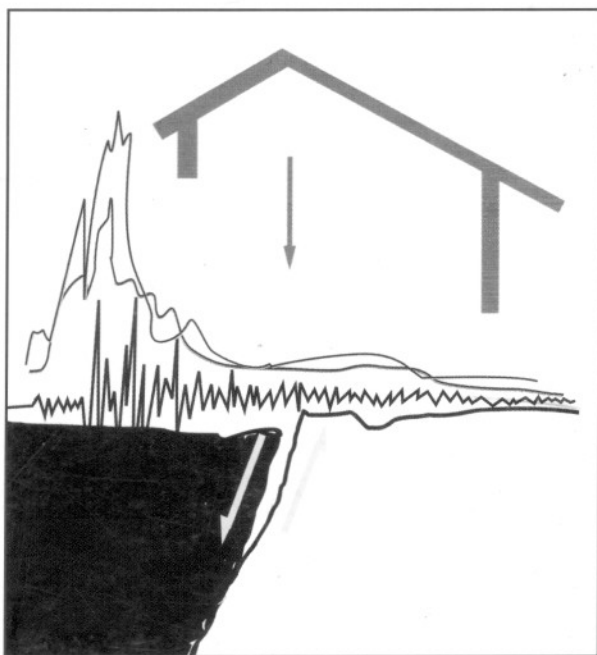


Πρακτικά Διεθνούς Επιστημονικού Συνεδρίου

**Ο ΣΕΙΣΜΟΣ ΤΗΣ 13^{ΗΣ} ΜΑΪΟΥ 1995
ΚΟΖΑΝΗΣ - ΓΡΕΒΕΝΩΝ:
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ
ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ**



Περιφέρεια Δυτ. Μακεδονίας
Νομαρχιακές Αυτοδιοικήσεις
Κοζάνης και Γρεβενών

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΒΙΒΛΙΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΓΝΩΣΗΣ
Κοζάνη 1998

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ Q ΑΠΟ ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΟΥΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΣ ΤΗΣ 13 ΜΑΪΟΥ 1995.

Ι. Γ. ΜΠΑΣΚΟΥΤΑΣ, Γ. Ν. ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ, Ι. Σ. ΚΑΛΟΓΕΡΑΣ

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών - Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, Τ.Θ.20048 -118 10 Θησείο - ΕΛΛΑΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εκτίμηση της εξασθένησης των σεισμικών κυμάτων στο μέσο διάδοσης, όπως είναι η Γη, είναι γενικά ένα δύσκολο αντικείμενο. Ιδιαίτερα αυτή η δυσκολία γίνεται μεγαλύτερη όταν για την εκτίμηση της εξασθένησης χρησιμοποιούνται σειсмоγράμματα στο φάσμα των υψηλών συχνοτήτων. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της ευαισθησίας τους στη ανομοιογενή δομή της Γης. Η λύση στο παραπάνω πρόβλημα είναι η στατιστική αντιμετώπιση των ανομοιογενειών του μέσου διάδοσης με τη χρήση μοντέλων απλής διασποράς των σεισμικών κυμάτων ουράς στο μέσο διάδοσης.

Η πιο ευρεία υπόθεση για τη φύση των σεισμικών κυμάτων ουράς που προτάθηκε από τους Aki και Chouet (1974) και αργότερα επεκτάθηκε από τον Sato (1977), είναι γνωστή και σαν μοντέλο της απλής και ισότροπης διασποράς. Σε αυτή την υπόθεση τα σεισμικά κύματα ουράς θεωρούνται δευτερογενή εγκάρσια κύματα που έχουν υποστεί διασπορά από ανομοιογένειες ή αλλιώς διασπορείς που βρίσκονται στο μέσο διάδοσης και χαρακτηρίζονται από μια τυχαία και ισότροπη κατανομή.

Σε αυτό το μοντέλο ο ποιοτικός παράγοντας εξασθένησης Q είναι μια παράμετρος που χαρακτηρίζει την κλίση των φθινόντων πλατών των κυμάτων ουράς, δηλαδή με άλλα λόγια είναι ένας δείκτης της ελάττωσης του πλάτους των κυμάτων ουράς, άρα της ενέργειας, εξαιτίας της εξασθένησης τους στο μέσο διάδοσης.

Εξ ορισμού ο παράγοντας Q περιλαμβάνει όλες τις δυνατές απώλειες της ενέργειας κατά μήκος της διαδρομής του σεισμικής ακτίνας, όπως είναι κυρίως η ανακατανομή ή η απόσβεση της ενέργειας.

Το Q που υπολογίζεται με τα μοντέλα της απλής διασποράς είναι μια μέση τιμή και αφορά σε συγκεκριμένο χώρο, ο οποίος υπό μορφή έλλειψης περιλαμβάνει την σεισμική πηγή και τον δέκτη (σειсмоγράφο) επίσης αυτή η μέση τιμή εκφράζει το άρθροισμα των παραγόντων διασποράς και απόσβεσης.

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι, πρώτον η εκτίμηση του ποιοτικού παράγοντα εξασθένησης Q_c στην πλειόσειστη περιοχή της Κοζάνης. Δεύτερον η εξέταση της όποιας χρονικής μεταβολής κατά την περίοδο της εξέλιξης του φαινομένου.

ΜΕΘΟΔΟΣ

Η σχέση που αρθροίζει τις ιδιότητες των σεισμικών κυμάτων ουράς μπορεί να γραφεί στην απλή μορφή που ακολουθεί:

$$A(\omega, t) = C(\omega) S(\omega, t) \quad (1)$$

όπου $C(\omega)$ είναι ένας όρος που εξαρτάται από τις ιδιότητες της σεισμικής πηγής καθώς επίσης από την εδαφική απόκριση στον σταθμό και $S(\omega, t)$ περιγράφει την εξασθένηση των σεισμικών κυμάτων ουράς.

Στο μοντέλο της απλής και ισότροπης διασποράς του Sato (1977) η μέση πυκνότητα της ενέργειας των σεισμικών κυμάτων ουράς E μπορεί να περιγραφεί με την ποσότητα RMS ή άλλως την τετραγωνική ρίζα των μέσων τετραγώνων των πλατών των σεισμικών κυμάτων ουράς:

$$E_{\text{sis}} = |A|^2$$

Αναπτύσσοντας του γενικούς όρους $C(\omega)$ και $S(\omega, t)$ καταλήγουμε στη σχέση:

$$A \propto \frac{C(\omega)}{r} \sqrt{K \left(\frac{vt}{r} \right)} e^{-\frac{\omega t}{2Q_c}} \quad (2)$$

Σε αυτή τη τελευταία ο όρος $C(\omega)$ θεωρείται σταθερός μετά από την παραδοχή ότι αφορά μικρούς τοπικούς σεισμούς, αζιμουθιακά κατανομημένους γύρω από ένα σεισμολογικό σταθμό, ώστε οι ιδιότητες της σεισμικής πηγής να μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι κοινές. Η συνάρτηση K περιγράφει την γεωμετρική εξασθένηση του Sato οι οποία χαρακτηρίζει μια επιπρόσθετη μείωση των πλατών αμέσως μετά την διέλευση των εγκαρσίων κυμάτων. Τέλος ο τελευταίος όρος περιέχει τον ποιοτικό παράγοντα εξασθένησης Q .

Λογαριθμίζοντας τη σχέση (2) καταλήγουμε στη σχέση:

$$\log_{10} A = C - \log_{10} t - 1/Q [\pi f \log_{10} e] t \quad (3)$$

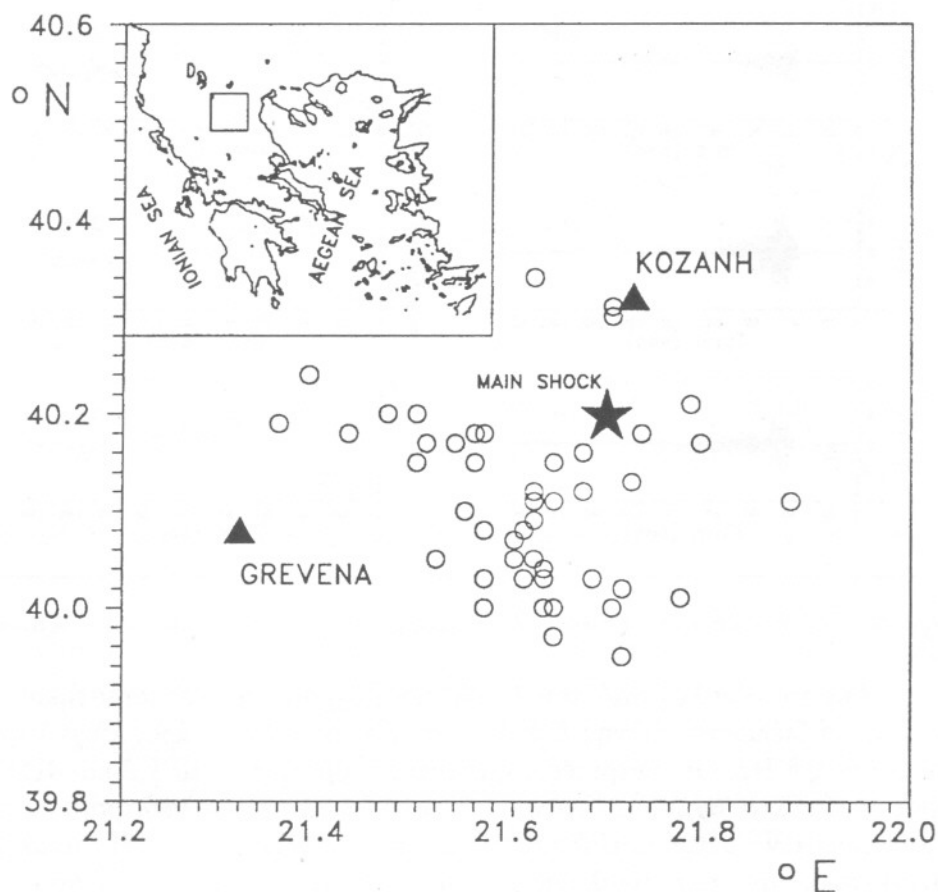
από την οποία μπορεί να υπολογισθεί το Q , με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ - ΑΝΑΛΥΣΗ

Για τον υπολογισμό του Q χρησιμοποιήθηκαν 80 μετασεισμοί της σεισμικής ακολουθίας του σεισμού των Γρεβενών - Κοζάνης, με μεγέθη που ποικίλουν από 3 έως 4.2 Richter.

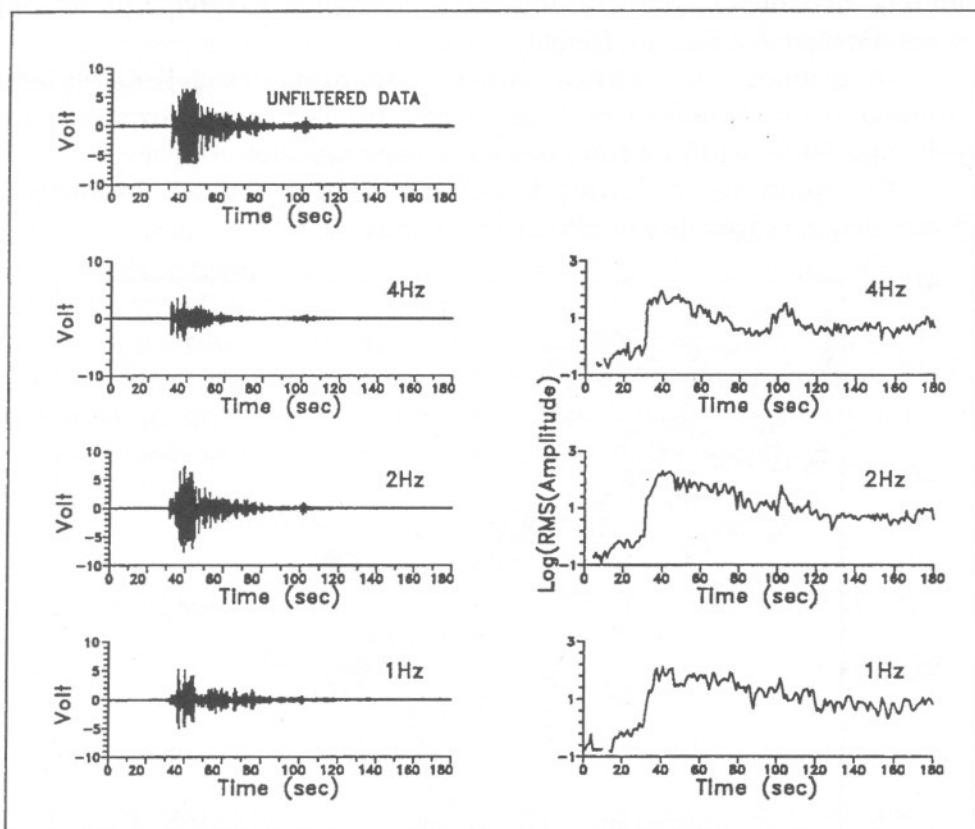
Οι σεισμοί αυτοί καταγράφηκαν στο σταθμό της Κοζάνης που λειτουργεί στη πόλη από το 1972 και ανήκει στο δίκτυο σειсмоγράφων του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.

Στο χάρτη του σχήματος 1, φαίνεται η κατανομή των επικέντρων των σεισμών που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη.



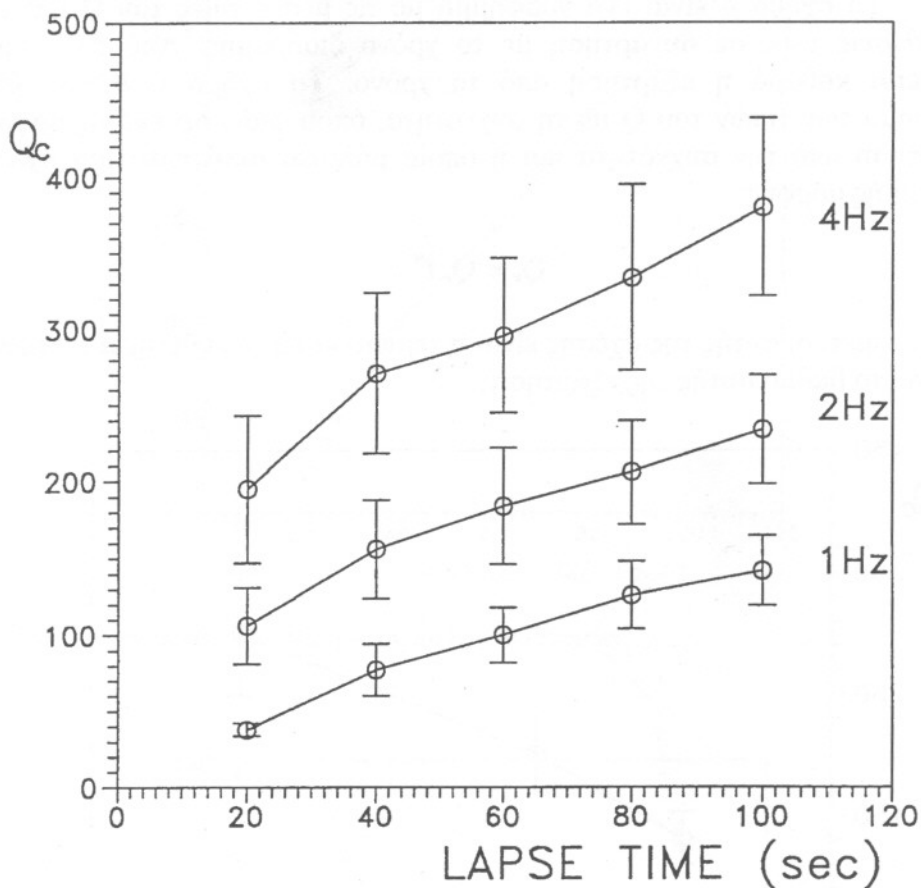
Σχήμα 1. Κατανομή επικέντρων των σεισμών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.

Στο σχήμα 2, φαίνεται ένα τυπικό σεισμόγραμμα σε ψηφιακή μορφή που καταγράφηκε στο σταθμό. Η μετατροπή από αναλογική σε ψηφιακή μορφή έγινε με μια δειγματοληψία 60 δειγμάτων το δευτερόλεπτο και ακρίβεια μετατροπής 0.4% ή 8 bits.



Σχήμα 2. Παράδειγμα ενός τυπικού σειсмоγράμματος από το σταθμό της Κοζάνης.

Για τον υπολογισμό του Q τα σεισογράμματα φιλτραρίστηκαν με ένα φίλτρο διέλευσης ζώνης 8 πόλων σε ένα συνολικό εύρος συχνότητας από 0.5 έως 8 Hz. Οι κεντρικές συχνότητες f_c ορίστηκαν τα 1, 2 και 4 Hz με εύρος $0.5f_c$. Στο σχήμα 3 φαίνονται παραδείγματα των φιλτραρισμένων κυματομορφών στις αντίστοιχες κεντρικές συχνότητες. Η ανάλυση συνεχίστηκε με τον υπολογισμό της ποσότητας RMS, δηλαδή της τετραγωνικής ρίζας των μέσων τετραγώνων των πλατών. Στο ίδιο σχήμα 3 φαίνονται τα γραφήματα αυτής της ποσότητας σε κάθε συχνότητα, που αντιστοιχεί στην ποσότητα $\log_{10} A$ της σχέσης 3.



Σχήμα 3. Γράφημα της ποσότητας $\log_{10}(\text{RMS}(A))$ σε σχέση με το χρόνο διαδρομής.

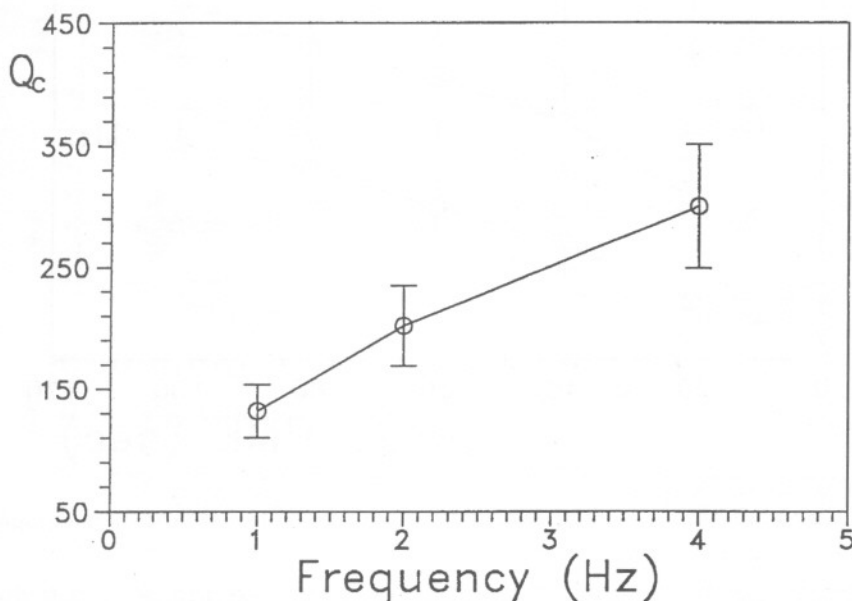
Έτσι με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζεται η κλίση στο επιλεγμένο παράθυρο χρόνου και ακολούθως ο παράγοντας ποιότητας Q . Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ανάλυση έγινε σε σχέση με τον χρόνο διαδρομής σε επικαλυπτόμενα παράθυρα χρόνου κάθε 20 δεύτερα. Ως αρχή της ανάλυσης ορίστηκε ο διπλάσιος χρόνος διαδρομής των εγκαρσίων κυμάτων, $2t_s$, ώστε να εξασφλιστεί η συνθήκη ότι τα κύματα ουράς αφορούν δευτερογενή σεισμικά κύματα.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το σχήμα 4 είναι ένα γράφημα με τις μέσες τιμές του Q και τις αποκλίσεις τους σε συνάρτηση με το χρόνο διαδρομής. Από το σχήμα φαίνεται καθαρά η εξάρτηση από το χρόνο. Το σχήμα 6 δείχνει ένα γράφημα των τιμών του Q με τη συχνότητα, όπου φαίνεται επίσης σαφώς εξάρτηση από την συχνότητα και η οποία μάλιστα ακολουθεί μια σχέση εκθετικής μορφής:

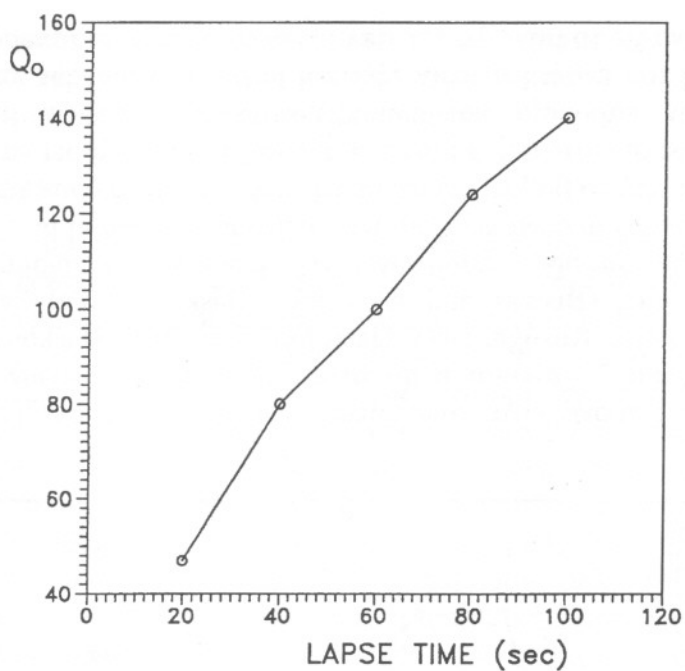
$$Q_c = Q_0 f^n$$

Οι παράμετροι αυτής της σχέσης είναι η τέμνουσα και ο εκθέτης n ο οποίος δείχνει το βαθμό αυτής της εξάρτησης.

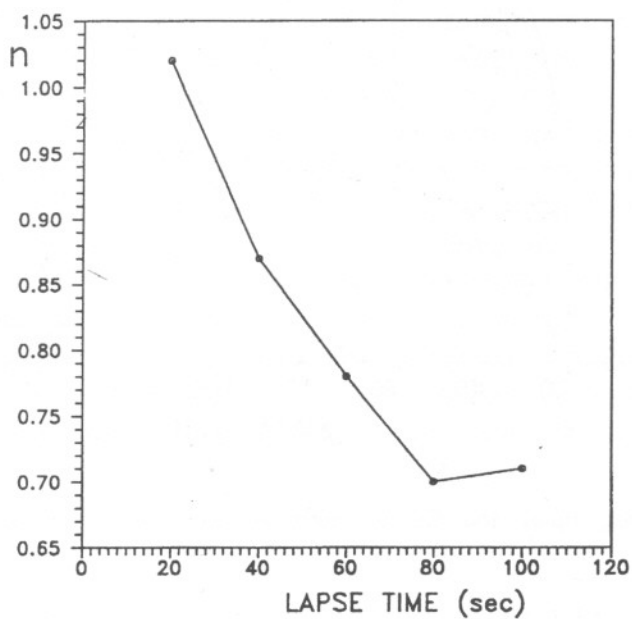


Σχήμα 4. Υπολογισμένες τιμές του Q_c σε σχέση με το χρόνο διαδρομής. Οι κάθετες γραμμές δείχνουν τη τυπική απόκλιση από τη μέση τιμή.

Στο σχήμα 5 φαίνονται οι τιμές του Q_0 οι οποίες ποικίλουν από 47 έως 160. Στο σχήμα 6 φαίνονται οι τιμές του n που ποικίλουν από 1.02 έως 0.76. Μία γενική παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι καθώς το παράθυρο χρόνου αυξάνει το μέν Q_0 αυξάνει ο δε εκθέτης n μειώνεται.



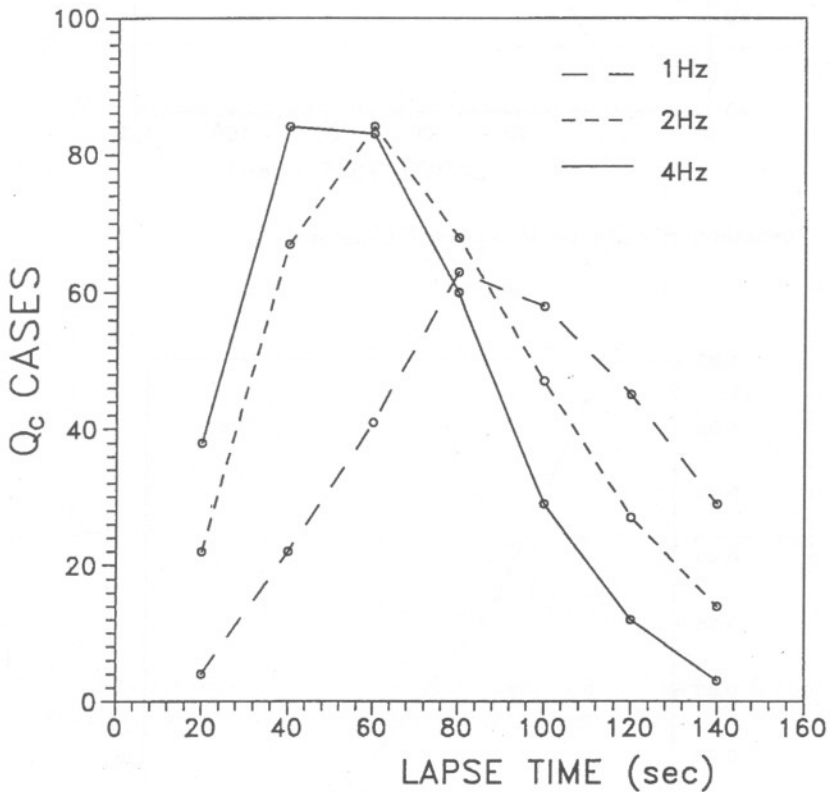
Σχήμα 5. Συνάρτηση του Q_o με το χρόνο διαδρομής.



Σχήμα 6. Συνάρτηση του η με το χρόνο διαδρομής.

Σύμφωνα με το μοντέλο της απλής και ισότροπης διασποράς αυτή η γενική μείωση του εκθέτη n στην εξέταση μεγάλων χρονικών παραθύρων αντανακλά την παρουσία και επικράτηση ανομοιογενειών με μικρού μήκους κύματος συνιστώσες. Επίσης, η αύξηση του Q_0 μπορεί να αποδοθεί στην εξάρτηση από το βάθος, καθώς με την πάροδο του χρόνου τα σεισμικά κύματα διασκοπούν ολοένα και βαθύτερα στρώματα, δηλαδή με άλλα λόγια μια τέτοια συμπεριφορά υποδηλώνει την μείωση των ανομοιογενειών μεγάλης κλίμακας, (Biswas and Aki 1984; Baskoutas and Sato, 1989; Ibanez et al., 1990a; Kosuga, 1991; Hatzidimitriou, 1993; Baskoutas, 1996).

Στο σχήμα 7 φαίνεται η ποσότητα των υπολογισμένων τιμών σε συνάρτηση με το χρόνο, είναι σαφές όπως αναμένεται άλλωστε η απώλεια



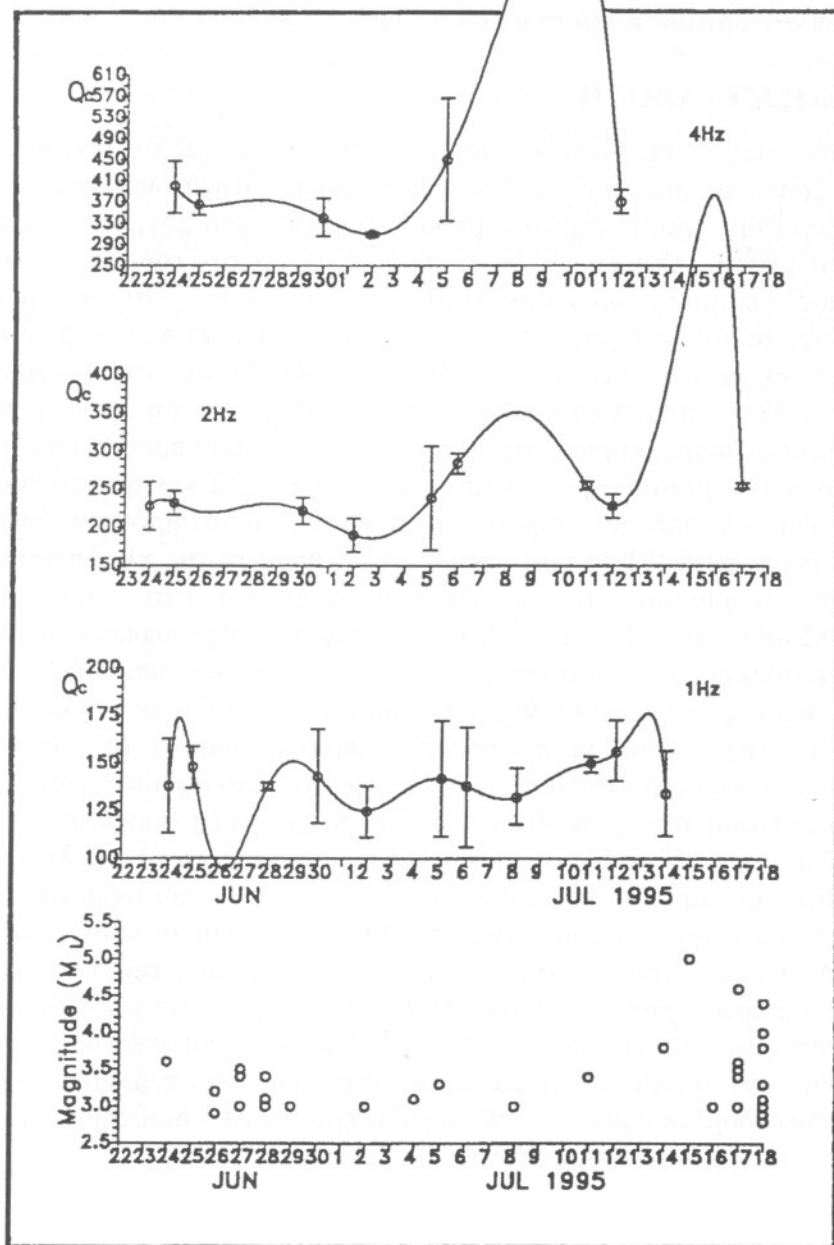
Σχήμα 7. Αριθμός τιμών του Q_c σε κάθε κεντρική συχνότητα σε σχέση με το χρόνο διαδρομής.

της ενέργειας στις υψηλές συχνότητες με την απόσταση. Είναι γνωστό ότι η κλίμακα του μήκους των ανομοιογενειών είναι μεγάλη στις χαμηλές

συχνότητες έτσι φαίνεται λογικό ότι ο παράγοντας Q στις χαμηλές συχνότητες εξαρτάται περισσότερο από την διασπορική ικανότητα των επιφανειακών στρωμάτων παρά των βαθύτερων.

ΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ

Ως ανομοιογένειες, βάση των μοντέλων της διασποράς της ενέργειας θεωρούνται ζώνες με διαφορετική πυκνότητα και ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, επίσης περιοχές όπου υπάρχει έντονη ρηγμάτωση και πτύχωση του μέσου. Από την άλλη πλευρά είναι γνωστό πως κατά την διάρκεια μιας σεισμικής δραστηριότητας έχουμε το σχηματισμό νέων ρωγματώσεων, το άνοιγμα παλαιών, καθώς επίσης και κίνηση υγρών ή αερίου μέσα σε αυτές. Στη διεθνή βιβλιογραφία (Sato, 1988) έχουν αναφερθεί πολλές περιπτώσεις χρονική μεταβολής του ποιοτικού παράγοντα εξασθένησης, κυρίως στη μέση τιμή του Q_c των προσεισμών σε σχέση με αυτή των μετασεισμών. Έτσι η παρουσία αλλά και η κατανομή των ρωγματώσεων, από μια σημαντική σεισμική δραστηριότητα όπως αυτής των Γρεβενών-Κοζάνης, για την ευρύτερη περιοχή της πλειόσειστης περιοχής, θα μπορούσαν να προκαλέσουν μεταβολές στην τιμή του παράγοντα εξασθένησης. Στη μελέτη αυτή εξετάσαμε την περίπτωση της χρονικής μεταβολής του παράγοντα Q , την οποία θα μπορούσε να προκαλέσει κυρίως η ανομοιογενής κατανομή των εστιών των χιλιάδων μικροσεισμών στην ευρύτερη πλειόσειστη περιοχή, παρότι το χρονικό διάστημα είναι πολύ μικρό για τέτοια είδους μελέτη. Στο σχήμα 8 φαίνεται η χρονική κατανομή του Q σε συνάρτηση με το χρόνο (η συσχέτιση έχει γίνει με πολυώνυμο 3^{ου} ή 5^{ου} βαθμού, εξαρτώμενη από την τη καλύτερη δυνατή λύση), και παράλληλα φαίνεται (στο κάτω μέρος του σχήματος) η χρονική κατανομή των σεισμών πάνω από 4.0 Richter για το ίδιο χρονικό διάστημα. Από τη σύγκριση, είναι σαφής μια τάση της αύξησης της τιμής του Q_c στη κεντρική συχνότητα των 4Hz που προηγείται της σεισμικής δραστηριότητας της 16^{ης} έως και 18^{ης} Ιουλίου. Πάντως είναι γεγονός ότι για να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα χρειάζεται η ανάλυση πολύ περισσότερων δεδομένων μέσα σε ένα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Όμως αυτό το αποτέλεσμα είναι ενθαρρυντικό για παραπέρα μελέτη.



Σχήμα 8. Χρονική κατανομή των μέσων τιμών του Q_c σε διάστημα ενός μήνα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aki, K. and Chouet, B. A., (1975). Origin of coda waves: source, attenuation and scattering effects. *J. Geophys. Res.*, Vol. 80, 3322-3342.
- Baskoutas, I., and Sato, H. (1989). Coda attenuation for 4 to 64Hz in the crust measured at Ashio, Japan. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 31, 277-283.
- Biswas, N. N., and Aki, K. (1984). Characteristics of coda waves: Central and south-central Alaska. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 74, 493-507.
- Hatzidimitriou, P. M. (1993), Attenuation of coda waves in northern Greece. *Pageoph*, 140, 63-78
- Ibanez, J.M., E. Del Pezzo, F. De Miguel, M. Herraiz, G, Alguacil and J. Morales. 1990a. Depth dependence seismic attenuation in Granada zone (South Spain). *Bull. Seism.Soc. Am.*, 80, 1232-1244.
- Kosuga, M. (1991). Dependence of Coda Q on frequency and lapse time in the western Nagano region, Central Japan. *J. Phys. Earth*, 40, 421-445.
- Sato, H. (1977). Energy propagation including scattering effects single isotropic scattering approximation. *J. Phys. Earth*, 25, 27-41.
- Sato H. (1988). Temporal change in scattering and attenuation associated with the earthquake occurrence-A review of recent studies on coda waves. *Pageoph*, 126, 465-497.