

Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ.	Τομ. XIX	σελ. 387-394	Αθήνα 1987
Bull. Geol. Soc. Greece	Vol.	pag.	Athens

ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΙΟ ΠΙΘΑΝΑ ΒΛΑΒΕΡΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥ ΜΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΒΟΛΟΥ

Κ. Χ. ΜΑΚΡΟΠΟΥΛΟΣ*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σεισμική αισθητότητα μιας περιοχής (perceptibility) ορίζεται η συνδυασμένη πιθανότητα ότι η περιοχή μελέτης θα δεχθεί μία εδαφική κίνηση με επιτάχυνση τουλάχιστον A σε συνδυασμό με τη γένεση ενός σεισμού με μέγεθος m , δηλαδή $P(A/m)$.

Είναι γνωστό ότι όσο το μέγεθος ενός σεισμού αυξάνει, τόσο η πιθανότητα να παρουσιαστεί σε μία περιοχή μικραίνει, ενώ η πιθανότητα ότι η θέση μελέτης βρίσκεται μέσα στη περιοχή που ο σεισμός αυτός θα προκαλέσει μία συγκεκριμένη επιτάχυνση αυξάνει. Έτσι, ο συνδυασμός των δύο πιθανοτήτων δίνει τη πιθανότητα αισθητότητας της περιοχής. Η καμπύλη κατανομής της πιθανότητας αυτής για μία τιμή επιτάχυνσης και ένα φάσμα μεγεθών, έχει τη μορφή κώδωνα. Το μέγεθος για το οποίο η καμπύλη παίρνει τη μέγιστη τιμή είναι αυτό που συνδυάζει και μεγάλη πιθανότητα να γίνει αλλά και συγχρόνως να δώσει επιτάχυνση τουλάχιστον όση η τιμή της αναφοράς της καμπύλης. Η εξέταση καμπύλων αισθητότητας για διαφορετικές τιμές επιτάχυνσης, έδειξε ότι τα μέγιστα παρατηρούνται για μία στενή ζώνη μεγεθών. Στη περιοχή Βόλου και για μέσα βάρη 10χλμ και 20χλμ., βρέθηκαν μεγέθη 6.48 και 6.65 αντίστοιχα. Με βάση τις ιδιότητες που έχουν, τα μεγέθη αυτά μπορούν να αποτελέσουν το φάσμα των σεισμών σχεδιασμού της περιοχής τουλάχιστον για συνηθισμένες κατασκευές.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη προσπάθεια για μία όσο το δυνατόν καλύτερη αποτύπωση του σεισμικού καθεστώτος και της μελλοντικής συμπεριφοράς μίας περιοχής εφαρμόζονται διάφοροι μέθοδοι-μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά είναι συνήθως στατιστικά-πιθανολογικά μοντέλα και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους βασίζεται στη ποιότητα και ποσότητα

*Λέκτορας του τομέα Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ. Πενεπιστήμιο Αθήνας.

των δεδομένων που χρησιμοποιούν. Τέτοια δεδομένα είναι κατάλογοι σεισμικών παραμέτρων όπως συντεταγμένες επικέντρων, βάθος εστιών, μέγεθος, ένταση κ.α. Δύο είναι κυρίως οι κατηγορίες μοντέλων: (α) Αυτές που χρησιμοποιούν όλα τα διαθέσιμα στοιχεία ανεξάρτητα μεγέθους. Τα μοντέλα αυτά στηρίζονται στη γνωστή συσσωρευτική κατανομή τυχρότητας-μέγεθος των Gutenberg and Richter (1944):

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

όπου N είναι το πλήθος των σεισμών με μέγεθος μεγαλύτερο ή ίσο του M στη μονάδα του χρόνου, τα δε a και b σταθερές. (β) Αυτά που χρησιμοποιούν μόνο μέρος των διαθέσιμων δεδομένων και συγκεκριμένα μόνο το μεγαλύτερο σεισμικό μέγεθος κάθε χρονικής μονάδας. Είναι τα μοντέλα της μεθόδου των ακραίων τιμών. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο αυτών κατηγοριών έχουν σχολιαστεί αλλού π.χ. Lomnitz, 1974, Comninakis, 1975, Makropoulos, 1978, Burton et al., 1980.

Αποτέλεσμα εφαρμογής των παραπάνω μεθόδων για ένα τόπο είναι ο προσδιορισμός της πιθανότητας που έχουν να γίνουν σεισμοί δεδομένου μεγέθους μέσα σε ορισμένο χρονικό διάστημα ή υπολογισμός του χρόνου επανάληψης σεισμών διαφόρων μεγεθών. Είναι δηλαδή ο καθορισμός της σεισμικής επικινδυνότητας του τόπου. Οι ίδιες μεθοδολογίες συνήθως εφαρμόζονται για το καθορισμό του σεισμικού κινδύνου από άποψη εδαφικής κίνησης. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια εμπειρικών νόμων απόσβεσης της ενεργειας καθώς αυτή διαδίδεται από την εστία προς τη θέση μελέτης και εκφράζεται σε παραμέτρους εδαφικής κίνησης, όπως είναι η επιτάχυνση, μετατόπιση ή ταχύτητα των μορίων της. Οι νόμοι αυτοί είναι της μορφής:

$$Y = ae^{bM} (R+C)^{-d} \quad (2)$$

όπου Y είναι η μέγιστη τιμή της παραμέτρου που αναμένεται να παρατηρηθεί στη θέση R χλμ. από την εστία του σεισμού μεγέθους M .

Στη συνέχεια της εργασίας αυτής θα εφαρμοστεί μέθοδος υπολογισμού του σεισμικού μεγέθους που συνδυάζει συγχρόνως, τη μεγαλύτερη πιθανότητα να συμβεί και να προξενήσει εδαφική κίνηση με δεδομένη στάθμη επιτάχυνσης στη περιοχή του Βόλου. Ο υπολογισμός ενός τέτοιου σεισμού αναμένεται να συμβάλει στο πιο ρεαλιστικό αντισεισμικό σχεδιασμό της περιοχής.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σεισμική αισθητότητα ενός τόπου (earthquake perceptibility) P_p , ορίζεται η πιθανότητα που έχει ο τόπος να δεχθεί εδαφική κί-

νηση τουλάχιστον μιας στάθμης x (x = ένταση, μεγ. επιτάχυνση κ.λ.π.) σαν αποτέλεσμα της γένεσης ενός σεισμού δεδομένου μεγέθους m . Αν $\Phi(m)$ είναι η πιθανότητα να συμβεί ένας σεισμός μεγέθους m και $P_c(x)$ είναι η πιθανότητα που έχει η θέση μελέτης να βρίσκεται μέσα στη περιοχή στην οποία ο σεισμός αυτός προξενεί εδαφική κίνηση τουλάχιστον μιας στάθμης x , τότε θα έχουμε τη σχέση:

$$P_p(x/m) = P_c(x) \cdot \Phi(m) \quad (3)$$

Η P_p είναι λοιπόν η συνδυασμένη πιθανότητα των $\Phi(m)$ και $P_c(x)$. Η $\Phi(m)$ είναι η διαφορική πιθανότητα dP/dm δηλαδή η πυκνότητα πιθανότητας να γίνει ένας σεισμός μεταξύ $m - \delta m$ και $m + \delta m$. Στη περίπτωση μελέτης μας ο υπολογισμός της P γίνεται με τη βοήθεια της τρίτης ασυμπτώτου της μεθόδου των ακραίων τιμών και δίνεται από τη σχέση:

$$P(m) = \exp \left[- \left(\frac{w - m}{w - u} \right)^k \right] \quad (4)$$

όπου w αντιπροσωπεύει άνω όριο των μέγιστων τιμών μεγέθους, u είναι η χαρακτηριστική μέγιστη τιμή της μονάδας χρόνου και k είναι η παράμετρος καμπυλότητας της κατανομής. Η καμπύλη κατανομής πλησιάζει ασυμπτωτικά τη τιμή w για μικρές πιθανότητες ή μεγάλες περιόδους επανάληψης. Η $P(m)$ είναι η πιθανότητα να μη γίνει υπέρβαση σεισμού με μέγεθος m μέσα στη μονάδα του χρόνου. Από την (4) προκύπτει ότι $P(w) = 1$ και $P(u) = \frac{1}{e}$.

Στη μελέτη αυτή σαν μέτρο εδαφικής κίνησης, x , χρησιμοποιείται η μέγιστη επιτάχυνση και νόμος απορρόφησης της μορφής της σχέσης (2) ο "μέσος" τύπος που βρέθηκε από τον Makropoulos (1978)

$$A = 2164 \cdot e^{0.7M} (R \pm 20)^{-1.80} \text{ cm/sec}^2 \quad (5)$$

Από τη σχέση (5) για δεδομένο μέγεθος M υπολογίζεται η ακτίνα, άρα και η επιφάνεια A_A που δέχτηκε μέγιστη επιτάχυνση ίση ή μεγαλύτερη μιας τιμής A . Τότε η πιθανότητα $P_c(x)$ ώστε η

περιοχή μελέτης να βρίσκεται μέσα στην επιφάνεια S_A , δίνεται από το λόγο της επιφάνειας S_A προς τη συνολική επιφάνεια αναφοράς S_T . Σαν επιφάνεια αναφοράς συνήθως παίρνουμε την επιφάνεια ακτίνας ικανής να προκαλέσει μιά οριική επιτάχυνση π.χ. 0.1g στη θέση μελέτης. Στην εργασία αυτή η S_T ορίζεται από ακτίνα μιάς μοίρας από το Βόλο και η S_A υπολογίστηκε για δύο τιμές μέσου βάθους 10 και 20χλμ.

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι η μεν $\Phi(m)$ ελαττώνεται με την αύξηση του m , δηλαδή μεγαλύτερα σεισμικά μεγέθη έχουν μικρότερη πιθανότητα να παρουσιαστούν μέσα σένα χρονικό διάστημα. Η $P_c(x)$ όμως που είναι ίση με S_A/S_T συνεχώς αυξάνει με την αύξηση του m , άρα και του A , μέχρι τη τιμή 1, όταν οι δύο επιφάνειες συμπίπτουν. Έτσι, η συνδυασμένη πιθανότητα $P_p(x/m)$, σχέση (3), έχει τη μορφή κώδωνα με μέγιστο που αντιστοιχεί στο μέγεθος που συνδυάζει και μεγάλη πιθανότητα να γίνει αλλά συγχρόνως και μεγάλη πιθανότητα να γίνει αισθητός με τιμή επιτάχυνσης τουλάχιστον ίση με τη τιμή A για την οποία σχεδιάστηκε η καμπύλη. Είναι δηλαδή το πιο πιθανό βλαβερό σεισμικό μέγεθος της περιοχής για αυτή τη τιμή επιτάχυνσης (most perceptible earthquake magnitude, MPM). Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής σε διαφορετικές περιοχές (Burton, 1978, Main, 1980, Burton et al., 1983) έδειξε ότι για ένα φάσμα τιμών A , το MPM κυμαίνεται γύρω από μιά μέση τιμή με μικρή τυπική απόκλιση. Στα επόμενο μέρος, η μεθοδολογία αυτή θα εφαρμοστεί στη περιοχή Βόλου, μιά περιοχή με έντονη βιομηχανική ανάπτυξη αλλά και με έντονη σεισμική δραστηριότητα.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από τους σεισμούς που έγιναν σε μια απόσταση μίας μοίρας γύρω από το Βόλο στη περίοδο 1900-1981 και με τη χρήση του μοντέλου της τρίτης ασυμπτώτου των ακραίων τιμών, σχέση (4), υπολογίστηκαν οι τιμές των σταθερών w , u και k . Βρέθηκε:

$$w=7.22 \pm 0.18$$

$$u=3.76 \pm 0.15$$

$$1/k=0.467 \pm 0.06$$

Με τη βοήθεια των τιμών αυτών υπολογίστηκαν οι παρακάτω τιμές αναμενόμενων μεγεθών:

1. Πλέον πιθανό ετήσιο μέγιστο μέγεθος : 4.64
2. Πλέον πιθανό μέγιστο μέγεθος για τα επόμενα 80 χρόνια : 6.80

3. Μέγεθος που έχει 90% πιθανότητα να παρουσιαστεί σε μέγιστο στα επόμενα 50 χρόνια : 7.03 .

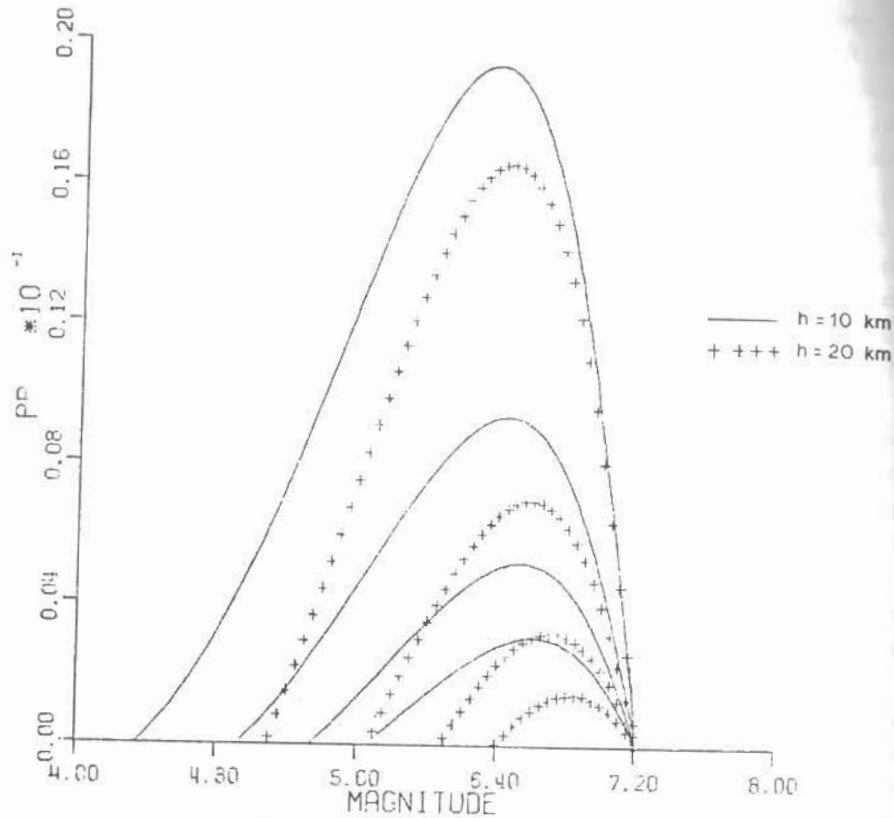
Όπως αναπτύχτηκε πιο πάνω, εκτός από τον υπολογισμό της πιθανότητας να γίνει ένας τέτοιος σεισμός, είναι ανάγκη να γνωρίζουμε πιο μέγεθος συγκεντρώνει τη μεγαλύτερη πιθανότητα να προξενήσει βλάβες για διάφορες τιμές επιτάχυνσης. Για το σκοπό αυτό, με τιμές επιτάχυνσης 0.1g, 0.15g, 0.20g, 0.25g, και για μέσα βάθη 10χλμ. και 20χλμ., υπολογίστηκε η ετήσια πιθανότητα $P_c (=S_A/S_T)$, ενός φάσματος μεγεθών από 4.0 έως $w=7.22$. Για το ίδιο φάσμα μεγεθών, από τη σχέση dP/dm , διαφόριση της σχέσης (4), υπολογίστηκε η ετήσια πιθανότητα γένεσης σεισμού μεγέθους $m \pm \Delta m$ φηλαδή η $\Phi(m)$. Τέλος, με τη βοήθεια της σχέσης (3), υπολογίστηκε η συνδυασμένη πιθανότητα $P_p(A/m)$ που έχει κάθε μέγεθος m να προξενήσει επιτάχυνση τουλάχιστον A . Το σχήμα 1 απεικονίζει τη κατανομή της P_p σε συνάρτηση του m .

Εξετάζοντας το σχήμα 1, παρατηρούμε ότι:

- α. Οι καμπύλες αισθητότητας που αντιστοιχούν στις τέσσερες τιμές επιτάχυνσης, για μέσο βάθος εστιών 10χλμ., παρουσιάζουν μέγιστο γύρω από το ίδιο μέγεθος. Το μέγεθος αυτό MPM, βρέθηκε ίσο με 6.48 ± 0.10 .
 - β. Για μέσο βάθος 20χλμ., το μέγιστο όλων των καμπύλων είναι μετατοπισμένο προς μεγαλύτερα μεγέθη και πάλι όμως γύρω από το ίδιο μέγεθος που στη περίπτωση αυτή βρέθηκε ίσο με 6.65 ± 0.17 .
- Η αύξηση της τιμής του MPM με το βάθος δικαιολογείται από το ότι, για το ίδιο μέγεθος m η μεν $\Phi(m)$ είναι ανεξάρτητη του βάθους, η $P_c(A)$ όμως, σύμφωνα με τη σχέση (5), ελαττώνεται, με αποτέλεσμα ο συνδυασμός τους να μετακινεί το μέγιστο προς μεγαλύτερα μεγέθη. Η επίδραση αυτή του βάθους στο τελικό αποτέλεσμα δείχνει για μια ακόμα φορά, την αξία που έχει η ακριβής γνώση του βάθους κάθε σεισμού στους υπολογισμούς των παραμέτρων επικινδυνότητας κάθε περιοχής.

Οι τιμές αυτές του πιο πιθανά αισθητού-βλαβερού-σεισμικού μεγέθους ισχύουν για το συγκεκριμένο μέτρο της εδαφικής κίνησης που χρησιμοποιήθηκε και στη περίπτωση μελέτης μας ήταν η μέγιστη επιτάχυνση. Σχετικές μελέτες (Burton, 1981), έδειξαν ότι η τιμή του MPM διαφέρει για διαφορετικά μέτρα εδαφικής κίνησης π.χ. ταχύτητα, μετατόπιση ή ένταση. Η εκλογή του είδους του μέτρου εξαρτάται από την ευαισθησία και επιδεκτικότητα της κατασκευής στην υψηλών συχνοτήτων επιτάχυνση ή χαμηλών συχνοτήτων ταχύτητα της συνολικής

PERCEPTIBILITY STUDY IN VOLOS AREA



Σχήμα 1. Ετήσια πιθανότητα PP, ώστε η περιοχή Βόλου να δεχθεί μέγιστη επιτάχυνση τουλάχιστον 0.10g 0.15g 0.20g και 0.25g από σεισμό μεγέθους M.

Συμπερασματικά, η μέθοδος που αναπτύχθηκε μπορεί να δώσει στον μηχανικό ένα πρόσθετο σχεδιαστικό κριτήριο. Έχοντας καταλήξει στο είδος, σπουδαιότητα και χρόνο ζωής της κατασκευής, μπορεί να επιλέξει το είδος του μέτρου της εδαφικής κίνησης που ενδιαφέρει. Ο υπολογισμός τότε του αντίστοιχου MPM είναι δυνατόν να συμβάλει θετικά σένα όσο γίνεται πιά ρεαλιστικό αντισεισμικό σχεδιασμό της περιοχής. -

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Burton, P.W., McGonigle, R.W., Makropoulos, K.C. and Ucer, S.B., 1980. Preliminary studies of seismic risk in Turkey, and the occurrence of upper bounded and other large earthquake magnitudes, in Proc. Int. Symp. on Earthquake Prediction in the North Anatolia Fault Zone, Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction, A Mete Isiara and A. Vogel, Editors, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Weisbaden, 143-172
- Burton, P.W., Main, I.G., and Long, R.E., 1983. Perceptible earthquakes in the Central and Eastern United States (examined using Gumbel's third distribution of extreme values), Bull. Seism. Soc. Am. 73, 497-518
- Burton, P.W., 1981. Variation in seismic risk parameters in Britain, in Proc. 2nd Int. Symp. Anal. Seismicity and Seismic Risk, Liblice, Czechoslovakia (Czechoslovak Academy of Sciences), vol. 2, 495-531.
- Comninakis, P.E., 1975. A contribution to the investigation of the seismicity of the area of Greece, PhD. Thesis, Athens University, 110pp.
- Gutenberg, B., and Richter, C.F., 1944. Frequency of earthquakes in California, Bull. Seism. Soc. Am., 34, 185-188.

- Lonnitz, C., 1974. Global tectonics and earthquake risk, Elsev. Scient. Publ. Comp., Amsterdam, 320pp.
- Main, I. G., 1980. Most perceptible earthquakes in the Eastern United States, M.Sc. Dissertation, University of Durham, England.
- Makropoulos, K. C., 1978. The statistics of large earthquake magnitude and an evaluation of Greek seismicity, Ph.D. Thesis, Edinburgh University, Edinburgh, Scotland.
- 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.
- Papazachos, B. C. and Comninakis, P. E., 1982. A catalogue of earthquakes in Greece and the surrounding area for the period 1901-1980. University of Thessaloniki, Geoph. Lab., 5, 146pp.