυπικού εστιακού βάθους κάθε ζώνης.

Το σύνολο αυτών των 200 ομάδων με «κύριους» σεισμούς ( $M \geq 6.0$ ) υλοποιήθηκε για κάθε σενάριο (5, 11 ή 22 κύριων σεισμών) και συμπληρώνει τους συνθετικούς καταλόγους με τους «μικρότερους» σεισμούς που ακολουθούν κατανομή Poisson για κάθε 10ετία. Έτσι λοιπόν το σύνολο των διευρυμένων καταλόγων, με ελεγχόμενο αριθμό σεισμών με μέγεθος  $M \geq 6.0$  μπορεί να αποτελέσει τη βάση για τον υπολογισμό των τιμών της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA). Για τον ίδιο κάρναβο των 880 σημείων που περιγράφηκε και νωρίτερα, υπολογίστηκαν εκ νέου οι τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA).

Τα αποτελέσματα για τις 15 επιλεγμένες θέσεις για το σενάριο των 11 «κύριων» σεισμών παρουσιάζονται στο κάτω δεξιά τμήμα του σχήματος (5) με μαύρη καμπύλη. Βλέπουμε ότι η εισαγωγή των αβεβαιοτήτων της πρόγνωσης στη δημιουργία των συνθετικών καταλόγων έχει τροποποιήσει αρκετά τα αποτελέσματα, όχι όμως σημαντικά εκτός από ελάχιστες περιπτώσεις (πχ. θέση 7 του σχήματος 1). Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα είναι αρκετά όμοια με το μοναδικό σενάριο πρόγνωσης κύριων σεισμών, χωρίς αβεβαιότητες στις εκτιμήσεις της πρόγνωσης (μωβ καμπύλη στο κάτω δεξιά τμήμα του σχήματος 5) και αισθητά διαφορετικά από το μοντέλο χρονικά ανεξάρτητης σεισμικής επικινδυνότητας σε αρκετές θέσεις.



**Σχήμα 7.** Τιμές της αναμενόμενης μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) για περίοδο επανάληψης 10 ετών με τη χρήση συνθετικών καταλόγων και εφαρμογή μοντέλου χρονικά εξαρτημένης σεισμικότητας για 3 διαφορετικά σενάρια που προβλέπουν 5 (επάνω), 11 (μεσαίο) και 22 (κάτω) σεισμούς με μέγεθος  $M \geq 6.0$  αντίστοιχα (δυσμενή σενάρια με σεισμούς σε ζώνες χαμηλής σεισμικότητας).

Στο σχήμα (7) παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των μεγίστων εδαφικών επιταχύνσεων για τα τρία σενάρια (5, 11 και 22 κύριων σεισμών), χρησιμοποιώντας τις αβεβαιότητες της πρόγνωσης και με την ίδια μορφή με αυτή του σχήματος (6). Σε γενικές γραμμές αναδεικνύεται η σημαντική συνεισφορά στο αποτέλεσμα των επιφανειακών σεισμών, τόσο του νοτίου Αιγαίου, όσο και της Ελληνικής τάφρου, καθώς οι σεισμοί στις ζώνες αυτές αποτελούν σημαντικότερη απειλή στην επιφάνεια απ' ό,τι μπορούν να αποτελέσουν οι σημαντικά βαθύτεροι σεισμοί των ζωνών ενδιάμεσου βάθους. Την ίδια στιγμή, γίνεται αισθητή η συμβολή των μεγάλων σεισμών ( $M \geq 6,0$ ) στον καθορισμό των μέτρων της σεισμικής επικινδυνότητας, κάτι που γίνεται ιδιαίτερα αισθητό με την εφαρμογή του χρονικά εξαρτημένου μοντέλου σεισμικότητας (σχήμα 7).

Αν και η χωρική κατανομή των μεγίστων εδαφικών επιταχύνσεων παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες στα σχήματα (6) και (7), κυρίως ως αποτέλεσμα της ταυτόσημης κατανομής των σεισμών με μεγέθη  $M < 6,0$ , αναδεικνύονται και σημαντικές χωρικές διαφοροποιήσεις για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η αύξηση των τιμών στην περιοχή του κεντρικού και δυτικού τμήματος του ηφαιστειακού τόξου (ζώνη 9a και 9b) που εμφανίζεται σε όλες τις περιπτώσεις, ως αποτέλεσμα της χωροθέτησης «αναμενόμενου» κύριου σεισμού στην περιοχή αυτή, όπως επίσης και σε τμήματα των ζωνών επιφανειακών σεισμών του νοτίου Αιγαίου (πχ, ζώνες 7b,c,e,f και g). Ομοίως, σημαντική αύξηση των τιμών της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης συναντάμε και στην πλειοψηφία των ζωνών με επιφανειακούς σεισμούς της Ελληνικής τάφρου (C, D, E, F και G). Παράλληλα, στις περιοχές των ζωνών ενδιάμεσου βάθους, παρατηρείται ανάλογη αύξηση των τιμών σε κάθε περίπτωση. Αντίθετα, σημαντική μείωση των τιμών της σεισμικής επικινδυνότητας, ιδιαίτερα στο σενάριο των 11 σεισμών με  $M \geq 6,0$ , εμφανίζεται κατά μήκος της δυτικής Ελληνικής τάφρου (ζώνες A και B)

## **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας με μια νέα μεθοδολογία που βασίζεται σε συνθετικούς καταλόγους σεισμών με βάση τα χαρακτηριστικά κάθε σεισμικής πηγής. Η μεθοδολογία αυτή διαφοροποιείται από τους κλασσικούς αλγορίθμους υπολογισμού των μέτρων σεισμικής επικινδυνότητας (πχ EqRISK), καθώς δε λαμβάνει υπόψη μόνο τα χαρακτηριστικά μιας ζώνης, αλλά παράλληλα διακρίνει και ειδικές περιπτώσεις σχετικά με τη θέση και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σεισμικών πηγών. Επιπλέον, η χρήση συνθετικών καταλόγων επιτρέπει την παραμετρική διερεύνηση του συνόλου των λύσεων σεισμικής επικινδυνότητας (ακραία σενάρια, πιθανότερα σενάρια, κλπ.), κάτι που δεν είναι εύκολα εφικτό με τη χρήση απλών αλγορίθμων υπολογισμού σεισμικής επικινδυνότητας.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθοδολογίας με τη βοήθεια συνθετικών καταλόγων και τη χρήση τόσο χρονικά ανεξάρτητου, όσο και χρονικά εξαρτημένου μοντέλου σεισμικότητας έδειξαν πως υπάρχουν μικρές αλλά αξιοσημείωτες διαφοροποιήσεις και αποκλίσεις ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο μοντέλο. Εφαρμόζοντας το χρονικά εξαρτημένο μοντέλο διαπιστώνεται μια έντονη μεταβολή στα

αποτελέσματα η οποία οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ιδιαιτερότητα (χωρική κατανομή, μέγεθος, κλπ.) των σεισμικών γεγονότων που περιλαμβάνονται σε κάθε σενάριο πρόγνωσης. Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν συνθετικοί κατάλογοι με ισχυρούς σεισμούς ( $M \geq 6.0$ ) που εντοπίζονται σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από μέτρια προς χαμηλή σχετικά σεισμικότητα, δημιουργώντας διαφοροποίηση στη σεισμική δραστηριότητα από εκείνη που θα ήταν στατιστικά αναμενόμενη σε επίπεδο 10ετίας.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας δείχνουν ότι η χρήση ανάλογων μοντέλων χρονικά εξαρτημένης σεισμικότητας μπορεί να είναι πρακτικά αξιοποιήσιμη και να οδηγήσει σε αποτελέσματα που μπορεί να είναι σημαντικά διαφοροποιημένα από εκείνα που βασίζονται σε χρονικά ανεξάρτητα μοντέλα για μια συγκεκριμένη 10ετία. Αυτά τα διαφοροποιημένα μέτρα σεισμικής επικινδυνότητας τα οποία λαμβάνουν υπ' όψη τις αβεβαιότητες της πρόγνωσης μπορούν να αξιοποιηθούν αναλόγως στην προσπάθεια για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των μέτρων ετοιμότητας μιας περιοχής, αφού υπάρχει σημαντική πιθανότητα να υπάρχουν σημαντικά διαφοροποιημένες εκτιμήσεις επικινδυνότητας, τουλάχιστον για μικρά χρονικά διαστήματα περιόδων επανάληψης.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα εργασία χρηματοδοτήθηκε μερικώς από τα ερευνητικά προγράμματα «Ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης & διαχείρισης σεισμικού κινδύνου στο μέτωπο του Ελληνικού τόξου. Εφαρμογή στις πόλεις Χανίων & Ηρακλείου, που χρηματοδοτείται από το ΠΕΠ Κρήτης και «Εξέλιξη του πεδίου των τάσεων και της παραμόρφωσης στον ευρύτερο ελληνικό χώρο και γένεση ισχυρών σεισμών: Συμβολή στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας» ΠΕΝΕΔ 2003, Μέτρο 8,3, Δράση 8,3,1 κωδ. 03ΕΔ815 που χρηματοδοτείται από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας και την Ευρωπαϊκή Ένωση

## **ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

- Bufe, C.D., Nishenko, S.P., and Varnes, D.J. (1994). Seismicity trends and potential for large earthquakes in Alaska-Aleutian region, *Pure app. Geophys.*, 142, 83-99.
- Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc Am.* 58, 1503-1606.
- Evison, F.F. (2001). Long-range synoptic earthquake forecasting: an aim for the millennium, *Tectonophysics*, 333, 207-215.
- Fedotov, S.A. (1965). Regularities of the distribution of strong earthquakes in Kamchatka, the Kurile Islands and northeastern Japan. *Tr. Inst. Fiz. Zemli, Akad. Nauk SSSR* 36, 66±93 (in Russian).
- Gutenberg, B. and Richter, C.F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 34, 185-188.
- Jaumé, S.C. (1992). Moment release rate variations during the seismic cycle in the Alaska-Aleutians subduction zone, *Proceed. at Wadati Conference on Great Subduction Earthquakes*, University of Alaska, 123-128.
- Jaumé, S.C., and L.R. Sykes (1999). Evolving towards a critical point: a review of accelerating seismic moment/energy release rate prior to large and great earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, 155, 279-306.

- Knopoff, L., T. Levshina, V.J. Keilis-Borok, and C., Mattoni (1996). Increase long-range intermediate-magnitude earthquake activity prior to strong earthquakes in California, *J. Geophys. Res.*, 101, 5779-5796.
- McGuire, R. K. (1976). FORTRAN computer program for seismic risk analysis, U.S. Geol. Surv. Open-File Rep., 77, 90 pp.
- Mogi, K. (1969). Some features of the recent seismic activity in and near Japan II. Activity before and after great earthquakes, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, 47, 395-417.
- Mogi, K. (1985). *Earthquake prediction*. Academic Press Japan, INC.
- Papadopoulos, G.A. (1988). Long-term accelerating foreshock activity may indicate the occurrence time of a strong shock in the Western Hellenic Arc. *Tectonophysics*, 152, 179-192,
- Papazachos, B. C. and Comninakis, P. E. (1969/70). Geophysical features of the Greek island arc and Eastern Mediterranean ridge. Seance de la Conference reunia a Madrid, 1-12 September 1969, *Comptes Rendus*, 16, 74-75.
- Papazachos, B. C. and Comninakis, P.E. (1971). Geophysical and Tectonic Features of the Aegean Arc. *J. Geophys. Res.*, 76, 8517-8533.
- Papazachos, B.C. (1989): A time predictable model for earthquake generation in Greece. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 79, 77-84
- Papazachos, B. C. Large seismic faults in the Hellenic arc. *Annali di Geofisica*, 39, 891-903, 1996.
- Papazachos, B. C. and Papazachos, C. B. (2000). Accelerated preshock deformation of broad regions in the Aegean area, *Pure Appl. Geophys.*, 157, 1663-1681.
- Papazachos, B. C., Karakostas, V. G., Papazachos, C. B. and Scordilis, E. M. The geometry of the Wadati-Benioff zone and lithospheric kinematics in the Hellenic arc, *Tectonophysics*, 319, 275-300, 2000.
- Papazachos, C.B. (2003). Minimum preshock magnitude in critical regions of accelerating seismic crustal deformation, *Boll. Geophys. Teor. Appl.*, 44, 103-113.
- Papazachos, C. B. and Papazachos, B. C. (2001). Precursory seismic deformation in the Aegean area, *Annali di Geofisica*, 44, 461-474.
- Papazachos, C.B., Karakaisis, G.F. and Scordilis, E.M. (2002). Results of a Retrospective Prediction of Past Strong mainshocks in the Broader Aegean Area by Application of the Accelerating Seismic Deformation Method, *Proc.XXVIII ESC General Assembly, Genoa*, 1-6 September, 14pp.,
- Papazachos, C. B., Karakaisis, G. F., Savvaidis, A. S. and Papazachos, B. C. (2002). Accelerating Seismic Crustal Deformation in Southern Aegean Area, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92, 570-580.
- Papazachos, C.B., E.M. Scordilis, G.F. Karakaisis, and B.C. Papazachos (2004), Decelerating preshock seismic deformation in fault regions during critical periods, *Bull. Geol. Soc. Greece* 36, 1-9.
- Papazachos, C.B., G.F. Karakaisis, E.M. Scordilis, and B.C. Papazachos (2005), Global observational properties of the critical earthquake model, *Bull. Seism. Soc. Am.* 95, 1841-1855.
- Papazachos, C.B., G.F. Karakaisis, E.M. Scordilis, and B.C. Papazachos (2006), New observational information on the precursory accelerating and decelerating strain energy release, *Tectonophysics*, 423, 83-96.
- Robinson, R. (2000), A test of the precursory accelerating moment release model on some recent New Zealand earthquakes, *Geophys. J. Int.*, 140, 568-576.

- Rundle, J. B. (1989). Derivation of the complete Gutenberg-Richter magnitude-frequency relation using the principle of scale invariance, *J. Geophys. Res.* 94, 12337-12342.
- Scholz, Ch.H. (1988), Mechanism of seismic quiescences, *Pure Appl. Geophys.* 26, 701-718.
- Shimazaki, K., Nakata, T. (1980). Time predictable recurrence of large earthquakes. *Geophys. Res. Lett.* 7, 279-282.
- Skarlatoudis A.A., C.B. Papazachos, B.N. Margaritis, N. Theodoulidis, C.H. Papaioannou, I. Kalogeras, E.M. Scordilis, V.G. Karakostas, (2003). Empirical peak ground motion predictive relations for shallow earthquakes in Greece, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 2591-2603.
- Sykes, L.R., Quittmeyer, R.C. (1981). Repeat times of great earthquakes along simple plate boundaries. In: Simpson, D.W., Richards, P.G. (Eds.). *Earthquake Prediction, An international review*, Maurice Ewing Series 4. Amer. Geophys. Union, pp. 217-247.
- Sykes, L.R. and S. Jaumé (1990). Seismic activity on neighbouring faults as a long term precursor to large earthquakes in the San Francisco Bay area, *Nature*, 348, 595-599.
- Tocher, D. (1959), Seismic history of the San Francisco bay region, Calif. Div. Mines Spec. Rep., 57, 39-48.
- Turcotte, D.L. (1989). A fractal approach to probabilistic seismic hazard assessment, *Tectonophysics* 167, 171-177.
- Turcotte D. L. (1992). *Fractals and chaos in geology and geophysics*, Cambridge University Press, 35-50.
- Tzani, A., F. Vallianatos, and K. Makropoulos (2000), Seismic and electrical precursors to the 17-1-1983, M=7 Kefallinia earthquake, Greece, signatures of a SOC system, *Phys. Chem. Earth*, (a), 25, 281-287.
- Wessel, P., and W. Smith (1995). New version of the Generic Mapping Tools, *EOS Trans. Amer. Geophys. U.*, 76-329.
- Wyss, M. (1997), Can earthquakes be predicted?, *Science*, 278, 487-488.
- Wyss, M. and R.E. Habermann (1988), Precursory seismic quiescence, *Pure Appl. Geophys.*, 126, 319-332.
- Zöller, G., Hainzl, S., Kurths, J., and Zschau, J. (2002), A systematic test on precursory seismic quiescence in Armenia, *Natural Hazards*, 26, 245-263.
- Παπαζάχος, Β. Κ. (1995) AUTO - SEISMO - GEOTECH: An automated geotechnic project for the prevention - mitigation of seismic risk in the cities of high seismic activity in the framework of detailed microzonation studies, 1995. Εργαστήριο Γεωφυσικής ΑΠΘ,