

ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ

**1ο ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ
ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ**

6.7.8 Μαΐου 1992 — ΕΥΓΕΝΙΔΕΙΟ ΙΔΡΥΜΑ

2ος ΤΟΜΟΣ

ΜΕ ΤΗΝ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ: Ο.Α.Σ.Π. • Ι.Τ.Σ.Α.Κ. • Σ.Π.Μ.Ε.

ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΑΚΡΟΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟ
ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΤΗΣ ΚΥΛΛΗΝΗΣ ΤΟΥ ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ 1988

Θεοδουλίδης Ν., Μάργαρης Β., ΙΤΣΑΚ, Θεσσαλονίκη
Παπασταματίου Δ., ΕΜΠ, Αθήνα
Καλογεράς Ι., Γεωδυναμικό Ινστ. Εθν. Αστεροσκοπείου Αθηνών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρουσιάζονται επεξεργασμένα επιταχυνσιογράμματα και μακροσεισμικές μετρήσεις του σεισμού που έπληξε το 1988 τη χερσόνησο της Κυλλήνης. Γίνεται σύγκριση με το σεισμό παρόμοιου μεγέθους που έπληξε την Καλαμάτα το 1986.

ABSTRACT

We present the analysis of accelerograms from the Kyllini 1988 earthquake in Peloponnese in conjunction with field measurements of observations in the epicentral area of this earthquake. On this basis we compare this earthquake with the similar magnitude shock that hit the town of Kalamata in 1986.

Οι παράμετροι του σεισμού όπως δίνονται από το Εργαστήριο Γεωφυσικής του Α.Π.Θ. είναι (Καρακώστας προσ.επικοινωνία):

Μέγεθος (Ms): 5.9

Συντεταγμένες: 37.90 N, 21.03 E

Βάθος: 8 km

Χρόνος (GMT): Οκτ.16,12:34:05.8

Από την καταγραφή των σεισμικών βλαβών καθορίσθηκε με σαφήνεια η πλειόσειστη περιοχή στη χερσόνησο της Κυλλήνης (Σχ. 1α). Σε αυτήν την περιοχή, εκτός από τις σοβαρές ζημιές, βρέθηκαν μετατοπισμένα αντικείμενα και εμφανίσθηκαν εδαφικές διαταραχές, όπως ρωγμές, τοπικές κατολισθήσεις ενώ έξω από την πλειόσειστη περιοχή παρουσιάσθηκε ρευστοποίηση χαλαρών αποθέσεων στις εκβολές του Πηνειού.

Ο σεισμός καταγράφηκε από όργανα του εθνικού δικτύου επιταχυνσιογράφων που είναι εγκατεστημένα στη Ζάκυνθο, στην Αμαλιάδα και στον Πύργο. Τα πιο αξιόλογα επιταχυνσιογράμματα του κυρίως σεισμού καταγράφηκαν έξω από την πλειόσειστη περιοχή στην Αμαλιάδα (σταθμός Γεωδυναμικού Ινστ. Εθν. Αστ. Αθηνών) και στη Ζάκυνθο (σταθμός ΙΤΣΑΚ). Στον Πύργο καταγράφηκε μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 0.045g. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται επεξεργασμένα τα δύο αυτά αξιόλογα επιταχυνσιογράμματα. Η επεξεργασία περιλαμβάνει τα διορθωμένα επιταχυνσιογράμματα, φάσματα απόκρισης και χρονογράμματα κατά Husid (1969). Σημειώνεται ότι τα παραπάνω επιταχυνσιογράμματα είναι αντιπροσωπευτικά των θέσεων όπου καταγράφηκαν. Για την πλειόσειστη περιοχή του σεισμού της Κυλλήνης παρουσιάζουμε και ορισμένες μακροσεισμικές μετρήσεις.

Τέλος, επιχειρείται μια σύγκριση με το επιταχυνσιογράμμα που καταγράφηκε το 1986 στην πλειόσειστη περιοχή του σεισμού της Καλαμάτας, με παρόμοιο μέγεθος (Ms). Στα πλαίσια αυτής της σύγκρισης γίνεται προσπάθεια αναγωγής του φάσματος απόκρισης του σεισμού της Κυλλήνης στην πλειόσειστη περιοχή. Για το σκοπό αυτό

χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις απόσβεσης φασματικών ταχυτήτων για τον Ελληνικό χώρο (Θεοδουλίδης 1991) καθώς και μακροσεισμικές μετρήσεις υπαίθρου στην περιοχή αυτή.

ΜΑΚΡΟΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Στο Σχ. 1β αποτυπώνονται οι διευθύνσεις μετατοπίσεων αντικειμένων που μετρήθηκαν μετά το σεισμό. Κατά μέσο όρο οι μετατοπίσεις αυτές ήταν της τάξης των 7 cm, με μέγιστα στην περιοχή Βαρβολομιού-Μαχού.

Ο μηχανισμός γένεσης και το σειсмоγόνο ρήγμα του σεισμού της Κυλλήνης προς το παρόν δεν είναι γνωστά. Στο υπαίθρο βρέθηκαν κανονικά ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ που κόβουν πλειοκαινικές αποθέσεις (Vita-Finzi, πρόσ.επικοινων.). Ένα από αυτά σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή στο Σχ. 1β. Η προκαταρκτική ανάλυση σειсмоγραμμάτων δίνει σαν πιθανό μηχανισμό γένεσης ανάστροφη ανάστροφου ρήγματος με διεύθυνση ΒΔ και κλίση προς τα ΒΑ (Καρακώστας, πρόσ.επικοινων.). Η λύση αυτή υποδηλώνει σύνθλιψη σε διεύθυνση ΒΑ και είναι συμβατή με την εφελκυστική έκταση που ενεργοποίησε το τεκτονικό ρήγμα του Σχ. 1β.

Οι διευθύνσεις των μετατοπίσεων δίνουν μια συστηματική αλλαγή εκατέρωθεν νοτιής γραμμής με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Τα ανύσματα των μετατοπίσεων συγκλίνουν προς την γραμμή αυτή και πιθανόν δηλώνουν ανάστροφη κανονικού ρήγματος κοντά στην επιφάνεια. Αυτή η επιφανειακή εκδήλωση ανάστροφου ρήγματος εμφανίσθηκε στους σεισμούς του Friuli της Ιταλίας (Papastamatiou & Asgian, 1986), του 1972 στο Mishan της οροσειράς Ζάγρου στο Ιράν (Berberian and Tchalenko, 1976) και του El Asnam της Αλγερίας (EERI, 1983). Σε παρόμοιο συμπέρασμα καταλήγει και η ανάλυση της μετασεισμικής ακολουθίας του σεισμού της Κυλλήνης από το τοπικό σεισμολογικό δίκτυο (Καρακώστας, πρόσ.επικοινων.). Αυτή η επιφανειακή εκδήλωση θα μπορούσε απλά να αποδοθεί σε μεγαλύτερη κλίση της ανάστροφης κίνησης σε βάθος.

Κοντά στη Μονή Βλαχερνών, ΝΑ της Κυλλήνης, βρέθηκε στη θέση του, αλλά με σπασμένο γυαλί, εικόνα μέσα σε υπαίθριο εικονοστάσι. Εικάζεται ότι η ζημιά έγινε από τη διέγερση σε ταλαντώσεις λόγω του σεισμού του ανηρτημένου καντηλιού του

εικονοστάσιου. Από ένα απλό πείραμα ελεύθερων ταλαντώσεων στο ύπαιθρο προέκυψαν για το συγκεκριμένο καντήλι $T = 1 \text{ sec}$ και $\zeta = 0.0025$. Έτσι θεωρείται ότι η φασματική μετατόπιση για $T = 1 \text{ sec}$ και $\zeta = 0$ στην πλειόσειστη περιοχή του σεισμού υπερέβαινε τα 12 cm. Σε αυτή την ένδειξη θα επανέλθουμε όταν θα συζητήσουμε την αναγωγή των φασμάτων απόκρισης στην πλειόσειστη περιοχή. Στα Καβάσιλα, έξω από την πλειόσειστη περιοχή, παρόμοια μακροσεισμική μέτρηση έδωσε φασματική μετατόπιση για $T=1$ μικρότερη από 5cm.

Σε επίσημα στοιχεία αναφέρονται βαριές ζημιές σε ποσοστό 15% των οικοδομών, σοβαρές ζημιές σε 20% και ελαφρές ζημιές σε 25% των οικοδομών. Σε αυτά τα στατιστικά στοιχεία αντιστοιχεί ένταση VIII της κλίμακας MSK.

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Αντίγραφα των οπτικών καταγραφών των επιταχυνσιογραμμάτων της Ζακύνθου (ZAK88) και της Αμαλιάδας (AML88) παρουσιάζονται στο Σχ. 2. Τόσο αυτό όσο και τα επόμενα σχήματα περιλαμβάνουν και την καταγραφή του σεισμού της Καλαμάτας (KAL86) (Anagnostopoulos et al. 1987). Συγκρίσεις γίνονται κατά τη διάρκεια της παρουσίασης των επεξεργασμένων καταγραφών της Κυλλήνης και πιο συστηματικά στο επόμενο κεφάλαιο. Στο Σχ. 2 όλα τα επιταχυνσιογράμματα είναι στην ίδια κλίμακα χρόνου. Οι καταγραφές της Κυλλήνης δείχνουν δύο ιδιαίτερα χαρακτηριστικά: (α) την εμφάνιση έντονης κατακόρυφης συνιστώσας μετά τη διέγερση του οργάνου και πριν από την άφιξη κυμάτων S στις οριζόντιες συνιστώσες και (β) μεγαλύτερη διάρκεια από αυτήν της Καλαμάτας. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά μπορεί να αλληλοσυνδέονται.

Η επεξεργασία των επιταχυνσιογραμμάτων έγινε στο ΙΤΣΑΚ με την καθιερωμένη διαδικασία (Μάργαρης και συνεργ. 1989). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 3α όπου δίνονται τα εξομαλυμένα φάσματα απόκρισης των δύο οριζοντίων συνιστωσών των δύο καταγραφών του σεισμού της Κυλλήνης. Οι καταγραφές αυτές έγιναν σε αλλοβιακές αποθέσεις και πιθανόν να έχουν επηρεασθεί από αυτές. Πρόσθετες πληροφορίες περιέχονται στα χρονογράμματα του Σχ. 3β. Τα χρονογράμματα δίνουν τη χρονική εξάρτηση του ολοκληρώματος του τετραγώνου της επιτάχυνσης (διάγραμμα Husid

(1969)) και του τετραγώνου της ταχύτητας (σεισμική ενεργειακή ροή της συνολικής καταγραφής της ταχύτητας). Το χρονογράμμα Husid είναι ανηγμένο στην τιμή του ολοκληρώματος για τη συνολική διάρκεια της καταγραφής. Εδώ έχουν περιληφθεί και τα αντίστοιχα χρονογράμματα της καταγραφής της Καλαμάτας. Το χρονογράμμα της Καλαμάτας δείχνει σταθερό ρυθμό ολοκλήρωσης στα πρώτα 3 περίπου sec και φθάνει την ανηγμένη τιμή 0.95 σε 6 περίπου sec. Οι καταγραφές της Κυλλήνης διατηρούν την αρχική μεγαλύτερη κλίση για 2 περίπου sec και φθάνουν την ανηγμένη τιμή 0.95 σε 10 περίπου sec. Η διαφορά αυτή θα μπορούσε να αποδοθεί σε μικρότερη διάρκεια διάρρηξης, σε συνδυασμό με την επίδραση των τοπικών συνθηκών και τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων, ή μόνο στα χαρακτηριστικά της σεισμικής διάρρηξης. Το γεγονός ότι οι αλλαγές στο ρυθμό ολοκλήρωσης είναι ασυνεχείς και συμπίπτουν χρονικά σε καταγραφές από διαφορετικούς σταθμούς (σε διαφορετικές αποστάσεις και διαφορετικό αζιμούθιο ως προς τη σεισμική πηγή καθώς και σε διαφορετικές εδαφικές συνθήκες) μας κάνει να πιστεύουμε ότι οι διαφορετικές φάσεις που υποδηλώνει το Σχ. 3β συνδέονται με πολύπλοκη θραύση του σειсмоγόνου ρήγματος.

Ενας πρόσθετος έλεγχος της επιρροής των τοπικών συνθηκών στο σταθμό της Ζακύνθου δίνεται στο Σχ. 4. Στο σχήμα αυτό δίνονται τα φάσματα απόκρισης, για απόσβεση 5%, των δύο οριζοντίων συνιστωσών καταγραφών από διαφορετικούς σεισμούς (με διαφορετικά μεγέθη, σε διαφορετικές αποστάσεις και αζιμούθια) (θεοδουλίδης 1991). Η επαλληλία αυτή δείχνει κάποια χαρακτηριστική περίοδο γύρω στο 1 sec που, όμως, δεν εμφανίζεται έντονα στο επιταχυνσιόγραμμα του σεισμού της Κυλλήνης και δεν συμφωνεί με τις "ανακλάσεις" του χρονογράμματος ροής σεισμικής ενέργειας του Σχ. 3β.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΤΗΣ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ

Ο σεισμός της Καλαμάτας το 1986, έδωσε παρόμοιας έκτασης πλειόσειστη περιοχή και καταγράφηκε από τους σεισμολογικούς σταθμούς με παρόμοιο μέγεθος. Οι σεισμοτεκτονικές συνθήκες των δύο σεισμών φαίνονται διαφορετικές: ο σεισμός της Καλαμάτας προκλήθηκε από κανονικό ρήγμα και έπληξε περιοχή χωρίς βεβαρυμένο σεισμολογικό ιστορικό. Ο σεισμός της Κυλλήνης προκλήθηκε,

πιθανόν, από ανάστροφο ρήγμα σε περιοχή που έχει επανειλημμένα πλήγει αυτόν τον αιώνα από σεισμούς. Οι κάτοικοι της χερσονήσου της Κυλλήνης ενθυμούνται τέτοιους σεισμούς. Από τον κατάλογο των Κομνηνάκη και Παπαζάχου (1986) προκύπτει ότι η χερσονήσος δοκίμασε εντάσεις VIII το 1910, το 1926 και το 1954.

Όπως ήδη αναφέραμε, τα επιταχυνσιογράμματα τού της Κυλλήνης καταγράφηκαν έξω από την πλειόσειστη περιοχή και δεν είναι αντιπροσωπευτικά της δόνησης που προκάλεσε τις ζημιές στην περιοχή αυτή. Σε αντίθεση, η καταγραφή του σεισμού του 1986 έγινε μέσα στην πόλη της Καλαμάτας. Για πιο σωστή σύγκριση των δύο σεισμών επιχειρήσαμε αναγωγή των φασματικών τιμών των καταγραφών ΖΑΚ88 και ΑΜΛ88 του σεισμού της Κυλλήνης στην πλειόσειστη περιοχή του σεισμού αυτού. Για την αναγωγή χρησιμοποιήσαμε εμπειρικές σχέσεις απόσβεσης που έχουν βασισθεί σε στατιστική ανάλυση επιταχυνσιογραμμάτων σεισμών του Ελληνικού χώρου, για αλλουβιακές εδαφικές συνθήκες (Θεοδουλίδης 1991). Η αναγωγή βασίσθηκε σε εξομαλυμένα φάσματα και δίνεται στο Σχ. 5 με σκιασμένες ζώνες που περιλαμβάνουν όλα τα ανηγμένα φάσματα απόκρισης. Στα ίδια σχήματα δίνονται τα φάσματα της καταγραφής της Καλαμάτας (ΚΑΛ86) για τον αντίστοιχο συντελεστή απόσβεσης, ζ . Τα φάσματα έχουν σχεδιασθεί για $\zeta=0$ και 0.05 και δείχνουν παρόμοια φασματικά πλάτη σε όλες τις περιόδους. Τα ανηγμένα φάσματα δείχνουν επιταχύνσεις της τάξης του 0.30g (για αυτή την ενδεικτική τιμή οι μετατοπίσεις αντικειμένων που μετρήθηκαν στο ύπαιθρο αντιστοιχούν σε συντελεστή ολίσθησης της τάξης του 0.10). Για περίοδο 1 sec και $\zeta=0$ το ανηγμένο φάσμα δίνει φασματική μετακίνηση 7-15 cm, συμβατή με τη μέτρηση υπαίθρου στο εικονοστάσι ΝΑ της Κυλλήνης.

Τα ανηγμένα φάσματα του σεισμού της Κυλλήνης εμφανίζουν εντυπωσιακή ομοιότητα με αυτό της Καλαμάτας αλλά αποτυπώνουν τα μέγιστα πλάτη απόκρισης ελαστικών ταλαντωτών χωρίς να αποδίδουν τα χαρακτηριστικά της ισχυρής κίνησης στο χρόνο. Παρουσιάσαμε ενδείξεις ότι στην πλειόσειστη περιοχή του σεισμού της Κυλλήνης ο εδαφικός κραδασμός πιθανώς να αντιστοιχούσε σε πιο πολύπλοκο μηχανισμό θραύσης του σεισμογόνου ρήγματος. Μια τέτοια διαφοροποίηση χρονικών φάσεων μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες

στην ανελαστική απόκριση των κατασκευών. Ίσως αυτή η διαφοροποίηση συνέβαλε και στην εμφάνιση ρευστοποίησης, που είναι ασυνήθιστο φαινόμενο για σεισμούς αυτού του μεγέθους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

Anagnostopoulos, S.A., Rinaldis, D., Lekidis, V.A., Margaris, V.N. and Theodulidis, N.P., The Kalamata, Greece, Earthquake of September 13, 1986, Earthquake Spectra, 3, 365-402, 1987.

Berberian M. and Tchalenko J.T., Earthquake of S. Zagros (Iran): Bushehr Region (Mishan Earthquake, 2 July 1972) in Contribution to the Seismotectonics of Iran (Part II), Geol. Survey of Iran, Rpt.39, 1976.

Comninakis, P. and Papazachos, B., A catalogue of earthquakes in Greece and the surrounding area for the period 1901-1985, Publ. Geoph. Lab., 1, 1986.

EERI, El-Asnam, Algeria Earthquake of October 10, 1990: A reconnaissance and engineering report, Earth. Eng. Res. Inst., California, 1983.

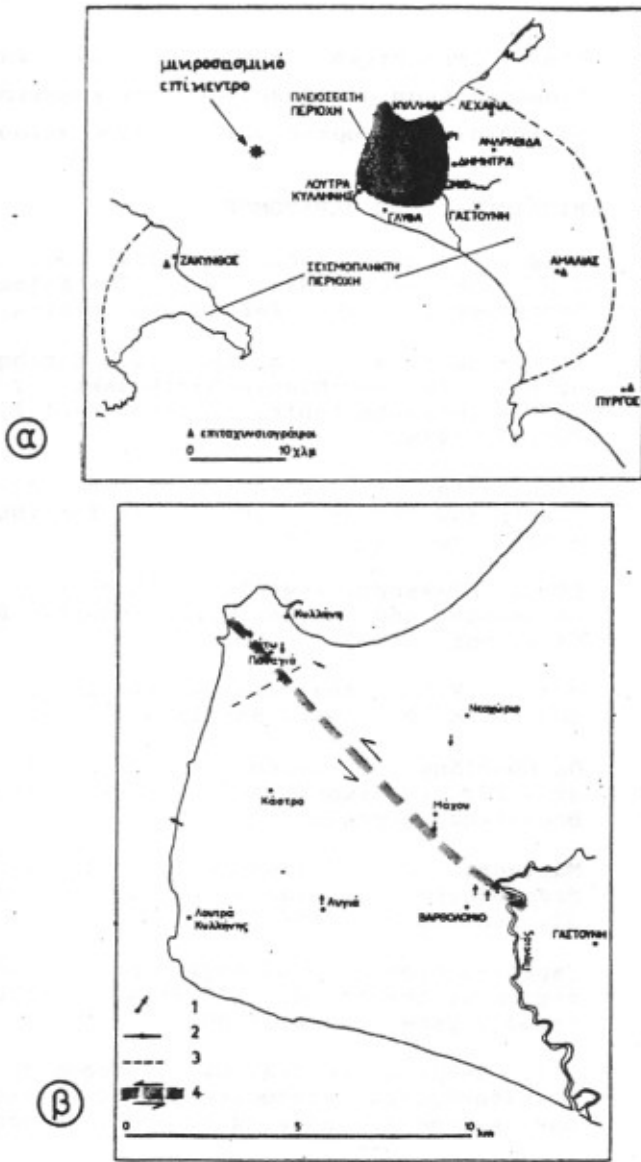
Husid, R.L., Analysis de terremotos: Analysis General, Revista del IDIEM, 8, 21-42, Santiago, Chile, 1969.

Θεοδουλίδης, Ν., Συμβολή στη μελέτη της ισχυρής σεισμικής κίνησης στον Ελληνικό χώρο, Διδακτορική διατριβή, 500 σελ., Πανεπιστήμιο Θεσ/νίκης, Θεσσαλονίκη, 1991.

Μάργαρης, Β., Παπασταματίου, Δ. και Θεοδουλίδης, Ν., ΙΤΣΑΚ: Μεθοδολογία επεξεργασίας επιταχυνσιογραμμάτων, Έργασια ΙΤΣΑΚ:89-02, Θεσσαλονίκη, 1989.

Papastamatiou D. and Asgian M., Ground motion in the epicentral region of the May 6, 1976 Friuli earthquake. Proc. 7th WCEE, Istanbul, paper 2/462, 1980.

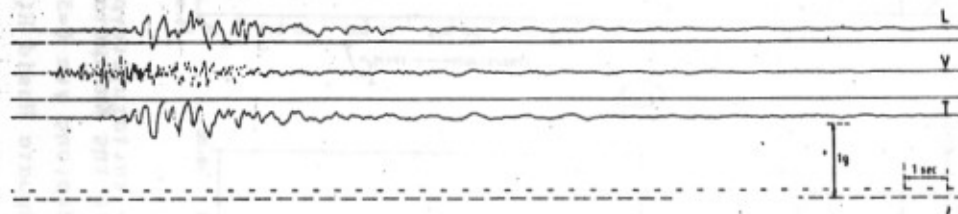
ΤΕΕ, Ενημερωτικό Δελτίο, Οι πρόσφατοι σεισμοί στην Ηλεία και στη Ζάκυνθο-Πρώτες εντυπώσεις από τους σεισμούς από το προσωπικό του Εργ. Αν/κης Τεχνολογίας του ΕΜΠ, Τεύχος 1593, 31 Οκτ., 1988.



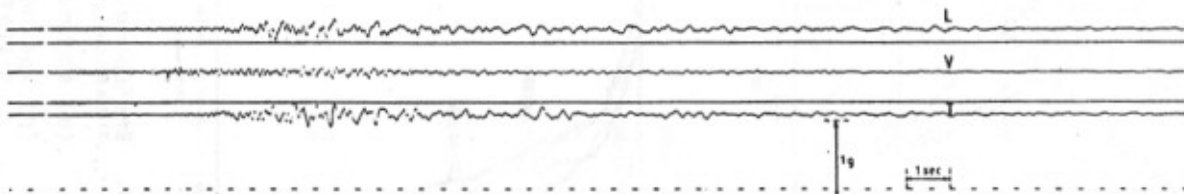
Σχήμα 1. Μακροσεισμικά χαρακτηριστικά του σεισμού της Κυλλήνης το 1988
 (α) Πλειόσειστη και σεισμόπληκτη περιοχή με τις κοντινότερες θέσεις επιταχυνσιογράφων (ΤΕΕ, 1988)
 (β) Πλειόσειστη περιοχή
 1 μετατοπίσεις αντικειμένων
 2 αιωρήσεις αντικειμένων
 3 νεοτεκτονικό κανονικό ρήγμα
 4 ίχνος πιθανής κανονικής διάρρηξης κοντά στην επιφάνεια

Figure 1. Macroseismic features of the Kyllini 1988 earthquake
 (a) Meisoseismal area and area affected by the earthquake with the nearest strong motion stations
 (b) Meisoseismal area
 1 base shift of objects
 2 swinging of objects
 3 neotectonic normal fault
 4 near surface approach of possible normal rupture

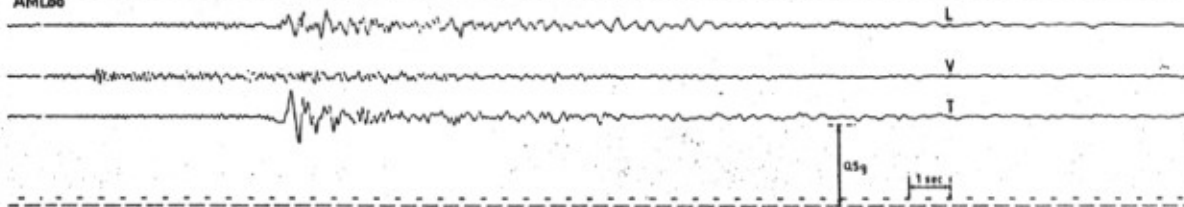
KAL86



ZAK88

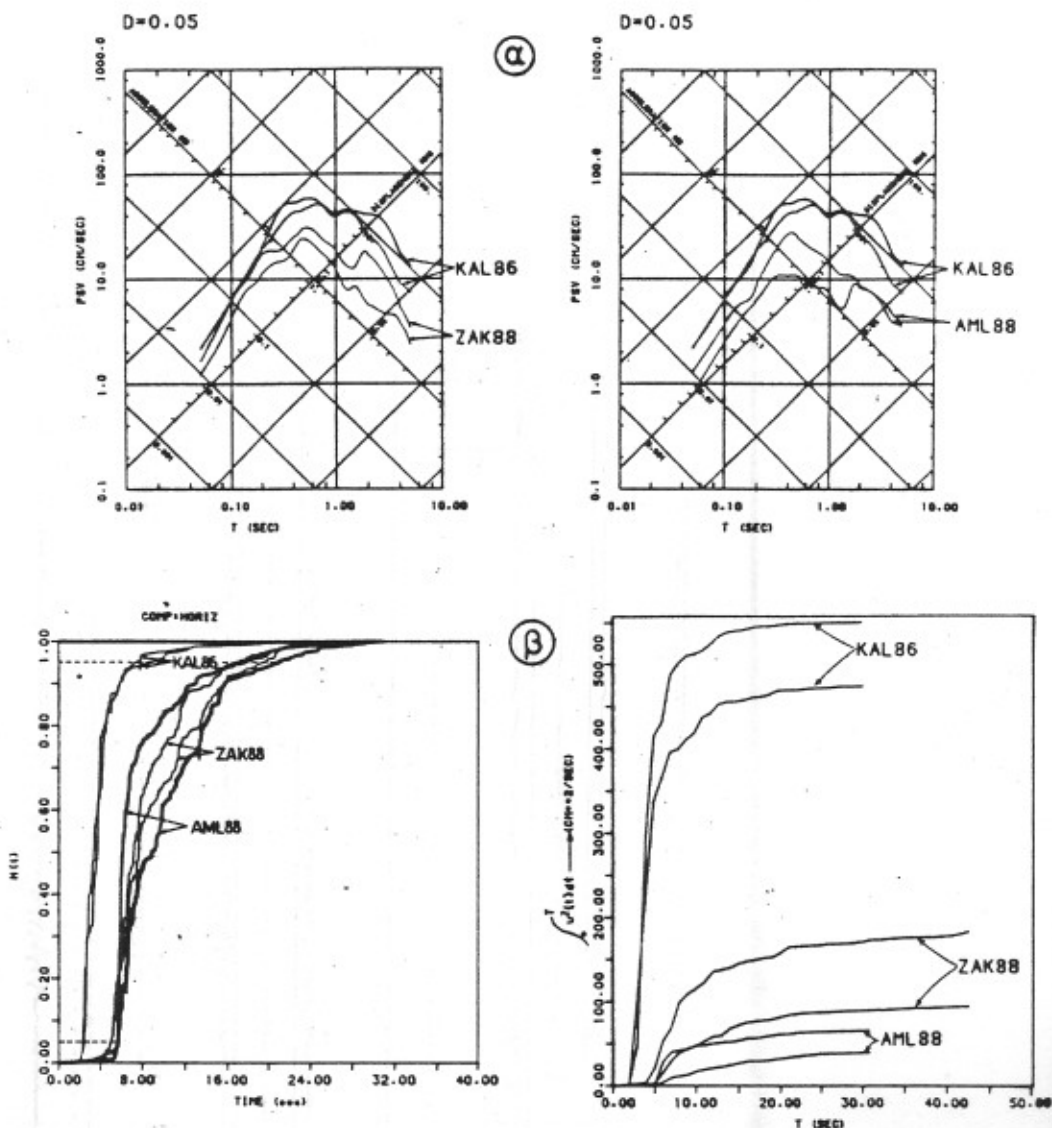


AML88



Σχήμα 2. Οπτικές καταγραφές του σεισμού της Κυλλήνης από τους επιταχυνσιογράφους της Ζακύνθου (ZAK88) και της Αμαλιάδας (AML88) καθώς και του σεισμού της Καλαμάτας (KAL86) το 1986

Figure 2. Optical registrations of the Kyllini earthquake at Zakynthos (ZAK88) and Amalias (AML88) as well as of the Kalamata (KAL86) 1986



Σχήμα 3. Επεξεργασία των επιταχυνσιογραμμάτων ZAK88, AML88 και σύγκριση με αυτό της Καλαμάτας (KAL86)

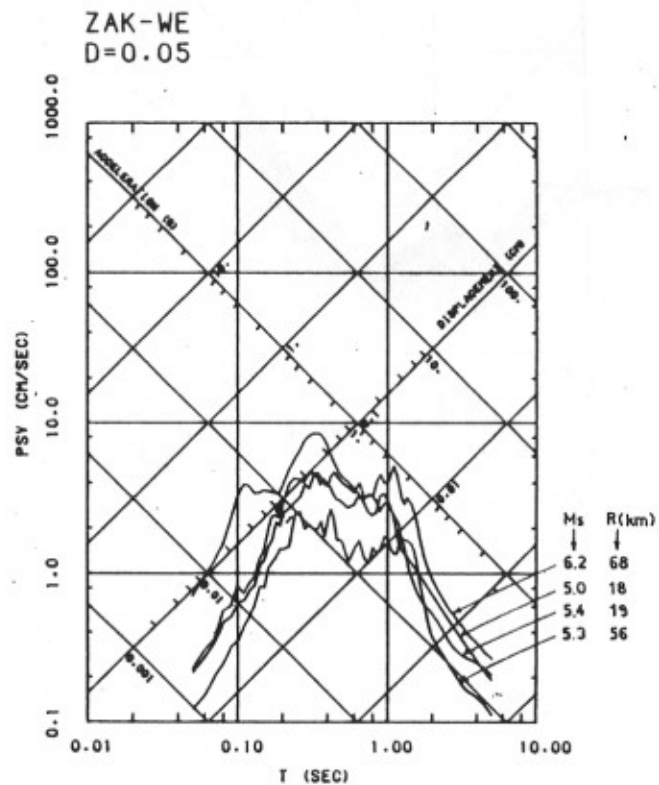
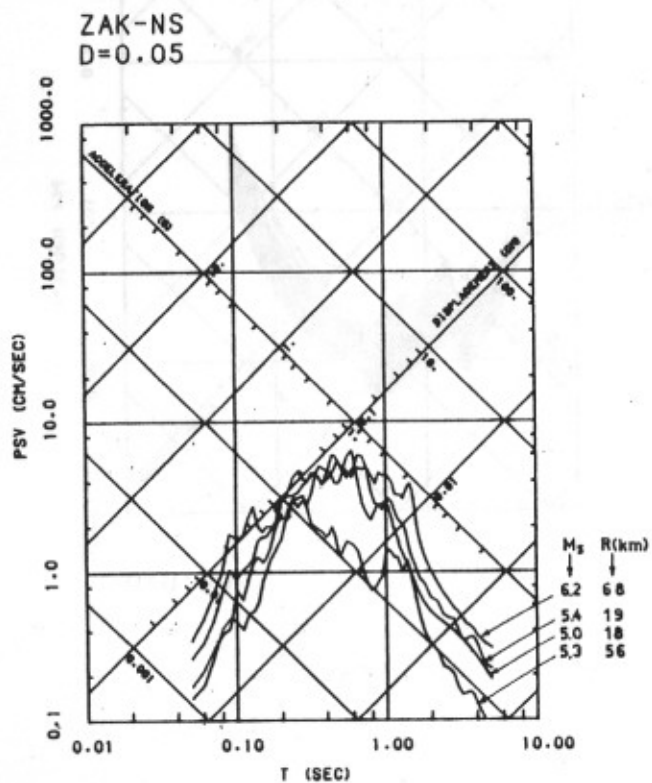
(α) Φάσματα απόκρισης για $\zeta=5\%$

(β) Χρονοδιαγράμματα Husid $H(t)$ και ροής σεισμικής ενέργειας

Figure 3. Processing of the accelerograms ZAK88, AML88 and comparison with those from Kalamata (KAL86)

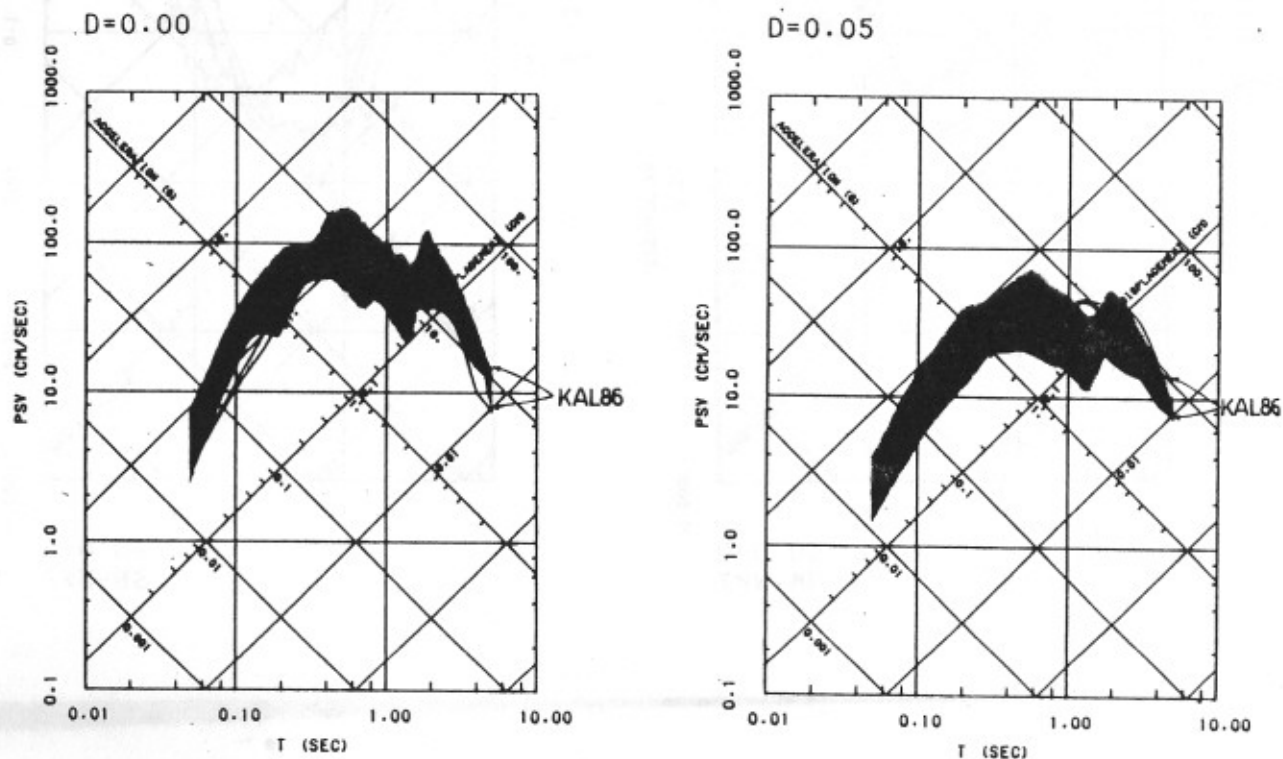
(a) Response spectra for 5% damping

(b) Time history of Husid function and of seismic energy flux



Σχήμα 4. Επαλληλία φασμάτων απόκρισης των δύο οριζοντίων συνιστωσών από διαφορετικούς σεισμούς, στο σταθμό της Ζακύνθου

Figure 4. Overlay of response spectra to the two horizontal components from different earthquakes, at the Zakynthos strong motion station



Σχήμα 5. Σύγκριση των φασμάτων απόκρισης των οριζοντίων συνιστωσών ανηγμένων στην πλειόσεισμη περιοχή του σεισμού της Κυλλήνης (σκιασμένη ζώνη) με αυτά του σεισμού της Καλαμάτας (συνεχόμενη γραμμή)

Figure 5. Comparison of the reconstructed response spectra in the meisseismal area of the Kyllini earthquake (shaded zone) with those recorded in Kalamata (solid line)