

ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 31^{ΗΣ} ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ 1996

ΠΡΟΕΔΡΙΑ ΙΩΑΝΝΟΥ ΠΕΣΜΑΖΟΓΛΟΥ

Η ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΤΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΝ
ΚΑΙ Ο ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΣ ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ
ΣΤΟΝ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΕΙΛΗΣ ΣΕ ΜΙΑ ΧΩΡΑ

ΟΜΙΛΙΑ ΤΟΥ ΑΚΑΔΗΜΑΓΓΚΟΥ Κ. ΑΓΓΕΛΟΥ ΓΑΛΑΝΟΠΟΥΛΟΥ

*One can never say
unequivocally that
something can't happen
David P. Schwartz*

Υπάρχει γενική παραδοχή ότι τα μεγέθη των μελλοντικών μετρίων έως μεγάλων σεισμών μπορούν να καθορισθούν από το μήκος γνωστών ρηγμάτων ή τμημάτων ρηγμάτων. Η παραδοχή αυτή βασίζεται σε εμπειρικές παρατηρήσεις που συσχετίζουν το μέγεθος των σεισμών με το μήκος του σειсмоγόνου ρήγματος ή της ρηξιγενούς επιφανείας. Η έκδοχή αυτή είναι σε αντίθεση με πολλές σεισμολογικές παρατηρήσεις σε αντίκλινες δομές με ανάστροφες μεταπτώσεις που δεν φθάνουν στην επιφάνεια του εδάφους (blind - thrust earthquakes) και άλλες εύλογες παραδοχές, όπως η διατήρηση της σεισμικής ροπής και η σταθερότης εμφάνισης των σεισμών.

Σε πολλές περιοχές ο ρυθμός εμφάνισης των σεισμών που χρειάζονται να εξηγήσουν τον παρατηρούμενο ρυθμό σεισμικής ροπής υπερβαίνει τον ιστορικό ρυθμό εμφάνισης σεισμών, εάν τα σεισμικά μεγέθη περιορίζονται από το μήκος των γνωστών ρηγμάτων. Ο ρυθμός εμφάνισης των πολύ μεγάλων σεισμών, με μέγεθος σεισμικής ροπής 8 και άνω, θα μπορούσε να άρει την αναφερθείσα αντίθεση, παρέχοντας τον ρυθμό της σεισμικής ροπής χωρίς την ανάγκη προσφυγής σε ένα υπέρμετρο ρυθμό εκλύσεως κανονικών μεγάλων σεισμών. Ένας σεισμός 8ου μεγέθους

ἀπελευθερώνει τὴν σεισμικὴ ροπὴ 30 περίπου σεισμῶν μεγέθους 7. Ὁ πολὺ μεγάλος σεισμὸς μπορεῖ ἀκόμη νὰ προκαλεῖ καὶ μικρότερη ζημιὰ, κατὰ μέσο ὄρο, ἀπὸ αὐτὴ πού προκαλοῦν πολλοὶ μεγάλοι, ἂν καὶ ἡ βλάβη μπορεῖ νὰ εἶναι ποιοτικὰ διαφορετικὴ. Μεταβολὴ στὴν ταχύτητα σεισμικῆς διαρρήξεως μπορεῖ νὰ προκαλέσει μεγάλες διαφορὲς μεταξύ τῆς ἀναμενομένης καὶ παρατηρουμένης ἐδαφικῆς κινήσεως (Abers et al., 1995).

Ἡ συχνότης τῶν πολὺ μεγάλων σεισμῶν εἶναι μιὰ ἀπὸ τὶς σημαντικότερες ἄγνωστες παραμέτρους στὶς ἐρευνητικὲς προσπάθειες καθορισμοῦ τῆς σεισμικῆς ἀπειλῆς. Ἡ συχνότης τῶν πολὺ μεγάλων σεισμῶν ἐλέγχει, σὲ μεγάλο βαθμὸ, τὸν ρυθμὸ ἐκλύσεως τῶν μετρίων ἕως μεγάλων σεισμῶν, καὶ καθορίζει τὴν πιθανότητα προκλήσεως πραγματικὰ μεγάλης βλάβης. Ἡ ἐκδοχὴ ὅτι ἡ σεισμικὴ ροπὴ διατηρεῖται σταθερὴ εἶναι εὐρέως ἀποδεκτὴ, τοῦλάχιστο σιωπηρῶς. Πολλὲς μελέτες χρησιμοποιοῦν τὶς μετρήσεις τοῦ ρυθμοῦ ὀλισθήσεως καὶ τῆς μέσης σεισμικῆς μετατοπίσεως γιὰ τὴν ἐκτίμηση τοῦ μέσου χρόνου ἐπαναλήψεως. Οἱ ὑπολογισμοὶ αὐτοὶ δέχονται ὅτι τὰ ρήγματα ἔχουν καταταμηθεῖ, καὶ οἱ μετατοπίσεις κατὰ τοὺς ἀλλεπάλληλους σεισμοὺς εἶναι περίπου ἴσες. Ἐπειδὴ ἡ ὀλισθήση αὐτὴ θεωρεῖται ὅτι εἶναι ἴση μὲ τὴν μέση ὀλισθήση στὰ τμήματα τῶν ρηγμάτων τῆς περιοχῆς, τὸ πρότυπο αὐτὸ ὑποδηλώνει τὴν διατήρηση τῆς τιμῆς τῆς σεισμικῆς ροπῆς. Στὴν μέθοδο προβλέψεως τοῦ χρόνου (time predictable), ὁ χρόνος μέχρι τὸν ἐπόμενο σεισμὸ ἐκτιμᾶται ἀπὸ τὴν σύγκριση τῆς μετατοπίσεως κατὰ τὸν τελευταῖο σεισμὸ μὲ τὴν συσσωρευθεῖσα συνολικὴ ὀλισθήση στὸ ρήγμα. Καὶ ἡ μέθοδος αὕτὴ ἀποδέχεται σιωπηρῶς τὴν διατήρηση τῆς σεισμικῆς ροπῆς. Πολὺ ὀλιγότερα ἀπαιτεῖ ἡ ἐκδοχὴ ὅτι, ἐπὶ πολὺ μακρὰ χρονικὴ περίοδο, σ' ὀλόκληρο τὸ μῆκος τοῦ ρήγματος καὶ μὲ τὴν ἐλαστικὴ πυκνότητά του, οἱ σεισμοὶ προκαλοῦν σχεδὸν ὁμοιόμορφη ὀλισθήση ἴση μὲ τὸν ρυθμὸ ὀλισθήσεως ἐπὶ τὸ σχετικὸ χρονικὸ διάστημα.

Ἡ ἰδέα ὅτι οἱ ρυθμοὶ γενέσεως τῶν μελλοντικῶν σεισμῶν μποροῦν νὰ ἐκτιμηθοῦν καλὰ ἀπὸ τοὺς ρυθμοὺς ἐμφανίσεως τῶν προηγούμενων σεισμῶν εἶναι εὐρύτατα ἀποδεκτὴ, ἂν καὶ φαίνεται ὡς ἐκδοχὴ ἀσθενέστερη ἀπὸ αὐτὴ τῆς διατηρήσεως τῆς σεισμικῆς ροπῆς. Ὁ παρατηρούμενος σεισμικὸς ρυθμὸς μεταβάλλεται φυσικὰ ἀπὸ τὸ ἕνα χρονικὸ διάστημα στὸ ἄλλο¹, ἀλλὰ τέτοιες μεταβολὲς ἀναμένονται σὲ

1. Οἱ ἐπόμενοι 4 μεγάλοι σεισμοὶ δεικνύουν ὅτι ὁ ρυθμὸς διαρρήξεως μπορεῖ νὰ μεταβληθεῖ πολὺ ἀπὸ ἕνα σεισμικὸ κύκλο στὸν ἀμέσως ἐπόμενο. Πιθανῶς λόγω ταχείας ἰάσεως (healing) στὴν περιοχὴ συγκεντρώσεως μεγαλύτερων ἐλαστικῶν τάσεων παρατηρεῖται, ὅχι σπάνια, μεταβολὴ στὸν ρυθμὸ διαρρήξεως τοῦ ρήγματος ἔπειτα ἀπὸ ἕνα πολὺ μεγάλο σεισμικὸ συμβάν σὲ ὀλίγους μεγάλους σεισμοὺς (Ruff, 1996).

Ἡ ρηξιγενὴς περιοχὴ στὴν περίπτωσι τοῦ σεισμοῦ τῆς 17ης Ἰουλίου 1980 (Ms 7,9) στὶς

διαδικασίες που γίνονται στην τύχη. Ούτως οι μεταβολές στην παρατηρούμενη σεισμικότητα δεν υποδηλώνουν και μεταβολή στον ρυθμό της έσωτερικής διαδικασίας που προκαλεί τους σεισμούς.

Η γνώμη ότι τα σεισμικά μεγέθη περιορίζονται από το μήκος ρηγμάτων ή τμημάτων τους προέρχεται από εμπειρικές μελέτες, που δεικνύουν ότι το μήκος της επιφανειακής διαρρήξεως και το μήκος των μετασεισμικών ζωνών αυξάνουν, γενικώς, όσον αυξάνει το μέγεθος του σεισμού. Στατιστικές συσχετίσεις με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, μέγιστης πιθανότητας ή άλλης καλύτερας, μεταξύ σεισμικού μεγέθους και μήκους ρήγματος ή ρηξιγενοῦς επιφανείας, επιτρέπουν την εκτίμηση του μεγέθους μελλοντικών σεισμών από το μήκος γνωστών ρηγμάτων ή τμημάτων ρηγμάτων, υπό την προϋπόθεση πάντως ότι οι μελλοντικοί σεισμοί θα περιορισθούν μόνο στα ρήγματα αυτά.

Με τις τρεις αυτές εκδοχές μαζί, καταλήγουμε ότι υπάρχει γενικώς αντίθεση μεταξύ του παρατηρουμένου ρυθμού γενέσεως μετρίων έως μεγάλων σεισμών και της σεισμικής ροπής, που εκτιμάται από την τεκτονική των πλακών ή των ρυθμῶν

νήσους Santa Cruz συμπίπτει ἐν μέρει με αὐτή που παρατηρήθηκε στὸν προηγούμενο μεγάλο σεισμό τοῦ 1966 (Ms 8,1). Ὁ χρόνος ἐπαναλήψεως στὸν σεισμό τοῦ 1980 ἦταν 14 ἔτη, περίπου 2,3 φορές μικρότερος ἀπὸ αὐτὸν τοῦ προηγούμενου σεισμοῦ (32 ἔτη).

Στὸν σεισμό τῶν Ἀλεουτίων νήσων τῆς 17ης Μαΐου 1986 (Mw 8,0) διερράγη και πάλι τὸ τμήμα τοῦ ρήγματος που εἶχε προκαλέσει τὸν πολὺ μεγάλο σεισμό τοῦ 1957 (Mw 8,6). Ὁ χρόνος ἐπαναλήψεως στὸν σεισμό τοῦ 1986 ἦταν 29 ἔτη, περίπου 1,8 φορές μικρότερος ἀπὸ αὐτὸν τοῦ προηγούμενου πολὺ μεγάλου σεισμοῦ (52 ἔτη).

Στὸν σεισμό Sanriku τῆς 28ης Δεκεμβρίου 1994 (Mw 7,7) διερράγη και πάλι τὸ νοτιότατο τμήμα τοῦ ρήγματος που εἶχε προκαλέσει τὸν πολὺ μεγάλο σεισμό τοῦ 1968 (Mw 8,2). Ὁ χρόνος ἐπαναλήψεως στὸν σεισμό τοῦ 1994 ἦταν 26 ἔτη, περίπου 2,7 φορές μικρότερος ἀπὸ αὐτὸν τοῦ προηγούμενου πολὺ μεγάλου σεισμοῦ (71 ἔτη). Τέλος ὁ σεισμός τῆς 3ης Δεκεμβρίου 1995 (Mw 7,9) συνέβη με ἐπαναδιάρρηξη τῆς ἐπικεντρικῆς προεξοχῆς τοῦ ρήγματος τοῦ πολὺ μεγάλου σεισμοῦ τοῦ 1963 (Mw 8,5). Ὁ χρόνος ἐπαναλήψεως στὸν σεισμό τοῦ 1995 ἦταν 32 ἔτη, περίπου 5,7 φορές μικρότερος ἀπὸ αὐτὸν τοῦ προηγούμενου πολὺ μεγάλου σεισμοῦ (183 ἔτη).

Ὅλοι αὐτοὶ και ἄλλοι ἀνάλογοι σεισμοὶ — ὅπως λ.χ. ὁ σεισμός τῆς 4ης Ὀκτωβρίου 1994, μεγέθους 8,2, ἔξω ἀπὸ τίς νότιες Κουρίλες νήσους — που ἐφθασαν ἐνωρίς μᾶς λέγουν ὅτι ὁ ρυθμὸς διαρρήξεως μεταβλήθηκε σὲ ὅλες αὐτὲς τίς ζῶνες καταδύσεως, και ὅτι θὰ πρέπει νὰ εἴμαστε ἔτοιμοι και γιὰ ἄλλους ἀπροσδόκητους «ξένους» (Ruff, 1996). Ἀναφέρεται (Allen, 1995) ὅτι σεισμός τῆς 9ης Ἰουνίου 1994, μεγέθους 8,3, που συνέβη κάτω ἀπὸ τὴν Βολιβία, σὲ βάθος μεγαλύτερο ἀπὸ 600 km, δὲν προκάλεσε ζημίες, και εἶναι ὁ μεγαλύτερος σεισμός βάθους που συνέβη ποτέ.

όλισθήσεως κατά μήκος τῶν ρηγμάτων. Οὕτω μία ἀπὸ τὶς τρεῖς ἐκδοχὲς πρέπει νὰ εἶναι ἐσφαλμένη, ἢ ἄλλως ὅτι τὰ δεδομένα τῶν ρυθμῶν ἐμφανίσεως σεισμῶν ἢ ὀλισθήσεως εἶναι κατάφωρα λανθασμένα.

Ἡ ἀντίθεση ποῦ ἀναφέραμε εἶναι περισσότερο καταφανής, ὅταν χρησιμοποιεῖται ἡ εἰδικὴ ἐκδοχὴ γιὰ τὴν ἐκτίμηση τῆς σεισμικῆς συχνότητος σὲ χωριστὰ ρήγματα. Ἡ ἐκδοχὴ αὐτὴ δέχεται ὅτι σὲ δεδομένο τμήμα ρήγματος ἡ ὀλισθήση ἢ ἡ σεισμικὴ ροπὴ ἀπελευθερώνεται ἀπὸ καιροῦ σὲ καιρὸ ὑπὸ μορφὴ σεισμῶν τοῦ αὐτοῦ περιπτώσεως μεγέθους. Στὴν περίπτωσιν αὐτὴ μπορούμε εὐκόλως νὰ ὑπολογίσουμε τὴν συχνότητα τῶν σεισμῶν αὐτῶν ἀπὸ τὸν λόγον τοῦ ρυθμοῦ ὀλισθήσεως κατά μήκος τοῦ ρήγματος πρὸς τὴν μετατόπιση ποῦ παράγεται κατὰ τὸν ἀντίστοιχον χαρακτηριστικὸν σεισμό. Διάφορες σχετικὲς μελέτες ἀπέδειξαν ὅτι τὸ σύνολο τῶν ρυθμῶν ποῦ ὑπολογίζονται κατὰ αὐτὸν τρόπο ὑπερβαίνει τὸν ρυθμὸν τῶν σεισμῶν, ποῦ παρατηροῦνται μὲ τὰ αὐτὰ περιπτώσεως χαρακτηριστικά, κατὰ 2 ἕως 5 φορές.

Τὰ ἐξαγόμενα ὅλων τῶν μελετῶν αὐτῶν ποῦ ἔγιναν στὴν Καλιφόρνια θὰ μπορούσαν νὰ θεωρηθοῦν ὡς χρονικὲς μεταβολὲς στὸν σεισμικὸν ρυθμὸν· τοῦτο σημαίνει ὅτι δὲν ἰσχύει ἡ ἐκδοχὴ τῆς σεισμικῆς σταθερότητος. Τὸ φαινόμενο ὅτι οἱ παρατηρούμενοι σεισμοὶ δὲν συμβαδίζουν μὲ τὸν προβλεπόμενον ρυθμὸν γενέσεως σεισμῶν ἔχει ἤδη καθιερωθεῖ στὴν ἐπιστημονικὴ ὀρολογία ὡς «σεισμικὸ ἔλλειμμα» (earthquake deficit). Ἀποδεχόμενοι ὅτι ὀλόκληρη ἡ Καλιφόρνια εὐρίσκεται κατὰ τὸν τελευταῖον ἕνα καὶ μισὸ αἰῶνα σὲ σχετικὴ ἠρεμία, θὰ ἦταν δυνατὸ οἱ χρονικὲς μεταβολὲς στὸν σεισμικὸν ρυθμὸν νὰ ἐξηγήσουν τὸ εὐρεθὲν στὴν Καλιφόρνια «σεισμικὸ ἔλλειμμα». Δὲν φαίνεται ὅμως λογικὸν νὰ δεχθοῦμε ὅτι τὸ ἴδιον ἰσχύει γιὰ ὀλόκληρη τὴν παρυφὴ τοῦ Εἰρηνικοῦ Ὠκεανοῦ.

Μερικὰ εἰδικὰ στοιχεῖα ποῦ χρησιμοποιήθηκαν σὲ ὀρισμένους περιπτώσεις σεισμικῶν προβλέψεων μπορεῖ νὰ ἦσαν λανθασμένα. Παραδείγματός χάριν τὰ χαρακτηριστικὰ μεγέθη μπορεῖ νὰ ὑποτιμήθηκαν μὲ ἀποτέλεσμα νὰ ὑπερτιμηθοῦν οἱ συχνότητές τους. Ἴσως καὶ οἱ ρυθμοὶ ὀλισθήσεως σὲ σημαντικὰ ρήγματα νὰ ὑπερτιμήθηκαν. Τὰ ἀποτελέσματα αὐτὰ μπορεῖ νὰ ἐξηγήσουν τὴν διαφορὰ μεταξὺ τῶν ρυθμῶν ποῦ παρατηρήθηκαν καὶ αὐτῶν ποῦ ἐκτιμήθηκαν γιὰ μερικὰ ρήγματα, ἀλλὰ εἶναι πολὺ δύσκολον νὰ ἐξηγηθεῖ ἡ ὑπέρβαση σὲ σεισμικὲς προβλέψεις ποῦ παρατηρήθηκε γιὰ μεγάλες περιοχές. Μπορεῖ ἐπίσης νὰ εἶναι ἀληθὲς ὅτι τὸ πρότυπον γιὰ χαρακτηριστικὰ μεγέθη ἐφαρμόστηκε κατὰ γράμμα. Στὴν πραγματικότητι σεισμὸν διαφορῶν μεγεθῶν συμβάλλουν στὸν ρυθμὸν ἀπελευθερώσεως τῆς σεισμικῆς ροπῆς.

Πολλὲς μελέτες χρησιμοποιοῦν διανομὴ μεγεθῶν Gutenberg-Richter ποῦ ἔχουν περικυβεῖ, καὶ ὅχι τὸ πρότυπον τῶν χαρακτηριστικῶν μεγεθῶν. Μερικὲς μελέτες χρησιμοποιοῦν συσσωρευτικὴν διανομὴν μεγεθῶν ποῦ ἔχουν περικυβεῖ, καὶ μερι-

κές άλλες τήν πυκνότητα. "Όλες αυτές οί παραλλαγές προτύπων δίδουν ρυθμούς όμοιους με αυτούς που προκύπτουν από τὸ πρότυπο χαρακτηριστικῶν μεγεθῶν, ἐὰν ἡ περικοπὴ τῶν μεγεθῶν εἶναι κοντὰ στὸ χαρακτηριστικὸ μέγεθος. Ἡ σεισμικὴ ροπὴ αὐξάνει ταχέως μετὰ τὸ μέγεθος οὕτως, ὥστε ἡ συμβολὴ τῶν μικρῶν ἕως μετρίων σεισμῶν στὴν συνολικὴ σεισμικὴ ροπὴ εἶναι πολὺ μικρὴ. Μὲ ἄλλα λόγια, ἐὰν τοὺς συμπεριλάβουμε σὲ πρότυπο ἐπαναλήψεως σεισμῶν νὰ μὴ ὑπάρχει μεταβολὴ στοὺς ρυθμούς που προβλέπονται, ἰδίως ἐὰν δὲν συμπεριλαμβάνονται πολὺ μεγάλοι σειμοί.

Ἡ διατήρηση τῆς σεισμικῆς ροπῆς εἶναι ἀποδεικτὴ μόνο γιὰ τὸ σειсмоγενετικὸ τμήμα τῆς λιθοσφαιρας· κάτωθεν τοῦ τμήματος αὐτοῦ ἡ σεισμικὴ ροπὴ ἐλευθερώνεται ἀσεισμικῶς. Ἐὰν ἔχουμε ὑπερεκτιμήσει τὸ πάχος τοῦ σειсмоγενετικοῦ στρώματος, τότε θὰ ἔχουμε ὑπερεκτιμήσει ἐπίσης τὸν ρυθμὸ συσσωρεύσεως τῆς σεισμικῆς ροπῆς, καὶ πιθανῶς καὶ τὸ μέγεθος τῶν χαρακτηριστικῶν σεισμῶν. Ἐὰν συμβαίνει αὐτό, θὰ μπορούσαμε νὰ διορθώσουμε τὴν διαφορὰ, χρησιμοποιοῦντες μικρότερο ἐλαστικὸ πάχος στὴν ἐκτίμηση τοῦ σεισμικοῦ ρυθμοῦ. Ἡ ἐξήγηση, ὅμως, αὐτὴ δὲν συμφωνεῖ καλὰ μετὰ τὸ χαρακτηριστικὸ πρότυπο, διότι σὲ πλεῖστα τμήματα ρηγμάτων ἔχουν ἤδη παρατηρηθεῖ σειμοί που ἔχουν μεγέθη ἀνάλογα πρὸς αὐτὰ που ἐκτιμοῦνται ἀπὸ τὸ μῆκος, τὴν μετατόπιση καὶ τὸ ἐλαστικὸ πάχος, που εἶναι κατὰ παράδοση ἀποδεικτό. Ἴσως κάποιο κλάσμα τῆς ὀλισθήσεως σ' ὀλόκληρη τὴν σειсмоγενετικὴ ρηξιγενῆ ἐπιφάνεια ἀπελευθερώνεται μετὰ ἀσεισμικὴ ὀλίσθηση. Στὴν περίπτωσή, ὅμως, αὐτὴ θὰ ἔπρεπε νὰ ἔχουμε ἐρπυσμὸ στὴν ἐπιφάνεια τῶν περισσοτέρων ρηγμάτων. Ἐνῶ θὰ πρέπει νὰ συμβαίνει πολὺ περισσότερος ἐρπυσμὸς ἀπὸ αὐτὸν που μπορούμε νὰ διακρίνουμε, ἰδίως ἐὰν τὰ ρήγματα εἶναι γεωμετρικῶς διάσπαρτα, οἱ γεωδαιτικὲς ἔρευνες θέτουν αὐστηρὰ ὄρια στὸν ρυθμὸ ἐρπυσμοῦ γιὰ μερικὰ σημαντικὰ ρήγματα. Φαίνεται, οὕτως, ἀπίθανο ὅτι διάχυτος ἐρπυσμὸς μπορεῖ νὰ ἀπελευθερώνει ἀξιόλογη σεισμικὴ ροπὴ.

Κατὰ τὸν Καθηγητὴ David Jackson (1996), ἡ περισσότερη πιθανὴ δυνατότης εἶναι ὅτι οἱ σειμοί δὲν περιορίζονται ἀπὸ τὸ μῆκος γνωστῶν ρηγμάτων ἢ τμημάτων ρηγμάτων.

Ὡστόσο, οἱ μεγαλύτεροι σειμοί που ἀναμένουμε δὲν εἶναι ἀπαραίτητο νὰ ἔχουν ἀκριβῶς τὸ μέγεθος που προβλέπεται, οὔτε νὰ συμβαίνουν πάντοτε στὶς ἴδιες ἀκριβῶς θέσεις. Εἶναι ἀφελὲς νὰ περιμένουμε ὅτι ὅλα τὰ ρήγματα συμπεριφέρονται ἀκριβῶς σύμφωνα μετὰ τὸ πρότυπο τῶν χαρακτηριστικῶν σεισμῶν ἢ τὸ πρότυπο Gutenberg-Richter. Εἶναι μᾶλλον πιθανὸ ὅτι ὑπάρχουν πλεῖστοι τρόποι σεισμικῆς συμπεριφορᾶς που ἀνταποκρίνονται στὴν τεκτονικὴ πολυπλοκότητα τῶν ρηγμάτων. Ὅπως φαίνεται, τὰ ρήγματα που χαρακτηρίζονται ἀπὸ πολύπλοκα ἴχνη τείνουν νὰ παρουσιάζουν διανομὲς μεγέθους - συχνότητας περισσότερο σύμφωνες μετὰ τὸ πρό-

τυπο διανομής Gutenberg-Richter, ενώ τα ρήγματα που χαρακτηρίζονται από σχετικώς όμαλά έχνη παρουσιάζουν διανομές περισσότερο σύμφωνες με το πρότυπο χαρακτηριστικῶν σεισμῶν (Wesnouski, 1996).

Έχει αποδειχθεῖ ὅτι ἡ διανομή τῶν σεισμῶν κατὰ τὸ πρότυπο Gutenberg-Richter μπορεῖ νὰ προκύπτει ἀπὸ διανομὴ ρηγματῶν διαφόρων μηκῶν καὶ ρυθμῶν ὀλισθήσεως, ἀπὸ τὰ ὁποῖα κάθε ἓνα παράγει σεισμοὺς ἑνὸς καὶ μόνου μεγέθους. Πρόσφατες ἔρευνες ἔδειξαν (Anderson et al., 1996), ὅτι τὸ μέγεθος τοῦ ἀναμενομένου σεισμοῦ ἐξαρτᾶται ὄχι μόνον ἀπὸ τὸ μῆκος τοῦ ρήγματος, ἀλλὰ καὶ ἀπὸ τὸν ρυθμὸ ὀλισθήσεως τῶν παρειῶν του. Γιὰ τὸ αὐτὸ μῆκος ρήγματος, οἱ μεγαλύτεροι σεισμοὶ συμβαίνουν στὰ ρήγματα πὸν ἔχουν τὸν μικρότερο ρυθμὸ ὀλισθήσεως. Οὕτως εἶναι γενικῶς ἀποδεκτὸ ὅτι ἡ σεισμικότης περιοχῶν μεγάλης ἐπιφανείας, καὶ γι' αὐτὸ τὸν λόγο καὶ ὀλοκλήρου τῆς γήινης ἐπιφανείας, περιγράφεται ἱκανοποιητικὰ ἀπὸ τὴν σχέση Gutenberg-Richter (Wesnouski, 1996).

Μὲ αὐτὴ τὴν ἐξήγηση, ἡ σεισμικὴ ροπὴ διατηρεῖται, ἀλλὰ διατηρεῖται κυρίως ἀπὸ τοὺς σπάνιους τεράστιους σεισμοὺς (huge earthquakes). Ἄς σημειωθεῖ ὅτι οἱ πελώριοι αὐτοὶ σεισμοὶ πρέπει νὰ συμβαίνουν ὄχι μόνον σὲ ρήγματα μεγάλου μήκους, ὅπως τὸ ρῆγμα τοῦ Ἁγίου Ἀνδρέα, ἀλλὰ ἀκόμη καὶ σὲ αὐτὰ πὸν ἔχουν μικρότερο μῆκος. Διαφορετικὰ, τὰ μικρότερα ρήγματα θὰ ἔπρεπε συλλογικὰ νὰ ἔχουν περισσότερους μετρίουσ σεισμοὺς ἀπὸ αὐτοὺς πὸν παρουσιάζονται στοὺς σεισμικοὺς καταλόγους. Μὲ τὴν ὑπόθεση αὐτῆ, οἱ σεισμοὶ πὸν καταγράφονται στοὺς καταλόγους θὰ μπορούσαν νὰ ἀπεικονίζουσαν τὸν ρυθμὸ ἐκλύσεως σεισμῶν μέχρι τοῦ μεγέθους ἐπαρκοῦσ δειγματοληψίας, δηλαδὴ μέχρι τοῦ μεγέθους πὸν θὰ εἶχαν συμβεῖ πέντε ἢ περισσότεροι μεγαλύτεροι σεισμοί. Γιὰ πλεῖστες περιοχές, οἱ ρυθμοὶ γενέσεως τῶν σεισμῶν πὸν ἔχουν καταχωρηθεῖ σὲ καταλόγους συμφωνοῦσαν καλῶς μὲ τὴν λογαριθμικὴ σχέση Gutenberg-Richter πὸν συνδέει τὸ μέγεθος μὲ τὸ πλῆθος τῶν σεισμῶν. Ἐὰν ἡ σχέση Gutenberg-Richter προεκταθεῖ σὲ μεγαλύτερα συμβάντα ἀπὸ αὐτὰ πὸν ἔχουμε ἰδεῖ, μπορεῖ νὰ ἐξηγήσει, ἐπίσης, τὴν γεωλογικῶς παρατηρουμένη σεισμικὴ ροπὴ. Ὁ συλλογισμὸς αὐτὸς ἄγει στὸ συμπέρασμα ὅτι τὸ μέγιστο μέγεθος σεισμοῦ πὸν χρειάζεται για νὰ ἐξηγήσει τὸν παρατηρούμενο ρυθμὸ σεισμικῆς ροπῆς εἶναι πολὺ μεγάλο, συνήθως στὴν περιοχὴ 8 ἕως 9 Ms.

Ἡ πραγματικὴ τιμὴ ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὴν κατανομὴ μεγεθῶν πὸν δεχόμεστε, ἀλλὰ οἰαδῆποτε κατανομὴ καὶ ἂν δεχθοῦμε, ἀπαιτοῦνται πολὺ μεγάλοι σεισμοί, μὲ χρόνο ἐπαναλήψεως στὴν τάξη χιλιάδων ἐτῶν. Ὁ κατάλογος μεγάλων σεισμῶν ἐπιφανείας, 1900-1989, πὸν δημοσιεύθηκε τὸ 1992 ἀπὸ τοὺς Pacheco καὶ Sykes δὲν εἶναι ἀντιπροσωπευτικὸς για σεισμοὺς μεγέθους 7,9 καὶ πάνω. Γιὰ νὰ ἔχουμε σωστὸ, αὐτοσυνεπὲς δεῖγμα σεισμῶν σ' ὅλη τὴν περιοχὴ μεγεθῶν 7,0 ἕως 9,0, για

ολόκληρη τή Γῆ, πρέπει νά ἔχουμε μακρὰ περίοδο ἐνοργάνων παρατηρήσεων περίπου 750 ἐτῶν καί πλεόν (Galanopoulos, 1993).

Μιά εὐλογῆ ἀντίρρηση γιά τούς πολὺ μεγάλους σεισμούς πηγάζει ἀπὸ τίς ἐμπειρικές σχέσεις πού συνδέουν τὸ μέγεθος τοῦ σεισμοῦ μὲ τὸ μῆκος τοῦ ρήγματος. Οἱ σχέσεις αὐτὲς ὑποδηλώνουν ὅτι ἕνας σεισμὸς 8ου μεγέθους πρέπει νά προέρχεται ἀπὸ ρήγμα μῆκους 500 χιλμ. καί πάνω, ὡς καί μέση μετατόπιση κοντὰ στὰ 10 μέτρα. Οὕτω γεννᾶται αὐτομάτως τὸ ἐρώτημα: πού θὰ πρέπει νά περιμένουμε τόσο μεγάλους σεισμούς; Τὰ πλεῖστα ἀπὸ τὰ γνωστὰ τμήματα ρηγμάτων ἔχουν μῆκος πολὺ μικρότερο ἀπὸ 500 χιλμ. Ἡ ἀντίρρηση ὅτι τὰ σεισμικὰ μεγέθη πρέπει νά περιορίζονται σ' αὐτὰ πού ὑποδηλώνουν οἱ στατιστικὲς συσχετίσεις εἶναι, τὸ ὀλιγότερο, ἰσχνή. Οἱ στατιστικὲς συσχετίσεις δίδουν τὸ μέσο μέγεθος σεισμοῦ γιά δοθὲν μῆκος ρήγματος, ἢ καί ἀντιστρόφως, καί ὄχι τὰ μέγιστα μεγέθη, τὰ ὁποῖα μπορεῖ νά σχετίζονται μᾶλλον μὲ πελώρια συμβάντα. Οἱ στατιστικὲς συσχετίσεις στηρίζονται σὲ πολὺ ὀλίγα δεδομένα γιά μεγάλους σεισμούς, γιὰτὶ ἀκριβῶς οἱ σεισμοὶ αὐτοὶ εἶναι πολὺ σπάνιοι.

Ἡ πιὸ σημαντικὴ ἐπιφύλαξη εἶναι ὅτι οἱ στατιστικὲς συσχετίσεις βασίζονται σὲ μῆκη ρηγμάτων, πού καθορίζονται μετὰ τὴν γένεση τῶν συμβάντων, πού ἀποδίδονται στὰ ρήγματα αὐτά. Τὰ μῆκη αὐτά μπορεῖ νά εἶναι οὐσιωδῶς μεγαλύτερα, ἰδίως στὴν περίπτωση γιγαντιαίων συμβάντων, ἀπὸ αὐτὰ πού εἶχαν καθορισθεῖ πρὶν ἀπὸ τούς σεισμούς. Ἡ πρόσφατη σεισμικὴ Ἱστορία εἶναι γεμάτη μὲ παραδείγματα σεισμῶν πού δὲν ὑπάκουσαν στὰ τερατικὰ ὄρια πού καθορίζονταν ἀπὸ τὰ ἄκρα γνωστῶν ρηγμάτων. Στὴν Καλιφόρνια λ.χ. ὁ σεισμὸς στὴν κομητεία Kern τὸ 1952, μὲ μέγεθος σεισμικῆς ροπῆς περίπου 7,5 συνέβη σ' ἕνα ἀφανὲς ρήγμα, τὸ ὁποῖον δὲν θὰ ἀνεμένετο, μὲ τίς σημερινὲς μεθόδους ὑπολογισμοῦ, νά προκαλέσει τόσο μεγάλο σεισμό. Τὸ 1992 ὁ σεισμὸς Landers συνέδεσε τέσσαρα ρήγματα, τὰ ὁποῖα προηγουμένως εἶχαν χαρτογραφηθεῖ χωριστά, καί ἦταν μεγαλύτερος ἀπὸ αὐτὸν πού θὰ μπορούσε νά προβλεφθεῖ γιά οἰοδήποτε ἀπὸ αὐτά. Ὁ σεισμὸς Gobi-Altai στὴν Κεντρικὴ Ἀσία τὸ 1957, μὲ μέγεθος μεγαλύτερο ἀπὸ 8, προκλήθηκε καθὼς φαίνεται ἀπὸ συνδυασμὸ διαρρήξεων παραταξιακῶν καί ἀναστρόφων ρηγμάτων πού εὑρίσκονταν σὲ ἀπόσταση 30 χιλμ. τὸ ἕνα ἀπὸ τὸ ἄλλο. Τὰ παραδείγματα αὐτά δεικνύουν ὅτι οἱ σεισμοὶ δὲν περιορίζονται ἀναγκαίως σὲ ὑφιστάμενα γραμμικῶς συνδεδεμένα τμήματα ρηγμάτων. Καί ἀσφαλῶς οἱ σεισμοὶ πρέπει νά εἶναι ἱκανοὶ νά ἐπεκτείνουν ὑπάρχοντα ρήγματα καί νά δημιουργοῦν νέα, ὅπως τὰ ρήγματα πού βλέπουμε σήμερα πρέπει νά δημιουργήθηκαν καί νά ἐπεξετάθηκαν κατὰ τὸ παρελθόν.

Πολὺ μεγάλοι σεισμοὶ συνέβηκαν στὸ ρήγμα τοῦ Ἀγίου Ἀνδρέα, ὅπου καί θὰ ἔπρεπε νά ἀναμένονται, καί στὴν περιοχὴ τῆς New Madrid στὰ κράσπεδα τοῦ Mi-

σεισιπῆ, ὅπου ἡ κατάτμηση τῆς ρηξιγενοῦς ζώνης δὲν ὑποδείκνυε τὴν δυνατότητα γένεσεως τόσο μεγάλων σεισμῶν. Ἐὰν πολὺ μεγάλοι σεισμοὶ μπορεῖ νὰ συμβαίνουν σ' αὐτὴ τὴν περιοχή, γιατί δὲν θὰ μπορούσαν νὰ συμβοῦν σὲ οἰαδήποτε ἄλλη σεισμικὴ περιοχή;

Στὸν Ἑλληνικὸ χῶρο ἔχουν συμβεῖ 4 πολὺ μεγάλοι σεισμοὶ ποὺ ἔχουν χαρακτηρισθεῖ ἀπὸ τὸν A. Sieberg ὡς πελώριοι (Riesenbeben): Ὁ σεισμὸς τῆς Κρήτης τῆς 12ης Ὀκτωβρίου 1856, ὁ σεισμὸς τῶν Φιλιππῶν τῆς 27ης Αὐγούστου 1886, ὁ σεισμὸς τῶν Κυθέρων τῆς 11ης Αὐγούστου 1903 καὶ ὁ σεισμὸς τῆς Ρόδου τῆς 26ης Ἰουνίου 1926. Κατὰ πολὺ μεγαλύτερος φαίνεται νὰ ἦταν ὁ σεισμὸς τῆς Κρήτης τῆς 21ης Ἰουλίου 365. Οἱ ζημιὲς ποὺ σημειώθηκαν σὲ πολλὲς παραμεσόγειες πόλεις ἀπὸ τὸν σεισμὸ καὶ τὸ θαλάσσιο κύμα βαρύτητας (tsunami) ποὺ ἀκολούθησε ἦσαν πρωτοφανεῖς σὲ μέγεθος καὶ ἔκταση (Galanopoulos, 1985). Διάφοροι περιηγητὲς καὶ ἱστορικοὶ συγγραφεῖς τῆς ἐποχῆς ἐκείνης θεώρησαν τὸν σεισμὸν ὡς «παγκόσμιο» (Per universum orbem).

Ἐὰν μπορούν νὰ συμβοῦν τέτοιοι σεισμοί, ἡ δυνατότης αὐτὴ ἔχει σοβαρὲς συνέπειες γιὰ τὴν ἐκτίμηση τῆς σεισμικῆς ἀπειλῆς κάθε περιοχῆς, καὶ γιὰ τὰ ἐπιστημονικὰ πρότυπα ποὺ συσχετίζουσι τοὺς σεισμοὺς πρὸς τὴν τεκτονικὴ τῶν πλακῶν καὶ τὶς παραμορφώσεις μεγάλης κλίμακας. Ἡ ἐνδεχόμενη βλάβη ἀπὸ σεισμὸ μεγέθους 8 καὶ ἄνω σὲ οἰαδήποτε ἀστική περιοχή θὰ ἦταν δίχως προηγούμενο καὶ θὰ προκαλοῦσε πιθανῶς τὴν διακοπὴ λειτουργίας φυσικῶν καὶ πολιτιστικῶν συστημάτων, στὰ ὁποῖα στηρίζομεθα χωρὶς νὰ ἔχουμε σαφῆ ἐπίγνωση αὐτοῦ. Οἱ ἀπώλειες θὰ μπορούσαν νὰ ἀνέλθουν σὲ τρισεκατομμύρια δολλάρια. Ὡστόσο, πρὸς εἰρωνεία, ἡ δυνατότης νὰ συμβοῦν πολὺ μεγάλοι σεισμοὶ ἔχει καὶ τὴν καλὴ τῆς πλευρά, τουλάχιστον γιὰ μερικοὺς. Οἱ πολὺ μεγάλοι σεισμοὶ πρέπει νὰ εἶναι ἐξαιρετικὰ σπάνιοι, καὶ ἡ καταστρεπτικὴ δυναμικότης αὐτῶν πρέπει νὰ βλέπεται ὑπὸ τὸ φῶς τοῦ πολὺ μικροῦ ρυθμοῦ μὲ τὸν ὁποῖον γίνονται. Ἐπὶ πλεόν, οἱ πολὺ μεγάλοι σεισμοὶ μπορεῖ νὰ ἐμποδίζουν τὴν γένεση πολὺ περισσοτέρων μετρίων ἕως μεγάλων σεισμῶν (Jackson, 1996).

Μία ἀπὸ τὶς σημαντικότερες ἀποκαλύψεις ποὺ ἔχουν γίνεῖ στὰ τελευταῖα 20 ἕως 30 χρόνια εἶναι ὅτι οἱ μεγάλοι σεισμοὶ διαφέρουν ὁ ἓνας ἀπὸ τὸν ἄλλο πολὺ περισσότερο ἀπὸ ὅ,τι μπορούσαμε ποτὲ νὰ φαντασθοῦμε, ἰδίως στὴν φυσικὴ διαδικασία τῆς σεισμικῆς διαρρήξεως (πτώση τάσεως, σχέδιο διαρρήξεως, ἀποτελέσματα κατευθύνσεως, τραχύτης ρήγματος καὶ ταχύτης μεταδόσεως διαρρήξεως). Ὅσο περισσότερο διαφέρουν οἱ σεισμοὶ ὁ ἓνας ἀπὸ τὸν ἄλλο, τόσο ὀλιγότερο πιθανὸ φαίνεται ὅτι μπορούν νὰ ἔχουν τὶς ἴδιες πρὸδρομες σεισμολογικὲς ἢ γεωδαιτικὲς ἐνδείξεις ἢ ἄλλες μὴ σεισμικὲς ἀνωμαλίες (ἠλεκτρικὲς, ἠλεκτρομαγνητικὲς, ἔδαφικοῦ ὕδατος, ραδονίου κ.λπ.).

Ἐργαστηριακὰ πειράματα καὶ θεωρητικὰ πρότυπα, ὅπως καὶ ἀπὸ μερικὲς σεισμολογικὲς καὶ γεωλογικὲς παρατηρήσεις φαίνεται ὅτι ἡ τριβὴ στὸ ρήγμα, στὰ σεισμογενετικὰ βάρη ὅπου ἀρχίζει ἡ διάρρηξη, εἶναι τόσο περίπλοκη, καὶ τόσο ἀπρόβλεπτη, ὥστε ἡ συμπεριφορὰ τῆς νὰ ἐμφανίζεται τυπικῶς κάπως περισσότερο χαοτικὴ παρά συστηματικὴ (Allen, 1995).

Ὅτῳ ποτὲ δὲν μπορεῖ κάποιος νὰ εἰπεῖ, χωρὶς ἀμφιβολία, ὅτι κάτι δὲν μπορεῖ νὰ συμβεῖ. Ὡστόσο, ἡ Ἱστορία εἶναι γεμάτη μὲ τολμηρὲς προβλέψεις ποὺ δὲν ἐπαληθεύθησαν (Time, p. 4, 1996 July 15). Μεταξὺ αὐτῶν ἀναφέρονται καὶ δύο ποὺ ἀποδίδονται σὲ πολὺ γνωστοὺς καὶ διασήμους ἄνδρες: α) στὸν Ἄγγλο Φυσικὸ Sir William Thomson (1824-1907), ἀργότερα Lord Kelvin, 1st Baron, πρόεδρο τῆς Royal Society τὸ 1895. Ὁ Thomson εἶχε τὴν γνώμη ὅτι βαρύτερες ἀπὸ τὸν ἀέρα ἱπτάμενες μηχανὲς εἶναι ἀδύνατο νὰ ὑπάρξουν (Heavier-than-air flying machines are impossible), καὶ β) στὸν Στρατάρχη τῆς Γαλλίας Ferdinand Foch (1851-1929), Καθηγητὴ τῆς Στρατηγικῆς στὴν Ἀνωτάτη Σχολὴ Πολέμου. Ὁ Foch εἶχε δηλώσει ὅτι τὰ ἀεροπλάνα εἶναι ἐνδιαφέροντα παιγνίδια ἀλλὰ ὄχι στρατιωτικῆς ἀξίας (Airplanes are interesting toys but of no military value). Ἐξαιρεση στὸν ἀναφερθέντα κανόνα εἶναι ὅτι: πάντοτε ὅ,τι γεννιέται γρήγορα ἢ ἀργὰ πεθαίνει. Τίποτα δὲν διαρκεῖ γιὰ πάντα ἐκτὸς ἀπὸ τὸν Θεὸ (Nothing lasts forever but God!).

Ἀπὸ τὴν προηγηθεῖσα ἀνάλυση φαίνεται νὰ δικαιολογεῖται ἡ ἀκλόνητη πίστη τοῦ καθηγητοῦ Perry Byerly στὸν Θεὸ τῶν πραγμάτων ὅπως εἶναι καὶ ὄχι στὸν Θεὸ τῶν πραγμάτων ὅπως θὰ ἔπρεπε νὰ εἶναι. Ὁ Byerly, καθηγητῆς στὸ Berkeley, συνήθιζε συχνὰ νὰ λέγει: I believe in the God of the things as they are, and not in the God of the things as they ought to be. Πράγματι, ὑπάρχουν πάντοτε ἐρωτήσεις, ἀκόμη καὶ στὸν κλάδο τῶν μαθηματικῶν, ποὺ ἔχουν μείνει γιὰ ἀπάντηση, καὶ ὑπάρχει πάντοτε χώρος γιὰ τὸν Θεό. (There are always questions left to be answered, and there is always room for God. (Peter Fischer, Time, p. 8, 1996 April 22). Γι' αὐτὸ τὸν λόγο καὶ τὸ μέλλον εἶναι πάντοτε σοφότερο ἀπὸ τὸ παρόν, καὶ μιὰ ἀπλὴ συγκεκριμένη αἰτιολογικὰ γνώμη ἀπὸ ἓνα καὶ μόνον σοφὸ ἄτομο μπορεῖ κάποτε ν' ἀποδειχθεῖ κατὰ πολὺ ὀρθότερη ἀπὸ τὴν συλλογικὴ γνώμη πλήθους ὀλιγότερο σοφῶν ἐμπείρων εἰδικῶν.

REFERENCES

- Abers A. G., Beavan J., Horton St., Jaume St., and Triep En., Large Accelerations and Tectonic Setting of the May 1993 Shumagin Islands Earthquake Sequence. «Bull. Seism. Soc. Am.», Vol 85, No. 6, pp. 1730-1738, 1995.
- Allen R. Cl., Earthquake Hazard Assessment: Has Our Approach Been Modified in the Light of Recent Earthquakes? («Earthquake Spectra», Vol. 11, No. 3, pp. 357-366, 1995.

- Anderson G. J., Wesnouski G. St. and Stirling W. M., Earthquake Size as a Function of Fault Slip Rate. «Bull. Seism. Soc. Am.», Vol. 86, No. 3, pp. 683-690, 1996.
- Galanopoulos G. A., Spreading of Felt Shaking of Recent Interplate Earthquakes of the Hellenic Arc in Africa (Egypt and Libya) Evidences the Reliability of Older Seismic Data. «Pract. Acad. of Athens», Vol. 60. pp. 605-624, 1985.
- Galanopoulos G. A., The Observation Time Required for a Representative Sample of Seismicity of the Earth. «Pract. Acad. of Athens», Vol. 68, pp. 162-173, 1993.
- Jackson D. D., The Case of Huge Earthquakes. «Seis. Res. Letters». Vol. 67, No. 1, pp. 3-5, 1996.
- Pacheco F. J. and Sykes R. L., Seismic Catalog of Large Shallow Earthquakes. «Bull. Seism. Soc. Am.», Vol. 82, No. 3, pp. 1306-1349, 1992.
- Ruff J. L., OPINION. «Seis. Res. Letters», Vol. 67, No. 2, pp. 3-4, 1996.
- Wesnousky G. St., Reply to Yan Kagan's Comment on «The Gutenberg-Richter of Characteristic Earthquake Distribution, Wich Is It?». Bull. Seism Soc. Am., Vol. 86, No 1A, pp. 286-291, 1996.