

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ:
ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Μακρόπουλος,Κ.*, Θεοδουλίδης,Ν.**, Μάργαρης,Β.**,
και Βούλγαρης,Ν.*

* Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωφυσικής και Γεωθερμίας, Πανεπιστήμιο Αθηνών, 15784 Αθήνα.

** Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών, Χάφα 1, 54626 Θεσσαλονίκη.

Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η

Είναι γνωστό ότι η Ελλάδα είναι μία από τις πλέον σεισμογενείς περιοχές της Γής και η πλέον σεισμογενής της Ευρώπης. Επομένως, η ρεαλιστική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας παίζει σημαντικό ρόλο στην τεχνική της ανάπτυξης. Στην εργασία αυτή γίνεται σύντομη ανασκόπηση στη διεθνή ερευνητική προσπάθεια για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας και εκτεταμένη παρουσίαση της ερευνητικής δραστηριότητας στον Ελληνικό χώρο. Επιπλέον, συζητούνται ορισμένες ερευνητικές τάσεις στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας και επισημαίνονται υπάρχουσες ανάγκες.

SEISMIC HAZARD ASSESSMENT: STATE OF THE ART IN GREECE

Makropoulos,K., Theodulidis,N., Margaris,V., and Voulgaris,N.

A B S T R A C T

Greece is one of the most seismically active countries in the world and the most active in Europe. Consequently, a realistic seismic hazard assessment plays an important role in the technical development of the country. This paper presents a brief review of the international effort on seismic hazard analysis as well as an extended review for the area of Greece. In addition, current trends and needs in the field of seismic hazard assessment, are discussed.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τα τελευταία 20 περίπου χρόνια έχει παρατηρηθεί απότομη αύξηση στις απαιτήσεις για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών όχι μόνο σε περιοχές υψηλής αλλά ακόμη και σε περιοχές χαμηλής σεισμικότητας. Σε αυτό έχουν συντελέσει πολλοί παράγοντες όπως η κατασκευή τεχνικών έργων μεγάλης σπουδαιότητας κλπ. Για την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου των έργων αυτών, λαμβάνονται υπόψη ισχυρές σεισμικές κινήσεις χαμηλής πιθανότητας υπέρβασης. Ο σεισμικός κίνδυνος που εκφράζει το τελικό αποτέλεσμα της

σεισμικής κίνησης σε μία θέση, εξαρτάται από την τρωτότητα της κατασκευής και από τη σεισμική επικινδυνότητα στη συγκεκριμένη θέση. Η σεισμική επικινδυνότητα εκφράζεται με την αναμενόμενη ένταση της σεισμικής κίνησης στη θέση. Η ένταση αυτή μπορεί να μετρηθεί με τη μακροσεισμική ένταση, ή την εδαφική επιτάχυνση, ταχύτητα, μετάθεση, ή τη φασματική επιτάχυνση ή ακόμη και με τεχνητά επιταχυνσιογράμματα σχεδιασμού.

Για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας έχουν αναπτυχθεί δύο μεθοδολογίες. Η πρώτη είναι η αιτιοκρατική, η οποία απαιτεί πλήρη γνώση όλων εκείνων των παραμέτρων που υπεισέρχονται στο πρόβλημα της σεισμικής επικινδυνότητας όπως η ακριβής γνώση της συμπεριφοράς νεοτεκτονικών ρηγμάτων, της γεωφυσικής δομής, των γεωμορφολογικών στοιχείων, της απόσβεσης των σεισμικών κυμάτων και των εδαφικών δυναμικών χαρακτηριστικών στην εξεταζόμενη θέση. Αυτά όμως απαιτούν λεπτομερείς και μεγάλης έκτασης εργασίες πεδίου οι οποίες είναι πολυδάπανες και χρονοβόρες και υλοποιούνται κυρίως κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών εξαιρετικής σπουδαιότητας.

Η δεύτερη και γενικά σήμερα η πλέον διαδεδομένη είναι η πιθανολογική μεθοδολογία προσέγγισης της σεισμικής επικινδυνότητας. Στη μεθοδολογία αυτή αξιοποιούνται τα περισσότερα από τα δεδομένα της αιτιοκρατικής και υπολογίζεται η πιθανότητα υπέρβασης μιας ορισμένης τιμής της ισχυρής εδαφικής κίνησης σε μία θέση, κατά τη διάρκεια ορισμένου χρονικού διαστήματος. Η διαδικασία για την πιθανολογική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας περιλαμβάνει:

i) Μοντελοποίηση των σεισμικών συμβάντων στο χρόνο και στο χώρο, με περιγραφή της γεωμετρίας των σεισμογόνων πηγών και εκτίμηση του ρυθμού σεισμικότητας αυτών.

ii) Περιγραφή της κατανομής των σεισμικών συμβάντων κατά μέγεθος για διάφορα μεγέθη και προσδιορισμό της πιθανοτικής κατανομής εμφάνισης των σεισμολογικών παραμέτρων όπως το μέγεθος, η σεισμική ροπή, το μήκος ρήγματος κ.λ.π.

iii) Περιγραφή της σχέσης απόσβεσης της ισχυρής κίνησης με την απόσταση από τη σεισμική πηγή, σαν συνάρτηση του μεγέθους και άλλων παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την έκλυση ενέργειας στην πηγή και τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων προς τη θέση.

iv) Εκτίμηση της πιθανότητας υπέρβασης διαφορετικών εντάσεων της ισχυρής εδαφικής κίνησης.

Κάθε ένα από τα παραπάνω βήματα περιέχει αβεβαιότητες οι οποίες μοντελοποιούνται και αναλύονται με τη χρήση πιθανολογικών μεθόδων. Η πιθανότητα υπέρβασης μιας ορισμένης τιμής της εδαφικής κίνησης για ένα συγκεκριμένο σεισμικό συμβάν υπολογίζεται από το θεώρημα της ολικής πιθανότητας,

$$P(Y>y) = \int P(Y>y/x) f_X(x) dx \quad (1)$$

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 άνωσμα των τυχαίων μεταβλητών που επηρεάζουν τις τιμές του Y και η ολοκλήρωση γίνεται για όλα τα δυνατά αποτελέσματα του 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 σχέση (1) γίνεται,

$$P(Y>y) = \int_R \int_M P(Y>y/m, r) f_R(r) f_M(m) dm dr \quad (2)$$

η οποία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας σε μία θέση.

Στην εργασία αυτή γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση της ερευνητικής δραστηριότητας για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας στο διεθνή χώρο και εκτεταμένη ανασκόπηση αυτής για τον Ελληνικό χώρο. Γίνεται συζήτηση για τις πρόσφατες ερευνητικές τάσεις στο πρόβλημα, επισημαίνονται οι μελλοντικές ανάγκες και προτείνονται ορισμένες κατευθύνσεις προς την κατά το δυνατόν ρεαλιστικότερη προσέγγιση εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας στον Ελληνικό χώρο.

ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΣΤΟ ΔΙΕΘΝΗ ΧΩΡΟ

Η βάση για την πιθανολογική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας σε μια θέση καθιερώθηκε από την πρωτοποριακή εργασία του Cornell (1968). Στην ανάλυση της σεισμικής επικινδυνότητας αυτός λαμβάνει υπόψη τόσο γραμμικές όσο και επιφανειακές σειсмоγόνες πηγές και δίνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης στο μοντέλο όλων των ιστορικών και ενόργανων σεισμολογικών καθώς και γεωλογικών δεδομένων. Στις περισσότερες μορφές σχέσεων που χρησιμοποίησε, οι "άνω ουρές" των κατανομών πιθανότητας των παραμέτρων της αναμενόμενης σεισμικής κίνησης βρήκε ότι είναι της μορφής της κατανομής των ακραίων τιμών του τύπου I και II. Ο Esteva (1969) και ο Cornell (1972) εισήγαγαν τη στατιστική Bayes στον πιθανολογικό υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας.

Οι Cornell και Vanmarcke (1969) έδειξαν ότι συστηματικά οι συχνότερα εμφανιζόμενοι αλλά μικρότεροι σεισμοί κοντά στην εξεταζόμενη θέση συνεισφέρουν περισσότερο στη σεισμική επικινδυνότητα από ότι οι μεγαλύτεροι σεισμοί σε μακρινές αποστάσεις. Οι Milne και Davenport (1969) εκτίμησαν τη σεισμική επικινδυνότητα στον Καναδά εφαρμόζοντας τις μεθόδους της "μέσης τιμής" και των "ακραίων τιμών". Οι Mertz και Cornell (1973) για την κατανομή των μεγεθών χρησιμοποίησαν δευτεροβάθμια εξίσωση με σημαντική επίδραση σε μεγάλες περιόδους επανάληψης της ισχυρής εδαφικής κίνησης. Οι Algermissen και Perkins (1976) εκπόνησαν χάρτη μέγιστης αναμενόμενης εδαφικής επιτάχυνσης για τις ΗΠΑ που αποτέλεσε τη βάση για τον αντισεισμικό κανονισμό ATC-03. Οι Der Kiureghian και Ang (1977), Mortgat και Shah (1979) πρότειναν βελτιωμένη μέθοδο εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας. Με βάση τη μέθοδο του Cornell (1968), ο McGuire (1976, 1978) εκπόνησε προγράμματα H/Y για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως μέχρι σήμερα.

Οι Weichert και Milne (1979) για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας στον Καναδά εφάρμοσαν τις μεθόδους της "μέσης τιμής", των "ακραίων τιμών" και του Cornell (1968), καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας πρέπει να βασίζεται σε εκτενείς σεισμογόνες πηγές ώστε αυτή να μην

εστιάζεται στα επίκεντρα παρελθόντων ισχυρών ιστορικών σεισμών. Επίσης, λόγω των αβεβαιοτήτων που εμπεριέχονται στις βασικές σεισμολογικές παραμέτρους εισόδου, στα μοντέλα χωρο-χρονικής συμπεριφοράς των σεισμών που υιοθετούνται καθώς και στις σχέσεις απόσβεσης στο κοντινό πεδίο, οι παραπάνω ερευνητές πρότειναν την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας για περιόδους επανάληψης $T_m > 1000$ έτη με αιτιοκρατικές μεθόδους.

Ο Kaul (1979) ανέπτυξε μεθοδολογία για τη χρήση της μετάθεσης των ρηγμάτων στη σεισμική επικινδυνότητα. Ο Rowshandel και οι συνεργάτες του (1981) πρότειναν ένα νέο μοντέλο γραμμικών ρηγμάτων το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας σε περιοχές με ανάστροφα ρήγματα. Στην ανάλυση που προτάθηκε από τους παραπάνω ερευνητές μπορούν να συμπεριληφθούν οι αβεβαιότητες λόγω της θέσης και του προσανατολισμού των ρηγμάτων. Ο Keilis-Borok και οι συνεργάτες του (1983) εκτίμησαν τη σεισμική επικινδυνότητα στις μεγαλύτερες πόλεις του κόσμου με τη χρήση ενός αλγορίθμου που οι ίδιοι είχαν προτείνει παλαιότερα (Keilis-Borok et al. 1974). Ο Basham και οι συνεργάτες του (1985) εκπόνησαν χάρτες αναμενόμενης εδαφικής επιτάχυνσης και ταχύτητας για τον Καναδά με βάση τη μέθοδο του Cornell (1968). Ο Matuschka και οι συνεργάτες του (1985) πρότειναν χάρτες αναμενόμενης φασματικής επιτάχυνσης για τη Ν.Ζηλανδία που αποτέλεσε τη βάση για τον αντισεισμικό σχεδιασμό αυτής της χώρας.

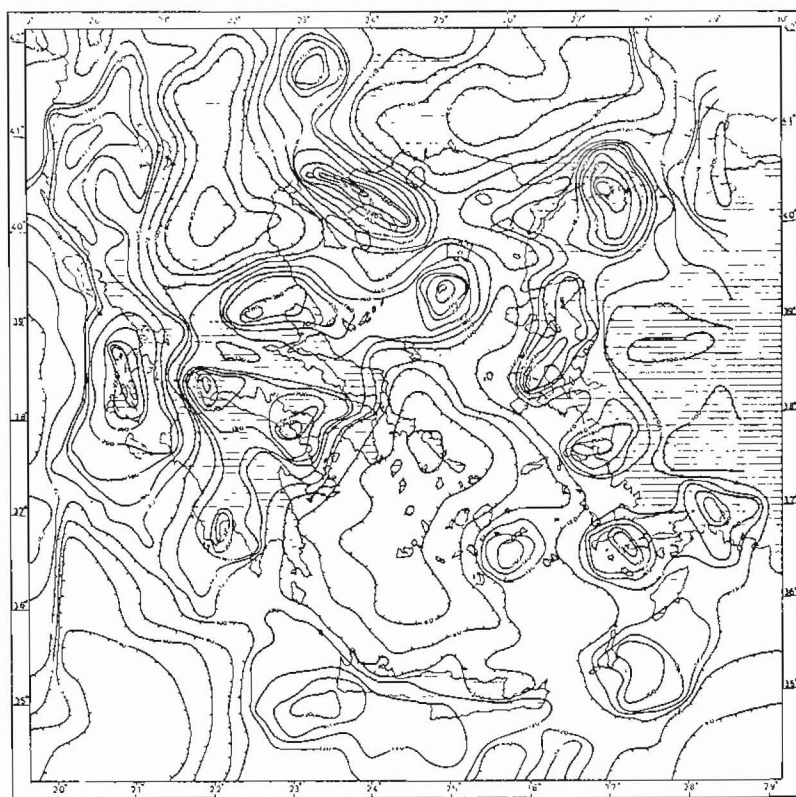
Το μοντέλο σεισμικότητας των περισσότερων από τις παραπάνω εργασίες, αλλά και από πλήθος εκείνων που δεν έχουν αναφερθεί, είναι εκείνο του Poisson, δηλαδή, η σεισμική επικινδυνότητα δεν θεωρείται συνάρτηση του χρόνου. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε θεωρητικά από τις Anagnos και Kiremidjian (1984), Kiremidjian and Anagnos (1984) ενώ ο Wesnousky και οι συνεργάτες του (1984) και ο Wesnousky (1986) εφάρμοσαν τη θεωρία για την Ιαπωνία και την Καλιφόρνια, αντίστοιχα.

Σημαντική έρευνα έχει γίνει για τον υπολογισμό των σφαλμάτων που υπεισέρχονται στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας και οφείλονται είτε στον υπολογισμό των παραμέτρων σεισμικότητας είτε στη στατιστική επεξεργασία της κατανομής των εντάσεων είτε στις σχέσεις απόσβεσης (Veneziano et al. 1977, Donovan and Bornstein 1978, McGuire and Shedloch 1980, Brillingier 1982). Επιπλέον, έχουν προταθεί βελτιωμένα μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τους τις παραπάνω αβεβαιότητες κατά την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας (Araya and Der Kiureghian 1988) και προσεγγίζουν το πρόβλημα διαχωρίζοντας τις εγγενείς από τις στατιστικές αβεβαιότητες που υπεισέρχονται κατά την ανάλυση (Kulkarni et al. 1984). Τέλος, η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας με βάση τις παραμέτρους νεοτεκτονικών ρηγμάτων καθώς και το ιστορικό ενεργοποίησης αυτών εντάσσεται στις πρόσφατες διεθνείς ερευνητικές προσπάθειες (Litcher et al. 1992).

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

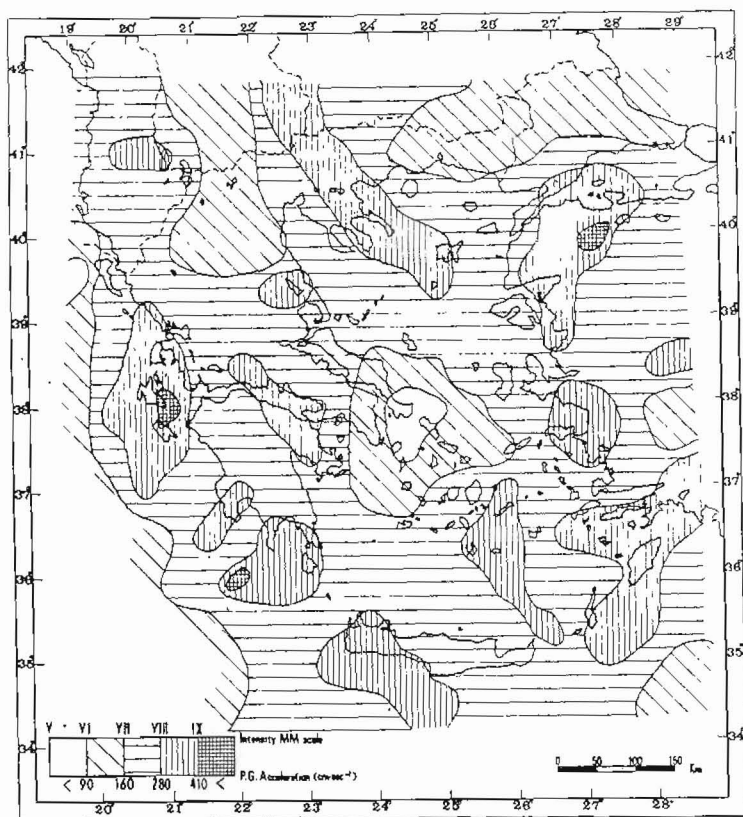
Η πρώτη προσπάθεια εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας στον Ελληνικό χώρο έγινε στις αρχές της δεκαετίας του '70 (Galanopoulos and Delibasis 1972) όπου δόθηκε χάρτης μέγιστων παρατηρημένων μακροσεισμικών εντάσεων στον Ελληνικό χώρο για την περίοδο 1800-1970. Ο Shebalin και οι συνεργάτες του (1976)

εκπόνησαν χάρτη μεγίστων αναμενόμενων εντάσεων για το Βαλκανικό χώρο ενώ ο Algermissen και οι συνεργάτες του (1976) εκπόνησαν για τον ίδιο χώρο χάρτες αναμενόμενης εδαφικής επιτάχυνσης και ταχύτητας κάνοντας όμως χρήση σχέσεων απόσβεσης των δυτικών ακτών των ΗΠΑ. Εκτεταμένη μελέτη για την εκτίμηση της μέγιστης αναμενόμενης εδαφικής επιτάχυνσης στον Ελληνικό χώρο με βάση τη θεωρία των ακραίων τιμών έγινε από το Μακρόπουλο (1978), Μακρόπουλο και Burton (1985). Για το σκοπό αυτό συντάχθηκε ένας πλήρης κατάλογος σεισμών για το χρονικό διάστημα (1901-1978) και προτάθηκε μια "μέση" σχέση απόσβεσης από τη διεθνή βιβλιογραφία, με τη χρήση της οποίας εκπονήθηκαν χάρτες αναμενόμενης εδαφικής επιτάχυνσης για τον Ελληνικό χώρο. Αναγνωρίζοντας την ευαισθησία της μεθόδου των ακραίων τιμών στην ποιότητα του καταλόγου των σεισμών που χρησιμοποιείται, οι Δρακόπουλος και Μακρόπουλος (1983) αξιοποιώντας τον κατάλογο του Μακρόπουλου (1978) και των Κομνηνάκη και Παπαζάχου (1978) εκπόνησαν χάρτες αναμενόμενης εδαφικής επιτάχυνσης για τον Ελληνικό χώρο (Σχ. 1).



Σχ.1. Η μέγιστη επιτάχυνση με 90% πιθανότητα μη υπέρβασης σε 25 χρόνια διάρκεια ζωής της κατασκευής (Drakopoulos and Makropoulos 1983).

Ο Παπαιωάννου (1984, 1986) εφαρμόζοντας τη μέθοδο της μέσης τιμής και της 1ης ασυμπτωτικής κατανομής του Gumbell (I), εκτίμησε τη σεισμική επικινδυνότητα στον Ελληνικό χώρο για τη μακροσεισμική ένταση και την εδαφική επιτάχυνση για τα επόμενα 80 έτη (Σχ. 2). Ο ίδιος ερευνητής κατέληξε στο συμπέρασμα ότι εφ'όσον γίνεται αυστηρός έλεγχος της πληρότητας των δεδομένων τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων δεν διαφέρουν σημαντικά.

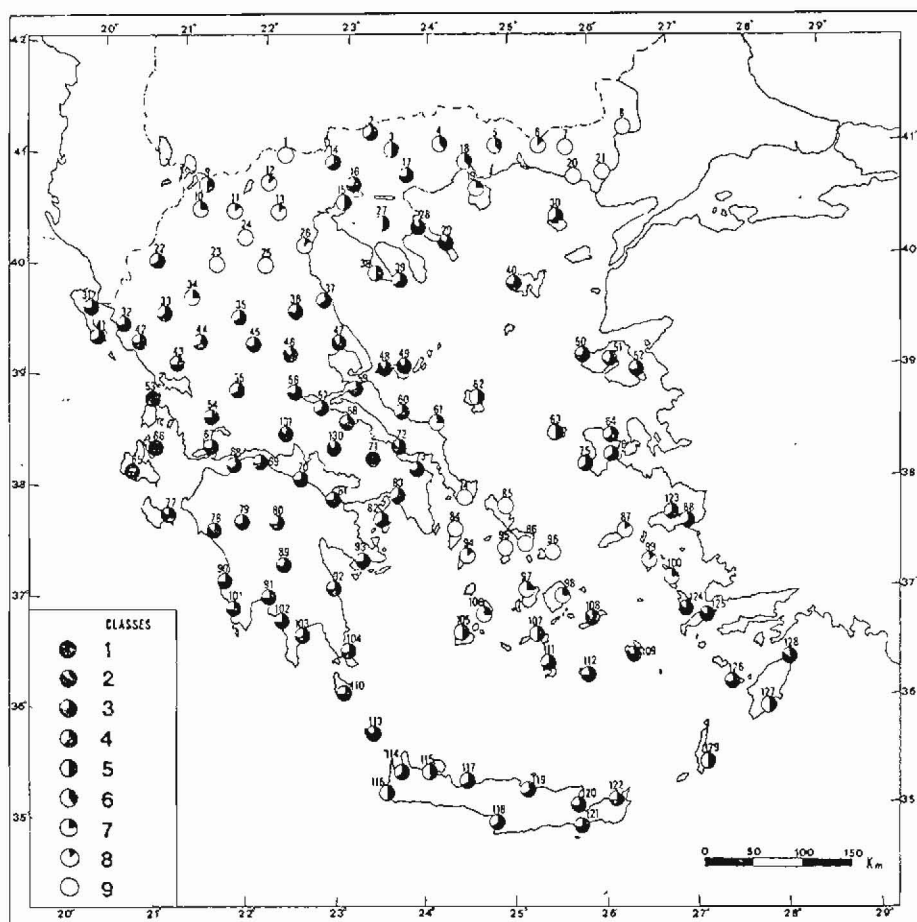


Σχ.2. Χάρτης κατανομής ίσων τιμών της πιθανότερης μέγιστης έντασης και πιθανότερης μέγιστης τιμής εδαφικής επιτάχυνσης για τον Ελληνικό χώρο και τις γύρω περιοχές για το χρονικό διάστημα 80 ετών. (Παπαιωάννου 1984).

Ο Σταυρακάκης (1985) εφάρμοσε τη μέθοδο Bayes για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας της ευρύτερης περιοχής της Κρήτης. Στην εργασία αυτή θεωρήθηκε ότι η σεισμικότητα των πηγών περιγράφεται από το μοντέλο Poisson-Gamma ενώ για τα μεγέθη των σεισμών θεωρήθηκε ότι ακολουθούν την κατανομή Bernoulli.

Ο Παταζάχος και οι συνεργάτες του (1985) με βάση μοντέλο σειсмоγόνων πηγών (Χατζηδημητρίου 1984), και σχέσεις απόσβεσης μακροσεισμικής έντασης (Παπαιωάννου 1984), εφάρμοσαν τη μεθοδολογία του Cornell (1968) για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας στον Ελληνικό χώρο. Αξιοποιώντας ολόκληρη την καμπύλη τιμών υπέρβασης της μακροσεισμικής έντασης οι παραπάνω

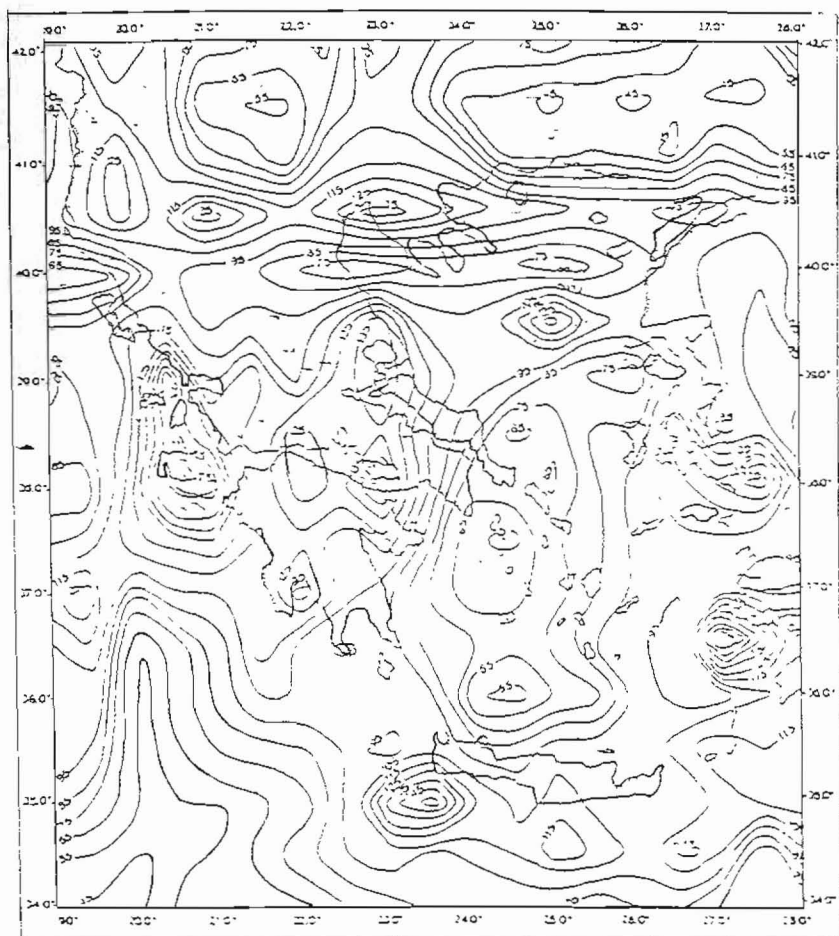
ερευνητές κατέταξαν 131 οικισμούς της χώρας σε 9 κατηγορίες παρόμοιας σεισμικής επικινδυνότητας (Σχ. 3). Χάρτης μέγιστης αναμενόμενης μακροσεισμικής έντασης για τα επόμενα 80 έτη στον Ελληνικό χώρο με βάση τη μεθοδολογία του Cornell (1968) δόθηκε από τον Παπαιωάννου και τους συνεργάτες του (1985). Η επίδραση των σχέσεων απόσβεσης στη σεισμική επικινδυνότητα εξετάστηκε από το Δρακόπουλο και Μακρόπουλο (1985).



Σχ.3. Κατάταξη σεισμικής επικινδυνότητας 131 οικισμών του Ελληνικού χώρου σε 9 κατηγορίες. (Papazachos et al. 1985).

Ο Μακρόπουλος και οι συνεργάτες του (1986) εκπόνησαν συγκριτική μελέτη εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας για τον Ελληνικό χώρο με τη χρήση διαφορετικών μοντέλων σεισμικών πηγών και έδωσαν χάρτες αναμενόμενης εδαφικής επιτάχυνσης με πιθανότητα εμφάνισης 63% για τα επόμενα 50 και 100 έτη (Σχ. 4). Οι ίδιοι ερευνητές έδειξαν ότι τα αποτελέσματα εξαρτώνται από το μέγιστο αναμενόμενο μέγεθος και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των

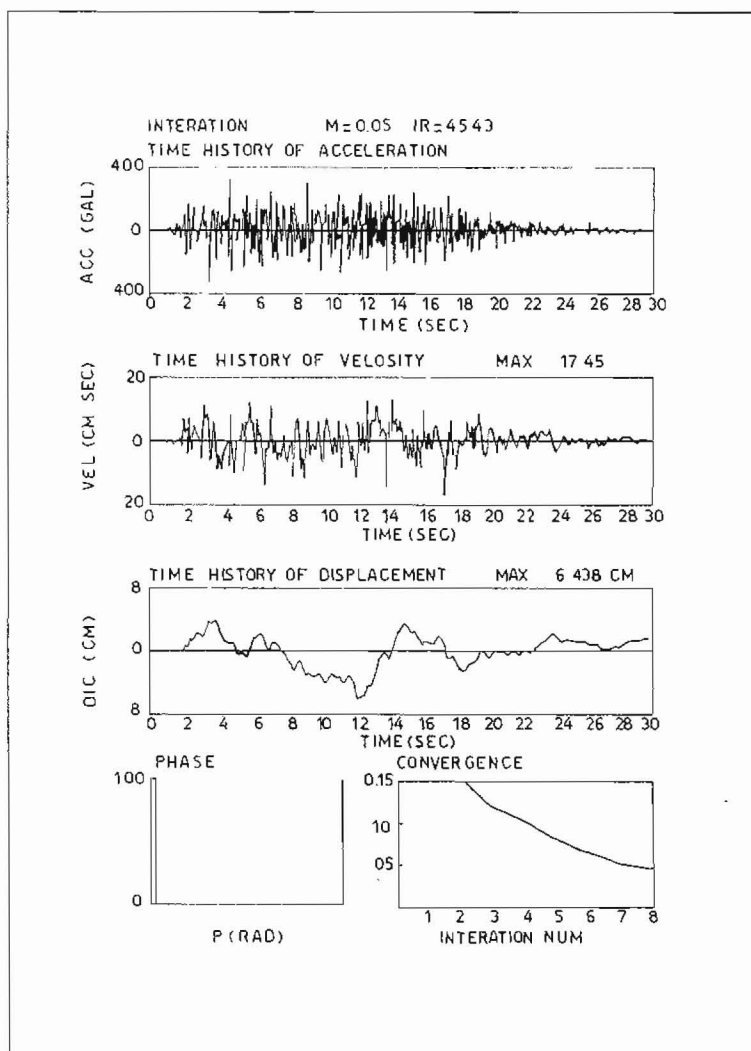
σεισμικών πηγών. Ο Δρακόπουλος και οι συνεργάτες του (1986) διερεύνουν την αξιοπιστία των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση αυτής της παραμέτρου καθώς και την επίδραση της, στη σεισμική επικινδυνότητα. Οι μέγιστες αναμενόμενες εδαφικές τιμές που προκύπτουν από την ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας σε μια θέση μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη παραγωγή συνθετικών επιταχυνσιογραμμάτων. Τέτοια προσπάθεια έγινε από το Σταυρακάκη και τους συνεργάτες του (1986) για την πόλη της Καλαμάτας (Σχ. 5).



Σχ.4. Χάρτης ισο-καμπυλών επιτάχυνσης για την περιοχή της Ελλάδας με πιθανότητα 63% να μην υπερβληθεί στα επόμενα 50 χρόνια. (Τα αποτελέσματα βασίζονται σε μοντέλο σειсмоγόνων πηγών). (Makropoulos et al. 1986).

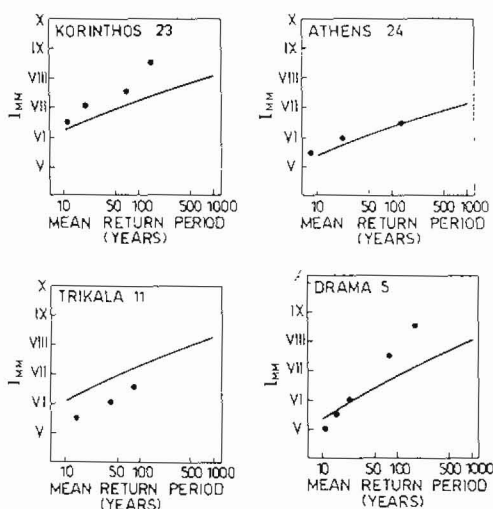
Οι Δρακόπουλος και Σταυρακάκης (1988) και ο Σταυρακάκης (1988) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο του Poisson υποεκτιμά τη σεισμική επικινδυνότητα και πρότειναν περισσότερο

αντιπροσωπευτικές φυσικές παραμέτρους όπως η "ροή ενέργειας" και η σεισμική ροπή, για την εκτίμηση του μέσου ρυθμού γένεσης των σεισμών. Οι Θεοδοουλίδης και συνεργάτες (1986), κατά την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας σε θέσεις του Ελληνικού χώρου με σκοπό το σχεδιασμό ενός εθνικού δικτύου επιταχυνσιογράφων, διερεύνησαν το ρόλο του ρυθμού παραμόρφωσης του γήινου φλοιού που επηρεάζεται αποφασιστικά από το μέγιστο σεισμό κάθε σεισμογόνου πηγής.



Σχ.5. Συνθετικό επιταχυνσιογράμμα της αναμενόμενης εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου και σε εδαφικές συνθήκες βράχου για την πόλη της Καλαμάτας (Stavrakakis et al. 1986).

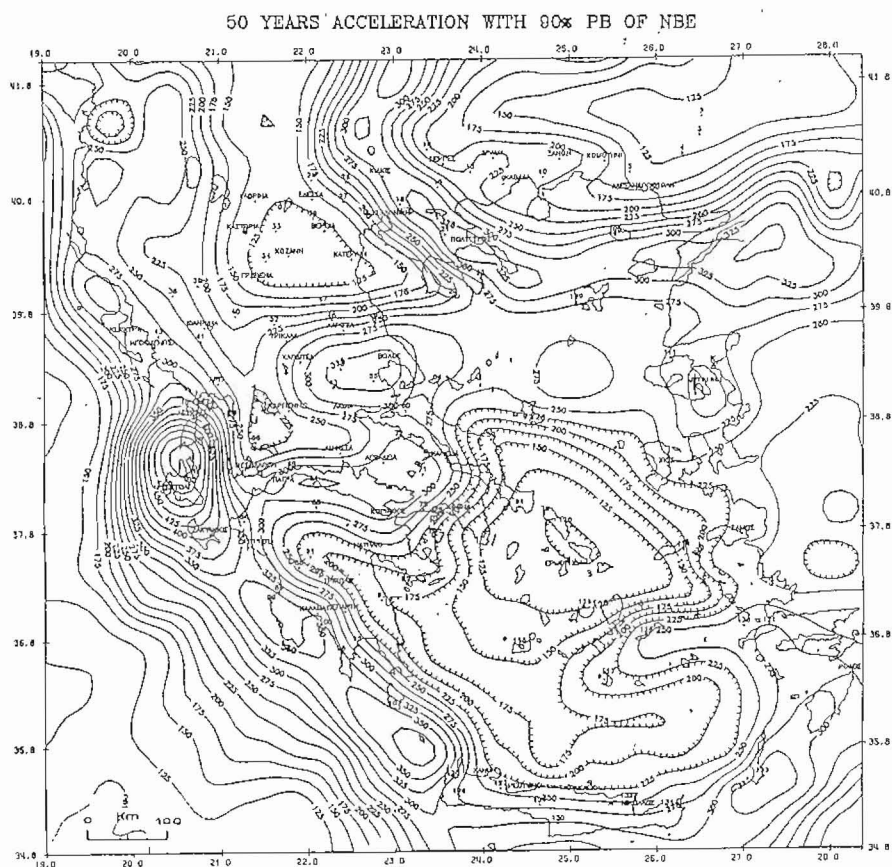
Ο Παπαϊωάννου (1988) διαχώρισε τη σεισμική επικινδυνότητα των σεισμών ενδιαμέσου βάθους από εκείνη των επιφανειακών για τον Ελληνικό χώρο. Ο Παπαζάχος και οι συνεργάτες του (1990) χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα έκαναν σύγκριση της μεθόδου του Cornell (1968) με εκείνη της "μέσης" τιμής για διάφορους οικισμούς της χώρας και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για μέσες περιόδους επανάληψης της αναμενόμενης εδαφικής κίνησης μεγαλύτερης από 100 έτη, η τελευταία δίνει σημαντικά υψηλότερες τιμές. Σύγκριση των καμπυλών επικινδυνότητας με τη μέθοδο του Cornell (1968) με πραγματικά παρατηρημένες μακροσεισμικές εντάσεις στους ίδιους οικισμούς έδειξε παρόμοια αποτελέσματα αλλά και σημαντικές διαφορές (Σχ. 6) οι οποίες αποδόθηκαν στη γεωμετρία των πηγών, ή στην πλασματική συγκέντρωση επικέντρων γύρω από την ιστορική θέση ή στην παρουσία ενεργού ρήγματος κοντά στη θέση, καταδεικνύοντας την ανάγκη νεοτεκτονικής μελέτης στην ευρύτερη περιοχή. Η Παπούλια και ο Σταυρακάκης (1990) με βάση τη μακροσεισμική ένταση, μελέτησαν την επίδραση τοπικών σχέσεων απόσβεσης στη σεισμική επικινδυνότητα μιας σχέσης. Ο Παπαζάχος και οι συνεργάτες του (1993) βασιζόμενοι στις σεισμικές πηγές του Ελληνικού χώρου που προέκυψαν με τη χρήση και ιστορικών στοιχείων (Παπαζάχος και Παπαζάχου 1989) καθώς και σε σχέσεις απόσβεσης της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας (Θεοδουλίδης 1988) πρότειναν τέσσερεις κατηγορίες ζωνών ίσης σεισμικής επικινδυνότητας στον Ελληνικό χώρο με παράμετρο τη μακροσεισμική ένταση, την εδαφική επιτάχυνση και ταχύτητα.



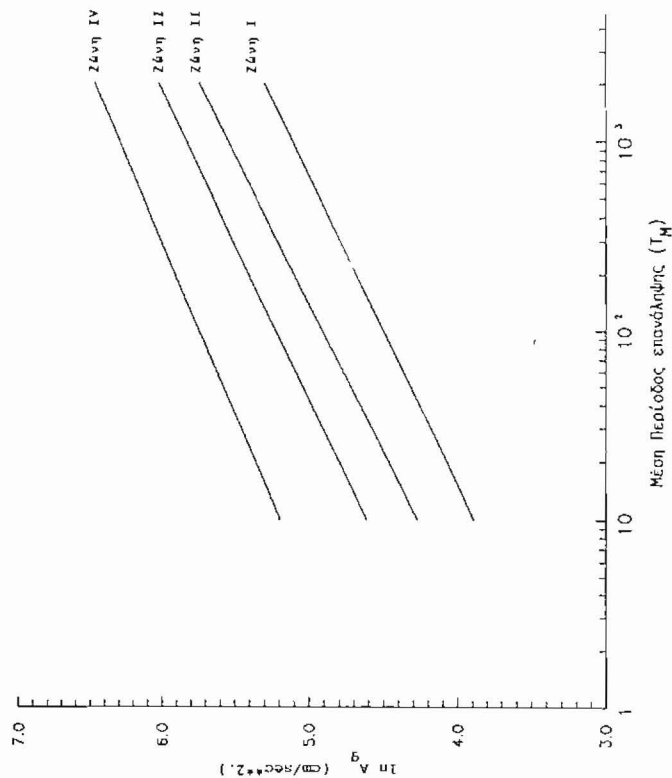
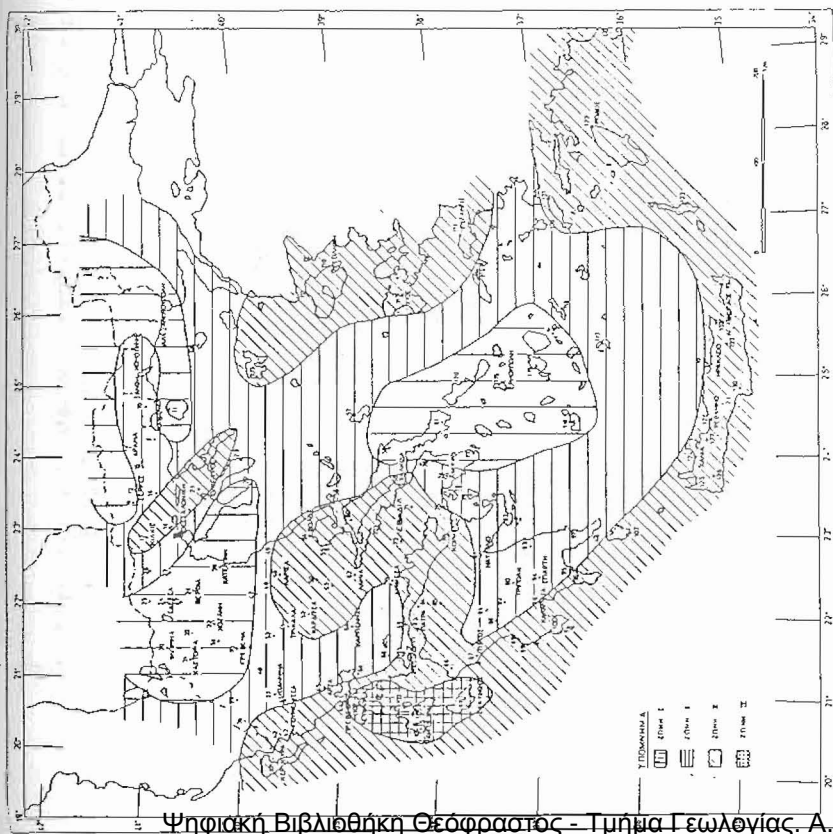
Σχ.6. Σύγκριση της μεθόδου της Μέσης τιμής (κύκλοι) και του Πιθανολογικού μοντέλου του Cornell (1968) υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας τεσσάρων οικισμών του Ελληνικού χώρου. (Κόρινθος, Αθήνα, Τρίκαλα και Δράμα). (Papazachos et al. 1990).

Σχετικά πρόσφατα, τέσσερεις σεισμολογικοί φορείς της χώρας, Εργαστήριο Σεισμολογίας του Πανεπιστημίου Αθηνών, Εργαστήριο

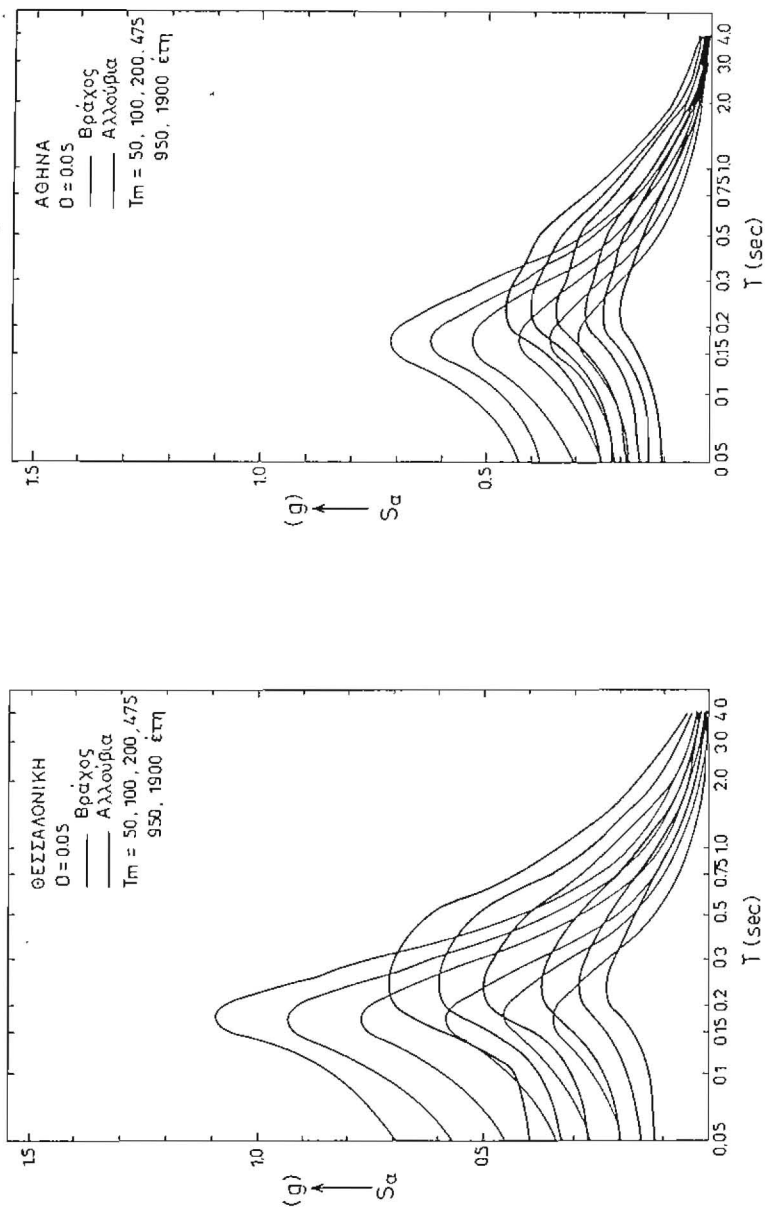
Γεωφυσικής του ΑΠΘ, Γεωδυναμικό Ινστιτούτου του Εθν. Αστεροσκοπείου Αθηνών και το Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών πρότειναν από κοινού χάρτες μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης και ταχύτητας (μέσος όρος τιμών των τεσσάρων φορέων), στα πλαίσια ευρύτερου προγράμματος για το Νέο Αντισεισμικό Κανονισμό (Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας 1989). Στο σχήμα (7) δίνεται ο χάρτης ισοκαμπύλων μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης για τα επόμενα 50 έτη με πιθανότητα υπέρβασης 10%. Η ομαδοποίηση σε 4 ζώνες ίσης σεισμικής επικινδυνότητας που προτάθηκε από τους τέσσερεις φορείς καθώς και η μεταβολή της αναμενόμενης εδαφικής επιτάχυνσης σε συνάρτηση με τη μέση περίοδο επανάληψης, δίνονται στο σχήμα (8). Στο ίδιο πρόγραμμα προτάθηκαν για μεγάλες πόλεις της Ελλάδας, πιθανολογικά φάσματα απόκρισης φασματικής επιτάχυνσης για δύο κατηγορίες εδαφικών συνθηκών ("Βράχος", "Αλλούβια"). Στο σχήμα (9) δίνεται παράδειγμα για την πόλη της Θεσσαλονίκης και των Αθηνών. Τέλος,



Σχ.7. Χάρτης ισο-καμπυλών επιτάχυνσης (cm/sec^2) του Ελληνικού χώρου και των γύρω περιοχών με 90% πιθανότητα μη υπέρβασης στα επόμενα 50 χρόνια (Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας, 1989).

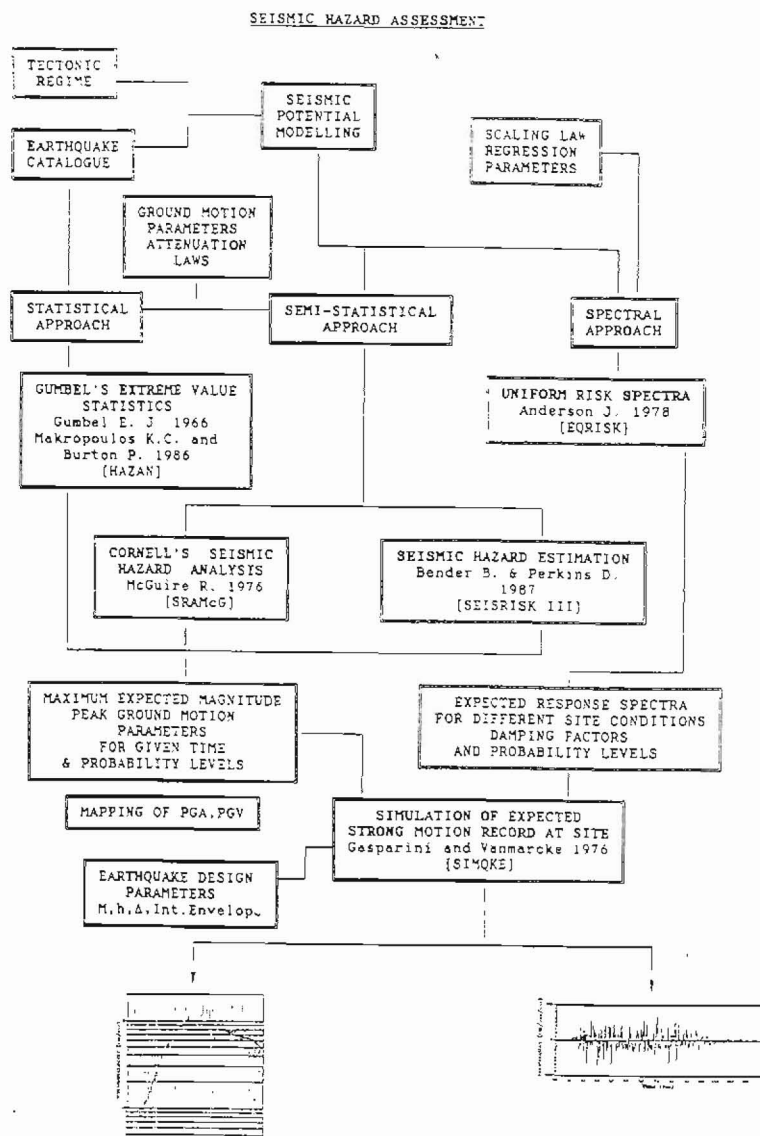


Σχ.8. α) Χάρτης κατανομής των 4 ζωνών (σης σεισμικής επικινδυνότητας του Ελληνικού χώρου. β) Καμπύλες μεταβολής του φυσικού (νεπέριου) λογαρίθμου της μέγιστης οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης, $\ln A_g$, σε συνάρτηση με τη μέση περίοδο επανάληψης, T_m , για τις τέσσερις κατηγορίες ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας. (Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας, 1989).



Σχ. 9. Πιθανολογικά φάσματα απόκρισης για εδαφικές συνθήκες "βράχος" και "αλλούβια" για τις πόλεις Θεσσαλονίκη και Αθήνα. (Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας, 1989).

σε μία προσπάθεια συγκέντρωσης-προσαρμογής και ολοκληρωμένης θεώρησης των γενικότερα αποδεκτών μεθοδολογιών (Hazan, McGuire, SEISRISK II, EQRISK, SIMQKE) ο Μακρόπουλος και συνεργάτες του (1990) συνέθεσαν ένα πλήρες περιβάλλον H/Y, το διάγραμμα ροής του οποίου φαίνεται στο σχήμα (10).

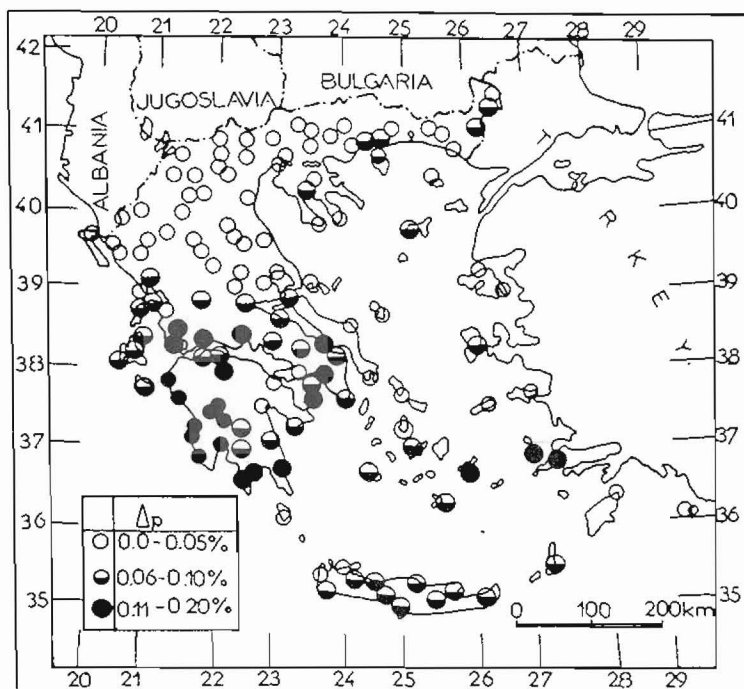


Σχ.10. Διάγραμμα ροής προσέγγισης της εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας με το λογισμικό πακέτο SHEP. (Μακρόπουλος et al. 1990).

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ

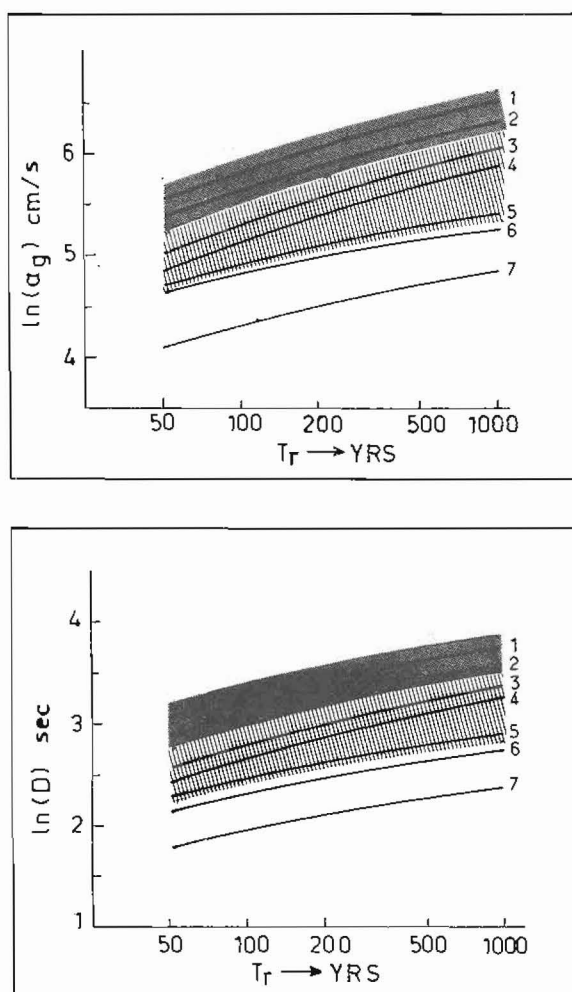
Όπως φαίνεται από το προηγούμενο κεφάλαιο, έχει γίνει σημαντική έρευνα κατά τα τελευταία 20 περίπου χρόνια στην κατεύθυνση της εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας στον Ελληνικό χώρο. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας έχουν πρακτικά αξιοποιηθεί και ενσωματωθεί στον Νέο Αντισεισμικό Κανονισμό. Κατά τη διάρκεια όμως της σχετικής έρευνας έχουν προκύψει και ερωτηματικά τα οποία βάζουν τις βάσεις για καινούργια έρευνα με στόχο την πλέον ορθολογική και ρεαλιστική προσέγγιση του προβλήματος της σεισμικής επικινδυνότητας.

Το πλήθος των ιστορικών στοιχείων σεισμών που έχουν δημοσιευθεί για τον Ελληνικό χώρο και τις γύρω περιοχές (Παπαζάχος και Παπαζάχου 1989) υπήρξε το έναυσμα για αναζήτηση χρονικά εξαρτημένων (time dependent) μοντέλων γένεσης των σεισμών σε περιορισμένους σεισμογόνους χώρους, σε αντίθεση με τα προηγούμενα που κυρίως βασίσθηκαν στο μοντέλο "χωρίς μνήμη", δηλαδή του Poisson (Papazachos 1989, 1992). Μία πρώτη εφαρμογή τέτοιου μοντέλου γένεσης σεισμών στη σεισμική επικινδυνότητα για τα επόμενα 50 χρόνια, έδειξε διαφορές σε σχέση με εκείνο του Poisson, ειδικά σε ζώνες υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας (Papaioannou et al. 1992, Papastamatiou et al. 1993). Στο χάρτη του σχήματος (11) φαίνεται η γεωγραφική κατανομή των διαφορών,

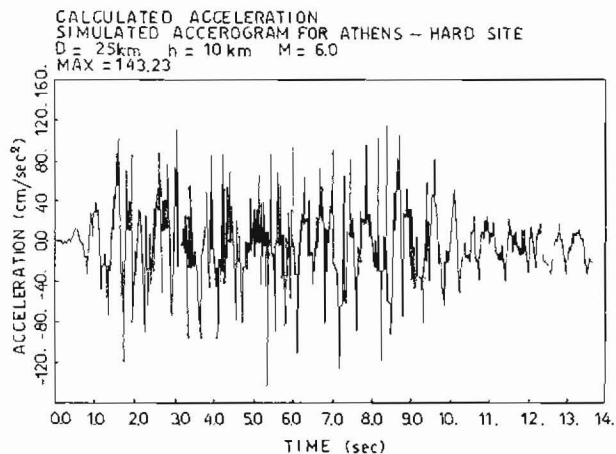
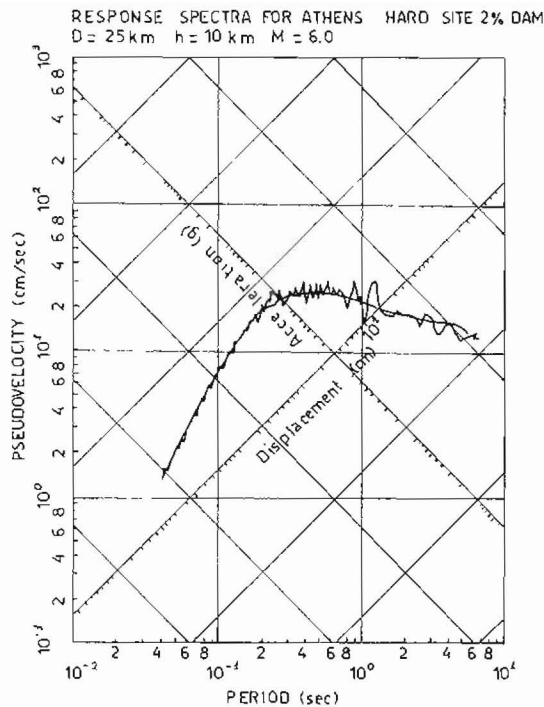


Σχ.11. Γεωγραφική κατανομή των διαφορών των πιθανοτήτων, Δp , υπολογισμένων με βάση το χρονικά εξαρτημένο μοντέλο σεισμικότητας, μείον των αντίστοιχων που υπολογίσθηκαν με βάση το μοντέλο Poisson, για όλες τις εξεταζόμενες θέσεις. (Papaioannou et al. 1992).

ΔΡ, μεταξύ των πιθανοτήτων που προσδιορίστηκαν με τη χρήση του μοντέλου Poisson από το χρονικά εξαρτημένο. Οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται στη δυτική Πελοπόννησο και στη νήσο Κω όπου το μελλοντικό χρονικό παράθυρο είναι δύο φορές μεγαλύτερο από τη μέση περίοδο επανάληψης των ισχυρών σεισμών στην περιοχή. Παραπέρα λεπτομερής έρευνα στο θέμα αυτό μπορεί να υποδείξει σημαντικά διαφορετικά αναμενόμενα επίπεδα ισχυρής εδαφικής κίνησης σε μια θέση από εκείνα που έχουν ήδη προταθεί στο ΝΕΑΚ.



Σχ.12. α) Καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης με την μέση περίοδο επανάληψης T_r , για 7 εξεταζόμενους οικισμούς του Ελληνικού χώρου. β) Καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας της ισχυρής διάρκειας με την μέση περίοδο επανάληψης, T_r , για τις ίδιες εξεταζόμενες θέσεις του Ελληνικού χώρου. (Parazachos et al. 1990).



Σχ.13. Αναμενόμενο συνθετικό επιταχυνσιόγραμμα για την πόλη των Αθηνών από υποτιθέμενο σεισμό μεγέθους 6.0, σε απόσταση 25 km και βάθος 10 km. (Makropoulos et al. 1990).

Η απόκτηση κατά την τελευταία δεκαετία ικανοποιητικού αριθμού επιταχυνσιογραμμάτων από σεισμούς του Ελληνικού χώρου οδήγησε σε εμπειρικά μοντέλα πρόβλεψης της ισχυρής εδαφικής κίνησης (Θεοδοουλίδης 1991) καθώς και της ισχυρής διάρκειας αυτής (Margaris et al. 1990). Η αξιοποίηση αυτών των μοντέλων στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας στον Ελληνικό χώρο μπορεί να οδηγήσει σε ρεαλιστικά αποτελέσματα. Στο σχήμα (12) δίνεται η αναμενόμενη εδαφική επιτάχυνση και η ισχυρή διάρκεια για 7 οικισμούς της Ελλάδας ύστερα από τη χρήση των προαναφερομένων μοντέλων και της μεθοδολογίας του Cornell (Papazachos et al. 1992). Παραπέρα διερεύνηση στο θέμα θα μπορούσε να καταλήξει σε χρήσιμα για τον αντισεισμικό σχεδιασμό στοιχεία, αφού η ισχυρή διάρκεια της σεισμικής κίνησης δεν έχει συμπεριληφθεί ουσιαστικά στο NEAK.

Είναι γνωστό ότι η πλέον περιεκτική μορφή της ισχυρής εδαφικής κίνησης είναι το επιταχυνσιογράμμα. Η έλλειψη επιταχυνσιογραμμάτων ειδικά στο κοντινό πεδίο ισχυρών σεισμών είναι παγκόσμιο φαινόμενο. Για το λόγο αυτό, πολλές ερευνητικές προσπάθειες έχουν στραφεί κατά την τελευταία δεκαετία με στόχο την παραγωγή τεχνητών επιταχυνσιογραμμάτων τα οποία είναι κατά το δυνατόν συνεπή με τα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής. Φυσικά όλες αυτές ερευνητικές προσπάθειες αναγνωρίζουν ότι τα τεχνητά επιταχυνσιογράμματα δεν υποκαθιστούν τις πραγματικές καταγραφές. Τέτοια προσπάθεια γένεσης τεχνητών επιταχυνσιογραμμάτων έχει γίνει και στον Ελληνικό χώρο (Σταυρακάκης και συνεργάτες 1986, Μακρόπουλος και συνεργάτες 1990). Στο σχήμα (13) δίνεται το αναμενόμενο επιταχυνσιογράμμα για την πόλη των Αθηνών από υποτιθέμενο σεισμό μεγέθους 6.0, σε απόσταση 25km και βάθος 10km. Όμως, η ερευνητική προσπάθεια στην κατεύθυνση αυτή θα πρέπει να λάβει υπόψη της, τόσο τα χαρακτηριστικά των σεισμικών πηγών του Ελληνικού χώρου όσο και τα ήδη υπάρχοντα επιταχυνσιογράμματα και τις τοπικές εδαφικές συνθήκες ως ρεαλιστική βάση για την προσομοίωση της ισχυρής κίνησης σε μία θέση. Είναι γεγονός ότι όλες οι παραπάνω μελλοντικές προσπάθειες θα πρέπει να υποστηρίζονται από δύο βασικούς παράγοντες. (α) την εκπόνηση νεοτεκτονικών μελετών σε θέσεις για τις οποίες υπάρχουν αρκετές ενδείξεις για την ύπαρξη πρόσφατων ενεργών γεωλογικών ρηγμάτων και (β) την ανάπτυξη και σωστή λειτουργία εθνικού δικτύου καθώς και ειδικών δικτύων επιταχυνσιογράφων "ελεύθερου πεδίου" τα οποία θα τροφοδοτούν την παραπέρα έρευνα με δεδομένα αλλά και θα ελέγχουν την ορθότητα η μη των θεωρητικών μοντέλων πρόβλεψης της ισχυρής εδαφικής κίνησης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Algermissen, S.T. and Perkins, D.M., (1976). A probabilistic estimate of maximum acceleration in rock in the contiguous United States. US Geolog. Survey, Open-File Rep., No 76-416.
- Algermissen, S.T., Perkins, D.M., Isherwood, W., Reagor, G. and Howard, C. (1976). Seismic risk evaluation of the Balkan region. Proc. Sem. on Seismic Zoning maps, Skopje 1975. II, 172-240.
- Anagnos, T. and Kiremidjian, A.S., (1984). Stochastic time-predictable model for earthquake occurrence. Bull.

- Seism. Soc. Am., 74, 2593 -2611.
- Araya, R. and DerKiureghian, A. (1988). Seismic hazard analysis: Improved models, uncertainties and sensitivities. Earthq. Eng. Res. Center, Univ. of California, Berkeley. Rep NO UBC/EERC-90/11. 147 pp.
- Basham, P.W., Weichert, D.H., Anglin, F.M. and Berry, M.J. (1985). New probabilistic strong ground motion maps of Canada. Bull. Seism. Soc. Am., 75, 563-595.
- Brillinger, D.R. (1982). Seismic risk assessment : Some statistical aspects. Earthq. Pred. Res., 1, 183-195.
- Comninakis, P.E. and Papazachos, B.C. (1978). A catalogue of earthquakes in the Mediterranean and the surrounding area for the period 1901 -1975. Geoph. Lab. Univ. of Thessaloniki, Publ. No 8, 96pp.
- Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis. Bull. Seism. Soc. Am., 58, 1503-1606.
- Cornell, C.A. (1972). Bayesian statistical decision theory and reliability based design. Proc. Int. Conf. Struct. Safety and reliability, 47-66.
- Cornell, C.A. and Vanmarcke, E.H. (1969). The major influences on seismic risk. Proc. 4th WCEE, Chile, 1, 69-83.
- DerKiureghian, A. and Ang, A.H.-S. (1977). A fault rupture model for seismic risk analysis. Bull. Seism. Soc. Am., 67, 1173-1194.
- Donovan, N.C. and Bornstein, A.E. (1978). Uncertainties in seismic risk procedures. J. of the Geotechn. Div. ASCE., No GT7, 869-887.
- Drakopoulos, J. and Makropoulos, K. (1983). Seismicity and hazard analysis studies in the area of Greece. Publ. Seism. Lab. Univ. of Athens, 1, 126pp.
- Drakopoulos, J. and Makropoulos, K.C. (1985). Uncertainties in hazard assessment due to attenuation laws. Proc. Int. Conf. on Reconstruction, restoration and urban planning of towns and regions in seismic prone areas. Yugoslavia, 14pp.
- Drakopoulos, J., Makropoulos, K. and Iatousakis, J. (1986). The influence of maximum expected magnitude in seismic hazard assessment. Proj. of the Seism. Hazard Maps for the area of Greece. 9pp.
- Drakopoulos, J. and Stavrakakis, G. (1988). Energy flux, seismic moment and their influence on seismic hazard analysis. Proc. of Int. Semin. on Seismic Zoning, China, 401-410.
- Esteva, L. (1969). Seismicity prediction : A bayesian approach. Proc 4th WCEE, Chile, 1, 172-184.
- Galanopoulos, A.G. and Delibasis, N. (1972). Map of maximum observed intensities in Greece (period 1800-1970), Athens.
- Θεοδουλίδης, Ν.Π., Μάργαρης, Β.Ν. και Παπασταματίου, Δ.Ι. (1986). Σχεδιασμός δικτύου επιταχυνσιογράφων. Ινστ. Τεχν. Σεισμ. Αντ. Κατ., Εργ. ΙΤΕΑΚ 86-04, σελ.148.
- Θεοδουλίδης, Ν.Π., (1988). Φάσματα απόκρισης σεισμών του Ελληνικού χώρου. Πρακτικά 1ου Συμπ. για τις νέες εξελίξεις στην σεισμολογία και γεωφυσική του Ελληνικού χώρου, Θεσσαλονίκη. 225-240.
- Θεοδουλίδης, Ν.Π., (1991). Συμβολή στη μελέτη της ισχυρής σεισμικής κίνησης στον Ελληνικό χώρο. Διδ. διατρ. Α.Π.Θ. 500 σελ.
- Kaul, M.N., (1979). Use of fault displacements in the evaluation

- of seismic risk. *Earthq. Eng. and Struct. Dyn.*, 7, 529-542.
- Keilis-Borok, V.I., Kronrod, T.L. and Mochan, G.M., (1974). Algorithms for estimation of seismic risk. In: *Seismic design decision analysis* (Translated from Russian). Internal Study Rept. No 43, Dept. of Civil Eng. MIT, Cambridge-MA, 74pp.
- Keilis-Borok, V.I., Kronrod, T.L. and Mochan, G.M., (1983). Seismic risk for the largest cities of the world. I.C.T.P. workshop on pattern recognition and analysis of seismicity, SRM/107-12, 67pp.
- Kiremidjian, A.S. and Anagnos, T., (1984). Stochastic slip-predictable model for earthquake occurrence. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74, 739-755.
- Kulkarni, R.B., Youngs, R.R. and Coppersmith, K.J., (1984). Assessment of confidence intervals for results of seismic hazard analysis. *Proc. 8th WCEE, San Francisco, I*, 263-270.
- Litehiser, J., Marrone, J. and Abrahamson, N. (1992). A preliminary model of firm foundation acceleration hazard in the San Francisco Bay area. *Earthquake Spectra*, 8, 225-257.
- Makropoulos, K.C., (1978). The statistics of large earthquake magnitude and evaluation of Greek seismicity. PhD thesis, Univ. of Edinburg, 193pp.
- Makropoulos, K.C. and Burton, P.W., (1985). Seismic hazard in Greece. II- Ground acceleration. *Tectonophysics*, 117, 259-294.
- Makropoulos, K.C., Stavrakakis, G.N., Latousakis, J. and Drakopoulos, J., (1986). A comparative seismic hazard study for the area of Greece. In: A. Vogel and K. Brandes (editors). *Proc. 2d Int. Sem. on Earthq. Prognostics Berlin-FRG*, 179-197.
- Makropoulos, K., Voulgaris, N. and Likiardopoulos, A. (1990). A multi-methological approach to seismic hazard assessment. An application for Athens (Greece). *Pr. of XXII Gen. Ass. ESC. Barcelona. II*, 585-591.
- Makropoulos, K.C., Likiardopoulos, A. and Voulgaris, N., (1990). A PC- based computer package for seismic hazard assessment. *Pr. of XXII Gen. Ass. ESC Barcelona. III*, 59-63.
- Margaris, V.N., Theodulidis, N.P., Papaioannou, Ch.A. and Papazachos, B.C., (1990). Strong motion duration of earthquakes in Greece. *Pr. of XXII Gen. Ass. ESC Barcelona. II*, 865-871.
- Matuschka, T., Berryman, K.R., O'Leary, A.J., Mcverry, G.H., Mulholland, W.M. and Skinner, R.I., (1985). New Zealand seismic hazard analysis. *Bull. of New Zeal. Nat. Soc. for Earthq. Eng.*, 18, 313-322.
- Mertz, H.A. and Cornell, C.A., (1973). Seismic risk analysis on a quadratic magnitude-frequency law. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 63, 1999-2006.
- Milne, W.G. and Davenport, A.G., (1969). Determination of earthquake risk in Canada. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 59, 729-754.
- Mortgat, C.P. and Shah, H.C., (1979). A bayessian model for seismic hazard mapping. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 69, 1237-1251.
- McGuire, R.K., (1976). FORTRAN computer program for seismic risk

- Rowshandel, B., Namat-Nasser, S. and Corotis, R.B. A comparative seismic hazard study for Azerbaijan province in Iran. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71, 335-362.
- Shebalin, N.V., Reisner, G.I., Drumea, A.V., Aptekman, J.V., Sholpo, V.N. Stepaneks, N.Y. and Zacharova, A.J., (1976). Earthquake origin zones and distribution of maximum expected seismic intensity for the Balkan region. *Proc. Sem. on Seismic zoning maps. Skopje 1975. II*, 68-171.
- Σταυρακάκης, Γ.Ν., (1985). Συμβολή της στατιστικής Bayes στην εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου της ευρύτερης περιοχής της Κρήτης και προσωμοίωση των αναμενόμενων ισχυρών εδαφικών κινήσεων. Διδ. Διατρ. Παν. Αθηνών, σελ. 294.
- Stavarakakis, G., (1988). Earthquake magnitude or seismic moment in seismic hazard evaluation. *PAGEOPH.*, 127, 21-31.
- Stavarakakis, G., Drakopoulos, J. and Makropoulos, K., (1986). A model for the seismic hazard assessment in southwestern Peloponnesus and synthesized ground motions for the city of Kalamata. *Ann. Geol. Pays Hell.*, 233-249.
- Stavarakakis, G., Drakopoulos, J. and Makropoulos, K., (1986). Complex rupture process and strong ground motion prediction. *Proc. 8th ECEE, Lisbon*, 1, 23-30.
- Veneziano, D., Schumacher, J. and Cornell, C.A., (1977). Statistical errors in seismic risk analysis. *ASCE Spring convention, Pittsburg-USA*.
- Weichert, D.H. and Milne, W.G. (1979). On canadian methodologies of probabilistic seismic risk estimation. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 69, 1549-1566.
- Wesnousky, S.G., (1986). Earthquakes, quaternary faults, and seismic hazard in California, *J. Geophys. Res.*, 91, 12587-12631.
- Wesnousky, S.G., Scholz, C.H., Shimazaki, K. and Matsuda, T., (1984). Integration of geological and seismological data for the analysis of seismic hazard: a case study of Japan. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74, 687-708.
- Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας. (1989). Τελική έκθεση για το πρόγραμμα του Οργανισμού Αντισεισμού Σχεδιασμού και Προστασίας.
- Χατζηδημητρίου, Π.Μ., (1984). Σεισμογόνοι χώροι και σεισμικές πηγές στον χώρο του Αιγαίου και τις γύρω περιοχές. Διδ. Διατρ. Παν. Θεσσαλονίκης., σελ. 162.