

## Μάθημα 9ο

### Πρόγνωση των Σεισμών

- Μακροπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών
- Μεσοπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών
- Βραχυπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών

## 1. Εισαγωγή

Τα αποτελέσματα της έρευνας για την πρόγνωση συγκεκριμένου σεισμού, η οποία ονομάζεται και **ειδική πρόγνωση**, δεν έχουν ακόμα φθάσει σε τέτοιο επίπεδο ώστε να εφαρμοστούν σε ευρεία κλίμακα για την αντισεισμική προστασία.

Η δυσκολία πρόγνωσης συγκεκριμένου σεισμού οφείλεται στο γεγονός ότι ο φλοιός της Γης όπου γεννιούνται οι σεισμοί είναι ένα **μη γραμμικό σύστημα**, δηλαδή ένα σύστημα το οποίο έχει **χαοτική συμπεριφορά**. Αυτό σημαίνει ότι οι βασικές παράμετροι ενός μελλοντικού σεισμού (χρόνος, χώρος, μέγεθος) και ιδιαίτερα ο χρόνος γένεσής του είναι εξαιρετικά ευαίσθητες σε μεταβολές της φυσικής εξέλιξης του φλοιού της Γης. Αυτό δε σημαίνει, όμως, ότι δεν υπάρχει καμιά δυνατότητα πρόγνωσης των σεισμών αφού τα χαοτικά συστήματα, συνεπώς και ο φλοιός της Γης, είναι πολύπλοκα αλλά προβλέψιμα σε κάποιο βαθμό (σε κάποια κλίμακα χρόνου, κλπ).

Με τον όρο **πρόγνωση συγκεκριμένου σεισμού** εννοούμε:

- τη γνώση του χώρου γένεσης,
- του χρόνου γένεσης,
- του μεγέθους του,

καθώς και των αντιστοίχων τριών, σχετικώς μικρών, **αβεβαιοτήτων** (παραθύρων, σφαλμάτων) πριν από τη γένεση του σεισμού.

### Ποιά θεωρείται επιτυχής πρόγνωση;

Για να θεωρηθεί μια πρόγνωση επιτυχής πρέπει ο σεισμός να γίνει μέσα στα τρία παράθυρα (χρόνου, χώρου, μεγέθους) που έχουν προκαθοριστεί.

### Τι είναι επιστημονικά έγκυρη πρόγνωση;

Είναι μια επιτυχής πρόγνωση που είναι αποτέλεσμα εφαρμογής συγκεκριμένης επιστημονικής μεθοδολογίας η οποία περιλαμβάνει:

- την επιστημονική μέθοδο,
- τα δεδομένα παρατήρησης,
- η πιθανότητα γένεσης μικρότερη από την πιθανότητα τυχαίας γένεσης, κλπ.

Μόνο οι έγκυρες προγνώσεις έχουν επιστημονικό αλλά και κοινωνικό ενδιαφέρον.

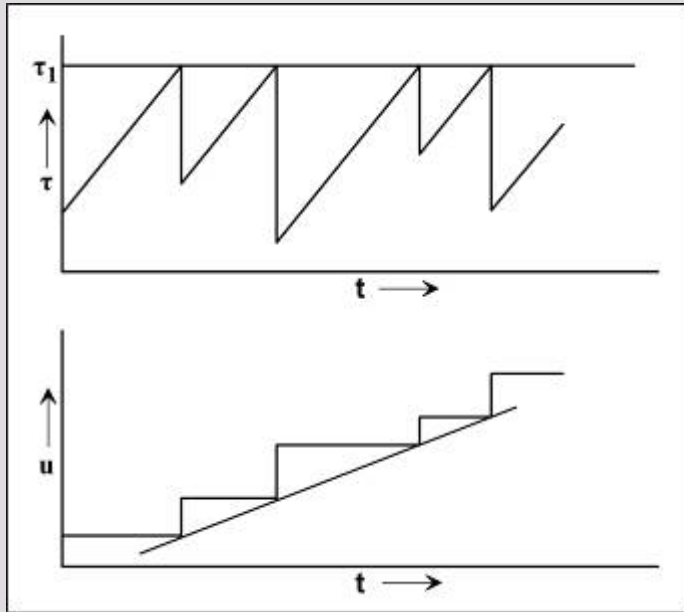
### Όταν ο χρόνος γένεσης του αναμενόμενου σεισμού υπολογίζεται με ακρίβεια:

- ◆ λίγων δεκαετιών (π.χ. 30 ετών), η πρόγνωση θεωρείται **μακροπρόθεσμη** (long term),
- ◆ αρκετών μηνών ή λίγων ετών (π.χ. 3 ετών), η πρόγνωση θεωρείται **μεσοπρόθεσμη** (intermediate term),
- ◆ λίγων ημερών ή εβδομάδων (π.χ. 10 ημερών), η πρόγνωση θεωρείται **βραχυπρόθεσμη** (short term)

## 2. Μακροπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών

- Οι κύριες επιστημονικές προσπάθειες μακροπρόθεσμης πρόγνωσης των σεισμών βασίζονται ουσιαστικά στην αρχή ότι σε κάθε μεγάλο ενεργό σεισμικό ρήγμα γίνονται κατ' επανάληψη ισχυροί (κύριοι) σεισμοί σύμφωνα τόσο με τη θεωρία του Reid όσο και με άλλες σχετικές θεωρίες και έννοιες (σεισμικός κύκλος, χαρακτηριστικός σεισμός).
- Οι περισσότερες και πιο πρόσφατες από τις προσπάθειες αυτές βασίζονται επιπλέον στην αρχή ότι η γένεση του επόμενου κυρίου σεισμού σε ένα ενεργό ρήγμα καθορίζεται σε ορισμένο βαθμό (π.χ. ο χρόνος γένεσής του) και από την πρόσφατη δράση γειτονικών ρηγμάτων.
- Παρουσιάζονται αρχικά δύο μοντέλα που βασίζονται στην υπόθεση ότι ο επόμενος κύριος σεισμός σε ένα ρήγμα εξαρτάται μόνο από τις τεκτονικές τάσεις που ενεργούν στο ρήγμα και από τον προηγούμενο κύριο σεισμό που έγινε στο ρήγμα. Το ένα από αυτά ονομάζεται **μοντέλο πρόγνωσης χρόνου** (time predictable model) και το άλλο **μοντέλο πρόγνωσης ολίσθησης** (slip predictable model). Στη συνέχεια αναφέρονται οι σημαντικότερες από τις επιστημονικές μεθόδους που έχουν δοκιμαστεί και ελέγχονται ακόμη για την αξιοπιστία τους στη μακροπρόθεσμη πρόγνωση των σεισμών. Αυτές είναι η μέθοδος των **προσωρινών σεισμικών κενών** (seismic gaps) και της **μεταβολής της στατικής τάσης**.

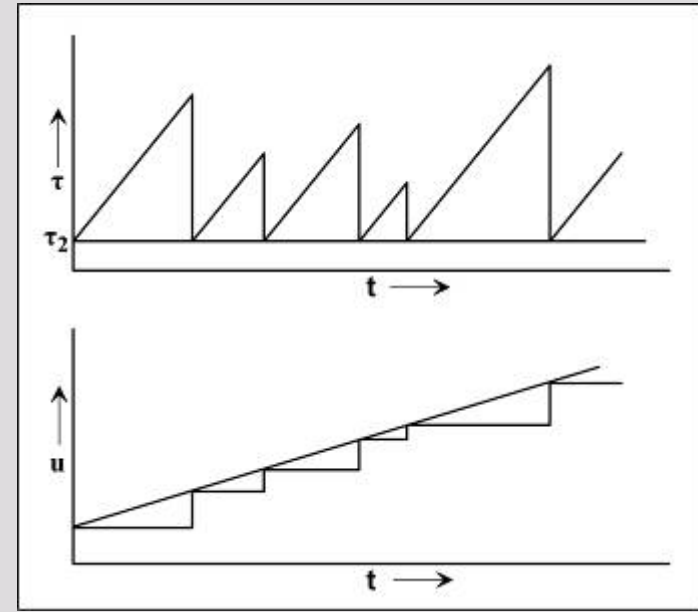
## Μακροπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών (συνέχεια)



Μοντέλο Πρόγνωσης του Χρόνου

Η χρονική μεταβολή της τάσης στο ρήγμα φθάνει ένα σταθερό ανώτερο όριο,  $\tau_1$  (πάνω) ενώ η πτώση τάσης,  $\tau_1 - \tau_2$  μεταβάλλεται από σεισμό σε σεισμό και συνεπώς η τιμή της ελάχιστης τάσης,  $\tau_2$ , δεν είναι σταθερή. Οι ελάχιστες τιμές της αθροιστικής ολίσθησης,  $u$ , βρίσκονται σε ευθεία γραμμή στο μοντέλο αυτό (κάτω) ενώ η τιμή της ολίσθησης διαφέρει από σεισμό σε σεισμό και γι' αυτό οι μέγιστες τιμές της αθροιστικής ολίσθησης μεταβάλλονται επίσης.

Ο χρόνος γένεσης ενός αναμενόμενου σεισμού μπορεί να προβλεφθεί, γιατί ο χρόνος αυτός καθορίζεται από την τιμή της ολίσθησης πάνω στο ρήγμα κατά τη γένεση του προηγούμενου σεισμού, η οποία είναι γνωστή ή μπορεί να υπολογισθεί από το γνωστό μέγεθος του προηγούμενου σεισμού.



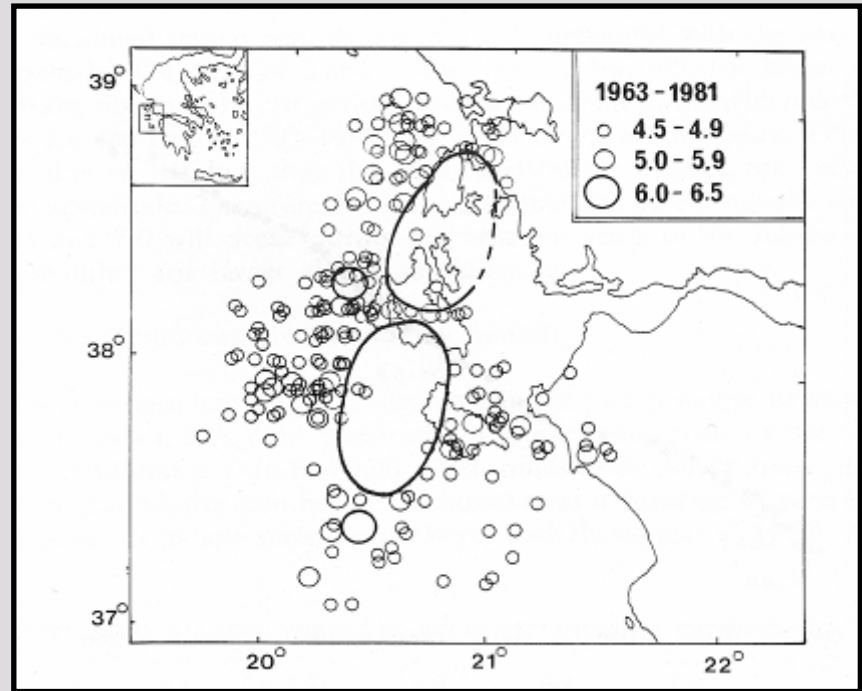
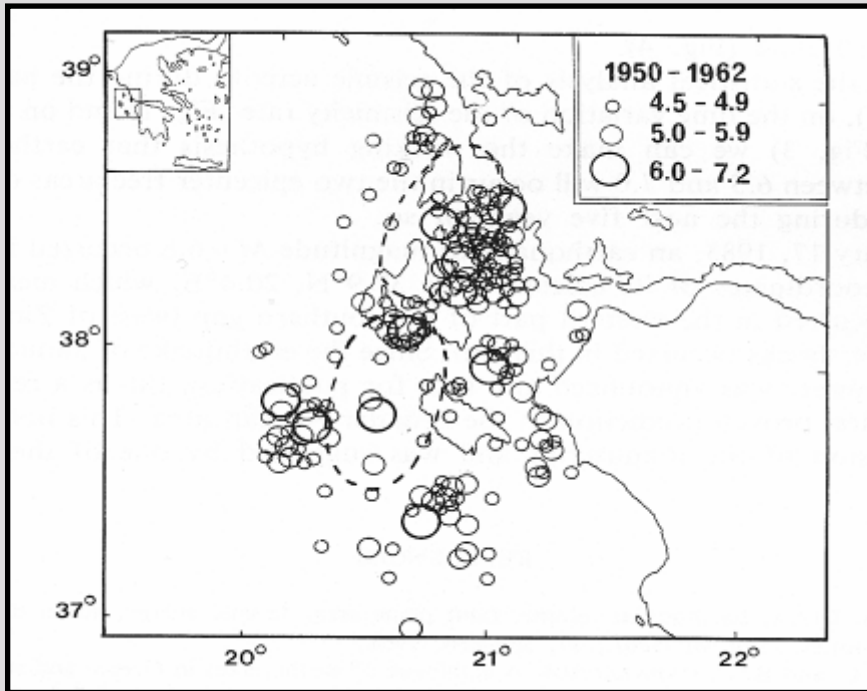
Μοντέλο Πρόγνωσης της Ολίσθησης

Το κατώτερο όριο,  $\tau_2$ , της τάσης στο μοντέλο αυτό παραμένει σταθερό αλλά το ανώτερο όριο και συνεπώς η πτώση τάσης μεταβάλλεται από σεισμό σε σεισμό (πάνω). Το ανώτερο όριο της αθροιστικής ολίσθησης στο ρήγμα βρίσκεται σε ευθεία γραμμή ενώ η χρονική μεταβολή του κατωτέρου ορίου της ολίσθησης στο ρήγμα δεν είναι γραμμική (κάτω).

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα του μοντέλου αυτού είναι ότι μπορεί να προβλεφθεί η ολίσθηση στο ρήγμα ενός αναμενόμενου σεισμού, γιατί η ολίσθηση αυτή καθορίζεται από το χρόνο που παρήλθε από το χρόνο γένεσης του προηγούμενου σεισμού.

### Προσωρινά Σεισμικά Κενά

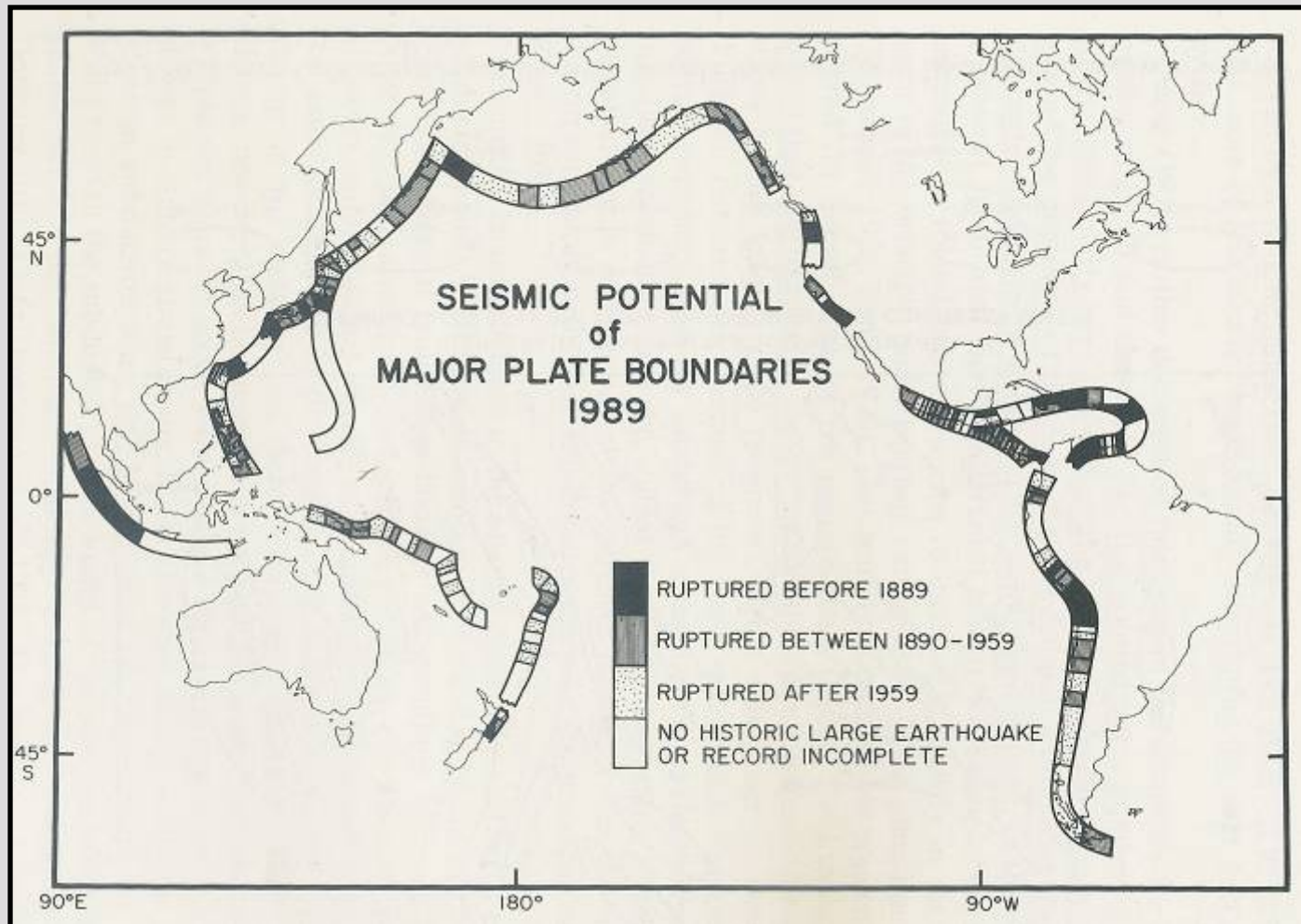
Αν εξετάσουμε προσεκτικά τις **σεισμικές ζώνες** σε ένα χάρτη επικέντρων σεισμών, οι οποίοι έγιναν σε ορισμένο χρόνο, θα παρατηρήσουμε ότι σε ορισμένες περιοχές οι ζώνες αυτές παρουσιάζουν **ασυνέχειες**. Πίστευαν παλιότερα ότι σ' αυτές τις σεισμικές ασυνέχειες δεν γίνονται σεισμοί. Δείχθηκε, όμως, ότι σε τέτοιες ασυνέχειες δεν έγιναν σεισμοί σε ορισμένο χρονικό διάστημα, που μέρος του αποτελεί το χρονικό διάστημα που καλύπτουν τα δεδομένα βάσει των οποίων έγινε ο χάρτης αλλά έγιναν στο παρελθόν σεισμοί. Προκύπτει, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι η πιθανότητα γένεσης σεισμών στο προσεχές μέλλον σ' αυτές τις προσωρινές σεισμικές ασυνέχειες είναι αυξημένη. Οι ασυνέχειες αυτές των σεισμικών ζωνών λέγονται **προσωρινά σεισμικά κενά**.



Στο αριστερό σχήμα φαίνονται τα επίκεντρα των σεισμών με μεγέθη  $M \geq 4.5$  που έγιναν στο χρονικό διάστημα 1950-1962 στην περιοχή των Ιονίων νησιών ενώ στο δεξιό σχήμα φαίνονται τα επίκεντρα των σεισμών που έγιναν στο χρονικό διάστημα 1963-1981. Στο τελευταίο αυτό διάστημα ορίσθηκαν δύο περιοχές ελλειπτικού σχήματος στις οποίες δεν έγιναν σεισμοί τέτοιων μεγεθών ενώ είχαν γίνει σ' αυτές στο προηγούμενο χρονικό διάστημα. Οι δύο αυτές περιοχές χαρακτηρίστηκαν ως σεισμικά κενά. Στο νότιο σεισμικό κενό έγινε σεισμός με μέγεθος  $M=7.0$  στις 17 Ιανουαρίου 1983 (Paradimitriou and Parazachos, 1985).

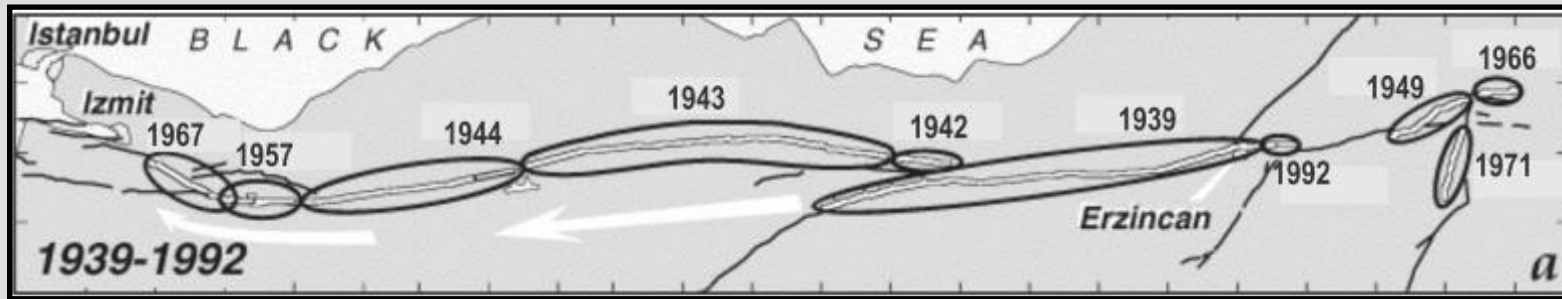
## Μακροπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών (συνέχεια)

Στο χάρτη του σχήματος φαίνονται τα σεισμικά κενά στην Περι-Ειρηνική Ζώνη, όπως αυτά αναγνωρίστηκαν το 1989 από τον Nishenko. Τα διάφορα σύμβολα αντιστοιχούν σε τμήματα των ορίων των λιθοσφαιρικών πλακών στη ζώνη αυτή με διαφορετικό «σεισμικό δυναμικό», π.χ. τα τμήματα με μαύρο χρώμα θεωρούνται ώριμα σεισμικά κενά, δηλαδή, τμήματα στα οποία αναμένονται ισχυροί σεισμοί (Scholz, 1990).



Για να θεωρηθεί μια περιοχή σεισμικής ζώνης ως προσωρινό σεισμικό κενό, εφαρμόζονται ορισμένα κριτήρια. Τα σημαντικότερα από τα κριτήρια αυτά είναι ότι στην περιοχή αυτή δεν έγινε σεισμός κατά τα τελευταία 30 χρόνια τουλάχιστον και ότι οι διαρρηξίες στη σεισμική ζώνη όπου βρίσκεται η περιοχή είναι ανάστροφες ή οριζόντιες. Όταν γίνει αναγνώριση ενός προσωρινού σεισμικού κενού, ο κατά προσέγγιση καθορισμός του χρόνου γένεσης του σεισμού επιδιώκεται με διάφορες μεθόδους.

Μια από τις μεθόδους αυτές βασίζεται στο γεγονός ότι σε ορισμένες ζώνες παρατηρήθηκε **μετανάστευση επικέντρων**, δηλαδή, συστηματική μετάθεση του σημείου διάρρηξης πάνω στη σεισμική ζώνη κατά ορισμένη κατεύθυνση. Αν, συνεπώς, παρατηρηθεί τέτοια μετάθεση πάνω στη σεισμική ζώνη με κατεύθυνση προς το σεισμικό κενό, μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι ο σεισμός θα γίνει σύντομα στο κενό, χωρίς να είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός του χρόνου γένεσης αυτού με τη μέθοδο αυτή.



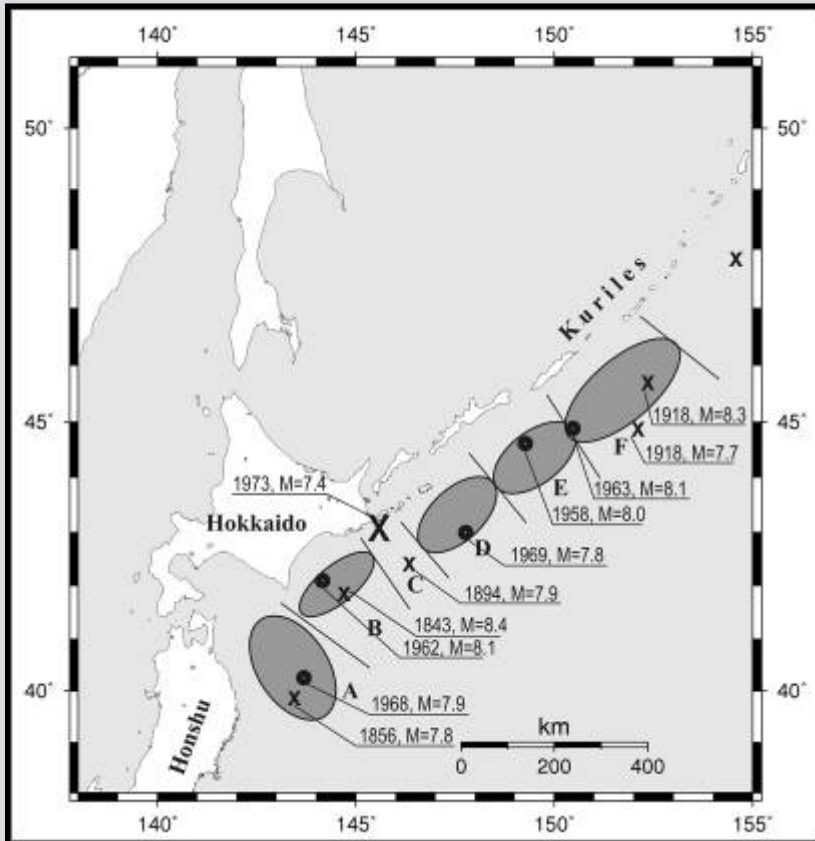
Ένα από τα γνωστότερα παραδείγματα μετανάστευσης της σεισμικής δράσης είναι αυτό της σεισμικής δράσης που παρατηρήθηκε κατά μήκος του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας, όπου παρατηρείται συχνά μετανάστευση στη γένεση ισχυρών σεισμών, κυρίως προς τα δυτικά. Έτσι, μεταξύ του 1939 και του 1967 έγιναν έξι μεγάλοι σεισμοί ( $M=7.3-8.0$ ) με σαφή μετανάστευση προς τα δυτικά. (Stein et al., 1997).

Μια άλλη μέθοδος βασίζεται στον καθορισμό της **περιόδου επανάληψης** των ισχυρών σεισμών στο προσωρινό σεισμικό κενό που παρουσιάζεται στο προηγούμενο κεφάλαιο και αφορά τον ορισμό μέτρων σεισμικότητας που καθορίζουν τη χρονική μεταβολή της σεισμικότητας των κύριων σεισμών με διάφορες μεθόδους (υπολογισμός της πιθανότητας σε ένα ρήγμα να γίνει ο επόμενος κύριος σεισμός σε χρόνο  $\Delta t$ , καθορισμός του χρόνου γένεσης του επόμενου κύριου σεισμού σε ένα ρήγμα με βάση παρατηρήσεις επιβραδυνόμενης σεισμικότητας κοντά στο ρήγμα και επιταχυνόμενης σεισμικότητας στην ευρύτερη περιοχή, κλπ.).



## Μακροπρόθεση Πρόγνωση των Σεισμών (συνέχεια)

Μια τρίτη μέθοδος καθορισμού του χρόνου γένεσης ενός μεγάλου σεισμού σε σεισμικό κενό βασίζεται στις γνώσεις που αφορούν την ταχύτητα της σχετικής κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών και την αντοχή των πετρωμάτων. Γνωρίζουμε σήμερα ότι οι ταχύτητες των σχετικών κινήσεων στις περιοχές επαφής των λιθοσφαιρικών πλακών κυμαίνονται μεταξύ 0 και 30 εκατοστών ανά έτος (0-30 cm/yr) και ότι η ανηγμένη παραμόρφωση θραύσης των πετρωμάτων είναι της τάξης του  $5 \times 10^{-5}$ . Συνεπώς, γνωρίζοντας την ταχύτητα σύγκλισης δύο λιθοσφαιρικών πλακών, μπορούμε να υπολογίσουμε το ρυθμό μεταβολής της ανηγμένης παραμόρφωσης των πετρωμάτων και επειδή γνωρίζουμε και την κρίσιμη τιμή την οποία όταν αποκτήσει η παραμόρφωση αυτή το πέτρωμα σπάει, δηλαδή, γίνεται σεισμός, μπορούμε να καθορίσουμε το χρόνο μεταξύ δύο μεγάλων σεισμών.



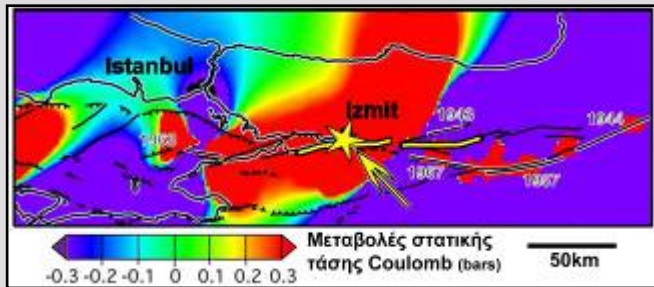
Το σχήμα παριστάνει σειρά σεισμογόνων χώρων μεγάλων σεισμών στην περιοχή των νησιών Hokkaido και νότιες Kuriles (βόρειοανατολικά της Ιαπωνίας). Η σεισμική αυτή ζώνη βρίσκεται στο όριο μεταξύ της Ειρηνικής και της Ευρασιατικής λιθοσφαιρικής πλάκας και γι' αυτό αναμένεται έντονη παραμόρφωση των πετρωμάτων του φλοιού. Ενώ, όμως, οι περιοχές A, B, D, E αποτέλεσαν εστιακούς χώρους μεγάλων σεισμών οι οποίοι έγιναν μεταξύ 1958 και 1969, στην περιοχή C δεν είχε γίνει μεγάλος σεισμός από το 1894. Για το λόγο αυτό, η περιοχή C θεωρήθηκε από Ιάπωνες σεισμολόγους ως προσωρινό σεισμικό κενό (Utsu, 1972). Η πρόβλεψη αποδείχθηκε σωστή, γιατί ένας σεισμός μεγέθους 7.4 έγινε στην περιοχή αυτή το 1973.

## Μακροπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών (συνέχεια)

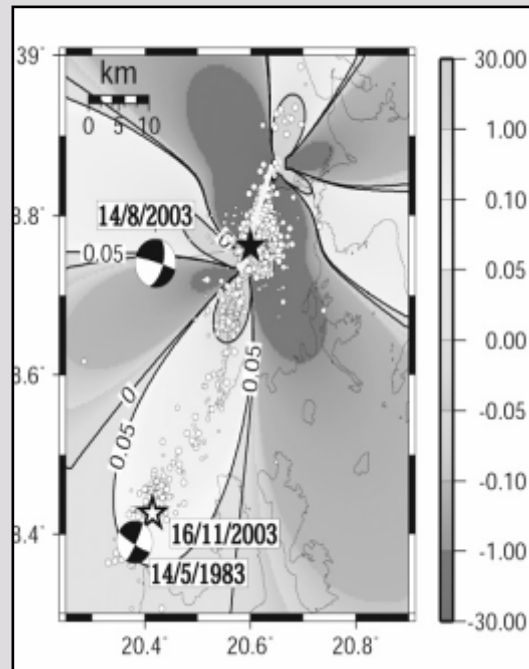
Η μέθοδος της **μεταβολής της στατικής τάσης** προέκυψε από έρευνες των τελευταίων τεσσάρων δεκαετιών. Από αυτές προκύπτει ότι η γένεση ενός ισχυρού σεισμού έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της διατμητικής και της κάθετης τάσης στα γειτονικά ρήγματα. Η μεταβολή αυτή εκτιμάται από τη μεταβολή της συνάρτησης Coulomb ( $\Delta CFF$ ), η οποία έχει ορισμένη κατανομή στο χώρο γύρω από την εστία ενός σεισμού που εξαρτάται από την ολίσθηση στην εστία του σεισμού και από τις διαστάσεις και τον προσανατολισμό του ρήγματος του και υπολογίζεται από τις σχετικές παραμέτρους της εστίας του σεισμού. Η ποσότητα  $\Delta CFF$  δίνεται σε συνάρτηση με τη μεταβολή της διατμητικής τάσης,  $\Delta\tau$ , και της κάθετης τάσης,  $\Delta\sigma$ , από τη σχέση:

$$\Delta CFF = \Delta\tau + \mu\Delta\sigma$$

όπου  $\mu$  είναι ο φαινόμενος συντελεστής τριβής (Scholz, 2002). Η τιμή της μεταβολής της τάσης Coulomb χρησιμοποιείται για να εκτιμήσουμε εάν η γένεση ενός σεισμού επισπεύδει ή επιβραδύνει τη γένεση ενός άλλου σεισμού. Εάν  $\Delta CFF > 0$ , ο πρώτος σεισμός επισπεύδει το χρόνο γένεσης του επόμενου σεισμού ενώ εάν  $\Delta CFF < 0$ , ο πρώτος σεισμός επιβραδύνει τη γένεση του δεύτερου.



Χωρική κατανομή της μεταβολής στατικής τάσης Coulomb για το χρονικό διάστημα 1912-1996 στην περιοχή του σεισμού της Νικομήδειας (Izmit, 17.8.1999,  $M=7.5$ ). Βλέπουμε ότι ο καταστρεπτικός σεισμός έγινε στο κέντρο της περιοχής μέγιστης αύξησης της στατικής τάσης (Nalbant et al., 1998, τροποποιημένο).



Μεταβολή της στατικής τάσης Coulomb (σε bars), που προέκυψε από τον κύριο σεισμό της Λευκάδας (μαύρο άστρο) της 14<sup>ης</sup> Αυγούστου 2003 ( $M=6.3$ ). Μετασεισμοί που δεν συνδέονται με το ρήγμα του σεισμού αυτού έγιναν μόνο στις περιοχές αύξησης της στατικής τάσης. Το λευκό άστρο αντιστοιχεί στο επίκεντρο του σεισμού ( $M=5.1$ ) που έγινε στις 16 Νοεμβρίου 2003 (Karakostas et al., 2004).

### 3. Μεσοπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών

Η μεσοπρόθεσμη πρόγνωση στηρίζεται στις προγνωστικές ιδιότητες ορισμένων τύπων σεισμικότητας που προκύπτουν από πλήθος αξιόπιστων σεισμολογικών παρατηρήσεων και από τη φυσική ερμηνεία αυτών των τύπων σεισμικότητας με βάση τη θεωρία του χάους. Η «**επιταχυνόμενη σεισμικότητα**» και η «**επιβραδυνόμενη σεισμικότητα**» είναι δύο από τους σημαντικότερους τέτοιους τύπους σεισμικότητας και έχουν παρουσιαστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Σε αυτούς τους τύπους σεισμικότητας βασίζεται η μέθοδος μεσοπρόθεσμης πρόγνωσης που ονομάζεται μέθοδος «**Επιβραδυνόμενης Εντός – Επιταχυνόμενης Εκτός Παραμόρφωσης**», που παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί κατά τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες έχει διαπιστωθεί ότι τόσο η συχνότητα των σεισμών ενδιάμεσου μεγέθους όσο και το μέγεθος των σεισμών αυτών σε μια ευρεία περιοχή (**κρίσιμη περιοχή**) γύρω από την εστία ενός επερχόμενου μεγάλου σεισμού (κυρίου σεισμού), αυξάνεται (επιταχύνεται) όσο πλησιάζει ο χρόνος γένεσης,  $t_c$ , του κυρίου σεισμού. Η ακτίνα,  $R$  (σε km), του ισοδύναμου κύκλου της ελλειπτικής κρίσιμης περιοχής και η διάρκεια,  $t_p$  (σε έτη), της επιταχυνόμενης προτεροσεισμικής ακολουθίας δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned}\log R &= 0.42M - 0.30 \log s_r + 1.25 & \sigma &= 0.15 \\ \log t_p &= 4.77 - 0.60 \log s_r & \sigma &= 0.10 \quad (1)\end{aligned}$$

όπου  $s_r$  (σε  $\text{Joule}^{1/2}/\text{yr} \cdot 10^4 \text{ km}^2$ ) είναι ο μακράς διάρκειας ρυθμός της σεισμικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή ανά έτος και ανά  $10000 \text{ km}^2$  και  $M$  είναι το μέγεθος του κυρίου σεισμού (Papazachos et al., 2005).

Διαπιστώθηκε, επίσης, ότι στην περιοχή του ρήγματος του αναμενόμενου κύριου σεισμού (**σεισμογόνο περιοχή**) η συχνότητα γένεσης των προτεροσεισμών και συνεπώς η σεισμική παραμόρφωση, επιβραδύνονται όσο πλησιάζει η γένεση του κύριου σεισμού. Η αντίστοιχη ακτίνα,  $a$  (σε km), του ισοδύναμου κύκλου της ελλειπτικής σεισμογόνου περιοχής και η διάρκεια,  $t_d$  (σε έτη), της επιβραδυνόμενης προτεροσεισμικής ακολουθίας δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned}\log a &= 0.23M - 0.14 \log s_d + 1.25 & \sigma &= 0.15 \\ \log t_d &= 3.00 - 0.32 \log s_d & \sigma &= 0.12 \quad (2)\end{aligned}$$

Έστω ότι σε ορισμένη περιοχή μια ακολουθία σεισμών που διερευνάται έχει πιθανότητα  $P$  να επαληθεύει τις σχέσεις (1). Τότε, για κάθε γεωγραφικό σημείο του χώρου που διερευνάται ορίζεται μια ποσότητα,  $q_a$ , που ονομάζεται «δείκτης ποιότητας», από τη σχέση:

$q_a = P/mC$ , όπου  $C$  είναι μια παράμετρος που εκφράζει το βαθμό απόκλισης από τη γραμμικότητα της χρονικής μεταβολής της σεισμικής παραμόρφωσης η οποία πραγματοποιείται στο χώρο λόγω της γένεσης των σεισμών της ακολουθίας και  $m$  ( $=0.3$ ) είναι ο εκθέτης της σχέσης της χρονικής μεταβολής της σεισμικής παραμόρφωσης που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο:  $S(t) = A + B (t_c - t)^m$ . Από στοιχεία επιταχυνόμενων προτεροσεισμικών ακολουθιών που έγιναν σε διάφορα μέρη της Γης, προκύπτει ότι:

$$C \leq 0.60, \quad P \geq 0.45, \quad m \leq 0.35, \quad q_a \geq 3.0 \quad (3)$$

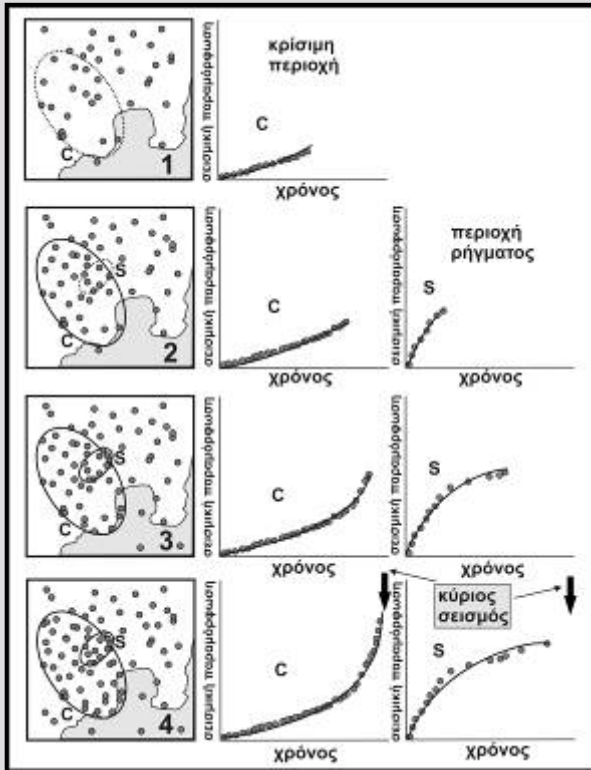
## Μεσοπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών (συνέχεια)

Το σημείο, Q, ενός υπό διερεύνηση χώρου για το οποίο ικανοποιούνται οι σχέσεις (3) και ο δείκτης ποιότητας έχει τη μεγαλύτερη τιμή, θεωρείται ως το κέντρο της κρίσιμης ελλειπτικής περιοχής. Η λύση (τιμές των παραμέτρων R,  $t_p$ , M, κλπ) που αντιστοιχεί σ' αυτό το κέντρο είναι η «βέλτιστη λύση». Το μέγεθος, M, που αντιστοιχεί στην βέλτιστη λύση είναι το μέγεθος του αναμενόμενου κύριου σεισμού με σφάλμα  $\pm 0.4$ .

Ένας άλλος «δείκτης ποιότητας»,  $q_d$ , ορίζεται από τη σχέση:  $q_d = Pm/C$ , όπου P είναι η πιθανότητα η υπό διερεύνηση ακολουθία προτεροσεισμών να επαληθεύει τις σχέσεις (2) με  $m=3.0$ . Από στοιχεία επιβραδυνόμενων προτεροσεισμικών ακολουθιών που έγιναν σε διάφορα μέρη της Γης, προκύπτει ότι:

$$C \leq 0.60, \quad P \geq 0.45, \quad 2.5 \leq m \leq 3.5, \quad q_d \geq 3.0 \quad (4)$$

Για τον καθορισμό του επικέντρου του αναμενόμενου κύριου σεισμού, όλη η κρίσιμη περιοχή χωρίζεται σε ένα αριθμό ισαπεχόντων σημείων (δίκτυο σημείων) και για κάθε σημείο ελέγχεται η ισχύς των σχέσεων (4). Ορίζονται, έτσι, όλα τα σημεία του δικτύου για τα οποία ισχύουν οι σχέσεις αυτές και εκείνο από τα σημεία αυτά για το οποίο ο δείκτης ποιότητας,  $q_d$ , έχει τη μεγαλύτερη τιμή θεωρείται ως το επίκεντρο του επερχόμενου κύριου σεισμού με σφάλμα μικρότερο των 120 km.



Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας προετοιμασίας ισχυρού κύριου σεισμού σύμφωνα με το μοντέλο της επιταχυνόμενης-επιβραδυνόμενης σεισμικής παραμόρφωσης.

Αριστερά φαίνονται χάρτες με τη χωρική κατανομή των επικέντρων των σεισμών (γκρίζοι κύκλοι) στην ευρύτερη περιοχή, στην κρίσιμη περιοχή C και στην περιοχή του ρήγματος S σε τέσσερις διαφορετικές χρονικές περιόδους, ενώ δεξιά φαίνονται γραφικές παραστάσεις της χρονικής μεταβολής της σεισμικής παραμόρφωσης, όπως αυτή υπολογίζεται από τη σχέση  $S(t) = A + B(t_c - t)^m$  τόσο για την κρίσιμη περιοχή (μεσαία στήλη) όσο και για την περιοχή του ρήγματος (δεξιά στήλη).

Στο αρχικό στάδιο της διαδικασίας η σεισμική δράση φαίνεται να επιταχύνεται λίγο σε μια περιοχή (χάρτης 1, κρίσιμη περιοχή, έλλειψη C και αντίστοιχη γραφική παράσταση). Στη συνέχεια, με την πάροδο του χρόνου (χάρτες 2, 3), η σεισμική δράση αυξάνει (επιταχύνεται) στην κρίσιμη περιοχή και επιβραδύνεται στην περιοχή του ρήγματος. Στο τελικό στάδιο (χάρτης 4) η επιτάχυνση και η επιβράδυνση στις δύο αυτές περιοχές είναι εντονότερη και το φαινόμενο κορυφώνεται με τη γένεση του κύριου σεισμού (μαύρα βέλη). Οι μαύρες καμπύλες στις γραφικές παραστάσεις προέρχονται από την προσαρμογή της σχέσης που αναφέρεται παραπάνω στα δεδομένα.

## **Μεσοπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών (συνέχεια)**

Φαίνεται ότι η μέθοδος της επιβραδυνόμενης εντός-επιταχυνόμενης εκτός σεισμικής παραμόρφωσης είναι η περισσότερο υποσχόμενη μέθοδος μεσοπρόθεσμης πρόγνωσης των σεισμών για τους ακόλουθους λόγους:

**α)** έχει δειχθεί ότι οι δύο τύποι σεισμικότητας, δηλαδή, επιταχυνόμενη σεισμική παραμόρφωση στον ευρύτερο (κρίσιμο) χώρο (ισχύς των σχέσεων 1) και επιβραδυνόμενη σεισμική παραμόρφωση (ισχύς των σχέσεων 2) στο στενότερο (σεισμογόνο) χώρο, προηγούνται ενός πολύ μεγάλου ποσοστού, αν όχι όλων, των ισχυρών κύριων σεισμών,

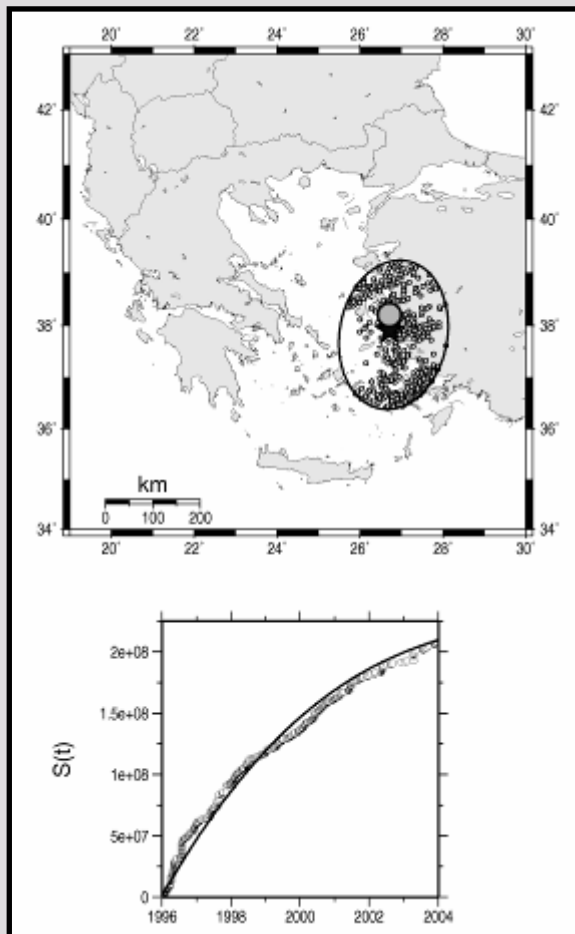
**β)** τόσο οι τρεις παράμετροι του επερχόμενου κύριου σεισμού (επίκεντρο, χρόνος γένεσης, μέγεθος) όσο και τα σφάλματα τους υπολογίζονται αριθμητικά και για το λόγο αυτό είναι δυνατός ο έλεγχος της εγκυρότητας της μεθόδου,

**γ)** απαιτεί δεδομένα σχετικά ισχυρών σεισμών ( $M > 4.0$ ) που είναι διαθέσιμα και οι παράμετροί τους (μέγεθος, συντεταγμένες epicέντρων) έχουν καθοριστεί με ικανοποιητική ακρίβεια.

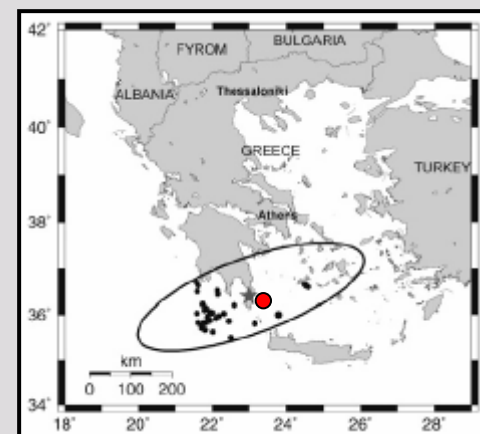
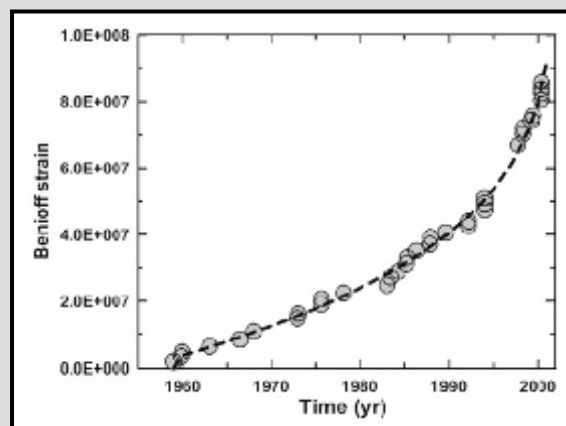
Προκύπτει, συνεπώς, ότι σε μια περιοχή που παρακολουθείται συστηματικά είναι πολύ λίγο πιθανό να γίνει ισχυρός κύριος σεισμός χωρίς να γίνει προηγουμένως αναγνώριση αυτών των δύο τύπων σεισμικότητας. Όμως, μέχρι τώρα σχετικές παρατηρήσεις έδειξαν ότι υπάρχει σημαντική πιθανότητα να παρατηρηθούν σε μια περιοχή οι δύο αυτοί τύποι σεισμικότητας χωρίς να ακολουθήσει κύριος σεισμός (false alarm).

Στη συνέχεια δίνονται δύο παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου που αφορούν κύριους σεισμούς που έγιναν πρόσφατα στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου και για τους οποίους είχαν προηγηθεί αντίστοιχες δημοσιεύσεις.

## Μεσοπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών (συνέχεια)

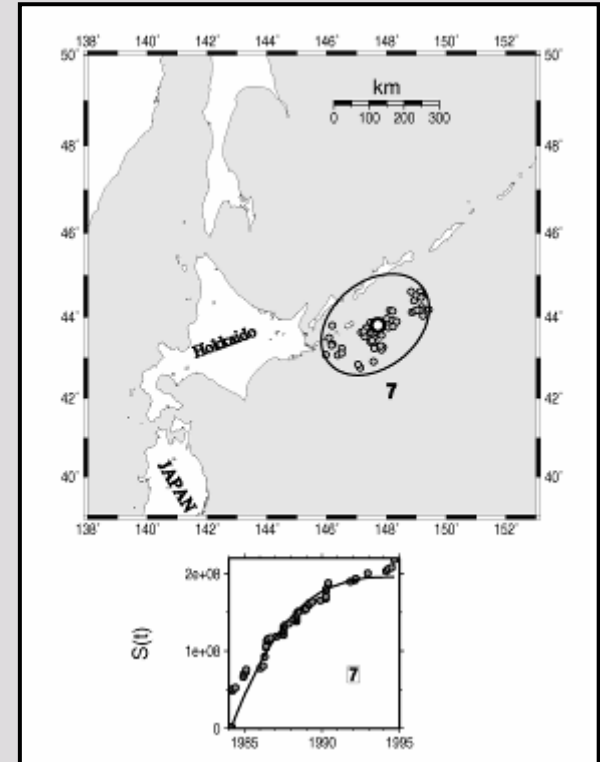
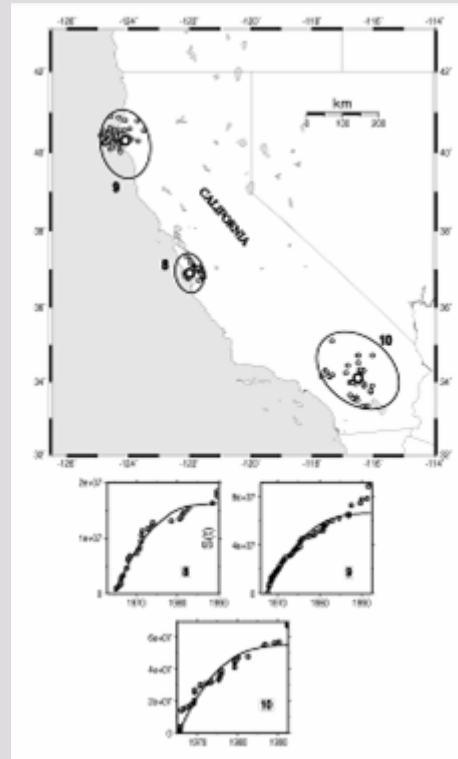
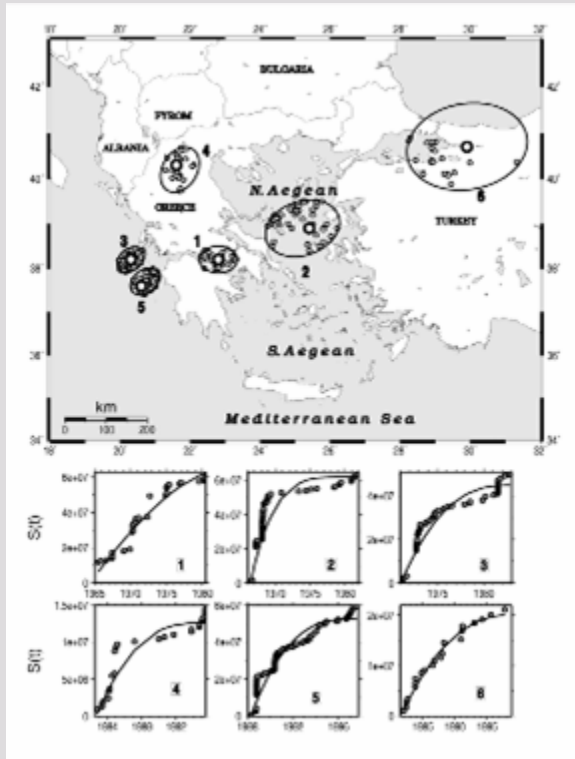


Η πρόδρομη επιβραδυνόμενη σεισμική διέγερση η οποία άρχισε το 1996 (κάτω μέρος του σχήματος) στην ελλειπτική περιοχή (πάνω μέρος του σχήματος) και κατέληξε στη γένεση των δύο ισχυρών σεισμών της 17ης Οκτωβρίου 2005 στα παράλια της Τουρκίας (γκρίζος κύκλος). Το αστέρι αντιστοιχεί στο επίκεντρο που είχε προσδιοριστεί πριν τη γένεση των δύο αυτών σεισμών (από τη σχετική μελέτη της ερευνητικής ομάδας του Εργαστηρίου Γεωφυσικής του Α.Π.Θ. τον Απρίλιο του 2005).



Η πρόδρομη επιταχυνόμενη σεισμική παραμόρφωση (αριστερά) στην κρίσιμη περιοχή του νοτιοδυτικού Αιγαίου (δεξιά) που κατέληξε στη γένεση του ισχυρού σεισμού ( $M=6.9$ ) στις 8 Ιανουαρίου 2006 (Parazachos et al., 2002). Το αστέρι αντιστοιχεί στο επίκεντρο του κύριου σεισμού που είχε προσδιοριστεί ενώ ο κόκκινος κύκλος στο επίκεντρο του σεισμού που έγινε.

## Μεσοπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών (συνέχεια)



Επιβραδυνόμενη σεισμική παραμόρφωση που παρατηρήθηκε σε σεισμογόνες περιοχές πριν από ισχυρούς σεισμούς που έχουν γίνει στο Αιγαίο (αριστερά), την Καλιφόρνια (κέντρο) και την Ιαπωνία (δεξιά). Η αναδρομική πρόγνωση των σεισμών αυτών βοήθησε στη διαμόρφωση των σχέσεων της μεθόδου της επιβραδυνόμενης εντός-επιταχυνόμενης εκτός σεισμικής παραμόρφωσης (Parazachos et al., 2005).

## 4. Βραχυπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών

Οι μέχρι τώρα προσπάθειες **βραχείας διάρκειας πρόγνωσης** των σεισμών βασίζονται στην αντίληψη ότι κατά τη διαδικασία γένεσης ενός σεισμού, του σταδίου διάρρηξης των πετρωμάτων προηγείται **προπαρασκευαστικό στάδιο** στον εστιακό (σεισμογόνο) χώρο του σεισμού. Συνέπεια των φυσικών διαδικασιών κατά το προπαρασκευαστικό στάδιο είναι η εμφάνιση **προδρόμων φαινομένων** τα οποία όχι μόνον προηγούνται του σεισμού αλλά έχουν και αιτιακή σχέση με αυτόν.

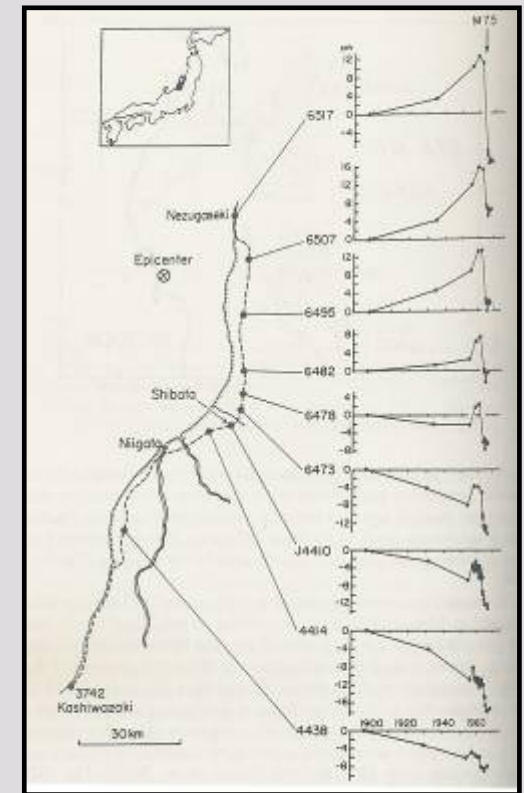
Η κύρια επιστημονική προσπάθεια επινώησης ασφαλούς και ακριβούς μεθόδου βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης των σεισμών βασίζεται στη **συνεχή** και όσο το δυνατόν **ακριβέστερη μέτρηση** διαφόρων φυσικών παραμέτρων, ώστε να καθοριστούν οι **κανονικές τιμές** των παραμέτρων αυτών και οι μεταβολές εκείνες που είναι αποτέλεσμα διαδικασιών που συμβαίνουν στους εστιακούς χώρους μεγάλων σεισμών πριν από τη γένεσή τους.

### Πρόδρομα Φαινόμενα

- παραμορφώσεις του φλοιού της Γης
- μεταβολές της σεισμικής δράσης
- μεταβολές γεωφυσικών παραμέτρων

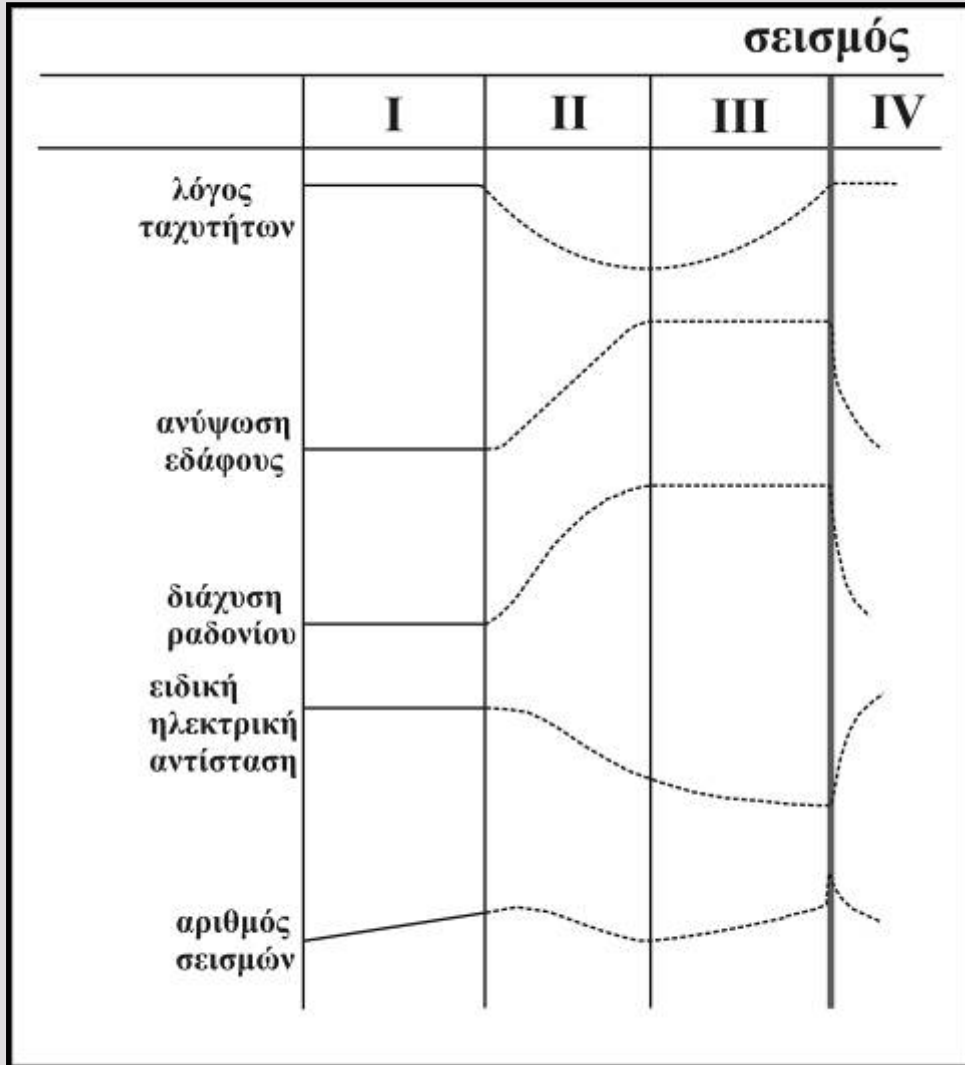
Οι **παραμορφώσεις του φλοιού** της Γης που έχουν παρατηρηθεί πριν από σεισμούς είναι: α) **επιμηκύνσεις** (ή επιβραχύνσεις) του εδάφους της τάξης του 10-6 που μετριοούνται συνεχώς με επιμηκυνσιόμετρα ή ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα με γεωδαιτικές μεθόδους, β) **κατακόρυφες** μεταβολές του εδάφους (ανυψώσεις, καθιζήσεις) της τάξης μερικών εκατοστών που έχουν προσδιορισθεί στην ξηρά με την ανάγνωση κατακόρυφου κανόνα με τηλεσκόπιο και στις ακτές με μέτρηση των μεταβολών της μέσης στάθμης της θάλασσας, γ) **μεταβολές της κλίσης** του εδάφους της τάξης του 10-5-10-6 rad/yr που μετριοούνται με κλισιόμετρα.

Στο σχήμα φαίνονται οι **κατακόρυφες μεταβολές του εδάφους** πριν από το σεισμό της Niigata στην Ιαπωνία το 1964, όπως μετρήθηκαν σε διάφορες θέσεις της περιοχής αυτής (Mogi, 1985).

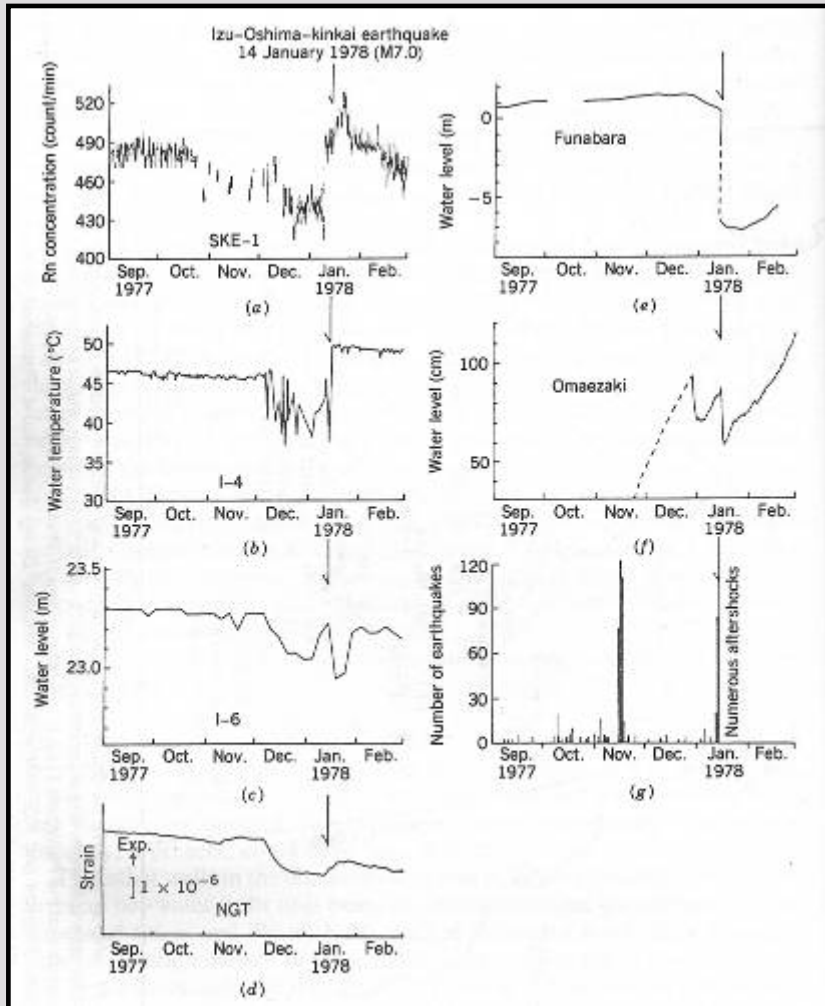




## Βραχυπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών (συνέχεια)



Η κύρια μεταβολή της σεισμικής δράσης η οποία έχει ενδιαφέρον για τη βραχυπρόθεσμη πρόγνωση των ισχυρών σεισμών είναι η γένεση των **προσεισμών**. Όμως, ο αριθμός και τα μεγέθη των προσεισμών είναι συνήθως μικρά και γι' αυτό είναι δύσκολη η διάκριση των προσεισμών από τη συνηθισμένη σεισμική δράση και η αναγνώρισή τους. Οι **μεταβολές γεωφυσικών παραμέτρων** που έχουν παρατηρηθεί πριν από σεισμούς είναι: α) ελάττωση του λόγου,  $\alpha/\beta$ , της ταχύτητας των επιμήκων κυμάτων προς την ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων μέχρι 15% της κανονικής τιμής, β) μεταβολή στο μηχανισμό γένεσης των μικρών σεισμών (αλλαγή της διεύθυνσης της συνιστώσας θλίψης), γ) μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των πετρωμάτων του εστιακού χώρου, δ) μεταβολή της περιεκτικότητας του ραδονίου στο μεταλλικό νερό και της έκλυσής του από το έδαφος κυρίως σε ρήγματα, ε) πρόδρομα ηλεκτρικά και ηλεκτρομαγνητικά σήματα που διαδίδονται κυρίως στη γη, και στ) μεταβολές της έντασης των διαφόρων γεωφυσικών πεδίων (μαγνητικού, ηλεκτρικού, βαρύτητας). Στο σχήμα δείχνεται σχηματικά η χρονική μεταβολή των πέντε από τις παραμέτρους αυτές.



**Διάφορα πρόδρομα φαινόμενα του σεισμού της Izu (14.1.1978, M=7.0) στην Ιαπωνία (Wakita et al., 1988).**

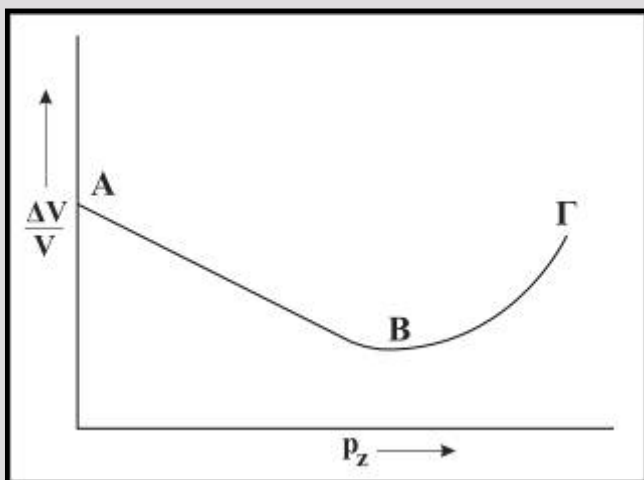
**Μακροσκοπικά πρόδρομα φαινόμενα** είναι: α) μεταβολές στο θαλάσσιο νερό (απόσυρση ή εφόρμηση της θάλασσας) που παρατηρούνται από μερικές ώρες μέχρι μερικές μέρες πριν από τους σεισμούς και οφείλονται σε προσεισμική παραμόρφωση του υποθαλάσσιου σεισμογόνου χώρου, β) πρόδρομες μεταβολές στο υπόγειο νερό (μεταβολή της στάθμης, της θερμοκρασίας κλπ) που παρατηρείται συνήθως μερικές ώρες πριν από το σεισμό, γ) πρόδρομα ακουστικά φαινόμενα (υποχθόνιος θόρυβος κλπ), που οφείλονται σε μικρούς σεισμούς (οι οποίοι δεν γίνονται αισθητοί ως εδαφική ταλάντωση) και γίνονται αισθητά μερικές μέρες πριν από το σεισμό. Πολλές φορές, όμως, ακούγονται τέτοιοι θόρυβοι χωρίς να ακολουθεί σεισμός, δ) πρόδρομα οπτικά φαινόμενα που, πιθανώς, οφείλονται σε μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου της Γης πριν από ισχυρούς σεισμούς, ε) ασυνήθιστη συμπεριφορά ζώων, που παρατηρείται 12 ώρες πριν από σεισμούς κατά μέσο όρο, και πιθανώς οφείλεται σε μικρούς σεισμούς, σε ερεθισμό των ζώων (φιδιών κλπ) από τοξικά αέρια που απελευθερώνονται στο σεισμογόνο χώρο κατά τη διάρκεια της φυσικής διαδικασίας προετοιμασίας γένεσης των σεισμών κλπ.

### Φυσική ερμηνεία των προδρόμων φαινομένων

Διάφορες προσπάθειες έγιναν για την ερμηνεία των μεταβολών που παρατηρούνται πριν από τους σεισμούς με θεωρητικά πρότυπα (μοντέλα). Από τις προσπάθειες αυτές εκείνες που βασίστηκαν σε εργαστηριακές έρευνες φαίνεται ότι σημειώνουν κάποια επιτυχία. Συνέπεια των εργαστηριακών αυτών ερευνών είναι η διατύπωση της **θεωρίας της διασταλτικότητας** (dilatancy theory).

Αν σε ορισμένο πέτρωμα (γρανίτη, κλπ) εφαρμόσουμε τάσεις συμπίεσης κατά τις διευθύνσεις ενός τρισσορθογωνίου συστήματος αξόνων και χαρτογραφήσουμε την ανηγμένη παραμόρφωση,  $\Delta V/V$ , δηλαδή το λόγο της μεταβολής του όγκου προς τον αρχικό όγκο του πετρώματος σε συνάρτηση με την τάση,  $p_z$ , κατά τη διεύθυνση της μέγιστης συμπίεσης, θα παρατηρήσουμε ότι όταν αυξάνεται η τάση, αρχικά ελαττώνεται ο όγκος, δηλαδή, το πέτρωμα συστέλλεται και η ανηγμένη παραμόρφωση είναι σχεδόν γραμμική συνάρτηση της τάσης, όπως φαίνεται στο σχήμα (τμήμα ΑΒ). Μετά, η σχέση παύει να είναι γραμμική και το πέτρωμα διαστέλλεται παρά την αύξηση της τάσης, δηλαδή, έχουμε το *φαινόμενο της διασταλτικότητας* (τμήμα ΒΓ) μέχρις ότου το πέτρωμα υποστεί θραύση (σημείο Γ).

Η διασταλτικότητα οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια αυτής, δημιουργούνται κενά στο πέτρωμα λόγω της δημιουργίας μικρορωγμών μέσα σ' αυτό. Ο μεγάλος άξονας των μικρορωγμών είναι παράλληλος προς τη διεύθυνση της μέγιστης συμπίεσης ενώ αυτές διογκώνονται κατά τη διεύθυνση της ελάχιστης συμπίεσης.



Αν υποθέσουμε ότι η διασταλτικότητα συμβαίνει και στον εστιακό χώρο πριν από τους σεισμούς, τότε οι μικρορωγμές που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια αυτής αποτελούν τις εστίες των προσεισμών. Η πλήρωση, από το άλλο μέρος, των μικρορωγμών με νερό μπορεί να ερμηνεύσει τη μεταβολή του λόγου της ταχύτητας των επιμήκων κυμάτων προς την ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων,  $\alpha/\beta$ , που παρατηρείται πριν από τη γένεση του σεισμού, γιατί η ταχύτητα των επιμήκων κυμάτων είναι περισσότερο ευαίσθητη σε μεταβολές του βαθμού διαβροχής του πετρώματος. Προσπάθειες, επίσης, καταβάλλονται για την ερμηνεία και των άλλων μεταβολών που παρατηρήθηκαν πριν από τους σεισμούς με τη θεωρία της διασταλτικότητας.

## Βραχυπρόθεσμη πρόγνωση των σεισμών με σεισμολογικά δεδομένα

🌐 Από μεγάλο αριθμό μελετών σεισμικών ακολουθιών κύριων σεισμών που έγιναν στην περιοχή του Αιγαίου προέκυψε το συμπέρασμα ότι **υπάρχει δυνατότητα ελέγχου της εξέλιξης μιας σεισμικής ακολουθίας**. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στη **μελέτη της χρονικής, χωρικής, χωροχρονικής και κατά μέγεθος κατανομής** των σεισμών μιας σεισμικής ακολουθίας και έχει ως στόχο την **προεκτίμηση** (πρόγνωση) των **ισχυρών σεισμών της ακολουθίας**.

🌐 Με τη διαδικασία αυτή μπορεί να ελεγχθεί αν μια **ακολουθία εξελίσσεται ομαλά**, αν δηλαδή πρόκειται για μια κανονική μετασεισμική ακολουθία, οπότε **δεν αναμένεται** η γένεση άλλου σεισμού με ανάλογο ή μεγαλύτερο μέγεθος από τον κύριο σεισμό που ήδη έγινε, ή αν η **ακολουθία δεν εξελίσσεται ομαλά**, οπότε **αναμένεται** σεισμός αναλόγου ή και μεγαλύτερου μεγέθους από όλους τους σεισμούς που ήδη έγιναν.

🌐 Ακόμη και στην περίπτωση ομαλής εξέλιξης μιας μετασεισμικής ακολουθίας η μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα **εντοπισμού των εστιών των μεγαλύτερων μετασεισμών** οι οποίοι πολλές φορές προκαλούν σημαντικές πρόσθετες βλάβες στα ήδη καταπονημένα από τον κύριο σεισμό κτίρια ή καταρρεύσεις τέτοιων κτιρίων. Για το σκοπό αυτό γράφτηκε από σεισμολόγους του Τομέα Γεωφυσικής του Α.Π.Θ. πρόγραμμα Η/Υ που ονομάζεται SSP (Seismic Sequence Prediction).

## Βραχυπρόθεσμη πρόγνωση των σεισμών με σεισμολογικά δεδομένα

🌍 **Μέγεθος μεγαλύτερου μετασεισμού:** από μελέτες πολλών μετασεισμικών ακολουθιών έχει βρεθεί ότι το μέγεθος,  $M_1$ , του μεγαλύτερου μετασεισμού είναι, κατά μέσο όρο, μικρότερο κατά 1.1 μονάδες μεγέθους από το μέγεθος,  $M_0$ , του κύριου σεισμού (Bath 1971, Papazachos 1974, κλπ.). Δηλαδή, είναι:  $M_0 - M_1 = 1.1$ .

🌍 Έχει δειχθεί ότι υπάρχει **πιθανότητα 42%** περίπου ένας ή περισσότεροι **προσεισμοί** με μέγεθος  $M \geq 4.4$  να προηγηθούν ενός κύριου σεισμού με μέγεθος 6.0 ή μεγαλύτερο (Papazachos, 1975).

🌍 Η **πιθανότητα γένεσης** του μεγαλύτερου μετασεισμού στο **πρώτο 24ωρο** μετά τον κύριο σεισμό είναι περίπου **53%** (Papazachos 1974, Κουρουζίδης 2003).

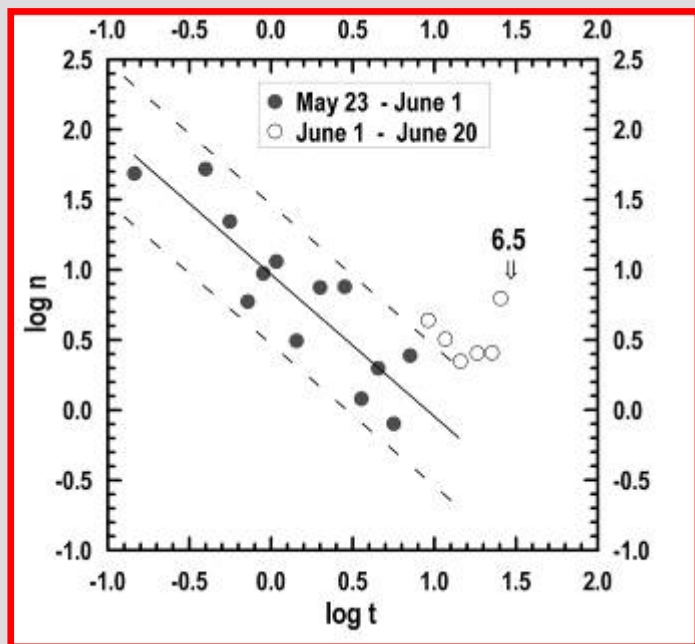
🌍 Καθορίστηκε η **διάρκεια, T** (σε μέρες), και ο **αριθμός, N**, των **μετασεισμών** με μέγεθος  $M \geq 4.0$ , σε συνάρτηση με το μέγεθος,  $M$ , του κύριου σεισμού (Παπαζάχος & Παπαζάχου, 1989, Κουρουζίδης, 2003). Δηλαδή, είναι:

$$\log T = -2.08 + 0.66M, \quad \log N = -3.22 + 0.77M$$

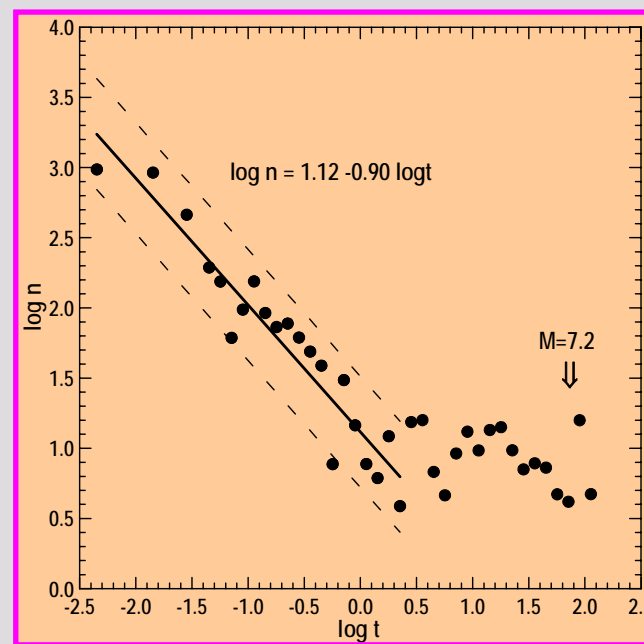
🌍 Έχει βρεθεί ότι η τιμή της **παραμέτρου b** των **προσεισμών** είναι **μικρότερη** από αυτήν των **μετασεισμών** (Papazachos et al., 1967).

## Βραχυπρόθεσμη πρόγνωση των σεισμών με σεισμολογικά δεδομένα

Έχει δειχθεί ότι οι μετασεισμοί ελαττώνονται με το χρόνο από τον κύριο σεισμό, ακολουθώντας ορισμένο νόμο δύναμης (Omori, 1894). Όταν παρατηρείται απόκλιση από την ελάττωση, τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα μη ομαλής εξέλιξης της σεισμικής ακολουθίας και ενδεχόμενη γένεση ενός ισχυρού σεισμού.

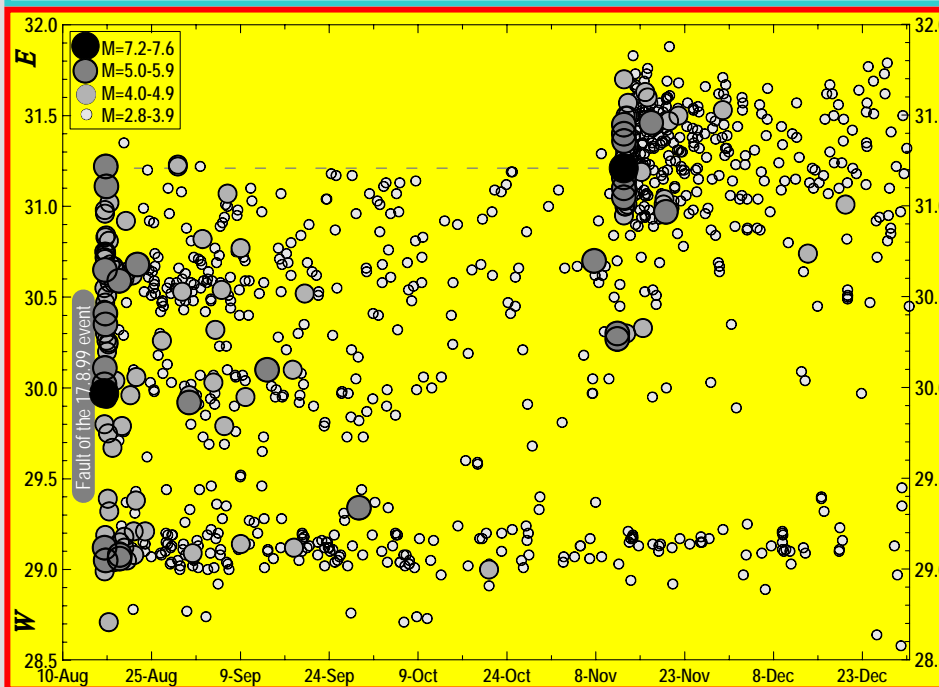
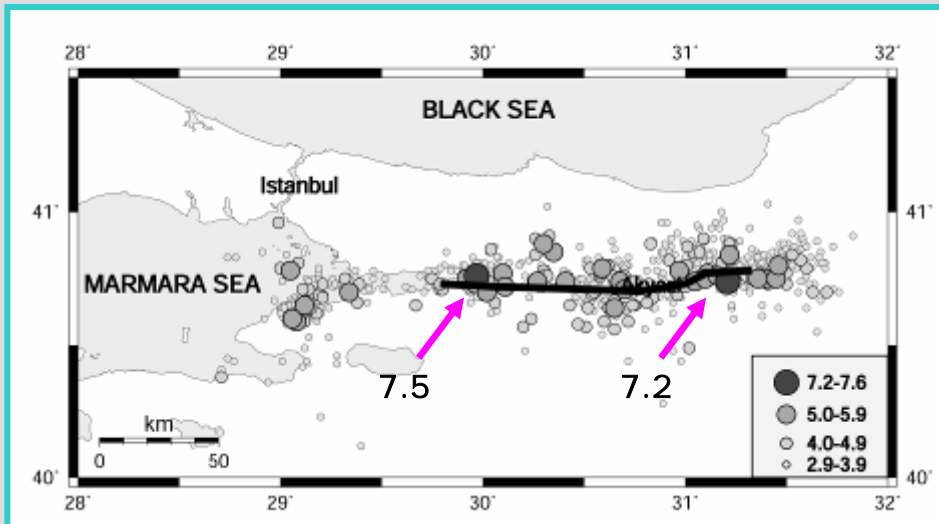


Στις 23 Μαΐου 1978 έγινε σεισμός με μέγεθος  $M=5.8$  στη Μυγδονία λεκάνη. Από τη μελέτη της χρονικής κατανομής του αριθμού των μετασεισμών του (μαύροι κύκλοι) προέκυψε ότι αυτοί δεν ελαττώνονταν ομαλά με το χρόνο (λευκοί κύκλοι). Τελικά, βρέθηκε ότι ήταν προσεισμική ακολουθία που κατέληξε στη γένεση του σεισμού της Θεσσαλονίκης (20 Ιουνίου 1978,  $M=6.5$ ). Οι διακεκομμένες γραμμές ορίζουν το διάστημα εμπιστοσύνης 95% (Parazachos et al., 1983).



Χρονική κατανομή του αριθμού των μετασεισμών του σεισμού της 17<sup>ης</sup> Αυγούστου 1999 στο Ιζμίτ της Τουρκίας ( $M=7.5$ ). Λίγες μέρες μετά από αυτόν φάνηκε ότι δεν υπήρχε μείωση του αριθμού τους με το χρόνο. Στις 12 Νοεμβρίου 1999 έγινε σεισμός με μέγεθος 7.2 στο ανατολικό άκρο της περιοχής του ρήγματος (Karakaisis, 2001).

# Βραχυπρόθεσμη πρόγνωση των σεισμών με σεισμολογικά δεδομένα

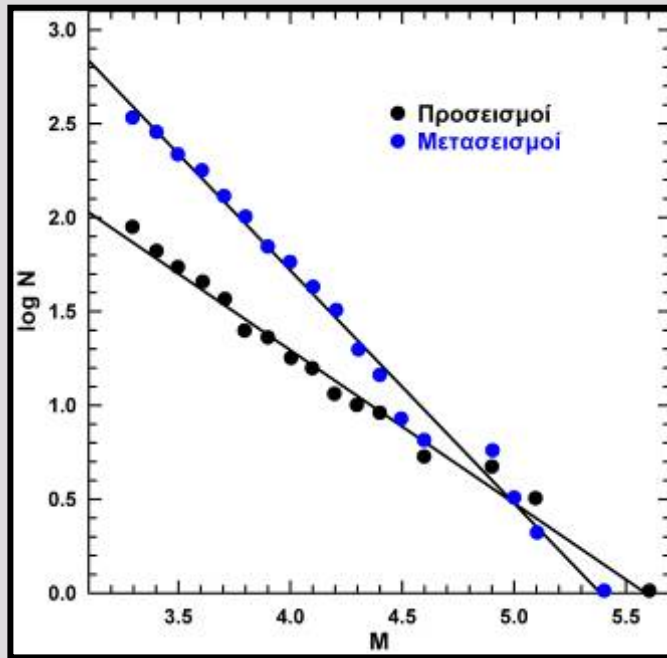


Από μελέτες της χωρικής κατανομής των εστιών των μετασεισμών σεισμικών ακολουθιών (Karakaisis et al., 1985), έχει βρεθεί ότι όταν η εστία του κύριου σεισμού βρίσκεται στο ένα άκρο του ρήγματος (μονοκατευθυντική διάρρηξη) η μετασεισμική δράση επεκτείνεται αμέσως στο άλλο άκρο του ρήγματος όπου γίνεται ο μεγαλύτερος μετασεισμός. Όταν ο κύριος σεισμός έχει την εστία του στο μέσο του ρήγματος (δικατευθυντική διάρρηξη), η μετασεισμική δράση επεκτείνεται και προς τα δύο άκρα του ρήγματος κοντά στο ένα από τα οποία γίνεται ο μεγαλύτερος μετασεισμός.

Στο πάνω σχήμα φαίνονται τα επίκεντρα των σεισμών της μετασεισμικής ακολουθίας του σεισμού του İzmit (M=7.5, 17.8.1999). Οι μετασεισμοί επεκτάθηκαν αμέσως στα δύο άκρα του ρήγματος, όπως αυτό φαίνεται στη χωροχρονική κατανομή (κάτω σχήμα).

Στις 12 Νοεμβρίου 1999 έγινε άλλος σεισμός στο Düzce, 150 km ανατολικά από τον προηγούμενο, με μέγεθος 7.2 (Karakaisis 2001).

## Βραχυπρόθεσμη πρόγνωση των σεισμών με σεισμολογικά δεδομένα



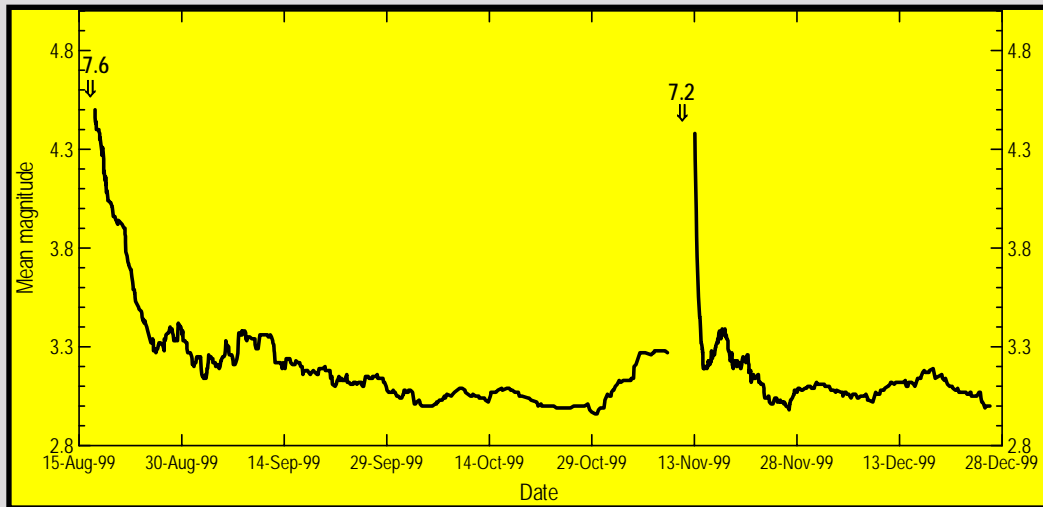
Έχει βρεθεί από παρατηρήσεις (Parazachos et al. 1967, Scholz 1968, κλπ.) ότι η τιμή της παραμέτρου  $b$  των προσεισμών είναι μικρότερη από αυτήν των μετασεισμών.

Κατανομή της αθροιστικής συχνότητας των προσεισμών (μαύροι κύκλοι) και των μετασεισμών (γαλάζιοι κύκλοι) του σεισμού που έγινε στη Μαγνησία στις 9 Ιουλίου 1980 με μέγεθος  $M=6.5$  (Parazachos et al., 1983).

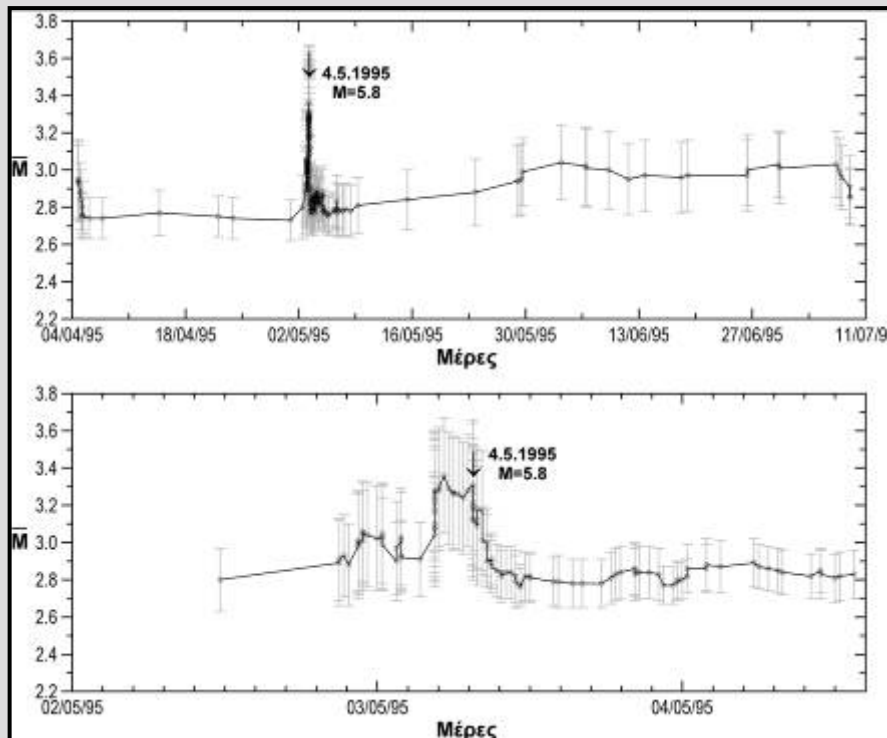
Έχει δειχθεί ότι τόσο η παράμετρος  $b$  όσο και το μέσο μέγεθος,  $M_{\mu}$  των μετασεισμών μιας μετασεισμικής ακολουθίας παραμένουν σταθερά κατά τη διάρκεια της χρονικής εξέλιξης της. Η ιδιότητα αυτή είναι εξαιρετικά χρήσιμη για τον έλεγχο της ομαλής εξέλιξης μιας μετασεισμικής ακολουθίας, γιατί σημαντική απόκλιση των παραμέτρων αυτών (ελάττωση της  $b$  και αύξηση του μέσου μεγέθους  $M_{\mu}$ ) σημαίνει ανώμαλη εξέλιξη και τη γένεση, πιθανώς, προσεισμών (για τους οποίους η  $b$  έχει μικρές τιμές και το  $M_{\mu}$  μεγάλες) οι οποίοι προμηνύουν τη γένεση ισχυρών σεισμών (Παπαζάχος & Παπαζάχου 2003).



## Βραχυπρόθεσμη πρόγνωση των σεισμών με σεισμολογικά δεδομένα



Χρονική μεταβολή του μέσου μεγέθους των μετασεισμών του κύριου σεισμού της 17.8.1999 στην Τουρκία ( $M=7.5$ ). Υπήρξε αύξηση 10 μέρες πριν το σεισμό της 12<sup>ης</sup> Νοεμβρίου (Karakaisis, 2001).



Στις 4 Απριλίου 1995 έγινε ένας σεισμός με μέγεθος 4.6 στην περιοχή της Αρναίας στη Χαλκιδική. Ο σεισμός αυτός ακολουθήθηκε από αρκετούς σεισμούς και στις 4 Μαΐου 1995 έγινε ο κύριος σεισμός της ακολουθίας, με μέγεθος  $M=5.8$ .

Μεταβολή του μέσου μεγέθους των σεισμών της ακολουθίας του κύριου σεισμού που έγινε στις 4.5.1995 ( $M=5.8$ ) στην περιοχή της Αρναίας (πάνω). Στο κάτω σχήμα φαίνεται η μεταβολή του μέσου μεγέθους 30 ώρες πριν και μετά τον κύριο σεισμό (Κουρουζίδης, 2003).

## 5. Κοινωνικές Επιπτώσεις της Πρόγνωσης των Σεισμών

Η πρόγνωση των σεισμών είναι ένα επιστημονικό πρόβλημα με σημαντικές κοινωνικές επιπτώσεις. Η κοινωνική απόκριση διαφέρει ανάλογα με το είδος της πρόγνωσης. Έτσι, η μακροπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη πρόγνωση μπορεί να επηρεάσουν προγράμματα μετριασμού των συνεπειών ενός ισχυρού σεισμού, όπως είναι η αφαίρεση επικινδυνότητων (ετοιμόρροπων κτιρίων, κλπ), η ενίσχυση ασθενών τεχνικών κατασκευών και η ετοιμότητα αντιμετώπισης εκτάκτων αναγκών. Η υπάρχουσα ήδη σχετική γνώση, κυρίως όσον αφορά τη μεσοπρόθεσμη πρόγνωση, επιτρέπει τον εστιασμό αυτών των μέτρων σε υποψήφιες περιοχές, με παράλληλη πλήρη διατήρηση των κλασσικών μέτρων ετοιμότητας (πιστή εφαρμογή του αντισεισμικού κανονισμού, κλπ).

Η βραχυπρόθεσμη πρόγνωση μπορεί να οδηγήσει στην εκκένωση κατοικημένων περιοχών και τη διακοπή λειτουργίας βιομηχανικών ή άλλων εγκαταστάσεων των οποίων η λειτουργία μπορεί να συμβάλει στην αύξηση των καταστροφών. **Δεν υπάρχει σήμερα δυνατότητα βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης** και γι' αυτό δεν λαμβάνονται τέτοια μέτρα προς το παρόν.

Οι επιστήμονες μπορούν, προφανώς, να δημοσιεύουν τις επιστημονικώς τεκμηριωμένες προγνώσεις τους σε έγκυρα διεθνή περιοδικά, γιατί αυτός είναι ο αποτελεσματικότερος τρόπος ελέγχου της αξιοπιστίας των μεθόδων πρόγνωσης. Μπορούν, επίσης, να ενημερώνουν τις αρμόδιες αρχές στις οποίες πρέπει να επισημαίνονται και οι σημαντικές αβεβαιότητες που αφορούν σήμερα ακόμα και τις μεσοπρόθεσμες προγνώσεις. Όμως, το επίπεδο της σχετικής γνώσης δεν επιτρέπει την ανακοίνωση στα μέσα ενημέρωσης προγνώσεων συγκεκριμένων μελλοντικών σεισμών από τους ίδιους τους ερευνητές, γιατί τέτοιες ανακοινώσεις μπορεί να έχουν αρνητικές κοινωνικές συνέπειες (οικονομικές, ψυχολογικές, κλπ). Συνεπώς, οι σεισμολόγοι δεν πρέπει να ενδίδουν στις ασφυκτικές πιέσεις που ασκούνται για να ανακοινώνουν ακριβείς προγνώσεις στα μέσα ενημέρωσης για ένα φαινόμενο το οποίο, από τη φύση του, παρουσιάζει σημαντικές αβεβαιότητες.