

Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ.	Τομ.	σελ.	Αθήνα
Bull. Geol. Soc. Greece	XIX	443-462	1987
	Vol.	pag.	Athens

## ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΩΝ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΤΟΥΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

ΓΙΑΝ. ΔΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ\*

### Εισαγωγή

Έχει δημοσιευτεί σημαντικός αριθμός μελετών για μετασεισμούς του Ελλαδικού χώρου (Parazachos et al. 1967, Drakopoulos 1968, 1971, Comninakis et al. 1968, Parazachos 1974, Drakopoulos 1978). Τα δεδομένα που έχουν δημοσιευτεί μαζί με τα πρόσφατα δεδομένα αποτελούν ένα ικανοποιητικό δείγμα 180 περιπτώσεων μετασεισμικών ακολουθιών που προσφέρονται για στατιστική επεξεργασία και μπορούν να συμβάλουν στην καλύτερη γνώση της μετασεισμικής συμπεριφοράς συγκεκριμένων κυρίων σεισμών του Ελλαδικού χώρου.

Στην εργασία αυτή καταβάλλεται προσπάθεια να εκτιμηθεί η μετασεισμική συμπεριφορά λίγο χρόνο μετά τη γένεση του κύριου σεισμού και να εκτιμηθεί καλύτερα το αναμενόμενο μέγεθος του μεγαλύτερου μετασεισμού που κυρίως συνδέεται με τον μετασεισμικό κίνδυνο και που πολλές φορές είναι εξ ίσου καταστρεπτικός με τον κύριο σεισμό που προηγήθηκε μιά και βρίσκει καταπονημένα τα κτίρια.

Επίσης καταβλήθηκε προσπάθεια να εκτιμηθεί η μετασεισμική δράση των ισχυρότερων μετασεισμών που πολλές φορές έχουν τεράστιες κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις στη σειсмоγενή χώρα μας.

Τέλος εξετάζονται οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η συνολική μετασεισμική ενέργεια και η διάρκεια της μετασεισμικής περιόδου σε ακολουθίες του Ελλαδικού χώρου.

Εκτός από το μέγεθος του κύριου σεισμού  $M_0$  πρωταρχικό ρόλο σ'όλα τα παραπάνω προβλήματα παίζει η παράμετρος  $b$  της σχέσης Gutenberg-Richter που είναι μιά από τις πιά σημαντικές παρα-

\* Καθηγ. Παν/μιο Γεωλογική Βιβλιοθήκη Θεόφρατος, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

μέτρους της σεισμολογίας και σχετίζεται με την ομοιογένεια της ύλης, την κατανομή των τάσεων και άλλες συνθήκες στην εστιακή περιοχή (Mogi 1963, Scholtz 1968) και που η χρησιμότητά της για προβλήματα σεισμικότητας και σεισμικής πρόγνωσης έχει συζητηθεί από διάφορους ερευνητές (Karnik 1969, Suyehiro 1966, Drakopoulos 1978).

### 1. Μεθοδολογία

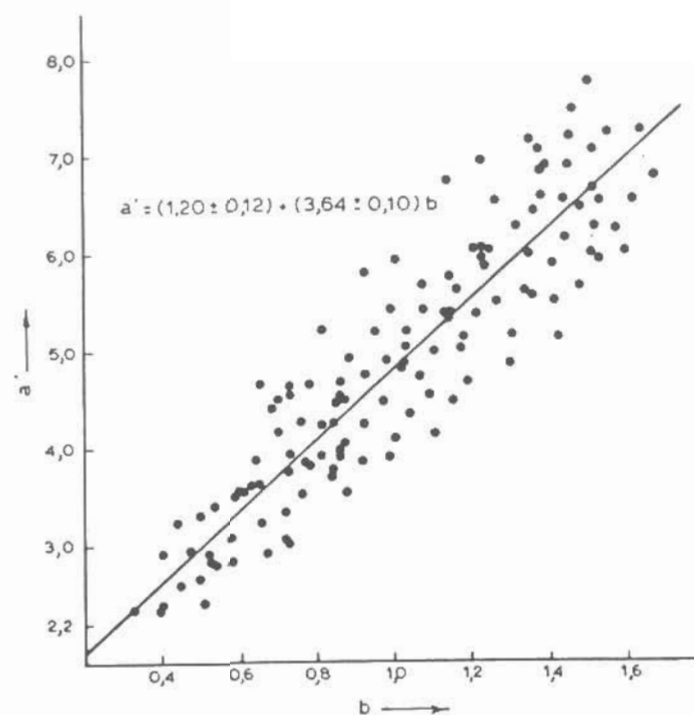
Για 140 περιπτώσεις μετασεισμικών σειρών του Ελληνικού χώρου βρέθηκε (Δρακόπουλος 1968) ότι οι παράμετροι  $a'$  και  $b$  της σχέσης  $\log N = a' - bM$  (1) συνδέονται με τό μέγεθος του κυρίου σεισμού  $M_0$  με σχέσεις της μορφής  $a' = f(b, M_0)$  (2).

Στην εργασία αυτή με την προσθήκη των νέων δεδομένων από μετασεισμικές σειρές της περιόδου 1969-1983 καταβάλλεται προσπάθεια από την μιά μεριά να βελτιωθεί η σχέση (2) και από το άλλο μέρος να ελεγχθεί η άποψη που εισηγήθηκε ο Δρακόπουλος το 1971 ότι η τιμή της παραμέτρου  $b$  δεν μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια της μετασεισμικής περιόδου.

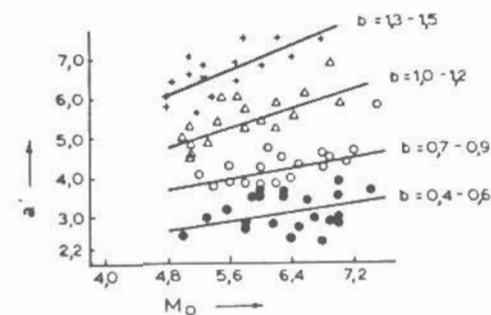
Εάν τα παραπάνω θεμελιωθούν με την χρησιμοποίηση και των πλούσιων σεισμολογικών δεδομένων της τελευταίας 15ετίας, τότε σε μετασεισμικές σειρές με μεγάλο αριθμό μετασεισμών μπορούμε να προσδιορίσουμε αξιόπιστη τιμή της παραμέτρου  $b$  συνήθως σε ώρες ή 2-3 ημέρες μετά τον κύριο σεισμό (αφού γίνουν 50-60 μετασεισμοί) χωρίς να χρειάζεται να δούμε τη συνολική εξέλιξη της μετασεισμικής δράσης.

Με γνωστά λοιπόν τα  $M_0$  (μέγεθος κυρίου σεισμού) και  $b$  και συνδυασμό των εξισώσεων (1) και (2) μπορούμε να προΐδουμε την εξέλιξη της μετασεισμικής σειράς δηλ. το πλήθος των μετασεισμών κατά τάξη μεγέθους.

Η διανομή των συντελεστών  $a'$  της σχέσεως  $\log N = a' - bM$  σε συνάρτηση με τις αντίστοιχες τιμές της παραμέτρου  $b$  για 180 μετασεισμικές ακολουθίες του Ελληνικού χώρου φαίνονται στο σχ.(1).



Σχ.1. Διανομή των συντελεστών  $a'$  της σχέσης  $\log N = a' - bM$ , σε συνάρτηση με τις αντίστοιχες τιμές του  $b$  για όλες τις μετασεισμικές σειρές του Ελληνικού χώρου.



Σχ.2. Διανομή των συντελεστών  $a'$  της σχέσης  $\log N = a' - bM$  σε συνάρτηση με το μέγεθος του κυρίου σεισμού  $M_0$  για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $b$ .

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι

Κανονικοί σεισμοί που έγιναν στον Ελληνικό χώρο από το 1914 μέχρι 1983 και είχαν αριθμό μετασεισμών με μέγεθος  $M \geq 3,0$  μεγαλύτερο του 60 και τιμή  $b$  περίπου σταθερή κατά τη διάρκεια της μετασεισμικής περιόδου.

No	Ημερομηνία	Χρόνος	Γεωγρ. Συντεταγμένες $\varphi^\circ$ $\lambda^\circ$	Περιοχή	Μέγεθος	Τιμές της παραμέτρου $b$ για διάφορα χρονικά διαστήματα				
						Μ	Α	Β	Γ	Δ
1	1914, Οκτ. 17	06 22	38 1/4, 23 1/2	Βοιωτία	6,0	1,37	1,35	1,30	1,29	1,32
2	1915, Αυγ. 11	09 11	38 1/2, 20 1/2	Λευκάδα	6,3	1,40	1,29			1,36
3	1932, Σεπ. 26	19 20	40,5 , 23,7	Χαλκιδιική	6,9	0,74	0,73	0,72		0,70
4	1953, Αυγ. 12	09 23	38,3 , 20,8	Κεφαλονιά	7,2	0,74	0,78	0,83	0,84	0,83
5	1954, Απρ. 30	13 02	39,3 , 22,2	Σοφάδες	7,0	0,97	0,96	1,03	1,01	1,00
6	1956, Ιουλ. 9	03 11	36,7 , 25,8	Κυκλάδες	7,5	0,88	0,87	0,86	0,88	0,91
7	1957, Μαρ. 8	12 21	39,3 , 22,6	Μαγνησία	6,8	0,69	0,78	0,72		0,73
8	1958, Μαρ. 29	03 00	38,4 , 22,5	Φωκίδα	5,0	0,81	0,83	0,82		0,85
9	1958, Μάιος 15	14 46	38 3/4, 22 1/4	Φθιώτιδα	4,7	1,33	1,39	1,35		1,37
10	1958, Αύγ. 27	15 16	37,4 , 20,7	Ζάκυνθος	6,5	0,72	0,74	0,73		0,76
11	1962, Ιαν. 19	19 38	38,5 , 22,1	Αιτωλία	5,4	0,88	0,87	0,82		0,86
12	1962, Απρ. 10	21 37	37,6 , 20,1	Ζάκυνθος	6,2	1,10	1,08	1,03	1,05	1,07
13	1963, Ιουλ. 5	14 21	38,9 , 23,1	Β.Εύβοια	4,9	1,06	1,04	1,08		1,03
14	1965, Μαρ. 9	17 57	39,3 , 23,8	Αλόνησος	6,3	0,52	0,55		0,53	0,56
						1,10	1,16			1,10
15	1966, Φεβ. 5	02 01	39,1 , 21,6	Κρεμαστά	6,3	1,10	1,14	1,18	1,19	1,12
16	1967, Μαρ. 4	17 58	39,1 , 24,6	Σκύρος	6,7	0,97	0,92	0,92	0,93	0,95
17	1967, Μάιος 1	07 09	39,6 , 21,2	Ηπειρος	6,4	1,39	1,37			1,34
18	1968, Φεβ. 19	22 45	39,3 , 25,0	Β.Αίγαίο	7,3	1,70	1,63			1,65
19	1968, Ιουλ. 4	21 47	37,7 , 23,2	Επίδαυρος	5,5	1,38	1,37	1,36	1,38	1,34
20	1970, Απρ. 8	13 50	38,3 , 22,6	Κορινθιακός	6,0	0,90	0,88	0,94	0,90	0,92
21	1972, Σεπ. 17	14 07	38,2 , 20,4	Κεφαλονιά	6,2	1,12	1,17	1,15	1,15	1,16
22	1974, Νοεμ. 14	13 22	38,5 , 23,1	Βοιωτία	5,4	1,04	0,97			1,01
23	1975, Μαρ. 27	05 15	40,45 , 26,1	Σάμος	6,7	1,60	1,57	1,51	1,62	1,58
24	1976, Μάιος 11	11 59	37,4 , 20,4	Ζάκυνθος	6,4	0,75	0,66	0,70	0,69	0,71
25	1980, Ιουλ. 9	02 11	39,29 , 22,91	Αλμυρός	6,5	1,30	1,38	1,26	1,40	1,35
26	1981, Φεβ. 24		38,23 , 22,97	Αλκυονίδες	6,7	0,76	0,83	0,80		0,78
27	1983, Ιαν. 17	12 41	37,97 , 20,25	Κεφαλονιά	6,6	1,10	1,19	1,11	1,12	1,15

Για τις 180 αυτές περιπτώσεις μετασεισμικών ακολουθιών του Ελληνικού χώρου βρέθηκε ότι η σχέση :

$$a^- = (1,20 \pm 0,12) + (3,64 \pm 0,10)b \quad (3)$$

συνδέει τις παραμέτρους  $a^-$  και  $b$  της σχέσεως Gutenberg-Richter

στο σχ. (2) έχουμε χαρτογραφήσει τις παραμέτρους  $a^-$  σε συνάρτηση με το μέγεθος του αντίστοιχου κυρίου σεισμού για μετασεισμικές σειρές που παρουσιάζουν την ίδια περίπου κλίση  $b$ . Είναι φανερό από το σχήμα αυτό ότι οι  $a^-$  κατανομονται σε ευθείες περίπου παράλληλες μεταξύ τους.

Η σχέση:

$$a^- = (3,65 \pm 0,10)b + (0,49 \pm 0,04)M_0 - (1,46 \pm 0,12) \quad (4)$$

ικανοποιεί τα μέχρι σήμερα δεδομένα από σεισμικές ακολουθίες του Ελληνικού χώρου.

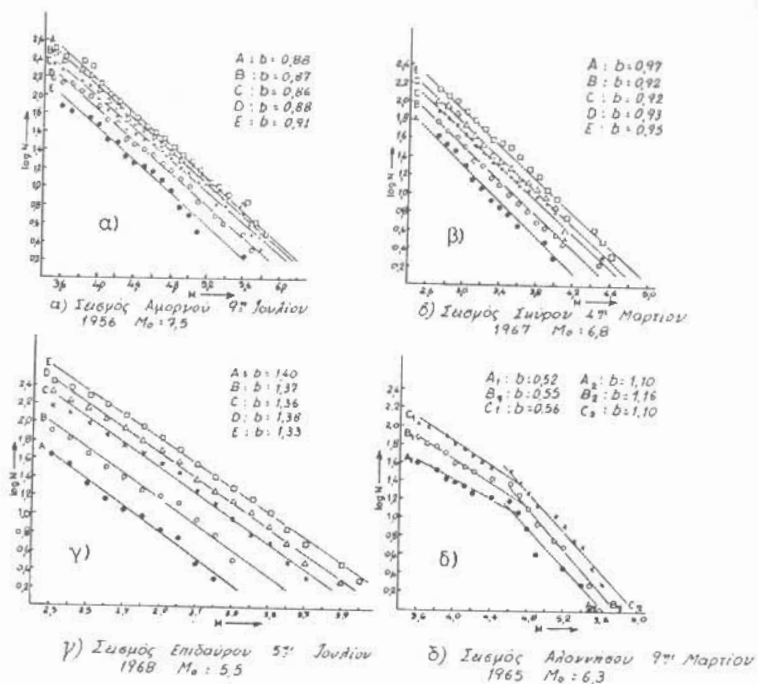
Στο σχήμα (3) παρουσιάζεται η κατανομή κατά μέγεθος του πλήθους των μετασεισμών σε ωρισμένες σεισμικές ακολουθίες που έγιναν στον Ελλαδικό χώρο. Σε κάθε μετασεισμική ακολουθία τα σεισμικά μεγέθη κατανομονται σύμφωνα με τη γνωστή σχέση των Gutenberg-Richter.

$$\log N(M) = a^- - bM$$

Τό  $N(M)$  είναι η συσσωρευτική συχνότητα δηλ. ο αριθμός των μετασεισμών με μέγεθος μεγαλύτερο ή ίσο του  $M$  και  $a^-$  και  $b$  παράμετροι που η φυσική τους σημασία έχει συζητηθεί σε πολλές μελέτες.

Στο σχήμα (3) τα γράμματα Α, Β, Γ, Δ και Ε αντιστοιχούν σε διάφορα χρονικά διαστήματα. Είναι φανερό από το σχ. (3) ότι σ'όλες τις περιπτώσεις οι ευθείες Α, Β, Γ, Δ και Ε που καθορίστηκαν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είναι μεταξύ τους σχεδόν παράλληλες.

Οι τιμές της παραμέτρου  $b$  που φαίνεται να μη μεταβάλλεται σημαντικά στη διάρκεια της μετασεισμικής περιόδου έχουν καταχωριστεί για κάθε περίπτωση στον πίνακα Ι. Μεταβολή του  $b$  βρέθηκε σε πολύ λίγες περιπτώσεις και μπορεί να εξηγηθεί με την κατακόρυφη συστηματική μετανάστευση των μετασεισμών σε συνάρτηση με το χρόνο.



Σχ. 3. Κατανομή κατά μέγεθος του πλήθους των μετασεισμών σε ωρισμένες χρονικές περιόδους κατά τη διάρκεια εξέλιξης της μετασεισμικής ακολουθίας

Επομένως σ' αυτές τις λίγες περιπτώσεις όπου το  $b$  μεταβάλλεται ουσιαστικά κατά τη διάρκεια της μετασεισμικής περιόδου η μεθοδολογία αυτή δεν πρέπει να εφαρμόζεται. Κλασική περίπτωση αυτού του τύπου είναι η μετασεισμική ακολουθία του σεισμού της 20ης Ιουν. 1978 για την οποία οι Παπαζάχος και συνεργάτες του βρήκαν τιμές της παραμέτρου  $b$  από 0,9 μέχρι 1,7.

## 2. Στατιστικό Πρότυπο

Με βάση την παραπάνω μεθοδολογία προτείνεται ένα βελτιωμένο στατιστικό πρότυπο για τον Ελλαδικό χώρο που μας επιτρέπει να προγνώσουμε την εξέλιξη της μετασεισμικής δράσεως για κάθε περίπτωση.

Στον πίνακα II έχει υπολογιστεί το πλήθος των μετασεισμών κατά τάξη μεγέθους για συγκεκριμένα μεγέθη κανονικών κυρίων σεισμών  $M_0$  και συγκεκριμένες τιμές της παραμέτρου  $b$  με βάση την παραπάνω μεθοδολογία. Σύγκριση του αριθμού των μετασεισμών για διάφορες τάξεις μεγέθους που παρατηρήθηκαν σε 42 περιπτώσεις μετασεισμικών σειρών στον Ελληνικό χώρο με τις αντίστοιχες τιμές που προβλέπονται από το στατιστικό πρότυπο δίνει καλή συμφωνία (βλέπε πίνακα III).

Υπάρχουν όμως χαρακτηριστικές περιπτώσεις μετασεισμικών ακολουθιών στις οποίες παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ του αριθμού των μετασεισμών που έγιναν πάνω από ωρισμένο μέγεθος και του αντίστοιχου αριθμού που υπολογίστηκαν με βάση το προτεινόμενο στατιστικό πρότυπο.

Ο πραγματικός αριθμός των μετασεισμών είναι μεγαλύτερος από αυτόν που εκτιμάται με βάση την μεθοδολογία που προτάθηκε, στις περιπτώσεις που έχουμε πολλούς μετασεισμούς δεύτερης τάξης, κυρίως από την δράση που ακολουθεί τον μεταγενέστερο μεγαλύτερο μετασεισμό με κλασικό παράδειγμα την μετασεισμική δράση του 1983 στην Κεφαλονιά. Επίσης η ίδια εικόνα παρατηρείται σε περιπτώσεις διδύμων κυρίων σεισμών με τυπικό παράδειγμα το σεισμό της 20ης Ιουν. 1978 στη Θεσ/κη.

Π Ι Ν Α Κ Α Σ Ι Ι

Κατά προσέγγιση αριθμός μετασεισμών πάνω από ωρισμένο μέγεθος  $M$  που αναμένεται να ακολουθήσουν κανονικό κύριο σεισμό με μέγεθος  $M_0$  και για συγκεκριμένες τιμές της παραμέτρου  $b$ .

Με Μεγέθη  $M \geq 2,0$

$M_0 \backslash b$	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
5,0	70	160	350	750	1500
5,5	130	280	600	1300	2700
6,0	220	500	1000	2250	4700
6,5	380	850	1800	3500	8200
7,0	680	1500	3000	6500	14000
7,5	1000	2500	5500	1500	24000

Με Μεγέθη  $M \geq 3,0$

$M_0 \backslash b$	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
5,0	18	25	35	45	60
5,5	35	45	60	80	110
6,0	50	80	100	140	190
6,5	95	140	180	240	320
7,0	175	240	310	420	570
7,5	300	400	560	730	1000

Με Μεγέθη  $M \geq 4,0$

$M_0 \backslash b$	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
5,0	4	4	4	3	3
5,5	8	7	6	5	4
6,0	14	13	10	9	8
6,5	24	22	18	15	16
7,0	43	38	30	25	22
7,5	75	60	55	45	40

Με μεγέθη  $M \geq 5,0$

$M_0 \backslash b$	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
6,0	3	2	1	0	0
6,5	6	3	2	1	0
7,0	10	6	3	2	1
7,5	17	10	5	3	2

Μέγεθος του μεγαλύτερου μετασεισμού

$M_0 \backslash b$	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
5,0	4,7	4,6	4,5	4,4	4,3
5,5	5,2	5,0	4,9	4,7	4,5
6,0	5,6	5,3	5,1	4,9	4,7
6,5	6,1	5,8	5,4	5,2	5,0
7,0	6,5	6,1	5,7	5,4	5,2
7,5	7,0	6,4	5,9	5,5	5,3

Π Ι Ν Α Κ Α Σ ΙΙΙ

Εύγκριση του αριθμού των μετασεισμών που έγιναν και του αριθμού που υπολογίζεται με βάση το προτεινόμενο στατιστικό πρότυπο σε ωρισμένες σεισμικές ακολουθίες.

No	Ημερομηνία	Χρόνος	Περιοχή	Μέγεθος $M_0$	b	Αριθμός Μετασεισμών που έγιναν	Αριθμός Μετασεισμών που αναμένονται με βάση το στατιστικό πρότυπο
1	24. 1.1912	16 23	Κεφαλονιά	6,8	0,65	49 με $M \geq 4,0$	40 με $M \geq 4,0$
2	23.11.1914	14 39	Λευκάδα	6,2	1,14	10 " $M \geq 4,0$	10 " $M \geq 4,0$
3	27. 1.1915	01 09	Ιθάκη	6,2	0,87	11 " $M \geq 4,0$	8 " $M \geq 4,0$
4	18. 3.1926	14 06	ΝΑ Ρόδου	6,9	1,22	9 " $M \geq 5,0$	11 " $M \geq 5,0$
5	19. 9.1926	01 03	Ν.Μεσσηνίας	6,2	0,77	9 " $M \geq 4,0$	13 " $M \geq 4,0$
6	26. 9.1932	19 20	Χαλκιδική	6,9	0,70	46 " $M \geq 4,0$	40 " $M \geq 4,0$
7	1. 3.1941	03 52	Λάρισα	6,3	0,61	17 " $M \geq 4,0$	20 " $M \geq 4,0$
8	27. 5.1944	07 28	Δωδεκάνησος	6,2	1,03	7 " $M \geq 4,3$	9 " $M \geq 4,3$
9	9. 2.1948	12 58	Κάρπαθος	7,1	0,68	13 " $M \geq 5,0$	11 " $M \geq 5,0$
10	22. 4.1948	10 42	Λευκάδα	6,4	0,73	14 " $M \geq 4,0$	21 " $M \geq 4,0$
11	23. 7.1949	15 03	Οινούσες	6,8	0,81	12 " $M \geq 4,0$	20 " $M \geq 4,0$
12	18. 3.1953	19 06	ΒΔ Τουρκία	7,2	0,78	21 " $M \geq 4,1$	25 " $M \geq 4,1$
13	2. 5.1953	18 37	Λέσβος	6,0	0,84	9 " $M \geq 4,1$	10 " $M \geq 4,1$
14	30. 4.1954	13 02	Σοφάδες	7,1	1,00	53 " $M \geq 4,0$	42 " $M \geq 4,0$
15	3. 8.1954	18 18	Λήμνος	6,1	0,86	21 " $M \geq 4,0$	15 " $M \geq 4,0$
16	19. 4.1954	16 47	Μαγνησία	6,3	0,63	14 " $M \geq 4,0$	18 " $M \geq 4,0$
17	16. 7.1955	07 07	Σάμος	6,8	1,45	27 " $M \geq 4,0$	20 " $M \geq 4,0$
18	9. 7.1956	03 11	Αμοργός	7,5	0,92	14 " $M \geq 5,0$	9 " $M \geq 5,0$
19	30. 7.1956	09 54	ΒΑ Κρήτη	6,0	0,65	15 " $M \geq 4,0$	14 " $M \geq 4,0$
20	9. 2.1957	07 43	Μεσσηνία	6,0	1,14	8 " $M \geq 4,0$	9 " $M \geq 4,0$
21	8. 3.1957	12 21	Μαγνησία	6,8	0,73	40 " $M \geq 4,0$	32 " $M \geq 4,0$
22	25. 4.1957	2 45	Α Ρόδου	7,2	0,59	6 " $M \geq 5,0$	13 " $M \geq 5,0$
23	18.10.1957	01 51	Αιτωλία	5,1	0,87	8 " $M \geq 4,0$	6 " $M \geq 4,0$
24	9.11.1957	23 56	Καρινθιακός	5,2	0,58	6 " $M \geq 4,0$	6 " $M \geq 4,0$
25	2. 1.1958	02 08	Λακωνία	5,7	1,22	9 " $M \geq 4,1$	7 " $M \geq 4,1$
26	16. 1.1958	04 18	Λήμνος	5,9	1,48	18 " $M \geq 4,0$	13 " $M \geq 4,0$
27	29. 3.1958	03 01	Φωκίδα	5,0	0,88	30 " $M \geq 3,5$	21 " $M \geq 3,5$
28	17. 7.1958	05 37	Θεο/κη	5,7	1,35	14 " $M \geq 3,9$	11 " $M \geq 3,9$
29	15.11.1958	05 43	Κ.Πελ/σος	5,6	0,80	14 " $M \geq 3,6$	10 " $M \geq 3,6$
30	23. 2.1960	07 35	Αμβρακικός	5,4	1,33	29 " $M \geq 3,4$	35 " $M \geq 3,4$

No	Ημερομηνία	Χρόνος	Περιοχή	Μέγεθος $M_0$	b	Αριθμός Μετασεισμών που έγιναν	Αριθμός Μετασεισμών που αναμένονται με βάση το στατιστικό πρότυπο
31	20. 2.1961	21 47	Δωδεκάνησος	5,7	0,75	28 με $M \geq 3,9$	24 με $M \geq 3,9$
32	19. 1.1962	19 38	Αιτωλία	5,4	0,86	42 " $M \geq 3,4$	34 " $M \geq 3,4$
33	4.10.1962	19 46	Κορινθία	5,3	1,53	29 " $M \geq 3,4$	34 " $M \geq 3,4$
34	9. 3.1965	17 58	Αλόνησος	6,4	0,65	60 " $M \geq 3,6$	55 " $M \geq 3,6$
35	5. 4.1965	03 13	Μεγαλόπολη	6,1	1,50	41 " $M \geq 3,6$	42 " $M \geq 3,6$
36	1. 9.1966	14 24	Μεγαλόπολη	5,8	1,10	16 " $M \geq 3,4$	24 " $M \geq 3,6$
37	4. 3.1967	17 58	Σκύρος	6,7	0,95	54 " $M \geq 3,5$	62 " $M \geq 3,5$
38	8. 4.1970	13 50	Κορινθιακός	6,0	0,90	92 " $M \geq 3,0$	104 " $M \geq 3,0$
39	27. 3.1975	05 15	Σάμος	6,7	1,60	56 " $M \geq 3,8$	48 " $M \geq 3,8$
40	11. 5.1976	16 59	Ζάκυνθος	6,6	0,72	32 " $M \geq 4,0$	37 " $M \geq 4,0$
41	9. 7.1980	02 11	Μαγνησία	6,5	1,35	39 " $M \geq 4,2$	33 " $M \geq 4,2$
42	24. 2.1981	20 53	Αλκυονίδες	6,7	0,78	81 " $M \geq 4,0$	66 " $M \geq 4,0$

Τέλος έχουμε πολύ μεγαλύτερο πραγματικό αριθμό μετασεισμών από τον αριθμό που υποδεικνύει η μεθοδολογία όταν έχουμε λιγυρούς προσεισμούς που δεν διαφέρουν πολύ χρονικά από τον κύριο σεισμό. Τέτοιο παράδειγμα είναι ο σεισμός της 12 Αυγ. 1963 στην Κεφαλονιά με  $M=7,2$  του οποίου προηγήθηκαν προσεισμοί με  $M = 6,8$  και  $M = 6,3$  από 9 μέχρι και 11 Αυγ. 1953. Ίδια είναι η περίπτωση του Αλμυρού 9 Ιουλ. 1980 που έγιναν τρεις διαδοχικοί σεισμοί με  $M = 5,6, 6,5,$  και  $6$  αντίστοιχα σε διάστημα 25 λεπτών.

Όλες οι προηγούμενες περιπτώσεις αποκλίσεων εξηγούνται ποιοτικά και από τα αποτελέσματα εργαστηριακών ερευνών διάρρηξης δειγμάτων διαφόρων πετρωμάτων με τις οποίες καταβλήθηκε προσπάθεια (Mogi, Scholtz κ.λ.π.) να δοθεί θεωρητική εξήγηση του μηχανισμού γένεσης μετασεισμικών ακολουθιών.

Η προτεινόμενη πάντως μεθοδολογία καλύπτει το μεγαλύτερο ποσοστό μετασεισμικών ακολουθιών του Ελλην. χώρου και κατά συνέπεια έχει μεγάλη πρακτική σημασία διότι με αυτή προσδιορίζονται τα μεγέθη των μεγαλύτερων μετασεισμών που πολλές φορές είναι εξίσου καταστρεπτικοί με τον κύριο σεισμό που έχει προηγηθεί μιά και βρίσκουν καταπονημένα τα κτίρια.

Με την γενικά αποδεκτή παραδοχή ότι υπάρχει σχέση μεταξύ της παραμέτρου  $b$  και της ομοιογένειας στην εστιακή περιοχή και με την προϋπόθεση ότι η ομοιογένεια γενικά αυξάνει με το εστιακό βάθος, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η παράμετρος  $b$  γενικά ελαττώνεται συναρτήσει του βάθους για τους κανονικούς (μέσα στο φλοιό) σεισμούς.

Κατά συνέπεια μικρού βάθους κύριοι σεισμοί που οι μετασεισμικές σειρές τους αντιστοιχούν σε μεγάλες τιμές  $b$  ακολουθούνται από μεγάλο πλήθος μικρών σεισμών συγκριτικά με βαθύτερους κανονικούς κύριους σεισμούς του ίδιου μεγέθους  $M_0$  (βλέπε πίνακα II). Αντιθέτως κανονικοί κύριοι σεισμοί μεγαλύτερου σχετικά εστιακού βάθους και αντίστοιχες μικρές τιμές  $b$  ακολουθούνται από μικρότερο αριθμό πολύ μικρών μετασεισμών συγκριτικά με τους αβαθείς κύριους σεισμούς του ίδιου μεγέθους  $M_0$  αλλά γενικά είναι πλουσιότεροι σε σχετικά μεγάλους μετασεισμούς (βλέπε πίνακα II).

Για παράδειγμα βλέπουμε από τον πίνακα II ότι ένας κύριος σεισμός με  $M_0 = 6,5$  θα έχει αριθμό μετασεισμών με  $M \geq 2,0$  όταν το  $b=1,4$  (πολύ αβαθής) περίπου 14.000 ενώ σεισμός με το ίδιο  $M_0$  όταν βρίσκεται στον πυθμένα του φλοιού με  $b=0,6$  θα έχει αντίστοιχα 700 περίπου μετασεισμούς με  $M \geq 2,0$ . Αντιθέτως από τον ίδιο πίνακα βλέπουμε ότι στις δύο περιπτώσεις οι σχετικά μεγάλοι μετασεισμοί με  $M \geq 4,0$  είναι αντίστοιχα 16 και 25 ενώ τα κατά προσέγγιση μεγέθη των μεγαλύτερων μετασεισμών τους  $M_1$  θα είναι αντίστοιχα 5,0 και 6,1.

Η πρακτική σημασία των παραπάνω είναι προφανής και οι κοινωνικές επιπτώσεις μεγάλες στη διάρκεια της εξέλιξης της μετασεισμικής περιόδου.

### 3. Σχέση του μεγέθους του μεγαλύτερου μετασεισμού $M_1$ προς το μέγεθος του κυρίου σεισμού $M_0$ σε σεισμικές ακολουθίες του Ελληνικού χώρου

Από τη χαρτογράφηση των μεγεθών των μεγαλύτερων μετασεισμών  $M_1$  σε συνάρτηση με τα μεγέθη των αντίστοιχων κυρίων σεισμών  $M_0$  για κάθε μιά σεισμική ακολουθία φαίνεται ότι η σχέση που συνδέει τις δύο αυτές ποσότητες δεν είναι γραμμική σ' όλη της την έκταση (σχ.4).

Οι εξισώσεις:

$$M_1 = (1,30 \pm 0,28) + (0,65 \pm 0,05)M_0 \text{ για } M_0 \geq 5,3 \quad (5)$$

$$M_1 = (0,05 \pm 0,35) + (0,87 \pm 0,09)M_0 \text{ για } M_0 \leq 5,2 \quad (6)$$

δίνουν αναλυτικά τις σχέσεις που συνδέουν το μέγεθος του μεγαλύτερου μετασεισμού  $M_1$  και το μέγεθος του αντίστοιχου κυρίου σεισμού  $M_0$ . Επειδή ο μεγαλύτερος μεταγενέστερος μετασεισμός είναι χρονικά μάλλον ανεξάρτητος από τους κανονικούς μετασεισμούς τα μεγέθη τους δεν χρησιμοποιήθηκαν στην εύρεση των σχέσεων (5) και (6).

Η μεγάλη διασπορά των σημείων στο σχήμα (4) οφείλεται στο ότι οι σεισμικές ακολουθίες που μελετήθηκαν προέρχονται από διάφορα εστιακά βάθη.

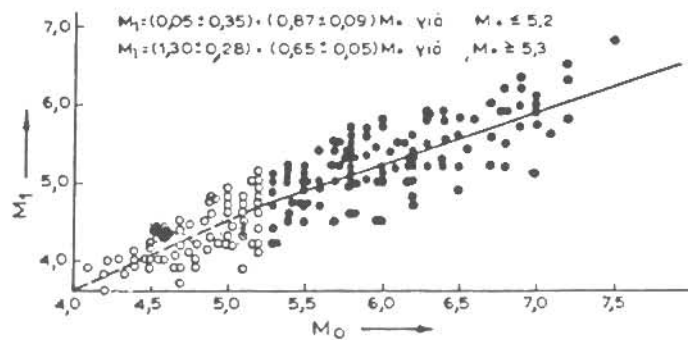
Για 180 μετασεισμικές ακολουθίες του Ελληνικού χώρου η μέση τιμή  $\bar{M}_1$  του μεγέθους του μεγαλύτερου μετασεισμού που αντιστοιχεί σε μεγέθη  $M_0 \pm 0,2$  κυρίων σεισμών υπολογίστηκε και απεικονίζεται στο (σχ.5) ανεξάρτητα από την τιμή της παραμέτρου  $b$ . Ανάλογη σχέση βρέθηκε το 1974 από τον Παπαζάχο. Αυτό το σχήμα δείχνει ότι υπάρχει μία σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ του  $M_1$  και του  $M_0$ . Θεωρήθηκε σκόπιμο να επαναλάβουμε την προηγούμενη εργασία και να συγκρίνουμε το  $\bar{M}_1 = f(M_0)$  για μετασεισμικές ακολουθίες με διάφορες τιμές της παραμέτρου  $b$ .

Από το(σχ. 4) και τις αντίστοιχες εξισώσεις (5) και (6) είναι φανερό ότι η διαφορά του μεγέθους κυρίου σεισμού  $M_0$  και μεγαλύτερου μετασεισμού  $M_1$  δεν εξαρτάται γενικώς από το μέγεθος του κυρίου σεισμού ενώ όταν συγκρίνουμε σεισμικές ακολουθίες του ίδιου  $b$  θα δούμε ισχυρή σχέση μεταξύ  $M_0 - M_1$  και  $M_0$ .

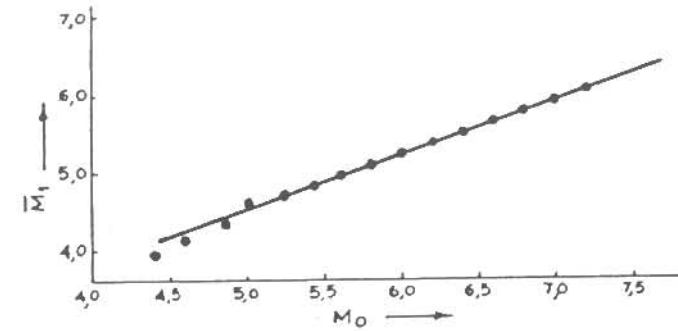
Καταβλήθηκε επίσης προσπάθεια να βελτιώσουμε τις σχέσεις (5) και (6) και να δούμε την επίδραση της παραμέτρου  $b$ , που όπως προαναφέρθηκε σχετίζεται με το εστιακό βάθος, κυρίως στη διαφορά  $M_0 - M_1$  (βλέπε σχ.6).

Με την μεθοδολογία που περιγράφηκε προηγουμένα υπολογίστηκαν τα μεγέθη  $M_1$  (μέγεθος μεγαλύτερου μετασεισμού) για διάφορες τιμές των παραμέτρων  $M_0$  και  $b$ . Τα αποτελέσματα βρίσκονται στον πίνακα (II) και δίνουν ενδεχόμενα πλέον αξιόπιστες τιμές από τις εξισώσεις (5) και (6).

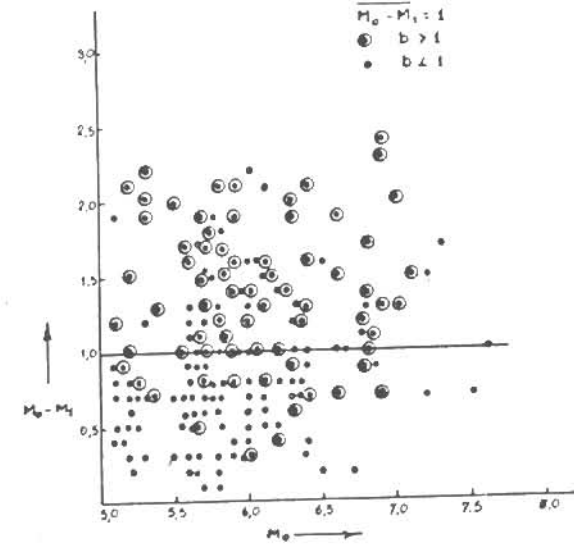
Χαρτογραφώντας τις  $M_1 = f(M_0)$  για συγκεκριμένες τιμές του  $b$  έγινε φανερό ότι τα σημεία δείχνουν μικρότερη διασπορά συγκριτικά με το σχ. (4).



Σχ.4. Σχέση μεταξύ του μεγέθους του μεγαλύτερου μετασεισμού  $M_1$  και του μεγέθους του αντίστοιχου κυρίου σεισμού  $M_0$ .

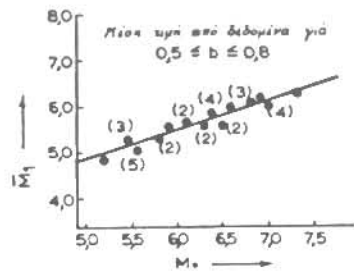


Σχ.5. Σχέση μεταξύ  $\bar{M}_1$  και  $M_0$  για σεισμικές ακολουθίες του Ελληνικού χώρου.

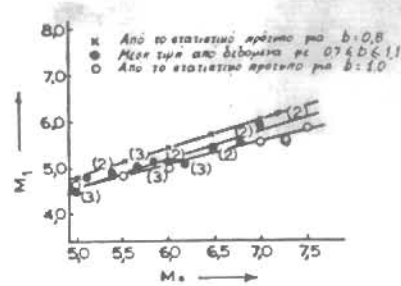


Σχ.(6) Διαφορά μεγέθους μεταξύ κυρίου σεισμού και μεγαλύτερου μετασεισμού συναρτήσει του μεγέθους του κυρίου σεισμού.

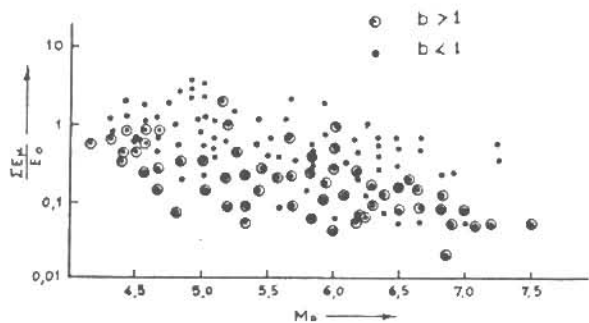




Σχ.7. Σχέση μεταξύ των μέσων τιμών  $\bar{M}_1$  και των αντίστοιχων τιμών  $M_0$  για  $0,5 \leq b \leq 0,8$



Σχ.8. Σχέση μέσων τιμών  $\bar{M}_1$  και αντίστοιχων  $M_0$  όπως προκύπτουν από δεδομένα με  $0,7 \leq b \leq 1,1$  και από δύο συγκεκριμένες τιμές  $b$  με βάση το στατιστικό πρότυπο.



Σχ.9. Σχέση μεταξύ  $\Sigma E_{\mu}/E_0$  σε συνάρτηση με το  $M_0$  για διάφορες τιμές  $b$ .

Το σχ. (7) δείχνει τη σχέση μεταξύ των μέσων τιμών  $\bar{M}_1$  συναρτήσει των αντίστοιχων  $M_0$  για σεισμικές ακολουθίες με  $0,5 \leq b \leq 0,8$  και στο σχ. (8) παρουσιάζεται η ίδια σχέση για ακολουθίες με  $0,7 < b \leq 1,1$ . Οι αριθμοί στα σχ. (7) και (8) δείχνουν αριθμό μετασεισμικών ακολουθιών. Τα λίγα σχετικά δεδομένα που υπάρχουν με  $M_0 > 6,2$  και  $b > 1,1$  δείχνουν συγκριτικά μεγαλύτερη διασπορά.

Είναι φανερό από τα προηγούμενα ότι οι παρακάτω σχέσεις

$$\bar{M}_1 = 1,60 + 0,63M_0 \quad \text{για } 0,5 < b \leq 0,8 \quad (7)$$

$$\bar{M}_1 = 1,67 + 0,56M_0 \quad \text{για } 0,8 < b \leq 1,1 \quad (8)$$

πού ισχύουν για  $M_0 > 5,2$  βελτιώνουν τις μέχρι τώρα γνωστές συναρτήσεις  $M_1 = f(M_0)$ .

Από την λεπτομερή εξέταση πολλών μετασεισμικών ακολουθιών που έγιναν στον Ελληνικό χώρο δεν προκύπτει εμφανής σχέση μεταξύ της διαφοράς των χρόνων γένεσης του κυρίου σεισμού και του μεγαλύτερου μετασεισμού  $t_1$  και του μεγέθους του κυρίου σεισμού  $M_0$  ή της περιοχής γένεσής αυτού. Το χρονικό αυτό διάστημα  $t_1$  ποικίλλει μεταξύ 2 λεπτών και 35 ημερών και εξαρτάται μάλλον από την εντατική κατάσταση που επικρατεί στην εστιακή περιοχή μετά τον κύριο σεισμό. Πάντως στα 60% των περιπτώσεων που μελετήθηκαν ο μεγαλύτερος μετασεισμός έγινε κατά το πρώτο 24ωρο μετά τον κύριο σεισμό. Στα 82% των περιπτώσεων ο  $M_1$  έγινε μέσα σε μία εβδομάδα μετά τον κύριο σεισμό και μόνο σε ποσοστό 5% ο χρόνος  $t_1$  ήταν μεγαλύτερος των 20 ημερών.

Σε 30% περίπου των περιπτώσεων στον Ελλαδικό χώρο κύριοι σεισμοί με μεγέθη  $M_0 \geq 5,8$  ακολουθούνται από μεγάλους μεταγενέστερους μετασεισμούς που τις πιο πολλές φορές είναι της ίδιας τάξεως μεγέθους με τους μεγαλύτερους μετασεισμούς.

#### 4. Μετασεισμική Ενέργεια και Διάρκεια Μετασεισμικής Περιόδου

Στο σχ. (9) φαίνεται ο λόγος της συνολικής ενέργειας που αποδεσμεύτηκε κατά τη διάρκεια της μετασεισμικής περιόδου  $\Sigma E_{\mu}$

προς την ενέργεια που απελευθερώθηκε κατά τον αντίστοιχο κύριο σεισμό  $E_0$  σε συνάρτηση με το μέγεθός του  $M_0$ . Ο υπολογισμός της ενέργειας που αντιστοιχεί σε κάθε σεισμό έγινε με βάση τη σχέση:

$$\log E = 11,8 + 1,5M \quad (9)$$

Από τη χαρτογράφηση αυτή παρατηρούμε ότι στο 75% των περιπτώσεων η ολική ενέργεια των μετασεισμών είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ενέργεια του κυρίου σεισμού. Η σημαντική διασπορά σημείων που παρουσιάζεται στο σχ. (9) μπορεί ν' αποδοθεί σε κάποιο βαθμό στα διάφορα βάθη των σεισμικών ακολουθιών πράγμα που πρακτικά σημαίνει στις διάφορες τιμές  $b$ . Από το ίδιο σχήμα φαίνεται ότι όταν διαχωρίσουμε τις σεισμικές ακολουθίες σε δύο κατηγορίες δηλ. σε αυτές που έχουν  $b < 1$  και στις λοιπές με  $b > 1$  η διασπορά των σημείων είναι σαφώς μικρότερη σε κάθε μία κατηγορία.

Το σχ. αυτό υποδεικνύει μεγάλους σχετικά λόγους  $\Sigma E_{\mu} / E_0$  σε ακολουθίες με μικρά  $b$  δηλ. βρίσκεται σε πλήρη ποιοτική συμφωνία με το στατιστικό πρότυπο που προτάθηκε στην εργασία αυτή. Με την παρατήρηση ότι η κύρια συμβολή στη συνολική ενέργεια των μετασεισμών που υπολογίζεται από την εξίσωση (9) προέρχεται από τους σχετικά μεγάλους μετασεισμούς ( $M \geq 4$ ) είναι φανερό ότι και από το στατιστικό πρότυπο (πίνακας II) αναμένονται μεγάλοι λόγοι  $\Sigma E_{\mu} / E_0$  σε σεισμικές ακολουθίες με μικρά  $b$  (0,6 - 0,9).

Βρέθηκε επίσης στην εργασία αυτή κάποια όχι πολύ σαφής τάση αύξησης της μετασεισμικής περιόδου  $t_{ολ}$  σε συνάρτηση με το μέγεθος του κυρίου σεισμού  $M_0$ . Σε μετασεισμικές ακολουθίες με  $4,2 \leq M_0 \leq 5,8$  η μέση διάρκεια της μετασεισμικής περιόδου βρέθηκε 12 ημέρες ενώ σε κύριους σεισμούς με  $5,9 \leq M_0 \leq 7,5$  η μέση διάρκεια είναι 90 ημέρες. Βέβαια πρέπει να τονιστεί ότι σε πολλές περιπτώσεις έχουμε μετασεισμική διάρκεια με σχετικά υψηλή συχνότητα μετασεισμών της τάξεως του εξαμήνου (π.χ. Σεισμός Αλκυονίδων 1981, Κεφαλονιάς 1983). Λεπτομερής εξέταση των δεδομένων έδειξε ότι η μετασεισμική διάρκεια των σεισμικών ακολουθιών του Ελλαδικού χώρου δεν σχετίζεται με την αντίστοιχη παράμετρο  $b$ .

## Βιβλιογραφία

- Comninakis P., Drakopoulos J., Moutoulidis G. and B. Papazachos (1968). Foreshock and Aftershock Sequences of the Cremasta earthquake and their relation to the Waterloading of the Cremasta artificial lake "Ann. di Geof." 21, 39 - 71.
- Drakopoulos J. (1968). Characteristic Parameters of fore -and aftershock sequences in the area of Greece. Thesis Univ. of Athens 130 pp.
- Drakopoulos J. and A. Economides (1972). Aftershocks of Febr. 19 1968 Earthquake in Northern Aegean Sea and related problems " pure and Appl. Geoph". 242 - 257.
- Drakopoulos J. (1971) . A statistical model on the occurrence of aftershocks in the area of Greece "Bull. Intern. Inst. of Seism. and Earthq. Engineer. , 8, 17 - 39.
- Drakopoulos J. (1978). Statistical significance tests of the difference between  $b$ - values for group of shocks occurred on and around Euboea island ,Greece "Acad. de Rep. Soc. Roum. Geoph. " 22 , 25 - 32.
- Gibowicz J. (1973). Stress drop and aftershocks "Bul. Seism. Soc. Am." 34, 185 - 188.
- Gutenberg B. and C. Richter (1944) Frequency of earthquakes in California " Bull. Seism. Soc. Am." 34, 185- 188.
- Karnik V. (1969). Seismicity of the European Area Part 1 (D. Reidel, Dordrecht).

- Mogi K. (1963). The fracture of a semi- infinite body caused by an inner stress origin and its relation to earthquake phenomena. " Bull. Earthq. Res. Inst.", 41, 595 - 614.
- Papazachos B., Delibasis N., Liapis N. and G. Mousoulidis(1967). Foreshock and Aftershock Sequences of some large earthquakes in the region of Greece " Ann.di Geof." 20, 1 - 93 .
- Papazachos B. (1974). On certain aftershock and foreshock parameters in the area of Greece " Ann. di Geof.",27 497 - 515.
- Scholtz C. (1968). The frequency - magnitude relation of microfracturing in rock and its relation 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.
- Utsu T. (1971) . Aftershocks and earthquake statistics (III) " J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. " 5 , 380 - 441.