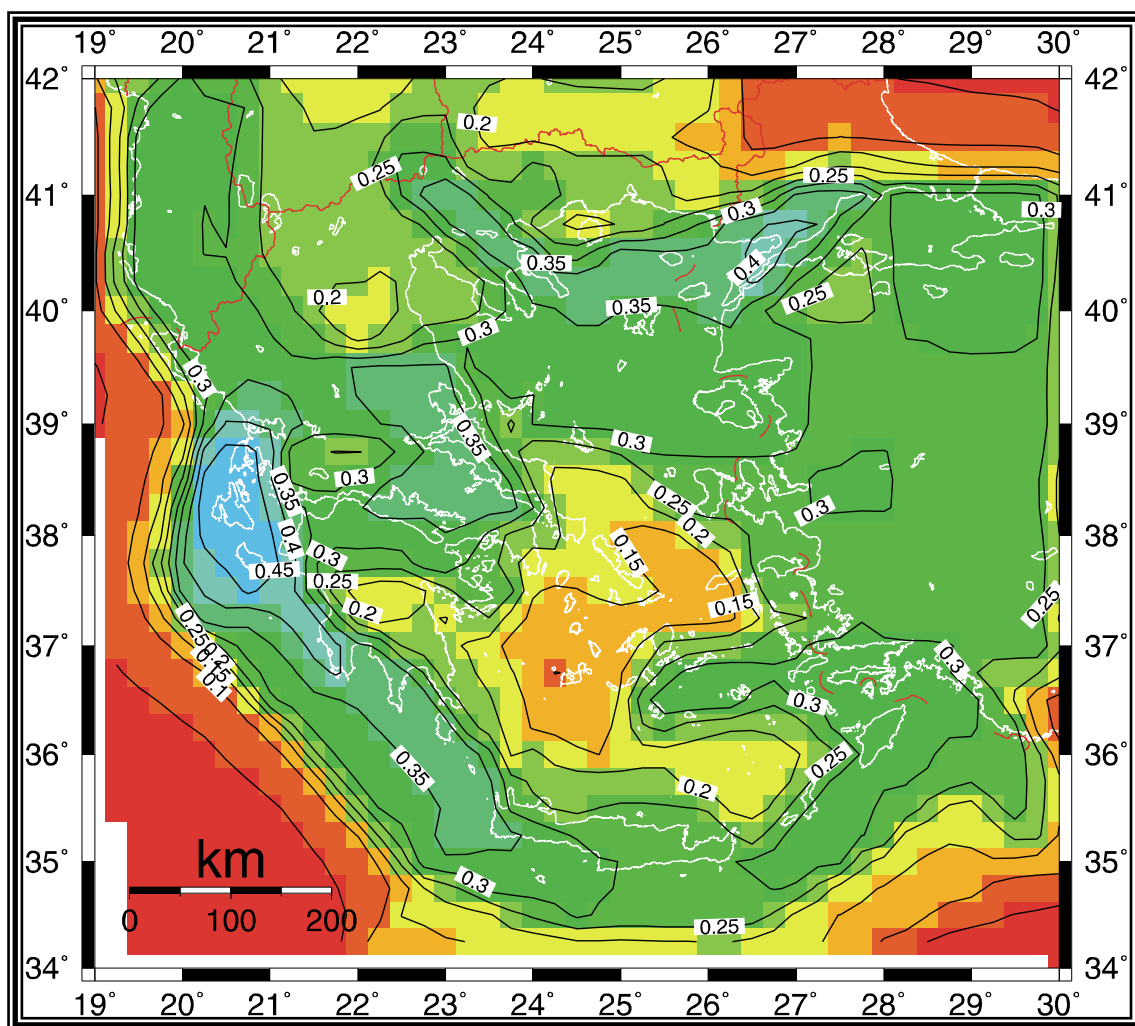




«Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων και εκπόνηση νέου χάρτη  
σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας συμβατού με τον ισχύοντα  
Ελληνικό Αντισεισμικό κανονισμό και τον Ευρωκώδικα 8»

## ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ

Καθ. Α. Τσελέντης  
Δρ .Ε. Σώκος



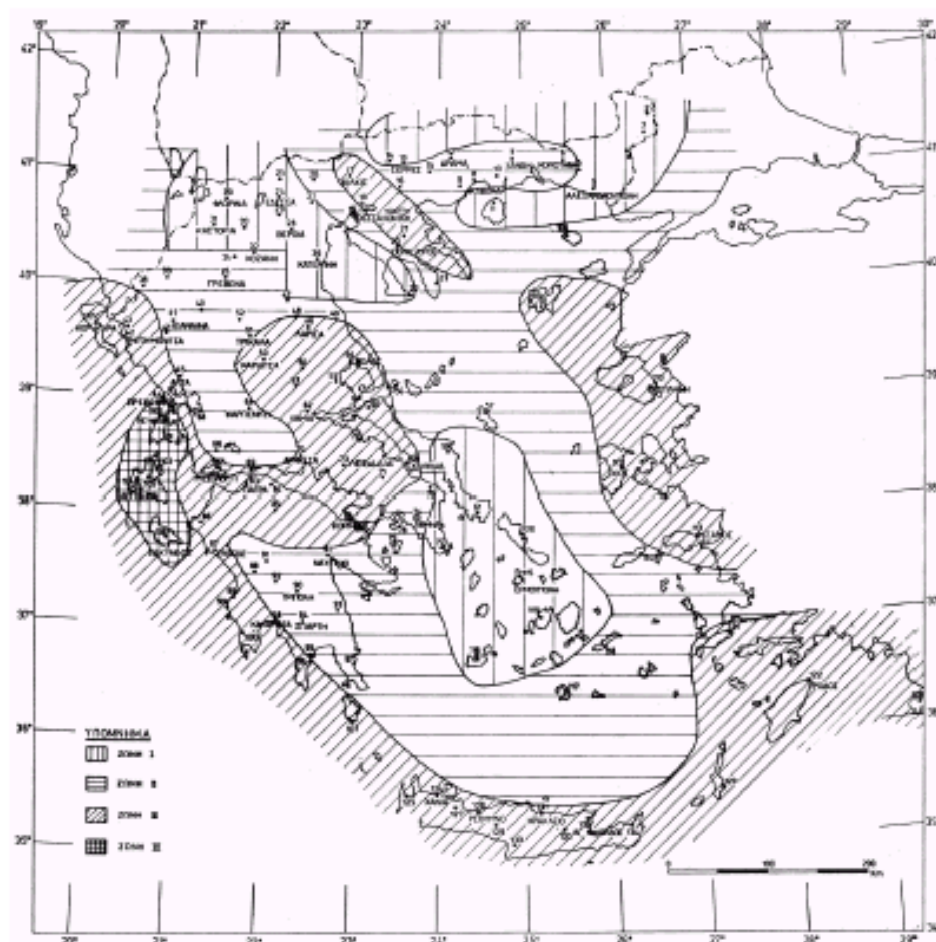
ΠΑΤΡΑ 2002

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>3</b>
<b>1 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ .....</b>	<b>5</b>
1.1 Γενικά.....	5
1.2 Στάδια Υπολογισμού Της Σεισμικής Επικινδυνότητας .....	5
<b>2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ.....</b>	<b>8</b>
2.1 Γενικά.....	8
2.2 Μοντέλο Σεισμικών Πηγών 1 (Papazachos 1990 με τροποποιήσεις) .....	9
2.3 Μοντέλο Σεισμικών Πηγών 2 (Papaioanou & Papazachos 2000) .....	15
2.4 Σεισμικές Πηγές Ενδιαμέσου Βάθους .....	19
<b>3 ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗΣ.....</b>	<b>22</b>
3.1 Γενικά.....	22
3.2 Σχέσεις εξασθένησης για την Ελλάδα .....	23
3.3 Επιλογή σχέσης εξασθένησης για τον υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας .....	25
<b>4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ .....</b>	<b>36</b>
4.1 Γενικά.....	36
4.2 Μεθοδολογία – Υπολογισμός σεισμικής επικινδυνότητας .....	37
4.3 Εφαρμογή Της Μεθόδου - Αποτελέσματα .....	41
4.3.1 Σεισμική επιτάχυνση.....	42
4.3.2 Σεισμική ταχύτητα - μετάθεση .....	42
<b>5 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>59</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>62</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>65</b>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βάση κάθε αντισεισμικού κανονισμού είναι ο χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας. Με βάση τον χάρτη αυτό καθορίζονται στη συνέχεια οι ζώνες ίσης σεισμικής επικινδυνότητας και η σεισμική επιτάχυνση του εδάφους για κάθε ζώνη. Στο Σχ. 1 παρουσιάζεται ο χάρτης των ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδος σύμφωνα με τον ΕΑΚ 2000.



**Σχήμα 1.** Χάρτης Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας (ΕΑΚ 2000).

**Σκοπός του προγράμματος είναι η αναθεώρηση του χάρτη του Σχ.1 ώστε να εμπλουτισθεί με τα νέα σεισμολογικά δεδομένα (π.χ. σεισμός Γρεβενών-Κοζάνης, Αθήνας κλπ) τα οποία προέκυψαν μετά την κατασκευή του, δηλαδή περίπου τα τελευταία δέκα χρόνια.**

Την υλοποίηση του προγράμματος ανέθεσε ο ΟΑΣΠ από κοινού σε πέντε σεισμολογικούς φορείς της χώρας, το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού

Αστεροσκοπείου, το Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών, και τα Εργαστήρια Σεισμολογίας των Πανεπιστημίων Αθηνών, Θεσσαλονίκης και Πατρών.

Κάθε φορέας ακολούθησε διαφορετική μεθοδολογία και τα τελικά αποτελέσματα συναξιολογήθηκαν για να προκύψει ο τελικός χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της χώρας.

Το εργαστήριο σεισμολογίας του Πανεπιστημίου Πατρών χρησιμοποίησε πιθανολογικές μεθόδους για τον υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας της χώρας (Cornell 1968, Bender and Perkins 1987). Οι μέθοδοι αυτοί βασίζονται σε ένα σεισμοτεκτονικό μοντέλο της ευρύτερης περιοχής καθώς και σε σχέσεις εξασθένησης της σεισμικής κίνησης. Τα παραπάνω στοιχεία παρουσιάζουν συχνά μεγάλες διακυμάνσεις κυρίως λόγω του μικρού όγκου των σεισμολογικών δεδομένων που εκ των πραγμάτων είναι δυνατόν να συσσωρευτεί, μια και συνήθως ο χρόνος επανάληψης των σεισμικών γεγονότων είναι πολύ μεγαλύτερος από τον χρόνο παρατήρησης.

Έτσι οι αναλύσεις αυτές δεν έχουν μονοσήμαντο χαρακτήρα και εξαρτώνται σημαντικά από το μοντέλο των σεισμικών ζωνών και την απόσβεση της σεισμικής κίνησης, για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα σεισμοτεκτονικών ζωνών και τρεις διαφορετικές σχέσεις εξασθένησης της σεισμικής κίνησης κατά τους υπολογισμούς. Τελικά τα αποτελέσματα από την παραπάνω ανάλυση συναξιολογήθηκαν και προέκυψε ο τελικός χάρτης της αναμενόμενης σεισμικής επιτάχυνσης.

Στα τελικά αποτελέσματα περιλαμβάνονται επίσης τα παρακάτω:

- Η σεισμική επιτάχυνση με πιθανότητα 90% να μην ξεπεραστεί για τα επόμενα 50 και 100 χρόνια
- Η σεισμική ταχύτητα με πιθανότητα 90% να μην ξεπεραστεί για τα επόμενα 50 και 100 χρόνια
- Η σεισμική μετάθεση με πιθανότητα 90% να μην ξεπεραστεί για τα επόμενα 50 και 100 χρόνια

## **1 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ**

### **1.1 Γενικά**

Σαν *σεισμική επικινδυνότητα* (Seismic Hazard) μιας θέσης ορίζεται η πιθανότητα να ξεπεράσει κάποια εδαφική παράμετρος της εδαφικής κίνησης (μετάθεση, ταχύτητα, επιτάχυνση), μέσα σε ορισμένο χρονικό διάστημα, κάποια δεδομένη τιμή. Η γνώση της σεισμικής επικινδυνότητας μιας περιοχής είναι απαραίτητη για την εκτίμηση του *σεισμικού κινδύνου* (*Seismic Risk*), ο οποίος μπορεί να εκφραστεί σαν συνέλιξη μιας συνάρτησης  $H(e, \mu, s)$ , όπου  $e$  οι ιδιότητες της σεισμικής πηγής,  $\mu$  οι ιδιότητες του μέσου διάδοσης και  $s$  των τοπικών συνθηκών και μιας άλλης συνάρτησης ( $T$ ), που περιγράφει την τρωτότητα των κατασκευών (Τσελέντης 1997).

$$R = H_{(e, \mu, s)} * T$$

Η σεισμική επικινδυνότητα σε μία θέση είναι δυνατόν να περιγραφεί με διάφορες παραμέτρους, π.χ. με την κατανομή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας, μετατόπισης ή ακόμη και της φασματικής επιτάχυνσης ή με καμπύλες επανάληψης κάποιου σεισμικού μεγέθους.

### **1.2 Στάδια Υπολογισμού Της Σεισμικής Επικινδυνότητας**

Η διαδικασία υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας σε μία θέση παρουσιάζεται με τη μορφή διαγράμματος στο Σχ.1.1.

*Το πρώτο στάδιο είναι ο προσδιορισμός των σεισμικών πηγών.* Στο στάδιο αυτό συνδυάζονται τα διαθέσιμα ιστορικά και ενόργανα σεισμολογικά στοιχεία με τα τεκτονικά δεδομένα ώστε να προκύψουν οι ζώνες από τις οποίες αναμένεται η σεισμική δράση στο μέλλον. Είναι κατανοητό ότι οι ζώνες αυτές δεν είναι δυνατόν να οριστούν μονοσήμαντα, επίσης, το σχήμα τους επηρεάζει τη σεισμική επικινδυνότητα οπότε πρέπει κάθε φορά να χρησιμοποιούνται όσο το δυνατόν περισσότερα στοιχεία και να καθορίζονται οι ζώνες με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια ή να χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα μοντέλα ζωνών (Τσελέντης 1997). Για την προσομοίωση των

σεισμικών πηγών χρησιμοποιούνται κυρίως το **επιφανειακό** και το **γραμμικό** μοντέλο. Το επιφανειακό χρησιμοποιείται στην περίπτωση που τα επίκεντρα των σεισμών δεν συνδέονται άμεσα με ένα ρήγμα αλλά καλύπτουν μια ολόκληρη περιοχή. Οι σεισμοί σε αυτή την περίπτωση συνήθως περιγράφονται σαν σημεία τυχαία κατανεμημένα μέσα στην σεισμική ζώνη. Στην περίπτωση του γραμμικού μοντέλου τα επίκεντρα των σεισμών κατανέμονται πάνω σε κάποιο ρήγμα γνωστών χαρακτηριστικών (μήκος, πλάτος, διεύθυνση, κλίση) και οι σεισμοί περιγράφονται σαν διαρρήξεις συγκεκριμένου μήκους τυχαία κατανεμημένες πάνω στο ρήγμα.

*Το δεύτερο στάδιο είναι ο χαρακτηρισμός της σεισμικότητας* κάθε πηγής, ο προσδιορισμός δηλαδή της κατανομής του αριθμού των σεισμών σε σχέση με το μέγεθος ή αλλιώς ο προσδιορισμός των παραμέτρων  $a$ ,  $b$  της σχέσης Gutenberg – Richter για κάθε ζώνη.

$$\text{Log}N=a-bM$$

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται κατάλογοι σεισμών κατάλληλα διορθωμένοι. Πιο συγκεκριμένα ο κατάλογος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των  $a$ ,  $b$  θα πρέπει να έχει υποστεί επεξεργασία ώστε να είναι ομοιογενής, να μην περιέχει προσεισμούς και μετασεισμούς και να είναι γνωστή η πληρότητα του (δηλ. το χρονικό διάστημα για το οποίο περιέχονται στον κατάλογο όλα τα σεισμικά μεγέθη από ένα μέγεθος και πάνω).

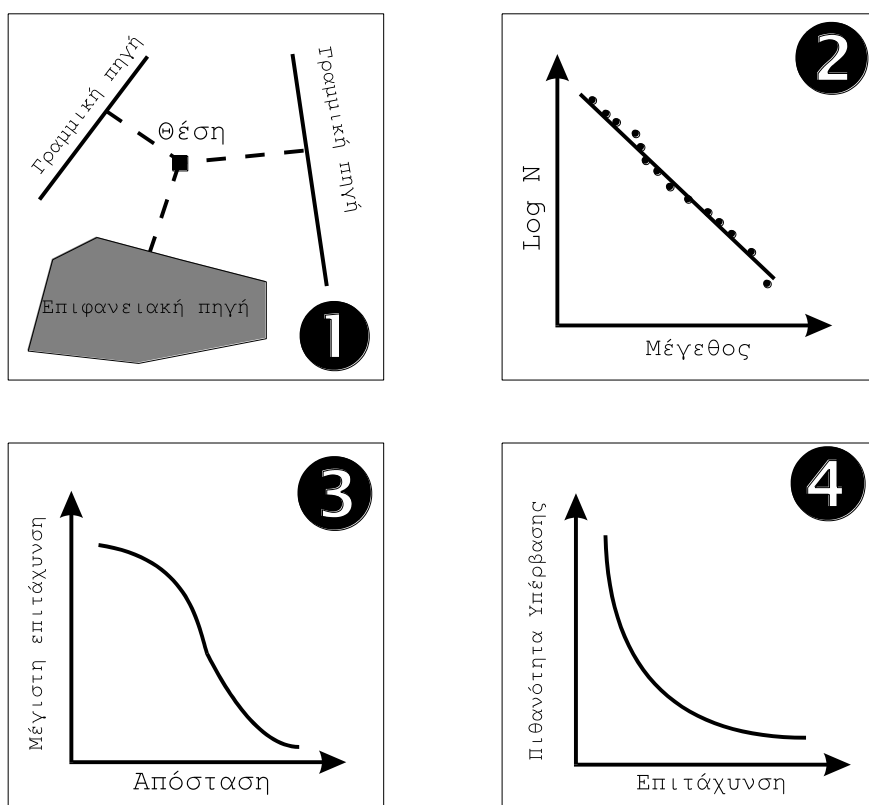
Από την παραπάνω σχέση προκύπτουν οι κυριότερες εξισώσεις που περιγράφουν στατιστικά τη σεισμικότητα. Για παράδειγμα ο ετήσιος αριθμός σεισμών οι οποίοι έχουν μέγεθος  $M$  ή μεγαλύτερο και η μέση περίοδος επανάληψης δίνονται από τις σχέσεις:

$$N_M = \frac{10^a}{10^{bM}} \quad , \quad T_M = \frac{10^{bM}}{10^a}$$

*Το τρίτο στάδιο είναι η επιλογή της σχέσης εξασθένησης*, δηλαδή της μαθηματικής σχέσης που περιγράφει την μεταβολή της σεισμικής παραμέτρου που αναλύουμε με την μεταβολή του σεισμικού μεγέθους, της απόστασης (για την απόσταση μπορεί να χρησιμοποιηθούν πέραν της επικεντρικής και άλλοι ορισμοί όπως η απόσταση από την επιφανειακή διάρρηξη, από το υπόκεντρο κλπ) καθώς και των τοπικών εδαφικών συνθηκών. Οι σχέσεις αυτές έχουν

προκύπτει από στατιστική επεξεργασία μιας βάσης δεδομένων επιταχυνσιογραμμάτων και συνήθως παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις σε περιοχές της βάσης που δεν υπάρχουν αρκετά δεδομένα (π.χ. για μεγάλους σεισμούς σε μικρές αποστάσεις κλπ). Συνήθως το πρόβλημα αυτό ξεπερνιέται με την εισαγωγή στη βάση κατάλληλων καταγραφών από περιοχές με συμβατό γεωτεκτονικό καθεστώς.

*Το τέταρτο στάδιο είναι ο πιθανολογικός υπολογισμός της τελικής τιμής της σεισμικής κίνησης σαν συνάρτηση της σεισμικότητας της σεισμικής πηγής και της σχέσης εξασθένησης. Στις επόμενες παραγράφους αναλύονται διεξοδικά τα διάφορα στάδια υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας.*



**Σχήμα 1.1** Στάδια υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας.

## **2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ**

### **2.1 Γενικά**

Βασική προϋπόθεση για τον σωστό υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας σε μία θέση είναι και η περιγραφή των σεισμικών πηγών που αναμένεται να την επηρεάσουν. Για τον σωστό προσδιορισμό των παραμέτρων κάθε σεισμικής πηγής, (έκταση, σχέση Gutenberg-Richter, μέγιστο μέγεθος) θα πρέπει να συνδυαστούν στοιχεία σεισμολογικά (ενόργανα και ιστορικά), στοιχεία τεκτονικής, γεωμορφολογίας κ. ά.

Για τον Ελλαδικό χώρο έχουν προταθεί αρκετά μοντέλα σεισμικών ζωνών όπως π.χ. Παπαζάχος & Παπαζάχου, 1989, Παπαζάχος, 1993, Parazachos & Parazachou 1997, Παραϊοαννου & Parazachos 2000 κ.ά.

Σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία δεν είναι δυνατόν να υπάρξει μόνο ένας ορισμός της κατανομής των σεισμικών ζωνών σε μια περιοχή ενδιαφέροντος, διότι εξ' ορισμού η έννοια της σεισμικής πηγής περιέχει αρκετά υποκειμενικά στοιχεία, π.χ. διαφορετικοί ερευνητές με τα ίδια δεδομένα συνήθως δίνουν διαφορετική κατανομή των σεισμικών ζωνών.

Τα παραπάνω αποτελούν μια αδυναμία της μεθοδολογίας η οποία ξεπερνιέται με τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων μοντέλων σεισμικών πηγών ή και με την χρήση μεθόδων που δεν απαιτούν τον ορισμό σεισμικών ζωνών (zone free).

Σύμφωνα με τα παραπάνω και για τις ανάγκες του προγράμματος επιλέχθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα σεισμικών πηγών της Ελλάδος. Το πρώτο περιγράφεται από τον Parazachos 1990 και χρησιμοποιήθηκε με τροποποιήσεις ενώ το δεύτερο περιγράφεται από τους Παραϊοαννου and Parazachos 2000 και χρησιμοποιήθηκε χωρίς κάποια τροποποίηση.

Στη συνέχεια θα περιγραφούν λεπτομερώς τα παραπάνω μοντέλα σεισμικών πηγών. Για ευκολία στη συνέχεια τα παραπάνω μοντέλα σεισμικών πηγών θα ονομάζονται σαν μοντέλο 1 και 2.

## **2.2 Μοντέλο Σεισμικών Πηγών 1 (Papazachos 1990 με τροποποιήσεις)**

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας της χώρας κατά την κατάρτιση του αντισεισμικού κανονισμού στις αρχές της δεκαετίας του '90. Είναι δηλαδή το μοντέλο από το οποίο προέκυψε ο χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας του ΕΑΚ 2000 (Σχ.1, Σχ.2.1).

Τα δεδομένα που προέκυψαν στα διάστημα των δέκα χρόνων από τον σχεδιασμό των σεισμικών πηγών του Σχ.2.1 και κυρίως οι σεισμοί της Κοζάνης-Γρεβενών και της Αθήνας (οι οποίοι έγιναν σε περιοχή για την οποία δεν είχε οριστεί συγκεκριμένη σεισμική ζώνη), επιβάλλουν την τροποποίηση των ορίων των ζωνών και την εισαγωγή νέων ώστε να συμβαδίζουν με τα σύγχρονα δεδομένα.

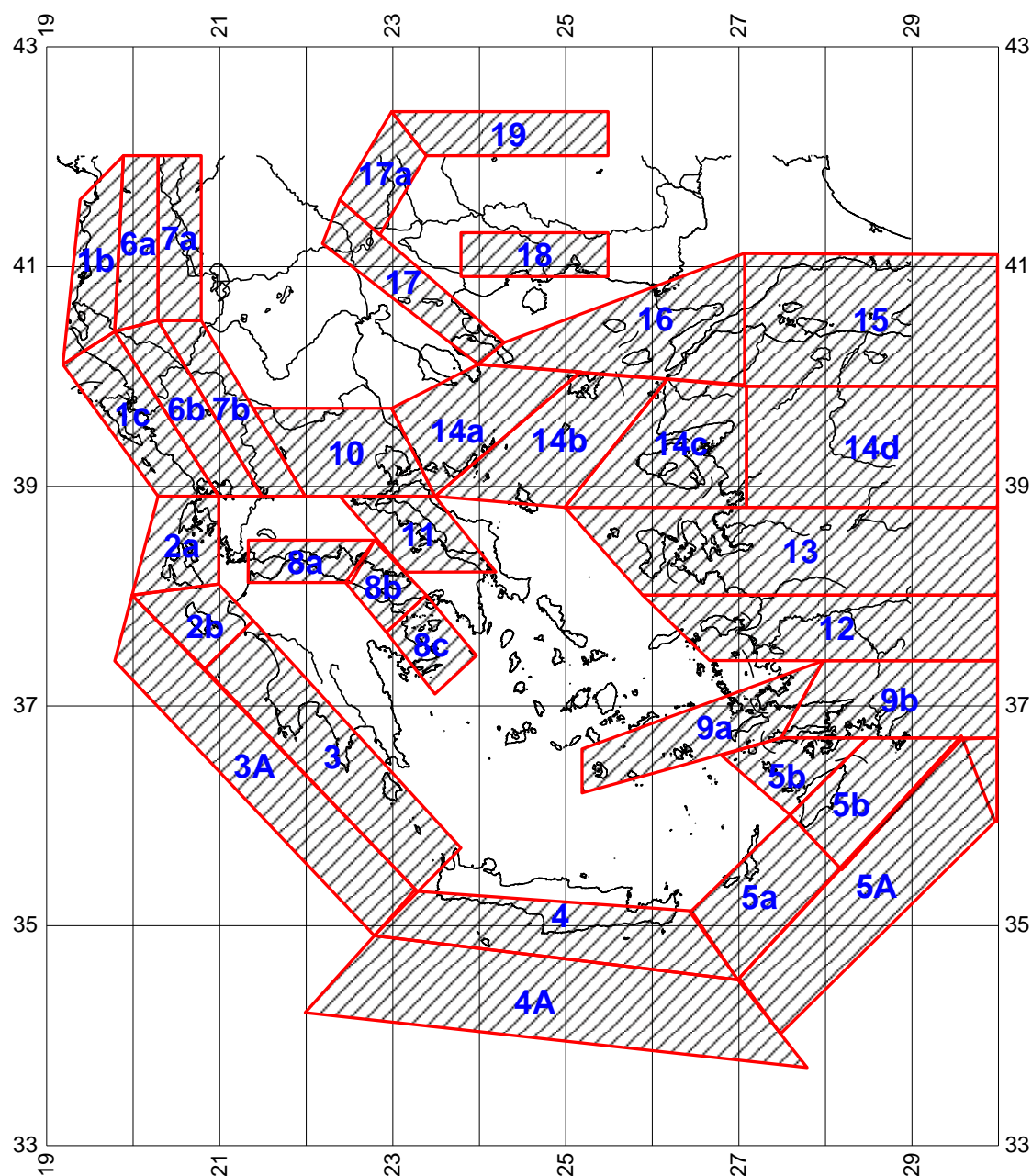
Σε σχέση με τον αρχικό σχεδιασμό, έχουν προστεθεί οι ζώνες, 20, 21, 22, 23, 24 ενώ σε μερικές ζώνες έχουν μεταβληθεί τα όρια τους όπως π.χ. στη ζώνη 4. Για τις ζώνες που προστέθηκαν και για τον υπολογισμό των παραμέτρων  $a$ ,  $b$  χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία που περιέχονται στον κατάλογο των Makropoulos and Burton 1981, Makropoulos et al 1989 μέχρι το 1963 ενώ από το 1963 μέχρι το 2000 χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία του σεισμικού καταλόγου του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου (Papanastasiou et al 2001). Τα δεδομένα εισήχθησαν στο πρόγραμμα Zmap ver.6.0 (Wiemer and Wyss 2000) όπου και έγινε η επεξεργασία τους. Συγκεκριμένα έγιναν τα παρακάτω:

- Αναγωγή του σεισμικού μεγέθους, σε όλο τον τελικό κατάλογο, στην ίδια κλίμακα μεγεθών
- Διαγραφή από τον κατάλογο των σεισμικών ακολουθιών (Declustering) χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του Reasenberg 1985.
- Επιλογή των σεισμών κάθε ζώνης και υπολογισμός των παραμέτρων  $a$ ,  $b$  χρησιμοποιώντας την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων

Στο Παράρτημα της μελέτης δίνεται ο κατάλογος που χρησιμοποιήθηκε ενώ στο Σχ.2.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, με τη μορφή διαγραμμάτων

συσσωρευτικής συχνότητας – σεισμικού μεγέθους, από την παραπάνω ανάλυση.

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι παράμετροι των σεισμικών πηγών που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο 1 ενώ στον Πίνακα 2.2 και στο Σχ.2.2 δίνονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες των ζωνών.



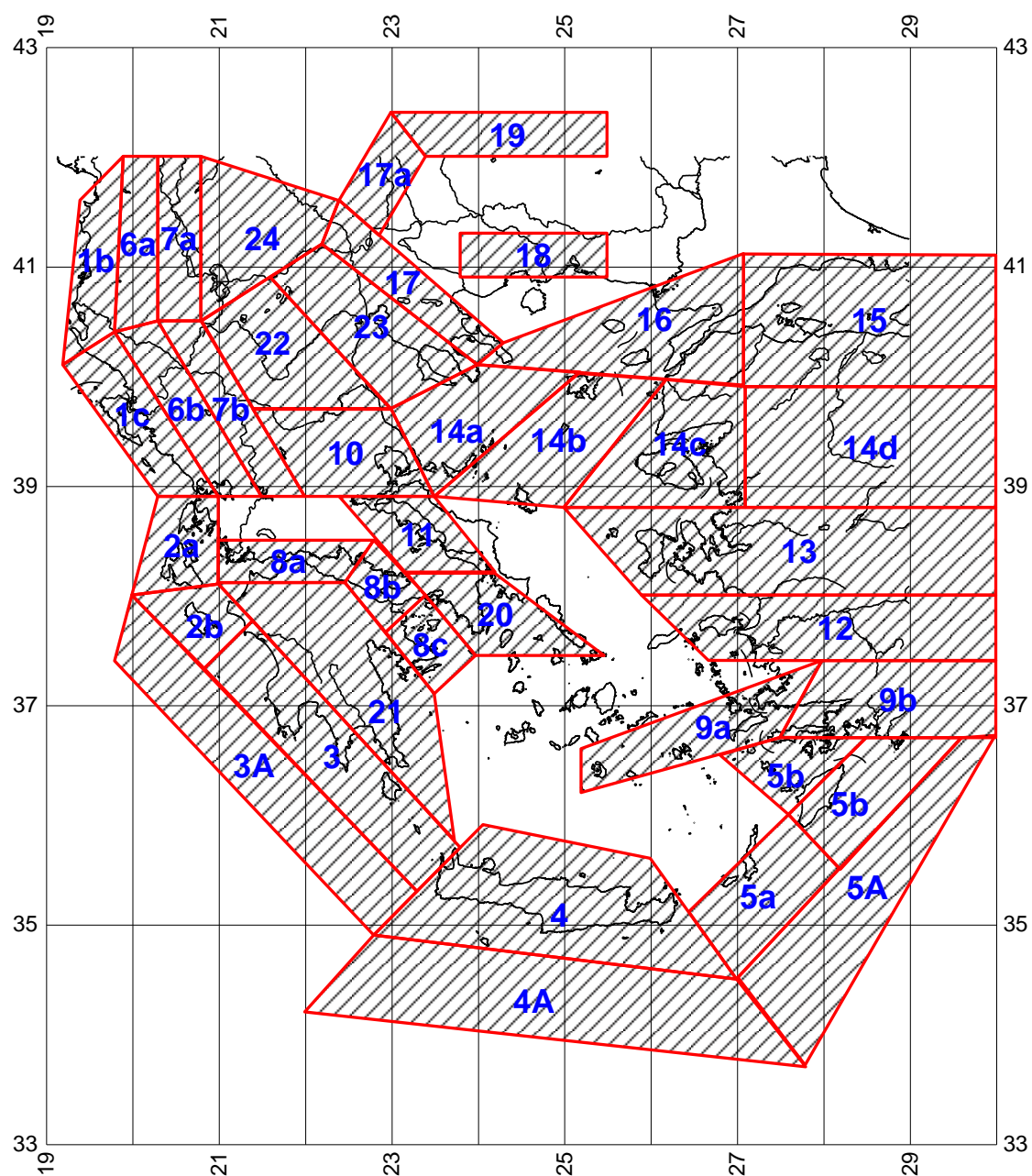
**Σχήμα 2.1.** Σεισμικές ζώνες της Ελλάδος από Parazachos 1990.

**Πίνακας 2.1.** Παράμετροι των σεισμικών πηγών του Μοντέλου 1.

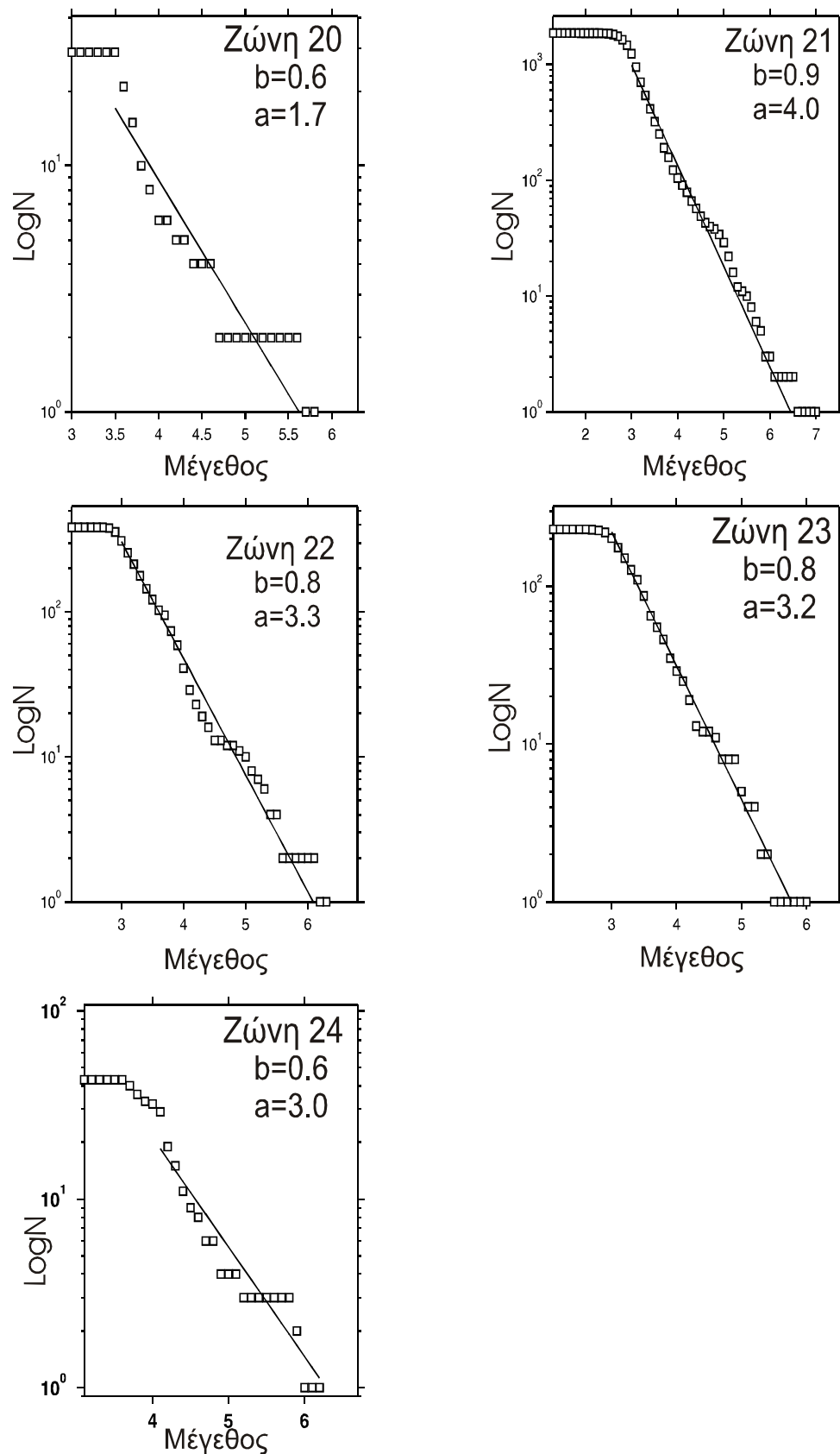
<b>Ζώνη</b>	<b>b</b>	<b>a</b>	<b>Μέγιστο Μέγεθος (<math>M_{max}</math>)</b>
1a	0.80	3.59	7.10
1b	0.80	3.57	6.80
1c	1.00	4.83	7.00
2a	1.00	5.26	7.20
2b	1.00	4.88	7.00
3	1.00	5.34	7.50
3A	1.00	5.09	6.50
4	1.00	4.93	8.00
4A	1.00	4.86	7.00
5a	0.80	3.78	7.10
5b	0.80	3.51	7.20
5A	0.80	3.53	6.90
5B	0.80	3.38	7.00
6a	1.00	4.43	6.40
6b	1.00	4.66	6.40
7a	0.80	3.56	6.50
7b	0.80	3.23	6.40
8a	1.00	4.66	7.10
8b	1.00	4.51	6.80
8c	1.00	4.08	6.30
9a	0.80	3.52	7.50
9b	0.80	3.50	7.00
10	0.80	3.83	7.00
11	0.80	3.59	7.00
12	0.80	3.65	6.90
13	0.80	3.72	7.10
14a	0.80	3.47	7.00
14b	0.80	3.55	7.20
14c	0.80	3.63	7.00
14d	0.80	3.78	7.10
15	0.60	2.68	7.70
16	0.60	2.54	7.50
17	0.60	2.50	7.00
17a	0.60	1.82	7.70
18	0.60	1.97	7.30
19	0.60	2.11	7.00
20	0.60	1.70	6.00
21	0.90	4.00	6.00
22	0.80	3.30	6.90
23	0.80	3.20	6.00
24	0.60	3.00	6.50

**Πίνακας 2.2.** Γεωγραφικά Όρια των ζωνών του Μοντέλου 1.

Ζώνη 1b		Ζώνη 5b		Ζώνη 9b		Ζώνη 17	
40.1	19.2	35.5	28.2	36.7	27.5	40.1	24.0
40.4	19.8	36.7	29.6	36.7	30.0	40.3	24.3
42.0	19.9	36.7	28.5	37.3	30.0	41.6	22.4
41.6	19.4	36.0	27.6	37.3	28.0	41.2	22.2
Ζώνη 1c		Ζώνη 5B		Ζώνη 10		Ζώνη 17a	
38.9	20.3	36.0	27.6	38.9	22.0	41.3	22.9
38.9	21.0	36.7	28.5	38.9	23.5	42.0	23.4
40.4	19.8	36.7	27.5	39.7	23.0	42.4	23.0
40.1	19.2	36.5	26.9	39.7	21.4	41.6	22.4
Ζώνη 2a		Ζώνη 6a		Ζώνη 11		Ζώνη 18	
38.0	20.0	40.4	19.8	38.2	23.1	40.9	23.8
38.1	21.0	40.5	20.3	38.2	24.1	40.9	25.5
38.9	21.0	42.0	20.3	38.9	23.3	41.3	25.5
38.9	20.3	42.0	19.9	38.9	22.3	41.3	23.8
Ζώνη 2b		Ζώνη 6b		Ζώνη 12		Ζώνη 19	
37.3	20.8	38.9	21.0	37.3	26.7	42.0	23.4
37.8	21.4	38.9	21.5	37.3	30.0	42.0	25.5
38.1	21.0	40.5	20.3	38.0	30.0	42.4	25.5
38.0	20.0	40.4	19.8	38.0	25.9	42.4	23.0
Ζώνη 3		Ζώνη 7a		Ζώνη 13		Ζώνη 14a	
35.3	23.3	40.5	20.3	38.0	25.9	38.9	23.5
35.7	23.8	40.5	20.8	38.0	30.0	38.9	23.7
37.8	21.4	42.0	20.3	38.8	30.0	40.0	25.1
37.3	20.8	42.0	20.8	38.8	25.0	40.1	24.0
						40.7	23.0
Ζώνη 24		Ζώνη 7b		Ζώνη 14b		Ζώνη 5A	
42.0	20.7	38.9	21.5	38.9	23.7	34.0	27.5
41.6	22.3	38.9	22.0	38.8	25.0	36.1	30.0
41.1	22.2	40.5	20.8	39.9	26.5	36.7	30.0
40.4	20.8	40.5	20.3	40.0	25.1	36.7	29.6
						34.5	27.0
Ζώνη 3A		Ζώνη 8a		Ζώνη 14c		Ζώνη 20	
34.9	22.8	38.0	21.4	38.8	25.0	37.4	23.9
35.3	23.3	38.0	22.4	38.8	27.1	37.4	25.4
38.0	20.0	38.5	22.8	39.9	27.1	38.2	24.2
37.4	19.8	38.5	21.4	39.9	26.5	38.2	23.1
Ζώνη 4		Ζώνη 8b		Ζώνη 14d		Ζώνη 21	
34.9	22.8	37.6	22.9	38.8	27.1	38.1	21.0
34.5	27.0	38.0	23.4	38.8	30.0	38.1	22.4
35.0	26.5	38.5	22.8	39.9	30.0	37.0	23.5
35.3	23.3	38.0	22.4	39.9	27.1	35.7	23.7
Ζώνη 4A		Ζώνη 8c		Ζώνη 15		Ζώνη 22	
34.2	22.0	37.1	23.5	39.9	27.0	40.5	20.8
33.7	27.8	37.5	23.9	39.9	30.0	40.9	21.6
34.5	27.0	38.0	23.4	41.1	30.0	39.7	23.0
34.9	22.8	37.6	22.9	41.1	27.0	39.7	21.4
Ζώνη 5a		Ζώνη 9a		Ζώνη 16		Ζώνη 23	
34.5	27.0	36.2	25.2	40.1	24.0	40.9	21.6
35.5	28.2	36.7	27.5	39.9	27.0	41.2	22.2
36.0	26.6	37.3	28.0	40.8	27.0	40.0	24.0
35.0	26.5	36.6	24.8	40.3	24.3	39.7	23.0



**Σχήμα 2.2.** Το τροποποιημένο μοντέλο σεισμικών πηγών που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση (Μοντέλο 1).

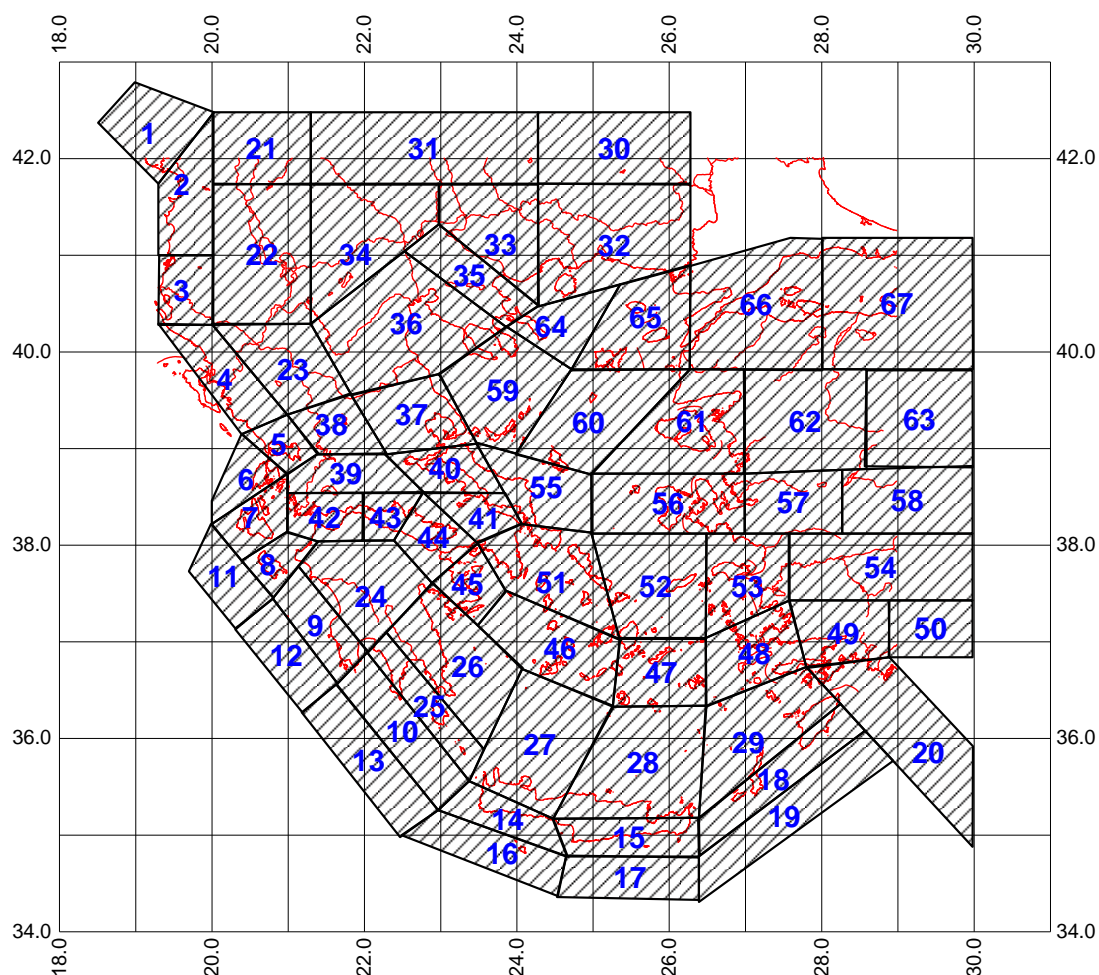


**Σχήμα 2.3.** Διαγράμματα συσσωρευτικής συχνότητας - σεισμικού μεγέθους για τις σεισμικές πηγές 20, 21, 22, 23, 24 του Μοντέλου 1.

### 2.3 Μοντέλο Σεισμικών Πηγών 2 (Papaioannou & Papazachos 2000)

Το δεύτερο μοντέλο σεισμικών ζωνών που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις περιγράφεται από τους Papaioannou & Papazachos 2000. Ο αριθμός των σεισμικών ζωνών είναι μεγαλύτερος σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο (67 ζώνες) και δεν υπάρχουν περιοχές της χώρας στις οποίες να μην αντιστοιχεί κάποια σεισμική ζώνη.

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε χωρίς κάποια τροποποίηση μια και είναι αρκετά σύγχρονο ώστε να περιέχει όλα τα νέα δεδομένα της σεισμικότητας. Στο Σχ.2.4 παρουσιάζεται το μοντέλο 2 ενώ στους Πίνακες 2.3, 2.4 δίνονται οι σεισμικές παράμετροι και τα γεωγραφικά όρια των ζωνών του μοντέλου.



**Σχήμα 2.4** Σεισμικές πηγές του Ελλαδικού χώρου (Papaioannou and Papazachos 2000).

**Πίνακας 2.3** Παράμετροι των σεισμικών πηγών του Μοντέλου 2.

<b>Ζώνη</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>Μέγιστο Μέγεθος (<math>M_{max}</math>)</b>
1	4.2	0.9	7
2	4.4	0.92	6.8
3	4.71	0.95	6.7
4	4.73	0.97	6.9
5	4.77	0.96	6.9
6	5.06	0.99	7.1
7	5.4	0.99	7.3
8	5.05	0.99	7.1
9	4.89	0.98	7.2
10	4.54	0.97	7.1
11	5.17	1.02	7.1
12	4.46	1	6.4
13	4.6	0.99	6.3
14	4.94	0.98	8
15	4.72	1	7.2
16	4.74	0.99	7.8
17	4.77	1.01	7.1
18	4.53	0.96	7
19	4.53	0.97	6.8
20	4.24	0.9	7.8
21	3.9	0.89	6.7
22	4.28	0.91	6.6
23	4.34	0.93	6.4
24	4.49	0.95	6.9
25	4.58	0.96	7.2
26	3.99	0.95	6.8
27	3.93	0.96	6.8
28	4.36	0.98	7.2
29	4.37	0.95	6.8
30	3.23	0.79	6.9
31	3.44	0.83	7.2
32	3.22	0.81	7
33	3.54	0.82	7
34	3.76	0.86	6.6
35	4.04	0.84	7.1
36	3.84	0.87	6.6
37	4.42	0.89	7
38	4.34	0.93	6.8
39	4.35	0.94	7
40	4.19	0.9	7
41	4.31	0.9	7
42	4.54	0.96	6.8
43	4.68	0.93	7
44	4.59	0.92	7

45	4.05	0.92	6.5
46	3.57	0.93	6.5
47	4.31	0.93	7.3
48	4.23	0.92	7
49	4.15	0.89	6.6
50	3.87	0.86	6.3
51	3.41	0.9	6.4
52	3.23	0.89	6.3
53	4.02	0.88	6.8
54	3.93	0.86	6.9
55	3.75	0.88	6.4
56	3.97	0.87	6.8
57	4.01	0.85	7
58	3.7	0.84	6.5
59	3.93	0.86	7.1
60	3.87	0.85	7.1
61	3.98	0.84	7.2
62	3.82	0.83	7
63	3.75	0.82	7
64	3.92	0.83	7.3
65	3.76	0.82	7.1
66	3.74	0.8	7.5
67	3.7	0.81	7.7

**Πίνακας 2.4.** Γεωγραφικά όρια των σεισμικών πηγών του Μοντέλου 2.

<b>01</b>	19.30	41.60	<b>18</b>	26.40	34.70	<b>35</b>	23.90	40.20	<b>52</b>	25.40	37.00
	20.00	42.30		28.57	36.05		24.30	40.40		26.50	37.00
	19.00	42.60		28.25	36.32		23.00	41.20		26.50	38.10
	18.50	42.20		26.40	35.10		22.55	40.95		25.00	38.10
<b>02</b>	19.30	40.90	<b>19</b>	26.40	34.20	<b>36</b>	21.85	39.50	<b>53</b>	26.50	37.00
	20.00	40.90		28.95	35.72		23.00	39.70		27.60	37.40
	20.00	42.30		28.57	36.05		23.90	40.20		27.60	38.10
	19.30	41.60		26.40	34.70		22.55	40.95		26.50	38.10
<b>03</b>	19.30	40.20	<b>20</b>	30.00	34.80	<b>37</b>	22.30	38.90	<b>54</b>	27.60	37.40
	20.00	40.20		30.00	35.90		23.50	39.00		30.00	37.40
	20.00	40.90		28.90	36.80		23.00	39.70		30.00	38.10
	19.30	40.90		27.80	36.70		21.85	39.50		27.60	38.10
<b>04</b>	20.40	39.10	<b>21</b>	20.00	41.60	<b>38</b>	21.40	38.90	<b>55</b>	29.10	38.20
	21.00	39.30		21.30	41.60		22.30	38.90		25.00	38.10
	20.00	40.20		21.30	42.30		21.85	39.50		25.00	38.70
	19.30	40.20		20.00	42.30		21.00	39.30		23.50	39.00
<b>05</b>	21.00	38.70	<b>22</b>	20.00	40.20	<b>39</b>	21.00	38.50	<b>56</b>	25.00	38.10
	21.40	38.90		21.30	40.20		22.80	38.50		27.00	38.10
	21.00	39.30		21.30	41.60		22.50	38.75		27.00	38.72
	20.40	39.10		20.00	41.60		22.30	38.90		25.00	38.70
							21.40	38.90			
							21.00	38.70			
<b>06</b>	20.00	38.40	<b>23</b>	21.00	39.30	<b>40</b>	22.80	38.50	<b>57</b>	27.00	38.10
	20.00	38.20		21.85	39.50		23.90	38.50		28.30	38.10
	21.00	38.70		21.30	40.20		23.50	39.00		28.30	38.75
	20.40	39.10		20.00	40.20		22.30	38.90		27.00	38.72

<b>07</b>	20.40	37.80	<b>24</b>	22.05	36.85	<b>41</b>	23.50	38.00	<b>58</b>	28.30	38.10
	21.00	38.10		22.90	37.60		24.10	38.20		30.00	38.10
	21.00	38.70		22.90	38.00		23.90	38.50		30.00	38.80
	20.00	38.20		21.40	38.00		22.80	38.50		28.30	38.75
				21.15	37.75						
<b>08</b>	20.80	37.40	<b>25</b>	23.40	35.50	<b>42</b>	21.40	38.00	<b>59</b>	24.00	38.90
	21.40	38.00		23.60	35.85		22.00	38.00		24.80	39.80
	21.00	38.10		22.30	37.08		22.00	38.50		23.90	40.20
	20.40	37.80		22.05	36.85		21.00	38.50		23.00	39.70
							21.00	38.10		23.50	39.00
<b>09</b>	21.65	36.53	<b>26</b>	23.60	35.85	<b>43</b>	22.00	38.00	<b>60</b>	25.00	38.70
	22.05	36.85		24.10	36.70		22.40	38.00		26.30	39.80
	21.15	37.75		22.90	37.60		22.80	38.50		24.80	39.80
	20.80	37.40		22.30	37.08		22.00	38.50		24.00	38.90
<b>10</b>	23.00	35.20	<b>27</b>	29.50	35.10	<b>44</b>	22.90	37.60	<b>61</b>	25.00	38.70
	23.40	35.50		25.30	36.30		23.50	38.00		27.00	38.72
	22.05	36.85		24.10	36.70		22.80	38.50		27.00	39.80
	21.65	36.53		23.40	35.50		22.40	38.00		26.30	39.80
<b>11</b>	20.30	37.10	<b>28</b>	24.50	35.10	<b>45</b>	23.50	37.14	<b>62</b>	27.00	38.72
	20.80	37.40		26.40	35.10		23.90	37.50		28.60	38.75
	20.00	38.20		26.50	36.30		23.50	38.00		28.60	39.80
	19.70	37.70		25.30	36.30		22.90	37.60		27.00	39.80
<b>12</b>	21.18	36.22	<b>29</b>	26.40	35.10	<b>46</b>	25.30	36.30	<b>63</b>	28.60	38.75
	21.65	36.53		28.25	36.32		25.40	37.00		30.00	38.80
	20.80	37.40		27.80	36.70		23.90	37.50		30.00	39.80
	20.30	37.10		26.50	36.30		23.50	37.14		28.60	39.80
							24.10	36.70			
<b>13</b>	22.50	34.90	<b>30</b>	24.30	41.55	<b>47</b>	25.30	36.30	<b>64</b>	24.80	39.80
	23.00	35.20		26.30	41.50		26.50	36.30		25.40	40.62
	21.65	36.53		26.30	42.30		26.50	37.00		24.30	40.40
	21.18	36.22		24.30	42.30		25.40	37.00		23.90	40.20
<b>14</b>	23.00	35.20	<b>31</b>	21.30	41.60	<b>48</b>	26.50	36.30	<b>65</b>	24.80	39.80
	24.70	34.70		24.30	41.55		27.80	36.70		26.30	39.80
	24.50	35.10		24.30	42.30		27.60	37.40		26.30	40.80
	23.40	35.50		21.30	42.30		26.50	37.00		25.40	40.62
<b>15</b>	24.70	34.70	<b>32</b>	24.30	40.40	<b>49</b>	27.80	36.70	<b>66</b>	26.30	39.80
	26.40	34.70		26.30	40.80		28.90	36.80		28.00	39.80
	26.40	35.10		26.30	41.50		28.90	37.40		28.00	41.10
	24.50	35.10		24.30	41.55		27.60	37.40		27.60	41.10
										26.30	40.80
<b>16</b>	24.55	34.25	<b>33</b>	24.30	40.40	<b>50</b>	28.90	36.80	<b>67</b>	28.00	39.80
	24.70	34.70		24.30	41.55		30.00	36.80		30.00	39.80
	23.00	35.20		23.00	41.58		30.00	37.90		30.00	41.10
	22.50	34.90		23.00	41.20		28.90	37.90		28.00	41.10
<b>17</b>	26.40	34.20	<b>34</b>	21.30	40.20	<b>51</b>	23.90	37.50			
	26.40	34.70		23.00	41.20		25.40	37.00			
	24.70	34.70		23.00	41.58		25.00	38.10			
	24.55	34.25		21.30	41.60		24.10	38.20			
							23.50	38.00			

## **2.4 Σεισμικές Πηγές Ενδιαμέσου Βάθους**

Τα μοντέλα σεισμικών πηγών που έχουν περιγραφεί στις παραπάνω παραγράφους αντιστοιχούν σε επιφανειακούς σεισμούς του Ελλαδικού χώρου. Πέραν όμως των επιφανειακών σεισμών και κυρίως στην περιοχή του νοτίου Αιγαίου παρατηρούνται και σεισμοί ενδιαμέσου βάθους, εξαιτίας της καταβύθισης της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική στο χώρο αυτό, έτσι έχουν προταθεί και σεισμικές πηγές που αντιστοιχούν στους σεισμούς αυτούς.

Για τους παραπάνω λόγους εκτός των δύο μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν συμπληρωματικά και σεισμικές πηγές για σεισμούς ενδιαμέσου βάθους ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο πλήρης η κάλυψη της σεισμικότητας.

Πρέπει να σημειωθεί ότι εξαιτίας της μεγάλης περιόδου επανάληψης των σεισμών αυτών είναι πολύ δύσκολο να συλλεχθούν αρκετά στοιχεία τόσο για τον υπολογισμό των παραμέτρων της σεισμικότητας κάθε ζώνης όσο κυρίως για τον τρόπο απόσβεσης της σεισμικής κίνησης, παρόλα αυτά όμως αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση οι παραπάνω πηγές, ώστε να υπάρχει μια όσο το δυνατόν καλύτερη περιγραφή της σεισμικότητας στα μοντέλα των σεισμικών ζωνών. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται επτά πηγές, τέσσερις (D1, D2, D3, D4) για την περιοχή της ζώνης Benioff από βάθος 60-100km και άλλες τρεις (D5, D6, D7) για το βαθύτερο μέρος 100-160km της ζώνης καταβύθισης.

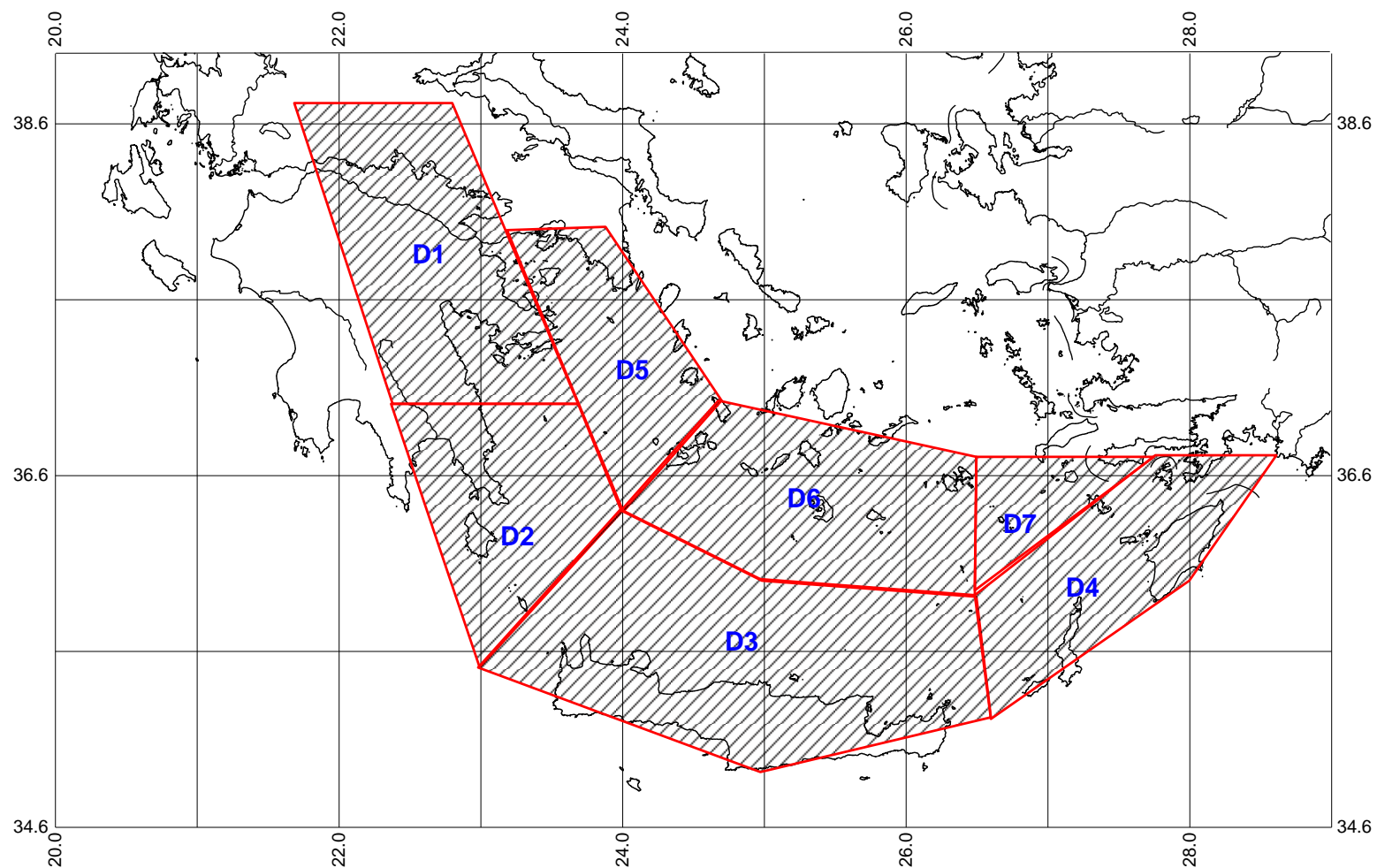
Στον Πίνακα 2.5 δίνονται οι σεισμικές παράμετροι των επτά σεισμικών πηγών ενδιαμέσου βάθους όπως περιγράφονται από τους Παραϊοαννου & Parazachos 2000 ενώ στον Πίνακα 2.6 και στο Σχ.2.5 δίνονται τα γεωγραφικά όρια των ζωνών.

**Πίνακας 2.5** Παράμετροι των σεισμικών πηγών ενδιαμέσου βάθους.

Ζώνη	A	b	Μέγιστο Μέγεθος ( $M_{max}$ )
D1	2.28	0.56	7.5
D2	1.80	0.56	7.5
D3	2.35	0.56	7.8
D4	2.28	0.56	7.5
D5	2.75	0.75	7.0
D6	3.08	0.75	7.0
D7	2.87	0.75	6.2

**Πίνακας 2.6.** Γεωγραφικά όρια των σεισμικών πηγών ενδιαμέσου βάθους.

D1		D5	
21.69	38.71	23.19	37.99
22.80	38.71	23.88	38.00
23.69	37.00	24.70	37.02
22.38	37.00	24.00	36.39
D2		D6	
22.37	37.00	23.99	36.39
23.69	37.00	24.68	37.02
23.99	36.39	26.50	36.70
22.99	35.50	26.48	35.91
		24.97	36.00
D3		D7	
22.98	35.50	26.48	35.94
23.98	36.39	26.50	36.70
24.98	35.99	27.75	36.70
26.50	35.90		
26.60	35.22		
24.97	34.90		
D4			
26.60	35.21		
26.48	35.91		
27.76	36.71		
28.61	36.71		
28.00	35.99		



**Σχήμα 2.5** Σεισμικές πηγές ενδιαμέσου βάθους για την περιοχή του νοτίου Αιγαίου (Papaioanou & Papazachos 2000).

### **3 ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗΣ**

#### **3.1 Γενικά**

Το επόμενο στάδιο στην διαδικασία υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας είναι η επιλογή της κατάλληλης σχέσης εξασθένησης. Δηλαδή μιας μαθηματικής σχέσης η οποία περιγράφει την μεταβολή της εδαφικής κίνησης (όπου η εδαφική κίνηση μπορεί να περιγράφεται σαν επιτάχυνση, ταχύτητα, μετάθεση, φασματική επιτάχυνση κλπ) σε σχέση με την απόσταση (επικεντρική, υποκεντρική κλπ), το μέγεθος του σεισμού και τις τοπικές εδαφικές συνθήκες.

Η επιλογή της σχέσης εξασθένησης αποτελεί, ίσως το πιο σημαντικό στάδιο στην μελέτη της σεισμικής επικινδυνότητας και οι σύγχρονες σχέσεις εκτός των παραπάνω μεταβλητών έχουν αρχίσει να εισάγουν και άλλα στοιχεία όπως π.χ. το μηχανισμό γένεσης κλπ. Επίσης οι τοπικές εδαφικές συνθήκες διαχωρίζονται σε περισσότερες κατηγορίες πέραν του απλού διαχωρισμού ανάμεσα σε υπόβαθρο και εδαφικό σχηματισμό.

Όπως είναι εύκολα κατανοητό μια σχέση εξασθένησης προκύπτει από την επεξεργασία ενός μεγάλου όγκου δεδομένων τα οποία προέρχονται από τις καταγραφές της ισχυρής εδαφικής κίνησης σε διάφορες αποστάσεις και για διάφορα σεισμικά μεγέθη. Στην συνέχεια με μαθηματική ανάλυση προκύπτει η συνάρτηση η οποία περιγράφει όσο το δυνατόν πιο σωστά την εξάρτηση της εδαφικής παραμέτρου από τις μεταβλητές που επιλέγει ο ερευνητής. Προκύπτουν έτσι πάντα, κάποια σφάλματα και περιορισμοί στην ακρίβεια της κάθε σχέσης εξασθένησης τα οποία θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη πριν την εφαρμογή της.

Η επιλογή της καταλληλότερης σχέσης για μια μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας είναι πολύ δύσκολη και πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή, ενώ σε κάθε περίπτωση είναι σωστό να μελετώνται παραπάνω από μία σχέσεις. Γενικά θα πρέπει η σχέση που θα επιλεγεί να βασίζεται σε δεδομένα προερχόμενα από την περιοχή για την οποία θέλουμε να μελετήσουμε την

σεισμική επικινδυνότητα ή αν αυτό δεν είναι δυνατόν λόγω έλλειψης στοιχείων τουλάχιστον από μια περιοχή με ανάλογο σεισμοτεκτονικό καθεστώς.

### **3.2 Σχέσεις εξασθένισης για την Ελλάδα**

Για τον Ελλαδικό χώρο έχουν προταθεί κατά καιρούς αρκετές σχέσεις εξασθένισης και η έρευνα πάνω στο αντικείμενο αυτό αναμένεται να συνεχιστεί καθώς προκύπτουν συνεχώς νέα δεδομένα από τα Εθνικά δίκτυα επιταχυνσιογράφων του ΙΤΣΑΚ και του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου αλλά και από άλλα μικρότερα δίκτυα τα οποία έχουν τοποθετηθεί κοντά σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας .

Η πρώτη προσπάθεια για την εισαγωγή μίας σχέσης εξασθένισης, για την επιτάχυνση του εδάφους, έγινε από τους Makropoulos and Burton 1985a,b η σχέση αυτή υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος οκτώ σχέσεων εξασθένισης που είχαν δημοσιευθεί την εποχή εκείνη και το τελικό αποτέλεσμα ήταν συμβατό με τα λίγα Ελληνικά δεδομένα που υπήρχαν.

Στη συνέχεια δημοσιεύτηκαν αρκετές σχέσεις εξασθένισης τόσο για επιτάχυνση, ταχύτητα, μετάθεση όσο και για σεισμική ένταση, φασματική επιτάχυνση, φασματική ψευδοταχύτητα. Τέτοιες σχέσεις έχουν δημοσιευθεί από τους Θεοδουλίδης 1988, Ambraseys 1990, Θεοδουλίδης 1991, Παναγιωτοπούλου 1991, Tselentis 1992, Theodulidis & Papazachos, 1992, Ambraseys 1995, Ambraseys 1996, Μάργαρης κ.ά. 2001 κ.ά.

Οι παραπάνω σχέσεις περιγράφουν την εξασθένιση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας ή μετάθεσης, υπάρχουν όμως και σχέσεις οι οποίες ασχολούνται με την εξασθένιση της φασματικής επιτάχυνσης ή ψευδοταχύτητας, όπως των Theodulidis & Papazachos 1994. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι παραπάνω σχέσεις εξασθένισης.

Μερικές εργασίες περιλαμβάνουν στην επεξεργασία τους πέραν των Ελληνικών δεδομένων και ένα μικρό αριθμό καταγραφών από άλλες χώρες (π.χ. Ιαπωνία, Αμερική) ώστε να συμπληρωθεί η βάση δεδομένων.

Οι σχέσεις που έχουν προταθεί από τους Ambraseys & Simpson 1996, Ambraseys et al, 1996 χρησιμοποιούν δεδομένα από Ευρωπαϊκές χώρες (με ένα μεγάλο μέρος από τα δεδομένα να προέρχεται από την Ελλάδα), επομένως είναι εφαρμόσιμες και στην Ελλάδα. Οι σχέσεις αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

Είναι φυσικό κάθε μία από τις παραπάνω σχέσεις να ισχύει κυρίως, για τα συγκεκριμένα δεδομένα τα οποία είχε στη διάθεσή του ο κάθε ερευνητής. Επίσης, οι σχέσεις αυτές εξελίσσονται με το χρόνο και όσο συσσωρεύονται νέα στοιχεία προκύπτουν νεώτερες και πιο ακριβείς σχέσεις.

Περιπτώσεις σεισμών οι οποίοι είναι έξω από τα όρια που θέτουν τα δεδομένα είναι δυνατόν να παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις. Έτσι π.χ. η σχέση των Theodulidis & Papazachos, 1992 ισχύει για σεισμούς  $4.5 < M < 7.0$  και για επικεντρικές αποστάσεις από 9-130km, ενώ των Ambraseys et al 1996 ισχύει για σεισμούς  $4.0 < M < 7.5$  και για αποστάσεις έως 200km. Επιπλέον, η μεθοδολογία που ακολουθείται από τους ερευνητές στον υπολογισμό της κάθε σχέσης διαφέρει σε μερικά σημεία π.χ. κάποιος ερευνητής μπορεί να μην επιλέξει την επικεντρική απόσταση αλλά την πιο κοντινή απόσταση στο ρήγμα κ.λ.π.

**Πίνακας 3.1.** Σχέσεις εξασθένησης της μέγιστης επιτάχυνσης, ταχύτητας, μετάθεσης που έχουν προταθεί για την Ελλάδα, δίνονται επίσης τα μεγέθη σεισμών για τα οποία ισχύουν οι παραπάνω σχέσεις καθώς και οι εργασίες στις οποίες έχουν δημοσιευθεί.

Σχέση Εξασθένησης	Μέγεθος	Εργασία
$a=2164e^{0.7M_s}(R+20)^{-1.8}$		Makropoulos & Burton 1985
$\log a = 1.83 + 0.55 M_s - 1.83 \log(R+15)$ $\log v = -0.40 + 0.63 M_s - 1.65 \log(R+10)$	4.5-7.5	Θεοδουλίδης 1988
$\log a = -0.789 + 0.2128M - \log R - 0.00255R$		Ambraseys 1990
$\log a = 1.77 + 0.49M - 1.65 \log(R+15)$ $\log v = -0.39 + 0.61M - 1.62 \log(R+10)$		Θεοδουλίδης 1991

$\log a_h = -1.023 + 0.226M - \log R - 0.00067R + 0.27P$ $\log a_v = -1.32 + 0.2227M - \log R - 0.00174R + 0.25P$	4.0-7.0	Παναγιωτοπούλου 1991
$\log a = 3.88 + 1.12M_s - 1.65 \ln(R+15) + 0.41S + 0.71P$ $\log v = -0.79 + 1.41M_s - 1.62 \ln(R+10) - 0.22S + 0.80P$ $\log d = -5.92 - 2.08M_s - 1.85 \ln(R+5) - 0.97S + 1.23P$	4.5-7.0	Theodoulidis & Papazachos 1992
$\ln a = -1.9 + 1.1M - 1.88 \ln(R + 1.09e^{0.44M})$		Tselentis 1992
$\ln(a_h) - 0.47 + 1.15M_w - 1.22 \ln R + 0.64P$	1.7-5.1	Theodoulidis 1998
$\ln PGA = 4.16 + 0.69M_w - 1.24 \ln(R+6) + 0.12S \pm 0.70$	4.5-7.0	Margaris et al 2001

**Πίνακας 3.2** Σχέσεις εξασθένησης που έχουν προταθεί από τους Ambraseys & Simpson, 1996 και τους Ambraseys et al, 1996 για την Ευρώπη.  $a_h$  – οριζόντια επιτάχυνση του εδάφους,  $a_v$  – κατακόρυφη επιτάχυνση του εδάφους.

Σχέση Εξασθένησης	Μέγεθος
$\log a_h = -1.39 + 0.266M_s - 0.922 \log R + 0.25P$ $\log a_h = -1.48 + 0.266M_s - 0.922 \log R + 0.117S_A + 0.124S_s + 0.25P$ $\log a_v = -1.67 + 0.273M_s - 0.954 \log R + 0.27P$ $\log a_v = -1.74 + 0.273M_s - 0.954 \log R + 0.076S_A + 0.058S_s$	4.0-7.5

### **3.3 Επιλογή σχέσης εξασθένησης για τον υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας**

Για τον τελικό υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω σχέσεις:

1.  $\log a = 3.88 + 1.12M_s - 1.65 \ln(R+15) + 0.41S + 0.71P$  (Theodoulidis and Papazachos 1992)
2.  $\log a_h = -1.39 + 0.266M_s - 0.922 \log R + 0.25P$  (Ambraseys et al 1996)
3.  $\ln PGA = 4.16 + 0.69M_w - 1.24 \ln(R+6) + 0.12S \pm 0.70$  (Μάργαρης κ.ά. 2001)

Η επιλογή τριών σχέσεων εξασθένισης έγινε ώστε να αυξηθεί η αξιοπιστία των υπολογισμών, όπως και στην περίπτωση του μοντέλου σεισμικών πηγών, μια και δεν είναι δυνατόν να υπάρξει μονοσήμαντη περιγραφή της εξασθένισης, τουλάχιστον με τα στοιχεία που είναι διαθέσιμα έως τώρα.

Οι παραπάνω σχέσεις επιλέχθηκαν διότι περιλαμβάνουν στις αναλύσεις τους τα πιο πλήρη δεδομένα για τον Ελλαδικό χώρο και επομένως έχουν εξαχθεί και τα πιο ασφαλή συμπεράσματα. Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε η σχέση των Theodulidis and Papazachos 1992 παράλληλα με την πολύ νεώτερη σχέση των Μάργαρης κ.ά. 2001 μια και η δεύτερη είναι πολύ πρόσφατη, δεν έχει ελεγχθεί η αξιοπιστία της. Επίσης χρησιμοποιήθηκε και η σχέση των Ambraseys et al 1996 στην οποία έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετά Ελληνικά δεδομένα σε συνδυασμό με δεδομένα από άλλες ευρωπαϊκές χώρες.

Στα σχήματα 3.1, 3.2, 3.3 παρουσιάζονται οι παραπάνω σχέσεις για σεισμό 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5 ενώ στα σχήματα 3.4, 3.5, 3.6 γίνεται σύγκρισή τους για σεισμούς μεγέθους 5, 6, 7.

Επιχειρώντας μία σύγκριση των σχέσεων παρατηρούμε μία σημαντική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων, κυρίως ανάμεσα στις σχέσεις των Theodulidis and Papazachos 1992 και Μάργαρης κ.ά. 2001 με την αύξηση του σεισμικού μεγέθους, το γεγονός αυτό έχει αποδοθεί από τους Μάργαρης κ.ά. 2001, στην ισχυρή εξάρτηση της σχέσης των Theodulidis and Papazachos 1992 από τον συντελεστή μεγέθους.

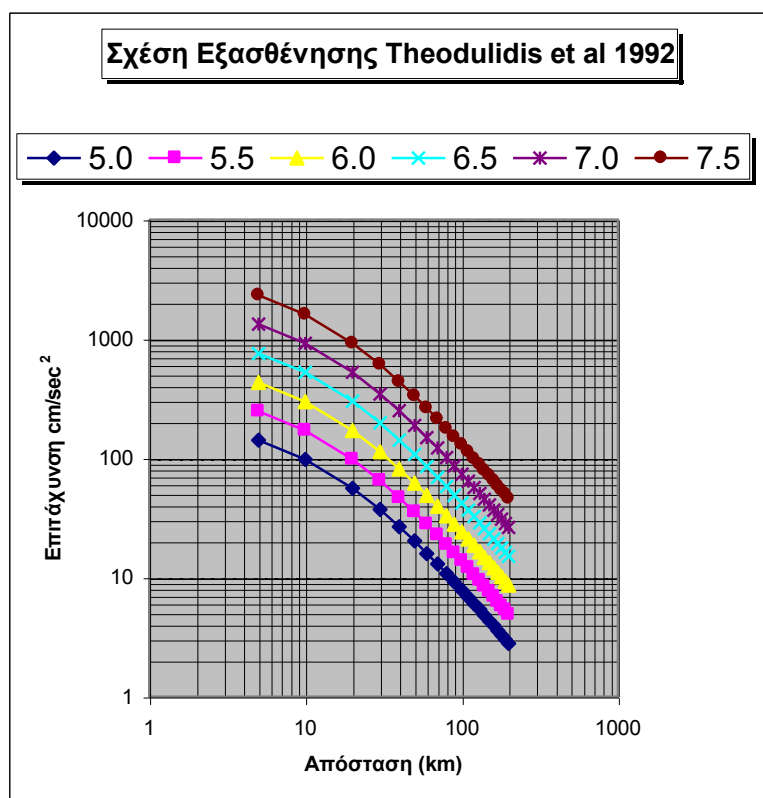
Οι διαφορές που προκύπτουν ανάμεσα στην σχέση των Ambraseys et al 1996 και σε αυτές των Theodulidis and Papazachos 1992 και Μάργαρης κ.ά. 2001 κρίνονται ικανοποιητικές για αποστάσεις μέχρι 50km ενώ αυξάνονται με την αύξηση της απόστασης. Οι Μάργαρης κ.ά. 2001 αποδίδουν τις παραπάνω διαφορές στην χρησιμοποίηση δεδομένων από διαφορετικά σεισμοτεκτονικά περιβάλλοντα καθώς και στον διαφορετικό ορισμό της απόστασης στον καθορισμό των παραπάνω σχέσεων εξασθένισης.

Για τους υπολογισμούς της σεισμικής επικινδυνότητας ως προς την εδαφική ταχύτητα και μετάθεση χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι αντίστοιχες σχέσεις που περιέχονται στις εργασίες 1 και 3 μια και στην εργασία των Ambraseys et al 1996 δεν περιλαμβάνονται σχέσεις εξασθένισης για την ταχύτητα και την μετάθεση.

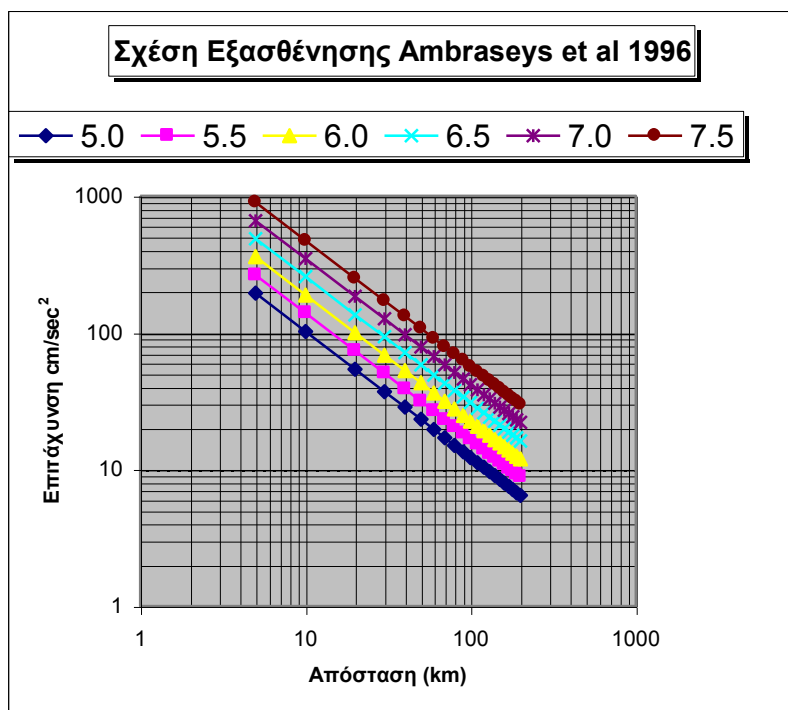
Στα σχήματα 3.7, 3.8, 3.12, 3.13 παρουσιάζονται οι παραπάνω σχέσεις για σεισμό 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5 ενώ στα σχήματα 3.9, 3.10, 3.11, 3.14, 3.15, 3.16 γίνεται σύγκρισή τους για σεισμούς μεγέθους 5, 6, 7.

Οι διαφορές που παρουσιάζονται ανάμεσα στις δύο σχέσεις είναι αρκετά σημαντικές με πιο σημαντικές αυτές για την εδαφική μετάθεση, κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο, μια και οι σχέσεις εξασθένισης της εδαφικής μετάθεσης έχουν πάντα μεγάλα σφάλματα κατά την διαδικασία υπολογισμού τους.

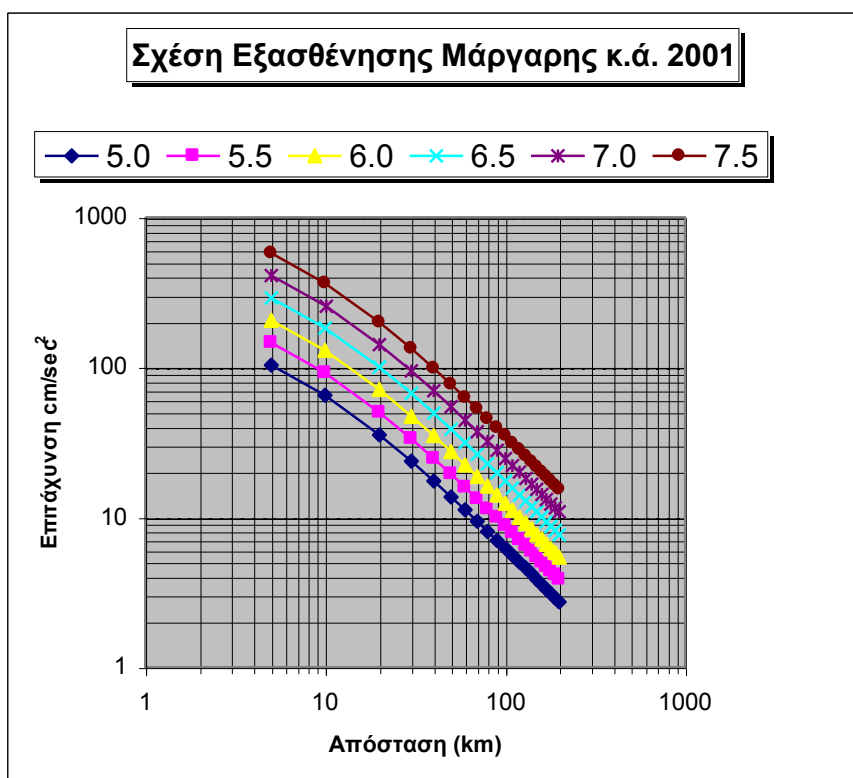
Γενικά η σχέση εξασθένισης των Μάργαρης κ.ά. 2001 δίνει μικρότερες τιμές για την εδαφική ταχύτητα, μετάθεση σε σχέση με αυτή των Theodulidis and Papazachos 1992, μπορούμε δε να αποδώσουμε τις παραπάνω διαφορές στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις.



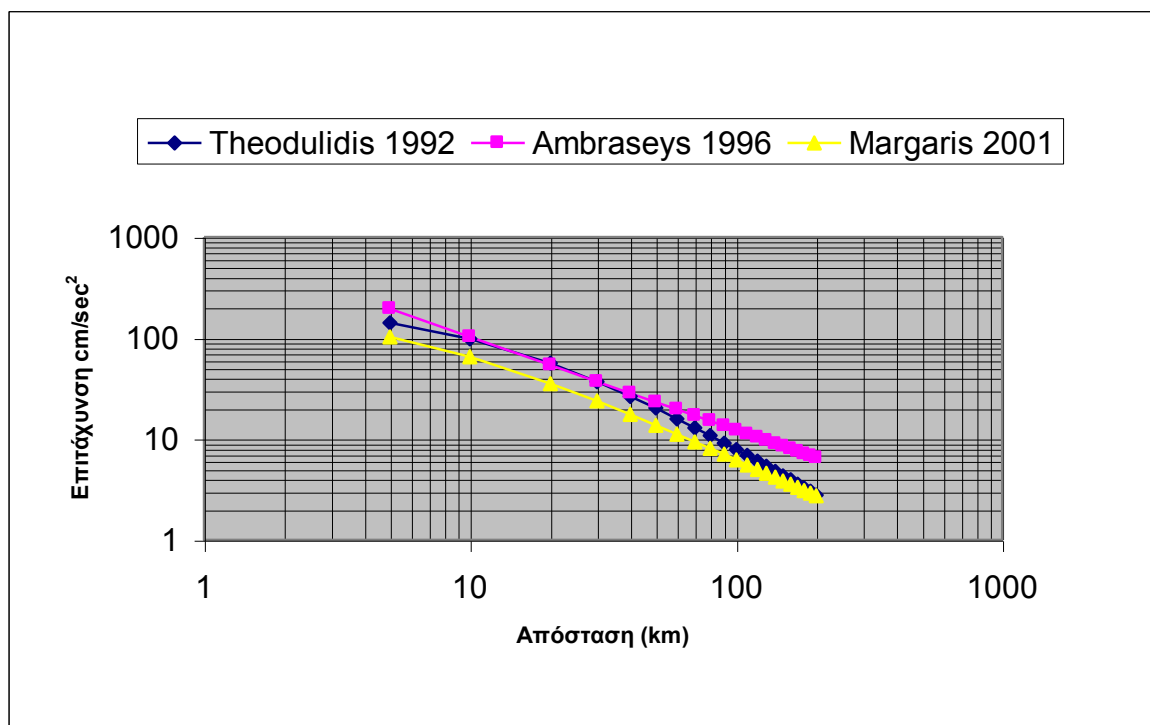
**Σχήμα 3.1** Η σχέση εξασθένησης της εδαφικής επιτάχυνσης των Theodulidis and Papazachos 1992 για διάφορα σεισμικά μεγέθη.



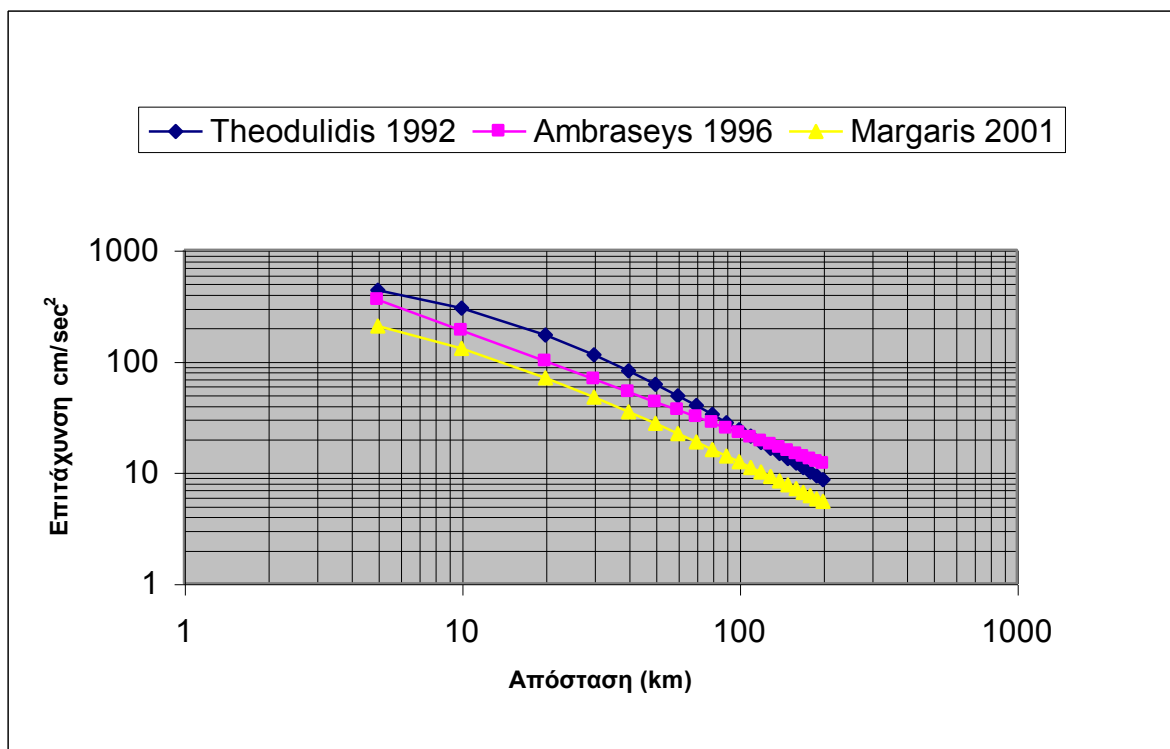
**Σχήμα 3.2** Η σχέση εξασθένησης της εδαφικής επιτάχυνσης των Ambraseys et al 1996 για διάφορα σεισμικά μεγέθη.



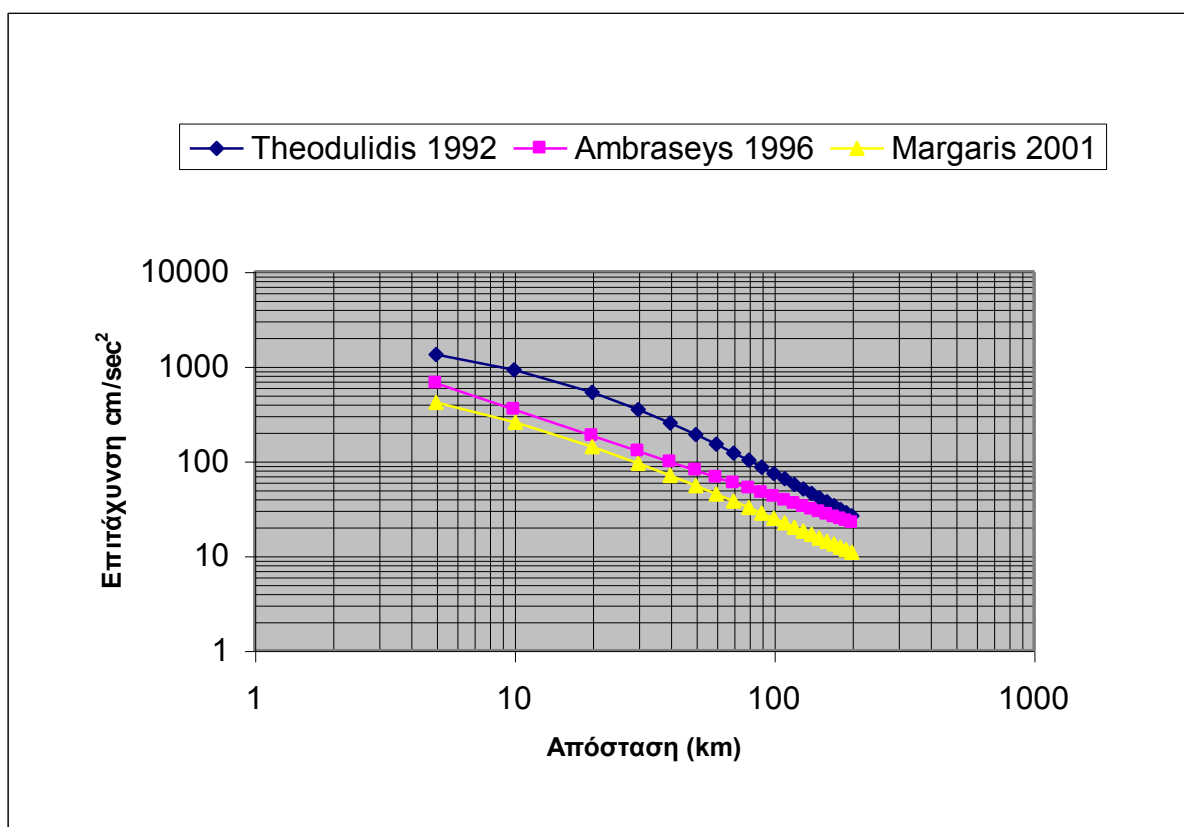
**Σχήμα 3.3** Η σχέση εξασθένισης της εδαφικής επιτάχυνσης των Μάργαρης κ.ά. 2001 για διάφορα σεισμικά μεγέθη.



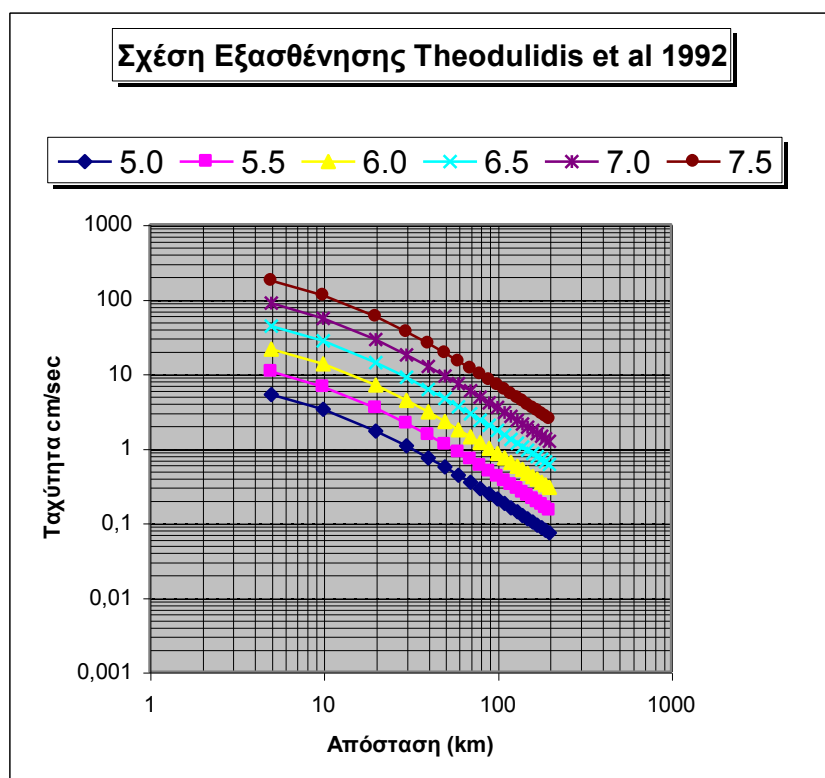
**Σχήμα 3.4** Σύγκριση των σχέσεων εξασθένισης της εδαφικής επιτάχυνσης για σεισμό  $M=5$ .



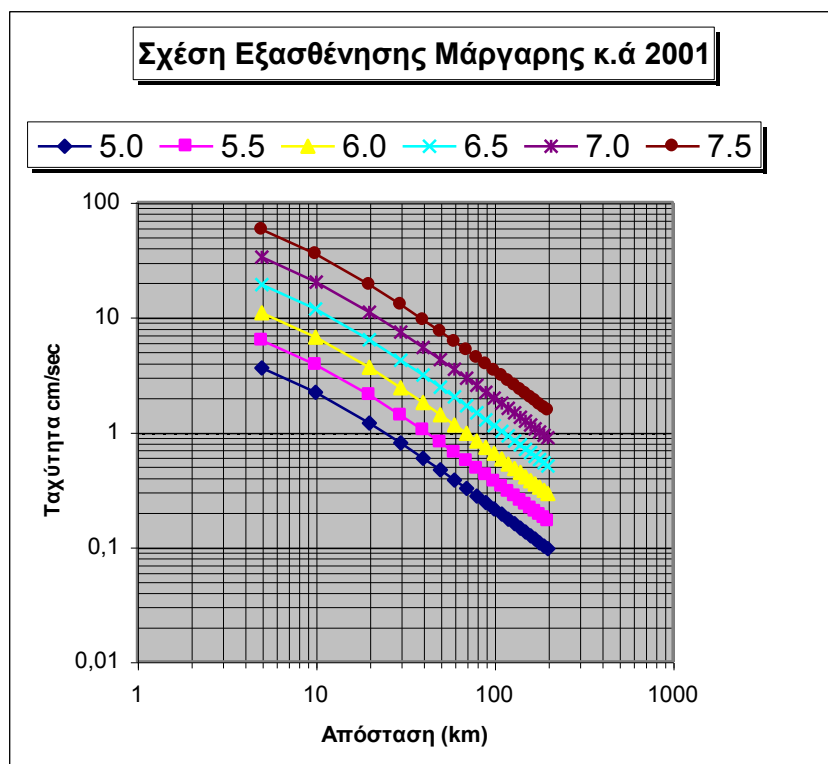
**Σχήμα 3.5** Σύγκριση των σχέσεων εξασθένισης της εδαφικής επιτάχυνσης για σεισμό M=6.



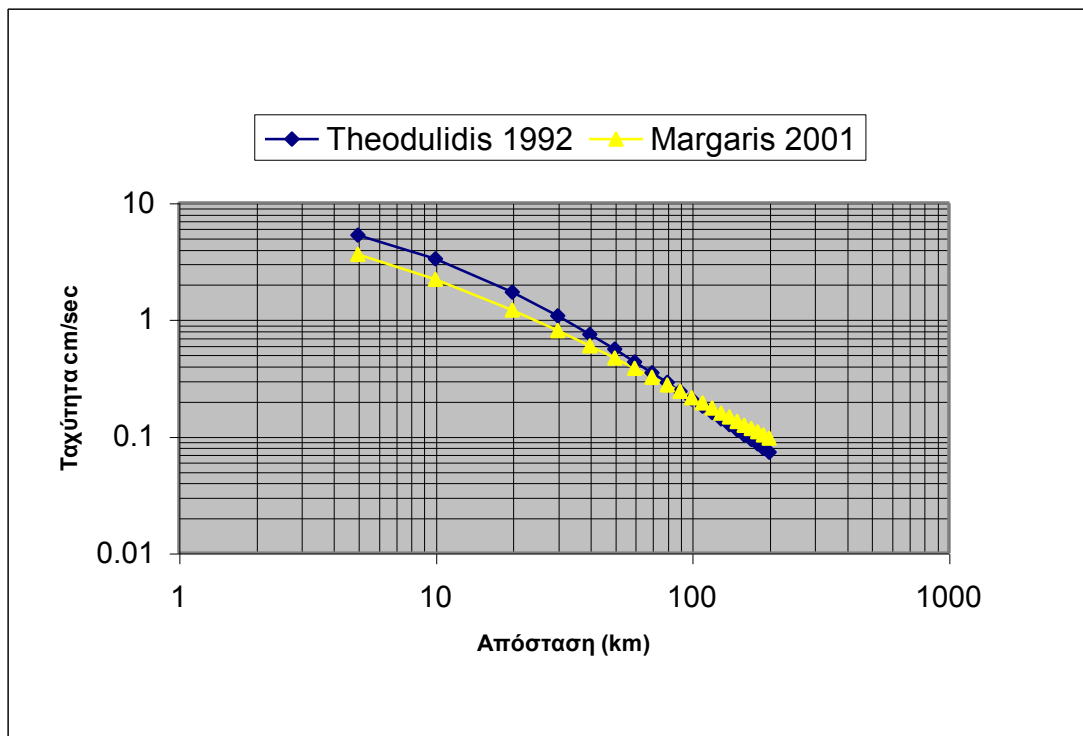
**Σχήμα 3.6** Σύγκριση των σχέσεων εξασθένισης της εδαφικής επιτάχυνσης για σεισμό M=7.



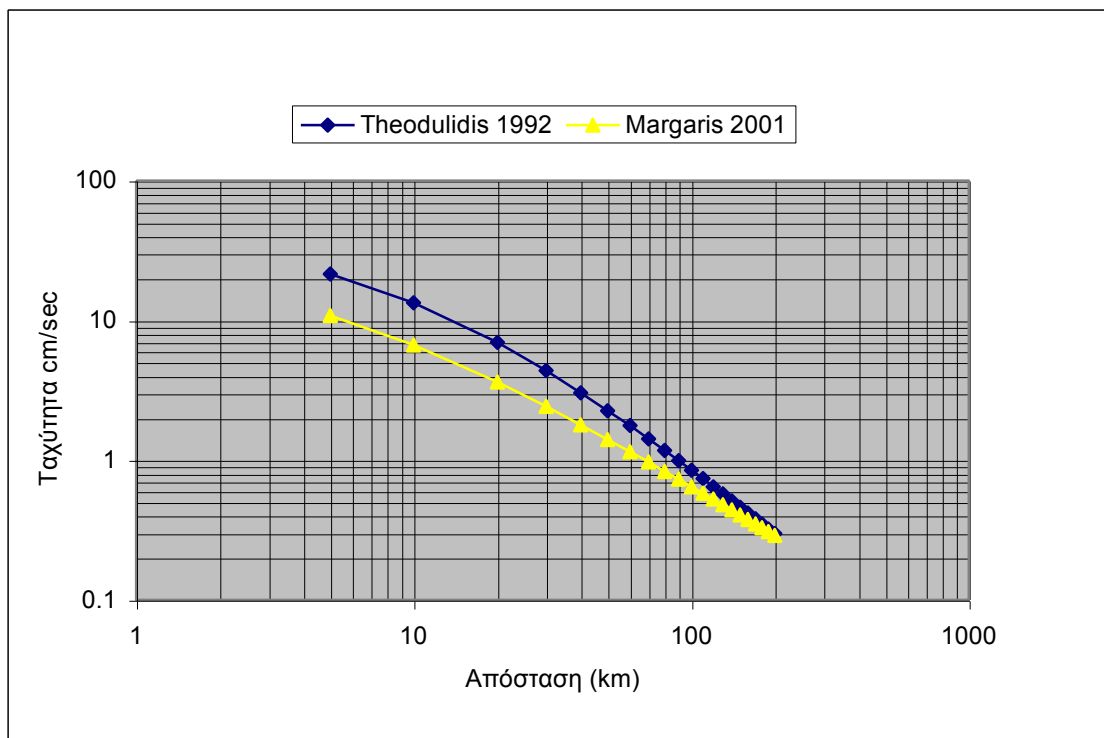
**Σχήμα 3.7** Η σχέση εξασθένησης της εδαφικής ταχύτητας των Theodulidis and Parazachos 1992 για διάφορα σεισμικά μεγέθη.



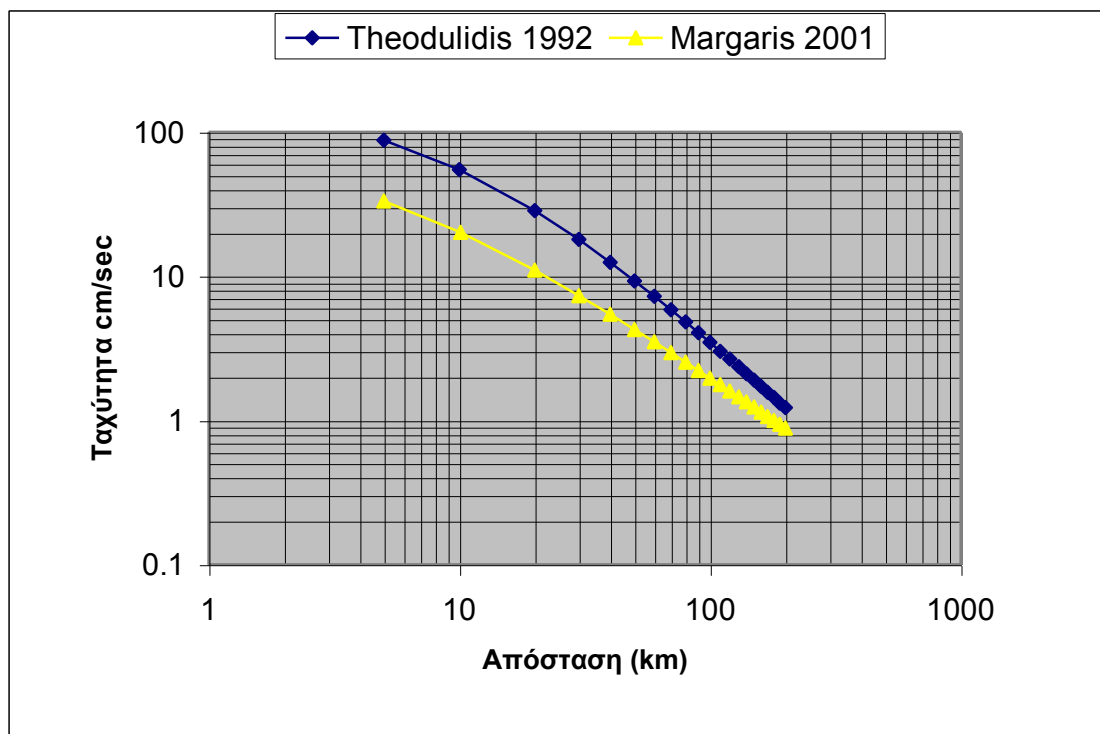
**Σχήμα 3.8** Η σχέση εξασθένησης της εδαφικής ταχύτητας των Μάργαρης κ.ά. 2001 για διάφορα σεισμικά μεγέθη.



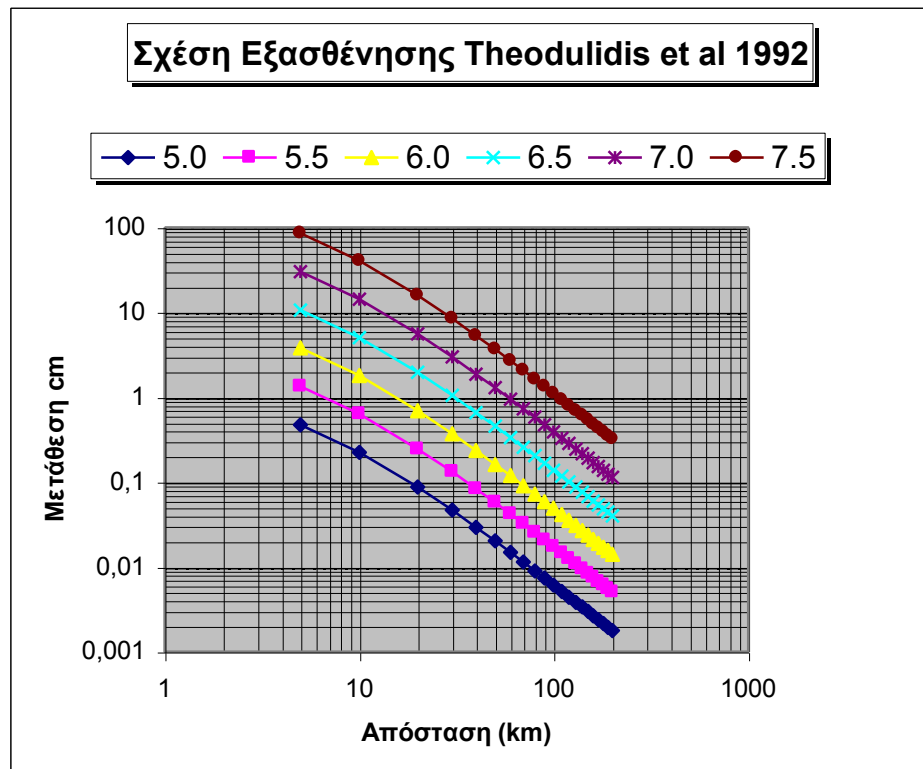
**Σχήμα 3.9** Σύγκριση των σχέσεων εξασθένησης της εδαφικής ταχύτητας για σεισμό M=5.



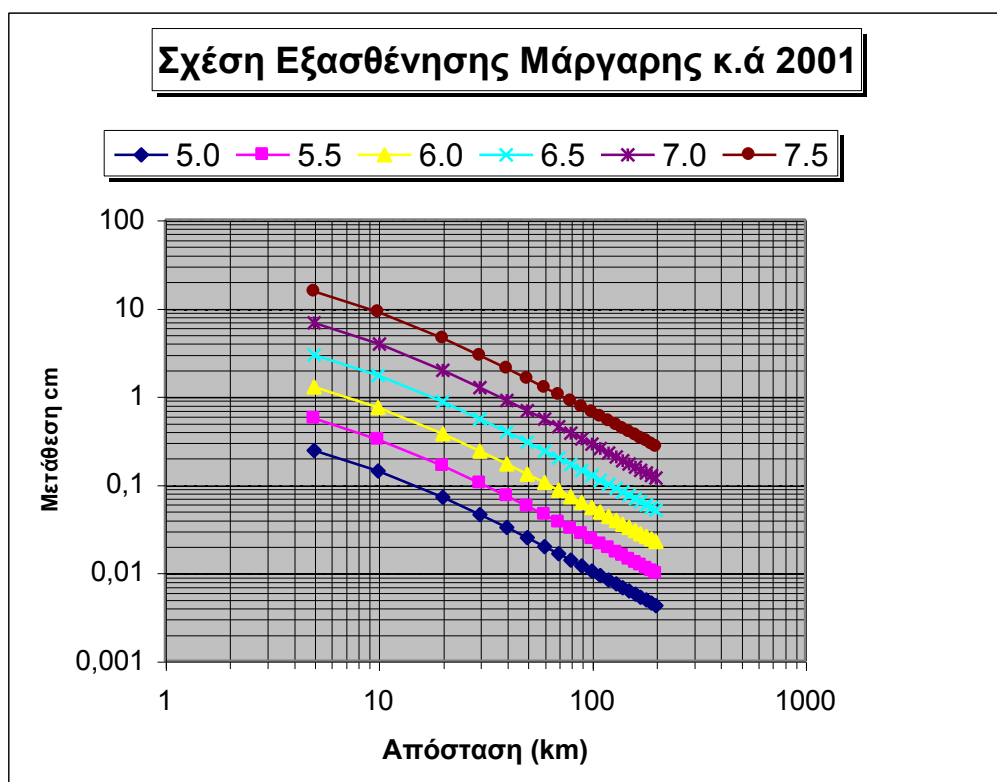
**Σχήμα 3.10** Σύγκριση των σχέσεων εξασθένησης της εδαφικής ταχύτητας για σεισμό M=6.



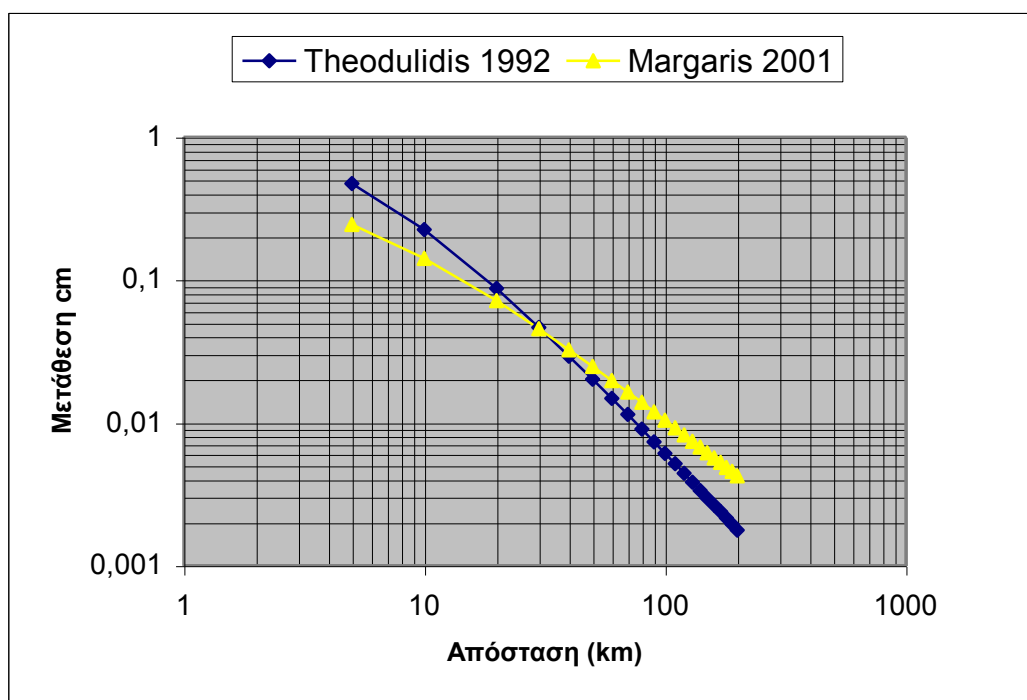
**Σχήμα 3.11** Σύγκριση των σχέσεων εξασθένησης της εδαφικής ταχύτητας για σεισμό  $M=7$ .



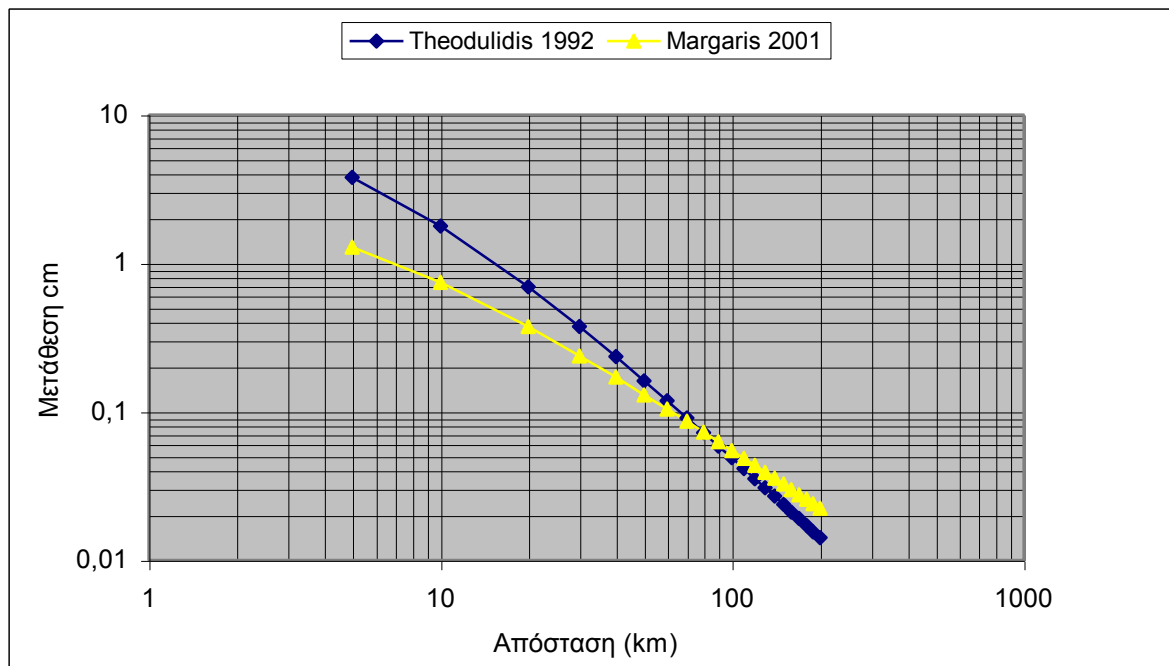
**Σχήμα 3.12** Η σχέση εξασθένησης της εδαφικής μετάθεσης των Theodulidis and Papazachos 1992 για διάφορα σεισμικά μεγέθη.



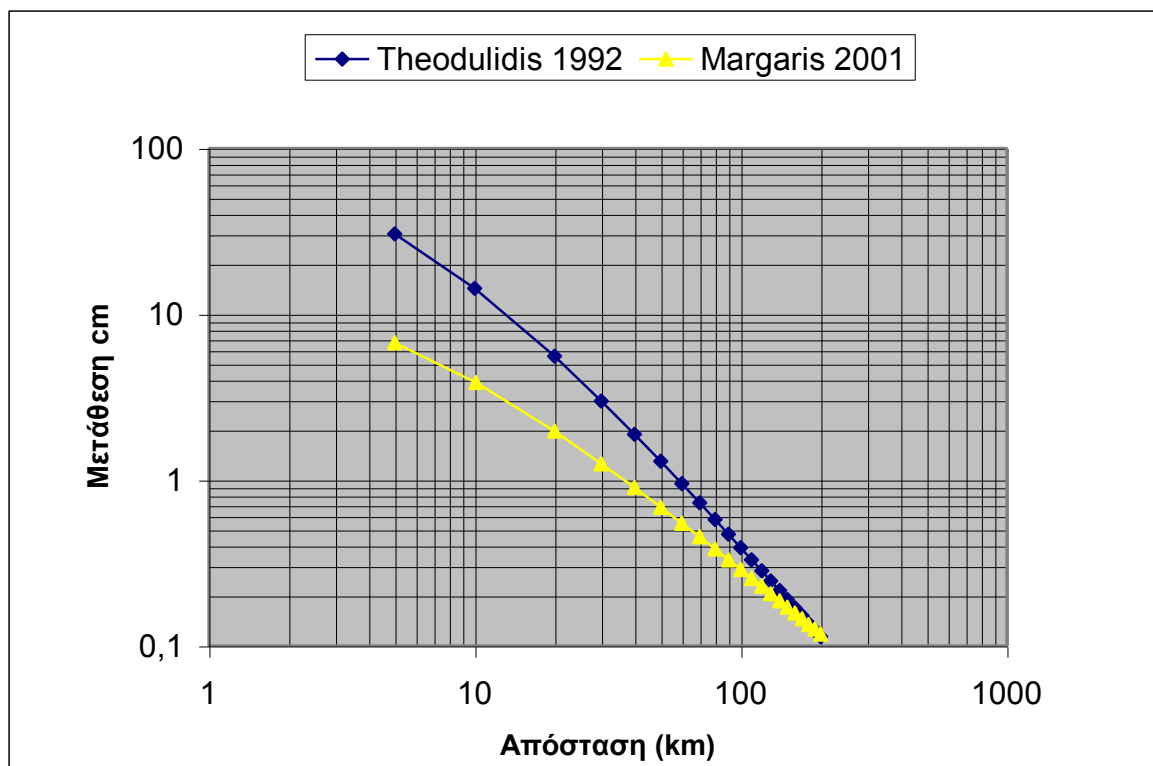
**Σχήμα 3.13** Η σχέση εξασθένισης της εδαφικής μετάθεσης των Μάργαρης κ.ά. 2001 για διάφορα σεισμικά μεγέθη.



**Σχήμα 3.14** Σύγκριση των σχέσεων εξασθένισης της εδαφικής μετάθεσης για σεισμό M=5



**Σχήμα 3.15** Σύγκριση των σχέσεων εξασθένησης της εδαφικής μετάθεσης για σεισμό M=6



**Σχήμα 3.16** Σύγκριση των σχέσεων εξασθένησης της εδαφικής μετάθεσης για σεισμό M=7

## 4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

### 4.1 Γενικά

Ο υπολογισμός της σεισμικής επικινδυνότητας έγινε χρησιμοποιώντας τα προγράμματα Η/Υ SeisriskIII και SeisriskIIIDP των Bender and Perkins 1987, Hanson et al 1992. Τα δύο προγράμματα χρησιμοποιούν την ίδια μεθοδολογία στους υπολογισμούς τους αλλά το SeisriskIIIDP έχει την επιπλέον δυνατότητα να χρησιμοποιεί κεκλιμένες σεισμικές πηγές, κάτι που είναι πολύ χρήσιμο στην περίπτωση προσομοίωσης σεισμικών πηγών σε ζώνες καταβύθισης. Η δυνατότητα αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας από τις σεισμικές πηγές ενδιαμέσου βάθους.

Γενικά, το πρόγραμμα SeisriskIII υπολογίζει την σεισμική επικινδυνότητα με την μορφή τιμών κάποιας εδαφικής παραμέτρου οι οποίες έχουν μια συγκεκριμένη πιθανότητα μη υπέρβασης για κάποιο χρονικό διάστημα. Η εδαφική παράμετρος (επιτάχυνση, ταχύτητα, μετάθεση κλπ) καθορίζεται από την σχέση εξασθένισης που εισάγεται στο πρόγραμμα. Η σεισμική επικινδυνότητα μπορεί να υπολογιστεί για ένα κানাβο τιμών αλλά και μόνο σε ορισμένα σημεία.

Τα δεδομένα που εισάγονται στο πρόγραμμα είναι:

- η πιθανότητα μη υπέρβασης για την οποία γίνονται οι υπολογισμοί
- τα όρια του κανάβου και η απόσταση μεταξύ των κόμβων στον άξονα Χ και Υ
- οι επιπλέον θέσεις για τις οποίες θέλουμε να υπολογιστεί η σεισμική επικινδυνότητα
- η σχέση εξασθένισης
- τα όρια των σεισμικών πηγών και η σεισμικότητά τους με την μορφή αριθμού σεισμών ανά σεισμικό μέγεθος για κάποιο χρονικό διάστημα παρατήρησης

Οι σεισμικές πηγές είναι δυνατόν να είναι α) ζώνες μέσα στις οποίες οι σεισμοί κατανέμονται ομοιόμορφα (οριζόντιες για το SeisriskIII και κεκλιμένες

για το SeisriskIIDP), είτε, β) γραμμικές πηγές στις οποίες οι σεισμοί είναι διαρρήξεις πεπερασμένου μήκους.

Με το όρο ομοιόμορφη κατανομή των σεισμών μέσα σε μία σεισμική πηγή εννοούμε ότι όλα τα σημεία της πηγής έχουν την ίδια πιθανότητα να είναι το επίκεντρο κάποιου σεισμού. Η παραπάνω υπόθεση μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά λάθη στον υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας, ειδικά σε θέσεις που βρίσκονται στα όρια των σεισμικών πηγών (Bender, 1986) και αυτό γιατί η σεισμικότητα μεταβάλλεται απότομα στα όρια των ζωνών.

Για να αποφευχθούν αυτές οι απότομες αλλαγές στα όρια των πηγών, στο SeisRiskIII τα επίκεντρα των σεισμών κατανέμονται κανονικά με τυπική απόκλιση  $\sigma$  (η οποία μπορεί να οριστεί από το χρήστη) γύρω από μία μέση θέση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η σεισμικότητα να μεταβάλλεται ομαλά στα όρια της σεισμικής πηγής.

#### **4.2 Μεθοδολογία – Υπολογισμός σεισμικής επικινδυνότητας**

Τόσο το SeisriskIII όσο και όλα τα αντίστοιχα προγράμματα υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας, με πιθανολογικές μεθόδους, βασίζονται στις παρακάτω γενικές παραδοχές, για τους υπολογισμούς τους

- η σεισμικότητα ακολουθεί την τυχαία κατανομή Poisson στις σεισμικές πηγές που έχουν οριστεί
- ο ρυθμός γένεσης των σεισμών παραμένει σταθερός με το χρόνο όπως έχει οριστεί για κάθε πηγή
- η εδαφική κίνηση (επιτάχυνση, ταχύτητα, μετάθεση κλπ) αυξάνεται με την αύξηση του σεισμικού μεγέθους και ελαττώνεται με την αύξηση της απόστασης από την πηγή του σεισμικού γεγονότος ως την θέση μελέτης
- Οι σεισμοί προσομοιώνονται σαν σημεία μέσα σε σεισμικές πηγές ή σαν διαρρήξεις πεπερασμένου μήκους πάνω σε ρήγματα ή συστήματα ρηγμάτων

- Οι σεισμοί έχουν κανονική κατανομή μέσα στις σεισμικές πηγές και οι διαρρήξεις μπορούν να συμβούν με την ίδια πιθανότητα σε κάθε σημείο του ρήγματος αρκεί η διάρρηξη να μην υπερβαίνει τα όρια του
- Τα σεισμικά μεγέθη περιορίζονται ανάμεσα σε ένα ελάχιστο ( $m_0$ ) και σε ένα μέγιστο μέγεθος ( $m_{\max}$ ), τα οποία μπορεί να είναι διαφορετικά για κάθε σεισμική πηγή

Με βάση τα παραπάνω, για κάθε σεισμική πηγή, μπορούμε να κατανείμουμε τα σεισμικά μεγέθη, ανάμεσα στο ελάχιστο και το μέγιστο μέγεθος, ως εξής:

$$m_j = m_0 + (j+1/2)\Delta m, \quad 0 \leq j \leq n-1$$

$$\Delta m = (m_{\max} - m_0)/n \quad (1)$$

όπου  $n$  ο αριθμός των διαστημάτων σεισμικών μεγεθών,  $m_j$  το σεισμικό μέγεθος που αντιστοιχεί στο κέντρο κάθε διαστήματος και  $\Delta m$  η μεταβολή. Η σεισμικότητα κάθε πηγής εισάγεται στο πρόγραμμα από τον χρήστη, σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, δηλ. σαν ρυθμός γένεσης σεισμών, στη μονάδα του χρόνου, για κάθε μέγεθος που αποτελεί το κέντρο του διαστήματος μεγεθών. Συνήθως η κατανομή αυτή είναι η γνωστή σχέση Gutenberg-Richter :

$$\log N_m = a - b m \quad (2)$$

όπου  $a$  και  $b$  είναι οι σταθερές κάθε πηγής.

Στο πρόγραμμα έχουμε εισάγει επίσης και μία σχέση εξασθένισης, με την μορφή πίνακα που περιέχει την εδαφική κίνηση που προκύπτει από μια σειρά σεισμικών μεγεθών σε συγκεκριμένες αποστάσεις από την πηγή. Με δεδομένα την γεωγραφική κατανομή των σεισμικών πηγών, την σεισμικότητα κάθε ζώνης και την σχέση εξασθένισης το πρόγραμμα υπολογίζει, σε έναν αριθμό 55 προκαθορισμένων διαστημάτων τιμών επιτάχυνσης, την ετήσια επιτάχυνση που προκύπτει.

Στη συνέχεια θα περιγραφεί η διαδικασία υπολογισμού, υποθέτοντας ότι οι υπολογισμοί γίνονται για εδαφική επιτάχυνση. Η διαδικασία είναι ακριβώς η ίδια σε κάθε άλλη περίπτωση και το μόνο που καθορίζει τον τύπο της εδαφικής κίνησης είναι η σχέση εξασθένισης.

Για την συγκεκριμένη σχέση εξασθένισης της εδαφικής επιτάχυνσης έστω  $d_m(i)$  η απόσταση στην οποία σεισμός μεγέθους  $m$  προκαλεί επιτάχυνση  $a_i$  σε μία θέση. Η πιθανότητα να συμβεί στη θέση μελέτης επιτάχυνση στο διάστημα  $a_{i-1} \leq a \leq a_i$  είναι η πιθανότητα να συμβεί σεισμός μεγέθους  $m$  σε μία απόσταση  $d_m(i) \leq d \leq d_m(i-1)$  (αθροιστική για όλα τα πιθανά μεγέθη).

Η πιθανότητα ένας σεισμός μεγέθους  $m$  που ανήκει σε μια σεισμική πηγή να συμβεί μέσα στην παραπάνω απόσταση ( $d_m(i) \leq d \leq d_m(i-1)$ ), είναι ισοδύναμη με το ποσοστό της επιφάνειας της σεισμικής πηγής ή το μήκος του ρήγματος που περιέχεται στην απόσταση αυτή.

Η επιφάνεια (ή το μήκος) αυτό, είναι συνάρτηση του πλάτους του διαστήματος

$$\Delta d(i) = d_m(i-1) - d_m(i) \quad (3)$$

και του κέντρου του διαστήματος

$$\bar{d}_m(i) = \frac{d_m(i-1) + d_m(i)}{2} \quad (4)$$

άρα μπορεί να γραφεί σαν

$$A[m(i)] = f[\bar{d}_m(i), \Delta d_m(i)] \quad (5)$$

Με βάση τα παραπάνω, η επιτάχυνση που προκύπτει στο διάστημα  $a_{i-1} \leq a \leq a_i$ , στη θέση μελέτης, από σεισμούς μεγέθους  $m$  στην σεισμική πηγή είναι ίση με το ποσοστό σεισμών μεγέθους  $m$  που συμβαίνουν στην επιφάνεια  $A[m(i)]$ , δηλαδή:

$$\rho_m(i) = \frac{A[m(i)]}{A} N_m \quad (6)$$

όπου  $N_m$  η συχνότητα γένεσης σεισμών μεγέθους  $m$  για τη σεισμική πηγή ή το ρήγμα, και  $A$  η συνολική επιφάνεια της πηγής (ή το μήκος του ρήγματος).

Το πρόγραμμα υπολογίζει το  $A[m(i)]$  και στην συνέχεια την επιτάχυνση που προκύπτει από τη σχέση (6) για κάθε μέγεθος στην ίδια σεισμική πηγή, στην συνέχεια αθροίζεται η επιτάχυνση κάθε σεισμικού μεγέθους και προκύπτει η συνολική επιτάχυνση της πηγής (εξ.7).

$$\rho(i) = \sum_{j=1}^n \rho_{mj}(i) \quad (7)$$

όπου  $n$  ο αριθμός των διαστημάτων σεισμικών μεγεθών.

Η τελική επιτάχυνση προκύπτει αθροίζοντας της μερικές επιταχύνσεις από κάθε πηγή ξεχωριστά.

Στη συνέχεια πρέπει να υπολογιστεί η πιθανότητα υπέρβασης (ή μη υπέρβασης) των παραπάνω τιμών για κάποιο χρονικό διάστημα. Έχουμε υποθέσει ότι η σεισμικότητα ακολουθεί την κατανομή Poisson, δηλαδή η πιθανότητα να συμβεί ένας σεισμός είναι η ίδια ανεξάρτητα από το πότε έχει γίνει ο προηγούμενος σεισμός. Για μια κατανομή Poisson η πιθανότητα να συμβούν  $k$  γεγονότα σε χρόνο  $t$  δίνεται από την σχέση:

$$P(k,t) = \frac{(\mu t)^k \exp(-\mu t)}{k!} \quad (8)$$

όπου  $\mu$  ο ρυθμός γένεσης των γεγονότων.

Η πιθανότητα να μη συμβεί κάποιο γεγονός σε χρόνο  $t$  είναι:

$$P(0,t) = \exp(-\mu t) \quad (9)$$

Στο προηγούμενο στάδιο έχει υπολογιστεί ο ετήσιος ρυθμός γένεσης επιταχύνσεων σε κάθε ένα από τα 55 διαστήματα επιταχύνσεων, από όλες τις σεισμικές πηγές, ο ετήσιος ρυθμός επιταχύνσεων  $\alpha > \alpha_j$  προκύπτει εύκολα από την παρακάτω εξίσωση

$$Ex[\alpha_j] = \sum_{i=j+1}^{55} \rho(i) \quad (10)$$

από την εξίσωση 10 μπορεί να υπολογιστεί και ο ετήσιος ρυθμός υπέρβασης της επιτάχυνσης  $Ex(\alpha)$  για επιτάχυνση  $\alpha$ .

Αντικαθιστώντας  $\mu = Ex(\alpha)$  στην εξίσωση 9 προκύπτει τελικά η παρακάτω σχέση

$$Ex(\alpha) = -\frac{\ln[P(0,t)]}{t} \quad (11)$$

από την οποία μπορεί να υπολογιστεί η επιτάχυνση η οποία έχει πιθανότητα  $p = P(0,t)$  να μην ξεπεραστεί σε χρόνο  $t$  ή ισοδύναμα πιθανότητα  $q = 1 - P(0,t)$  να ξεπεραστεί. Τόσο η πιθανότητα  $p$  όσο και το χρονικό διάστημα  $t$  εισάγονται στο πρόγραμμα από τον χρήστη.

### **4.3 Εφαρμογή Της Μεθόδου - Αποτελέσματα**

Η σεισμική επικινδυνότητα υπολογίστηκε για την ευρύτερη περιοχή του Ελλαδικού χώρου, πιο συγκεκριμένα για την περιοχή από γεωγραφικό πλάτος  $34^{\circ}$  έως  $42^{\circ}$  και από γεωγραφικό μήκος  $19^{\circ}$  έως  $30^{\circ}$ . Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε κανάβος με βήμα  $0.15^{\circ}$ , προέκυψαν έτσι 1485 κόμβοι στους οποίους και υπολογίστηκε η σεισμική επικινδυνότητα. Οι υπολογισμοί έγιναν για πιθανότητα μη υπέρβασης 90% για τα επόμενα 50 και 100 χρόνια (χρόνος επανάληψης 474 και 949 χρόνια αντίστοιχα).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα σεισμικών πηγών και τρεις σχέσεις εξασθένισης, προέκυψαν έτσι έξι διαφορετικές επιλύσεις για την σεισμική επικινδυνότητα, από τις οποίες προήλθε και ο τελικός χάρτης παίρνοντας τον μέσο όρο (Σχ.4.1).

Η συνεισφορά των σεισμικών πηγών ενδιαμέσου βάθους υπολογίστηκε με το πρόγραμμα SeisRiskIIIDP, ενώ οι υπολογισμοί για τις επιφανειακές πηγές έγιναν με το πρόγραμμα SeisRiskIII, τελικά τα αποτελέσματα και από τα δύο προγράμματα συνδυάστηκαν σε ένα χάρτη. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του SeisRiskIIIDP παρουσιάζονται στα Σχ.4.8, 4.9, 4.10 για κάθε μία σχέση εξασθένισης που χρησιμοποιήθηκε, γενικά η συνολική συνεισφορά των ζωνών ενδιαμέσου βάθους παρουσιάζεται μικρή, αυτό όμως μπορεί να οφείλεται στην σχετικά περιορισμένη γνώση της σεισμικότητας και της εξασθένησης της σεισμικής κίνησης από τις ζώνες αυτές.

Τα προγράμματα SeisriskIII και SeisriskIIIDP υπολογίζουν για κάθε σημείο του κανάβου την σεισμική επιτάχυνση και αποθηκεύουν τα αποτελέσματα σε αρχεία κείμενου. Στη συνέχεια με την χρήση του πακέτου προγραμμάτων GMT (Wessel and Smith, 1991) δημιουργήθηκαν οι ενδιάμεσοι χάρτες ισοεπιταχύνσεων, ισοταχυτήτων, ισομεταθέσεων και υπολογίστηκε ο τελικός μέσος χάρτης.

Στις επόμενες παραγράφους θα περιγραφούν τα αποτελέσματα για την σεισμική επιτάχυνση, ταχύτητα, μετάθεση.

#### **4.3.1 Σεισμική επιτάχυνση**

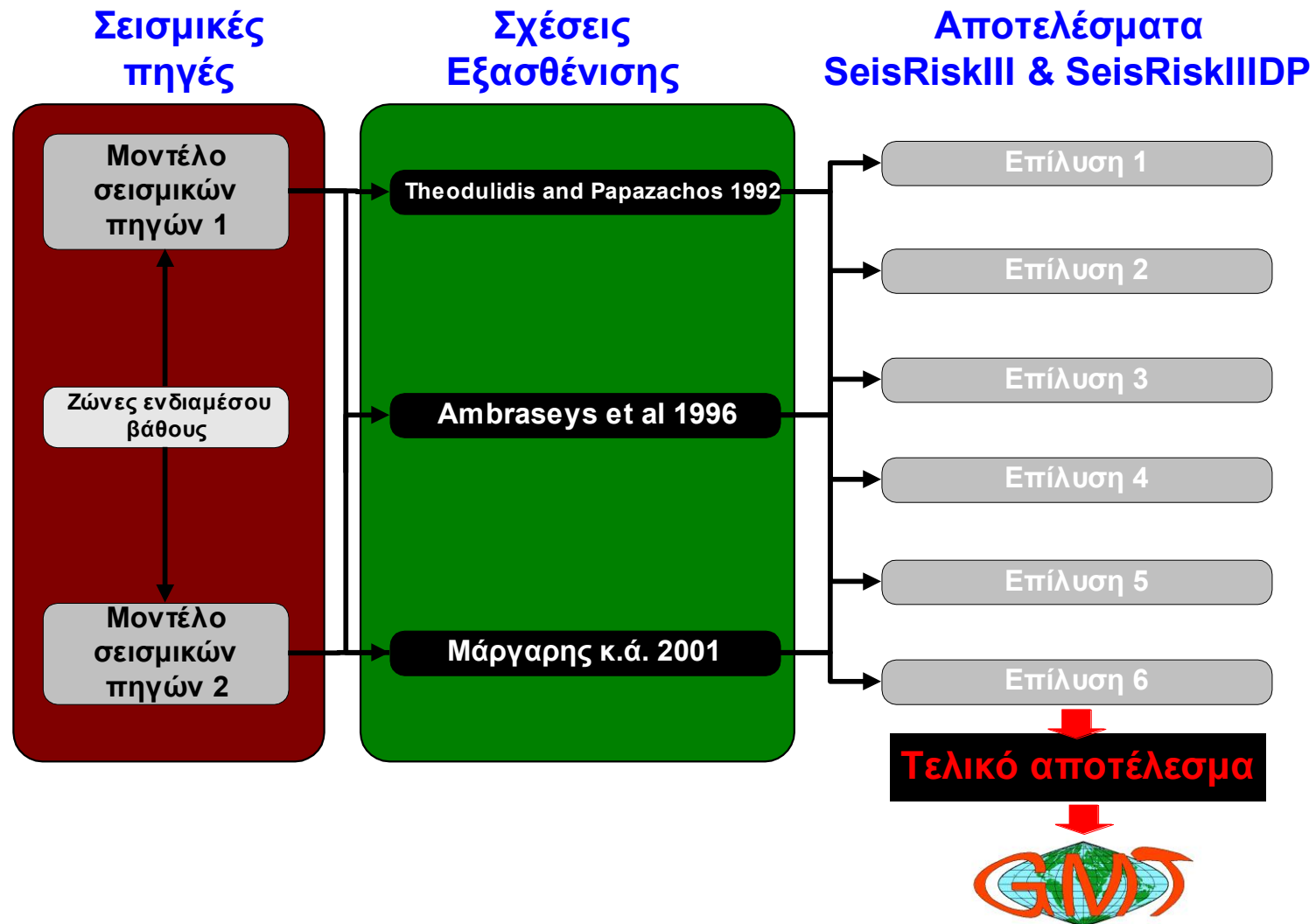
Στο Σχ.4.1 παρουσιάζεται με τη μορφή διαγράμματος η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για να προκύψει ο τελικός χάρτης με τον υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας. Κάθε ένας από τους δυνατούς συνδυασμούς σεισμικών πηγών – σχέσεων εξασθένησης εισήχθη αρχικά στο πρόγραμμα SeisRiskIII, IIIDP στη συνέχεια τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την βοήθεια του πακέτου προγραμμάτων GMT, μετατράπηκαν αρχικά σε έναν ενιαίο κানাβο, δημιουργήθηκαν οι ενδιάμεσοι χάρτες ισοεπιταχύνσεων και τελικά υπολογίστηκε ο μέσος όρος των έξι κανάβων.

Στα Σχ.4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 παρουσιάζονται οι χάρτες για κάθε δυνατό συνδυασμό σεισμικών πηγών – σχέσεων εξασθένησης, ενώ στα Σχ.4.11, 4.12 παρουσιάζεται ο τελικός χάρτης της επιτάχυνσης του εδάφους με πιθανότητα 90% να μην ξεπεραστεί τα επόμενα 50 (περίοδος επανάληψης 474 χρόνια) και στα επόμενα 100 χρόνια (περίοδος επανάληψης 949 χρόνια), αντίστοιχα. Οι μέγιστες τιμές που προέκυψαν για τις παραπάνω περιόδους επανάληψης ήταν 0.49g και 0.54g αντίστοιχα και παρουσιάζονται στην περιοχή των Ιονίων νήσων.

#### **4.3.2 Σεισμική ταχύτητα - μετάθεση**

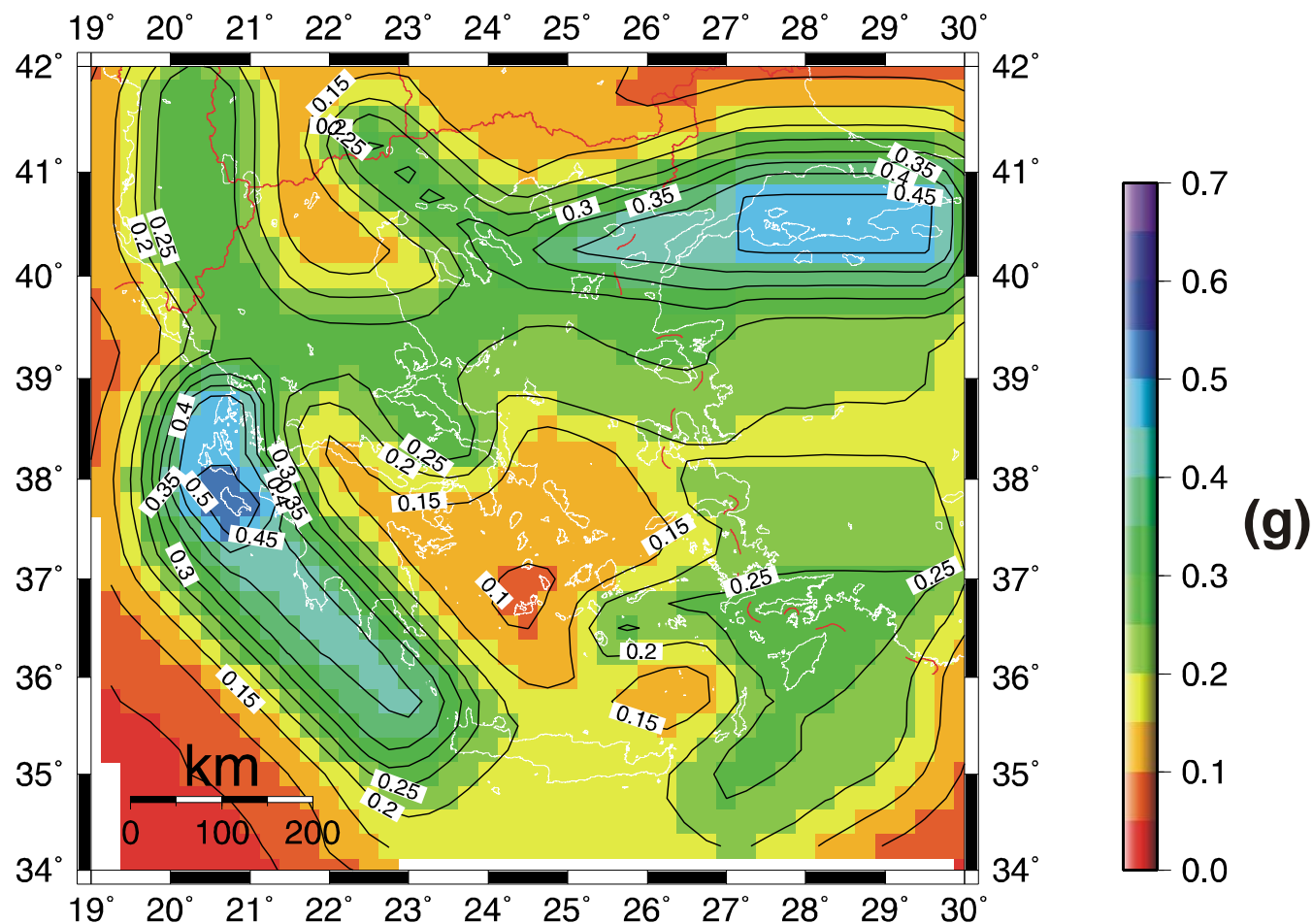
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της αναμενόμενης ταχύτητας – μετάθεσης του εδάφους ήταν η ίδια με αυτήν που περιγράφηκε πιο πάνω για την εδαφική επιτάχυνση. Τα ενδιάμεσα στάδια ήταν λιγότερα γιατί χρησιμοποιήθηκαν μόνον δύο σχέσεις εξασθένησης.

Στα Σχ.4.13, 4.14, 4.15, 4.16 παρουσιάζονται οι τελικοί χάρτες της ταχύτητας-μετάθεσης του εδάφους με πιθανότητα 90% να μην ξεπεραστεί τα επόμενα 50 (περίοδος επανάληψης 474 χρόνια) και στα επόμενα 100 χρόνια (περίοδος επανάληψης 949 χρόνια), αντίστοιχα. Οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται και πάλι στην περιοχή των Ιονίων νήσων και είναι 27.6cm/sec και 31.1cm/sec για την ταχύτητα και 5.5cm και 6.4cm για την μετάθεση, για 474 και 949 χρόνια αντίστοιχα.



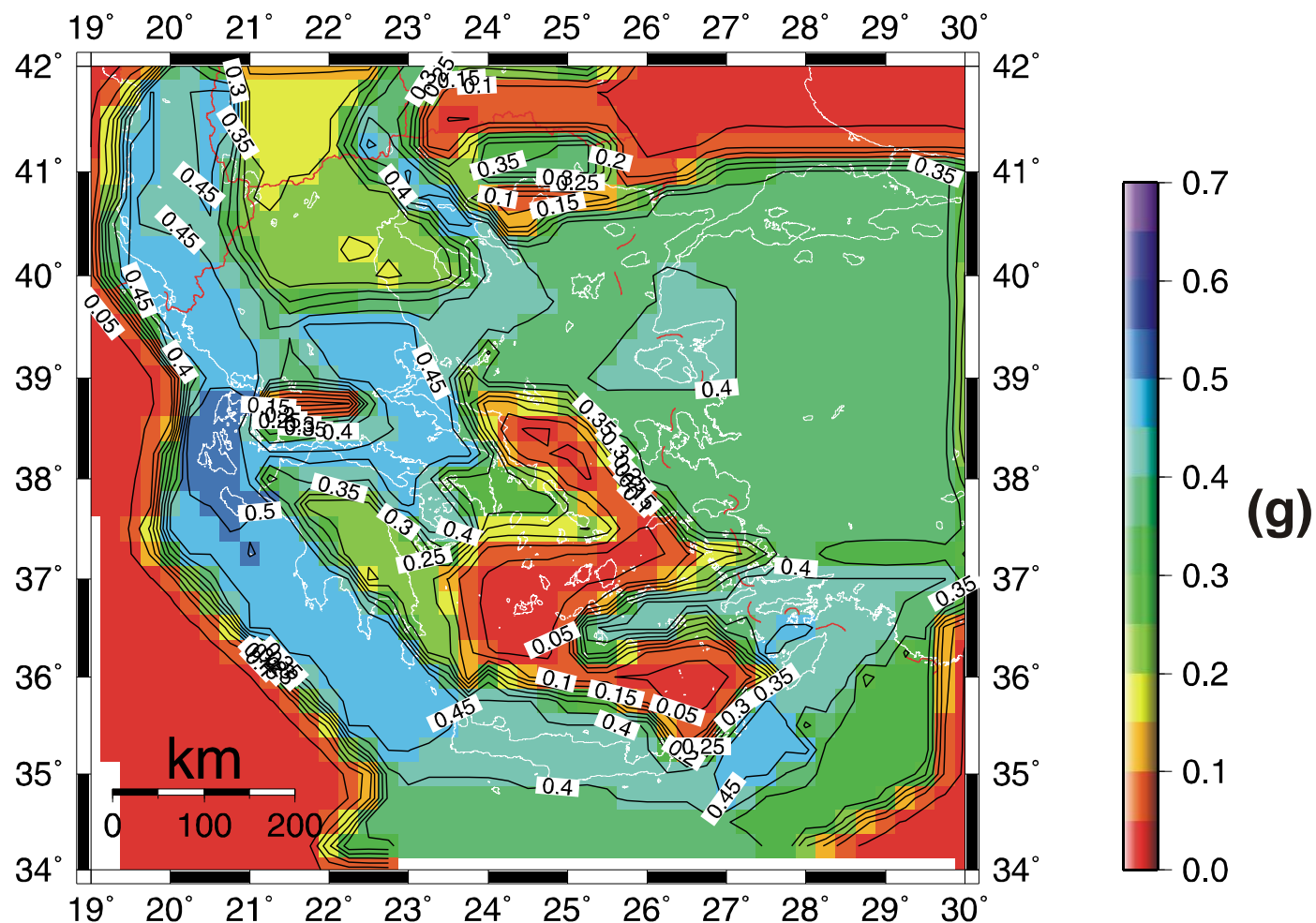
**Σχήμα 4.1.** Μεθοδολογία υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας.

**Επιτάχυνση του εδάφους με 90% πιθανότητα να μην ξεπεραστεί τα επόμενα 50 χρόνια**



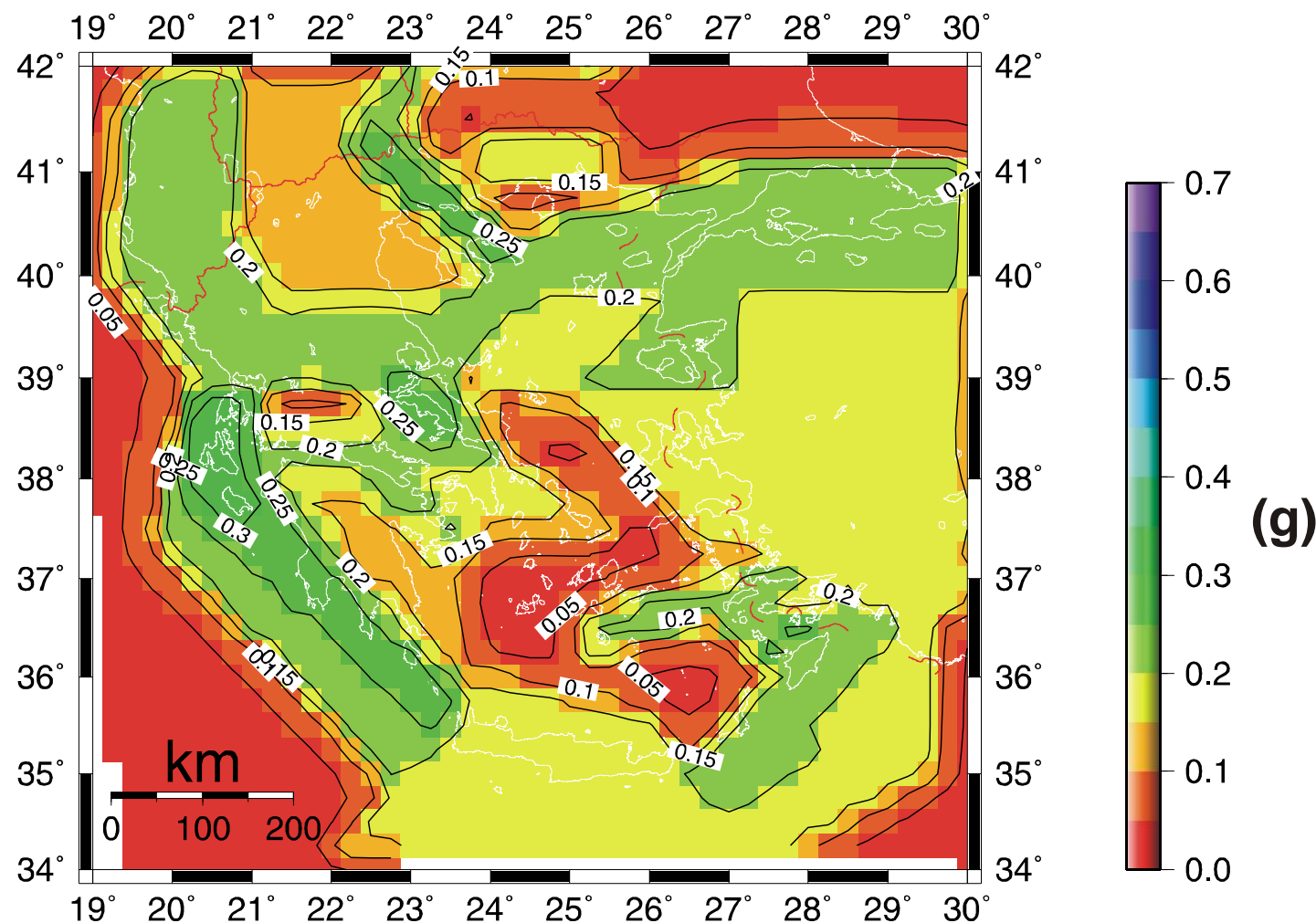
**Σχήμα 4.2.** Αποτελέσματα για το μοντέλο σεισμικών πηγών 1 και την σχέση εξασθένησης των Theodulidis and Papazachos 1992.

Επιτάχυνση του εδάφους με 90% πιθανότητα να μην ξεπεραστεί τα επόμενα 50 χρόνια



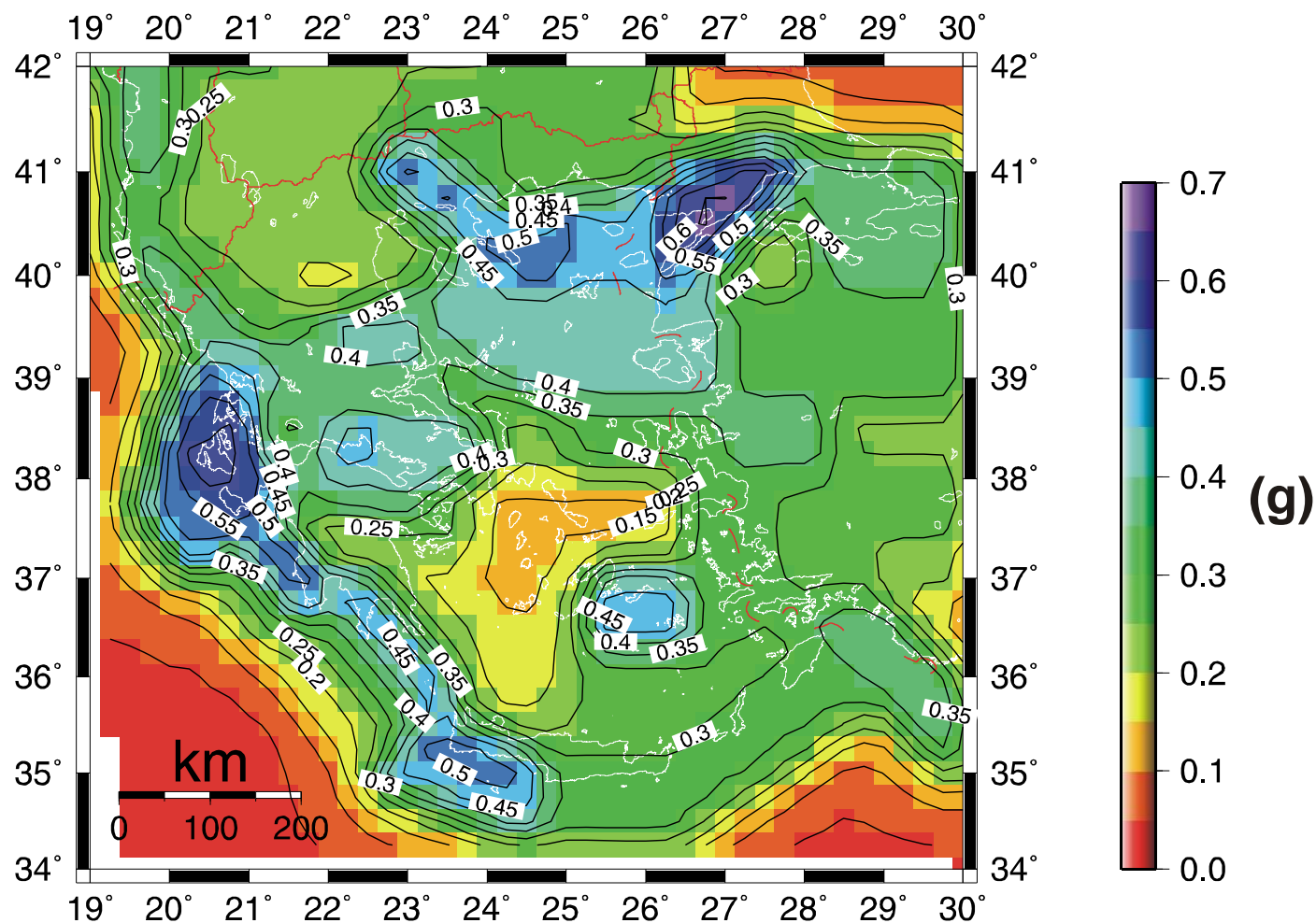
**Σχήμα 4.3.** Αποτελέσματα για το μοντέλο σεισμικών πηγών 1 και την σχέση εξασθένησης των Ambraseys et al 1996.

**Επιτάχυνση του εδάφους με 90% πιθανότητα να μην ξεπεραστεί τα επόμενα 50 χρόνια**



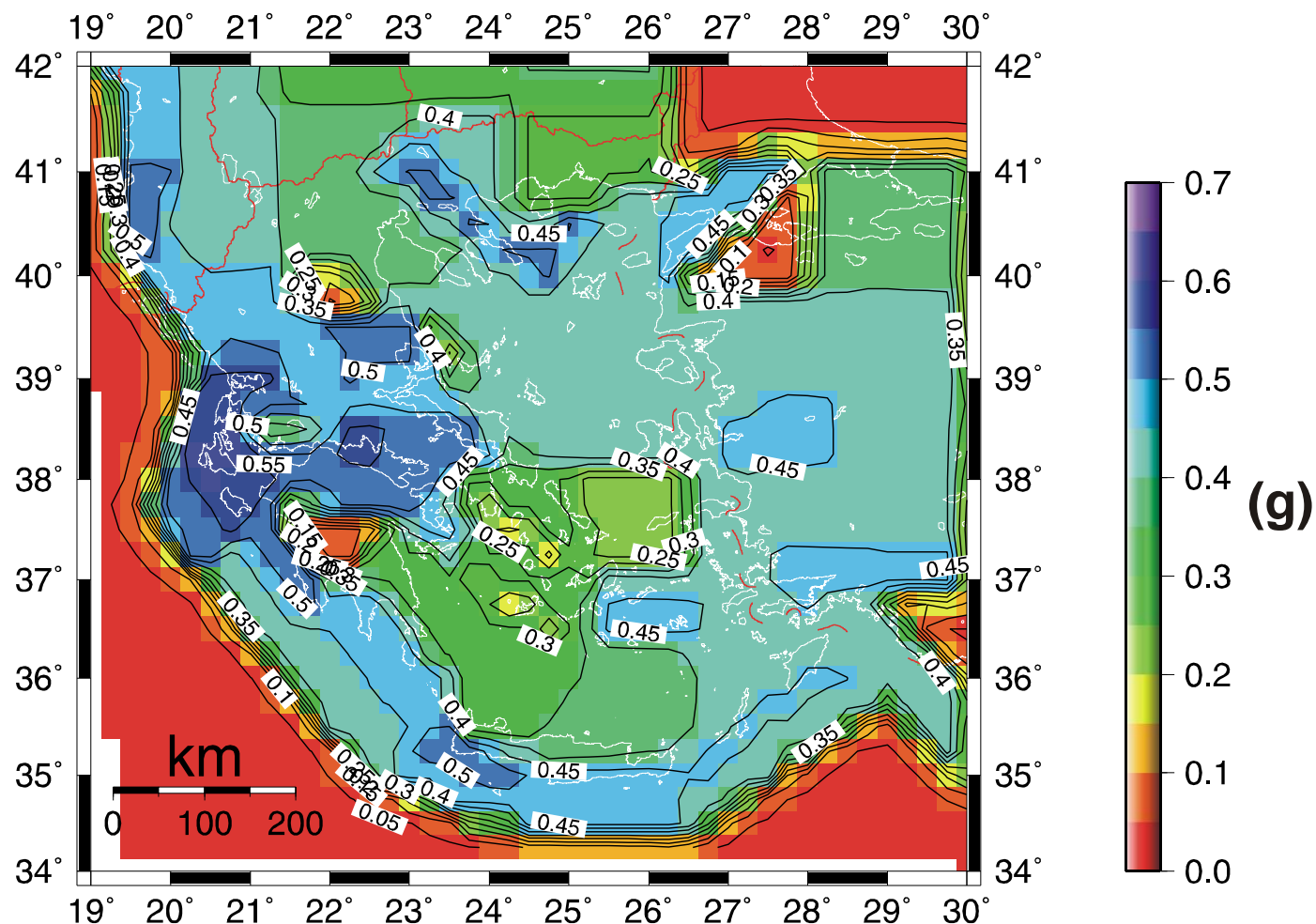
**Σχήμα 4.4.** Αποτελέσματα για το μοντέλο σεισμικών πηγών 1 και την σχέση εξασθένησης των Μάργαρης κ.ά.2001.

Επιτάχυνση του εδάφους με 90% πιθανότητα να μην ξεπεραστεί τα επόμενα 50 χρόνια



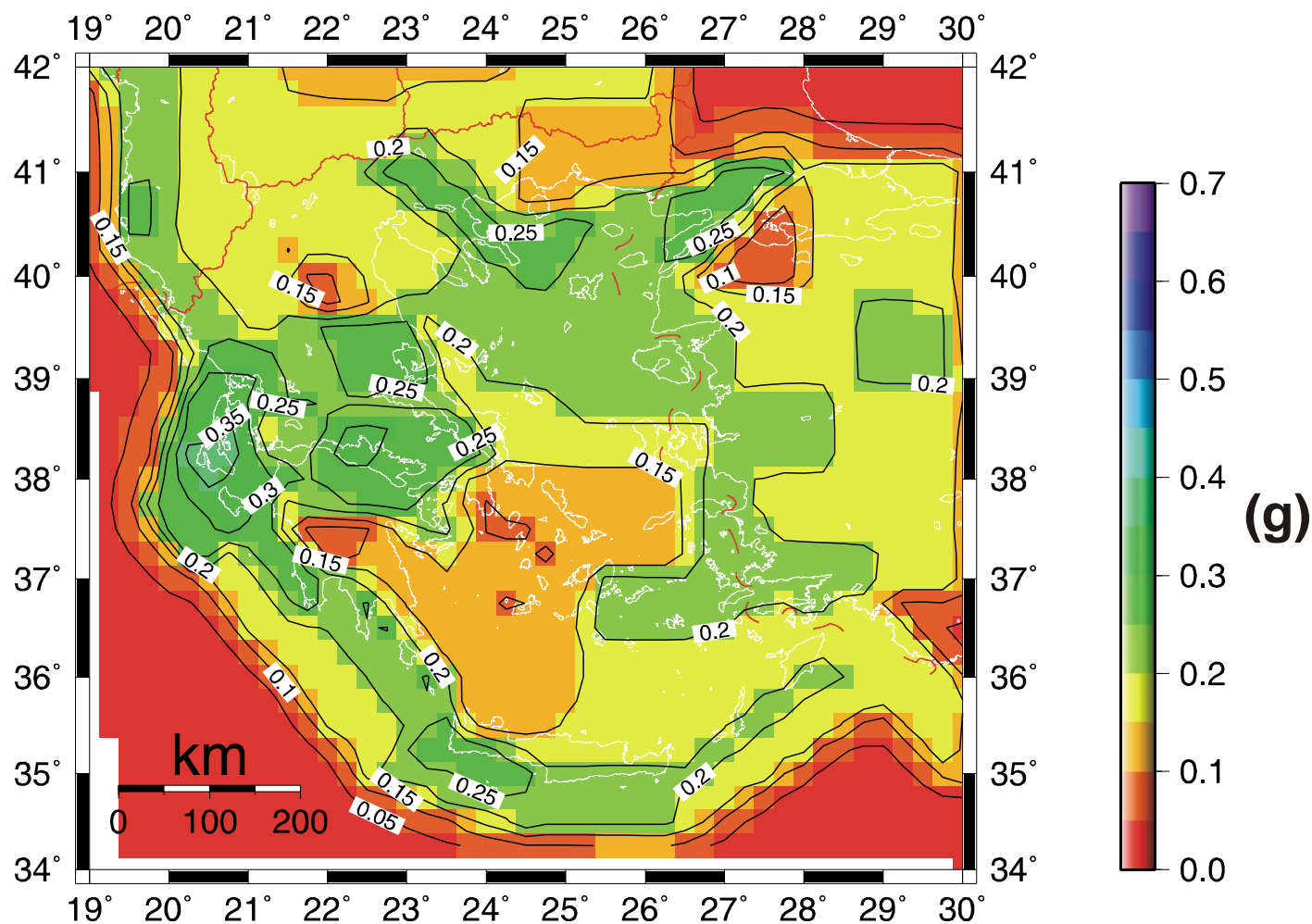
**Σχήμα 4.5.** Αποτελέσματα για το μοντέλο σεισμικών πηγών 2 και την σχέση εξασθένησης των Theodulidis and Papazachos 1992.

Επιτάχυνση του εδάφους με 90% πιθανότητα να μην ξεπεραστεί τα επόμενα 50 χρόνια



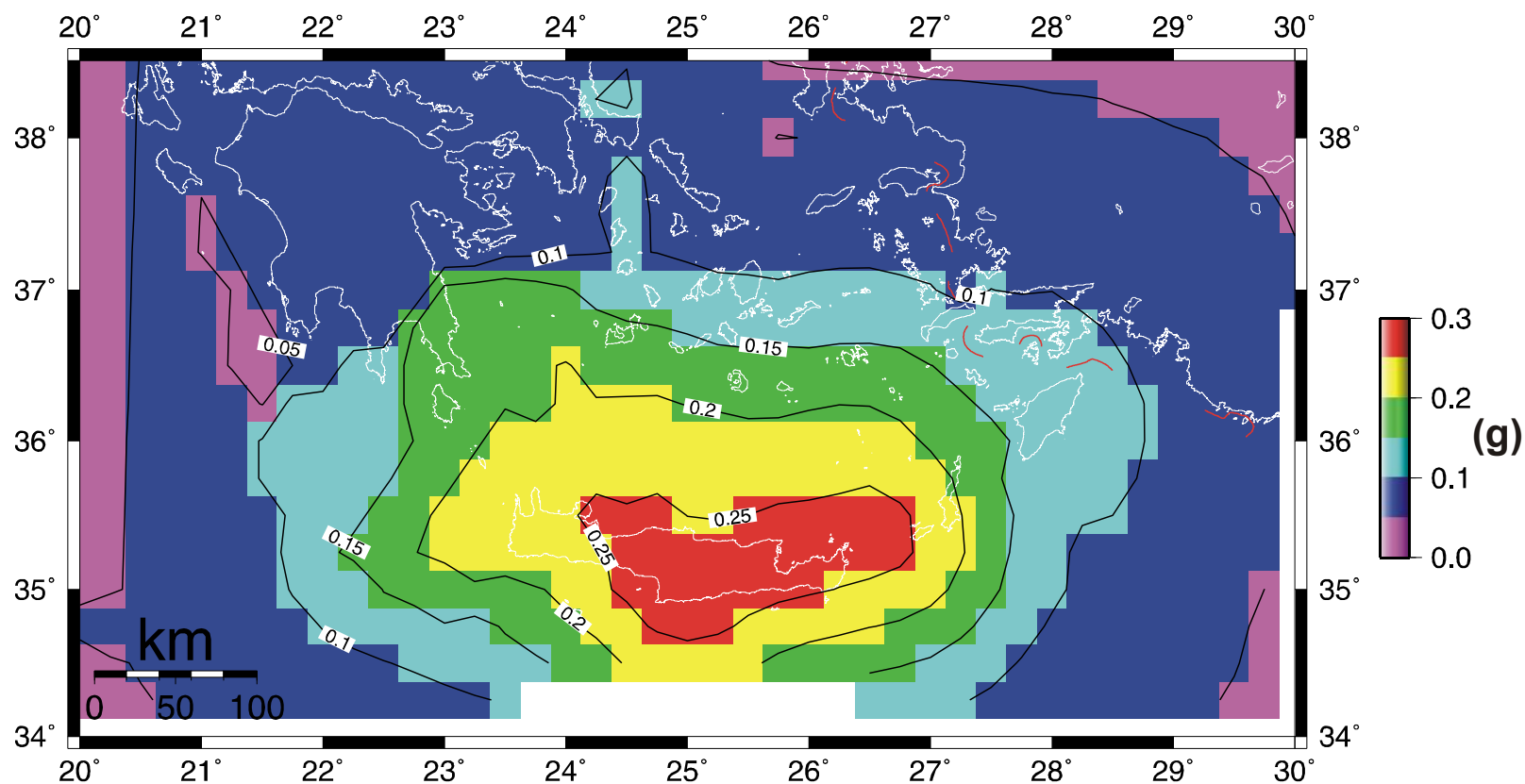
**Σχήμα 4.6.** Αποτελέσματα για το μοντέλο σεισμικών πηγών 2 και την σχέση εξασθένησης των Ambraseys et al 1996.

### Επιτάχυνση του εδάφους με 90% πιθανότητα να μην ξεπεραστεί τα επόμενα 50 χρόνια



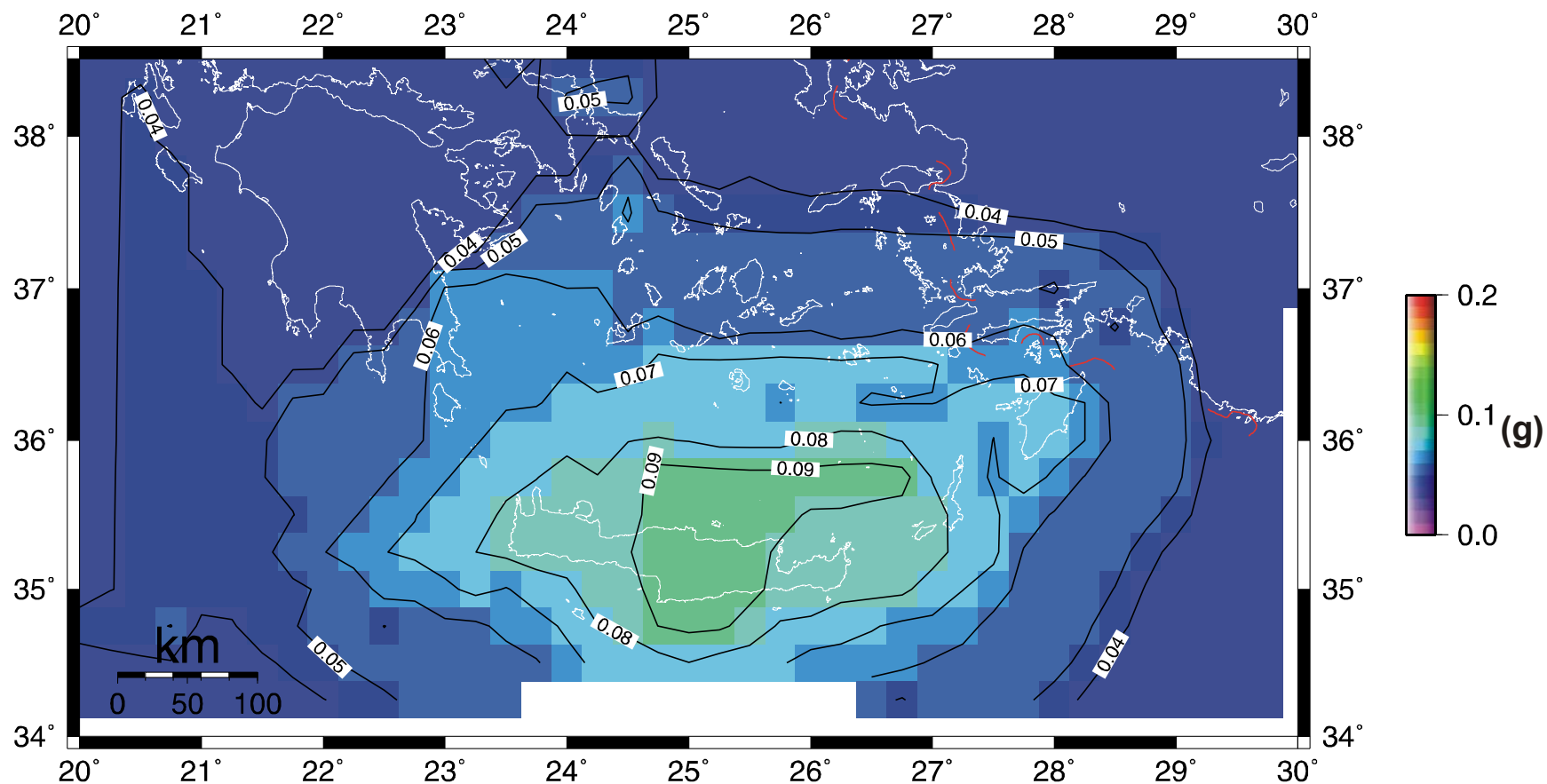
**Σχήμα 4.7.** Αποτελέσματα για το μοντέλο σεισμικών πηγών 2 και την σχέση εξασθένησης των Μάργαρης κ.ά.2001.

Επιτάχυνση του εδάφους με 90% πιθανότητα να μην ξεπεραστεί τα επόμενα 50 χρόνια



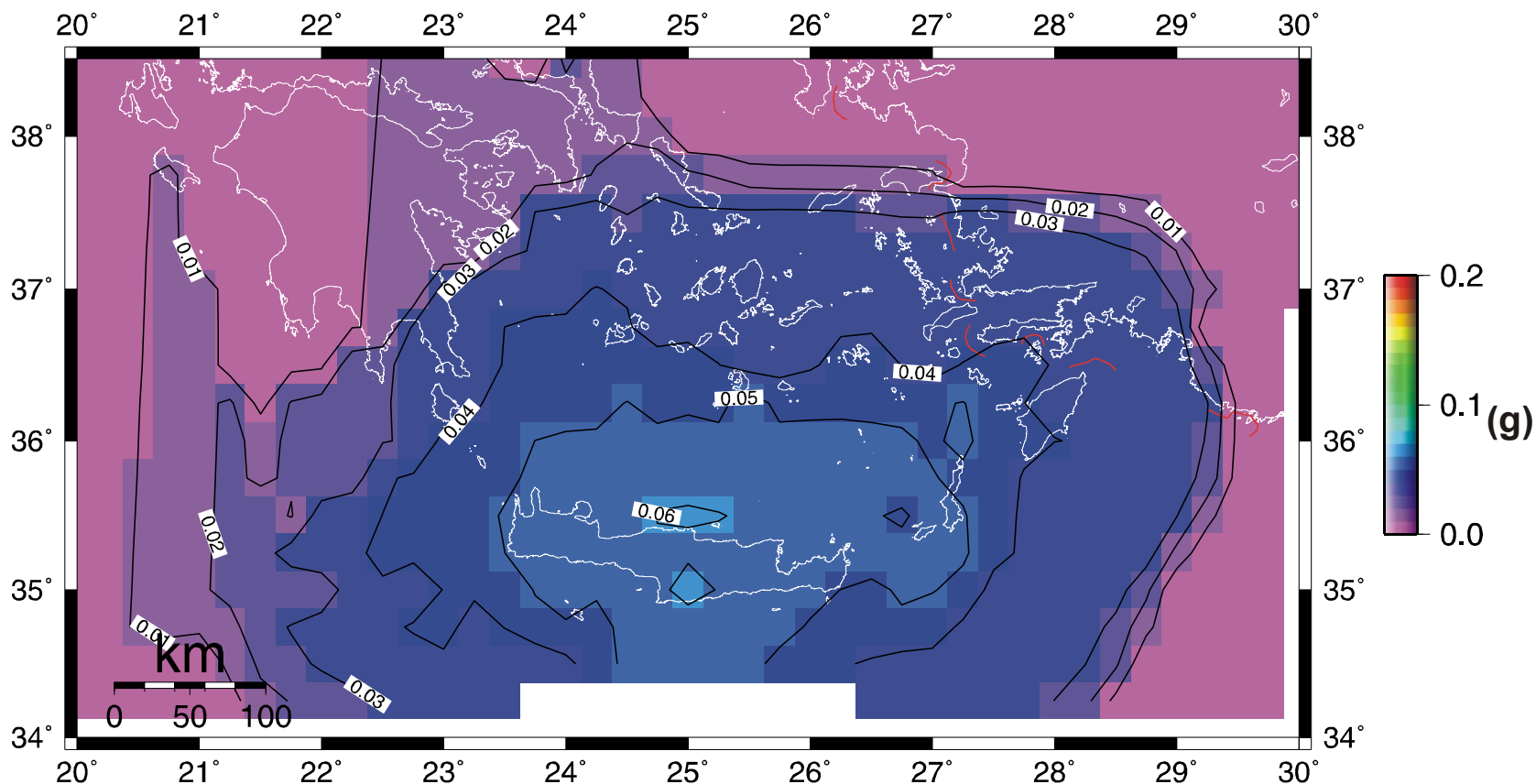
**Σχήμα 4.8.** Αποτελέσματα για το μοντέλο σεισμικών πηγών ενδιαμέσου βάθους και την σχέση εξασθένησης των Theodulidis and Papazachos 1992.

Επιτάχυνση του εδάφους με 90% πιθανότητα να μην ξεπεραστεί τα επόμενα 50 χρόνια



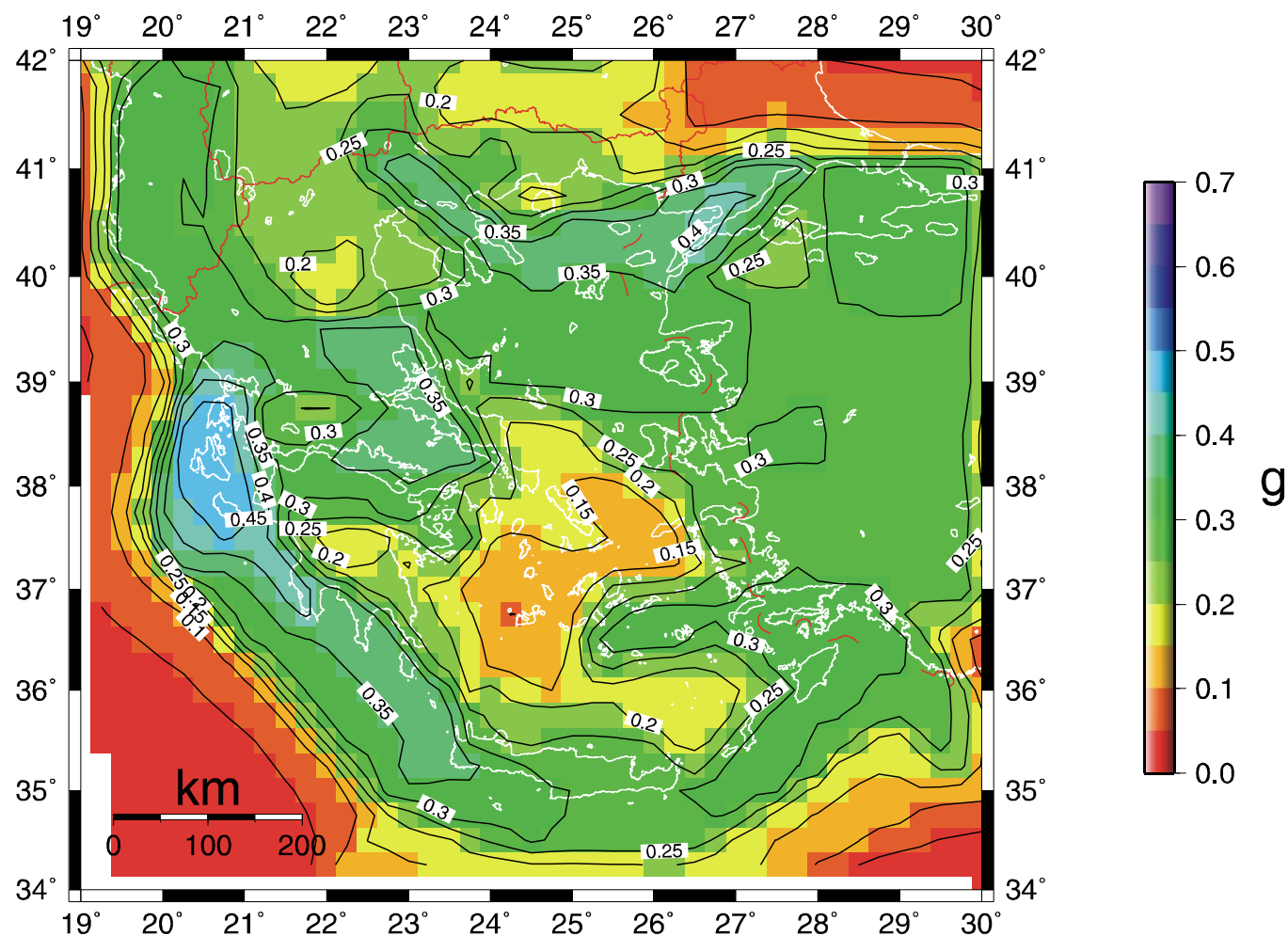
**Σχήμα 4.9.** Αποτελέσματα για το μοντέλο σεισμικών πηγών ενδιαμέσου βάθους και την σχέση εξασθένησης των των Ambraseys et al 1996

Επιτάχυνση του εδάφους με 90% πιθανότητα να μην ξεπεραστεί τα επόμενα 50 χρόνια



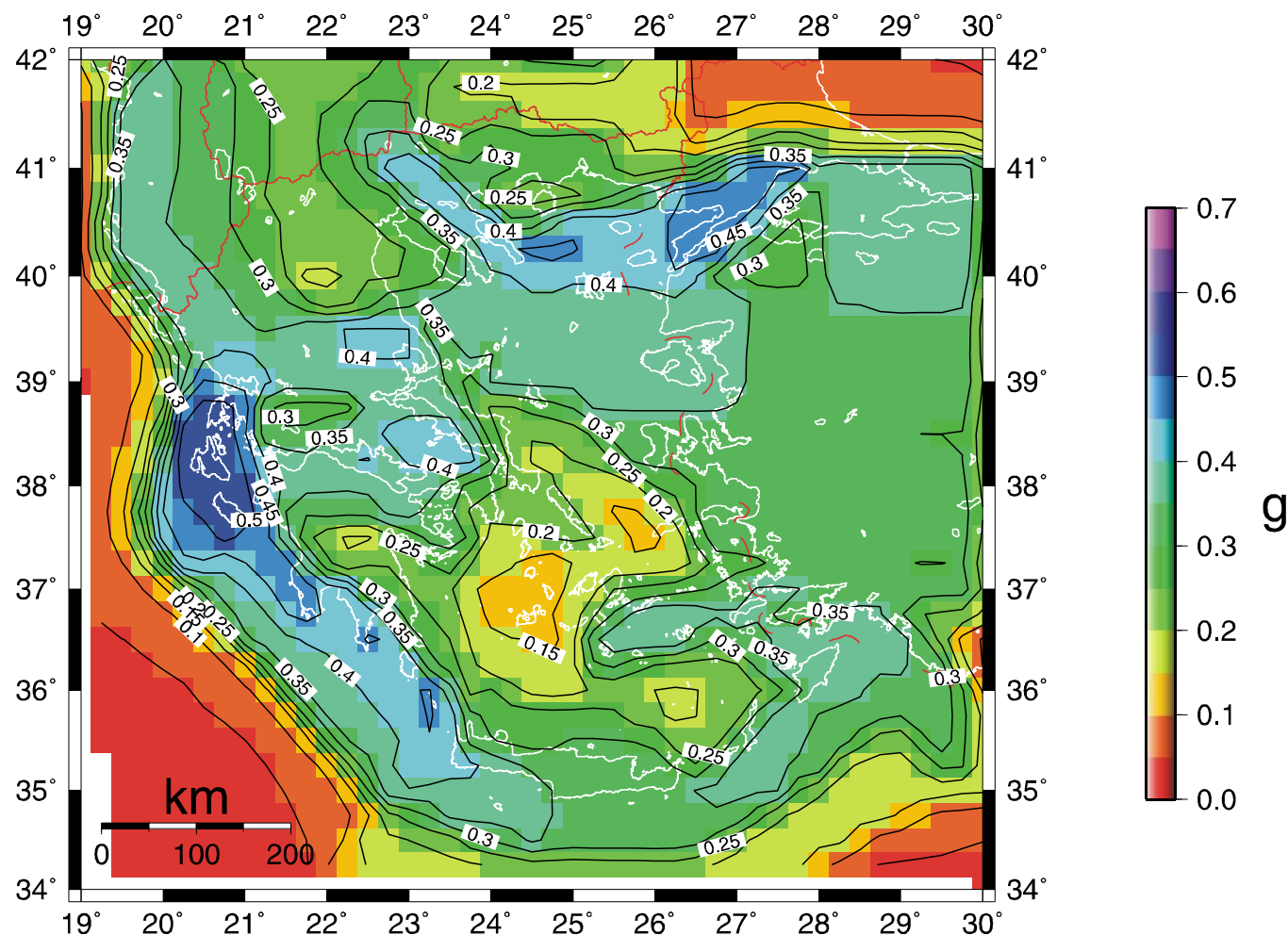
**Σχήμα 4.10.** Αποτελέσματα για το μοντέλο σεισμικών πηγών ενδιαμέσου βάθους και την σχέση εξασθένησης των Μάργαρης κ.ά.2001.

### Επιτάχυνση του εδάφους με 90% πιθανότητα να μην ξεπεραστεί τα επόμενα 50 χρόνια



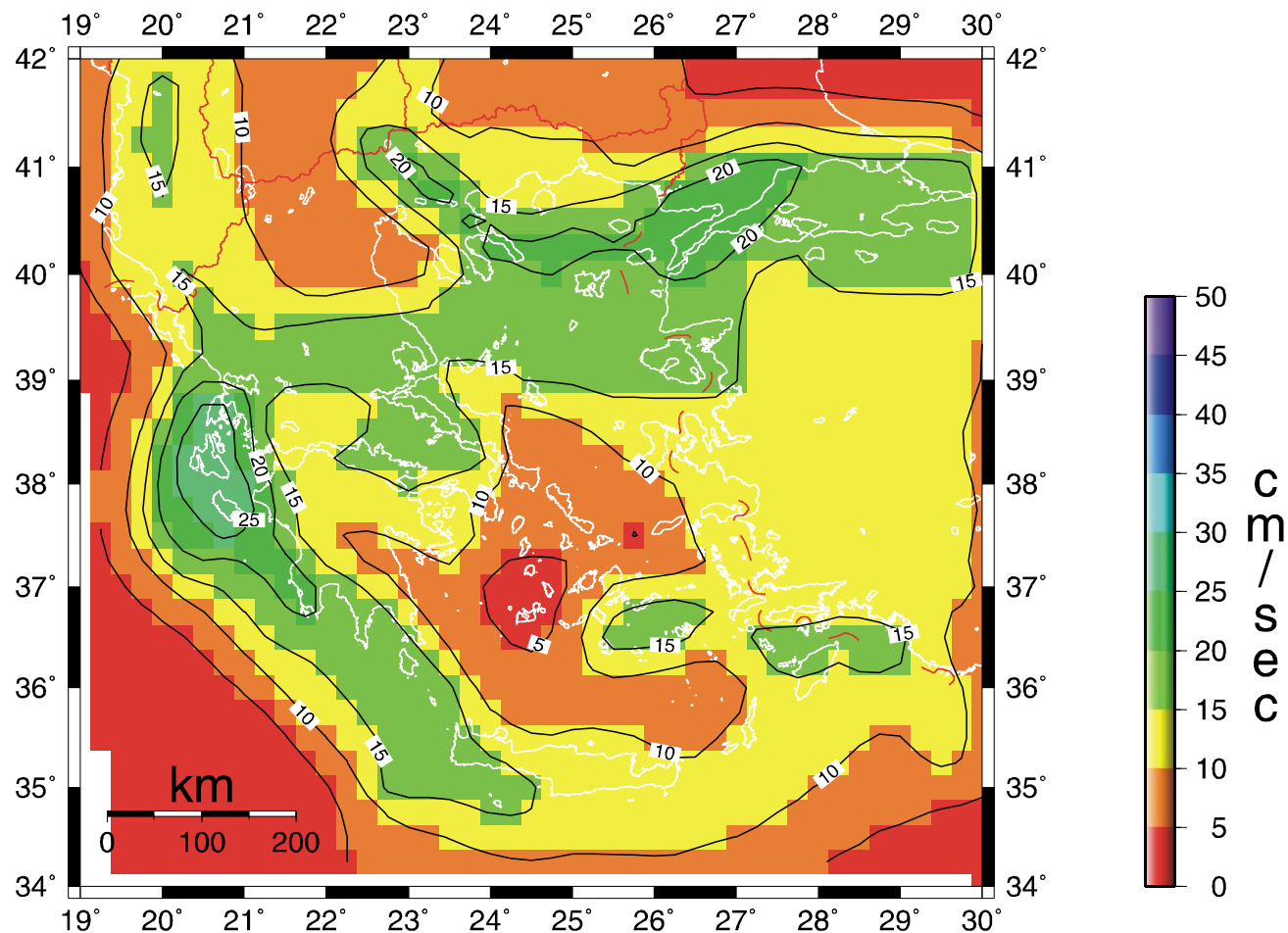
**Σχήμα 4.11.** Τελικά αποτελέσματα (επιτάχυνση) για περίοδο επανάληψης 474 χρόνια.

### Επιτάχυνση του εδάφους με 90% πιθανότητα να μην ξεπεραστεί τα επόμενα 100 χρόνια



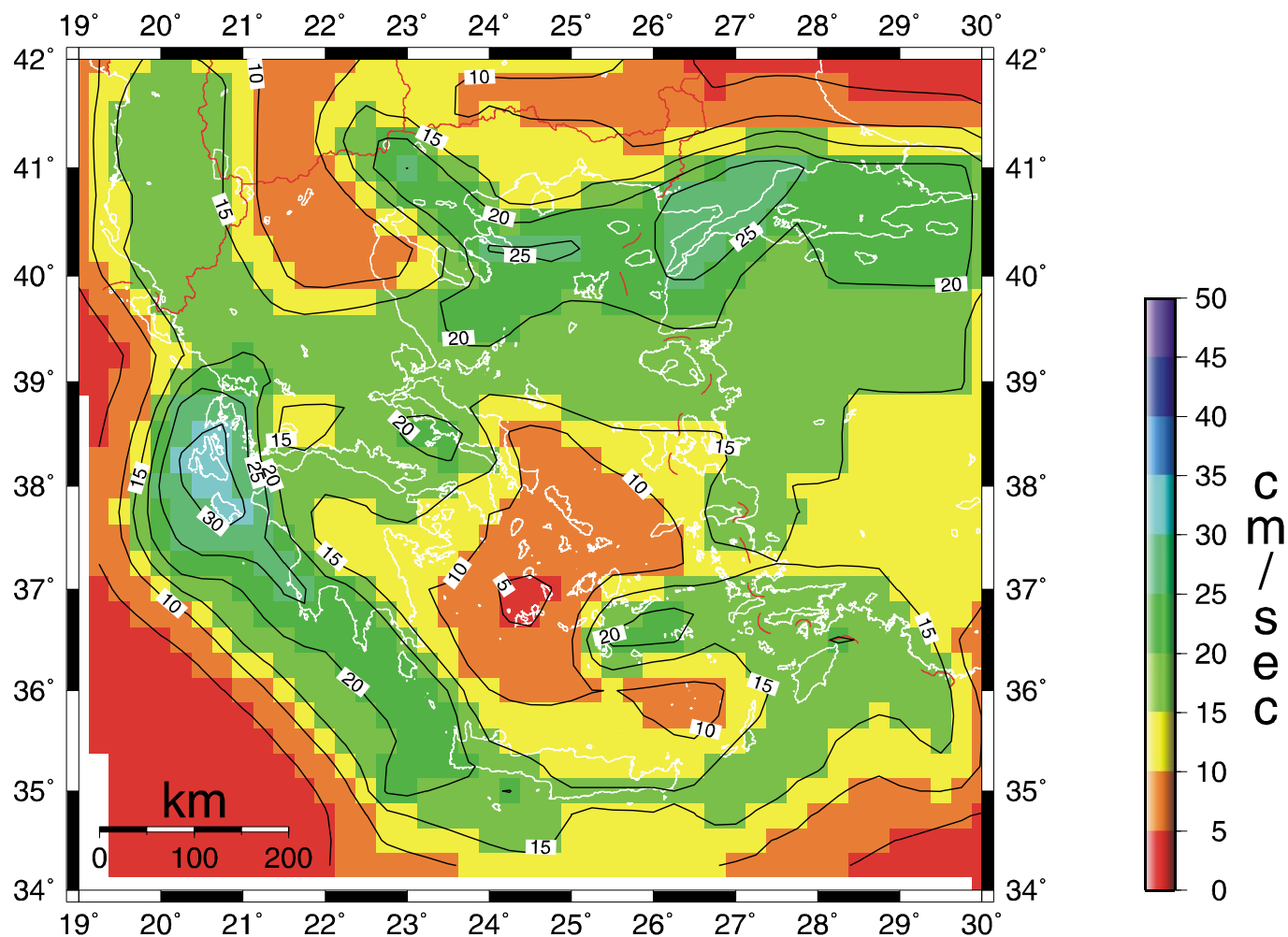
**Σχήμα 4.12.** Τελικά αποτελέσματα (επιτάχυνση) για περίοδο επανάληψης 949 χρόνια.

### Ταχύτητα του εδάφους με 90% πιθανότητα να μην ξεπεραστεί τα επόμενα 50 χρόνια



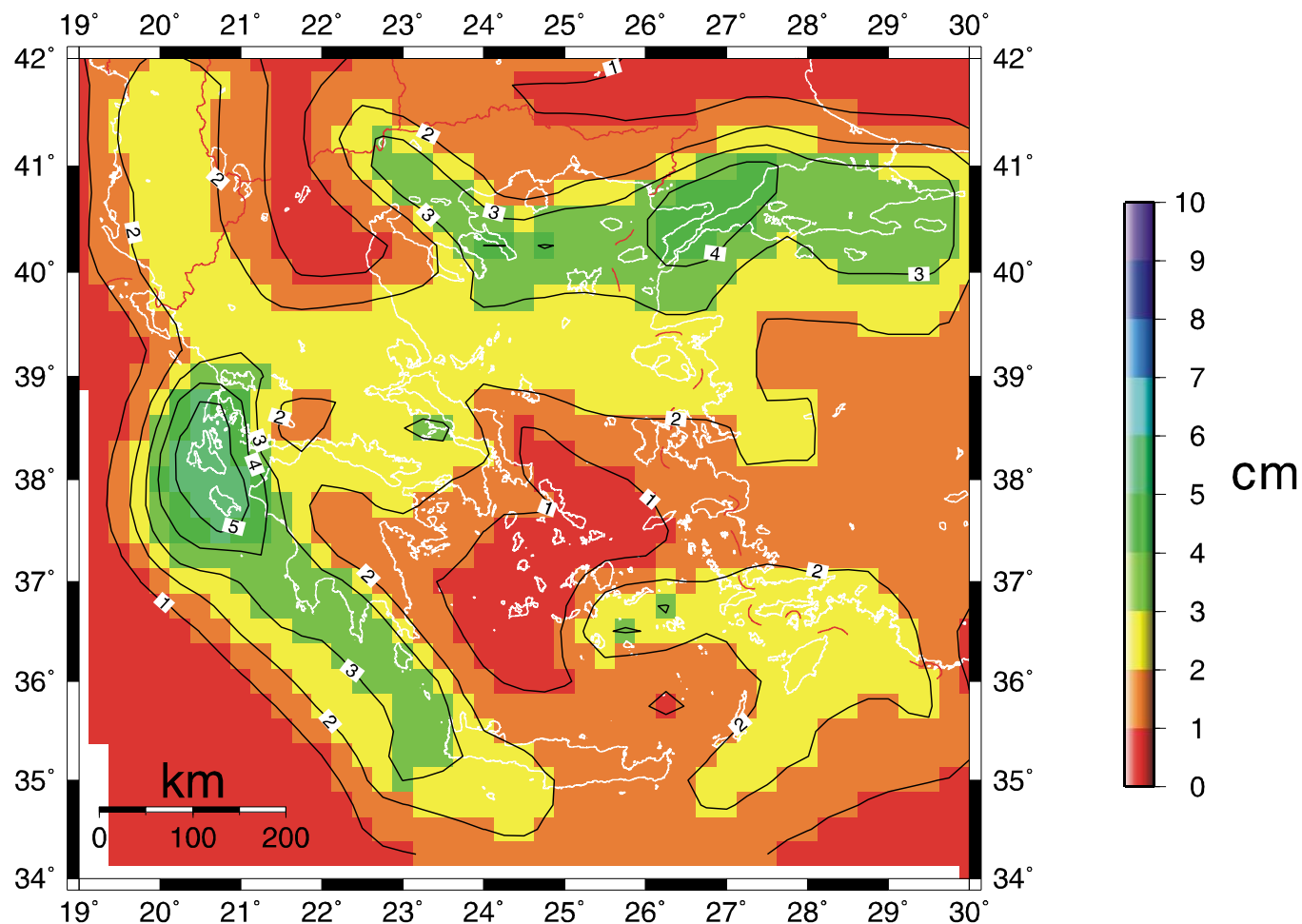
**Σχήμα 4.13.** Τελικά αποτελέσματα (ταχύτητα) για περίοδο επανάληψης 474 χρόνια.

Ταχύτητα του εδάφους με 90% πιθανότητα να μην ξεπεραστεί τα επόμενα 100 χρόνια



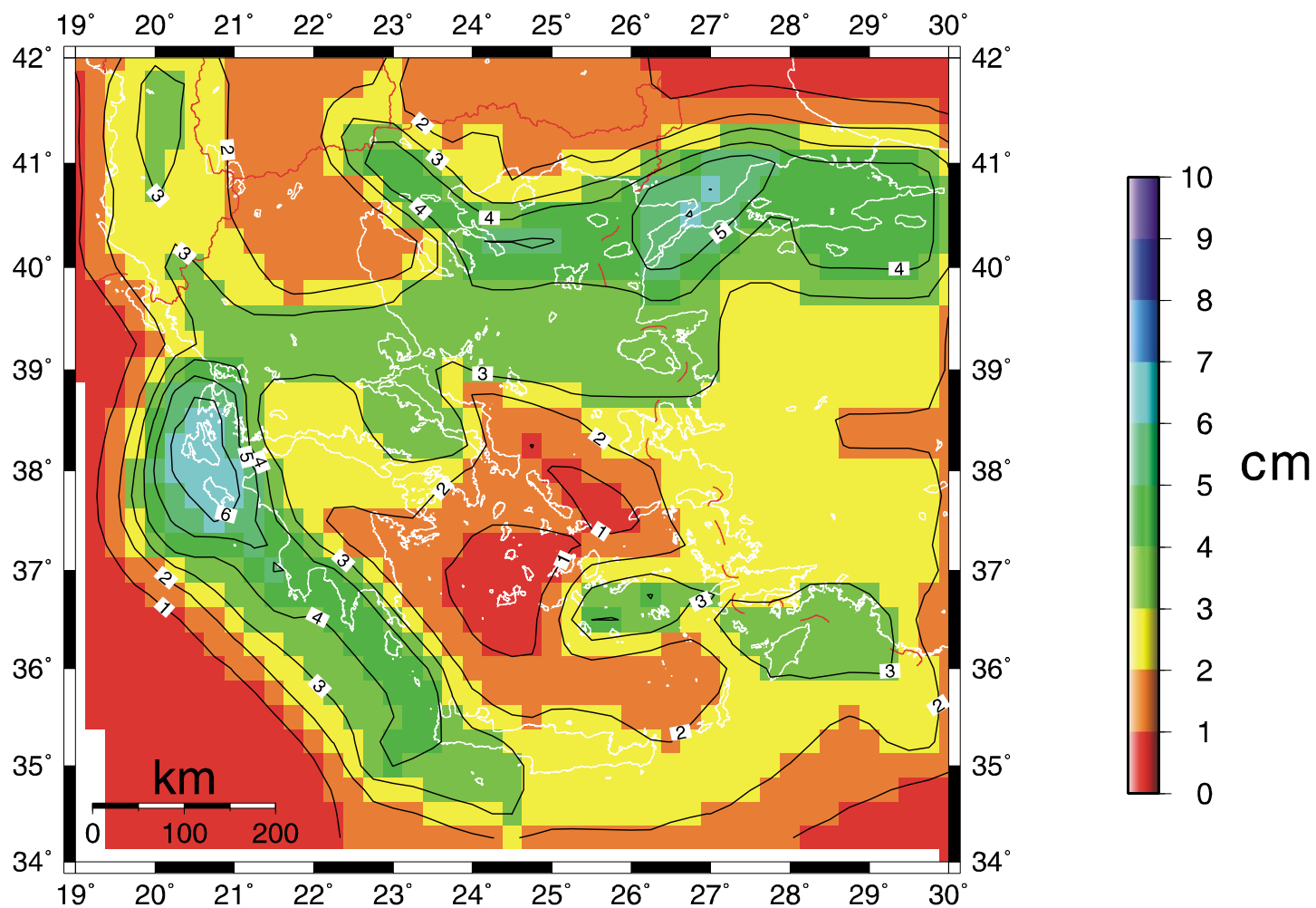
**Σχήμα 4.14.** Τελικά αποτελέσματα (ταχύτητα) για περίοδο επανάληψης 949 χρόνια.

### Μετάθεση του εδάφους με 90% πιθανότητα να μην ξεπεραστεί τα επόμενα 50 χρόνια



**Σχήμα 4.15.** Τελικά αποτελέσματα (μετάθεση) για περίοδο επανάληψης 474 χρόνια.

Μετάθεση του εδάφους με 90% πιθανότητα να μην ξεπεραστεί τα επόμενα 100 χρόνια

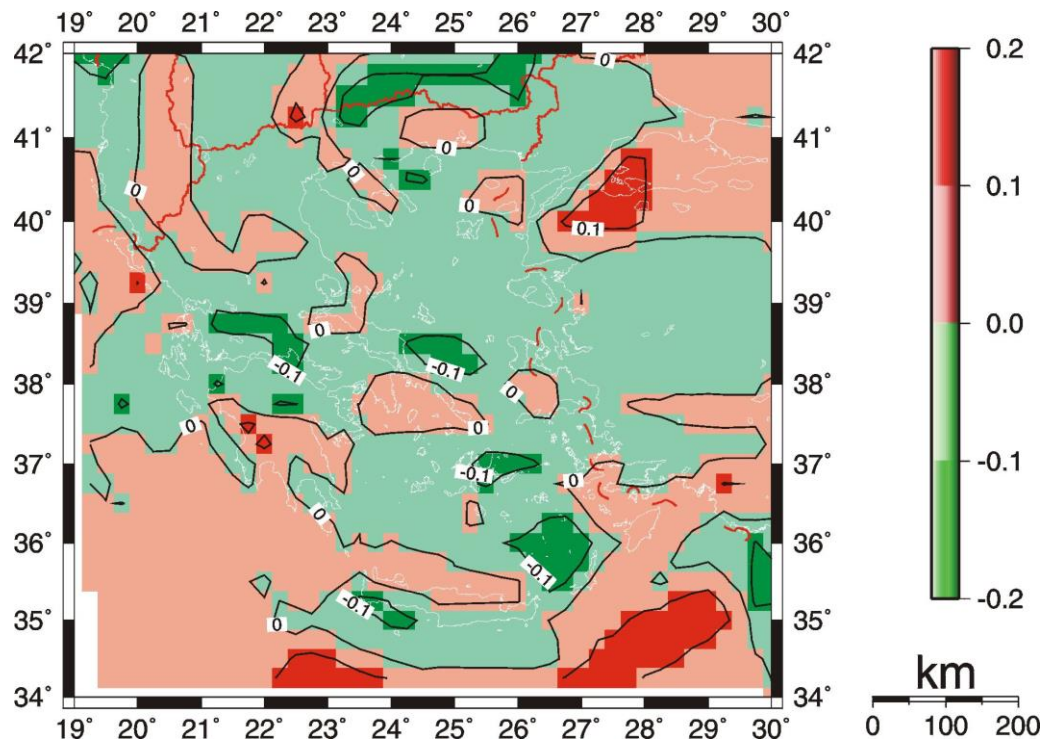


**Σχήμα 4.16.** Τελικά αποτελέσματα (μετάθεση) για περίοδο επανάληψης 949 χρόνια.

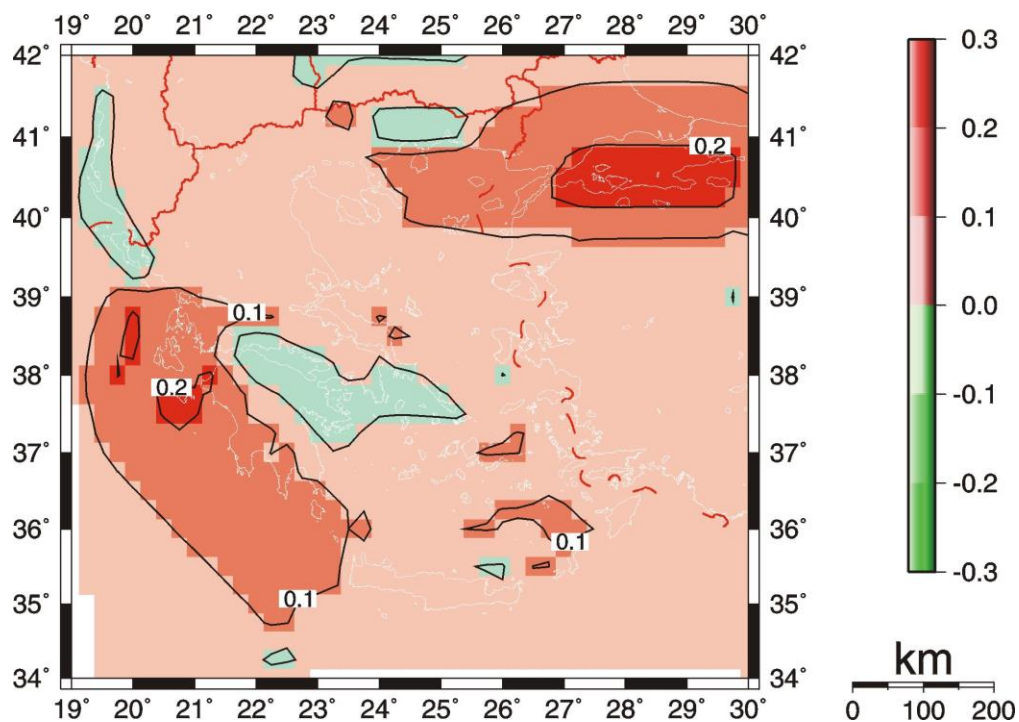
## 5 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για να μελετηθεί η επίδραση του μοντέλου σεισμικών πηγών και της σχέσης εξασθένησης έγιναν οι παρακάτω υπολογισμοί. Στο Σχ.5.1 παρουσιάζεται η διαφορά (σε g) ανάμεσα στο μοντέλο σεισμικών πηγών 1 και το μοντέλο σεισμικών πηγών 2, για την ίδια σχέση εξασθένησης. Οι διαφορές που παρατηρούνται, σε ότι αφορά την μέγιστη τιμή, είναι αρκετά μικρές, της τάξης του  $\pm 0.1g$ , και καθορίζονται από τα γεωγραφικά όρια των ζωνών. Μπορούμε να συμπεράνουμε λοιπόν ότι τα διαφορετικά μοντέλα σεισμικών πηγών δεν επηρεάζουν σημαντικά την τελική λύση τουλάχιστον όσο αφορά τις μέγιστες τιμές της. Στο Σχ.5.2 παρουσιάζεται η διαφορά (σε g) για το ίδιο μοντέλο σεισμικών πηγών (μοντέλο 1) και διαφορετικές σχέσεις εξασθένησης (Theodulidis and Parazachos 1992 – Μάργαρης κ.ά. 2001). Οι διαφορές στην περίπτωση αυτή είναι μεγαλύτερες ( $\pm 0.2g$ ), με την σχέση των Theodulidis and Parazachos 1992 να παρουσιάζει γενικά μεγαλύτερες τιμές κάτι που αναμένεται και από την σύγκριση των σχέσεων στο Κεφάλαιο 3. Η αντίστοιχη διαδικασία ανάμεσα στην σχέση των Ambraseys et al 1996 και την σχέση των Μάργαρης κ.ά. 2001 δίνει γενικά μικρότερες διαφορές χωρίς όμως να θεωρούνται αμελητέες. Συμπεραίνεται έτσι ότι η επιλογή της σχέσης εξασθένησης επηρεάζει σημαντικά την τελική τιμή της σεισμικής επικινδυνότητας.

Η παραπάνω ανάλυση παρουσιάζει την ανάγκη χρήσης αρκετών διαφορετικών μοντέλων και σχέσεων εξασθένησης στον υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας ώστε οι τελικοί υπολογισμοί να παρουσιάζουν όσο το δυνατό μικρότερη εξάρτηση από τις αβεβαιότητες των αρχικών δεδομένων.



**Σχήμα 5.1.** Σύγκριση των δύο μοντέλων σεισμικών πηγών (Μοντέλο 1 – Μοντέλο 2).

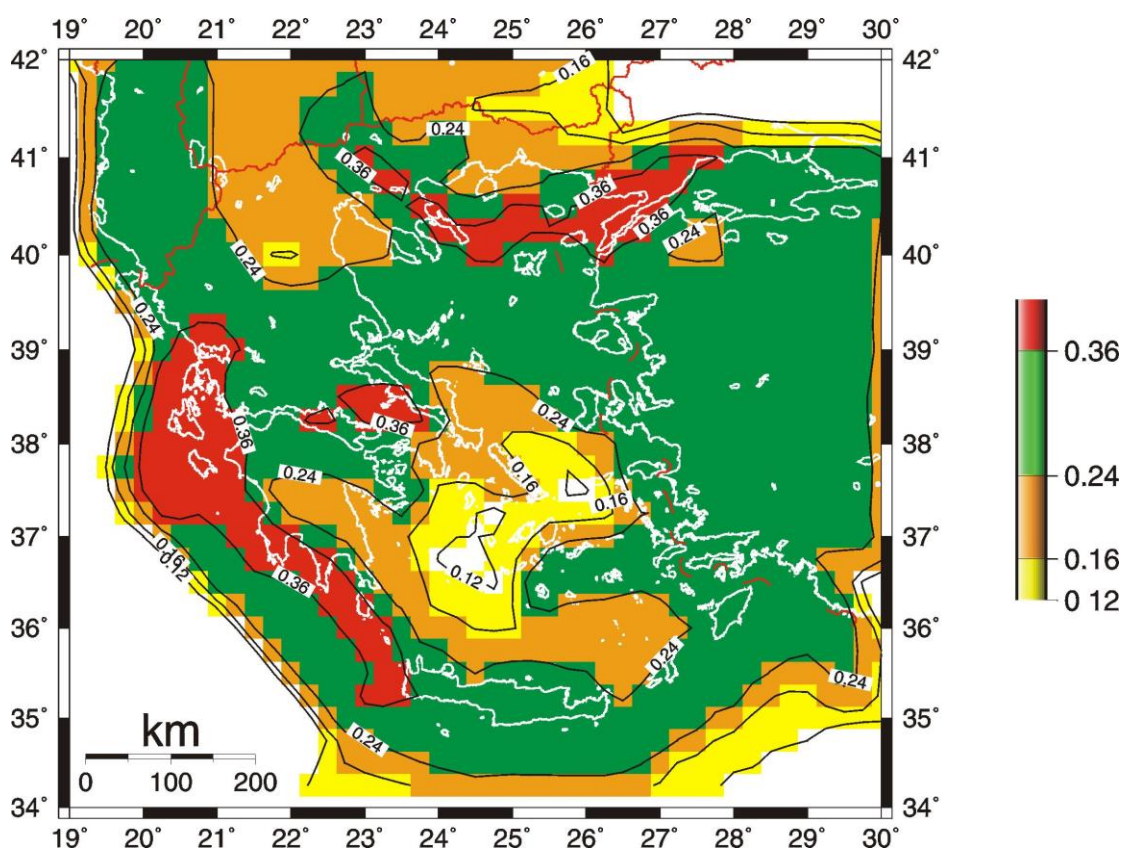


**Σχήμα 5.2.** Σύγκριση δύο σχέσεων εξασθένησης (Theodulidis and Parazachos 1992 – Μάργαρης κ.ά. 2001).

Τέλος στο Σχ.5.3 επιχειρείται μία σύγκριση των αποτελεσμάτων για την εδαφική επιτάχυνση με 90% πιθανότητα να μην ξεπεραστεί για τα επόμενα 50 χρόνια, με τα όρια των ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας που ισχύουν για τον ΕΑΚ 2000 (Σχ.1).

Όπως μπορούμε να διακρίνουμε η Ζώνη Ι έχει ουσιαστικά περιοριστεί στις Κυκλάδες και στην ανατολική Θράκη. Η Ζώνη ΙΙ έχει πάρει τη θέση της Ζώνης Ι στην δυτική Μακεδονία αλλά έχει γενικά περιοριστεί σε έκταση σε σχέση με τον ΕΑΚ από την Ζώνη ΙΙΙ η οποία καλύπτει και το μεγαλύτερο μέρος του Ελλαδικού χώρου.

Η Ζώνη ΙV έχει αυξηθεί σε έκταση και εκτείνεται νότια από την Κεφαλονιά - Ζάκυνθο ως την δυτική Κρήτη ενώ εμφανίζεται και στην κεντρική Ελλάδα (Κορινθιακός κόλπος- Αταλάντη) και στο βόρειο Αιγαίο.



**Σχήμα 5.3.** Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας του ΕΑΚ 2000.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Ambraseys, N., 1990. Uniform magnitude re-evaluation of European earthquakes associated with strong-motion records, *Earth. Eng. Str. Dyn.*, 19, 1-20.
- Ambraseys, N.N. and Simpson, K.A. 1996. Prediction of vertical response spectra in Europe, *Earthquake Engineering and structural Dynamics*, 25, 401-412.
- Ambraseys, N.N., Simpson, K.A. and Bommer, J.J., 1996. Prediction of horizontal response spectra in Europe, *Earthquake Engineering and structural Dynamics*, 25, 371-400.
- Bender B.K., 1983. Maximum likelihood estimation of b values for magnitude grouped data: *Bull. Seism. Soc. of Am.*, 73, 831-851.
- Bender B.K., 1986. Modelling source zone boundary uncertainty in seismic hazard analysis, *Bull. Seism. Soc. of Am.*, 76, 329-341.
- Bender, B.K., and Perkins, D.M., 1987, SEISRISKIII -- A computer program for seismic hazard estimation: *U.S. Geological Survey Bulletin* 1772, 48 p.
- Cornell, C.A. and Merz, H.A. 1975. Seismic Risk Analysis of Boston, *Journal of the Structural Division, American Society of Civil Engineers*, 101. No.ST10, pp.2027-2043.
- Drakopoulos, J. and Makropoulos, K., 1983. Seismicity and seismic hazard analysis in the area of Greece. *Publ. of Geoph. Lab., University of Athens*, No.1.
- Hanson, Stanley, Thenhaus, Paul, Chapman-Wilbert, Michelle, and Perkins, David, 1992, *Analyst's Manual for USGS Seismic Hazard Programs Adapted to the Macintosh Computer System*: U. S. Geological Survey Open-File Report 92-529.
- Makropoulos K.C. and Burton P.W. 1981. A catalogue of seismicity in Greece and adjacent areas. *Geophys.J.R.astr.Soc.* 65, 741-762.

- Makropoulos K.C., Drakopoulos J.K and Latousakis J.B. 1989. A revised and extended earthquake catalogue for Greece since 1900. Geophys.J.Int.Research Note, 98, 391-394.
- Makropoulos, K.C. and Burton, P.W., 1985. Seismic hazard in Greece I: Magnitude Recurrence, Tectonophysics, 117, 205-257.
- Makropoulos, K.C. and Burton, P.W., 1985. Seismic hazard in Greece II: Ground Acceleration, Tectonophysics, 117, 259-294.
- Makropoulos, K.C., Drakopoulos, J., and Latoussakis, J., 1989. A revised earthquake catalogue since 1987. Geophys. J. Int., 98, 391-394.
- McGuire, R.K., 1995. Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes closing the loop, Bull. Seism. Soc Am., 85, 5, 1275-1284.
- Papanastassiou D., Latoussakis J. and Stavrakakis G,, 2001. A revised catalogue of earthquakes in the broader area of greece for the period 1950-2000, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Congress of the Geological Society of Greece, Athens, September 2001. Bulletin of the Geological Society of Greece, Vol. XXXIV/4, 1563-1566, 2001.
- Papazachos, B. and Papazachou C., 1997. The earthquakes of Greece, Editor Ziti, Thessaloniki.
- Papazachos, B.C. & Comninakis, L. 1982. A catalogue of historical earthquakes in Greece and surrounding area, 479 B.C. - 1900 A.D., University of Thessaloniki, Geophys. Lab. Publ., No.5, Thessaloniki.
- Papazachos, B.C., 1990. Seismicity of the Aegean and surrounding area, Tectonophysics, 178, 287-308.
- Reasenber, P.A (1985). Second-order moment of Central California seismicity, 1969-1982, J. Geophys. Res., 90, 5479-5495
- Stepp, J.C., 1973, Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area, in, Harding, S.T., ed., Contributions to Seismic Zoning: National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Report ERL267-ESL30, p. 16-28
- Thenhaus, P.C., ed., 1983, Summary of workshops concerning regional seismic source zones of parts of the conterminous United States,

- convened by the U.S. Geological Survey 1979-1980, Golden Colorado: U.S. Geological Survey Circular 898, 36 pp.
- Theodoulidis, N. and Papazachos B.C., 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 Dynamics and Earthquake Engineering, 11, 387-402.
- Theodoulidis, N. and Papazachos B.C., 1994. Dependence of strong ground motion on magnitude-distance, site geology and macroseismic intensity for shallow, earthquakes in Greece: II. Horizontal pseudovelocity (in press).
- Tselentis, G-A., 1992. Semi - empirical synthesis of site specific design spectra in Western Greece. International Symposium on Earthquake Disaster Mitifation, Odawara, Japan.
- Weichert, D.H., 1980, Estimation of earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes: Seismological Society of America Bulletin, v. 70, p. 1337-1346.
- Wessel, P., and W. H. F. Smith, Free software helps map and display data, EOS Trans. Amer. Geo-phys. U., vol. 72 (41), pp. 441, 445-446, 1991.
- Wiemer, S., and M. Wyss, Minimum magnitude of complete reporting in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States, and Japan, Bulletin of the Seismological Society of America, 90, 859-869, 2000.
- Παπαζάχος και συνεργάτες, 1994. A catalogue of earthquakes in Greece and surrounding area. Publ. of Geoph. Lab., University of Thessaloniki, No. 3, 124.
- Τσελέντης Α., 1997. Σύγχρονη Σεισμολογία, Εκδ. Παπασωτηρίου, Τομ. 1-2, σελ. 1300.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

## **ΣΥΝΟΔΕΥΤΙΚΟ CD**

## **Περιγραφή**

Στο Παράρτημα Ι περιέχεται CDROM στο οποίο υπάρχουν σε ψηφιακή μορφή το κείμενο και οι χάρτες της μελέτης (Αρχείο Microsoft Word 2000).