

## ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

**Θεόδωρος Μ. Τσάπανος**

*Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωφυσικής, 54124 Θεσσαλονίκη*

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πέρασαν ήδη δέκα χρόνια από το μεσημέρι της 13ης Μαΐου 1995 όπου μεταξύ των πόλεων Κοζάνης και Γρεβενών σημειώθηκε ο ισχυρός σεισμός με μέγεθος  $M=6.6$  Ρίχτερ. Από την δόνηση επλήγησαν σε μεγαλύτερο βαθμό χωριά των νομών Κοζάνης και Γρεβενών στη θεωρούμενη μέχρι εκείνη τη στιγμή «ασεισμική» περιοχή. Νεκροί δεν υπήρξαν, όμως η έκταση των ζημιών και των συνεπειών στην ευρύτερη περιοχή ήταν δραματική, αφού πολλά χωριά καταστράφηκαν σχεδόν ολοσχερώς, ενώ ζημιές σημειώθηκαν και σε τμήματα των πόλεων Κοζάνης και Γρεβενών. Στην εργασία αυτή εξετάζονται η σεισμικότητα και η σεισμική επικινδυνότητα της περιφέρειας της Δυτικής Μακεδονίας. Η σεισμικότητα εξετάζεται με την μέθοδο της μέσης τιμής και υπολογίζονται οι παράμετροι  $a_m$ ,  $b$  και  $a$ . Στην συνέχεια δίνονται μέτρα σεισμικότητας της περιοχής όπως η μέση περίοδος επανάληψης  $T_m$ , η πιθανότητα να γίνει σεισμός με μέγεθος  $M$  ή μεγαλύτερο σε  $t$  χρόνια και το πιθανότερο μέγιστο μέγεθος σεισμού σε διάστημα  $t$  ετών. Βρέθηκε ότι σεισμοί με μέγεθος σαν τον σεισμό του 1995 συμβαίνουν κάθε περίπου 300 χρόνια. Επίσης υπολογίστηκε ότι το πιθανότερο μέγιστο μέγεθος σεισμού είναι  $M=6.0$  Richter σε διάστημα 100 ετών δίνονται επίσης χάρτες με το πιθανότερο μέγιστο μέγεθος σεισμού σε διάστημα 50 και 500 ετών. Το μέγιστο πιθανότερο μέγεθος σεισμού υπολογίστηκε σε 6.76 με σφάλμα 0.22. Χρησιμοποιώντας το μέγεθος αυτό σαν σεισμό σχεδιασμού, έγινε εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας που εκφράστηκε ως σεισμική επιτάχυνση (PGA) σε μονάδες  $g$ , έγινε εκτίμηση της επιτάχυνσης σχεδιασμού για τις 4 μεγάλες πόλεις της περιφέρειας (Κοζάνη, Φλώρινα Γρεβενά και Καστοριά). Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η πλέον πρόσφατη σχέση απόσβεσης για τον Ελληνικό χώρο. Εκτιμήθηκε επίσης για τις πόλεις αυτές η πιθανότητα ορισμένης τιμής εδαφικής επιτάχυνσης που προκαλείται από τον σεισμό σχεδιασμού για διάφορες αποστάσεις. Τέλος δίνεται χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Δυτικής Μακεδονίας που εκφράζει την πιθανότητα 10% υπέρβασης της τιμής της εδαφικής επιτάχυνσης τουλάχιστον 1 φορά τα επόμενα 50 χρόνια.

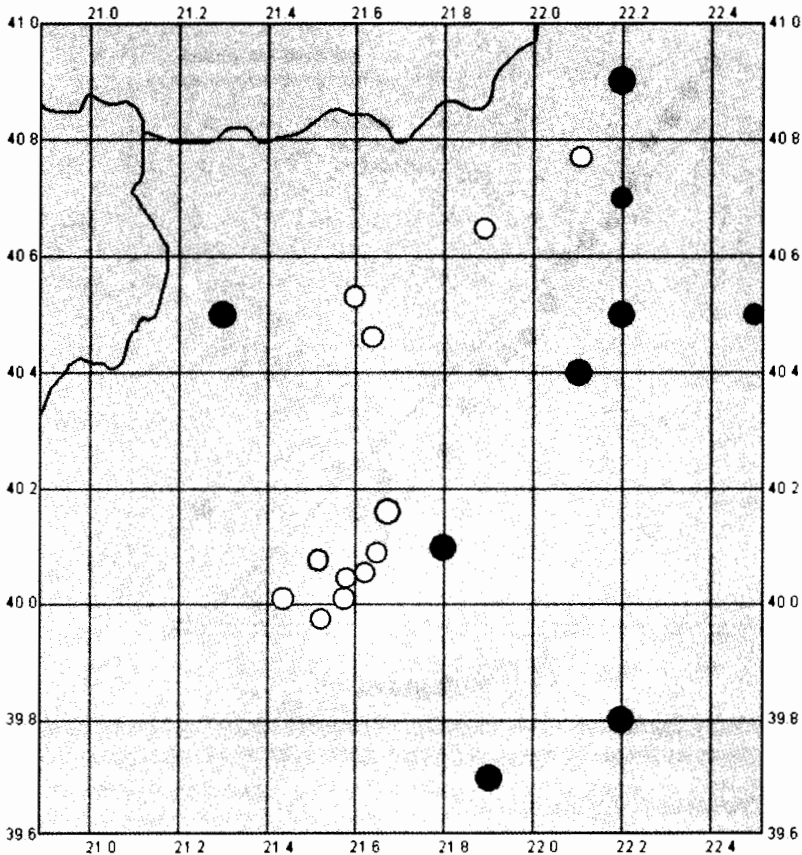
### ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

Η ευρύτερη περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας χαρακτηρίζονταν ως ζώνη χαμηλής σεισμικότητας. Παρόλα αυτά στο παρελθόν έχουν καταγραφεί ισχυροί σεισμοί όπως αυτοί που έγιναν στη Βέροια το 896 και το 1211 με μεγέθη 6.0 και 6.5, αντίστοιχα καθώς και ο σεισμός της Καστοριάς το 1812 με μέγεθος 6.5. Οι σεισμοί αυτοί έγιναν και σε κοντινές αποστάσεις από τις αντίστοιχες πόλεις. Βλέπουμε λοιπόν ότι η περιοχή δεν ήταν και τόσο ασεισμική όσο την εθεωρείτω. Στο σχήμα (1) φαίνονται οι ισχυροί σεισμοί με μέγεθος ( $M>5.0$ ) που

επλήξαν την ευρύτερη περιοχή της δυτικής Μακεδονίας από το 800 το 2003.

Με τον όρο σεισμικότητα μίας περιοχής εννοούμε μία ποσότητα που είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερα είναι τα μεγέθη των σεισμών και όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα εμφάνισής τους στη περιοχή.

Σύμφωνα με τον νόμο των Gutenberg-Richter ο αριθμός των σεισμών από ορισμένο μέγεθος και πάνω που συμβαίνουν σε μία περιοχή κατά την διάρκεια ορισμένου χρονικού διαστήματος συνδέονται με γραμμική σχέση με το μέγεθος των σεισμών.



**Σχήμα (1).** Οι σεισμοί με μέγεθος  $M > 5.0$  που έπληξαν την ευρύτερη περιοχή μελέτης από το 800 μέχρι το 2003.

**Figure (1).** The earthquakes with magnitude  $M > 5.0$  which occurred in the broad studied area during the time period 800- 2003.

$$\text{Log}N = a_1 - bM \quad (1)$$

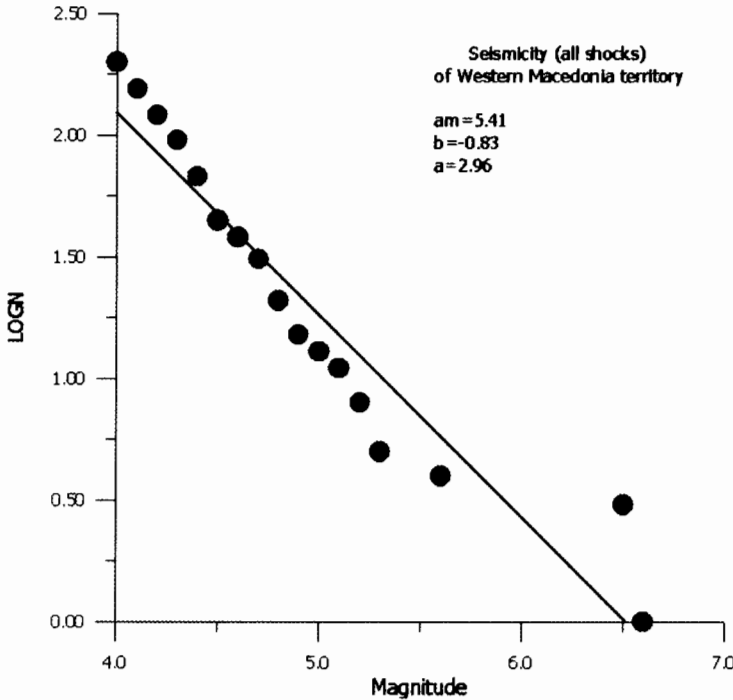
όπου  $a_1$  και  $b$  παράμετροι. Η κατανομή των κύριων σεισμών στη περιοχή σύμφωνα με τον παραπάνω νόμο δίνεται στο σχήμα (2).

Η παράμετρος  $b$  της σχέσης (1) έχει μεγάλη σημασία για την σεισμολογία και εξαρτάται από το πεδίο των τάσεων της περιοχής και την ομοιογένεια του υλικού. Μεταξύ των άλλων βρέθηκε ότι η τιμή της παραμέτρου αυτής είναι μεγαλύτερη στους μετασεισμούς. Η παράμετρος  $a_1$  εξαρτάται από την σεισμικότητα της περιοχής, το εμβαδόν που καλύπτουν τα επίκεντρα και από το χρονικό

διάστημα  $t$  στο οποίο έγιναν οι σεισμοί.

Αν εξετάσουμε αναλυτικότερα τους σεισμούς που έγιναν στη περιοχή της δυτικής Μακεδονίας, μπορούμε να τους κατατάξουμε 3 ομάδες. Οι σεισμοί που έγιναν από το 1700 μέχρι το 2003 (όλη η δυτική Μακεδονία), από το 1700 μέχρι το 1995 για την περιοχή Κοζάνης-Γρεβενών (διάστημα προ του σεισμού) και τέλος την μετασεισμική περίοδο (μετά τον σεισμό του 1995). Στο σχήμα (3) δείχνεται η κατανομή των μεγεθών στις 3 ομάδες.

Η τιμή παραμέτρου  $b$  για τα 2 χρονικά διαστήματα 1700-1995 (προ του σεισμού) και της μετασεισμικής ακολουθίας είναι **0.60** και **1.30**, αντί-



**Σχήμα (2).** Κατανομή των μεγεθών των κύριων σεισμών στην ευρύτερη περιοχή ης δυτικής Μακεδονίας.  
**Figure (2).** The frequency-magnitude distribution of the main shocks in the broad area of western Macedonia.

στοιχα. Είναι εντυπωσιακά υψηλή η τιμή της παραμέτρου αυτής για την μετασεισμική ακολουθία.

Συνήθως ανάγουμε την παράμετρο  $a_i$  (της σχέσης 1) σε χρονικό διάστημα 1 έτους με την σχέση και σε μία μονάδα επιφανείας (π.χ. 10.000 Km<sup>2</sup>) σύμφωνα με τη σχέση:

$$a = a_i - \log t S \quad (2)$$

όπου  $t$  το χρονικό διάστημα το οποίο καλύπτουν τα δεδομένα, (στην προκειμένη περίπτωση σεισμοί) και  $S$  το εμβαδόν της περιοχής που μελετάται.

Για την ποσοτική εκτίμηση της σεισμικότητας μιας περιοχής χρησιμοποιούνται διάφορα μέτρα σεισμικότητας. Τέτοια είναι: α) Η μέση περίοδος επανάληψης  $T_m$  (σε έτη) των σεισμών οι οποίοι έχουν μέγεθος  $M$  ή μεγαλύτερο και δίνεται από τη σχέση

$$T_m = \frac{10^{bM}}{10^a} \quad (3)$$

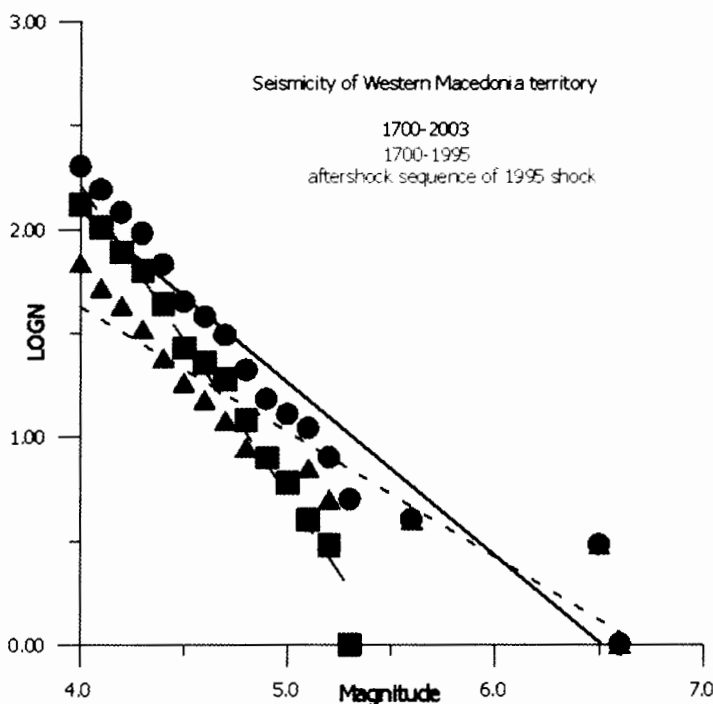
ενώ η πιθανότητα  $P_t$  να γίνει σεισμός μεγέθους  $M$  ή μεγαλύτερου κατά το χρονικό διάστημα,  $t$ , υποθέτοντας χρονική κατανομή Poisson δίνεται από την σχέση

$$P_t = 1 - e^{(-10^{a-bM})} \cdot t \quad (4)$$

Άλλο μέτρο σεισμικότητας θεωρείται το πιθανότερο μέγιστο μέγεθος σεισμού,  $M_t$ , σε χρόνο  $t$  ετών και δίνεται από τη σχέση:

$$M_t = \frac{a}{b} + \frac{\log t}{b} \quad (5)$$

Οι σχέσεις (3, 4 και 5) χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή. Είναι χαρακτηριστικό ότι ένας σεισμός μεγέθους 6.0 Richter έχει μέση περίοδο ε-



**Σχήμα (3).** Κατανομή των μεγεθών των σεισμών στην περιοχή μελέτης για τα 3 χρονικά διαστήματα, 1700-2003 (μαύροι κύκλοι), 1700-1995 (τρίγωνα) και μετασεισμική ακολουθία του σεισμού του 1995 (τετράγωνα).

**Figure (3).** Frequency-magnitude distribution in the studied area for 3 time intervals, 1700-2003 (black circles), 1700-1995 (triangles) and aftershock sequence of the event of 1995 (squares).

πανάληψης 105 περίπου χρόνια (με πιθανότητα 0.61). Ο πιθανότερος μέγιστος σεισμός στη Δυτική Μακεδονία για χρονικό διάστημα 100 ετών έχει μέγεθος 6.0 Richter. Η παρατήρηση αυτή δείχνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μας.

#### ΜΕΤΡΑ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

Η μέση περίοδος επανάληψης των σεισμών  $T_m$  (σε έτη), που έχουν μέγεθος  $M$  ή μεγαλύτερο δίνεται από τη σχέση (3), ενώ η πιθανότητα  $P_t$  να γίνει σεισμός με μέγεθος  $M$  ή μεγαλύτερο σε χρόνο  $t$  ετών (υποθέτοντας κατανομή Poisson) δίνεται από την σχέση (4). Στον Πίνακα (1) φαίνονται οι μέσες περιόδους επανάληψης για σεισμούς με μέγεθος 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5 και 6.6, καθώς και οι

πιθανότητες να γίνει σεισμός στην περιοχή με μέγεθος 5.0 και 6.0 ή μεγαλύτερο για 1, 10, 25, 50, 75 και 100 έτη.

Στον παραπάνω πίνακα τα σύμβολα P10, P25, κτλ. δείχνουν την πιθανότητα γένεσης σεισμού μεγέθους 5.0 και 6.0 ή μεγαλύτερο για χρονικά διαστήματα 10, 25, κτλ. ετών.

Το πιθανότερο μέγιστο μέγεθος  $\bar{M}$  σεισμού που γίνεται στη περιοχή σε χρονικό διάστημα  $t$  ετών δίνεται από τη σχέση (5). Στον Πίνακα (2) εμφανίζονται τα μεγέθη των σεισμών για 1, 5, 10, 25, 50, 75 και 100 έτη.

Για την περιοχή της Φλώρινας (Tsarpanos, et al., 1993) βρέθηκε ότι η πόλη δεν απειλείται από σεισμούς κοντινών αποστάσεων, αφού δεν υπάρχουν εστίες ισχυρών σεισμών ( $M > 5.5$ ) μέχρι την

**ΠΙΝΑΚΑΣ (1).** Μέση περίοδος επανάληψης για διάφορα μεγέθη και πιθανότητα γένεσης σεισμού μεγέθους 5.0 και 6.0 ή μεγαλύτερου για διάφορες χρονικές περιόδους.

**TABLE (1).** Mean return periods for various magnitudes and the probability of the occurrence of a magnitude 5.0 and 6.0 or greater in various time periods.

Μέγεθος σεισμού	Μέση περίοδος επανάληψης Tm (έτη)	Πιθανότητα Pt γένεσης σεισμού M σε χρόνο t P1	P10	P25	P50	P75	P100
4.0	2.3						
4.5	5.9						
5.0	15.5	0.063	0.476	0.800	0.960	0.992	0.998
5.5	40.2						
6.0	104.7	0.009	0.092	0.212	0.379	0.551	0.615
6.5	272.3						
6.6	329.6						

**ΠΙΝΑΚΑΣ (2).** Το πιθανότερο μέγιστο μέγεθος σεισμού που γίνεται στην περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας για διάφορα χρονικά διαστήματα.

**TABLE (2).** The most probable maximum magnitude which occurred in the territory of western Macedonia for various time periods.

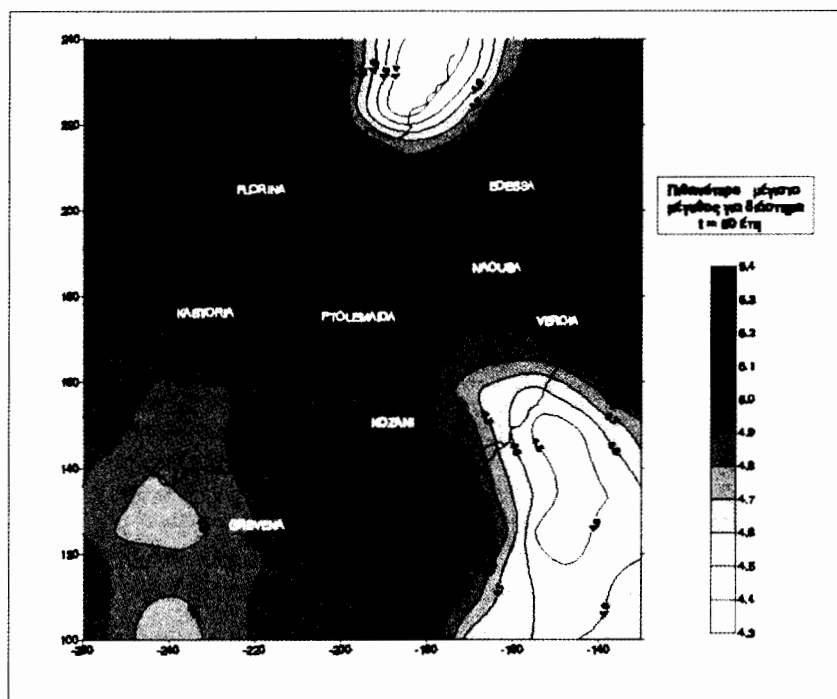
Χρονικό διάστημα (σε έτη)	Μέγεθος σεισμού
1	3.6
5	4.4
10	4.8
25	5.3
50	5.6
75	5.8
100	6.0

απόσταση των 45 χιλιομέτρων περίπου. Εντούτοις ο κίνδυνος από μακρινότερους σεισμούς δεν είναι ανύπαρκτος. Το χρονικά εξαρτώμενο μοντέλο που εφαρμόστηκε για την περιοχή για την γένεση επιφανειακών σεισμών έδειξε ότι υπάρχει πιθανότητα 33% να γίνει σεισμός με μέγεθος  $M=5.3$  τα επόμενα 10 χρόνια, ενώ η πιθανότητα αυξάνει στο 76% για σεισμό ίδιου μεγέθους για τα επόμενα 20 χρόνια (Tsapanos et al., 1993). Στη περιοχή της Καστοριάς εκτός από τον μεγάλο σεισμό του 1812 παρατηρείται μια μικρή σεισμικότητα ακόμα και στις μέρες μας με σεισμούς μικρότερους των 5 Richter.

Στο σχήμα (4) έχει χαρτογραφηθεί για την δυτική Μακεδονία το πιθανότερο μέγιστο μέγεθος σεισμού για 50 χρόνια και για επιφάνεια 10.000 Km<sup>2</sup> σύμφωνα με τις σχέσεις (2) και (5). Στο χάρτη του σχήματος (5) έχει χαρτογραφηθεί για την δυ-

τική Μακεδονία το πιθανότερο μέγιστο μέγεθος σεισμού για 500 χρόνια και για επιφάνεια 10.000 Km<sup>2</sup> σύμφωνα με τις σχέσεις (2) και (5).

Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες ίσων τιμών στα σχήματα (4) και (5) της παραμέτρου σεισμικότητας  $M_p$ , ακολουθούν σχεδόν τον ποταμό Αλιάκμονα. Ζώνες υψηλής σεισμικότητας εμφανίζονται βόρεια του ποταμού. Στο ΒΔ τμήμα της περιοχής εμφανίζεται μια ζώνη με μεγάλη σεισμικότητα με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και φτάνει μέχρι την περιοχή της Πτολεμαΐδας, ενώ μια δεύτερη ζώνη με υψηλή επίσης σεισμικότητα εμφανίζεται στο ΒΑ τμήμα της περιοχής ανατολικά της Έδεσσας. Ο σεισμός του 896 ( $M=6.0$ ) κατέστρεψε την πόλη της Βέροιας και βρίσκεται σε απόσταση 45 Km από την Κοζάνη. Ενδέχεται ο σεισμός αυτός να σχετίζεται με το τμήμα του Αλιάκμονα που έχει ΒΑ διεύθυνση (Papazachos and Papazachou, 1989). Ένα



**Σχήμα (4).** Πιθανότερο μέγιστο μέγεθος σεισμού για την Δυτική Μακεδονία για διάστημα 50 ετών (Χατζηδημητρίου και Παπαζάχος, 1995).

**Figure (4).** The most probable maximum magnitude in a time period of 50 years for western Macedonia (Hatzidimitriou and Papazachos, 1995).

άλλο χαρακτηριστικό της περιοχής είναι ότι η σεισμική δράση άρχισε μετά την πλήρωση της λίμνης του Πολυφύτου με νερό, το 1974. Η πλήρωση αυτή προκάλεσε ασεισμική δράση η οποία με την πάροδο του χρόνου διέγειρε την τωρινή σεισμική δράση σε μία περιοχή με χαμηλή σεισμικότητα. Από έρευνα στη περιοχή (Παπαζάχος και συνεργάτες, 1995) δειχθηκε ότι τμήματα του ρήγματος αυτού ή άλλα μικρότερα ρήγματα κοντά στο ρήγμα του σεισμού του 1995 είχαν ενεργοποιηθεί κατά την περίοδο 1979-1993, και μάλιστα μεταξύ των άλλων μικρών μεγεθών σεισμών, το 1984 εκλύθηκε ένας ισχυρός με μέγεθος 5.6 Richter.

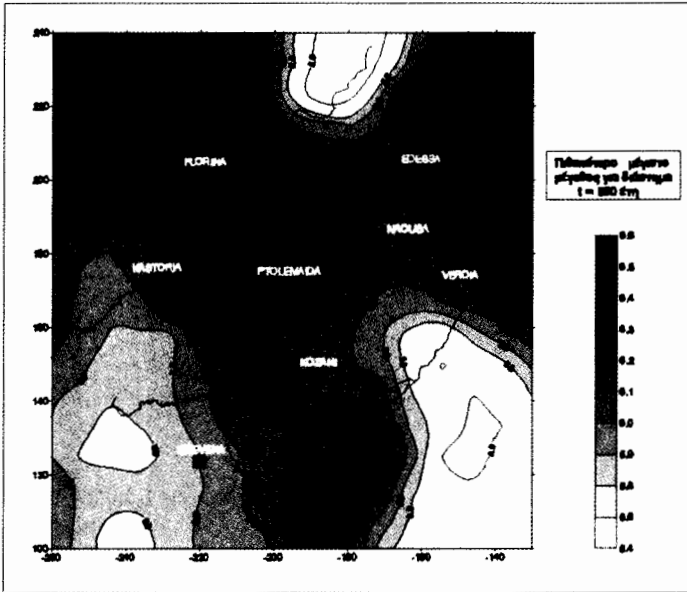
Εδώ θα θέλαμε να τονίσουμε ότι τόσο η Κοζάνη όσο και τα Γρεβενά, οι δύο πόλεις που δοκιμάστηκαν κατά κύριο λόγο από τον σεισμό του 1995, βρίσκονται έξω από την κύρια ζώνη διάρρηξης, ε-

νώ το νοτιοδυτικό άκρο της τεχνητής λίμνης του Πολυφύτου βρίσκεται μέσα σε αυτή. Η διάρρηξη είχε διεύθυνση ΑΒΑ-ΔΝΔ και πρόκειται για ένα κανονικό ρήγμα με μικρή δεξιόστροφη συνιστώσα ολισθήσης (Παπαζάχος και συνεργάτες, 1995).

Οι ποσότητες που χαρτογραφούνται στα σχήματα (4 και 5) υπολογίστηκαν σε πλέγμα ισαπεχόντων ανά 0, 1° σημείων με βάση τα δεδομένα σεισμών με επίκεντρα σε ακτίνα 30 Km από κάθε σημείο.

### ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ

Σεισμική επικινδυνότητα ενός τόπου είναι η αναμενόμενη σε αυτό τον τόπο τιμή της σεισμικής έντασης  $Y$ , σε καθορισμένο χρονικό διάστημα και με ορισμένη πιθανότητα υπέρβασης της τιμής αυτής. Ο όρος σεισμική ένταση μπορεί να αντιστοι-



**Σχήμα (5).** Πιθανότερο μέγιστο μέγεθος σεισμού για την Δυτική Μακεδονία για διάστημα 500 ετών (Χατζηδημητρίου και Παπαζάχος, 1995).

**Figure (5).** The most probable maximum magnitude in a time period of 50 years for western Macedonia (Hatzidimitriou and Papazachos, 1995).

χεί στην μακροσεισμική ένταση  $I$  ή σε μέτρο μιας από τις παραμέτρους της σεισμικής κίνησης [π.χ. λογάριθμος της εδαφικής επιτάχυνσης ( $a$ ), ταχύτητας ( $V$ ) ή μετάθεσης ( $D$ )]. Διάφορα μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας. Για παράδειγμα η μέθοδος των ακραίων τιμών του Gumbel μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα χρήσιμο εργαλείο για τον υπολογισμό των παραμέτρων της σεισμικής επικινδυνότητας. Από την άλλη μεριά οι Knoroff and Kagan (1977) έδειξαν ότι ενδέχεται η μέθοδος να παρουσιάζει προβλήματα στον υπολογισμό των παραμέτρων της σεισμικής επικινδυνότητας. Και αυτό διότι η μεθοδολογία λειτουργεί καλά όταν έχουμε δεδομένα σεισμών για μικρά χρονικά διαστήματα (π.χ ανά 1 χρόνο), αλλά αυτό είναι εφικτό μόνο για τους πρόσφατους καταλόγους που συντάχθηκαν από ενόργανες καταγραφές. Από τα δεδομένα που χρησιμοποιήσαμε φαίνεται η μεθοδολογία αυτή δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην παρούσα μελέτη. Για να ξεπεραστεί αυτή η ασυμβατότητα χρησιμοποιή-

ήσαμε την μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας (Kijko and Sellevoll, 1989,1992). Με την μεθοδολογία αυτή ξεπερνάμε την παραπάνω δυσκολία.

Για την ευρύτερη περιοχή μελέτης το μέγιστο πιθανό μέγεθος σεισμού σύμφωνα με την μεθοδολογία που εφαρμόσαμε είναι:

$$M_w^{\max} = 6.76 \pm 0.22$$

Η τιμή αυτή βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με το μέγιστο παρατηρούμενο μέγεθος της περιοχής που μελετάμε που είναι  $M_w = 6.7$  (Papazachos and Papazachou, 2002) και ενέχει το πλεονέκτημα της εκτίμησης του σφάλματος. Ο σεισμός αυτός έγινε κοντά στην Έδεσσα το 1395, είχε ένταση στην πόλη της Έδεσσας (VIII) και εξαιτίας του γκρεμίστηκε ένα μεγάλο μέρος της πόλης.

Για τον καθορισμό της σεισμικής επικινδυνότητας από τον Cornell (1968) και τον McGuire (1976) χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Poisson το οποίο στον αλγόριθμο περιγράφεται από τον κα-

θορισμό των σεισμικών ζωνών, τις παραμέτρους σεισμικότητας (εστιακό βάθος, ρυθμός σεισμικότητας, μέγιστο μέγεθος, τιμές της παραμέτρου  $b$ , κτλ.) και την σχέση απόσβεσης της ισχυρής εδαφικής κίνησης. Αντί για το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήσαμε στη εργασία αυτή το μοντέλο των Kijko and Graham (1998) που εκτός των άλλων πλεονεκτημάτων είναι απαλλαγμένο από την απαίτηση των σεισμικών ζωνών, που αν δεν ορισθούν με ακρίβεια υπερτιμάται ή υποεκτιμάται η σεισμική επικινδυνότητα.

Η σεισμική επικινδυνότητα όπως καθορίζεται από τον Lomnitz (1974) είναι η πιθανότητα εμφάνισης ενός «κρίσιμου σεισμού» κατά την διάρκεια ορισμένης χρονικής περιόδου. Ο κρίσιμος αυτός σεισμός ονομάζεται «σεισμός σχεδιασμού». Η έννοια του «σεισμού σχεδιασμού» χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της «επιτάχυνσης σχεδιασμού» σύμφωνα με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από τους Kijko and Graham (1998, 1999) για τον σχεδιασμό ενός σεναρίου για την γένεση σεισμών σε κοντινές αποστάσεις από την θέση μελέτης και τον σεισμικό κίνδυνο που θα προκύψει από αυτούς για την περιοχή.

Έτσι με βάση την νέα σχέση απόσβεσης για τον Ελληνικό χώρο, όπως αυτή διατυπώθηκε από τον Μάργαρη και τους συνεργάτες του (2001) και αφορά την σεισμική εδαφική επιτάχυνση, την εδαφική ταχύτητα και την εδαφική μετάθεση έγινε η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας με βάση την σεισμική εδαφική επιτάχυνση και την εδαφική ταχύτητα. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι όλες οι εκτιμήσεις έγιναν για εδάφη ενδιάμεσης κατηγορίας. Δύο είναι κυρίως οι ισχυροί σεισμοί της περιφέρειας δυτικής Μακεδονίας. Αυτός του 1812 που έγινε κοντά στην Καστοριά και ο σεισμός που έγινε το 1995 στην περιοχή μεταξύ Κοζάνη-Γρεβενών. Στα σχήματα (6 και 7) έχει χαρτογραφηθεί η πιθανότητα υπέρβασης μιας ορισμένης τιμής PGA που προκαλείται από σεισμό σχεδιασμού με μέγεθος  $M_w^{max} = 6.76 \pm 0.22$  και έχει επικεντρική απόσταση την απόσταση των τεσσάρων μεγάλων πόλεων της περιφέρειας από τα επίκεντρα των σεισμών ως εξής: α) της Κοζάνης (20

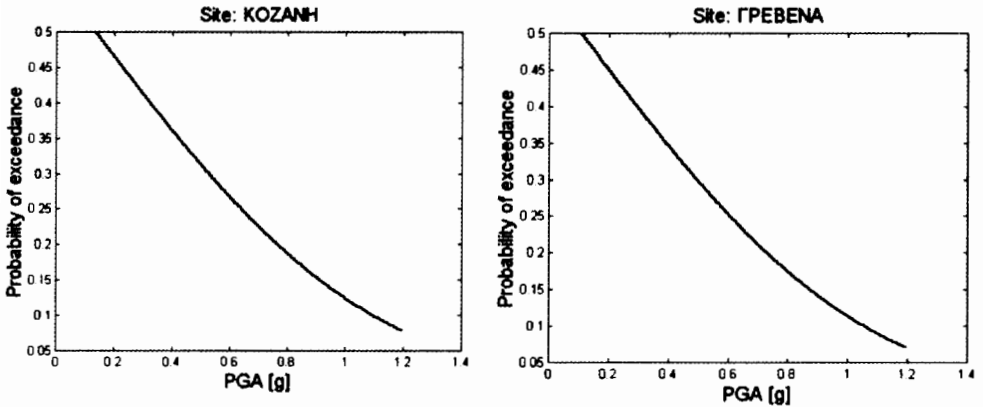
Km) και των Γρεβενών (25 Km) από το επίκεντρο του σεισμού του 1995, και β) της Καστοριάς (5 Km) και της Φλώρινας (30 Km) από το επίκεντρο του σεισμού του 1812.

Η ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται σαν ζώνη χαμηλής επικινδυνότητας και ανήκει στη ζώνη Ι σύμφωνα με τον ΝΕΑΚ (Νέος Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός). Σύμφωνα με μελέτη του ΙΤΣΑΚ (Θεοδουλίδης και συνεργάτες, 1997) στην πόλη της Κοζάνης λειτουργούσε πριν τον σεισμό του 1995 ένας επιταχυνσιογράφος ενώ στη συνέχεια εγκαταστάθηκαν άλλοι 7 στη πλειόσειση περιοχή και στις πόλεις Κοζάνη και Γρεβενά. Ο κύριος σεισμός καταγράφηκε από 8 σταθμούς του Εθνικού Δικτύου Επιταχυνσιογράφων του ΙΤΣΑΚ (Κοζάνη, Καρδίτσα, Καρπενήσι, Λάρισα, Έδεσσα, Καστοριά, Βέροια και Φλώρινα). Εκτός της Κοζάνης όπου καταγράφηκε η μεγαλύτερη εδαφική επιτάχυνση με τιμή 0.21g, στους υπόλοιπους σταθμούς αυτή κυμάνθηκε από 0.01g έως 0.03g. Οι εδαφικές επιταχύνσεις όλων των δεδομένων κυμαίνονται από 0.004g ως 0.21g.

Οι σχέσεις απόσβεσης της ισχυρής σεισμικής κίνησης που προτάθηκαν (Θεοδουλίδης και συνεργάτες, 1997) για την περιοχή των νομών Κοζάνης-Γρεβενών έχουν συντελεστή γεωμετρικής διασποράς (1.90), μεγαλύτερο από εκείνον που έχει προταθεί για τον Ελληνικό χώρο (1.65) που έχει σαν συνέπεια τον μεγαλύτερο ρυθμό απόσβεσης της ισχυρής σεισμικής κίνησης στην περιοχή σε σχέση με άλλες περιοχές της χώρας.

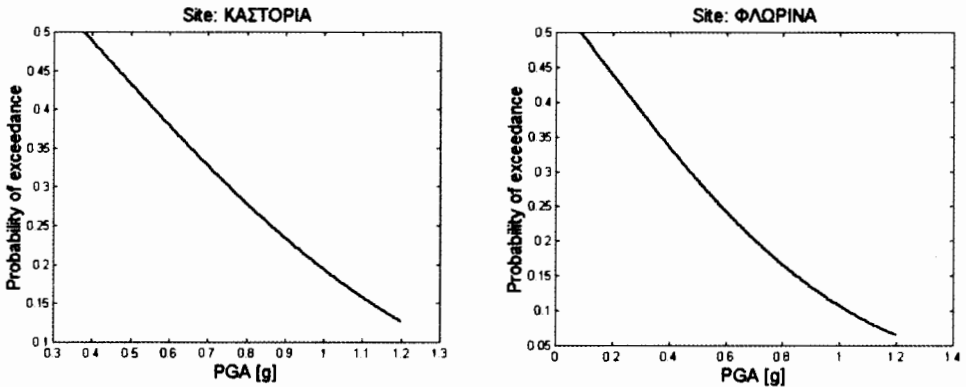
Με βάση την μεθοδολογία των Kijko and Graham (1998) υπολογίσαμε την μέγιστη δυνατή επιτάχυνση της Κοζάνης και των Γρεβενών όσον αφορά τον σεισμό του 1995. Από μελέτες που έχουν γίνει θεωρήθηκε ότι τα Γρεβενά υπέστησαν ζημιές λόγω του σεισμογόνου ρήγματος ενώ οι ζημιές της Κοζάνης οφείλονται στον σεισμό καθαυτό. Έτσι λοιπόν υπολογίσαμε την μέγιστη δυνατή επιτάχυνση για τις δύο αυτές πόλεις: α) σε σχέση με την απόστασή τους από το επίκεντρο του σεισμού (Κοζάνη 20 Km-Γρεβενά 25 Km) και β) σε σχέση με την απόστασή τους από το σεισμογόνο ρήγμα (Κοζάνη 23 Km-Γρεβενά 5 Km). Η μέγιστη





**Σχήμα (6).** Χαρτογράφηση πιθανότητας ορισμένης τιμής εδαφικής επιτάχυνσης PGA που προκαλείται από σεισμό  $6.76+0.22$  και έχει τόπο γένεσης 20+5 Km από την Κοζάνη και 25+5 Km από τα Γρεβενά.

**Figure (6).** The probability that an earthquake of  $m_{\max}=6.76+0.22$  at distances 20+5 Km from Kozani and 25+5 Km from Grevena, will produce a PGA exceeding a given value at the two cities.



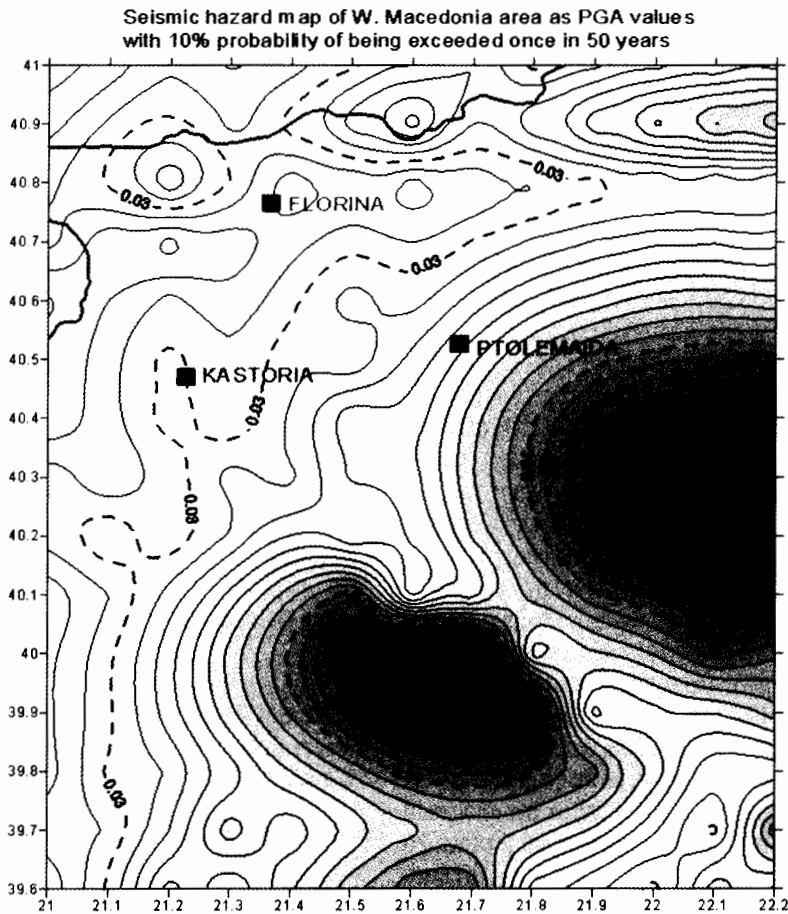
**Σχήμα (7).** Χαρτογράφηση πιθανότητας ορισμένης τιμής εδαφικής επιτάχυνσης PGA που προκαλείται από σεισμό  $6.76+0.22$  και έχει τόπο γένεσης 5+1 Km από την Καστοριά και 30+5 Km από την Φλώρινα.

**Figure (7).** The probability that an earthquake of  $m_{\max}=6.76+0.22$  at distances 5+1 Km from Kastoria and 30+5 Km from Florina, will produce a PGA exceeding a given value at the two cities.

δυνατή επιτάχυνση για την πρώτη περίπτωση είναι: Κοζάνη  $a=0.221$  g και Γρεβενά  $a=0.180$  g, ενώ αντίστοιχα για την δεύτερη περίπτωση είναι: Κοζάνη  $a=0.193$  g και Γρεβενά  $a=0.239$  g. Είναι χαρακτηριστικό ότι η μετρημένη για την Κοζάνη σεισμική επιτάχυνση είναι 0.21 g ενώ η υπολογισθείσα είναι 0.22 g, σχεδόν ταυτόσημες. Επίσης οι μεγάλες ζημιές στη περιοχή των Γρεβενών οφείλονται στο σειсмоγόνο ρήγμα αφού η σεισμική

επιτάχυνση που υπολογίσαμε είναι για την πόλη των Γρεβενών 0.24 g. Για τον σεισμό του 1812 από τον οποίο επηρεάστηκαν οι πόλεις της Καστοριάς και της Φλώρινας οι τιμές της μέγιστης δυνατής επιτάχυνσης που πιθανώς έπληξαν τις δύο πόλεις είναι: για την Καστοριά 0.253 g και για την Φλώρινα 0.089 g.

Τέλος κατασκευάσαμε έναν ομαλοποιημένο χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας για την ευρύτε-



**Σχήμα (8).** Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Δυτικής Μακεδονίας. Εκφράζει την πιθανότητα 10% υπέρβασης της τιμής της εδαφικής επιτάχυνσης τουλάχιστον 1 φορά τα επόμενα 50 χρόνια.

**Figure (8).** Probabilistic seismic hazard map of western Macedonia territory as PGA values with 10% probability of being exceeded at least once in 50 years.

ρη περιοχή της περιφέρειας δυτικής Μακεδονίας. Στον χάρτη του σχήματος (8) δίνεται η πιθανότητα 10% υπέρβασης της τιμής της εδαφικής επιτάχυνσης τουλάχιστον 1 φορά τα επόμενα 50 χρόνια.

Στον χάρτη αυτό βλέπουμε δύο μέγιστες τιμές η μία κοντά στα Γρεβενά και οφείλεται στον σεισμό του 1995 και η άλλη κοντά στην Κοζάνη που οφείλεται στους σεισμούς της Βέροιας το 896 και το 1211. Η Καστοριά έχει υπολογισθείσα τιμή σεισμικής επιτάχυνσης 0.03, ενώ η Φλώρινα

έχει την μικρότερη τιμή της μέγιστης δυνατής επιτάχυνσης, από όλες τις πόλεις της περιφέρειας της δυτικής Μακεδονίας.

#### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Οι συνέπειες του σεισμού της 13ης Μαΐου 1995 υπήρξαν καταστροφικές στην ευρύτερη περιοχή της Κοζάνης και των Γρεβενών. Η περιοχή ανήκε στην ζώνη I (κατώτερη διαβάθμιση σύμφωνα με τον ΝΕΑΚ). Στην παρούσα εργασία υπολογίστηκε η σεισμικότητα της περιοχής και σαν μέτρα

αυτής χρησιμοποιήθηκαν η μέση περίοδος επανάληψης  $T_m$ , η πιθανότητα να γίνει σεισμός με μέγεθος  $M$  ή μεγαλύτερο σε  $t$  χρόνια και το πιθανότερο μέγιστο μέγεθος σεισμού σε διάστημα  $t$  ετών. Βρέθηκε ότι σεισμοί με μέγεθος σαν τον σεισμό του 1995 συμβαίνουν κάθε περίπου 300 χρόνια. Σύμφωνα με τον Παπαζάχο και τους συνεργάτες του (1995) ένας τέτοιος σεισμός γίνεται στη περιοχή κάθε 500 με 1000 χρόνια. Επίσης υπολογίστηκε ότι το πιθανότερο μέγιστο μέγεθος σεισμού είναι  $M=6.0$  Richter σε διάστημα 100 ετών. Το μέγιστο πιθανότερο μέγεθος σεισμού υπολογίστηκε σε 6.76 με σφάλμα 0.22. Στην περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας εκτός από αυτόν έχει γίνει άλλος ένας ισχυρός σεισμός κοντά στην Καστοριά το 1812 με μέγεθος 6.5. Έγινε επίσης εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας που εκφράστηκε σαν σεισμική επιτάχυνση (PGA) σε μονάδες  $g$  για τις 4 μεγάλες πόλεις της περιφέρειας που είναι πρωτεύουσες των ομώνυμων νομών (Κοζάνη, Φλώρινα Γρεβενά και Καστοριά). Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η πλέον πρόσφατη σχέση απόσβεσης για τον Ελληνικό χώρο (Μάργαρης και συνεργάτες, 2001). Για τις πόλεις Κοζάνη και Γρεβενά υπολογίσαμε την μέγιστη δυνατή επιτάχυνση για δύο περιπτώσεις: α) σε σχέση με την απόσταση τους από το επίκεντρο του σεισμού (Κοζάνη 20 Km-Γρεβενά 25 Km) και β) σε σχέση με την απόστασή τους από το σεισμογόνο ρήγμα (Κοζάνη 23 Km-Γρεβενά 5 Km). Η μέγιστη δυνατή επιτάχυνση για την πρώτη περίπτωση είναι: Κοζάνη  $a=0.221g$  και Γρεβενά  $a=0.180g$ , ενώ αντίστοιχα για την δεύτερη περίπτωση είναι: Κοζάνη  $a=0.193g$  και Γρεβενά  $a=0.239g$ . Είναι χαρακτηριστικό ότι η μετρημένη για την Κοζάνη σεισμική επιτάχυνση είναι  $0.21g$  ενώ η υπολογισθείσα είναι  $0.22g$ , σχεδόν ταυτόσημες. Αυτή η τιμή της αναμενόμενης επιτάχυνσης για μέση περίοδο επανάληψης 500 χρόνια στην ευρύτερη περιοχή (Θεοδοουλίδης και συνεργάτες, 1997). Επίσης οι μεγάλες ζημιές στη περιοχή των Γρεβενών οφείλονται στο σεισμογόνο ρήγμα αφού η σεισμική επιτάχυνση που υπολογίσαμε είναι για την πόλη των Γρεβενών  $0.24g$ , που είναι

σχεδόν ταυτόσημη με την τιμή της αναμενόμενης επιτάχυνσης για μέση περίοδο επανάληψης 1000 χρόνια στην ευρύτερη περιοχή (Θεοδοουλίδης και συνεργάτες, 1997). Από τον σεισμό του 1812 επηρεάστηκαν κυρίως οι πόλεις της Καστοριάς και της Φλώρινας που απέχουν από το επίκεντρο του συγκεκριμένου σεισμού 5 Km και 30 Km, αντίστοιχα. Οι τιμές της μέγιστης δυνατής επιτάχυνσης που πιθανώς έπληξαν τις δύο πόλεις (αφού δεν υπάρχουν σχετικές αναφορές) είναι: για την Καστοριά  $0.253g$  και για την Φλώρινα  $0.089g$ . Η μελέτη της σεισμικής απόκρισης (για τον σεισμό του 1995) έδειξε σημαντική επίδραση των εδαφικών συνθηκών στη διαφοροποίηση της ισχυρής σεισμικής κίνησης (Ραπτάκης και συνεργάτες, 1997).

Κατασκευάστηκε πιθανολογικός χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της περιφέρειας της Δυτικής Μακεδονίας που εκφράζει την πιθανότητα 10% υπέρβασης της τιμής της εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) τουλάχιστον 1 φορά τα επόμενα 50 χρόνια.

## BIBLIOΓΡΑΦΙΑ - REFERENCES

- Cornell, C.A., (1968). Engineering seismic risk analysis. Bull. Seismol. Soc. Am., 71, 2011-2038.
- Θεοδοουλίδης, Ν., Λεκιδής, Β., Μάργαρης, Β., Παπαζάχος, Κ., Παπαιωάννου, Χ. και Δημητρίου, Π., (1997). Εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας και φάσματα σχεδιασμού στους νομούς Κοζάνης-Γρεβενών μετά τον σεισμό της 13-5-1995. Πρακτ. 3ου Πανελ. Συν. Γεωτεχνικής Μηχαν., Πάτρα, 20-22 Μαρτίου 1997, 241-255.
- Kijko A., Sellevoll M.A., (1989). Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part I. Utilization of extreme and complete catalogs with different threshold magnitudes. Bull. Seism. Soc. Am. 79, 645-654.
- Kijko A., Sellevoll M.A., (1992). Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part II. Incorporation of magnitude heterogeneity. Bull. Seism. Soc. Am. 82, 120-134.
- Kijko, A and Graham, G., (1998). Parametric-historic procedure for probabilistic seismic haz-

- ard analysis. Part I. Estimation of maximum regional magnitude  $m_{max}$ . Pageoph, 152, 413-442.
- Kijko, A and Graham, G., (1999). Parametric-historic procedure for probabilistic seismic hazard analysis. Part II. Assessment of seismic hazard at specific site. Pageoph, 154, 1-22.
- Knopoff, L. and Kagan, Y., (1977). Analysis of the theory of extremes as applied to earthquake problems. J. Geophys. Res., 82, 5647-5657.
- Lomnitz, C., (1974). Global tectonics and earthquake risk. Elsevier Scientific Publ. Comp., Amsterdam, The Netherlands, 320pp.
- Μάργαρης, Β., Παπαζάχος, Κ., Παπαιωάννου, Χ., Θεοδουλίδης, Ν., Καλογεράς, Ι. και Σκαρλατούδης, Α., (2001). 12ο Συνέδ. Σεισμικής Μηχαν., Θεσσαλονίκη 2001, εργασία Νο 385.
- McGuire, R.K., (1976). Fortran computer program for seismic risk analysis. U.S. Geol. Surv., Open-File Rept., 76-79.
- Παπαζάχος, Β.Κ., Παναγιωτόπουλος, Δ.Γ., Σκορδύλης, Ε.Μ., Καρακαίσης, Γ.Φ., Παπαιωάννου, Χ.Α., Καρακώστας, Β.Γ., Παπαδημητρίου, Ε.Ε., Κυρατζή, Α.Α., Χατζηδημητρίου, Π.Μ., Λεβεντάκης, Γ.Ν., Βοϊδομάτης, Φ.Σ., Πεφτιτσέλης, Κ.Ι. και Τσάπανος, Θ.Μ., (1995). Η φυσική διαδικασία γένεσης του κύριου σεισμού της Κοζάνης-Γρεβενών της 13ης Μαΐου 1995 ( $M_s=6.6$ ) και της σεισμικής ακολουθίας του. Γεωτεχνική Ενημέρωση, Νο 73, Μάιος 1995, 54-64.
- Papazachos, B.C. and Papazachou, C., (1989). The earthquakes of Greece. Ziti Publications, Thessaloniki, 356pp.
- Papazachos, B.C. and Papazachou, C., (2002). The earthquakes of Greece. Ziti Publications, 2<sup>nd</sup> Edition, Thessaloniki, 317pp.
- Ραπτάκης, Δ.Γ., Τόλης, Σ.Β., Λοντζετιδης, Κ.Σ. και Πιτλάκης, Κ.Δ., (1997). Σύγκριση ενόργανης και θεωρητικής μελέτης της σεισμικής απόκρισης κατά το σεισμό Κοζάνης Γρεβενών. Πρακτ. 3ου Πανελ. Συν. Γεωτεχνικής Μηχαν., Πάτρα, 20-22 Μαρτίου 1997, 257-268.
- Tsapanos, T.M., Papaioannou, Ch.A. and Margaris, V.N., (1993). Seismicity and seismic hazard for the city of Florina. Proc. 2<sup>nd</sup> Cong. of HGU, Florina 5-7 May 1993, Vol. 1, 73-83.
- Χατζηδημητρίου, Π.Μ. και Παπαζάχος, Β.Κ., (1995). Η σεισμικότητα της Δυτικής Μακεδονίας. Γεωτεχν. Επιμ. Ελλάδα, : Ημερίδα «Ο σεισμός της 13ης Μαΐου, Κοζάνη-Γρεβενά», Νοέμβριος 11, 1995, 11σελ.

## ABSTRACT

### SEISMICITY AND SEISMIC HAZARD OF WEST MACEDONIA

**Theodoros M. Tsapanos**

*Aristotle University of Thessaloniki, School of Geology, Geophysical laboratory, 54124 Thessaloniki, Greece*

Ten years have passed already since the noon of the 13rd of May of 1995, when a strong earthquake of magnitude  $M=6.6$  occurred between the cities of Kozani and Grevena in northern Greece (west Macedonia territory). Many villages have been destroyed in the area which was considered as an «aseismic» up to that time. There were no victims from this event but the damage was intense in some villages. Damage was also reported in the cities of Kozani and Grevena, as well. In the present study the seismicity and the seismic hazard for the west Macedonia territory, are assessed. The seismicity is evaluated through mean value method and the parameters  $a_m$ ,  $b$  and  $a$  are calculated. In continuation the study provides the quantitative seismicity in terms of mean return period  $T_m$ , the probability of the occurrence of a magnitude  $M$  or greater in  $t$  years and the most probable maximum magnitude in a time period of  $t$  years. I found that earthquakes like the event of 1995 occurred almost every 300 years. I also evaluated that the most probable maximum magnitude is of magnitude  $M=6.0$  in a time period of 100

years. Maps shown the most probable maximum magnitude in time periods of 50 and 500 years are illustrated. The maximum possible earthquake is estimated to be equal to 6.76 with an error of +0.22. Using this magnitude as a design magnitude, the estimation of the seismic hazard in terms of PGA (in g) we estimate the design acceleration was calculated for the four large cities of the territory which are the capitals of the four prefectures of western Macedonia (Kozani, Florina, Grevena and Kastoria). For this purpose the most recent attenuation law for Greece, is used. For the above mentioned cities, the probability, was calculated that the design earthquake will produce a PGA in various distances at the cities exceeding a given value of acceleration, is calculated. A figure is finally given for the territory of western Macedonia, which depicts the probabilistic seismic hazard map of the investigated area in terms of PGA values specifies 10% probability of exceedance at least.