

Παρουσίαση και Επεξεργασία των Σεισμολογικών Δεδομένων για τη Σύνταξη του Νέου Χάρτη Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας

Introduction on the Seismological Data and Their Elaboration for the Compilation of the new Seismic Hazard Zoning map of Greece.

| | |
|------------------|---|
| ΠΑΠΑΙΩΑΝΝΟΥ, ΧΡ. | Σεισμολόγος, Κύριος Ερευνητής, ΙΤΣΑΚ |
| ΚΑΡΑΚΑΙΣΗΣ, Γ. | Σεισμολόγος, Καθηγητής, Α.Π.Θ. |
| ΛΑΤΟΥΣΣΑΚΗΣ, Ι. | Σεισμολόγος, Διευθυντής Ερευνών, ΓΙ-ΕΑΑ |
| ΜΑΚΡΟΠΟΥΛΟΣ, Κ. | Σεισμολόγος, Καθηγητής, Παν. Αθηνών |
| ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ, Γ. | Σεισμολόγος, Διευθυντής Ερευνών, ΓΙ-ΕΑΑ |
| ΤΣΕΛΕΝΤΗΣ, Γ-Α. | Σεισμολόγος, Καθηγητής, Παν. Πατρών |
| ΓΚΑΖΕΤΑΣ, Γ. | Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Ε.Μ.Π. |
| ΦΑΡΔΗΣ, Μ. | Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Παν. Πατρών |
| ΜΟΥΝΤΡΑΚΗΣ, Δ. | Γεωλόγος, Καθηγητής, Α.Π.Θ. |
| ΚΩΣΤΙΚΑΣ, ΧΡ. | Πολιτικός Μηχανικός |

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα δεδομένα, οι μέθοδοι επεξεργασίας και τα τελικά αποτελέσματα υπό μορφή χαρτών, για τον χάρτη ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας του Ελληνικού χώρου με παράμετρο τη μέγιστη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση. Οι χάρτες δίνουν τη γεωγραφική κατανομή του μέσου όρου και την τυπική απόκλιση των αντιστοιχών τιμών οι οποίες υπολογίστηκαν από τους πέντε σεισμολογικούς φορείς. Οι τιμές της μέγιστης οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης αντιστοιχούν σε πιθανότητα υπέρβασης 10% σε χρονικό διάστημα 50 ετών ή ισοδύναμα για μέση περίοδο επανάληψης 475 ετών.

ABSTRACT: In the present study the data used and methodologies employed for the compilation of the new seismic hazard map of Greece are presented. The maps were compiled using as seismic hazard parameter the peak horizontal acceleration on “rock” sites that is soil category B according to UBC. The maps depict the geographical distribution of the mean values and their standard deviation, as they were computed by the five seismological research institutions and university laboratories of Greece. The calculations were performed for 475 years mean return period, which corresponds to 10% probability of exceedence in 50 years.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο **σεισμική επικινδυνότητα** σε ένα τόπο εννοούμε την αναμενόμενη στον τόπο αυτό τιμή της σεισμικής έντασης, Y_i , (μακροσεισμική ένταση, μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, ταχύτητα, μετάθεση, ή τις φασματικές τους τιμές, διάρκεια της ισχυρής κίνησης) σε καθορισμένο χρονικό διάστημα και με ορισμένη πιθανότητα υπέρβασης της τιμής

αυτής. Θεωρώντας ότι οι σεισμοί ακολουθούν μία κατανομή Poisson, η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος της σεισμικής επικινδυνότητας δίνεται από τη σχέση:

$$Y_i = \frac{\ln N_0 t}{\beta} - \frac{\ln[-\ln(1-P_i)]}{\beta} \quad (1)$$

όπου Y_i είναι η παράμετρος της σεισμικής επικινδυνότητας, η οποία έχει πιθανότητα P_i

να υπερβληθεί σε ορισμένο χρονικό διάστημα t ετών και N_0, β σταθερές οι οποίες υπολογίζονται από σχέσεις κατανομής της σεισμικής έντασης.

Δύο είναι οι βασικές μεθοδολογίες για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας σε μία περιοχή, η αιτιοκρατική και η πιθανολογική. Η αιτιοκρατική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας (ΑΕΣΕ) βασίζεται στη επιλογή ενός ή περισσοτέρων σεισμών από τους οποίους καθορίζεται ο σεισμός "σχεδιασμού" που χρησιμοποιείται στον αντισεισμικό σχεδιασμό. Από την άλλη πλευρά, η πιθανολογική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας (ΠΕΣΕ) καθορίζει τα βασικά ερωτήματα, *πόσο ισχυρά και πόσο συχνά* το έδαφος θα κινηθεί, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους πιθανούς σεισμούς οι οποίοι θα μπορούσαν να επηρεάσουν την εξεταζόμενη θέση. Η ΠΕΣΕ συνδυάζει πληροφορίες οι οποίες σχετίζονται με το μέγεθος των σεισμικών συμβάντων, την εξεταζόμενη θέση και την ετήσια πιθανότητα επανάληψης των σεισμών που απειλούν την θέση. Σε αντίθεση με την τυπική ΑΕΣΕ η οποία υιοθετεί συγκεκριμένους σεισμούς, η ΠΕΣΕ επιτρέπει τη χρησιμοποίηση πολλαπλών σεισμικών συμβάντων διαφόρων σεισμικών μεγεθών περιλαμβάνοντας επίσης και τις αβεβαιότητες των αντίστοιχων υπολογισμών. Στους χάρτες ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας για τους αντισεισμικούς κανονισμούς χρησιμοποιείται η ΠΕΣΕ.

Ο χάρτης ο οποίος παρουσιάζεται στην εργασία αυτή αποτελεί τον τρίτο επίσημο χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας του Ελληνικού Χώρου με εφαρμογή στον ΑΚ.

Ο πρώτος χάρτης με την ονομασία *Τεχνικός Σεισμικός Χάρτης της Ελλάδας* (Τεχνικά Χρονικά, τεύχος 184, 1939) όπως και η δεύτερη έκδοση του (Ρουσόπουλος, 1956) διαιρούσε την Ελλάδα σε ζώνες και σε κάθε ζώνη όριζε τον συντελεστή οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης, ε , εισάγοντας για κάθε ζώνη τέσσερις τιμές σεισμικής επιτάχυνσης αναλόγως του εδάφους και τις τιμές του συντελεστή, ε , να κυμαίνονται μεταξύ 0.01g και 0.16g. Στον Αντισεισμικό Κανονισμό του 1959 (Βασιλικό Διάταγμα 19/26.2.1959, ΦΕΚ 36Α) δίνονταν πίνακας "*Χαρακτηρισμού Σεισμικότητας Οικισμών της Ελλάδας*". Με βάση τον Πίνακα αυτό οι κυριότερες οικιστικές περιοχές της Ελλάδας χωρίστηκαν σε τρεις κατηγορίες με τιμές του συντελεστή σεισμικής επιβάρυνσης, ε , να κυμαίνονται επίσης μεταξύ 0.01g και 0.16g. Το 1986 ο ΟΑΣΠ αποφάσισε να αναθέσει στους σεισμολογικούς φορείς την εκπόνηση νέου

χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας στα πλαίσια εκπόνησης νέου αντισεισμικού κανονισμού. Ο χάρτης αυτός χώριζε την Ελλάδα σε τέσσερις ζώνες με τιμές του σεισμικού συντελεστή 0.12g, 0.16g, 0.24g και 0.36g αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούσαν σε πιθανότητα υπέρβασης 10% για χρονική διάρκεια 50 ετών.

Μετά τους καταστρεπτικούς σεισμούς της δεκαετίας του '90 σε περιοχές χαμηλής σεισμικότητας και τη συλλογή νέων δεδομένων, ο ΟΑΣΠ ανέθεσε τον Οκτώβριο του 2000 πρόγραμμα στους πέντε σεισμολογικούς φορείς της Ελλάδας για την εκπόνηση νέου χάρτη Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας συμβατού με τον ισχύοντα Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό του 1995 και τον Ευρωκώδικα 8. Ταυτόχρονα συστάθηκε επιτροπή παρακολούθησης και συντονισμού του προγράμματος με μέλη τους συγγραφείς. Οι υπολογισμοί έγιναν για εδαφικές συνθήκες "βράχου", ή αντίστοιχα κατηγορίας Β κατά UBC (1997) σε ένα πλέγμα σημείων $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία η οποία συνήθως χρησιμοποιείται για την πιθανολογική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας (ΠΕΣΕ) προτάθηκε αρχικά από τον Cornell (1968). Τα βασικά βήματα μπορούν να συνοψιστούν παρακάτω:

- Καθορισμός των σεισμικών πηγών.
- Καθορισμός μοντέλου σεισμικότητας.
- Καθορισμός εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της ισχυρής σεισμικής κίνησης.
- Καθορισμός πιθανολογικής ανάλυσης της σεισμικής επικινδυνότητας

2.1 Μοντέλα Σεισμικών Πηγών

Ένα μοντέλο σεισμικών πηγών το οποίο χρησιμοποιείται στην ΠΕΣΕ μπορεί να αποτελείται από σημεία, γραμμές ή επιφάνειες. Είναι επίσης δυνατόν να γίνει χρήση υβριδικών μοντέλων με τη χρήση ρηγμάτων για τους ισχυρούς σεισμούς και επιφανειών για τη χωρική κατανομή των μικρότερων σεισμών.

Για την εκπόνηση του χάρτη σεισμικών ζωνών το 1989 προτάθηκε (Parazachos, 1990) ένα μοντέλο 36 σεισμικών πηγών για τους επιφανειακούς σεισμούς και 6 σεισμικών πηγών για τους ενδιάμεσου βάθους σεισμούς. Για κάθε σεισμική πηγή δόθηκαν οι παράμετροι σεισμικότητας. Η σεισμικότητα των

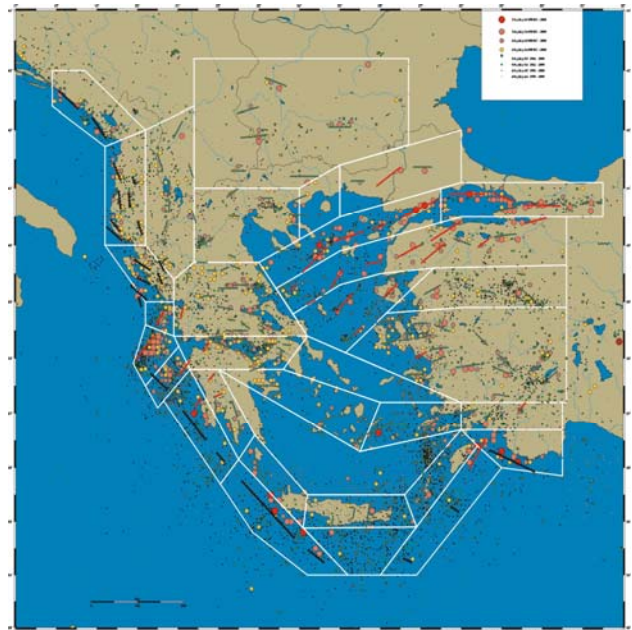
περιοχών οποίες δεν ήταν μέσα σε σεισμικές πηγές θεωρήθηκε ως σεισμικότητα υποβάθρου με μέγιστο μέγεθος $M=6.1$. Το μοντέλο αυτό βασίστηκε σε ενόργανα και ιστορικά δεδομένα και χρησιμοποιήθηκε από το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του ΕΑΑ (ΓΙ-ΕΑΑ) και το Εργαστήριο Σεισμολογίας του Πανεπιστημίου Πάτρας με τροποποιήσεις για τους σεισμούς της Κοζάνης (1995) και της Πάρνηθας (1999).

Οι Papaioannou and Papazachos (2000) πρότειναν για τον Νότιο Βαλκανικό χώρο ένα μοντέλο το οποίο αποτελείται από 67 σεισμικές πηγές επιφανειακών σεισμών και 7 για τους σεισμούς ενδιάμεσου βάθους, για τις οποίες καθόρισαν τις παραμέτρους σεισμικότητας. Το μοντέλο αυτό βασίστηκε σε ιστορικά δεδομένα (Papazachos and Papazachou, 1997) έλαβε υπόψη τους μεταγενέστερους από το μοντέλο του 1990 ισχυρούς σεισμούς (Πύργου 1993, Κοζάνης 1995, Αιγίου 1995, Κόνιτσας 1996, Αθήνας 1999), τον καθορισμό των ζωνών διάρρηξης ισχυρών σεισμών στον Αιγαίο χώρο (Papazachos et al., 1999) και τις νέες απόψεις για την σεισμοτεκτονική του Αιγαίου χώρου (Papazachos et al., 1998; McClusky et al., 2000). Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε σαν βάση για νέο μοντέλο επιφανειακών πηγών από το ΙΤΣΑΚ και τα Εργαστήρια Σεισμολογίας των Πανεπιστημίων Αθήνας (ΕΣ-ΠΑ) και Πάτρας (ΕΣ-ΠΠ).

Στα πλαίσια του προγράμματος ο Παπαζάχος και συν., (2001) καθόρισαν τα κύρια ρήγματα του ελληνικού χώρου και των γύρω περιοχών όπου γεννήθηκαν οι γνωστοί ισχυροί ($M \geq 6.0$) σεισμοί από τον 5^ο π.Χ. αιώνα μέχρι το 2000. Ορίστηκαν 159 ρήγματα, χωρισμένα σε 10 ομάδες ανάλογα με τη θέση τους στο χώρο και με το είδος τους και δόθηκαν οι παράμετροι τους. Με βάση τα ρήγματα αυτά και τον κατάλογο των σεισμών Papazachos et al. (2000), προτάθηκε ένα υβριδικό μοντέλο το οποίο αποτελείται από ρήγματα (για τους ισχυρούς σεισμούς με $M \geq 6.0$) και επιφάνειες σεισμικών ζωνών για τους σεισμούς με μεγέθη $4.5 \leq M \leq 5.9$. Ο χάρτης στο σχήμα 1 δίνει την γεωγραφική κατανομή των ρηγμάτων των ισχυρών επιφανειακών σεισμών και των επιφανειακών σεισμικών ζωνών στον ευρύτερο Αιγαίο χώρο. Ο Papazachos (1996) καθόρισε τέσσερα ρήγμα-τα (γεωμετρικά χαρακτηριστικά και παραμέτρους σεισμικότητας) για τους ισχυρούς σεισμούς ενδιάμεσου βάθους.

Το Εργαστήριο Γεωφυσικής του ΑΠΘ (ΕΓ-ΑΠΘ) χρησιμοποίησε το μοντέλο του σχήματος 1, ανάγοντας τα ρήγματα σε επιφάνειες σεισμικών ζωνών για τις ανάγκες του

προγράμματος EqRISK (McGuire, 1976), ενώ το ΙΤΣΑΚ χρησιμοποίησε το μοντέλο αυτό στην υβριδική του μορφή.



Σχήμα 1. Υβριδικό μοντέλο ρηγμάτων των ισχυρών σεισμών και επιφανειών σεισμικών ζωνών στον ευρύτερο Αιγαίο χώρο (Παπαϊωάννου, 2001).

Figure 1. Hybrid model of fault and area sources in the Aegean and surrounding area (Papaioannou, 2001).

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων σεισμικότητας χρησιμοποιήθηκαν: (α) από το ΓΙ-ΕΑΑ, οι κατάλογοι Papanastasiou et al. (2001) για ελάχιστο μέγεθος σεισμών $M \geq 4.5$ για το διάστημα 1950-2000 και Drakatos and Latoussakis (2001) (β) από το ΕΣ-ΠΑ ο κατάλογος Makropoulos et al. (1989), ο οποίος και συμπληρώθηκε ώστε να καλύπτει τη χρονική περίοδο 1901-2000 με ελάχιστο μέγεθος σεισμών 4.5 (γ) από το ΕΣ-ΠΠ ο κατάλογος του ΓΙ-ΕΑΑ (1964-2000) και ο κατάλογος Makropoulos et al. (1989) για τα προηγούμενα χρόνια και (δ) από το ΕΓ-ΑΠΘ και το ΙΤΣΑΚ ο κατάλογος Papazachos et al. (2000) ο οποίος περιλαμβάνει όλους τους σεισμούς του ευρύτερου Αιγαίου χώρου στα παρακάτω χρονικά διαστήματα με μεγέθη μεγαλύτερα από ορισμένα ελάχιστα μεγέθη: 550 π.Χ.-1910 $M \geq 6.0$, 1911-1949 $M \geq 4.9$, 1950-1999 $M \geq 4.0$.

2.2 Σχέσεις Απόσβεσης

Η γενική μορφή των σχέσεων απόσβεσης της ισχυρής σεισμικής κίνησης είναι:

$$\ln Y = c_1 + c_2 * M + c_3 * \ln(R+R_0) + c_4 S + \sigma_{\ln Y} P \quad (2)$$

όπου Y είναι η εξεταζόμενη παράμετρος της ισχυρής σεισμικής κίνησης $\{I_{MM}, PGA, PGV, PGD\}$, M είναι το μέγεθος του σεισμού, R η απόσταση, S η παράμετρος που χαρακτηρίζει τις εδαφικές συνθήκες, R_0 είναι παράμετρος που σχετίζεται με την απόσβεση της ισχυρής κίνησης στο κοντινό πεδίο και $\sigma_{\ln Y}$ είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των υπολοίπων της εξαρτημένης μεταβλητής $\ln Y$. P είναι 0 για το μέσο όρο των τιμών $\ln Y$ και 1 για το μέσο όρο συν ένα μέσο τετραγωνικό σφάλμα. c_1, \dots, c_4 είναι οι συντελεστές αναγωγής της σχέσης (2).

Οι σχέσεις απόσβεσης των παραμέτρων της ισχυρής σεισμικής κίνησης οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στον χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας του ΕΑΚ του 1995 δεν λάμβαναν υπόψη τις εδαφικές συνθήκες ($c_4=0.0$). Οι σχέσεις αυτές είχαν προταθεί από τους Μακροπούλου (1978) και Θεοδουλίδης (1988).

Στα πλαίσια του προγράμματος το ΓΙ-ΕΑΑ και το ΙΤΣΑΚ με βάση το σύνολο των καταγραφών τους επέλεξαν 744 οριζόντιες συνιστώσες από 142 επιφανειακούς σεισμούς του Ελληνικού χώρου με μεγέθη $4.5 \leq M \leq 7.0$ και επικεντρικές αποστάσεις $1\text{km} \leq R \leq 150\text{km}$ και πρότειναν (Μάργαρη και συν., 2001) τη παρακάτω σχέση απόσβεσης της μέγιστης οριζόντιας συνιστώσας της εδαφικής επιτάχυνσης, a_g , (σε cm/sec^2):

$$\ln a_g = 4.16 + 0.69M - 1.24 \ln(R+6) + 0.12S + 0.70P \quad (3)$$

όπου S η παράμετρος που χαρακτηρίζει τις εδαφικές συνθήκες. Χρησιμοποιήθηκε μία απλή γραμμική αντιστοιχία $B \leftrightarrow S=0$, $C \leftrightarrow S=1$ και $D \leftrightarrow S=2$ για τους τρεις τύπους εδαφικών συνθηκών (κατά UBC 1997) για τους σταθμούς καταγραφής του Ελληνικού χώρου. Η παραπάνω αντιστοιχία είναι αυθαίρετη, αφού δεν είναι αναγκαίο η ποσοτική επίδραση της μετάβασης $B \rightarrow C$ και $C \rightarrow D$ να είναι ίδια.

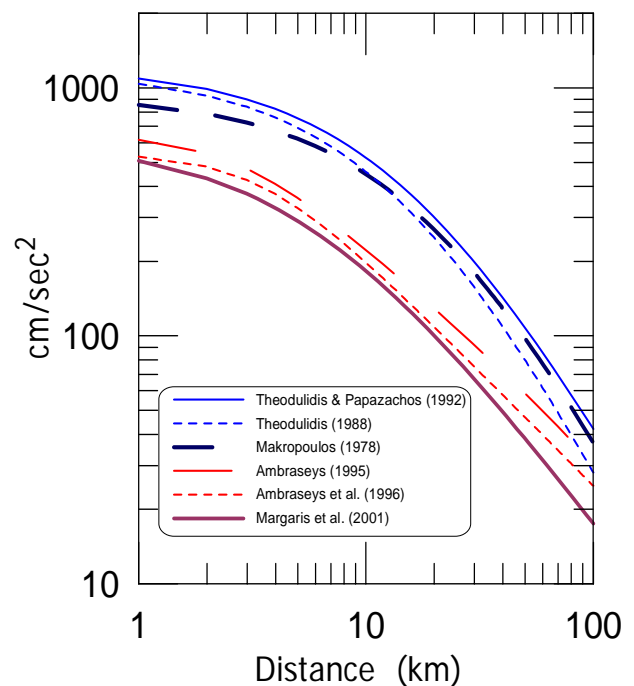
Το ΓΙ-ΕΑΑ χρησιμοποίησε για την απόσβεση των επιφανειακών σεισμών τις σχέσεις Θεοδουλίδης (1988), Theodulidis and Papazachos (1992), Μακροπούλου (1978) και Μάργαρη και συνεργάτες (2001). Το ΕΓ-ΑΠΘ χρησιμοποίησε τις τη σχέση του Μάργαρη και συν. (2001). Οι σχέσεις των Μακροπούλου (1978), Theodulidis and Papazachos (1992), Ambraseys (1995) χρησιμοποιήθηκαν από το ΕΣ-ΠΑ ενώ οι σχέσεις των Theodulidis and Papazachos (1992), Ambraseys et al. (1996)

και Μάργαρη και συν. (2001) χρησιμοποιήθηκαν από το ΕΣ-ΠΠ. Το ΙΤΣΑΚ χρησιμοποίησε τις σχέσεις των Μάργαρη και συν. (2001). Η σχέση απόσβεσης για τους σεισμούς ενδιαμέσου βάθους η οποία χρησιμοποιήθηκε από το ΓΙ-ΕΑΑ, το ΕΓ-ΑΠΘ και το ΙΤΣΑΚ προτάθηκε από τον Θεοδουλίδη (1991) και είναι:

$$\ln a_g = 3.47 + 0.75M - 0.85 \ln R_{\text{CER}} + 0.27S + 0.66P \quad (4)$$

όπου R_{CER} είναι η απόσταση από το κέντρο έκλυσης ενέργειας.

Στη γραφική παράσταση του σχήματος 2 φαίνεται η σύγκριση των μέσων σχέσεων απόσβεσης της μέγιστης οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης επιφανειακών σεισμών οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν από τους φορείς υλοποίησης του προγράμματος για $M=6.5$ και έδαφος κατηγορίας B κατά UBC (1997).



Σχήμα 2. Σύγκριση των διαφόρων σχέσεων απόσβεσης οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την επιτάχυνση για επιφανειακό σεισμό μεγέθους $M=6.5$ και εδαφικές συνθήκες "βράχος".
Figure 2. Comparison of the various empirical predictive relations for the PGA, used in the present study for $M=6.5$ and soil conditions "rock".

Από τη σύγκριση του σχήματος (2) προκύπτει ότι οι σχέσεις των Μακροπούλου (1978), Theodulidis and Papazachos (1992) και Θεοδουλίδης (1988) δίνουν διπλάσιες σχεδόν

τιμές από τις σχέσεις των Ambraseys (1995), Ambraseys et al (1996) και Μάργαρης και συν. (2001) στο κοντινό πεδίο ($R < 30$ km).

2.3 Αλγόριθμοι για την εκτίμηση της Σεισμικής Επικινδυνότητας

Οι αλγόριθμοι οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα περιελάμβαναν αλγορίθμους οι οποίοι βασίζονται στην πιθανολογική μέθοδο των ακραίων τιμών του Gumbell (1958) και στην ημιαυτοκρατική μέθοδο Cornell (1968) και τις τροποποιήσεις της.

Στην πρώτη περίπτωση ανήκει ο αλγόριθμος HAZAN (Makropoulos and Burton, 1986), ο οποίος χρησιμοποιήθηκε από το ΕΣ-ΠΑ. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό χρησιμοποιείται ένας κατάλογος σεισμών και για κάθε θέση του πλέγματος υπολογίζεται η επιτάχυνση με βάση σχέσεις μεγέθους-απόστασης. Σαν σεισμικές πηγές στη περίπτωση αυτή θεωρούνται τα επίκεντρα των σεισμών (σημειακές πηγές). Στη συνέχεια οι τιμές των επιταχύνσεων επεξεργάζονται θεωρώντας ότι οι μέγιστες από τις τιμές ακολουθούν την πρώτη ή την τρίτη ασυμπτωτική κατανομή. Στη μέθοδο αυτή τα αποτελέσματα επηρεάζονται σημαντικά από τη γένεση των πρόσφατων σεισμών και δεν είναι εύκολο να ληφθούν υπόψη ιστορικά δεδομένα. Η δεύτερη περίπτωση, η οποία εφαρμόστηκε από όλους τους φορείς, περιλαμβάνει τα προγράμματα EQRISK (McGuire, 1976), FRISK (McGuire, 1978), SEISRISK III, SEISRISK IIID (Bender and Perkins, 1987) και FRISK88M (1995).

Στα ανωτέρω προγράμματα οι διαφοροποιήσεις τους έγκεινται στο τρόπο θεώρησης των σεισμικών πηγών.

Ο McGuire (1976) ανέπτυξε πρόγραμμα εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας χρησιμοποιώντας σαν σεισμικές πηγές επιφάνειες και αργότερα (McGuire, 1978) μόνο ρήγματα. Στη πρώτη περίπτωση η βασική παραδοχή 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. Η πιθανότητα υπέρβασης μίας ορισμένης τιμής της εδαφικής κίνησης για ένα συγκεκριμένο σεισμικό συμβάν υπολογίζεται από το θεώρημα της ολικής πιθανότητας:

$$P(Y > y) = \int \int_{RM} P(Y > y/m, r) f_M(m) f_R(r) dm dr \quad (5)$$

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, M είναι το μέγεθος του σεισμού, και R η απόσταση από την εστία.

Για να ληφθούν υπόψη νεότερες απόψεις για την κατανομή των ισχυρών σεισμών πάνω σε μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες και ότι στην περίπτωση αυτή η σεισμική ενέργεια εκλύεται από ζώνη διάρρηξης και όχι ένα σημείο, εκπονήθηκαν προγράμματα στα οποία σαν χώρος γένεσης ενός μελλοντικού ισχυρού σεισμού θεωρείται ένα ολόκληρο ρήγμα, ενώ η διάρρηξη σχετίζεται με τμήμα του ρήγματος το οποίο σπάει κατά την διάρκεια γένεσης του σεισμού. Θεωρείται ότι το κάθε ρήγμα αποτελείται από άθροισμα τεμαχίων και ο σεισμός μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε θέση του. Επίσης οι εστίες, τα μεγέθη και οι άλλες παράμετροι των διαδοχικών σεισμών οι οποίοι μπορεί να γίνουν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Οι βασικοί νόμοι οι οποίοι ισχύουν στην περίπτωση αυτή είναι ο νόμος των Gutenberg-Richter και σχέσεις οι οποίες συνδέουν το μέγεθος με το μήκος διάρρηξης.

Οι αλγόριθμοι SeisRisk III και SeisRisk IIID (δέχεται επίπεδα ρήγματος) βασίζονται στην αρχική προσέγγιση του Cornell (1968) με τις ακόλουθες τροποποιήσεις:

(i) Μέσα σε κάθε σεισμική ζώνη τα επίκεντρα των σεισμών ακολουθούν μία κανονική κατανομή και όχι ομοιόμορφη όπως δέχονται οι μέθοδοι McGuire (1976, 1978) και FRISK88M (1995). Αποτέλεσμα της κανονικής κατανομής είναι να εξομαλύνονται οι μεταβολές σεισμικότητας των ζωνών και αντίστοιχα τα επίπεδα των παραμέτρων οι οποίες υπολογίζονται, ώστε να μην παρουσιάζεται το σύννηδες φαινόμενο της μεγάλης διαφοράς των αναμενόμενων επιταχύνσεων ή άλλων παραμέτρων σε αποστάσεις λίγων χιλιομέτρων λόγω του γεγονότος ότι ανήκουν σε διαφορετικές σεισμικές ζώνες.

(ii) Εκτελείται μερική εξομάλυνση μεγεθών θεωρώντας για τις θέσεις, οι οποίες βρίσκονται πλησιέστερα προς ένα ρήγμα, ότι οι διαρρήξεις συμβαίνουν από ένα εύρος μεγεθών. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται εξομάλυνση των τιμών των παραμέτρων οι οποίες υπολογίζονται από τις διαρρήξεις αυτές.

(iii) Δέχεται και ενσωματώνει στους υπολογισμούς για κάθε ζώνη τόσο το σφάλμα στην ακρίβεια υπολογισμού των επικέντρων των

σεισμών, όσο και στη σχέση απόσβεσης των εδαφικών παραμέτρων.

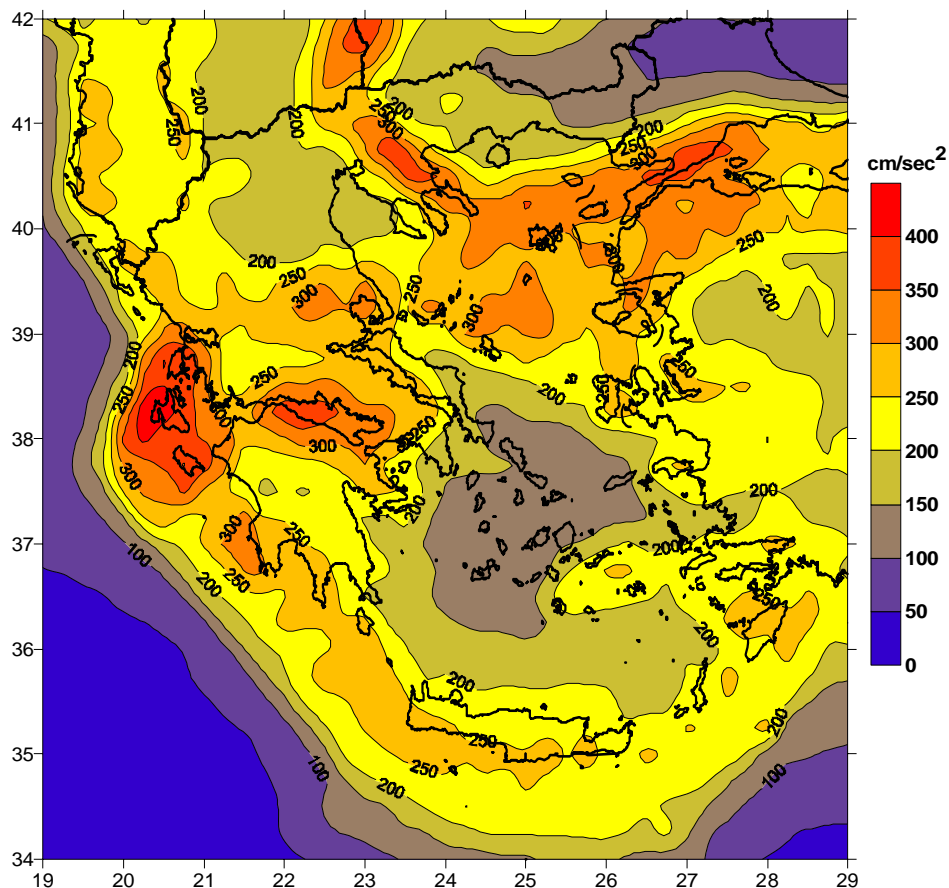
Από τους φορείς οι οποίοι συμμετείχαν στο πρόγραμμα, το ΓΙ-ΕΑΑ χρησιμοποίησε τα προγράμματα EQRISK και FRISK το ΕΓ-ΑΠΘ τα προγράμματα EQRISK (τροποποιημένη έκδοση για να λαμβάνεται υπόψη η ανισότροπη ακτινοβολία της σεισμικής ενέργειας από την εστία του σεισμού σε διαφορετικές διευθύνσεις και η ταυτόχρονη θεώρηση διαφορετικών σχέσεων απόσβεσης) και FRISK88M, το ΕΣ-ΠΙΑ τα προγράμματα HAZAN και SEISRISK III, το ΕΣ-ΠΠ τα προγράμματα SEISRISK III και SEISRISK IIID και το ΙΤΣΑΚ τα προγράμματα EQRISK και FRISK88M (σε τροποποιημένες εκδόσεις για την απόσβεση).

3. ΧΑΡΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Ο χάρτης του σχήματος (3) δίνει την γεωγραφική κατανομή των μέσων όρων των μέγιστων οριζοντίων επιταχύνσεων σε πλέγμα $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Οι επιταχύνσεις οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν αποτελούν τον μέσο όρο

των πέντε φορέων. Αρχικά για κάθε σημείο του κανάβου υπολογίστηκε ο αριθμητικός μέσος όρος και η τυπική απόκλιση. Έγινε έλεγχος των επιμέρους τιμών για κάθε σημείο του κανάβου ώστε καμία τιμή να μην είναι έξω από το διάστημα $M.O. \pm 1\sigma$. Στις περιπτώσεις αυτές έγινε νέος υπολογισμός του μέσου όρου.

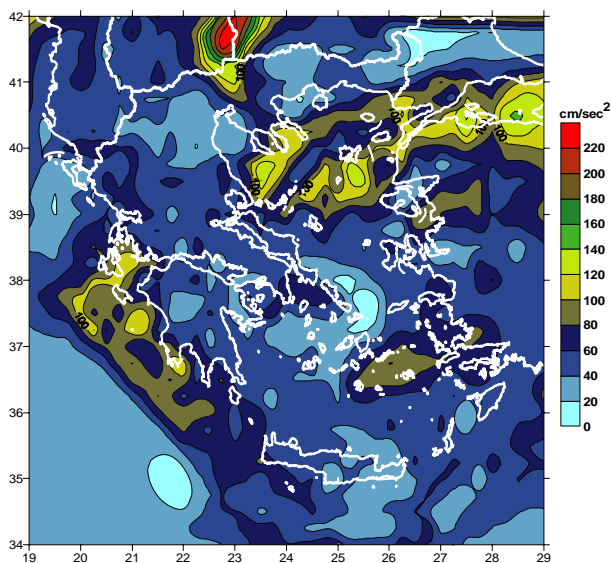
Για την κατασκευή του χάρτη χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SURFER[®] με επιλογή της μεθόδου "Nearest Neighboring", και γύρω από κάθε σημείο επιλέχθηκαν τα γειτονικά του σε απόσταση $0.50^\circ \times 0.50^\circ$. Η μέθοδος αυτή αποτρέπει τη δημιουργία "νησίδων" υψηλών τιμών (bull's eye effect). Για κάθε μία από τις σχέσεις απόσβεσης της επιτάχυνσης βρέθηκε η κατανομή της διαφοράς των θεωρητικών τιμών από τις τιμές οι οποίες είχαν παρατηρηθεί. Από τις κατανομές αυτές φάνηκε ότι η τυπική απόκλιση είναι της τάξης των 50 cm/sec^2 . Για το λόγο αυτό η τιμή των καμπυλών επιλέχθηκε ίση με την τιμή αυτή. Χαμηλότερη ανάλυση του χάρτη θα ήταν μικρότερο του σφάλματος των σχέσεων απόσβεσης.



Σχήμα 3. Γεωγραφική κατανομή του μέσου όρου των μέγιστων οριζοντίων επιταχύνσεων (σε cm/sec^2) στην Ελλάδα και τις γύρω περιοχές.

Figure 3. Geographical distribution of the mean values of the peak ground acceleration (cm/sec^2) in Greece and surrounding area.

Ο χάρτης του σχήματος (4) δίνει τη γεωγραφική κατανομή των τυπικών αποκλίσεων όπως προέκυψαν κατά τον υπολογισμό του μέσου όρου. Από τον χάρτη αυτό προκύπτει ότι η διασπορά των τιμών των επιταχύνσεων είναι μικρότερη του σφάλματος των σχέσεων απόσβεσης για το μεγαλύτερο τμήμα της Ελλάδας. Οι μεγαλύτερες τιμές της διασποράς παρουσιάζονται στην περιοχή της Κρέσνας, ενώ διασπορά τιμών της τάξης των 100-120 cm/sec^2 εμφανίζεται κυρίως σε θαλάσσιο χώρο.



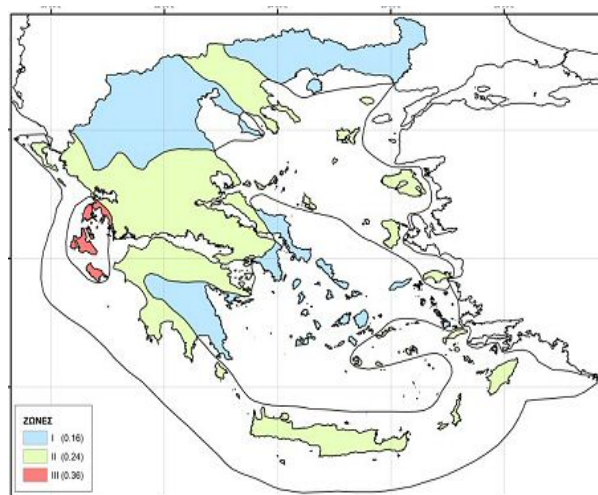
Σχήμα 4. Γεωγραφική κατανομή των τυπικών αποκλίσεων των τιμών των μέγιστων οριζοντίων επιταχύνσεων (σε cm/sec^2) στην Ελλάδα και τις γύρω περιοχές.

Figure 4. Geographical distribution of the standard deviation of the peak ground acceleration values (cm/sec^2) in Greece and surrounding area.

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ambraseys, N.N. (1995), "The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe". *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 24, pp. 467-490.
- Ambraseys, N.N., Simpson, K.A and Bommer, J.J. (1996), "Prediction of horizontal response spectra in Europe". *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 25, pp. 371-400.
- Bender, A. and Perkins, D.M. (1987), "SEISRISK III: a computer program for seismic hazard estimation". *U.S. Geol. Surv. Bull.* 1772.
- Cornell, C. A. (1968), "Engineering seismic risk analysis". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 58, pp.

Με βάση τον χάρτη του σχήματος (3) προτάθηκε ο νέος χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας, ο οποίος ενσωματώθηκε στην τροποποίηση διατάξεων του "Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού ΕΑΚ-2000" λόγω αναθεώρησης του Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας (Φ.Ε.Κ. Β' 1154/12-8-2003, Απόφαση Αριθ. Δ17α/115/9/ΦΝ275). Ο χάρτης αυτός (www.oasp.gr) δίνεται στο σχήμα (5). Όπως φαίνεται από τον χάρτη αυτό ο Ελληνικός χώρος χωρίστηκε σε τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας με τιμές σχεδιασμού 0.16g, 0.24g και 0.36g. Σε σύγκριση με τον προηγούμενο χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας του ΕΑΚ φαίνεται ότι η ζώνες I και II του προηγούμενου χάρτη ενοποιήθηκαν σε μία ζώνη.



Σχήμα 5. Νέος χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας (www.oasp.gr)

Figure 5. New seismic hazard zoning map of Greece (www.oasp.gr)

1503-1606.

- Drakatos, G. and Latoussakis, J. (2001), "A catalog of aftershock sequences in Greece (1971–1997): Their spatial and temporal characteristics". *J. Seismology*, 5, pp. 137-145.

Θεοδοουλίδης, Ν. Π. (1998), "Φάσματα απόκρισης σεισμών του Ελληνικού χώρου". Πρακτ. 1ου Συμπ: *Εξελίξεις στη Σεισμολογία και Γεωφυσική του Ελληνικού χώρου*, Θεσσαλονίκη 1988, σελ. 225-240.

FRisk88M (1995), "User's Manual, ver. 1.70". Risk Engineering Inc., Boulder CO., p. 69.

Gumbell, E.J. (1958), "Extreme value stati-

- stics". Columbia Univ. Press, p. 375.
- McClusky, S.C., Balassanian, S., Barka, A.A., Demir, C., Georgiev, I., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksoz, N., and Veis, G. (2000). "GPS constraints on crustal movements and deformations in the E. Mediterranean (1988-1997): Implications for plate Dynamics". *J. Geophys. Res.*, 105, p. 5695-5719.
- McGuire, R.K. (1976), "EQRISK: FORTRAN computer program for seismic risk analysis". U.S. Geol.Surv., Open file rep. No 76-67, pp. 90.
- McGuire, R.K. (1978), "FRISK: computer program for seismic risk analysis using faults as earthquake sources". U.S. Geol. Surv., Open file rep. No 78-1007, pp. 88.
- Makropoulos, K.C. (1978), "The statistics of large earthquake magnitude and an evaluation of Greek seismicity". Ph.D. thesis, Univ. of Edinburgh, pp. 193.
- Makropoulos K.C. and Burton, P.W. (1986), "HAZAN: A Fortran program to evaluate seismic-hazard parameters using Gumbel's theory of extreme value statistics". *Comp. Geosc.* 12, p. 29-46.
- Makropoulos, K.C., Drakopoulos, J. and Latoussakis, J.B. (1989), "A revised and extended earthquake catalogue in Greece since 1900". *Geophys. J. Int.*, 98, p. 391-394.
- Μάργαρης Β., Παπαζάχος, Β., Παπαϊωάννου, Χρ., Θεοδουλίδης, Ν., Καλογεράς Ι. και Σκαρλατούδης, Α. (2001), "Εμπειρικές σχέσεις απόσβεσης της οριζόντιας ισχυρής κίνησης των επιφανειακών σεισμών του Ελληνικού χώρου". Πρακτ. 2^{ου} Συν. Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, Θεσσαλονίκη, 28-30 Νοεμβρίου 2001, Α, σελ. 27-36.
- Παπαϊωάννου, Χρ. Α. [επιστημονικός υπεύθυνος] (2001), "Τελική έκθεση του προγράμματος: Συλλογή & επεξεργασία σεισμικών δεδομένων και εκπόνηση νέου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας συμβατού με τον ισχύοντα Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό και τον Ευρωκώδικα 8." Ο.Α.Σ.Π – Ι.Τ.Σ.Α.Κ., σελ. 68.
- Papaoiannou, Ch. A. and Papazachos B.C. (2000), "Time-independent and time-dependent seismic hazard in Greece based on seismogenic sources". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, p. 22-33.
- Papanastasiou, D., Latoussakis, J. and Stavrakakis, G. (2001), "A revised catalogue of earthquakes in the broader area of Greece for the period 1950-2000". *Bull. Geol. Soc. Greece*, XXXIV, p. 1563-1566.
- Papazachos, B.C. (1990), "Seismicity of the Aegean and surrounding area". *Tectonophysics*, 178, p. 287-308.
- Papazachos, B.C. (1996), Large seismic faults in the Hellenic Arc. *Analli di Geofisica*, 39, p. 891-903.
- Papazachos, B.C. and Papazachou, C. B. (1997), "The earthquakes of Greece", Ziti Publications Thessaloniki-Greece, pp 304.
- Papazachos, B.C., Papadimitriou, E.E., Kiratzi, A.A., Papazachos C.B. and Louvari, E.K. (1998), "Fault plane solutions in the Aegean Sea and the surrounding area and their tectonic implication". *Boll. Geofis. Teor. Appl.*, 39, p. 199-218.
- Papazachos, B.C., Papaioannou, Ch.A., Papazachos, C.B. and Savvaidis, A.S. (1999), "Rupture zones and seismic faults of shallow earthquakes in Greece". *Tectonophysics*, 308, p. 205-221.
- Papazachos, B.C., Comninakis, P.E., Karakaisis, G.F., Karakostas, B.G., Papaioannou, Ch.A., Papazachos, C.B. and Scordilis, E.M. (2000), "A catalogue of earthquakes in Greece and surrounding area for the period 550BC-1999". *Publ. Geoph. Lab., Univ. of Thessaloniki*.
- Παπαζάχος, Β. Κ., Μουντράκης, Δ.Μ. Παπαζάχος, Κ.Β., Τρανός, Μ.Δ., Καρακαϊσής, Γ.Φ. και Σαββαϊδής, Α.Σ. (2001), "Τα ρήγματα που προκάλεσαν τους γνωστούς ισχυρούς σεισμούς στην Ελλάδα και τη γύρω περιοχή από τον 5^ο αιώνα π.Χ. μέχρι σήμερα". 2^ο Συν. Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, Θεσσαλονίκη, 28-30 Νοεμβρίου 2001, Α, σελ. 17-26.
- Ρουσόπουλος, Α. (1956), "Αντισεισμικά κατάσκευαί", Β. Παπαχρυσάνθεμου, Έκδοσις 2^α, Αθήναι, σελ 431.
- Theodulidis N. and Papazachos, B. (1992), "Dependence of strong ground motion on magnitude-distance, site geology and macroseismic intensity for shallow earthquakes in Greece: I, Peak horizontal acceleration, velocity and displacement". *Soil Dyn. & Earth. Eng.*, 11, p. 387-402.
- UBC (1997), "Uniform Building Code", Vol, II, Intern. Conf. Building Officials, USA, p. 489.