

Πρακτικά	6ου	Συνεδρίου	Μάιος	1992
Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ.	Τομ.	XXVIII/3	σελ.	201-212
Bull. Geol. Soc. Greece	Vol.		pag.	
			Αθήνα	1993
			Athens	

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΟΥΡΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΑΝΑΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΤΩΝ ΑΘΗΝΩΝ

Ι.ΜΠΑΣΚΟΥΤΑΣ, Γ.ΠΑΝΟΠΟΥΛΟΥ, Κ.ΜΑΚΡΟΠΟΥΛΟΣ,
Ι.ΔΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

ABSTRACT

Seismic waves attenuation was measured in central Greece, around ATH station, from the time domain temporal decay of coda waves amplitude. Sato's (1978ab), single isotropic scattering model was adopted. Coda waves were considered as scattered body waves and elastic energy radiated spherically in the infinite elastic and isotropic medium. Energy density is proportional to RMS value of velocity amplitude. In this study the method was oriented to overcome the inherent difficulties which are present in the data on paper recorded.

A set of 65 local earthquakes were selected from WWSSN ATH station between 1982-1985, with epicentral distances shorter than 200Km, and magnitudes, which range from 3.7-5.2 Ms, Richter scale.

* Seismological Institute, National Observatory of Athens
118 10 Athens

** Department of Geophysics, University of Athens
Panepistimioupolis, Ilisia, 154 84 ATHENS, GREECE

Measurements of peak to peak amplitude and predominant period was made within a five sec interval, started $1.5t^*$, where t^* is the S-wave travel time till the signal to noise ratio, became 5. The amplitude values have been converted into velocity one, by the mean of the instrument response curve. Then a cumulative function of velocity amplitudes, to obtain RMS was introduced, at time t , middle of the 5 sec time window considered. Thus the values obtained in this way constitute the amplitudes used for this analysis.

Although the proposed data analysis must be considered as a rough approximation because of the difficulties on reading the paper charts, which leads on measurement error; our results confirm its utility for dealing with paper recorded data.

The value of Q^{-1} were estimated to be $6.92 \times 10^{-3} \pm 2.8 \times 10^{-3}$, at 1Hz. This value agrees well with those obtained at several places, seismic active, in the world. We can also point out that, if we suggest that coda Q coincide with Q of S-waves, as many researchers suggested, then Q agrees also well with mean free path value (98Km), obtained by the authors for the same region, using the same data set.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μέθοδος ανάλυσης των ουράς των σεισμικών κυμάτων, για τον υπολογισμό του παράγοντα ποιότητας Q^{-1} , που βασίζεται στο μοντέλο απλής και ισότροπης διασποράς, εφαρμόστηκε σε 65 τοπικούς σεισμούς, που έγιναν στο διάστημα 1982-1985 και καταγράφηκαν αναλογικά σε ταινίες χάρτιου στο σεισμολογικό σταθμό των Αθηνών (ATH). Σε αυτό το σύνολο δεδομένων απ την ανάγνωση της προεξέχουσας συχνότητας προκύπτει ένα φάσμα απο 0.5 έως 1.6Hz. Ετσι η τιμή του Q^{-1} ίση με $6.92 \times 10^{-3} \pm 2.8 \times 10^{-3}$ που βρέθηκε αφορά στη συχνότητα του 1Hz. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την χρήση αντίστοιχων δεδομένων, που υπάρχουν σε μεγάλο αριθμό στην Ελλάδα.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μετά την πρωτοπόρα εργασία του Aki (1969), η ανάλυση των κυμάτων ουράς - του τελευταίου τμήματος των σειсмоγραμμάτων μετά την διέλευση των εγκαρσίων κυμάτων - είχε μιá ραγδαία εξέλιξη. Αυτή η ανάλυση, που εφαρμόστηκε κατά καιρούς σε διάφορες περιοχές του κόσμου, (Aki and Chouet, 1975; Sato, 1978, Rautian and Khalaturin, 1978, Del Pezzo et al., 1983; Baskoutas et al., 1989 για την Ελλάδα), απέδειξε ότι είναι ένα ισχύρο εργαλείο εξερεύνησης κα επίλυσης προβλημάτων που έχουν να κάνουν με την επίδραση του μέσου στην διάδοση των σεισμικών κυμάτων. Αυτή η στατιστική ανάλυση που εφαρμόζεται οδηγεί σε ένα ευκολότερο δρόμο για την ερμηνεία των σειсмоγραμμάτων και μάλιστα εκείνου του τμήματος του, που μέχρι πρότινος εθεωρείτο άχρηστο.

Οι εγγραφές σε ταινίες χάρτου συνιστούν ένα πρόβλημα κάποιες φορές ανυπέρβλητο στην προσπάθεια να διαβαστούν ή να ψηφιοποιηθούν τα σειсмоγράμματα. Σε αυτή την εργασία προσαρμόζεται η μέθοδος της απλής και ισότροπης διασποράς των σεισμικών κυμάτων που προτάθηκε απ τον Sato (1977a,b), σε τέτοια δεδομένα.

Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι πρώτο να υπολογισθεί παράγοντας ποιότητας Q^{-1} γύρω απ τον σταθμό των Αθηνών, δεύτερον να αποτελέσει οδηγό για την επεξεργασία αντίστοιχων δεδομένων για άλλες περιοχές της Ελλάδας με του ίδιου τύπου δεδομένα.

ΜΕΘΟΔΟΣ

Με βάση την υπόθεση ότι η ελαστική ενέργεια ακτινοβολείται σφαιρικά σε ένα μέσο διάδοσης ισότροπο και ομοιογενές, ο Sato (1977) προτείνει ότι η πυκνότητα της ενέργειας των σεισμικών κυμάτων ουράς δίνεται απ την σχέση :

$$E_s(r, f, t) = [W_0/4\pi r^2] K(\alpha) \exp(-2\pi f Q^{-1} t) \quad (1)$$

όπου W_0 είναι η συνολική ενέργεια που ακτινοβολείται απ την πηγή, r είναι η υποκεντρική απόσταση, $\alpha = t/t_s$ όπου t είναι ο χρόνος διαδρομής του κύματος του οποίου μετράμε το χρόνο άφιξης και t_s ο χρόνος διδρομής των εγκάρσιων κυμάτων. Η συνάρτηση $K(\alpha)$ είναι:

$$K(\alpha) = (1/\alpha) \ln[(\alpha+1)/(\alpha-1)] \quad (2)$$

η οποία ασυμπτωματικά έχει τη μορφή :

$$K(\alpha) \approx 2(t_s/t)^2 \text{ για } t \gg t_s \quad (3)$$

Απ την σχέση (1) έχουμε :

$$E_s(r, f, t) \approx \exp(-2\pi f Q^{-1} t) / t^2 \quad (4)$$

που αντιστοιχεί στο μοντέλο απλής διασποράς του Aki και Chouet (1975).

Η πυκνότητα ενέργειας των κυμάτων της ουράς είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας των μέσης τιμής των τετραγώνων των πλατών, δηλαδή :

$$A(r, f, t) \approx \exp(-Q^{-1} \pi f t) / t \quad (5)$$

Λογαριθμίζοντας την σχέση αυτή

$$\log_{10}(t A) = C(f) - Q^{-1} (\pi f \log_{10} e) t \quad (6)$$

Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση στα δεδομένα, είναι δυνατό να υπολογισθεί ο παράγοντας ποιότητας Q^{-1} , (Aki, 1969; Aki and Chouet, 1975).

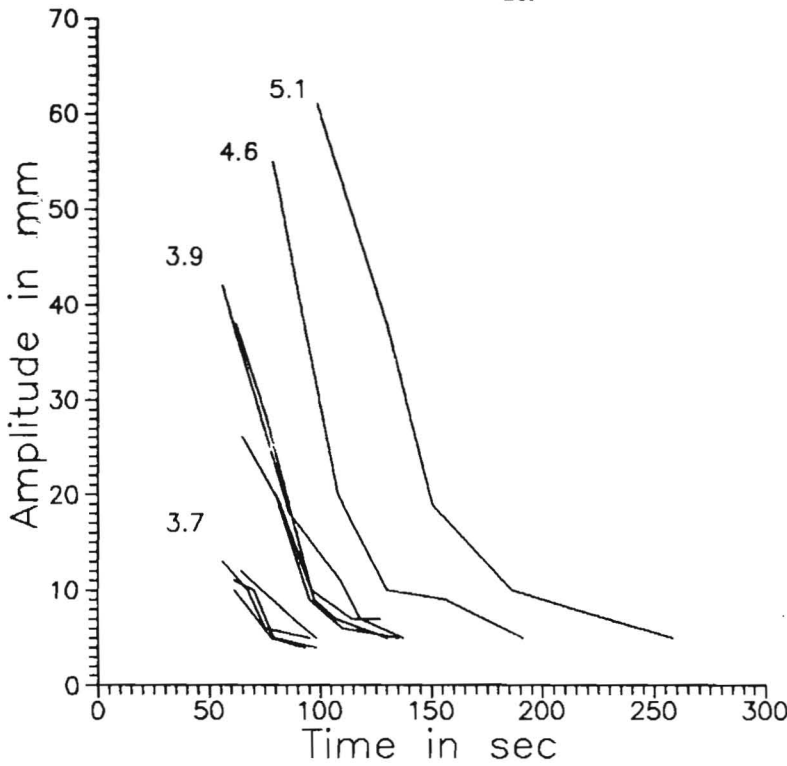
ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

Τα δεδομένα της εργασίας αυτής αφορούν στον σταθμό των Αθηνών (WWSSN), που έχει σεισμόμετρο και γαλβανόμετρο με ιδιοπεριόδους, 1Hz και 0.74Hz αντίστοιχα και είναι καταγραμμένα σε φωτογραφικό χαρτί της Kodak, με ταχύτητα αναγραφής 60mm/min. Από διάφορες εργασίες (Herrmann, 1980; Herráiz and Mezcua, 1984; Singh and Herrmann, 1983; Jin and Aki, 1988) φαίνεται ότι ένα σύνολο 15 έως 20 σεισμών είναι αρκετό για αυτή την ανάλυση. Εμείς διαλέξαμε 65 αναγραφές στο διάστημα μεταξύ 1982-1985, με μεγέθη, M_s , από 3.7 έως 5.2 και επικεντρικές αποστάσεις μέχρι 200 χιλ. απο τον σταθμό. Όλοι οι παράμετροι που αναφέρονται στον πίνακα I προέρχονται απο το Δελτίο του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού

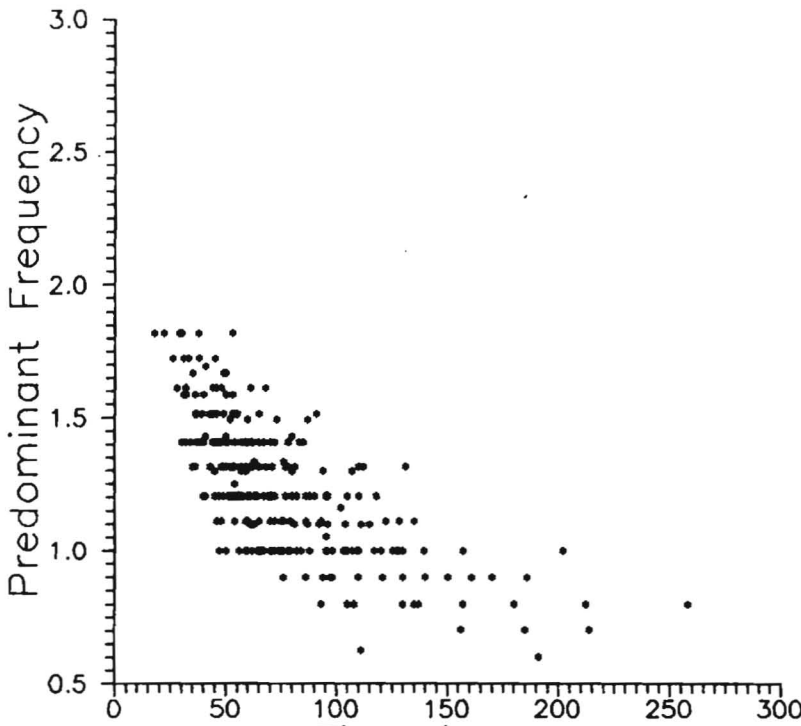
TABLE 1.

DATE	TIME	LAT	LON	H	Ms
1982 JAN 3	19 49 27.4	38.920	24.810	30	3.8
1982 JAN 5	00 30 36.7	38.830	24.960	25	4.8
1982 MAR 1	08 43 1.6	38.460	24.830	31	4.0
1982 MAR 27	22 45 34.0	38.110	22.540	20	4.1
1982 APR 25	09 09 58.6	38.900	24.770	33	4.0
1982 APR 30	16 28 50.9	39.300	22.950	32	3.8
1982 AUG 27	01 41 10.0	36.860	23.670	107	4.2
1982 OCT 8	17 09 54.3	38.020	22.510	22	3.7
1982 NOV 27	00 20 30.3	37.980	22.050	31	3.8
1982 DEC 14	19 23 56.8	38.630	24.840	21	4.7
1982 DEC 29	02 55 3.0	37.410	21.590	20	3.8
1983 JAN 12	03 55 44.2	38.820	24.960	32	4.1
1983 FEB 4	05 51 36.3	38.070	22.070	26	4.2
1983 FEB 10	16 09 26.9	38.310	22.150	26	4.2
1983 FEB 24	00 13 50.5	37.290	21.530	25	4.1
1983 FEB 28	16 04 14.3	38.840	24.940	28	5.2
1983 MAR 11	08 37 35.9	38.840	24.970	32	4.3
1983 APR 6	12 49 14.7	38.740	22.370	20	3.8
1983 APR 7	01 51 53.3	38.680	22.290	21	4.0
1983 APR 8	12 35 16.2	38.750	22.390	20	3.9
1983 APR 8	13 29 8.6	38.720	22.380	22	4.0
1983 APR 10	01 38 46.2	38.700	22.380	21	3.9
1983 APR 29	01 27 2.9	38.770	22.370	21	4.0
1983 JUN 19	14 18 6.0	38.730	24.890	10	3.8
1983 AUG 6	09 05 5.8	38.830	24.950	23	3.7
1983 AUG 7	12 05 34.5	38.260	22.140	20	3.8
1983 AUG 20	08 15 32.7	37.590	22.610	11	4.1
1983 SEP 15	00 05 1.2	38.700	22.410	21	4.1
1983 SEP 19	01 18 14.5	38.730	22.330	23	5.0
1983 SEP 19	01 22 40.4	38.730	22.360	21	3.7
1983 SEP 19	03 52 40.7	38.710	22.360	22	3.9
1983 SEP 22	04 17 48.2	38.760	22.410	21	3.8
1983 OCT 7	04 14 5.9	37.990	23.250	122	4.1
1983 OCT 15	20 43 25.3	38.870	23.540	22	3.9
1983 OCT 31	14 04 14.8	38.160	23.010	103	4.1
1983 NOV 9	09 57 44.3	39.080	23.420	24	4.4
1983 DEC 18	12 51 16.8	39.450	24.040	23	4.2
1983 DEC 26	03 03 53.1	37.240	23.880	21	3.7
1984 JAN 16	22 54 1.9	38.150	22.190	27	3.7
1984 JAN 22	07 09 52.7	39.020	22.120	20	3.9
1984 FEB 16	22 40 34.1	38.090	22.100	25	3.7
1984 FEB 17	12 02 48.8	38.560	24.510	27	3.9
1984 FEB 17	21 19 55.8	39.210	23.440	21	4.3
1984 APR 1	20 17 0.9	38.870	24.990	26	3.9
1984 APR 8	09 47 30.5	38.830	24.950	35	3.9
1984 MAY 3	01 46 34.0	38.700	24.880	27	3.9

1984	OCT	10	21	11	21.5	36.960	23.600	81	4.6
1984	NOV	9	09	51	23.7	38.280	22.060	22	3.8
1984	DEC	16	12	08	9.2	37.150	24.130	125	4.1
1984	DEC	23	01	59	56.5	37.840	22.430	36	4.0
1985	JAN	23	05	48	38.8	38.770	24.920	21	3.7
1985	MAR	10	14	52	8.6	38.610	24.730	24	3.9
1985	MAR	12	09	51	9.5	39.430	24.000	25	5.0
1985	JUN	6	04	37	29.7	38.802	23.510	27	4.1
1985	JUN	6	23	41	28.2	38.708	23.600	24	3.8
1985	JUN	7	07	50	52.2	38.402	24.200	29	4.1
1985	JUN	14	00	00	45.4	37.404	22.430	72	3.9
1985	JUN	20	02	58	32.1	39.206	22.860	39	4.4
1985	JUN	21	00	15	22.6	38.509	23.550	28	4.3
1985	JUL	29	20	52	22.8	38.308	22.280	23	4.0
1985	AUG	28	00	33	41.3	37.108	23.400	75	4.5
1985	SEP	21	10	13	9.6	39.002	22.130	41	4.8
1985	OCT	8	20	49	0.0	38.305	23.680	20	4.2
1985	OCT	15	07	42	53.6	39.102	22.080	41	3.8

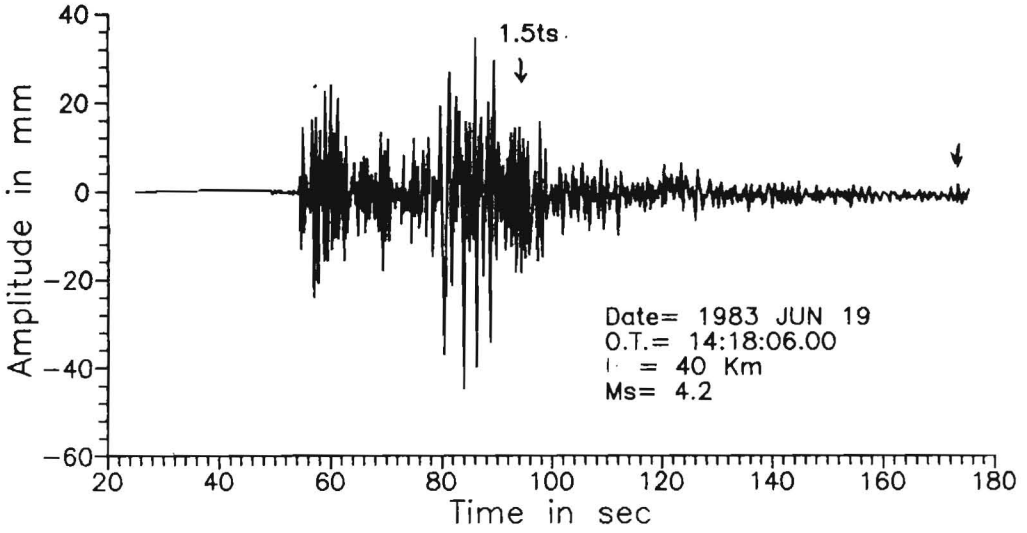


Σχήμα 2. Απόσβεση πλατών σε σχέση με τον χρόνο διαδρομής

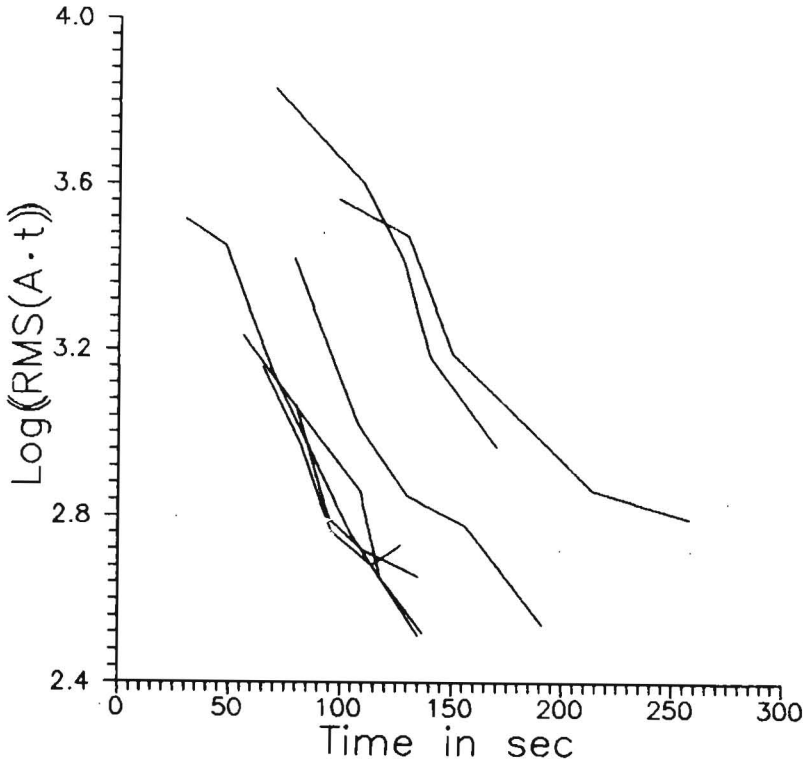


Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστους - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

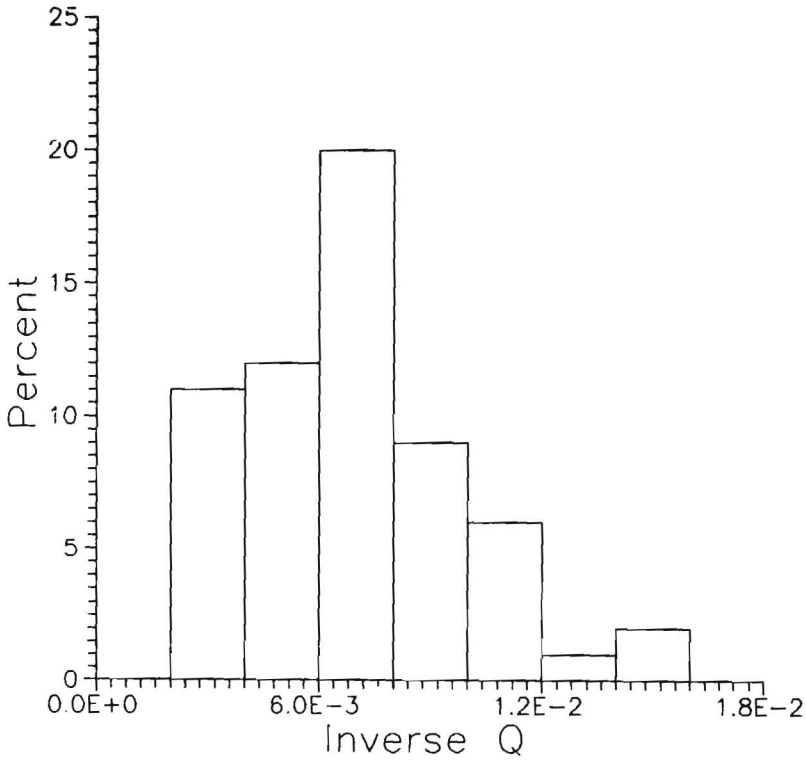
Σχήμα 3. Σχέση της δεσπόζουσας συχνότητας προς τον χρόνο διαδρομής



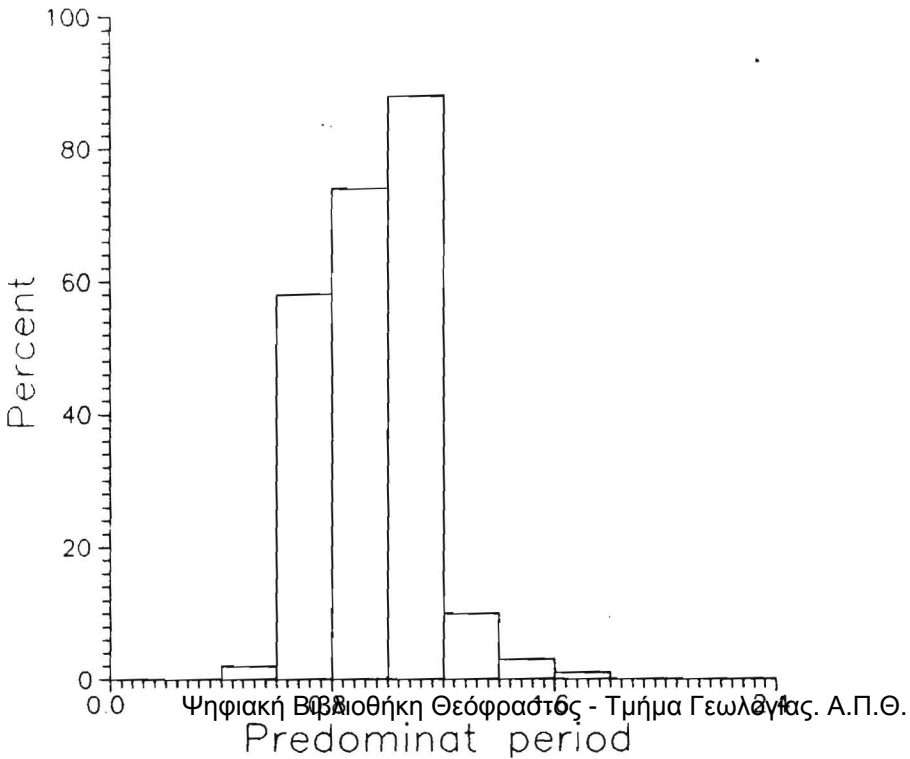
Σχήμα 4. Ψηφιοποιημένο σεισμογράμμα όπου φαίνονται το χρονικό παράθυρο ανάλυσης.



Σχήμα 5. Παράδειγμα της ποσότητας $\text{Log}(\text{RMS}(A \cdot t))$.
Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.



Σχμα 6. Ιστογράμμα των τιμών του παράγοντα ποιότητας Q .



Σχμα 7. Ιστογράμμα της δεσπόζουσας περιόδου για όλα τα προκύπτοντα

Αστεροσκοπείου Αθηνών. Ο χάρτης των επικέντρων φαίνεται στο σχήμα 1. Τα κριτήρια της επιλογής τους είναι τρία, πρώτον η κατά το δυνατόν καλλίτερη αζιμουθιακή κατανομή, δεύτερον η επικεντρική απόσταση, μικρότερη από 200 χιλ. και τρίτον η ποιότητα αναγραφής τους, στο βαθμό που επιτρέπει την ανάγνωση του συχνοτικού περιεχομένου της εγγραφής. Στο σχήμα 2 φαίνεται η χαρακτηριστική απόσβεση των πλατών σε σχέση με τον χρόνο διαδρομής για διάφορα μεγέθη, που πιστοποιεί μιά απ τις ιδιότητες των σεισμικών κυμάτων ουράς (Aki and Chouet, 1975; Sato, 1977a,b).

Η ανάλυση συνίσταται στη μέτρηση της κορυφής των πλατών αναγραφής σε διάστημα 5 δευτερολέπτων κατά μήκος του σειсмоγράματος με την βοήθεια μεγενθυντικού φακού και με την χρήση της καμπύλης απόκρισης του σεισμομέτρου, μετατρέπονται σε πλάτη ταχύτητας. Κατόπιν υπολογίζεται η τιμή της τετραγωνικής ρίζας, της μέσης τιμής των τετραγώνων αυτών των πλατών, (RMS), που χρησιμοποιούνται στην τελική σχέση (6). Στο ίδιο διάστημα των 5 δευτ. έγινε και η μέτρηση της δεσπόζουσας συχνότητας. Ο χρόνος διαδρομής αναφέρεται στο μέσο αυτού του διαστήματος των 5 δευτ. απ την γέννηση του σεισμού. Η δεσπόζουσα περίοδος του σήματος μπορεί να μετρηθεί σχετικά εύκολα μετρώντας τον αριθμό των σημείων των πλατών που τέμνουν τον μηδενικό άξονα μέσα σε ένα διάστημα 5 δευτ., και διαίρεση αυτού του αριθμού των σημείων με το διπλάσιο του χρονικού παραθύρου που εξετάστηκε, (Herrmann 1980; Jin and Aki 1988). Στο σχήμα 3, φαίνεται η σχέση της δεσπόζουσας συχνότητας σε σχέση με τον χρόνο διαδρομής. Το συνολικό τμήμα του σεισμογράματος που εξετάζεται αρχίζει μετά την διεύλεση των εγκαρσίων κυμάτων περίπου $1.5t_0$, όπου t_0 είναι ο χρόνος διαδρομής των εγκαρσίων κυμάτων έως ότου ο λόγος σήματος θορύβου γίνει ίσος με 3, σχήμα 4. Παράδειγμα της ποσότητας $\log_{10}(\text{RMS}(A t))$, σε σχέση προς τον χρόνο διαδρομής, που χρησιμοποιούνται στην τελική σχέση (6), φαίνεται στο σχήμα 5.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η μέση τιμή του παράγοντα ποιότητας Q^{-1} που υπολογίστηκε για την περιοχή γύρω απ τον σταθμό των Αθηνών είναι $6.92 \times 10^{-3} \pm 2.8 \times 10^{-3}$. Στο σχήμα 6, φαίνεται το ιστόγραμμα των τιμών του παράγοντα ποιότητας Q^{-1} , που υπολογίστηκαν. Η σχετικά μεγάλη τυπική απόκλιση που παρατηρήθηκε μπορεί να αποδοθεί στις τόπικές γεωλογικές μεταβολές που διαπέρασαν τα κύματα ουράς στην εν λόγω περιοχή. Η τιμή αυτή μπορούμε να πούμε ότι αφορά στη συχνότητα του 1Hz, γιατί το συχνοτικό περιεχόμενο του συνόλου των δεδομένων που εξετάστηκαν ποικίλει απο 0.6 έως 1.8Hz, σχήμα 7, όπως άλλωστε έχει συμβεί και σε άλλες αντίστοιχες εργασίες (Singh and Herrmann, 1983; Herráiz and Mezcua, 1984; Jin et al. 1988; Cónas et al. 1988).

Επίσης η τιμή του Q^{-1} που βρέθηκε είναι σε απόλυτη συμφωνία με την τιμή του δρόμου ελεύθερης διαδρομής των σεισμικών κυμάτων που υπολογίστηκε για το ίδιο σύνολο σεισμών σε 98Km, απο τον Μπασκούτα και άλλους, (υπό έκδοση 1992). Αν υποθέσουμε ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων στην επιφάνεια ίση με 3.5 km/s (Κηφισκή Βιβλιοθήκη Θεσσαλονίκης - Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ - που

προτείνουν οι Sheng και Gao (1988), ο χρόνος ελεύθερης διαδρομής είναι 96Km. Παρόλο που η εργασία αυτή αφορά μέθοδο επεξεργασίας δεδομένων, και περίπτωση εφαρμογής της, αν θέλαμε να σχολιάσουμε τη φυσική σημασία του παραγοντα Qc^{-1} της ουράς των σεισμικών κυμάτων και την επιλογή της παραπάνω σχέσης, μπορούμε να αναφέρουμε τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών σε διάφορες περιοχές του κόσμου (Rautian and Khalturin 1978; Aki, 1980; Pulli et al. 1984), που προτείνουν ότι ο παραγοντας Q για συχνότητες μικρότερες από 3Hz συμπίπτει με τον Qs .

Τέλος μπορούμε να αναφέρουμε ότι η τιμή αυτή συμπίπτει με τιμές που υπολογίστηκαν σε άλλες περιοχές του κόσμου, σεισμικά ενεργές, (Herrmann, 1980; Singh et al., 1983; Pulli, 1984).

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aki K., 1969. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. *J. Geophys. Res.*, 74, 615-631.
- Aki K. and Chouet B., 1975. Origin of coda waves: Source, attenuation and scattering effects. *J. Geophys. Res.*, 80, 3322-3342.
- Aki K. 1980. Scattering and attenuation of shear waves in the lithosphere. *J. Geophys. Res.*, 85, 6496-6504.
- Baskoutas I., Makropoulos K., Kouskouna V. and Drakopoulos J. 1989. Evaluation of seismic Q , in central Greece from local events. *Proceedings of the 4th International Symposium on the Analysis of Seismicity and Seismic Risk. Czechoslovakia.*
- Baskoutas I., Makropoulos K. and Sato H. 1991. Mean free path under central Greece. *Tectonophysics*, (in press).
- Canas J., Egozcue J. and Pujades L. 1988. Seismic attenuation in southern Mexico using the coda Q method. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 78, 5, 1807-1817.
- Chen P., Nuttli O., Ye W. and Qin J., 1984. Estimates of short period Q values and seismic moments from coda waves for earthquakes of the Beijing and Yun-Nan Regions of China. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 74, 4, 1189-1207.
- Del Pezzo E., Ferulano F. and Martini M., 1983. Attenuation of short period seismic coda waves in the Aeolian Islands - Southern Italy. *Bull. Geof. Teor. Appl.* 25, 45-51.
- Herreraiz M. and Mezcua R., 1982. Un nuevo enfoque el estudio de datos microsismicos basando en el analisis de codas. *Rev. De Geofisica*, 38, 167-178.
- Herreraiz M. and Mezcua R., 1984. Application of coda waves analysis to microearthquake analog data. *Anales Geophys.* 2, 5, 545-552.
- Herreraiz M. and Espinoza A. F., 1987. Coda waves: A Review, *Pure Appl. Geophys.*, 125, 499-577.
- Herrmann, R. B., 1980. Q estimates using the coda of local earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 70, 447-468.
- Jin A. and Aki K., 1988. Spatial and Temporal correlation between coda Q and seismicity in China. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 78, 741-789
- Εθνική Βιβλιοθήκη Γεωγραφίας - Τμήμα Γεωλογίας. Α.Π.Θ.

- Pullii J. J., 1984. Attenuation of coda waves in the New England. Bull. Seism. Soc. Am., 74, 1149-1166.
- Rautian T., Khalturin K., 1978. The use of coda for determination of the earthquake source spectrum. Bull. Seismol. Soc. Amer., 68, 923-943.
- Sato H., 1977a. Energy propagation including scattering effects; single isotropic scattering approximation. J. Phys. Earth, 25, 27-41.
- Sato H., 1977b. Single isotropic scattering model including wave conversions; Simple theoretical model of the short period body waves propagations. J. Phys. Earth, 25, 163-176.
- Sato H., 1978. Mean free path of S-waves under the Kanto district of Japan. J. Phys. Earth, 26, 185-198
- Shang T., Gao L., 1988. Transportation theory of multiple scattering and its application to seismic coda waves of impulse source. Scientia Sinica (series B) Vol. XXXI No 12.
- Singh S. and Herrmann B., 1983. Regionalization of crustal coda Q in the continental United States. J. Geophys. Res., 88, 527-538