

| | | | |
|-------------------------|------|---------|--------|
| Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ. | Τομ. | σελ. | Αθήνα |
| Bull. Geol. Soc. Greece | XIX | 463-475 | 1987 |
| | Vol. | pag. | Athens |

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΠΡΟΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΣΕΙΡΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΜΕΓΑΛΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

ΓΙΑΝ. ΔΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ* & ΓΙΑΝ. ΛΑΤΟΥΣΑΚΗΣ**

Περίληψη

Έχει δειχτεί (Suyehiro 1966, Drakopoulos 1968) ότι η τιμή της παραμέτρου b της σχέσης Gutenberg-Richter είναι μικρότερη για προσεισμούς απ'ότι για μετασεισμούς ή για συνηθισμένη σεισμική δραστηριότητα. Είναι επίσης γνωστό από αποτελέσματα διαφόρων ερευνητών, ότι η τιμή του b σε σηνοσειρές είναι ακόμη μεγαλύτερη από τα αντίστοιχα b σε κανονική σεισμική δραστηριότητα ή μετασεισμούς. Κατά συνέπεια οι διαφορές στις τιμές b μεταξύ σηνοσειρών και προσεισμών αναμένεται να είναι περισσότερο σημαντικές.

Με βάση τα παραπάνω ο Drakopoulos (1978) εφάρμοσε διάφορα στατιστικά κριτήρια για προ- και μετασεισμικές σειρές της περιοχής Ευβοίας και βρήκε σ'όλες στατιστικά σημαντικές διαφορές των τιμών b (confidence level δηλαδή στάθμη εμπιστοσύνης > 85%) άν και ο αριθμός των προσεισμών δεν ήταν μεγάλος μιά και το σεισμολογικό δίκτυο δεν ήταν πυκνό στη συγκεκριμένη περιοχή.

Στη μελέτη αυτή εφαρμόστηκαν διάφορα στατιστικά κριτήρια [χ^2 - test όπως υποδείχτηκε από τον Utsu, Student's t-test όπως εφαρμόστηκε από τον Miyamura και κυρίως η μέθοδος των Lahr and Romeroy (1970) όπως βελτιώθηκε από τον Δρακόπουλο (1978)] για τρεις περιπτώσεις προ- και μετασεισμικών σειρών με μεγάλο αριθμό προσεισμών. Αυτές ήταν αντίστοιχα οι σειρές:

- 1) Κόλπος Σάρου $40,45^{\circ}\text{B}$, $26,12^{\circ}\text{A}$ 27 Μαρτ. 1975 με $M_0 = 6,5$
- 2) Θεσσαλονίκης $40,75^{\circ}\text{B}$, $23,26^{\circ}\text{A}$ 20 Ιουν. 1978 με $M_0 = 6,5$
- 3) Μαγνησίας $39,28^{\circ}\text{B}$, $23,11^{\circ}\text{A}$ 9 Ιουλ. 1980 με $M_0 = 6,5$

Σ'όλες τις περιπτώσεις και με την εφαρμογή των τριών κριτηρίων βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές με στάθμη εμπιστοσύνης > 90%.

*Καθηγ.στο Παν/μίο της Αθήνας, Τομέας Γεωφυσικής- Γεωθερμίας

**Σεισμολ.Γεωδ.Ινστ. Αστερ. Αθήνας.

Η ίδια μεθοδολογία εφαρμόστηκε για τις αντιπροσωπευτικές τιμές b των προ- και μετασεισμών του Ελληνικού χώρου ($b_{\pi} = 0,83$, $b_{\mu} = 1,13$ κατά Δρακόπουλο και $b_{\pi} = 0,67$ και $b_{\mu} = 0,92$ κατά Παπαζάχο) και βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στις τιμές των b_{π} και b_{μ} . Η εφαρμογή της μεθοδολογίας αποδεικνύεται ότι δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε περιπτώσεις σειρών με μεγάλο αριθμό προσεισμών και επομένως με πύκνωση του σεισμολογικού δικτύου της χώρας η μέθοδος θα συμβάλει πολύ στη διάκριση των προσεισμών και κατά συνέπεια στην πρόγνωση μεγάλων κυρίων σεισμών του Ελληνικού χώρου.

1. Μέθοδος έρευνας

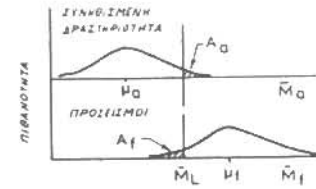
Η εξέταση διαφόρων ομάδων σεισμών που έχουν ένα μέσο μέγεθος \bar{M} μεγαλύτερο από ένα προκαθορισμένο όριο M_L μπορεί να συμβάλει στη σωστή προειδοποίηση για επικείμενο σεισμό (Lahr και Romeroy 1970). Η μελέτη των σεισμικών αυτών ομάδων μπορεί να δώσει μιά μικρή τιμή του b , της σχέσεως συχνότητας-μεγέθους σεισμών των Richter-Gutenberg, πράγμα που σημαίνει προσεισμική σεισρά. Είναι καθοριστικής σημασίας το όριο M_L να είναι τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες λανθασμένης προειδοποίησης εξαιτίας τυχαίων διακυμάνσεων ενώ συγχρόνως να μη χάνονται πραγματικές περιπτώσεις μικρών κυρίως προσεισμών.

Το σχ.1 είναι ένα σχηματικό διάγραμμα της πιθανότητας σε συνάρτηση με το μέσο μέγεθος για προσεισμούς με μέση τιμή μ_f και για συνήθη δραστηριότητα με μέση τιμή μ_a . 'Ας διαλέξουμε το όριο, \bar{M}_L τέτοιο ώστε η πιθανότητα η συνήθης δραστηριότητα να έχει \bar{M}_a μεγαλύτερη του \bar{M}_L να ισούται με την πιθανότητα να χάσουμε μιά ομάδα πραγματικών προσεισμών με \bar{M}_f μικρότερο του M_L . Αυτό είναι ισοδύναμο με την ισότητα των εμβαδών A_a και A_f του σχ.1.

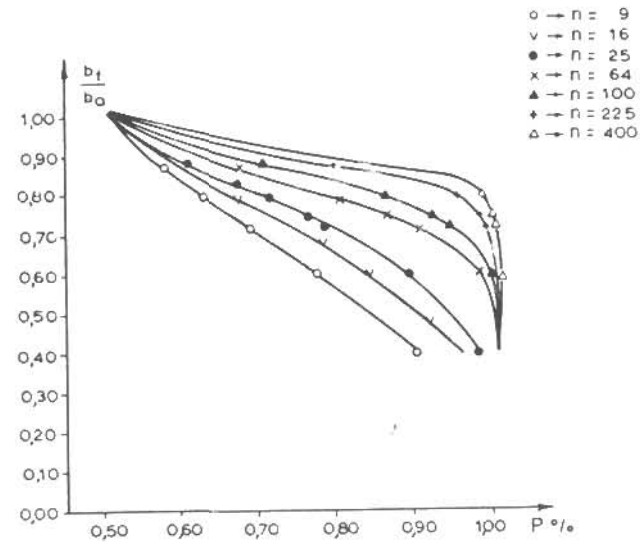
Η κατανομή της μεταβλητής:

$$z = \frac{\bar{M}_L - \mu_a}{\sigma} \quad (1)$$

είναι μιά τυποποιημένη κανονική καμπύλη, όπου σ η τυπική απόκλιση



Σχ. 1. Η πιθανότητα σε συνάρτηση με το μέσο μέγεθος για συνήθισμένη δραστηριότητα (άνω μέρος) και προσεισμούς (κάτω μέρος)



Σχ. 2. Η πιθανότητα σωστής προειδοποίησης σε συνάρτηση με τον λόγο b_f/b_a και για διαφορετικούς αριθμούς προσεισμών n .

$$z_f = -z_a \quad (2)$$

δηλαδή
$$-\frac{\bar{M}_L - \mu_f}{\sigma_f} = \frac{\bar{M}_L - \mu_a}{\sigma_a} = z_f \quad (3)$$

αλλά
$$\sigma_f = \frac{\mu_f}{\sqrt{n}}, \quad \sigma_a = \frac{\mu_a}{\sqrt{n}}$$

όπου n είναι ο αριθμός των σεισμών της ομάδας. Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην (3) έχουμε τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\bar{M}_L = \frac{2\mu_a\mu_f}{\mu_a + \mu_f} \quad (4)$$

$$-z_f = +z_a = \frac{\mu_f - \mu_a}{\mu_f + \mu_a} \sqrt{n} \quad (5)$$

Η τιμή $b_a=1$ έχει προταθεί από πολλούς μελετητές σε παγκόσμια κλίμακα για τη συνήθη δραστηριότητα και τις μετασεισμικές σειρές. Σ'αυτή την περίπτωση η (5) γίνεται:

$$z = \frac{b_f - 1}{b_f + 1} \sqrt{n} \quad (6)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (6) μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές του z για διάφορες τιμές των n και b_f με την προϋπόθεση ότι $b_a=1$. Είναι επίσης δυνατό να καθορίσουμε τις τιμές του P , δηλαδή τις πιθανότητες σωστής προειδοποίησης, για διάφορες τιμές του n και του λόγου b_f/b_a .

Στο σχ.2 δείχνεται η πιθανότητα σωστής προειδοποίησης σε συνάρτηση με τον αριθμό των σεισμών n για διάφορες τιμές του λόγου b_f/b_a . Από το σχ.2 είναι φανερό ότι με την υιοθέτηση μιάς τιμής για το b_a μπορούμε να καθορίσουμε διάφορες τιμές του αριθ-

μού των προσεισμών όπως και το αντίστοιχο b_f που θα αναγκαστεί να έχουμε ωρισμένη στάθμη σωστής προειδοποίησης (στην πραγματικότητα επισήμανσης προσεισμικής δράσης). Από το σχ.2 φαίνεται η σημασία του αριθμού των προσεισμών στο πρόβλημα της πρόγνωσης. Εξαιτίας των πιθανών εφαρμογών για την πρόγνωση σεισμών, η παραπέρα έρευνα που θα στηρίζεται σε πυκνότερο δίκτυο, είναι ουσιαστικής σημασίας για τη χώρα μας.

Με τη χρησιμοποίηση πολλών δεδομένων (σχ.3) βρέθηκε ότι για τους σεισμούς του βλληνικού χώρου ισχύει:

$$b_f \leq 0,11 + 0,65b_a \quad (7)$$

Από συνδυασμό των εξισώσεων (7) και (5) έχουμε:

$$z = \frac{0,0478 - 0,152b_f}{-0,0478 + 0,7166b_f} \sqrt{n} \quad (8)$$

που είναι ισοδύναμη με την

$$z = \frac{0,15 - 0,11\mu_f}{0,71 - 0,11\mu_f} \quad (9)$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση (8) έχουμε τον πίνακα I.

Σε λεπτομερή μελέτη προ- και μετασεισμών στην περιοχή της Ελλάδας ο Δρακόπουλος (1968), βρήκε για το b_f προσεισμών μέση τιμή $b_f = 0,83$ ενώ για το b_a μετασεισμών μέση τιμή $b_a = 1,13$. Ο Παπαζάχος αντίστοιχα βρήκε $b_f = 0,67$ και $b_a = 0,92$.

Σ'αυτές τις περιπτώσεις έχουμε αντίστοιχα:

$$i) \mu_f = \frac{0,4343}{0,83} = 0,52, \quad \mu_a = \frac{0,4343}{1,13} = 0,42, \quad z = \frac{\mu_f - \mu_a}{\mu_f + \mu_a} \sqrt{n} = 0,11\sqrt{n}$$

$$ii) \mu_f = \frac{0,4343}{0,67} = 0,65, \quad \mu_a = \frac{0,4343}{0,92} = 0,47, \quad z = \frac{\mu_f - \mu_a}{\mu_f + \mu_a} \sqrt{n} = 0,15\sqrt{n}$$

Εφαρμόσαμε αυτή τη μέθοδο για τρεις περιπτώσεις προ- και μετασεισμικών σειρών με μεγάλο σχετικά αριθμό προσεισμών.

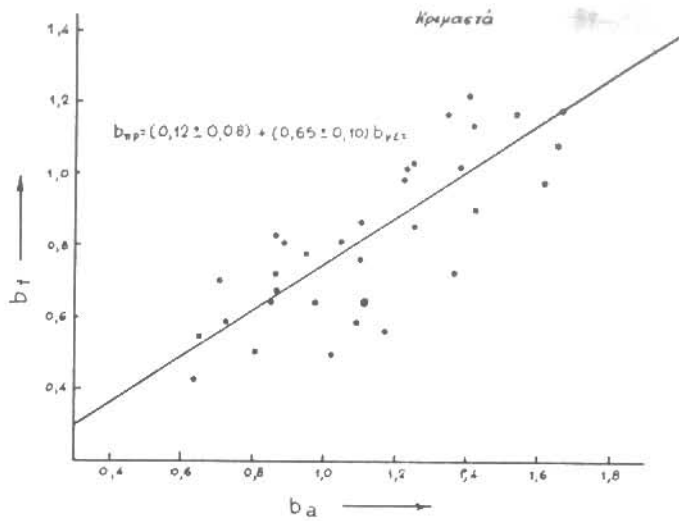
Τιμές των P και Z για διαφορετικές τιμές των n και b_f στη περίπτωση σεισμικών σειρών στην Ελλάδα όπου ισχύει η σχέση $b_f = 0,11 + 0,65 b_a$

| n | \sqrt{n} | b_f | 0,40 | 0,60 | 0,80 | 0,84 | 1,00 |
|-----|------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------|
| | | $\frac{b_f}{b_a}$ | 0,88 | 0,78 | 0,75 | 0,74 | 0,72 |
| 9 | 3 | P= 0,56 Z=-0,16 | 0,62 -0,34 | 0,66 -0,42 | 0,66 -0,43 | 0,68 -0,47 | |
| 16 | 4 | 0,58 -0,22 | 0,67 -0,45 | 0,71 -0,56 | 0,72 -0,58 | 0,73 -0,62 | |
| 25 | 5 | 0,60 -0,27 | 0,71 -0,57 | 0,76 -0,70 | 0,76 -0,72 | 0,78 -0,78 | |
| 36 | 6 | 0,63 -0,33 | 0,74 -0,68 | 0,80 -0,84 | 0,80 -0,86 | 0,83 -0,93 | |
| 49 | 7 | 0,64 -0,33 | 0,78 -0,79 | 0,84 -0,98 | 0,84 -1,01 | 0,86 -1,09 | |
| 64 | 8 | 0,67 -0,43 | 0,82 -0,91 | 0,86 -1,12 | 0,87 -1,25 | 0,90 -1,25 | |
| 81 | 9 | 0,69 -0,49 | 0,84 -1,02 | 0,89 -1,26 | 0,90 -1,29 | 0,92 -1,40 | |
| 100 | 10 | 0,70 -0,54 | 0,87 -1,14 | 0,92 -1,40 | 0,93 -1,44 | 0,94 -1,56 | |
| 225 | 15 | 0,79 -0,82 | 0,96 -1,70 | 0,98 -2,11 | 0,98 -2,16 | 0,99 -2,34 | |
| 400 | 20 | 0,86 -1,09 | 0,99 -2,27 | 1,00 -2,81 | 1,00 -2,88 | 1,00 -3,12 | |
| 900 | 30 | 0,95 -1,63 | 1,00 -3,40 | 1,00 -4,21 | 1,00 -4,31 | 1,00 -4,67 | |

Π Ι Ν Α Κ Α Σ Ι Ι

Παράμετροι των τριών σεισμικών ακολουθιών της μελέτης και αποτελέσματα της Βασικής Μεθόδου που εφαρμόστηκε.

| No | Ημερομηνία Κύριου Σεισμού | Χρόνος h : m | Γεωγρ. Συντεταγ. Μέρους Κύριου Σεισμού N ^ο E ^ο | Μέγεθος M ₀ | b _f | b _a | μ _f | μ _a | Z | Πιθανότητα P για αριθμό προσεγγισμ ^ο n |
|----|---------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------|---------------------------------------------------|
| 1 | 1975, Μαρ. 27 | 05 : 15 | 40,45 | 26,12 | 6,5 | 1,60 | 0,62 | 0,27 | -0,39√n | 0,93 για n = 22 |
| 2 | 1978, Ιουν. 20 | 20 : 03 | 40,75 | 23,26 | 6,5 | 1,70 | 0,54 | 0,26 | -0,35√n | 0,92 για n = 25 |
| 3 | 1980, Ιουλ. 9 | 02 : 11 | 39,28 | 23,11 | 6,5 | 1,35 | 0,50 | 0,32 | -0,22√n | 0,92 για n = 64 |



Σχ.3. Σχέση b_f (προσεισμών) και b_a (μετασεισμών) για σεισμικές ακολουθίες του Ελληνικού χώρου.

Ο Πίνακας II δείχνει τα αποτελέσματα για κάθε μία από τις τρεις αυτές περιπτώσεις.

Από τον πίνακα II είναι φανερό ότι και στις τρεις περιπτώσεις η πιθανότητα σωστής διάκρισης προσεισμών είναι μεγαλύτερη του 0,90. Φαίνεται επίσης από τον πίνακα η σημασία της διαφοράς $b_a - b_f$.

2. Εφαρμογή άλλων στατιστικών κριτηρίων

Ο Utsu (1966) ανέπτυξε μέθοδο για τον έλεγχο της στατιστικής σημασίας της διαφοράς των τιμών του b μεταξύ δύο ομάδων σεισμών A και B, που βασίζεται στο κριτήριο της χ^2 -κατανομής.

$$F = \frac{\chi_A^2 / \phi_A}{\chi_B^2 / \phi_B} \quad (10)$$

Αυτή η μεταβλητή ϕ βαθμούς ελευθερίας,

$$\phi_A = 2n_A \quad \text{και} \quad \phi_B = 2n_B \quad (11)$$

όπου n_A και n_B ο ολικός αριθμός σεισμών στις ομάδες A και B.

Κατά συνέπεια η

$$F = \frac{b_B b_{0A}}{b_A b_{0B}} \quad (12)$$

ακολουθεί την F κατανομή με $2n_A$ και $2n_B$ βαθμούς ελευθερίας. Η υπόθεση $b_{0A} < b_{0B}$ μπορεί να ελεγχθεί συγκρίνοντας το b_B/b_A (εδώ υποθέτουμε ότι $b_A < b_B$) με την τιμή της F που αντιστοιχεί σε $2n_A$ και $2n_B$ βαθμούς ελευθερίας σε μία δεδομένη στάθμη εμπιστοσύνης και βρίσκεται στα περισσότερα εγχειρίδια στατιστικής. Η παραπάνω μέθοδος που προτάθηκε από τον Utsu δεν απαιτεί προϋποθέσεις όπως μεγάλο αριθμό δεδομένων, κανονική κατανομή του αριθμού των σεισμών κατά κλάση μεγέθους με την ίδια διασπορά κλπ. Τα αποτελέσματα για τις τρεις περιπτώσεις φαίνονται στον πίνακα III.

Π Ι Ν Α Κ Α Σ III

Αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου του Utsu για τις τρεις συγκεκριμένες σεισμικές ακολουθίες

| a/a | b_f | b_a | n_f | n_A | b_a/b_f | F |
|-----|-------|-------|-------|-------|-----------|----------------------------|
| 1 | 0,70 | 1,60 | 22 | 62 | 2,29 | $F_{0,01}(44,124) = 2,0$ |
| 2 | 0,80 | 1,70 | 25 | 76 | 2,12 | $F_{0,01}(50,152) = 1,68$ |
| 3 | 0,87 | 1,35 | 64 | 544 | 1,55 | $F_{0,01}(128,544) = 1,36$ |

Σ'όλες τις περιπτώσεις η τιμή της $F_{0,01}$ είναι μικρότερη από τον λόγο b_a/b_f , δηλαδή η διαφορά μεταξύ b προσεισμών και μετασεισμών είναι σημαντική με στάθμη εμπιστοσύνης τουλάχιστον 95%.

Ο Miyamura (1962b) ανέπτυξε μέθοδο για να ελέγξει τη σημασία της διαφοράς των τιμών του b για προσεισμούς και μετασεισμούς με τη χρήση του κριτηρίου t-test.

Η τυπική απόκλιση στον υπολογισμό του b είναι περίπου $S_b = \pm 0,04$ οπότε :

$$1) \quad t = \frac{b_a - b_f}{S_b} = \frac{1,60 - 0,70}{0,04} = 22$$

Οι βαθμοί ελευθερίας $n = N - 2 = 3 - 2 = 1$ σύμφωνα με τους πίνακες t-test

$$P_T(t > 22) = 0,03$$

Όμοια

$$2) \quad t = \frac{b_a - b_f}{S_b} = \frac{1,70 - 0,80}{0,04} = 22$$

$$P_T(t > 22) = 0,03$$

$$3) \quad t = \frac{b_a - b_f}{S_b} = \frac{1,35 - 0,87}{0,04} = 12$$

$$P_T(t > 12) = 0,03$$

Δηλαδή και για τις τρεις περιπτώσεις η σημασία της διαφοράς $b_a - b_f$ είναι αξιόπιστη με στάθμη εμπιστοσύνης 97%.

Για τις μέσες τιμές του b προσερισμών και b μετασεισμών πούχουν βρεί ο Δρακόπουλος (0,83 και 1,13 αντίστοιχα) και ο Παπαζάχος (0,67 και 0,92 αντίστοιχα) η διαφορά είναι αξιόπιστη με στάθμη εμπιστοσύνης 95%.

3. Συμπεράσματα

Στη μελέτη αυτή εφαρμόστηκαν διάφορα στατιστικά κριτήρια χ^2 -test όπως υποδείχτηκε από τον Utsu, Student's t-test όπως εφαρμόστηκε από τον Miyamura και κύρια η μέθοδος των Laht από Romeroy (1970) όπως βελτιώθηκε από τον Δρακόπουλο (1978) για τρεις περιπτώσεις προ- και μετασεισμικών σειρών με μεγάλο αριθμό προσερισμών.

Σ'όλες τις περιπτώσεις και με την εφαρμογή των τριών κριτηρίων βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές με στάθμη εμπιστοσύνης > 90%.

Η ίδια μεθοδολογία εφαρμόστηκε για τις αντιπροσωπευτικές τιμές b των προ- και μετασεισμών του Ελληνικού χώρου ($b_f = 0,83$, $b_a = 1,13$ κατά Δρακόπουλο και $b_f = 0,67$ και $b_a = 0,92$ κατά Παπαζάχο) και βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στις τιμές των b_f και b_a . Η εφαρμογή της μεθοδολογίας αποδεικνύεται ότι δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε περιπτώσεις σειρών με μεγάλο αριθμό προσερισμών και επομένως με πύκνωση του σεισμολογικού δικτύου της χώρας η μέθοδος θα συμβάλει πολύ στη διάκριση των προσερισμών και κατά συνέπεια στην πρόγνωση μεγάλων κυρίων σεισμών στη χώρα.

Εάν λάβουμε υπ'όψη μας ότι όλοι σχεδόν οι ερευνητές στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν υπολογίσει τιμές b για σημαντικές πολύ μεγαλύτερες από τη συνήθη σεισμική δραστηριότητα ή τους μετασεισμούς τότε η διαφορά τιμών b μεταξύ σημαντικών και προσερισμών είναι περισσότερο σημαντική. Για πρακτικούς σκοπούς στην πρόγνωση αυτό φαίνεται περισσότερο ελπιδοφόρο διότι η βασική προσπάθειά μας είναι η διάκριση προσερισμών από μηνοσεισμούς και κατά συνέπεια η σημασία της εργασίας είναι προφανής.

Φυσικά με τη μεθοδολογία αυτή δεν μπορεί να καθοριστεί ο χρόνος του κύριου σεισμού ούτε και το μέγεθος του αλλά και μόνο το γεγονός ότι αναγνωρίζεται έτσι αν πρόκειται για προσεισμούς βοηθάει στην έγκαιρη προειδοποίηση μεγάλου επικείμενου σεισμού και στη λήψη ειδικών μέτρων.

Βιβλιογραφία

- Aki K. (1965).- Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits, Bull. Earth. Res. Inst. Tokyo Univ., 43, 237-239.
- Drakopoulos J. (1968).- Characteristic Parameters of Fore- and Aftershock Sequences in the Region of Greece (in Greek with English summary) Dissertation 1968, Athens Univ., pp. 1-129.
- Drakopoulos J. (1971).- A Statistical Model on the occurrence of Aftershocks in the Area of Greece, Bul. Intern. Inst. of Seism. and Earthq. Engin., 8, 17-39.
- Drakopoulos J. (1978).- Statistical Significance tests of the Difference between the b -values for groups of shocks occurred on and around Euboea Island Greece, Acad. de la Rep. Soc. de Roumanie, Geophysique, 22, 25-32.
- Lahr J. and P. Pomeroy (1970).- The Foreshock - Aftershock Sequence of the March 20 1966 Earthquake in the Republic of Congo Bull. Seism. Soc. Am., 60, 1245-1258.
- Miyamura S. (1962b).- A Note on Fennoscandian Seismicity, Geophysica, 7, 1-12.
- Mogi, K. (1962b).- Magnitude-Frequency relation for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes, Bull. Earth. Res. Inst. Tokyo Univ. 40, 831-853.
- Page R. (1968).- Aftershocks and microaftershocks of the great Alaska earthquake of 1964, Bull. Seism. Soc. Am., 58, 1131-1168.
- Papazachos B. (1975).- Foreshocks and Earthquake Prediction, Tectonophysics, 28, 213-226.
- Scholtz C. (1968).- The Frequency-magnitude relationship of microfracturing in rock and its relationship to earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., 58, 399-415.
- Suyehiro S. (1966).- Difference between aftershocks and foreshocks in the relationship of magnitude to frequency of occurrence for the great Chilean Earthquake of 1960, Bull. Seism. Soc. Am., 56, 185-200.
- Suyehiro S. and H. Sekiya (1972).- Foreshocks and Earthquake Prediction, Tectonophysics, 14, 219-225.
- Utsu T. (1965).- A method for Determining the Values of b in the formula $\log n = a - bM$ showing the Magnitude-Frequency Relation for Earthquakes, Geoph. Bull. Hokkaido Univ., 13, 99-103.
- Utsu T. (1966).- A Statistical Significance Test of the Difference in b -value between two earthquake Groups, Journ. Phys. Earth., 14, 37-40.
- Utsu T. (1967).- Some Problems of the Frequency Distribution of Earthquakes in respect to Magnitude, Geoph. Bull. Hokkaido Univ., 18, 33-69.