

ΠΤΩΣΗ ΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΓΑΛΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Γ. Φ. Καρακίσις*

Γ. Ψ. ΚΑΡΑΚΑΙΣΗ

Σ Υ Ν Ο Ψ Η

Στην εργασία αυτή εξετάζεται η πτώση τάσης των μεγάλων σεισμών που έγιναν στην Ελλάδα μετά το 1978. Χρησιμοποιήθηκαν τα περισσότερο αξιόπιστα δεδομένα, τα οποία αφορούν τις διαστάσεις των σεισμογόνων ρηγμάτων, τις μέσες μεταθέσεις των επιφανειών τους και τις σεισμικές τους ροπές. Οι τιμές της πτώσης τάσης που υπολογίστηκαν σε συνάρτηση με τις μέσες μεταθέσεις των επιφανειών των ρηγμάτων, όσο και αυτές που υπολογίστηκαν σε συνάρτηση με τις σεισμικές ροπές των σεισμών και τις επιφάνειες διάρρηξης των σεισμογόνων ρηγμάτων έδειξαν ότι οι σεισμοί που γίνονται στην Ελλάδα, τόσο κατά μήκος του Ελληνικού τόξου, όσο και στο εσωτερικό του, χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές της πτώσης τάσης. Οι τιμές αυτές είναι χαμηλότερες από τις μέσες τιμές που έχουν υπολογιστεί διεθνώς.

A B S T R A C T

The stress drop of large earthquakes which occurred in Greece after 1978 is examined in the present paper. For this reason the most reliable data concerning fault dimensions, average displacement and seismic moment of these earthquakes, have been used. The stress drop values that have been obtained by the use of the parameters mentioned above indicates that the earthquakes which occurred in the Aegean area are characterized by low stress drop values. These values are lower than the mean ones that hold worldwide.

G.F. KARAKAISIS. Stress drop of large earthquakes in Greece.

* Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Εργαστήριο Γεωφυσικής, Θεσσαλονίκη 540 06, Ελλάδα.

Μία σημαντική παράμετρος της εστίας του σεισμού είναι και η πτώση τάσης, $\Delta\sigma$, δηλαδή, η διαφορά των τιμών της διατμητικής τεκτονικής τάσης στην εστία του σεισμού πριν και μετά τη γένεσή του. Αυτή εξαρτάται από το σεισμοτεκτονικό περιβάλλον της περιοχής στην οποία έγινε ο σεισμός (ενδοπλακικοί οριοπλακικοί σεισμοί) καθώς και από τα χαρακτηριστικά του ρήγματος (ομογένεια των επιφανειών του ρήγματος, τύπος του ρήγματος, την αντοχή σε διάτμηση του υλικού κλπ) και καθορίζει σε ορισμένο βαθμό, την επικινδυνότητα του σεισμού (Παπαζάχος 1989).

Ο υπολογισμός της πτώσης τάσης μπορεί να γίνει είτε από άμεσες παρατηρήσεις του φασματικού περιεχομένου των σεισμικών κυμάτων μακράς περιόδου είτε έμμεσα, από σχέσεις που συνδέουν την πτώση τάσης με διάφορες παραμέτρους του ρήγματος (διαστάσεις της επιφάνειας του ρήγματος, μέση μετάθεση κατά μήκος του ρήγματος, κλπ.).

Στην εργασία αυτή εξετάζεται η πτώση τάσης των μεγάλων σεισμών που έγιναν στην περιοχή του Αιγαίου μετά το 1978. Προηγούμενοι ερευνητές έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι οι περιορισμένες καταστροφές που προκαλούνται από τους σεισμούς που γίνονται στην Ελλάδα, ακόμη και από αυτούς που έχουν μεγάλα μεγέθη, είναι πιθανό να οφείλονται και στη χαμηλή πτώση τάσης που χαρακτηρίζει τους σεισμούς της περιοχής (Kiritzi et al. 1985). Μελέτες που αφορούν την πτώση τάσης σεισμών που έγιναν σε διάφορα τεκτονικά περιβάλλοντα, έδειξαν ότι αυτή έχει μέση τιμή ίση με 30 bars για τους σεισμούς που γίνονται στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών (οριοπλακικοί σεισμοί), ενώ οι σεισμοί που γίνονται στο εσωτερικό των λιθοσφαιρικών πλακών (ενδοπλακικοί σεισμοί) παρουσιάζουν μέση πτώση τάσης ίση με 60 bars. Οι τιμές της πτώσης τάσης που υπολογίζονται στην παρούσα εργασία είναι χαμηλότερες από αυτές που αναφέρθηκαν προηγούμενα.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η διεύρυνση του δικτύου σεισμολογικών σταθμών στην Ελλάδα και τις γειτονικές χώρες στη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας και η χρησιμοποίηση διορθώσεων στις αβξίσεις των επιμήκων κυμάτων στους σταθμούς αυτούς (Panagiotopoulos et al. 1985), επέτρεψαν τον ακριβή υπολογισμό των εστιακών παραμέτρων των σεισμών που έγιναν στην περιοχή του Αιγαίου αυτό το χρονικό διάστημα, καθώς και στον υπολογισμό των διαστάσεων των ρηγμάτων που προκάλεσαν τους σεισμούς αυτούς. Αρκετοί από τους σεισμούς που μελετήθηκαν παρουσίασαν επιφανειακές εκδηλώσεις από τις οποίες υπολογίστηκαν οι μέσες μεταθέσεις των επι-

φανειών των σεισμογόνων ρηγμάτων. Στον Πίνακα (I) δίνονται πληροφορίες που αφορούν την ημερομηνία γένεσης των σεισμών που μελετήθηκαν, τις συντεταγμένες των επικέντρων τους, το μέγεθός τους, M_S , την επιφάνεια του ρήγματος, S, τη μέση μετάθεση στο ρήγμα, \bar{u} , το είδος της διάρρηξης, ΕΔ (Κ=κανονική, Α=ανάστροφη, Π=παράταξης, ΚΠ, ΑΠ=μικτή) και τη σεισμική ροπή τους (Παπαζάχος και Παπαζάχου 1989). Οι αριθμοί που είναι σε παρενθέσεις αντιστοιχούν στις πηγές πληροφοριών που αναφέρονται στο τέλος του Πίνακα.

Πίνακας (I). Ημερομηνία γένεσης, συντεταγμένες επικέντρου (φ_N^0, λ_E^0), επιφανειακά μεγέθη (M_S), επιφάνειες των ρηγμάτων (S), μέσες μεταθέσεις στα ρήγματα, (\bar{u}), σεισμικές ροπές, (M_0) και είδη διάρρηξης (ΕΔ), των σεισμών που μελετήθηκαν.

Table (I). Date, origin time, focal coordinates, (φ_N^0, λ_E^0), surface magnitudes, (M_S), fault surfaces, (S), average fault displacements, (\bar{u}), seismic moments, (M_0) and kinds of faulting, (ΕΔ) of the studied earthquakes.

ΧΡΟΝΟΣ ΓΕΝΕΣΗΣ	φ_N^0	λ_E^0	M_S	S (Km ²)	\bar{u} (m)	$M_0 \cdot 10^{25}$ Erg	ΕΔ	Περιοχή	Αναφορά
1978, 23 Μαΐου	40,8	23,3	5,8	180	-	0,562	Κ	Θεσσαλονίκη	(1), (2)
1978, 20 Ιουν.	40,7	23,2	6,5	390	0,27	6,607	Κ	Θεσσαλονίκη	(3), (2)
1979, 15 Απρ.	42,1	19,2	7,1	2075	-	33,113	ΑΠ	Monte-Negro	(4), (5), (2)
1981, 24 Φεβρ.	38,1	23,1	6,7	440	0,60	8,128	Κ	Αλκυονίδες	(6), (2), (7)
1981, 4 Μαρτ.	38,2	23,3	6,3	230	0,60	0,977	Κ	Αλκυονίδες	(8), (2), (7)
1981, 19 Δεκ.	39,1	25,2	7,2	1620	0,67	23,988	Π	Β. Αιγαίο	(9), (2), (10)
1982, 18 Ιαν.	39,8	24,4	6,7	780	-	9,333	Π	Β. Αιγαίο	(9), (2)
1983, 17 Ιαν.	38,0	20,2	7,0	930	-	23,988	Π	Κεφαλονιά	(9), (11)
1983, 6 Αυγ.	40,1	24,8	6,8	480	0,46	13,489	Π	Β. Αιγαίο	(9), (2), (10)
1986, 13 Σεπτ.	37,1	22,1	6,0	160	0,12	0,661	Κ	Καλαμάτα	(9), (12)

(1): Soufleris and Stewart 1981; (2): Kiritzi et al. 1985; (3): Kulhanek and Meyer 1983; (4): Boore et al 1984; (5): Kociaj 1980; (6): Kim et al. 1984; (7): Papazachos et al 1981; (8): Jackson et al. 1982; (9): National Earthquake Information Service Bulletins; (10): Kiritzi et al. 1987; (11): Scordilis et al. 1985; (12): Papazachos et al. 1988.

Οι τιμές της πτώσης τάσης υπολογίστηκαν από τις παρακάτω σχέσεις (Kanamori and Anderson 1975):

$$\Delta\sigma_{\bar{u}} = C \cdot \mu \cdot \frac{\bar{u}}{w} \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_{M_0} = C \cdot \frac{M_0}{S \cdot w} \quad (2)$$

όπου, C, είναι σταθερά, η οποία εξαρτάται από το είδος του ρήγματος και w είναι το πλάτος του ρήγματος. Η $\Delta\sigma_{\bar{u}}$ αντιστοιχεί στην πτώση τάσης που υπολογίζεται από τη μέση μετάθεση, \bar{u} , ενώ η $\Delta\sigma_{M_0}$ αντιστοιχεί στην πτώση τάσης που υπολογίζεται από τη σεισμική ροπή και από την επιφάνεια του ρήγματος. Η σταθερά C έχει τις παρακάτω τιμές:

$$\text{ρήγμα παράταξης: } C = \frac{2}{\pi} \quad (\text{Knoroff 1958})$$

$$\text{ρήγμα κλίσης: } C = \frac{4(\lambda+\mu)}{\pi(\lambda+2\mu)} \quad (\text{Aki 1966})$$

Οι τιμές των σταθερών του Lamé, λ και μ , είναι περίπου ίσες με $3 \cdot 10^{11}$ dyn/cm², αν δεχθούμε ότι ο λόγος του Poisson για την περιοχή ληφθείλσος με 0,25 (Παπαζάχος 1978).

Τα πλάτη, w, των σειсмоγόνων ρημάτων υπολογίστηκαν από την παρακάτω σχέση (Παπαζάχος και Παπαζάχου 1989):

$$\log(w) = 0,19 \cdot M_s - 0,13 \quad (3)$$

Οι τιμές της πτώσης τάσης των σεισμών του Πίνακα (I) που υπολογίστηκαν με τη χρησιμοποίηση των σχέσεων (1) και (2) φαίνονται στον Πίνακα (II).

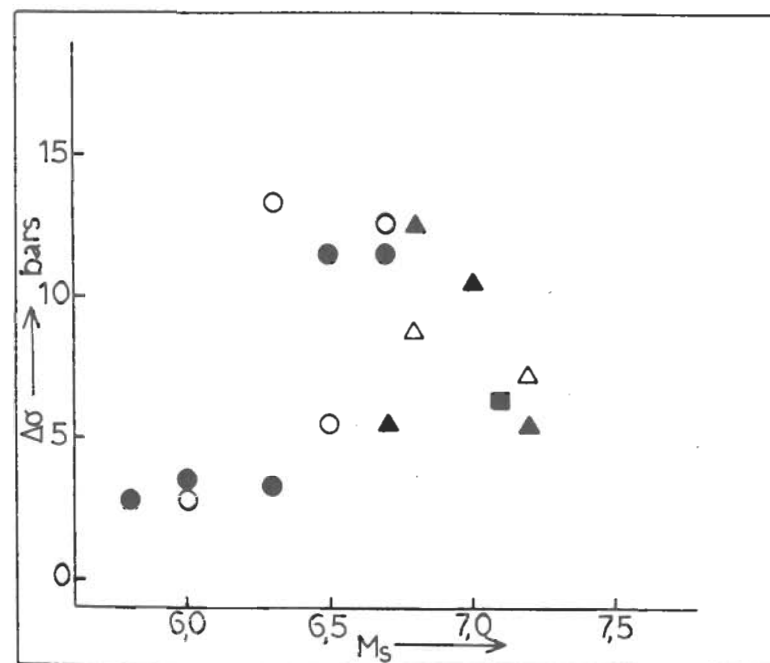
Πίνακας (II). Τιμές πτώσης τάσης των σεισμών του Πίνακα (I).

Table (II). Stress drop values of the earthquakes listed in Table(I).

ΧΡΟΝΟΣ ΓΕΝΕΣΗΣ	M_s	ΕΔ	$\Delta\sigma_{\bar{u}}$ bars	$\Delta\sigma_{M_0}$ bars
1978, 23 Μαΐου	5,8	Κ	-	2,86
1978, 20 Ιουν.	6,5	Κ	5,49	11,47
1979, 15 Απρ.	7,1	ΑΠ	-	6,13
1981, 24 Φεβρ.	6,7	Κ	12,44	11,42
1981, 4 Μαρτ.	6,3	Κ	13,23	3,12
1981, 19 Δεκ.	7,2	Π	7,11	5,45
1982, 18 Ιαν.	6,7	Π	-	5,48
1983, 17 Ιαν.	7,0	Π	-	10,40
1983, 6 Αυγ.	6,8	Π	8,79	12,35
1986, 13 Σεπτ.	6,0	Κ	2,89	3,48

Καταβλήθηκε προσπάθεια να βρεθεί συσχέτιση μεταξύ του μεγέθους του κύριου σεισμού και της πτώσης τάσης του. Για το λόγο αυτό, χαρτογραφήθηκαν οι τιμές της πτώσης τάσης που υπολογίστηκαν και με τις δύο σχέσεις, σε συνάρτηση με τα μεγέθη των κυρίων σεισμών που μελετήθηκαν. Στο σχήμα (1) τα λευκά σύμβολα παριστάνουν τις τιμές

της πτώσης τάσης που υπολογίστηκαν με τη βοήθεια της σχέσης (1), ενώ τα μαύρα σύμβολα παριστάνουν τις τιμές της πτώσης τάσης που υπολογίστηκαν από τη σχέση (2). Οι κύκλοι, τα τρίγωνα και το τετράγωνο αντιστοιχούν σε διαρρήξεις κανονικές, παράταξης και μικτές.



Σχ. 1. Χαρτογράφηση των τιμών της πτώσης τάσης που περιλαμβάνονται στον Πίνακα (II) και υπολογίστηκαν από τις μέσες μεταθέσεις (λευκά σύμβολα), καθώς και από τις επιφανείες των ρημάτων και τις σεισμικές ροπές των σεισμών (μαύρα σύμβολα), σε συνάρτηση με το μέγεθος των σεισμών. Οι κύκλοι, τα τρίγωνα και το τετράγωνο αντιστοιχούν σε διαρρήξεις κανονικές, παράταξης και μικτές.

Fig.2. Plot of stress drop values listed in Table (II), that have been derived by average displacement (white symbols) and by fault surfaces and seismic moments of the earthquakes (black symbols). The circles, the triangles and the square denote different kinds of faulting (dip, strike and mixed).

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από το δείγμα των 10 πρόσφατων σεισμών που χρησιμοποιήθηκε προκύπτει ότι δεν υπάρχει εξάρτηση της πτώσης τάσης και του μεγέθους του κύριου σεισμού. Οι τιμές της πτώσης τάσης που υπολογίστηκαν τόσο από τις μέσες μεταθέσεις των επιφανειών των ρημάτων, όσο και από τις επιφανείες των ρημάτων και τις σεισμικές ροπές των σει-

σμών κυμαίνονται από 2 ως 13 bars περίπου, δηλαδή, είναι αρκετά μικρότερες από τις μέσες τιμές της πτώσης τάσης που έχουν υπολογιστεί για σεισμούς που έγιναν σε διάφορα τεκτονικά περιβάλλοντα. Το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί με τα συμπεράσματα των περισσότερων ερευνητών οι οποίοι, με βάση το φασματικό περιεχόμενο των σεισμικών κυμάτων μακράς περιόδου, υπολόγισαν ίδιας τάξης μεγέθους τιμές πτώσης τάσης για σεισμούς που έγιναν στην περιοχή που μελετήθηκε (Soufleris and Stewart 1981, Jackson et al. 1982, Purcaru and Berckhemer 1982, Kim et al. 1984, Kiratzi et al. 1987, Lyon-Caen et al. 1988). Οι σχετικά μεγάλες τιμές πτώσης τάσης που βρέθηκαν από άλλους ερευνητές και αφορούν σεισμούς που εξετάζονται στην παρούσα εργασία (Stavrakakis et al. 1986, Ιωαννιδου 1989), είναι πιθανό να οφείλονται στην υιοθέτηση από μέρους τους του κυκλικού μοντέλου ρήγματος, ενώ η χωρική κατανομή των σεισμών των σεισμικών ακολουθιών που έγιναν πρόσφατα στην Ελλάδα, έδειξε ότι η χρησιμοποίηση ορθογώνιας επιφάνειας ρήγματος προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα (Kiratzi et al. 1985).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο συγγραφέας εκφράζει τις θερμές ευχαριστίες του στον καθηγητή κ. Β.Κ. Παπαζάχο για την παρότρυνση και την κριτική ανώνυμη του κειμένου. Η εργασία αυτή έγινε στα πλαίσια του προγράμματος της Γ.Γ.Ε.Τ. 87ΑΚ1/1987.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- AKI, K. (1966). Generation and propagation of G-waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964. - *Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo University*, 44, 23-88
- BOORE, D., SIMS, J., KANAMORI, H. and HARDING, S. (1981). The Montenegro, Yugoslavia, earthquake of April 15, 1979: source orientation and strength. - *Phys. of Earth and Planet. Int.*, 27, 133-142.
- ΙΩΑΝΝΙΔΟΥ, Ε.Ι. (1989). Χαρακτηριστικές παράμετροι σεισμικής πηγής με τη μέθοδο της αντιστροφής των κυμάτων χώρου: Ελλάδα και η ευρύτερη περιοχή της. - Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, σελ. 282.
- JACKSON, J., GAGNEPAIN, J., HOUSEMAN, G., KING, G., PAPANASTASSIOU, P., SOUFLERIS, C. and VIRIEUX, J. (1982). Seismicity, normal faulting and geomorphological development of the gulf of Corinth (Greece): The Corinth earthquakes of February and March 1981. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 57, 377-397.
- KANAMORI, H. and ANDERSON, D. (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology. - *B.S.S.A.*, 65, 5, 1073-1095.

- KIM, W., KULHANEK, O. and MEYER, K. (1984). Source processes of the 1981 gulf of Corinth earthquake sequence from body wave analysis. - *B.S.S.A.*, 74, 459-477.
- KIRATZI, A.A., KARAKAISIS, G.F., PAPANASTASSIOU, E.E. and PAPAΖΑΧΟΣ Β.Κ. (1985). Seismic source parameter relations for earthquakes in Greece. - *PAGEOPH*, 123, 27-41.
- KIRATZI, A.A., WAGNER, G. and LANGSTON, CH. (1987). Moment tensor inversion analysis of recent earthquakes in the northern Aegean trough. - *Am. Geophys. Un., 1987 Fall Meeting, December 6-11, 1987, San Francisco*.
- ΚΝΟΡΟΦΦ, L. (1958). Energy release in earthquakes. - *Geophys. J.* 1, 44-52.
- KOČIAJ, S. (1980). The main characteristics of the focus of the April 15, 1979 earthquake derived from instrumental data. - *The earthquake of April 15, 1979 and the elimination of its consequences, Symposium, Shkodra, April 4-5, 1980*, 69-91.
- KULHANEK, O. and MEYER, K. (1983). Spectral study of the June 20, 1978 Thessaloniki earthquake. In B.C. Papazachos and P.G. Carydis (ed.) "The Thessaloniki, Northern Greece Earthquake of June 20, 1978 and its seismic sequence, Technical Chamber of Greece, Section of Central Macedonia", 187-199.
- LYON-CAEN, H., ARMIJO, R., ΔΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ, J., BASKOUTAS, J., DELIBASIS, N., GAULON, R., KOUSKOUNA, V., LATOUSSAKIS, J., MAKROPOULOS, K., PAPANASTASSIOU, P., PAPANASTASSIOU, D. and PEDOTTI, G. (1988). The 1986 Kalamata (southern Greece) earthquake: Detailed study of a normal fault; evidence of east-west extension in the Hellenic arc. - *J. GEOPHYS. RES.*, 93, 14967-15000.
- PANAGIOTOPOULOS, D.G., HATZIDIMITRIOU, P.M., KARAKAISIS, G.F., PAPANASTASSIOU, E.E. and PAPAΖΑΧΟΣ, Β.Κ. (1985). Travel-time residuals in southeastern Europe. - *PAGEOPH*, 123, 221-231.
- ΠΑΠΑΖΑΧΟΣ, Β.Κ. (1978). Εισαγωγή στη Γεωφυσική. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ. 334.
- ΠΑΠΑΖΑΧΟΣ, Β.Κ. (1989). Εισαγωγή στη Σεισμολογία. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ. 382.
- PAPAΖΑΧΟΣ, Β.Κ., COMNINAKIS, P.E., MOUNTRAKIS, D.M. and PAVLIDES, S. (1981). Preliminary results of an investigation of the February-March 1981 Alkyonides gulf (Greece) earthquakes. *Proc. Int. Symp. Hellenic arc and Trench, Athens, April 1981*, 2, 47-87.
- PAPAΖΑΧΟΣ, Β.Κ., KIRATZI, A.A., KARACOSTAS, B.G., PANAGIOTOPOULOS, D.G., SCORDILIS, E.M. and MOUNTRAKIS, D. (1988). Surface fault traces, fault plane solution and spatial distribution of the aftershocks of the September 13, 1986 earthquake of Kalamata (Southern Greece). - *PAGEOPH*, 126, 55-68.
- ΠΑΠΑΖΑΧΟΣ, Β.Κ. και ΠΑΠΑΖΑΧΟΥ, Κ. (1989). Οι σεισμοί της Ελλάδας. Εκδόσεις Ζήτη, σελ. 356.
- PURCARU, G. and BERCKHEMER, H. (1982). Quantitative relations of seismic source parameters and a classification of earthquakes. - *Tectonophysics*, 84, 57-128.
- ΣΚΟΡΔΥΛΗΣ, Ε.Μ. (1985). Μικροσεισμική μελέτη της Σερβομακεδονικής ζώνης και των γύρω περιοχών. - Διδ. Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ. 250.
- SCORDILIS, E.M., KARAKAISIS, G.F., KARACOSTAS, B.G., PANAGIOTOPOULOS, D.G., COMNINAKIS, P.E. and PAPAΖΑΧΟΣ, Β.Κ. (1985). Evidence for transform faulting in the Ionian sea: the Cephalonia island earthquake sequence of 1983. - *PAGEOPH*, 123, 388-397.
- SOUFLERIS, C. and STEWART, G. (1981). A source study of Thessaloniki (northern Greece) 1978 earthquake sequence. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 67, 343-358.
- STAVRAKAKIS, G., ΔΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ, J. and MAKROΠΟΥΛΟΣ, Κ. (1986). Rupture complexity and fault asperities: the Corinth, central Greece earthquake sequence of 1981. 3ο Επιστ. Συνέδριο Ε.Γ.Ε., 22-25 Μαΐου 1986, Αθήνα.