

Θ.

**ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ της
ΙΣΧΥΡΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ στις ΘΕΣΕΙΣ
της ΠΛΕΙΟΣΕΙΣΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
(ΘΕΟΔΟΥΛΙΔΗΣ, ΜΑΡΓΑΡΗΣ, ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ,
& ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ)**



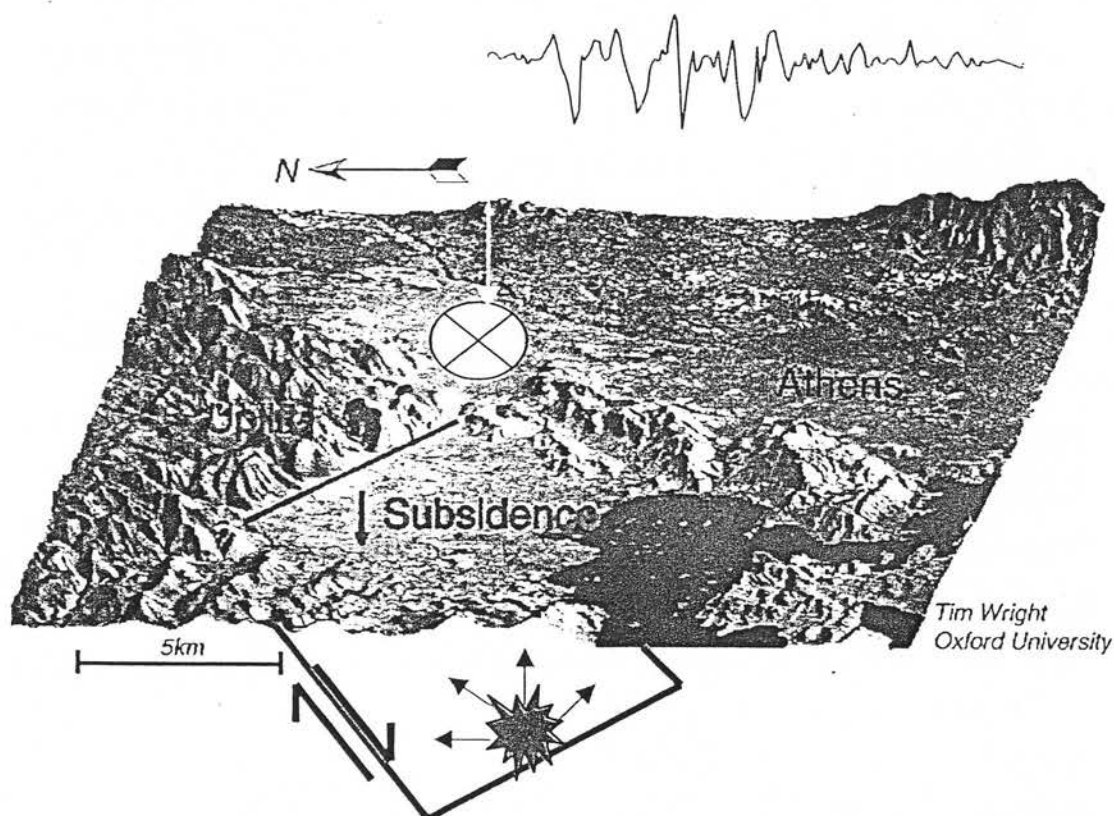
ΙΤΣΑΚ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ & ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
Γεωργικής Σχολής 46, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ - Τηλ. (031) 476081 -4, Fax (031) 476085
Ταχ. Διεύθυνση Ταχ. Θυρίδα 53, 55102 Φοίνικας, Θεσσαλονίκη

Τίτλος Προγράμματος:

“ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΡΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ
ΘΕΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΛΕΙΟΣΕΙΣΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ
ΒΔ. ΑΤΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΤΗΣ 7/9/1999 (M=5.9) ”

Σύμβαση Ε.Μ.Π. & ΙΤΣΑΚ [1/9/2000]



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ - ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2001

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

	Σελ.
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
A.ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗΝ ΙΣΧΥΡΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΠΛΕΙΟΣΕΙΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ	3
A.1. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	3
A.1.1. Δεδομένα που Χρησιμοποιήθηκαν	3
A.1.2. Φασματικοί Λόγοι Οριζόντιας προς Κατακόρυφη Συνιστώσα	4
A.1.3. Κλασσικοί Φασματικοί Λόγοι Πλατών (SSRT)	6
A.1.3.1. Εισαγωγή	6
A.1.3.2. Μεθοδολογία	6
B. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΡΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΗΣ 7/9/1999 ΣΤΗΝ ΠΛΕΙΟΣΕΙΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ (ΜΕΝΙΔΙ - FARAN S.A.)	11
B.1. Εκτίμηση της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης με Βάση τη Στοχαστική Μέθοδο Πηγής Πεπερασμένων Διαστάσεων στις Θέσεις Μενίδι και Faran S.A.	11
B.2. Εκτίμηση της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης με Βάση Εμπειρικά Μοντέλα που Ισχύουν για τον Ελληνικό Χώρο	14
B.3. Προσομοίωση της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης με τη Μέθοδο των Εμπειρικών Συναρτήσεων Green (Empirical Green's Functions: EGF)	16
B.3.1. Εισαγωγή	17
B.3.2. Μέθοδος των Εμπειρικών Συναρτήσεων Green	18
B.3.3. Εφαρμογή της Μεθοδολογίας	20
B.3.4. Τεκμηρίωση του Μοντέλου Διάρρηξης στη Θέση KER (Κερατσίνι)	22
B.3.5. Προσομοίωση της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης στις Θέσεις MND και FRN – Συμπεράσματα	25
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	30
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ	

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΡΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ ΘΕΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΛΕΙΟΣΕΙΣΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΒΔ. ΑΤΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΤΗΣ 7/9/1999 ($M=5.9$)

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ισχυρός σεισμός της 7ης Σεπτεμβρίου 1999, 14:56 ώρα Ελλάδος, στη βορειοδυτική Αττική, στα βορειοδυτικά προάστια των Αθηνών, σύμφωνα με ανακοίνωση του Εργαστηρίου Γεωφυσικής του ΑΠΘ και του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών είχε μέγεθος $M_s=5.9$, επίκεντρο με συντεταγμένες 38.09N, 23.63E και εστιακό βάθος 14km. Το σεισμικό ρήγμα ήταν κανονικό (ρήγμα βαρύτητας), είχε διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, και κλίση ΝΔ (Tselentis and Zahradnik, 2000, Louvari et al. 2000, Παπαζάχος και συνεργ. 2000). Από τις σεισμικές δονήσεις επλήγησαν σε μεγαλύτερο βαθμό - με καταρρεύσεις και υψηλά ποσοστά βλαβών - βόρεια προάστια των Αθηνών (Άνω Λιόσια, Μενίδι, Θρακομακεδόνες, Μεταμόρφωση). Η ευρύτερη περιοχή της σεισμικής ακολουθίας χαρακτηρίζεται ως ενδιάμεσης σεισμικότητας και ανήκει στη ζώνη II του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (εδαφική επιτάχυνση 0.16g).

Το ΙΤΣΑΚ είχε εγκατεστημένο, πριν τον κύριο σεισμό, στην πόλη των Αθηνών τρεις αναλογικούς επιταχυνσιογράφους (SMA-1): (1) στο κτίριο της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού, (2) στις εγκαταστάσεις του ΚΕΔΕ και (3) στο πολιτιστικό κέντρο του Χαλανδρίου. Στη συνέχεια εγκαταστάθηκαν από το ΙΤΣΑΚ επτά ψηφιακοί επιταχυνσιογράφοι στην πλειόσειστη περιοχή: (1) στο Δημαρχείο των Άνω Λιοσίων (υπόγειο), (2) στο Δημαρχείο του Μενιδίου (υπόγειο), (3) στο Δημαρχείο της Φυλής (υπόγειο), (4) στο Δημαρχείο της Μεταμόρφωσης (υπόγειο), (5) στις εγκαταστάσεις της Faran S.A. (ελεύθερο πεδίο), (6) στο γήπεδο Γεροβουνού του Καματερού (ελεύθερο πεδίο) και (7) σε αυλή ιδιωτικής κατοικίας στους Θρακομακεδόνες (Μ. Αλεξάνδρου 3).

Ο κύριος σεισμός της 7ης Σεπτεμβρίου 1999 καταγράφηκε από 12 σταθμούς «ελευθέρου πεδίου» του Εθνικού Δικτύου Επιταχυνσιογράφων του ΙΤΣΑΚ και του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και 3 σταθμούς της ΔΕΗ. Συγκεκριμένα - εκτός των 3 προαναφερομένων σταθμών του ΙΤΣΑΚ - η ισχυρή κίνηση καταγράφηκε και από τους σταθμούς των Θηβών, Χαλκίδας, Αλιβερίου, Κορίνθου, Ραφήνας, Λαυρίου, Κερατσινίου, Ν. Ψυχικού, Μοναστηράκι, Σεπολίων, Ιστιαίας και Αγίας Παρασκευής, καλύπτοντας ένα εύρος επικεντρικών αποστάσεων $12\text{km} \leq R \leq 107\text{km}$. Η μεγαλύτερη εδαφική επιτάχυνση «ελευθέρου πεδίου» παρατηρήθηκε στα Σεπόλια, $PGA=0.34g$, ενώ στους υπόλοιπους σταθμούς αυτή κυμάνθηκε από 0.01g έως 0.30g.

Στην έκθεση του ερευνητικού αυτού προγράμματος, με βάση τα επιταχυνσιογραφήματα των κυριότερων μετασεισμών της σεισμικής ακολουθίας, έγινε προσπάθεια:

(Α) να εκτιμηθεί η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών σε θέσεις της πλειόσειστης περιοχής στην ισχυρή σεισμική κίνηση με τη μέθοδο του φασματικού λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα και του κλασικού φασματικού λόγου όπου αυτό ήταν δυνατόν.

(Β) να εκτιμηθεί η ισχυρή σεισμική κίνηση του κυρίως σεισμού ($M=5.9$) της 7/9/1999, σε δύο θέσεις (Μενίδι και Εργοστάσιο της Faran S.A.) με βάση:

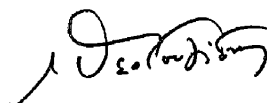
- τη στοχαστική μέθοδο για σεισμική πηγή πεπερασμένων διαστάσεων.
- εμπειρικά μοντέλα απόσβεσης της ισχυρή κίνησης που προτάθηκαν για τον Ελληνικό χώρο.
- την αιτιοκρατική μέθοδο των εμπειρικών συναρτήσεων Green.

Η εκπόνηση του προγράμματος αυτού έγινε από ερευνητικό προσωπικό του ΙΤΣΑΚ και συμμετείχαν οι Δημητρίου Πέτρος, Επικ. Ερευνητής, Θεοδουλίδης Νικόλαος, Αναπλ. Ερευνητής, Μάργαρης Βασίλειος, Επικ. Ερευνητής και Παπαιωάννου Χρήστος, Επικ. Ερευνητής, με επιστημονικά υπεύθυνο τον Θεοδουλίδη Νικόλαο.

Ευχαριστίες εκφράζονται προς το τεχνικό προσωπικό του ΙΤΣΑΚ για τη συμβολή του στην άριστη λειτουργία του δικτύου επιταχυνσιογράφων του Ινστιτούτου, τη Δ.Ε.Η. για τη διάθεση των επιταχυνσιογραφημάτων στη θέση Κερατσίνι και τον καθ. Γ. Γκαζέτα τόσο για τις χρήσιμες επιστημονικές συζητήσεις σχετικά με την ισχυρή σεισμική κίνηση και τις επιπτώσεις της στην πλειόσειστη περιοχή του σεισμού της 7/9/1999 στη ΒΔ. Αττική, όσο και για τη χρηματοδότηση του προγράμματος αυτού.

Θεσσαλονίκη, Ιανουάριος 2001

Ο επιστημονικά υπεύθυνος



Θεοδουλίδης Νικόλαος
Δρ. Σεισμολόγος - Αναπλ. Ερευνητής

Α. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΕΛΑΦΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗΝ ΙΣΧΥΡΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΠΛΕΙΟΣΕΙΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

Α.1. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Α.1.1. Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν

Για το σκοπό της έκθεσης αυτής χρησιμοποιήθηκαν επιταχυνσιογραφήματα από 25 μετασεισμούς με καλές λύσεις επικέντρων και εστιακών βαθών που προέκυψαν από ανάλυση σειсмоγραμμάτων τοπικού ψηφιακού δικτύου σε συνδυασμό με το εθνικό δίκτυο σειсмоγράφων (Παπαζάχος και συνεργ., 2000). Στον Πίνακα 1 δίνονται πληροφορίες για τους σεισμούς αυτούς.

Πίνακας 1. Στοιχεία για επιλεγμένους σεισμούς της μετασεισμικής ακολουθίας της 7ης Σεπτεμβρίου 1999 στην ΒΔ Αττική (Παπαζάχος και συνεργ., 2000).

DATE	ORIGIN	LAT N	LONG E	DEPTH	RMS	ERH	ERZ
990909	041048.27	38 4.81	23 39.35	9.3	.04	1.2	.9
990910	144957.60	38 5.21	23 40.76	7.3	.08	.5	.4
990912	061742.10	38 5.24	23 37.67	6.9	.21	1.1	1.0
990916	081210.85	38 2.92	23 39.46	5.4	.20	.8	.6
990916	230238.45	38 4.08	23 38.79	8.0	.12	.6	.6
990917	173801.10	38 3.71	23 40.36	6.9	.20	.7	.9
990918	020711.90	38 4.14	23 39.00	6.2	.11	.4	.5
990920	195810.21	37 56.38	23 37.19	6.8	.10	.6	.6
990922	031921.41	38 5.60	23 39.61	7.9	.09	.4	.5
990923	163642.85	38 6.90	23 29.54	8.0	.13	.7	.7
990924	101656.43	38 3.98	23 34.72	10.9	.12	.6	.6
990924	124502.31	38 3.80	23 38.27	6.9	.12	.4	.6
990925	125620.48	38 6.29	23 40.20	4.3	.08	.2	.3
990928	055920.55	38 4.22	23 38.35	6.4	.11	.4	.5
991003	170335.20	38 5.89	23 45.01	6.9	.13	.4	.4
991003	180537.14	38 5.69	23 44.83	6.2	.14	.5	.6
991005	203714.68	38 4.70	23 42.13	5.7	.08	.2	.4
991008	215604.98	38 3.23	23 37.42	11.1	.12	.7	.6
991010	094435.58	38 5.29	23 42.97	5.2	.12	.7	.6
991011	185024.49	38 6.59	23 43.15	10.4	.11	.6	.6
991014	183921.59	38 3.70	23 38.67	6.1	.11	.4	.7
991015	104825.42	38 6.22	23 40.50	3.4	.16	.6	1.5
991018	144300.11	38 5.87	23 39.82	4.0	.18	.7	1.6

Τα μεγέθη των μετασεισμών κυμαίνονται μεταξύ $3.0 \leq M_w \leq 4.0$ με επικεντρικές αποστάσεις μικρότερες των 15km. Τα δεδομένα αυτά καταγράφηκαν από το φορητό

δίκτυο επιταχυνσιογράφων του Ι.Τ.Σ.Α.Κ. το οποίο εγκαταστάθηκε στην περιοχή αμέσως μετά τον κύριο σεισμό.

Α.1.2. Φασματικοί Λόγοι Οριζόντιας προς Κατακόρυφη Συνιστώσα

Σε ορισμένες θέσεις της πλειόσειστης περιοχής (Δημαρχείο Φυλής, Δημαρχείο Ανω Λιοσίων, Δημαρχείο Μενιδίου, Εργοστάσιο της Faran S.A., Γήπεδο Γεροβουνού Καματερού, Δημαρχείο Μεταμόρφωσης, Θρακομακεδόνες[M. Αλεξάνδρου 3]) στις οποίες έχουν καταγραφεί επιταχυνσιογράμματα μετασεισμών, εφαρμόσθηκε η τεχνική του φασματικού λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα. Η τεχνική αυτή, η οποία δίνει χρήσιμες πληροφορίες για τη δεσπόζουσα συχνότητα συντονισμού στην εξεταζόμενη θέση (συνάρτηση μεταφοράς - ενίσχυσης), έχει προταθεί από το Nakamura (1989) για μετρήσεις μικροθορύβου και έχει επίσης εφαρμοσθεί σε περιπτώσεις ισχυρής εδαφικής κίνησης (Lermo and Chavez-Garcia 1993; Theodulidis and Bard 1995, Raptakis et al. 1998, Dimitriou et al., 1999, μεταξύ πολλών άλλων).

Όπως φαίνεται στα σχήματα 1 και 2, για συχνότητες μεταξύ 0.2Hz και 20Hz το μέσο πλάτος φασματικής ενίσχυσης είναι γενικά χαμηλό και κυμαίνεται σε τιμές από 2 έως 4. Πιο αναλυτικά, για τη Φυλή, η οποία βρίσκεται στον ορεινό όγκο της Πάρνηθας και σε εδαφικές συνθήκες “σκληρού πετρώματος”, οι φασματικές ενισχύσεις είναι μικρότερες του 2 για όλο το εύρος των εξεταζόμενων συχνοτήτων όπως εξάλλου ήταν αναμενόμενο. Στα Άνω Λιόσια, με εξαίρεση ένα πολύ στενό εύρος συχνοτήτων γύρω στο 1Hz, οι φασματικές ενισχύσεις είναι μικρότερες του 2. Στο Μενίδι εμφανίζεται πλάτος φασματικής ενίσχυσης περίπου 2.5 σε ένα στενό εύρος συχνοτήτων γύρω στα 2Hz, και γύρω στα 10Hz. Στη θέση της Faran S.A. και στους Θρακομακεδόνες εμφανίζεται πλάτος φασματικής ενίσχυσης 2-3 σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος συχνοτήτων περίπου μεταξύ 1Hz και 6Hz. Ανάλογα φασματικά πλάτη παρατηρούνται και στη θέση της Μεταμόρφωσης σε μικρότερες όμως συχνότητες μεταξύ 1Hz και 4Hz. Τέλος, στη θέση του Καματερού εμφανίζονται τα μεγαλύτερα φασματικά πλάτη 2-4 σε μεγάλο εύρος υψηλών συχνοτήτων μεταξύ 5Hz και 13Hz.

Στη θέση της Faran S.A. με βάση το μοντέλο ταχυτήτων των εγκάρσιων κυμάτων για τα πρώτα 35m βάθος (Σχ. 3) έγινε εκτίμηση της θεωρητικά αναμενόμενης συνάρτησης μεταφοράς (transfer function) του φασματικού λόγου της οριζόντιας προς

την κατακόρυφη συνιστώσα των εγκαρσίων SV κυμάτων (γωνία πρόσπτωσης $\sim 10^\circ$). Στο σχήμα 2(κάτω) δίνεται η σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα για δύο περιπτώσεις βραχώδους υποβάθρου ($V_s \geq 1000 \text{ m/sec}$), η πρώτη στα 100m (σιέλ γραμμή) και η δεύτερη στα 150m (μπλέ γραμμή). Παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία τόσο στα πλάτη όσο και στα φασματικά σχήματα των θεωρητικών με τις πειραματικά υπολογισμένες συναρτήσεις μεταφοράς. Το γεγονός αυτό ενισχύει την αξιοπιστία του προτεινόμενου μοντέλου ταχυτήτων (V_s) στη θέση της Faran S.A.

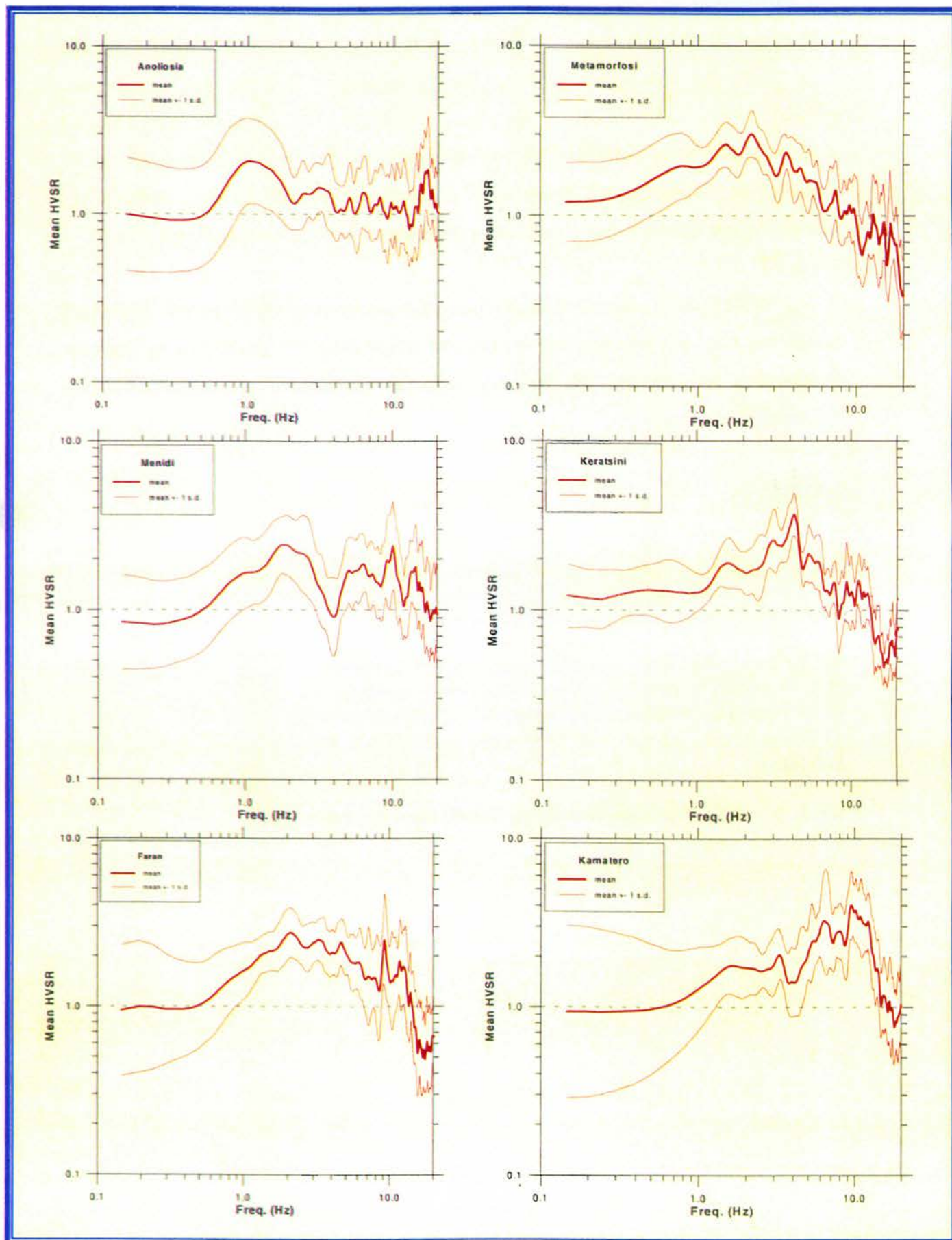
Οι παραπάνω παρατηρήσεις σχετικά με τα φασματικά σχήματα των λόγων της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα, μπορούν συμπληρωματικά να ληφθούν υπόψη κατά την εκτίμηση των σεισμικών δράσεων σχεδιασμού στις παραπάνω θέσεις της πλειόσειστης περιοχής.

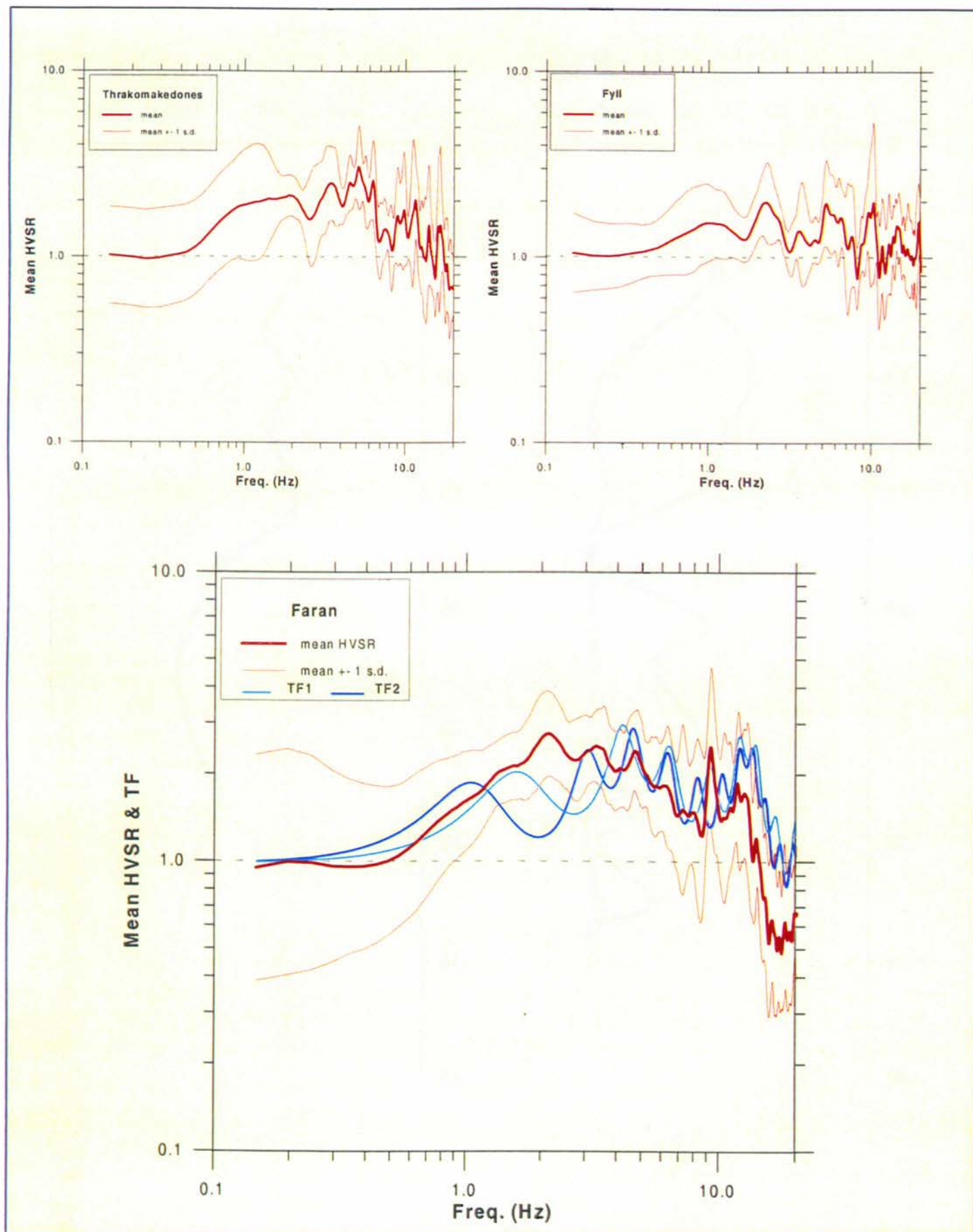
ΣΧΗΜΑΤΑ

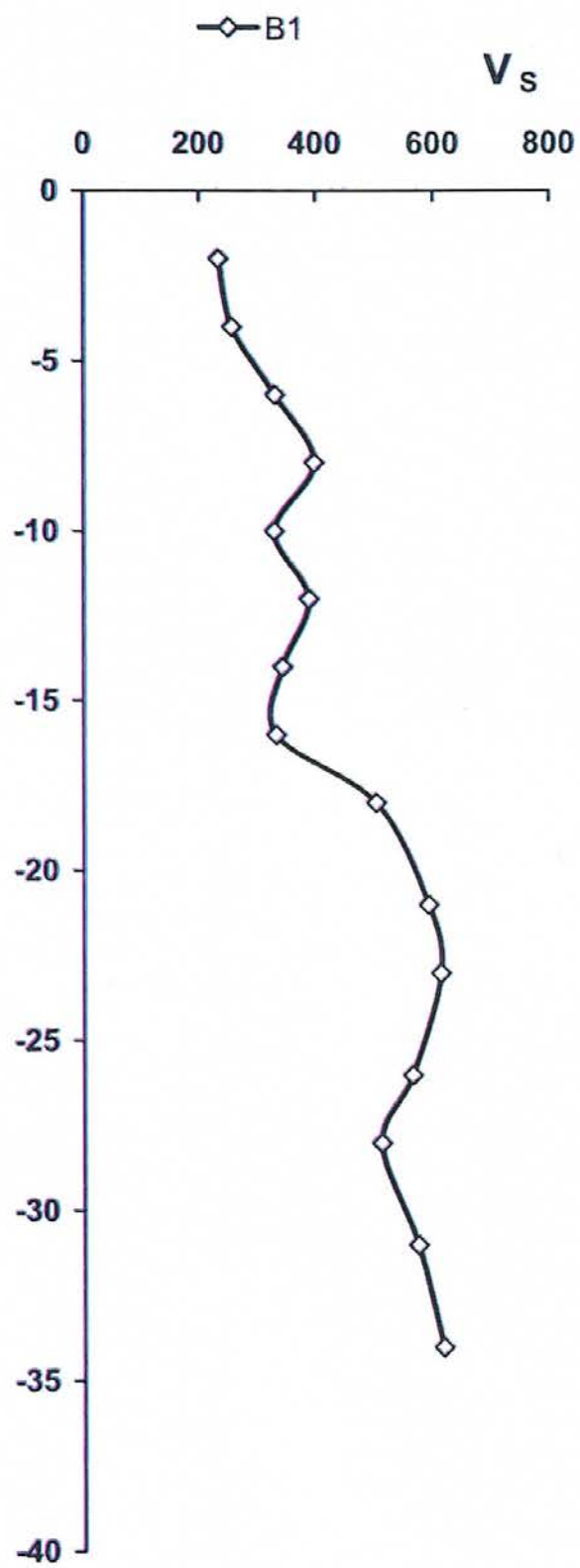
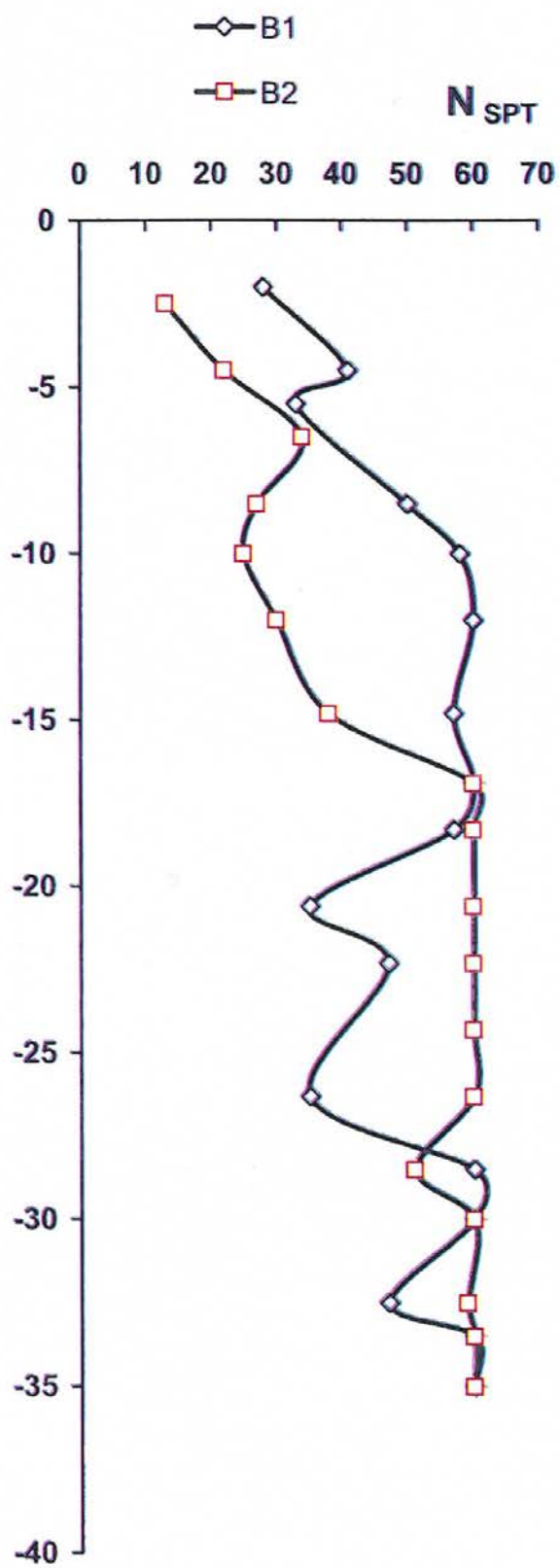
Σχ. 1. Φασματικοί λόγοι της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα για διάφορους θέσεις της πλειόσειστης περιοχής του σεισμού της 13-5-1995 (*Ανω Λιόσια, Μεταμόρφωση, Μενίδι, Κερατσίνι, Faran S.A., Καματερό*).

Σχ. 2. Φασματικοί λόγοι της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα για τις θέσεις Θρακομακεδόνες και Φυλή της πλειόσειστης περιοχής του σεισμού της 13-5-1995 (πάνω) και σύγκριση του παρατηρημένου με τον θεωρητικά υπολογισμένο λόγο (TF1, TF2) της οριζόντιας προς την κατακόρυφη φασματική συνιστώσα για τη θέση Faran S.A.(κάτω)

Σχ. 3. Μοντέλο NSPT και ταχυτήτων V_s στη θέση της Faran S.A.







Σχ. 3

A.1.3. ΚΛΑΣΣΙΚΟΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΙ ΛΟΓΟΙ ΠΛΑΤΩΝ (SSRT)

A.1.3.1. Εισαγωγή

Είναι γνωστό και ευρέως αποδεκτό μεταξύ των σεισμολόγων και των μηχανικών ότι οι τοπικές συνθήκες μιας περιοχής επιδρούν σε μεγάλο βαθμό στη σεισμική κίνηση. Παρατηρήσεις σε σεισμούς τόσο διεθνώς (Mexico City 1985, Leninakan και Spitak 1988, Loma Prieta 1989, Ιράν 1990, Northridge 1994, Kobe 1995, Adana 1997, Izmit 1999) όσο και στην Ελλάδα (Εδεσσα 1990, Κοζάνη 1995, Κόνιτσα 1996, Αθήνα 1999) όπου προκλήθηκαν σημαντικές ζημιές. Η σεισμική κίνηση σε μια τοποθεσία καθορίζεται από διάφορους παράγοντες που αφορούν :

- Τις παραμέτρους της σεισμικής εστίας (μέγεθος, σεισμική ροπή, μηχανισμός γένεσης, κλπ).
- Τις ιδιότητες του δρόμου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, ο οποίος βρίσκεται μεταξύ της εστίας του σεισμού και της τοποθεσίας (μήκος δρόμου, απόσβεση σεισμικών κυμάτων, κλπ).
- Τα χαρακτηριστικά της ίδιας της τοποθεσίας (σκληρότητα του εδάφους θεμελίωσης, μορφολογία, κλπ).

Στην μελέτη αυτή εξετάζεται η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών, δηλαδή η ενίσχυση της σεισμικής κίνησης και των χαρακτηριστικών της, στις θέσεις των καταρρεύσεων λόγω του σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 και ειδικότερα στις θέσεις του εργοστασίου της Faran και στο Δημαρχείο του Μενιδίου, όπου το ΙΤΣΑΚ εγκατέστησε επιταχυνσιογράφους μετά τον σεισμό. Εφαρμόστηκε η μέθοδος του κλασικών φασματικού λόγου και σαν σταθμός αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ο επιταχυνσιογράφος στο Δημαρχείο της Φυλής.

A.1.3.2. Μεθοδολογία

Η μέθοδος βασίζεται στον καθορισμό των φασματικών λόγων, δηλαδή τον λόγο του φάσματος των καταγραφών σε μία συγκεκριμένη θέση (Faran, Μενίδι) προς το αντίστοιχο φάσμα του σταθμού αναφοράς (Φυλή). Κατά την μέθοδο αυτή παίρνουμε ένα παράθυρο του επιταχυνσιογραφήματος (συνήθως μετά από τα εγκάρσια κύματα) ή και όλο το επιταχυνσιογράφημα, υπολογίζουμε το φάσμα Fourier το εξομαλύνουμε και κατόπιν το διαιρούμε με το αντίστοιχο φάσμα του σταθμού

αναφοράς (ref). Στις θέσεις μελέτης ήταν εγκατεστημένοι επιταχυνσιογράφοι τύπου ETNA (18 bits resolution) στις θέσεις Faran και Μενίδι ενώ στη Φυλή ήταν εγκατεστημένος ένας SSA-2 (12 bits resolution). Η συχνότητα δειγματοληψίας και στους δύο τύπους οργάνων είναι 200 sps.

Επιλέχθηκαν σεισμοί τα υπόκεντρα των οποίων είχαν υπολογιστεί με μικρά σφάλματα (Παπαζάχος και συνεργ., 2000) και στην συνέχεια επιλέχθηκαν τα αντίστοιχα ζεύγη καταγραφών, θέσεων-σταθμού αναφοράς. Λόγω της χαμηλής ανάλυσης του επιταχυνσιογράφου στην Φυλή βρέθηκαν επιταχυνσιογραφήματα στα οποία η στάθμη της καταγραφής ήταν στα όρια του θορύβου και για τον λόγο αυτό τα αντίστοιχα ζεύγη εξαιρέθηκαν. Οι παράμετροι των σεισμών και οι αντίστοιχες καταγραφές δίνονται στον Πίνακα 2. Στον ίδιο Πίνακα δίνονται και οι υποκεντρικές αποστάσεις των θέσεων των επιταχυνσιογράφων.

Πίνακας 2. Παράμετροι σεισμών και κωδικοί καταγραφών με τις αντίστοιχες υποκεντρικές αποστάσεις

S/N	DATE Or. Time LAT. LONG. H M _L								I. T. S. A. K.					
	(GMT) (N) (E) (km)								Aftershock Network					
									MND		FYL		FRN	
										Hypocen.		Hypocen.		Hypocen.
									etna	Distance	ssa-2	Distance	etna	Distance
1	1999	SEP	10	14 49 56.7	38.087	23.679	7.34	3.7	26	10	3	8		
2	1999	SEP	12	06 17 41.8	38.087	23.628	6.91	3.7	28	13	4	8		
3	1999	SEP	16	08 12 10.9	38.049	23.658	5.42	3.1	45	11	9	8		
4	1999	SEP	16	23 02 35.4	38.068	23.647	8	3.4	48	13	11	9	1	16
5	1999	SEP	17	17 38 2.1	38.062	23.673	6.86	3.3	51	10	13	8	2	14
6	1999	SEP	18	02 07 11.7	38.069	23.650	6.18	2.6	52	11	14	7	3	15
7	1999	SEP	28	05 59 19.9	38.070	23.639	6.41	3.2	56	12	18	8	7	16
8	1999	OCT	3	17 03 35.2	38.098	23.750	6.93	3.5	57	7	19	10	8	8

Επειδή, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2, οι υποκεντρικές αποστάσεις μεταξύ της θέσης της Φυλής και των εξεταζόμενων θέσεων ήταν διαφορετικές έγινε προσπάθεια να αναχθούν τα φάσματα σε απόσταση 0 km. Επίσης επειδή οι προσανατολισμοί των επιταχυνσιογράφων ήταν διαφορετικοί σε κάθε θέση έγινε περιστροφή των οριζοντίων συνιστωσών έτσι ώστε η διεύθυνση της L+ να αντιστοιχεί στο Βορρά και η διεύθυνση T+ να αντιστοιχεί στην διεύθυνση της Ανατολής.

Συγκεκριμένα για να υπολογιστούν οι τυπικοί λόγοι των φασματικών πλατών ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

1. Έγινε περιστροφή των οριζοντίων συνιστωσών με βάση τους προσανατολισμούς οι οποίοι είχαν μετρηθεί στην φάση της εγκατάστασης.
2. Υπολογίστηκαν τα φάσματα Fourier κάθε οριζόντιας συνιστώσας χρησιμοποιώντας ολόκληρη την καταγραφή. Η επιλογή της χρήσης όλης της κυματομορφής έγινε επειδή εφ' ενός στην εφαρμογή της μεθόδου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα (h/v ratio) έγινε χρήση όλης της κυματομορφής και αφετέρου επειδή (σε επιλεγμένα επιταχυνσιογραφήματα) η σύγκριση των φασμάτων Fourier όλης της κυματομορφής με τα αντίστοιχα φάσματα που αντιστοιχούσαν στο παράθυρο μετά την άφιξη των S- κυμάτων δεν εμφάνισε σημαντικές διαφορές.
3. Για κάθε φάσμα υπολογίστηκε η κλίση του φάσματος πλατών, κ, (Anderson and Hough, 1984) για τις υψηλές συχνότητες.
4. Το φάσμα πλατών επιταχύνσεων της εδαφικής κίνησης, $R(f)$, σε συνάρτηση με την συχνότητα δίνεται από την σχέση:

$$R(f) = CS(f)A(f)D(f) \quad (1)$$

(Joyner and Boore, 1988) όπου C είναι ένας συντελεστής αναγωγής; $S(f)$ είναι το αντίστοιχο φάσμα στην εστία; $A(f)$ είναι ο συντελεστής ενίσχυσης και $D(f)$ είναι συντελεστής απομείωσης. Ο συντελεστής C σε συνάρτηση με την απόσταση, R, δίνεται από την σχέση:

$$C = \frac{R_{\Theta\Phi} F V}{4\pi\rho_0\beta_0^3 R} \quad (2)$$

όπου $R_{\Theta\Phi}(=0.62)$ είναι συντελεστής για την ακτινοβολία (radiation pattern) για ένα μέσο αζιμούθιο και μέση γωνία ανάδυσης για 45° κλίση ρήγματος (Boore and Boatwright, 1984), $F (=2)$ είναι συντελεστής για το αποτέλεσμα της ελεύθερης επιφάνειας, $V (= \sqrt{2}/2)$ είναι συντελεστής για τον διαχωρισμό της ενέργειας σε δύο οριζόντιες συνιστώσες και $\rho_0(=2.7 \text{ gr/cm}^3)$, $\beta_0(= 3.4 \cdot 10^5 \text{ cm/sec})$ είναι αντίστοιχα η πυκνότητα και η ταχύτητα των S- κυμάτων στην εστία.

Ο συντελεστής ενίσχυσης, $A(f)$ μπορεί να δοθεί με διάφορους τρόπους. Με βάση τις διαθέσιμες πληροφορίες θεωρήθηκε ότι και οι θέσεις της Φυλής και Μενιδίου ανήκουν στην κατηγορία b ενώ η θέση της Faran στην κατηγορία C. Οι Margaritis and Boore (1998) καθόρισαν διακριτά ζεύγη τιμών συχνοτήτων και τιμών του συντελεστή ενίσχυσης, $A(f)$. Επίσης, τιμές για αντίστοιχα ζεύγη τιμών και για αντίστοιχες

κατηγορίες εδαφών c, d (κατά NEHRP) με βάση Ελληνικά δεδομένα καθορίστηκαν από τους Klimis et al., (1999). Για την κατηγορία b, λόγω έλλειψης δεδομένων στον Ελληνικό χώρο, προτάθηκαν οι τιμές των Frankel et al., (1996) οι οποίες εφαρμόστηκαν στην παρούσα μελέτη. Για την θέση της Faran (κατηγορία c) χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχοι συντελεστές, οι οποίοι προτάθηκαν από τους Klimis et al., (1999).

Ο συντελεστής $D(f)$ δίνεται από την σχέση:

$$D(f) = \exp[-\pi f R / Q(f)\beta]P(f) \quad (3)$$

όπου

$$Q(f) = 29.4 \frac{1 + \left(\frac{f}{0.3}\right)^{2.9}}{\left(\frac{f}{0.3}\right)^2} \quad \text{και} \quad P(f) = \exp(-\pi k_0 f) \quad (4)$$

(Joyner and Boore, 1988). Σύμφωνα με τον Margaris (2001) η τιμή της παραμέτρου k_0 για εδαφικές συνθήκες b βρέθηκε ίση με 0.04.

5. Θεωρώντας ότι στην σχέση (1) το φάσμα Fourier το οποίο υπολογίστηκε είναι η ποσότητα $R(f)$, επιλύοντας προς $S(f)$ και λαμβάνοντας υπόψη τις υποκεντρικές αποστάσεις για κάθε καταγραφή από τον Πίνακα 2 υπολογίστηκαν τα ανηγμένα φάσματα πλατών στην εστία.

6. Για όλους στους σεισμούς για τους οποίους υπήρχαν κοινά ζεύγη καταγραφών Φυλής– Μενιδίου (8 ζεύγη) και Φυλής–Faran (5 ζεύγη) υπολογίστηκαν οι φασματικοί λόγοι των πλατών για τις δύο διευθύνσεις των οριζοντίων συνιστωσών και βρέθηκαν οι μέσοι όροι για τις αντίστοιχες συχνότητες. Ο μέγιστος αριθμός σημείων για τις αναλύσεις των καταγραφών οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ήταν 2048 και η συχνότητα δειγματοληψίας 200sps. Συνεπώς τα φάσματα υπολογίστηκαν για βήμα μεταβολής της συχνότητας 0.09766 Hz. Τα μέσα φάσματα εξομαλύνθηκαν με την μέθοδο του κινούμενου μέσου όρου θεωρώντας 5 γειτονικές τιμές συχνότητας.

Αν λάβουμε υπόψη ότι η μέθοδος του φασματικού λόγου πλατών της οριζόντιας συνιστώσας προς την κατακόρυφη (h/v ratio) μας δίνει ορισμένες πληροφορίες για τις εδαφικές συνθήκες της θέσης καταγραφής τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο λόγος:

$$\left(\frac{(h/v)_{\text{site}}}{(h/v)_{\text{ref}}} \right) \quad (5)$$

αποτελεί έναν “ισοδύναμο” λόγο SSR και για ένα ορισμένο εύρος συχνοτήτων αναμένεται να σχετίζεται με τα αποτελέσματα της κλασσικής μεθόδου SSR. Θα πρέπει επίσης να λάβουμε υπόψη ότι γενικά η μέθοδος (h/v ratio) υπολείπεται στην εκτίμηση των πλατών αλλά δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την δεσπόζουσα

ιδιοσυχνότητα. Στην εφαρμογή της μεθόδου αυτής χρησιμοποιήθηκε επιπρόσθετα σαν σταθμός αναφοράς και η θέση του επιταχυνσιογράφου στους Θρακομακεδόνες. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε για όλες τις θέσεις όπου υπήρχαν επιταχυνσιογράφοι του ΙΤΣΑΚ και τα αποτελέσματα δίνονται συνολικά στο σχήμα (4) για τις έξι θέσεις (Μεταμόρφωση, Καματερό, Άνω Λιόσια, Κερατσίνι, Faran και Μενίδι). Από τα σχήματα αυτά φαίνεται μία ενίσχυση μεγαλύτερη ή ίση του 3 στις θέσεις Καματερό(Δημαρχείο) και Κερατσίνι (Εγκαταστάσεις ΔΕΗ) για ένα εύρος συχνοτήτων 6-12Hz και 3-5Hz αντίστοιχα, ανεξάρτητα του σταθμού αναφοράς που χρησιμοποιείται.

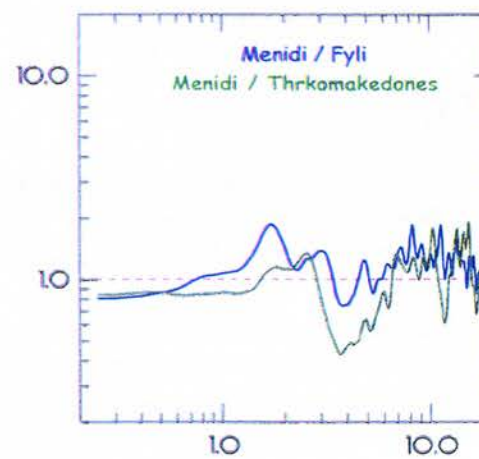
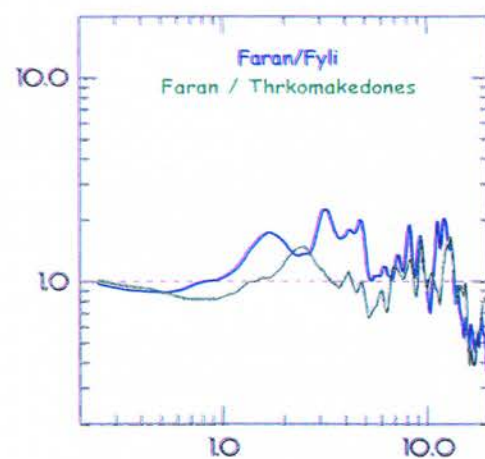
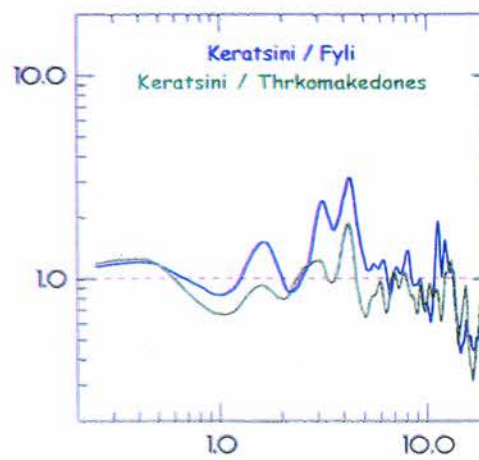
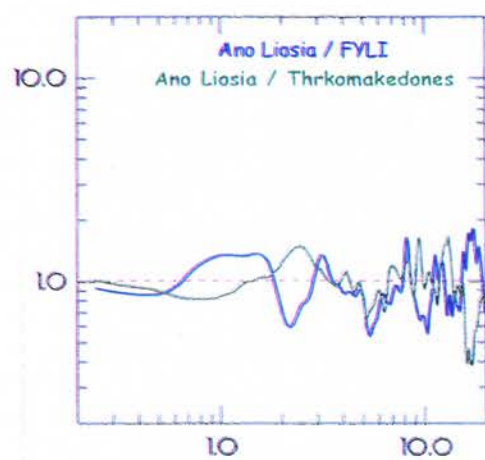
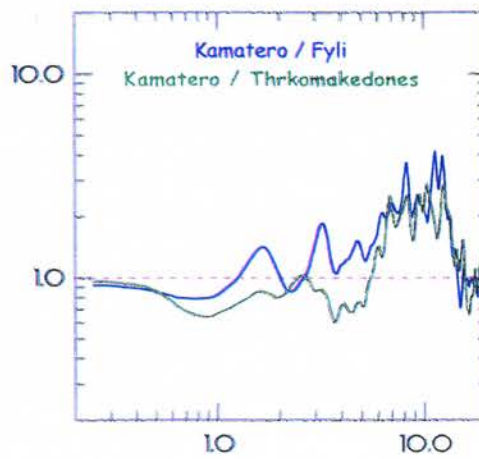
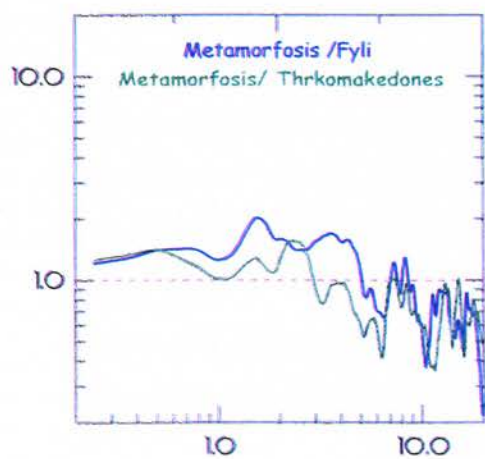
Στα σχήματα (5) και (6) δίνονται τα αποτελέσματα της τεχνικής SSR για τις θέσεις στο Μενίδι και την Faran αντίστοιχα με σταθμό αναφοράς την Φυλή. Στα ίδια σχήματα για λόγους σύγκρισης έχουν περαστεί με διακεκομμένες γραμμές και οι αντίστοιχες καμπύλες του σχήματος (4). Από το σχήμα 5 (Μενίδι) φαίνεται ότι υπάρχει μία ενίσχυση στο διάστημα συχνοτήτων 1.5 -3Hz. Η ενίσχυση αυτή προκύπτει και από τους μέσους φασματικούς λόγους πλατών των λόγων h/ν . Μία δεύτερη και σημαντικότερη ενίσχυση εμφανίζεται στο εύρος συχνοτήτων 7-14Hz. Στο σχήμα 6 (Faran) φαίνεται ότι επίσης υπάρχει μία ενίσχυση στο διάστημα συχνοτήτων 1.5-3Hz όπως και στο Μενίδι αλλά με σημαντικά μεγαλύτερες ενισχύσεις. Οι σημαντικότερες όμως ενισχύσεις για την θέση αυτή καλύπτουν ένα εύρος συχνοτήτων 6.5-12.5Hz και στις δύο συνιστώσες. Οι ενισχύσεις από τους μέσους φασματικούς λόγους πλατών των λόγων h/ν εμφανίζονται στα 3 Hz και στα 11 Hz.

ΣΧΗΜΑΤΑ

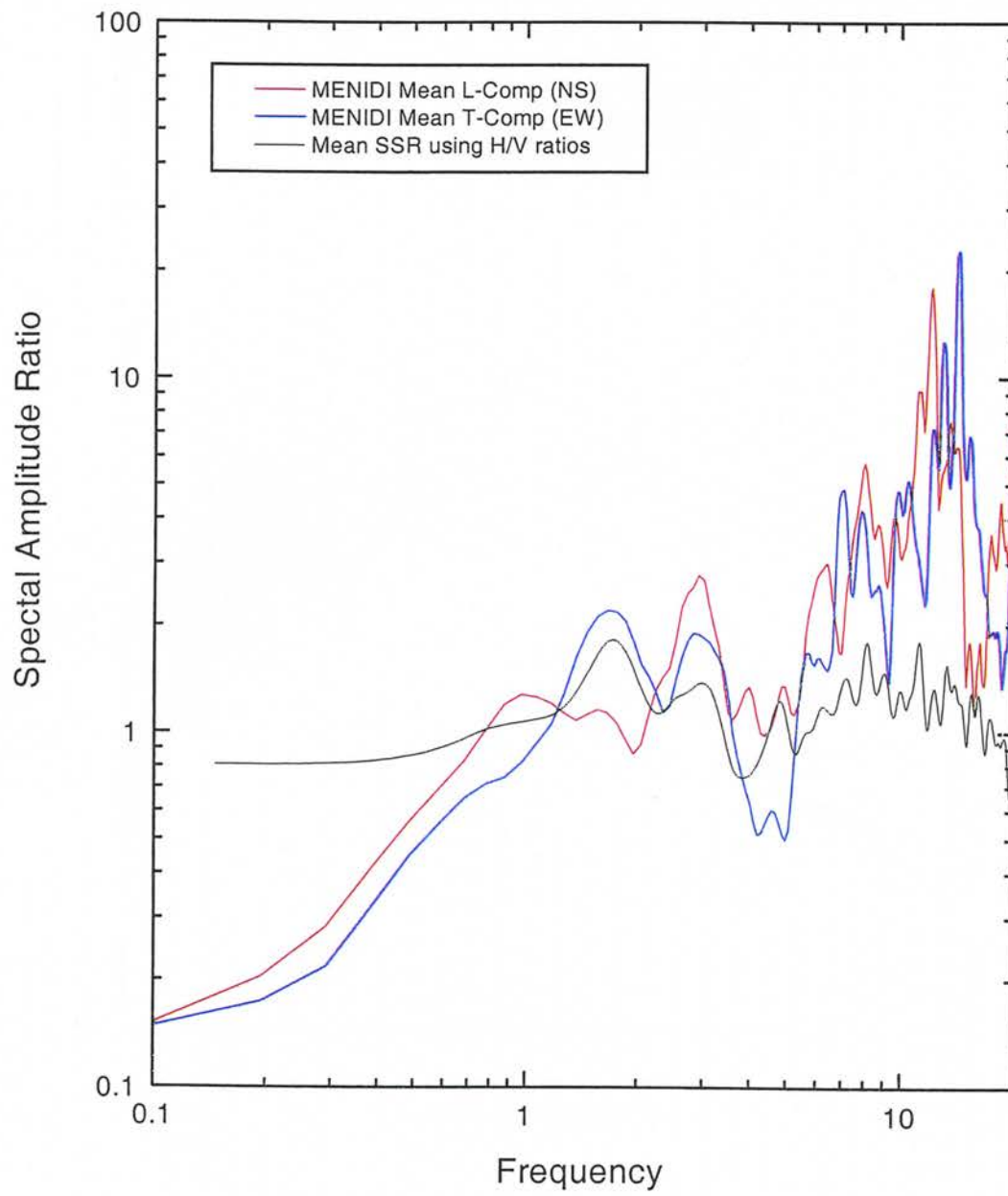
Σχ. 4. Μέσοι τυπικοί φασματικοί λόγοι πλατών, $\{(h/\nu)^{\text{site}}/(h/\nu)^{\text{ref}}\}$, για τις καταγραφές στις θέσεις των επιταχυνσιογράφων του ΙΤΣΑΚ με την χρήση των σταθμών Φυλής (μπλε γραμμές) και Θρακομακεδόνων (πράσινες γραμμές) σαν σταθμών αναφοράς.

Σχ. 5. Τυπικοί φασματικοί λόγοι πλατών για τις δύο συνιστώσες στο Μενίδι ως προς τις αντίστοιχες καταγραφές στη Φυλή (συνεχείς γραμμές). Η αντίστοιχη καμπύλη του σχήματος (4) δίνεται επίσης (διακεκομμένη γραμμή). Οι οριζόντιες συνιστώσες έχουν περιστραφεί ώστε η διεύθυνση L+ να έχει διεύθυνση προς Βορρά και η διεύθυνση T+ να έχει διεύθυνση προς Ανατολή.

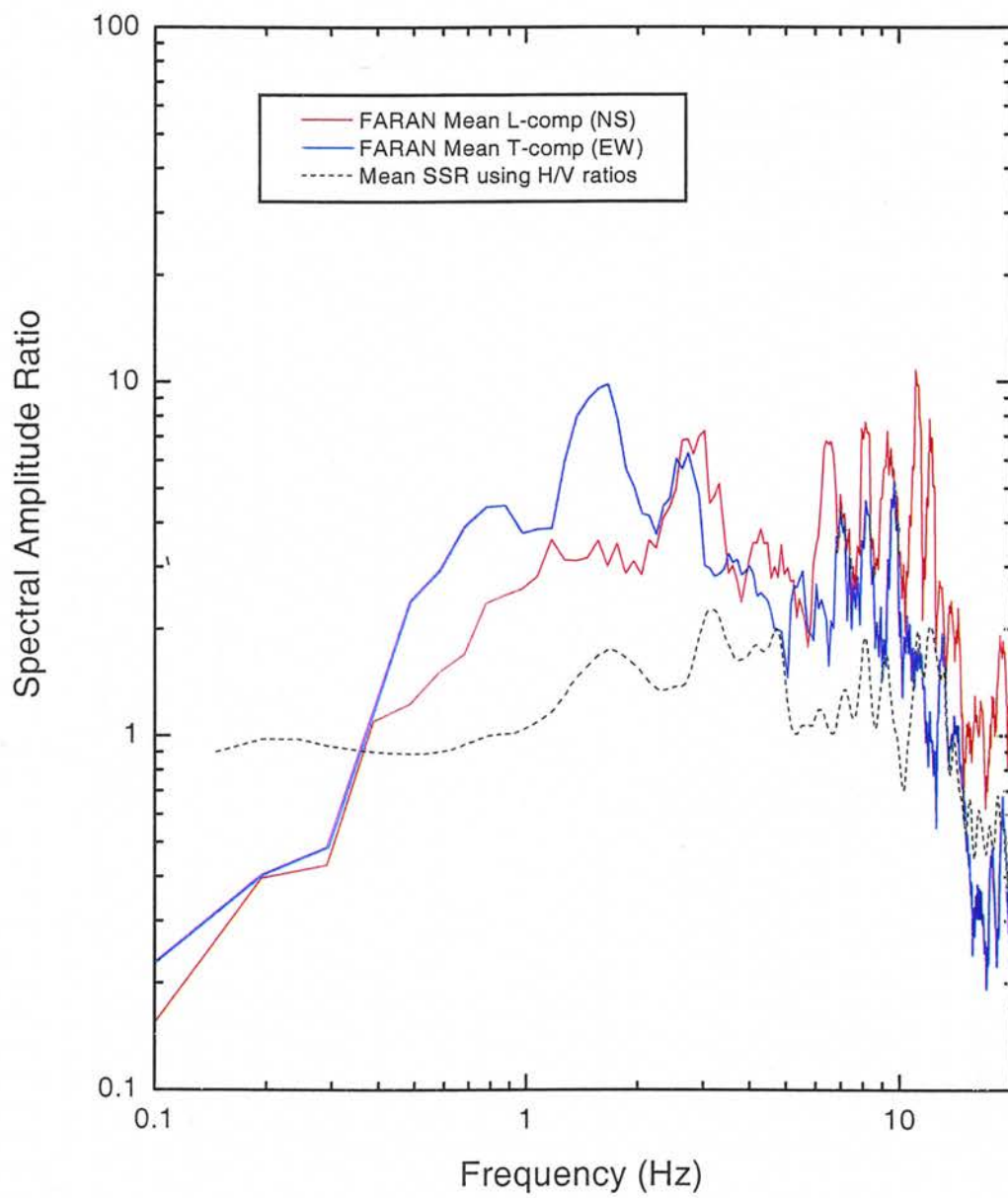
Σχ. 6. Τυπικοί φασματικοί λόγοι πλατών για τις δύο συνιστώσες στη Faran ως προς τις αντίστοιχες καταγραφές στη Φυλή (συνεχείς γραμμές). Η αντίστοιχη καμπύλη του σχήματος (4) δίνεται επίσης (διακεκομμένη γραμμή). Οι οριζόντιες συνιστώσες έχουν περιστραφεί ώστε η διεύθυνση L+ να έχει διεύθυνση προς Βορρά και η διεύθυνση T+ να έχει διεύθυνση προς Ανατολή.



Σχ. 4



$\Sigma\chi. 5$



$\Sigma\chi. 6$

B. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΡΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΗΣ 7/9/1999 ΣΤΗΝ ΠΛΕΙΟΣΕΙΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ (ΜΕΝΙΔΙ- FARAN S.A.)

B.1. Εκτίμηση της ισχυρής σεισμικής κίνησης με βάση τη στοχαστική μέθοδο πηγής πεπερασμένων διαστάσεων στις θέσεις Μενίδι και Faran S.A.

Για τον καθορισμό της ισχυρής σεισμικής κίνησης του κοντινού πεδίου (near-field) του σεισμού της Αθήνας, σε δύο προεπιλεγμένες θέσεις (Δήμος Μενιδίου και θέση εργοστασίου Faran S.A.), χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα προσομοίωσης. Το μοντέλο της σημειακής σεισμικής πηγής (point source model) όπως προτάθηκε από τους Boore (1983) and Joyner and Boore (1988) και το μοντέλο της πεπερασμένης σεισμικής πηγής που βασίσθηκε σε μία σειρά από εργασίες προσομοίωσης της ισχυρής κίνησης με τις πιο βασικές εκείνες που προτάθηκαν από τους Beresnev and Atkinson (1997, 1998, 1999). Τα δύο μοντέλα δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα για σεισμούς με μεγέθη από $M > 5.5$, ενώ η μελέτη σεισμών με μεγέθη $M < 5.5$ μπορεί να γίνει με βάση το μοντέλο της σημειακής σεισμικής πηγής. Έχει δειχθεί με τη χρήση καταγραφών ισχυρής κίνησης από σεισμούς στην California, ότι το μοντέλο της σημειακής πηγής για σεισμούς $M > 5.5$ παρουσιάζει απόκλιση σε σχέση με τις εμπειρικές σχέσεις απόσβεσης, πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει με το μοντέλο της πεπερασμένης σεισμικής πηγής (Atkinson and Silva, 1997).

Για το σκοπό αυτό υιοθετήθηκαν οι ίδιες παράμετροι σεισμικής πηγής (πυκνότητας του υλικού, ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων), δρόμου διάδοσης (παράγοντας Q , γεωμετρική διασπορά, διάρκεια της κίνησης) και ιδιοτήτων της θέσης καταγραφής (συντελεστής ακτινοβολίας, επίδραση της ελεύθερης επιφάνειας, τιμή $-κ_0$) και για τα δύο μοντέλα προσομοίωσης. Για το μοντέλο της πεπερασμένης σεισμικής πηγής χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι του σεισμικού ρήγματος όπως καθορίστηκαν από το Harvard καθώς και από τους Παπαζάχο και συνεργ. (2000). Κάθε εξεταζόμενη θέση, με βάση την διαθέσιμες γεωτεχνικές πληροφορίες καθώς και τον καθορισμό της επιφανειακής γεωλογίας ενισχύθηκε με ομαλοποιημένους συντελεστές ενίσχυσης για τον Ελληνικό χώρο (Klimis et al., 1999).

Προκειμένου να προσομοιώσουμε την ισχυρή κίνηση στις δύο θέσεις (Μενίδι-S1 και Faran S.A. -S2) στο κοντινό πεδίο από το σεισμό της Αθήνας, χρησιμοποιήθηκαν 14 καταγραφές ισχυρής κίνησης του ιδίου κύριου σεισμού σε διάφορες θέσεις μέσα στο Λεκανοπέδιο της Αττικής καταγραμμένες στην ελεύθερη επιφάνεια. Οι καταγραφές αυτές καταγράφηκαν από τα δίκτυα επιταχυνσιογράφων του ΙΤΣΑΚ, του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Ε.Α.Α. και της ΔΕΗ σε διάφορες επικεντρικές αποστάσεις. Οι καταγραφές αυτές καθώς και οι υπολογισμένες παράμετροι της σεισμικής πηγής με βάση τα καταγραμμένα επιταχυνσιογράμματα φαίνονται στο Πίνακα 3. Οι παράμετροι της γωνιακής συχνότητας, f_0 , της τιμής k_0 (Anderson and Hough, 1984) και της πτώσης τάσης υπολογίστηκαν με ανεξάρτητη μεθοδολογία για τον συγκεκριμένο σεισμό (Margaris and Hatzidimitriou, 1999). Οι τιμές των μακροσεισμικών εντάσεων στις θέσεις των επιταχυνσιογράφων εκτιμήθηκαν από το προσωπικό του ΙΤΣΑΚ με επιτόπου έρευνα καθώς και από τον Πρωτονοτάριο Ι. (2000, προσωπική επικοινωνία). Με βάση τα δεδομένα αυτά προσομοιώθηκε η ισχυρή κίνηση σε κάθε θέση καταγραφής των επιταχυνσιογράφων. Οι συνθετικές φασματικές τιμές των ψευδοταχυτήτων για παράγοντα απόσβεση, 5%, συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες που καταγράφηκαν σε κάθε θέση. Στο Σχήμα 10 φαίνονται οι συγκρίσεις αυτές ενώ κάποια αδυναμία του μοντέλου των ομαλοποιημένων συντελεστών ενίσχυσης στις θέσεις Χαλάνδρι, Ραφήνα και Σεπόλια (A299-1, RFN1, SPLB1) είναι προφανής. Από τα ίδια μοντέλα εκτιμήθηκαν και οι μέγιστες τιμές των επιταχύνσεων σε κάθε θέση. Οι τιμές αυτές συσχετίστηκαν με τις αντίστοιχες τιμές που καταγράφηκαν σε κάθε θέση επιταχυνσιογράφου από τον κύριο σεισμό. Στο Σχήμα 11 φαίνεται η συσχέτιση αυτή ενώ είναι προφανές ότι το μοντέλο της πεπερασμένης σεισμικής πηγής μπορεί να προβλέψει καλύτερα την ισχυρή κίνηση του σεισμού της Αθήνας του 1999. Θεωρώντας ότι οι συγκρίσεις των παρατηρημένων μέγιστων και φασματικών τιμών με τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις είναι αρκετά επαρκείς, έγινε προσομοίωση της αναμενόμενης ισχυρής κίνησης στις δύο εξεταζόμενες θέσεις στο κοντινό πεδίο, στο Μενίδι(θέση S1) και FARAN(θέση S2). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 12, με τις συγκρίσεις των αναμενόμενων PSV φασμάτων απόκρισης (5%) για τα δύο μοντέλα προσομοίωσης στο πάνω μέρος του σχήματος ενώ τα αντίστοιχα συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα στο κάτω μέρος του σχήματος. Μία λεπτομερής ανάλυση των παραπάνω καταγραφών σε σχέση με τις υπάρχουσες εμπειρικές σχέσεις απόσβεσης καθώς και τις καταγραμμένες τιμές ισχυρής κίνησης παρουσιάζονται από τον Margaris (2001). Οι μέγιστες τιμές των επιταχύνσεων

για το Μενίδι από τα δύο μοντέλα κυμαίνονται από 380 – 485 cm/sec² ενώ αντίστοιχα για την θέση FARAN κυμαίνονται από 260 – 370 cm/sec².

Πίνακας 3. Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση και οι υπολογισμένες μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις.

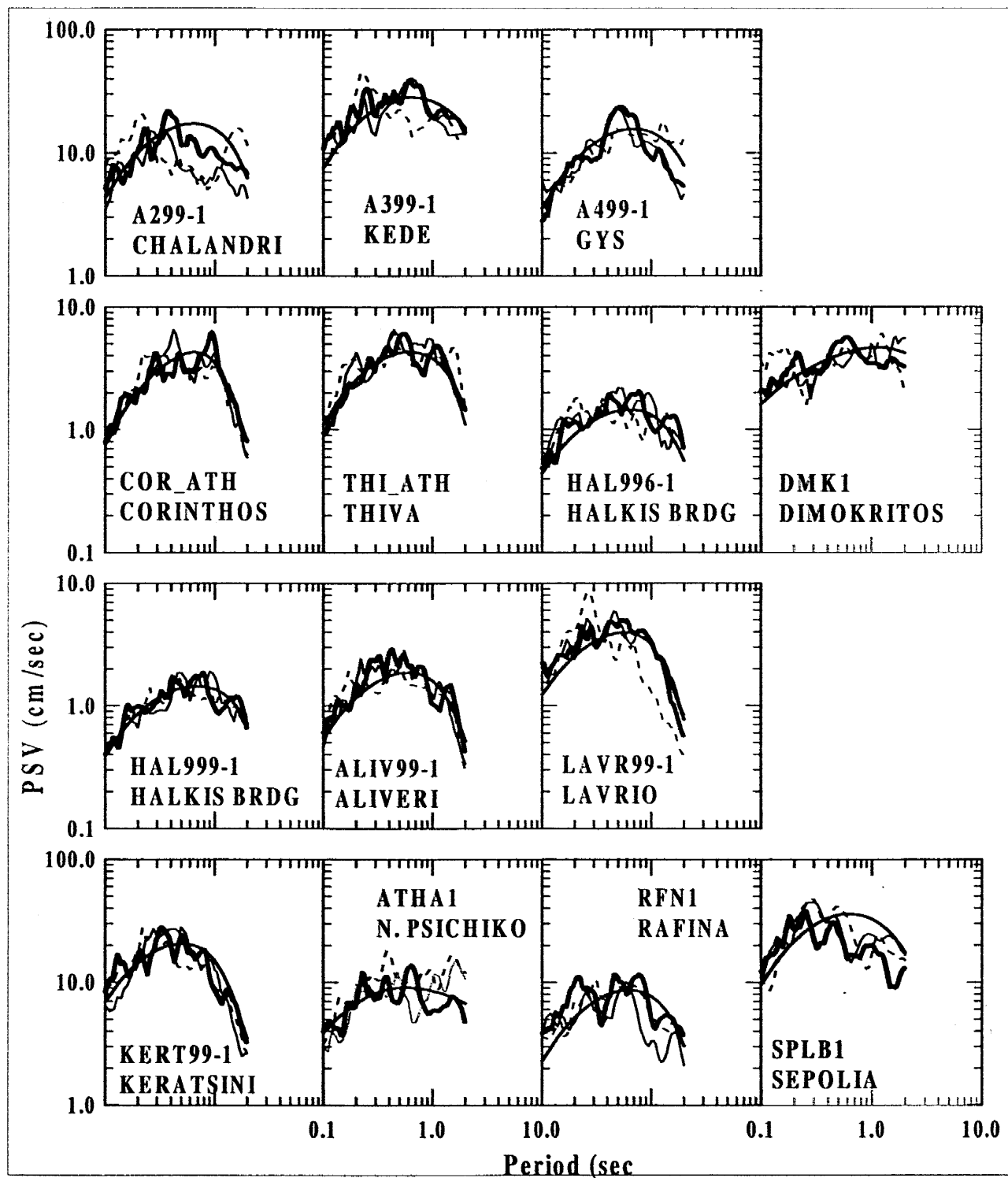
Station	rc_code	Rcd	SC*	Imm	fo(Hz)	K ₀	Δσ	pga-L	pga-T	pga1	pga2	RF
Chalandri	A299-1	10	1	6	0.265	0.05	32	108.1	155.6	122.5	127.5	1
KEDE	A399-1	7.5	1	7	0.275	0.048	35.7	258.6	297.2	209.6	301.7	1
GYS	A499-1	9	1	6.5	0.24	0.054	23.8	118.6	107.9	103.5	117	1
Korinth	Cor_ath	55	0	4	0.345	0.06	70.5	33.47	23.6	24.2	25.3	1
Thiva	Thi_ath	27	2	4	0.29	0.046	41.9	40.26	32.7	30.8	38.2	1
Halkis1	hal9961	40	1	3	0.22	0.035	18.3	14.06	15.53	11.2	14.6	1
Halkis4	hal9991	40	1	3	0.22	0.039	18.3	11.44	10.36	10.4	12	1
Aliveri	aliv991	43	2	3	0.265	0.038	32	19.95	19.95	14.1	19.7	2
Keratsini	kert991	7.5	2	6.5	0.29	0.038	41.9	214.4	179.5	176.9	215.3	2
Lavrion	lavr991	44	2	4	0.325	0.038	58.9	41.58	51.97	31.3	57.6	2
N.Psichiko	ath1	12	2	6	0.24	0.034	23.8	83.56	99.16	95.2	108.7	3
Dimokritos	dmk1	13	2	5.5	0.225	0.017	19.6	49.91	69.87	42.7	55.5	3
Rafina	rfl	23	1	4.5	0.305	0.047	48.7	81.39	101.4	62.4	85.4	3
Sepolia(b1)	splb1	7	1	7	0.31	0.05	51.2	342	318.9	387.9	333	3

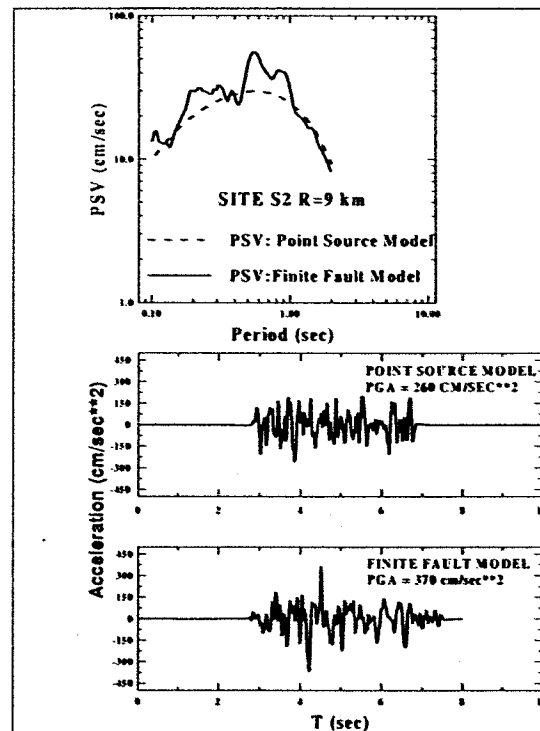
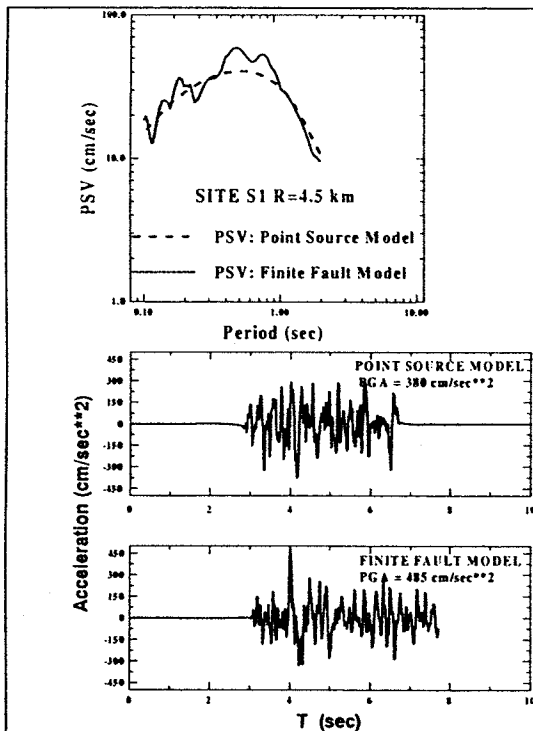
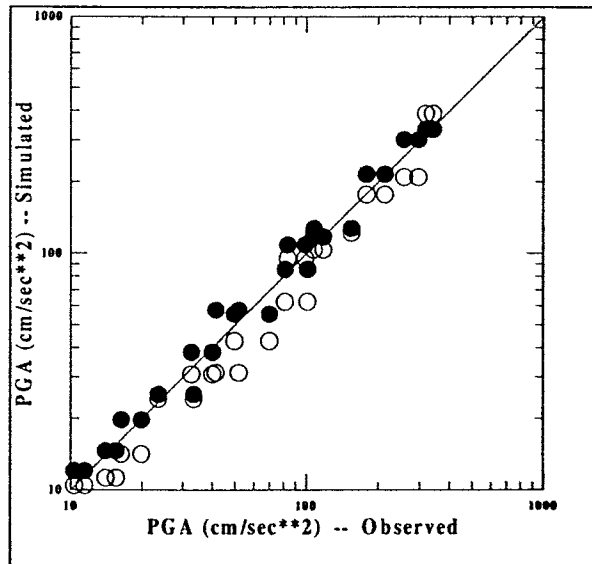
1. ITSAK : Institute of Engineering Seismology and Earthquake Engineering
2. PPC : Public Power Corporation
3. NOA : National Observatory in Athens – Geodynamic Institute.

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχ. 7. Σύγκριση συνθετικών φασματικών ψευδοταχυτήτων του κυρίου σεισμού για παράγοντα απόσβεσης, D=5%, (παχειά εξομαλυμένη γραμμή: μοντέλο σημειακής πηγής & παχειά μή εξομαλυμένη γραμμή: μοντέλο πηγής πεπερασμένων διαστάσεων), με τις αντίστοιχες που καταγράφηκαν σε κάθε θέση.

Σχ. 8. Σύγκριση (πάνω) παρατηρημένων PGA με αντίστοιχες συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων για το μοντέλο της σημειακής πηγής (ανοικτοί κύκλοι) και το μοντέλο πεπερασμένων διαστάσεων σεισμικής πηγής (μαύροι κύκλοι). Προσομοίωση (κάτω) της ισχυρής κίνησης του κυρίου σεισμού στις θέσεις Μενίδι (Site S1) και Faran S.A. (Site S2).





B.2. Εκτίμηση της ισχυρής σεισμικής κίνησης με βάση εμπειρικά μοντέλα που ισχύουν για τον Ελληνικό χώρο.

Με βάση εμπειρικά μοντέλα πρόβλεψης της ισχυρής σεισμικής κίνησης στον Ελληνικό χώρο με εξαρτημένη μεταβλητή την φασματική ψευδοταχύτητα, $PSV(T)$ και ανεξάρτητες μεταβλητές το μέγεθος, M , την επικεντρική απόσταση, R , και τις εδαφικές συνθήκες, S , $\{PSV(T)=f(M,R,S)\}$ (Θεοδουλίδης 1991, Theodulidis and Papazachos 1994) έγινε προσπάθεια αναγωγής (scaling) στο κοντινό πεδίο ($R \sim 12\text{km}$) των παρατηρημένων φασματικών ψευδοταχυτήτων - σε 14 θέσεις - της ισχυρής σεισμικής κίνησης του κυρίου σεισμού της 7/9/1999. Η αναγωγή έγινε μόνον ως προς την απόσταση διατηρώντας τον ίδιο παράγοντα των εδαφικών συνθηκών της θέσης καταγραφής. Με τον τρόπο αυτόν οι ανηγμένες στο κοντινό πεδίο φασματικές τιμές συμπεριλαμβάνουν την επίδραση ποικιλίας εδαφικών συνθηκών. Διόρθωση ως προς την ανισότροπη ακτινοβολία της πηγής δεν λαμβάνεται υπόψη. Στο σχήμα 13 δίνονται τα παρατηρημένα φάσματα ψευδοταχύτητας όλων των διαθέσιμων καταγραφών ($13\text{km} \leq R \leq 58\text{km}$) όπου είναι εμφανής η μεγάλη διασπορά ως προς τα φασματικά πλάτη και το περιεχόμενο συχνοτήτων. Μετά την αναγωγή - ως προς την απόσταση - και αφαιρώντας από το δείγμα 2 καταγραφές που οι θέσεις τους είναι σε «σκληρό πέτρωμα», παίρνουμε την εικόνα του σχήματος 14. Παρατηρείται - ως αναμενόμενη εξ άλλου - η σημαντική ελάττωση της διασποράς των φασματικών ψευδοταχυτήτων του σχήματος 13. Στο ίδιο σχήμα δίνεται η απ' ευθείας *a priori* πρόβλεψη των αναμενόμενων φασματικών ψευδοταχυτήτων \pm μια τυπική απόκλιση, για σεισμό μεγέθους $M=5.9$, σε επικεντρική απόσταση $R=12\text{km}$. Η σύγκριση των δύο προσεγγίσεων είναι ικανοποιητική παρά τη μεγάλη διασπορά των πλατών των φασματικών τιμών (μέχρι 5 φορές). Με τον προσεγγιστικό αυτόν τρόπο μπορούμε να εκτιμήσουμε το χαμηλότερο και υψηλότερο πλάτος της ισχυρής κίνησης στο κοντινό πεδίο κατά τον κύριο σεισμό. Αυτό κυμαίνεται, για εύρος ιδιοπεριόδων $0.2\text{sec} - 1.0\text{sec}$, μεταξύ $10\text{cm/sec} \leq PSV(T) \leq 50\text{cm/sec}$. Η εκτίμηση των φασματικών ψευδοεπιταχύνσεων, $PSA(T)$, μπορεί να γίνει με τη χρήση της σχέσης $PSA(T)=(2\pi/T)PSV(T)$.

Με βάση εμπειρικά μοντέλα πρόβλεψης της ισχυρής σεισμικής κίνησης στον Ελληνικό χώρο με εξαρτημένη μεταβλητή την φασματική ψευδοταχύτητα, $PSV(T)$ και

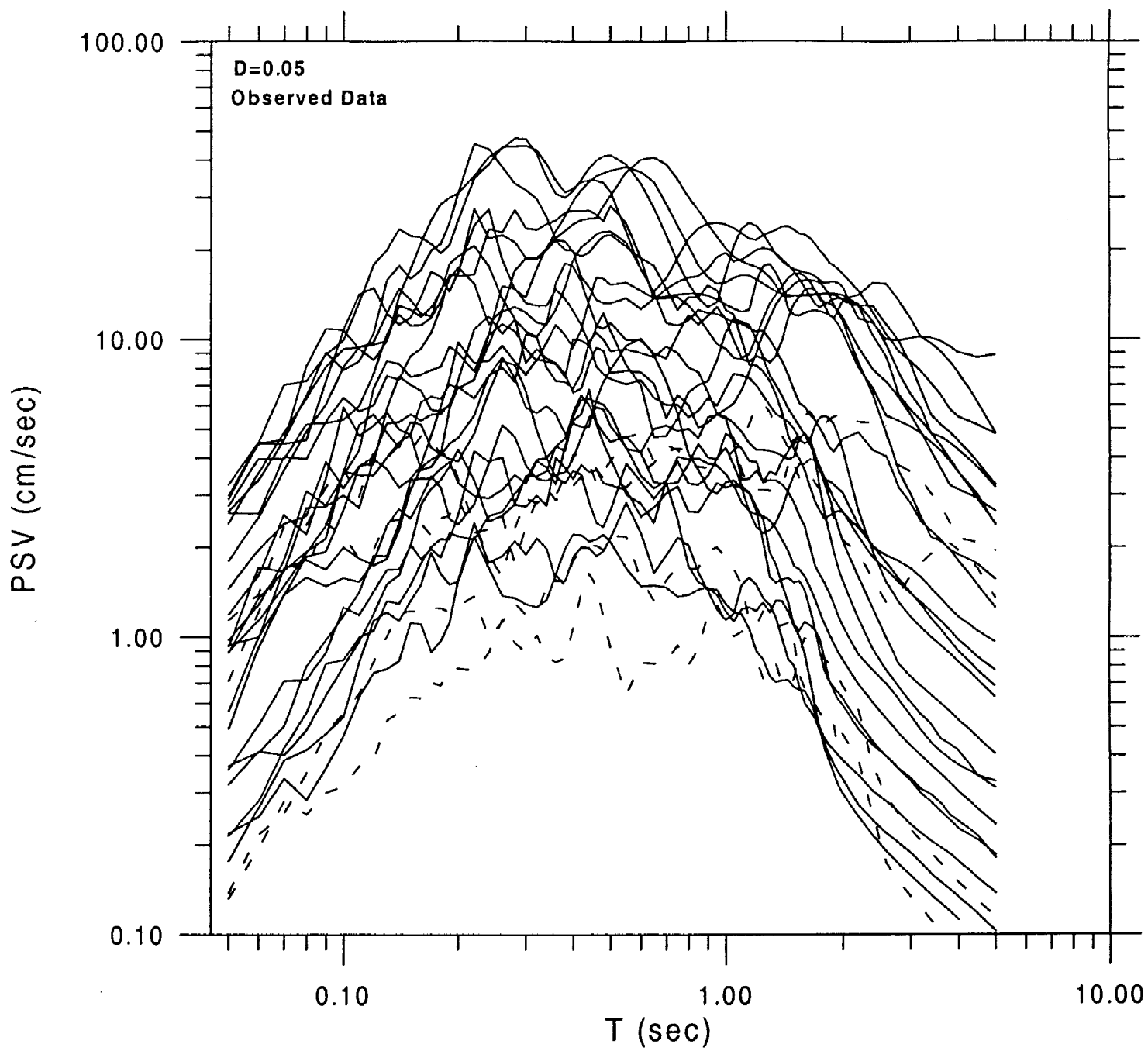
ανεξάρτητες μεταβλητές την μακροσεισμική ένταση, I_{MM} , την και τις εδαφικές συνθήκες, S , $\{PSV(T)=f(I_{MM},S)\}$ (Θεοδουλίδης 1991, Theodulidis and Papazachos 1994) εκτιμήθηκαν οι αναμενόμενες τιμές φασματικής ψευδοταχύτητας για μακροσεισμική ένταση $I_{MM}=VIII$ και IX . Οι τιμές αυτές είναι ρεαλιστικές για την πλειόσειστη περιοχή στο κοντινό πεδίο του κύριου σεισμού (Άνω Λιόσια, Μενίδι κτλ.). Όπως φαίνεται στο σχήμα 15 για ένταση $VIII$ καλύπτονται ικανοποιητικά όλες οι ανηγμένες τιμές φασματικών ψευδοταχυτήτων για ιδιοπεριόδους $T \geq 0.4s$, ενώ για μικρότερες ιδιοπεριόδους, $T < 0.4s$, η ένταση IX καλύπτει πλήρως τις ανηγμένες φασματικές τιμές. Το γεγονός αυτό ενισχύει παραπέρα την ικανοποιητική προαναφερόμενη εκτίμηση της ισχυρής σεισμικής κίνησης στο κοντινό πεδίο του κύριου σεισμού (Σχ. 14).

ΣΧΗΜΑΤΑ

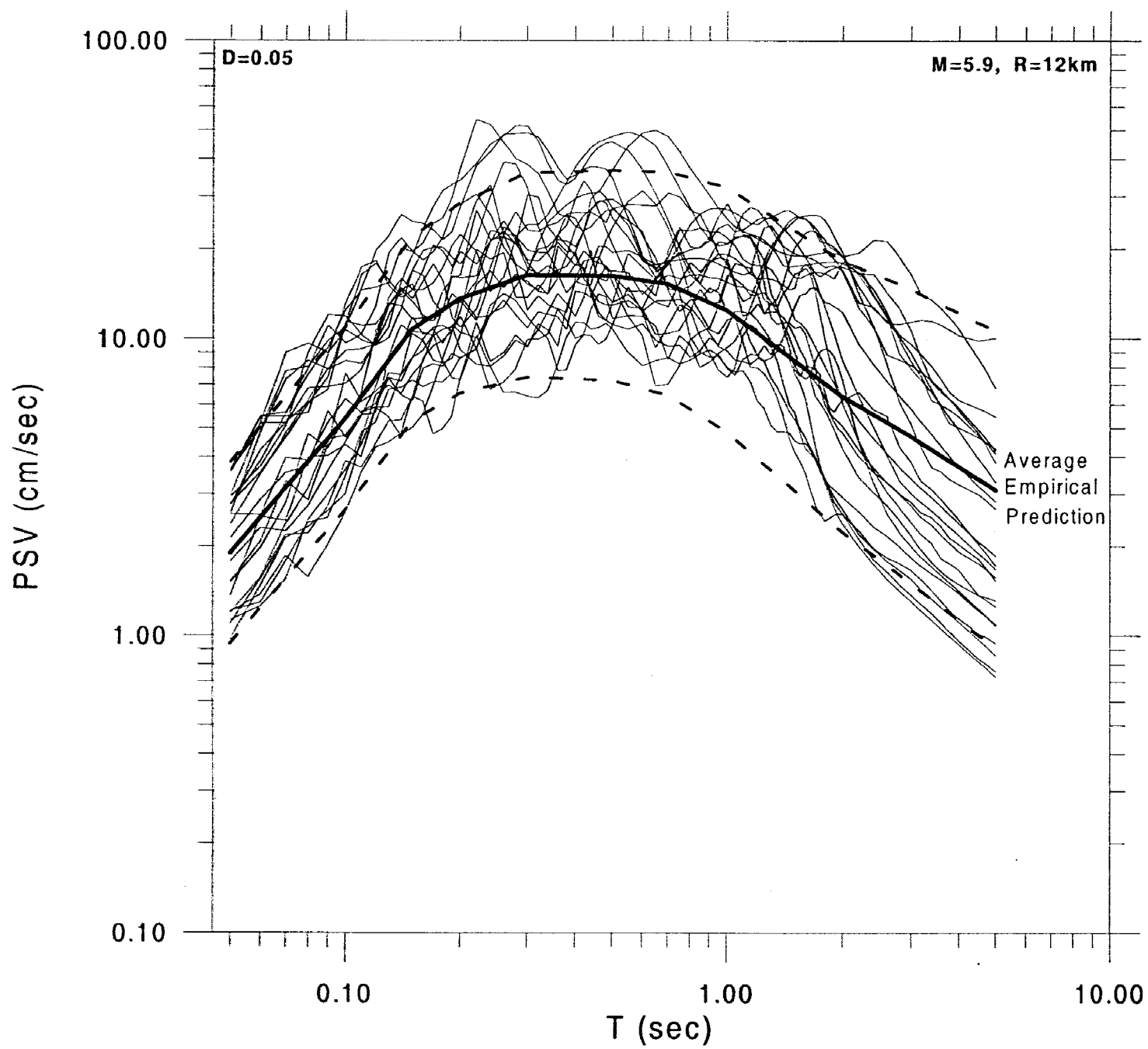
Σχ. 9. Παρατηρημένα φάσματα ψευδοταχύτητας του κύριου σεισμού της 7/9/1999, σε 14 θέσεις της ευρύτερης περιοχής.

Σχ. 10. Ανηγμένα - στο κοντινό πεδίο - φάσματα ψευδοταχύτητας του κύριου σεισμού της 7/9/1999, σε σύγκριση με την *a priori* εκτίμηση της μέσης φασματικής ψευδοταχύτητας \pm μια τυπική απόκλιση, για τον κύριο σεισμό.

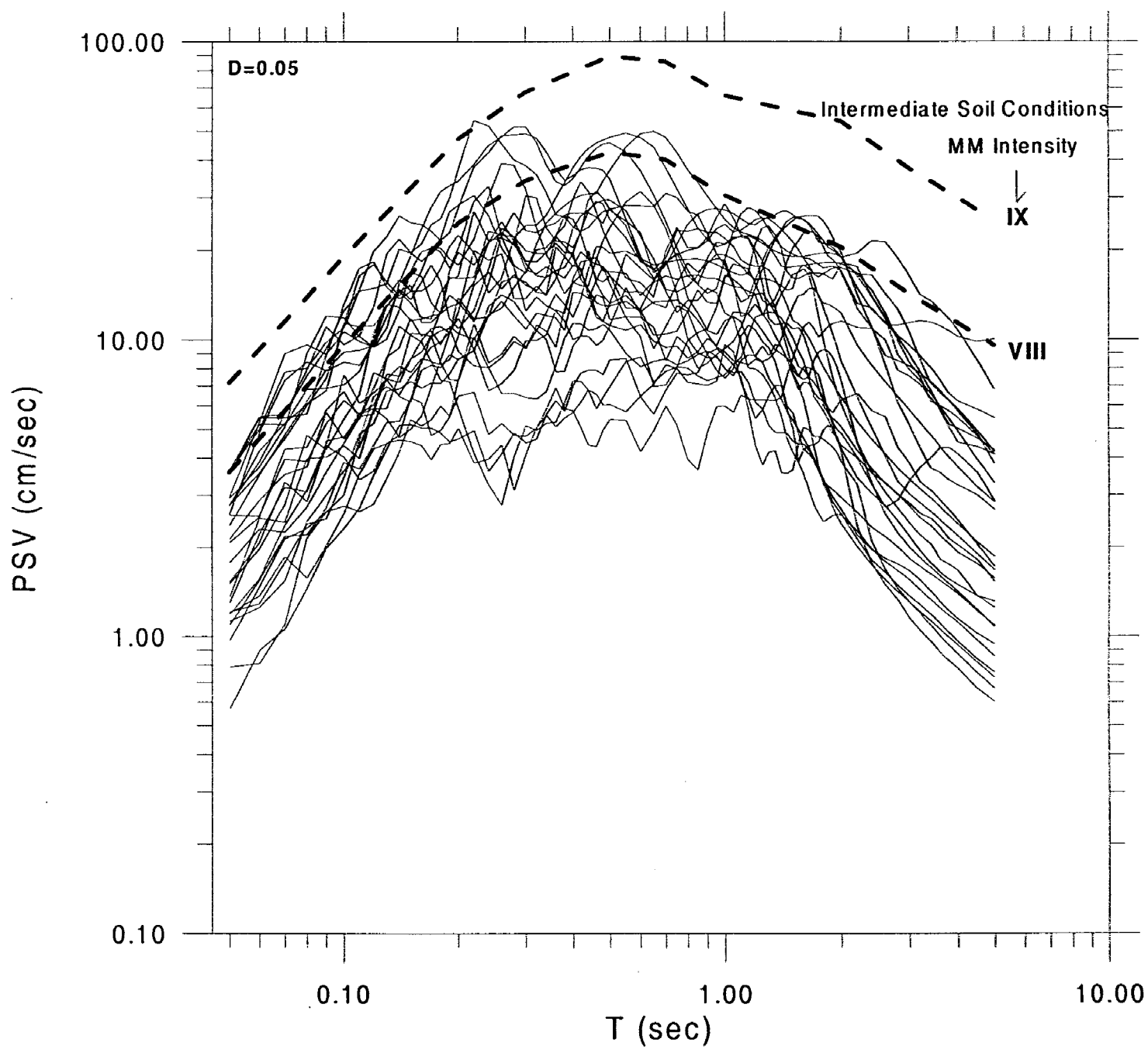
Σχ. 11. Σύγκριση των ανηγμένων φασμάτων ψευδοταχύτητας του κύριου σεισμού με τα *a priori* αναμενόμενα φάσματα ψευδοταχύτητας με βάση τις παρατηρημένες τιμές μακροσεισμικών εντάσεων στο κοντινό πεδίο του κύριου σεισμού.



$\Sigma\chi.9$

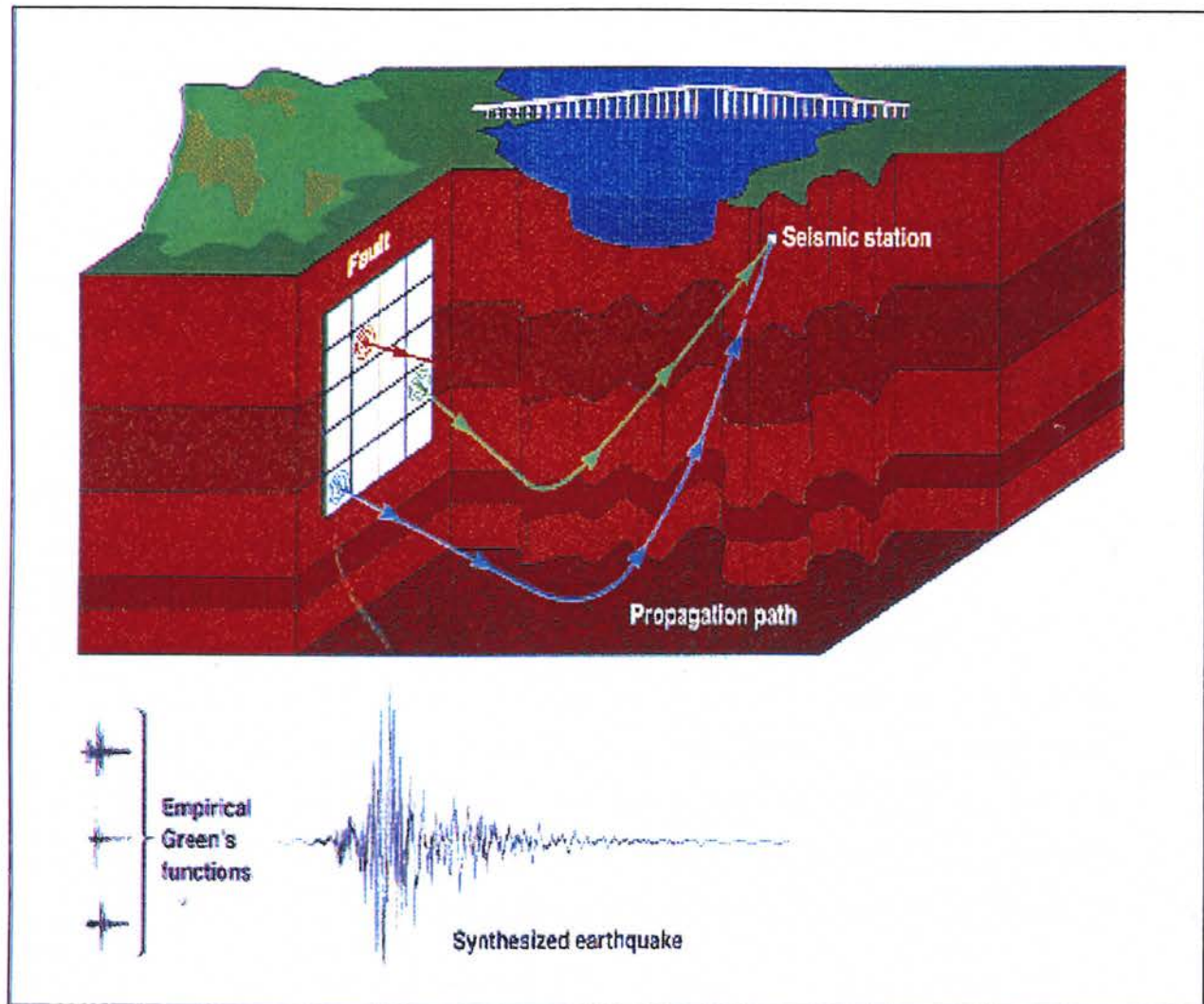


$\Sigma \chi. 10$



$\Sigma\chi. 11$

**Β.3. Προσομοίωση της ισχυρής Σεισμικής Κίνησης με τη Μέθοδο των
Εμπειρικών Συναρτήσεων Green (Empirical Green's Functions: EGF).**



(<http://www-ep.es.lnl.gov/www-ep/ghp/greenfn.html>)

B.3.1. Εισαγωγή

Η μέθοδος των εμπειρικών συναρτήσεων Green βασίζεται στην ιδέα του Hartzell (1978) να προσομοιώσει τις ισχυρές σεισμικές κινήσεις μεγάλων σεισμών ορισμένου σεισμογόνου ρήγματος, χρησιμοποιώντας ως συναρτήσεις του Green τις πραγματικές καταγραφές μικρών σεισμών του ίδιου ρήγματος. Για να γίνει η συλλογή των εμπειρικών συναρτήσεων Green από ένα συγκεκριμένο ρήγμα, τοποθετούνται σειсмоγράφοι ή επιταχυνσιογράφοι στην περιοχή ενδιαφέροντος και για ορισμένο χρονικό διάστημα καταγράφονται μικροσεισμοί που οφείλονται σε πολύ μικρές μετακινήσεις στην επιφάνεια του ρήγματος. Οι μικροσεισμοί έχουν τις εστίες τους σε διάφορα σημεία πάνω στη ρηξιγενή επιφάνεια, οπότε αν το ρήγμα διαιρεθεί σε ορισμένο αριθμό στοιχειωδών ρηγμάτων, η ιδανική συλλογή δεδομένων θα πρέπει να περιλαμβάνει μια καταγραφή από καθένα από αυτά τα στοιχειώδη ρήγματα. Είναι γνωστό όμως ότι οι επιφάνειες των ρηγμάτων είναι ετερογενείς με συνέπεια να υπάρχουν τμήματα που παραμένουν ανενεργά και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται δεδομένα γειτονικών τμημάτων για την προσομοίωση της ισχυρής σεισμικής κίνησης που πρόκειται να προκληθεί από το σεισμογόνο ρήγμα.

Για τον υπολογισμό ενός σεισμογράμματος που να αντιπροσωπεύει το αποτέλεσμα της διάρρηξης όλων των τμημάτων του ρήματος με συγκεκριμένη ταχύτητα, δηλαδή το αποτέλεσμα ενός μεγάλου σεισμού, προστίθενται όλες οι καταγραφές των μικρών σεισμών. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η σύνθεση ολόκληρης της χρονοϊστορίας της σεισμικής κίνησης, χωρίς να απαιτείται η επίδραση της πηγής και του δρόμου διάδοσης με μαθηματικούς υπολογισμούς.

Η αρχική ιδέα του Hartzell (1978) αναπτύχθηκε και βελτιώθηκε στη συνέχεια από διάφορους ερευνητές (Kanamori 1979, Hadley and Helmberger 1980). Σημαντική ώθηση στη μέθοδο των εμπειρικών συναρτήσεων Green έδωσε ο Irikura (1983) προτείνοντας την άθροιση των σεισμικών ιστοριών των διαφόρων τμημάτων του ρήματος με ορισμένη χρονική καθυστέρηση, έτσι ώστε να μπορεί να αποτυπωθεί στη συνθετική καταγραφή ρεαλιστική εικόνα της διάδοσης της διάρρηξης. Από τη σύγκριση με τα πραγματικά σεισμογράμματα προέκυψε ότι ο Irikura πέτυχε τη σύνθεση των ισχυρών κινήσεων από το σεισμό του Izu-Hanto-Toho-Okii (1980, $M=6.7$) για συχνότητες μικρότερες από 1 Hz, ενώ για τις

μεγαλύτερες συχνότητες, ένα στοχαστικό μοντέλο διάρρηξης του ρήγματος θεωρήθηκε ως η πλέον αξιόπιστη αντιμετώπιση. Βελτίωση της μεθόδου των EGF, όπως προτάθηκε από τον Irikura (1983) έγινε από τους Irikura και Kamae (1994), Kamae et al. (1998), Pitarka et al. (1998) ενώ η σχετική έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη με βάση την ιδέα των υβριδικών συναρτήσεων του Green.

B.3.2. Μέθοδος των Εμπειρικών Συναρτήσεων Green

Στη εργασία αυτή έγινε χρήση της μεθόδου που προτάθηκε από τον Irikura (1983, 1986) καθώς και της βελτίωσης της από τους Kamae και Irikura (1994) και Kamae et al. (1998). Ο Irikura (1983) συνδύασε την τεχνική των εμπειρικών συναρτήσεων Green με το νόμο ομοιομορφίας των σεισμών (self similarity law). Αν υποθέσουμε ότι ισχύει ο νόμος αυτός, τότε για δυο σεισμικά γεγονότα διαφορετικού μεγέθους, που συμβαίνουν στην ίδια περιοχή, ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις ομοιομορφίας (Kanamori and Anderson, 1975, Geller, 1976) :

$$\frac{L}{L_e} = \frac{W}{W_e} = \frac{D}{D_e} = \frac{\tau}{\tau_e} = \left(\frac{M_0}{M_{0e}} \right)^{1/3} = N \quad (6)$$

όπου L , W είναι το μήκος και το πλάτος της σεισμικής πηγής, αντίστοιχα, D η τελική μετατόπιση πάνω στην επιφάνεια του ρήγματος, τ ο χρόνος ανάδυσης και M_0 η σεισμική ροπή. Οι παράμετροι με τον δείκτη e αντιπροσωπεύουν τα αντίστοιχα μεγέθη για το μικρότερο σεισμό (element event).

Οι παραπάνω σχέσεις (6) τροποποιήθηκαν κατάλληλα (Kamae και Irikura, 1994, Kamae et al., 1998) ώστε να λαμβάνεται υπόψη και η διαφορά στην πτώση τάσης μεταξύ του μεγάλου και του μικρού σεισμού. Οι τροποποιημένες σχέσεις είναι :

$$\frac{L}{L_e} = \frac{W}{W_e} = \frac{D}{CD_e} = \frac{\tau}{\tau_e} = \left(\frac{M_0}{CM_{0e}} \right)^{1/3} = N \quad (7)$$

όπου η παράμετρος C εκφράζει ακριβώς το λόγο της πτώσης τάσης του μεγάλου σεισμού προς την πτώση τάσης του μικρού σεισμού.

Οι φασματικές σχέσεις μεταξύ μεγάλων και μικρών σεισμών στις χαμηλές και στις υψηλές συχνότητες είναι αντίστοιχα :

$$\frac{U_0}{U_{0e}} = \frac{M_0}{M_{0e}} = CN^3, \quad \frac{A_0}{A_{0e}} = CN \quad (8)$$

όπου U_0 είναι η τιμή που καθορίζεται από το οριζόντιο τμήμα του φάσματος της μετατόπισης και A_0 η τιμή που καθορίζεται από το οριζόντιο τμήμα του φάσματος της επιτάχυνσης.

Ο παράγοντας C έχει εξαιρετικά μεγάλη σημασία για το αποτέλεσμα της προσομοίωσης (Kamae et al., 1998) και ιδιαίτερα για τα μέγιστα πλάτη των συνθετικών ισχυρών κινήσεων. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίον η τροποποίηση των παραπάνω σχέσεων θεωρείται απαραίτητη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το επιταχυνσιογράφημα του μεγάλου σεισμού, $A(t)$, εκφράζεται σε σχέση με εκείνο του μικρού σεισμού, $a(t)$, από τη σχέση :

$$A(t) = \sum_{i=1}^{N^2} \frac{r_i}{r_i} F(t - t_i) * Ca(t) \quad (9)$$

$$\text{όπου} \quad F(t) = \delta(t) + \frac{1}{n'} \sum_{j=1}^{(N-1)n'} \delta\left[t - \frac{(j-1)T}{(N-1)n'}\right] \quad \text{και} \quad t_i = \frac{r_i}{V_c} + \frac{\xi_i}{V_r} + e_i$$

Στις σχέσεις αυτές είναι : r η απόσταση του σημείου παρατήρησης από την εστία του μικρού σεισμού, r_i η απόσταση του σημείου παρατήρησης από το κέντρο του i τμήματος της επιφάνειας του ρήγματος, ξ_i η απόσταση του σημείου από το οποίο άρχισε η διάρρηξη από το κέντρο του i τμήματος, V_r η ταχύτητα διάρρηξης, V_c η ταχύτητα των εξεταζόμενων κυμάτων, T ο χρόνος ανάδυσης του

μεγάλου σεισμού και n' ακέραιος αριθμός για την απομάκρυνση τυχαίας περιοδικότητας που υπεισέρχεται κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας (Irikura, 1983). Η συνάρτηση $F(t)$ καθορίζει τη διαφορά της συνάρτησης ταχύτητας ολίσθησης του μεγάλου σεισμού από την αντίστοιχη συνάρτηση του μικρού σεισμού. Ο πρώτος όρος του δεξιού μέλους της $F(t)$, αντιπροσωπεύει τη συνάρτηση ενός μοναδιαίου παλμού, $\delta(t)$ (delta function), ενώ ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει έναν τετραγωνικό παλμό διάρκειας T . Ο αριθμός e_i είναι ένας τυχαίος αριθμός που υπεισέρχεται για να δοθεί ένας τυχαίος χαρακτήρας στη διαδικασία διάδοσης της διάρρηξης (Frankel, 1995, Kamae et al., 1998).

B.3.3. Εφαρμογή της Μεθοδολογίας

(α) Χαρακτηριστικά σεισμικής πηγής του κύριου σεισμού

Το μέγεθος ροπής του κύριου σεισμού της Αθήνας ήταν $M_w=5.9$. Η σεισμική ροπή M_0 καθώς και άλλα βασικά χαρακτηριστικά της σεισμικής εστίας τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή δίνονται στον Πίνακα 4:

Πίνακας 4. Δεδομένα εστιακών παραμέτρων του σεισμού της 7/9/1999.

Συν/νες Επικέντρου	Βάθος (km)	Σεισμική Ροπή (dyn.cm)	Διεύθυνση (deg)	Κλίση (deg)	Γωνία (deg) Ολίσθησης	L / w (km)
-	10.	$9.2 \cdot 10^{24}$ (1)	120	57	-80	18 / 10
38.13N 23.55E	-	$7.8 \cdot 10^{24}$ (2)	-	-	-	-
38.02N 23.17E	-	$12.0 \cdot 10^{24}$ (3)	-	-	-	-
-	-	$7.2 \cdot 10^{24}$ (4)	-	-	-	-
38.059N 23.571E	14.5	- (5)	115-120	55	-	18 / 10

(1) Louvari and Kiratzi (2000)

(2) USGS

(3) Harvard University

(4) $\log M_0 = 1.5 M_w + 15.99$ (Papazachos and Papazachou, 1997)

(5) Παπαζάχος και συνεργ. (2000).

Το μοντέλο δομής στην εξεταζόμενη περιοχή δίνει μια μέση ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων $V_s \approx 3.3 \text{ km/sec}$ (Παπαζάχος και συνεργ. 2000, Tselentis and Zahradnik 2000).

Για τον υπολογισμό του χρόνου ανάδυσης, τ , του υπό προσομοίωση σεισμού, χρησιμοποιήθηκε κατ' αρχήν η εμπειρική σχέση του Geller (1976) :

$$\tau = \frac{16S^{1/2}}{(7\pi^{3/2}\beta)} \quad (10)$$

όπου $S=(L \times w)$ είναι η επιφάνεια του ρήγματος και β η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων. Με βάση τα δεδομένα που προαναφέρθηκαν, ο χρόνος ανάδυσης παίρνει την υψηλή τιμή $\tau=1.7\text{sec}$.

Εάν δεχθούμε δικατευθυντική διάρρηξη στην επιφάνεια του σειсмоγόνου ρήγματος ($L=18\text{km}$), ως την πλέον ρεαλιστική όπως συζητείται παρακάτω, με μία ταχύτητα διάρρηξης $V_r=0.8V_s=2.64\text{ km/sec}$, τότε ο συνολικός χρόνος διάρρηξης είναι $t_r=3.4\text{sec}$. Ο χρόνος αυτός είναι συγκρίσιμος με την περιβαλλόμενη διάρκεια της ισχυρής σεισμικής κίνησης - για πλάτος εδαφικής επιτάχυνσης μεγαλύτερο ή ίσο του $0.05g$ - σε δύο επιταχυνσιογραφήματα των σταθμών του ΙΤΣΑΚ στον ΑΤΗ2-Χαλάνδρι $\sim 2.9\text{sec}$ και στον ΑΤΗ4-Γ.Υ.Σ. $\sim 2.6\text{sec}$ (Anastasiadis et al. 1999). Οι σταθμοί αυτοί επιλέχθηκαν με βάση το κριτήριο ότι η επίδραση των εδαφικών συνθηκών στην διάρκεια της ισχυρής κίνησης ήταν μάλλον ελάχιστη. Σύμφωνα με τον Heaton(1990), ο χρόνος ανάδυσης είναι της τάξης του 10% του συνολικού χρόνου διάρρηξης στο σειсмоγόνο ρήγμα, δηλαδή, της τάξης των 0.3sec . Η τιμή αυτή είναι σε καλή συμφωνία με εκείνη που προτάθηκε από τους Tselentis και Zahradnik (2000) και που σύμφωνα με αυτούς κυμαίνεται μεταξύ 0.1sec και 0.3sec . Για την τεκμηρίωση της ισχυρής σεισμικής κίνησης στη θέση KER ως χρόνος ανάδυσης χρησιμοποιήθηκε η τιμή $\tau=0.3\text{sec}$. Στο Σχήμα 12 δίνεται η οριζόντια συνιστώσα της καταγραφής του κυρίου σεισμού στη θέση KER με τη μεγαλύτερη εδαφική επιτάχυνση.

(β) Χαρακτηριστικά σεισμικής πηγής του μετασεισμού

Ο μετασεισμός που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή της μεθόδου EGF επιλέχθηκε με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

- να έχει παρόμοιο μηχανισμό γένεσης με εκείνον του κύριου σεισμού.
- να έχει εστία πάνω στην επιφάνεια του ρήγματος του κυρίου σεισμού.
- να έχει το δυνατόν μεγαλύτερο μέγεθος από εκείνους που κατέγραψαν οι επιταχυνσιογράφοι του μετασεισμικού δικτύου.
- να έχει καταγραφές σε όλες τις θέσεις όπου πρόκειται να γίνει η τεκμηρίωση και η προσομοίωση (KER, MND, FRN)

Τέτοιος μετασεισμός είναι εκείνος της 16/6/1999 (23:02:38.45 GMT), με επίκεντρο 38°04.08N, 23°38.79E, εστιακό βάθος $h=8\text{km}$ και τοπικό μέγεθος, $M_L=3.0$ (Παπαζάχος και συνεργ. 2000). Η σεισμική ροπή του μετασεισμού αυτού υπολογίστηκε από τη σχέση των Margaris και Papazachos (1999):

$$\text{Log}M_0 = 1.335M_L + 17.585 \quad (11)$$

και είναι ίση με $M_0 = 3.89 \cdot 10^{21} \text{ dyn.cm}$. Στο Σχήμα 13 δίνεται η οριζόντια συνιστώσα της καταγραφής του επιλεγμένου μετασεισμού στη θέση KER με τη μεγαλύτερη εδαφική επιτάχυνση η οποία είναι ίδια σε διεύθυνση με εκείνη του κυρίου σεισμού. Στα Σχήματα 14 και 15, δίνονται οι οριζόντιες συνιστώσες του επιλεγμένου μετασεισμού με τις μεγαλύτερες εδαφικές επιταχύνσεις που καταγράφηκαν στις θέσεις MND (Μενίδι) και FRN (Faran S.A.).

B.3.4. Τεκμηρίωση του Μοντέλου Διάρρηξης στη Θέση KER (Κερατσίνι)

Στο Σχήμα 16 δίνεται η θέση του ρήγματος, του επικέντρου του κύριου σεισμού, των επικέντρων καλά υπολογισμένων μετασεισμών και οι σταθμοί επιταχυνσιογράφων που εγκαταστάθηκαν στην πλειόσειστη περιοχή.

Μετά από τον υπολογισμό των τιμών των εστιακών παραμέτρων του μεγάλου και του μικρού σεισμού, υπολογίζεται ο αριθμός των τμημάτων στα οποία πρέπει να διαιρεθεί το ρήγμα του υπό προσομοίωση σεισμού. Η διαίρεση του ρήγματος γίνεται σε $N \times N$ τμήματα, όπου N είναι ο πιο κοντινός ακέραιος στην τιμή που υπολογίζεται από τις σχέσεις :

$$N = \left(\frac{U_0}{C \cdot U_{0e}} \right)^{1/3}, \quad C = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \sigma_e} = \frac{A_0}{N \cdot A_{0e}} \quad (12)$$

Στην παραπάνω σχέση, A_0 , A_{0e} οι μέσες τιμές του επιπέδου του φάσματος των επιταχύνσεων και U_0 , U_{0e} είναι οι μέσες τιμές του επιπέδου του φάσματος των μετατοπίσεων του μεγάλου και του μικρού σεισμού, αντίστοιχα. C είναι ο λόγος των τιμών της πτώσης τάσης των δυο συμβάντων. Στο Σχήμα 17 παρουσιάζονται τα δύο πιθανά μοντέλα διάρρηξης του ρήγματος που εξετάστηκαν στην εργασία αυτή. Στα Σχήματα 18 και 19 φαίνεται η εκτίμηση των τιμών των A_0 , A_{0e} και U_0 , U_{0e} . Έτσι, $A_0/A_{0e} \approx 33$ και $U_0/U_{0e} \approx 1850$. Με βάση τις σχέσεις (12) έχουμε τις τιμές $N \approx 8$ και $C \approx 4.4$.

Προκειμένου να γίνει διερεύνηση του ρεαλιστικότερου μοντέλου διάρρηξης στο σεισμογόνο ρήγμα, με δεδομένες τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων όπως έχουν προαναφερθεί, υιοθετήθηκαν 2 μοντέλα διάρρηξης, εκείνο της δικατευθυντικής (bilateral) και της κυκλικής (radial) διάρρηξης καθώς και 12 διαφορετικά σημεία έναρξης αυτής στην επιφάνεια του ρήγματος, S_1, S_2, \dots, S_{12} (Σχ. 17). Τα αποτελέσματα προσομοίωσης για κάθε σενάριο υπό μορφή επιταχυνσιογραφήματος δίνονται στο Παράρτημα 1. Στον Πίνακα 5 δίνονται οι τιμές των μεγίστων εδαφικών επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μεταθέσεων των συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων που δίνονται στο Παράρτημα 1, για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια διάρρηξης και για χρόνο ανάδυσης $\tau=0.3\text{sec}$. Οι αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές στη θέση KER, της οριζόντιας συνιστώσας με τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, είναι $\text{PGA}=206\text{cm/sec}^2$, $\text{PGV}=11.2\text{cm/sec}$ και $\text{PGD}=1.02\text{cm}$.

Πίνακας 5. Υπολογισμένες τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας, μετάθεσης για προσομοίωση με δικατευθυντική και κυκλική διάρρηξη και διάφορα σενάρια έναρξης της διάρρηξης (Σχ. 17).

Σενάριο Διάρρηξης	h(km) (***)	R (km) (***)	Αζιμούθιο (deg) του KER (***)	PGA (cm/sec ²)	PGV (cm/sec)	PGD (cm)
1 Lateral(*) 1 Radial(**)	12	18.5	147	171 232	9.6 9.3	0.75 0.66
2 Lateral 2 Radial	10	19.5	152	176 162	9.2 5.6	0.77 0.48
3 Lateral 3 Radial	8	20.3	155	197 187	9.8 7.8	0.78 0.38
4 Lateral 4 Radial	6	21.3	159	184 168	8.8 6.0	0.75 0.37
5 Lateral 5 Radial	12	13.2	168	234 133	11.8 6.6	0.84 0.39
6 Lateral 6 Radial	10	14.2	166	191 149	9.3 5.8	0.94 0.47
7 Lateral 7 Radial	8	15.5	170	196 276	8.7 8.8	0.95 0.46
8 Lateral 8 Radial	6	16.5	174	173 196	9.5 6.9	0.86 0.41
9 Lateral 9 Radial	12	9	204	174 173	7.8 5.0	0.66 0.39
10 Lateral 10 Radial	10	11	205	169 163	7.2 5.5	0.62 0.37
11 Lateral 11 Radial	8	12	205	175 134	7.8 5.9	0.65 0.40
12 Lateral 12 Radial	6	13.5	206	161 166	7.6 6.0	0.63 0.35

(*) Δικατευθυντική διάρρηξη,

(**) Κυκλική διάρρηξη

(***) Βάθος (h), επικεντρική απόσταση (R) και αζιμούθιο (deg)
του KER σε σχέση με το σημείο έναρξης της διάρρηξης

Στο Σχήμα 20 δίνονται οι λόγοι των μεγίστων τιμών εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας, μετάθεσης των συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων προς τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές στη θέση KER. Παρατηρείται ότι το μοντέλο της δικατευθυντικής διάρρηξης παρουσιάζει γενικά μικρότερη διασπορά από εκείνο της κυκλικής διάρρηξης. Για το πρώτο μοντέλο το ικανοποιητικότερο σενάριο είναι το 5. Δηλαδή, η

διάρρηξη ξεκινά από το βαθύτερο σημείο του ρήγματος κοντά στην εστία του υπολογισμένου επικέντρου του κυρίου σεισμού από τους Παπαζάχο και συνεργ. (2000) και διαδίδεται ταυτόχρονα προς τις δύο άκρες του. Στο Σχήμα 21 φαίνεται η σύγκριση του παρατηρημένου επιταχυνσιογραφήματος στη θέση KER (οριζόντια συνιστώσα με τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση) με τα συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα για δύο μοντέλα διάρρηξης και την υπόθεση του σεναρίου έναρξης αυτής 5. Η καλή συμφωνία τόσο στα πλάτη όσο και στη διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης για το μοντέλο της δικατευθυντικής διάρρηξης είναι εμφανής. Επιπλέον, η σύγκριση του φασματικού περιεχομένου του παρατηρημένου επιταχυνσιογραφήματος με τα συνθετικά του σεναρίου 5 δείχνει την καλύτερη συμφωνία για το μοντέλο της δικατευθυντικής διάρρηξης σε όλο το φάσμα των εξεταζόμενων συχνοτήτων και ιδιαίτερα στο εύρος μεταξύ 1Hz - 4Hz (Σχ. 22, 23).

B.3.5. Προσομοίωση της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης στις Θέσεις MND και FRN – Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα της τεκμηρίωσης στη θέση KER προέκυψε ότι το σενάριο έναρξης της διάρρηξης 5 είναι εκείνο το οποίο προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική καταγραφή. Ασφαλώς, η τεκμηρίωση σε μια μόνον θέση δεν εξασφαλίζει πλήρως την εκτίμηση του μοντέλου διάρρηξης, αλλά το προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό. Η χρήση περισσότερων ζευγών καταγραφής κυρίου σεισμού-μετασεισμού σε διάφορες θέσεις και αζιμούθια γύρω από το σεισμογόνο ρήγμα μπορεί οδηγήσει σε ένα «μέσο» μοντέλο διάρρηξης η χρήση του οποίου θα είχε και μεγαλύτερη στατιστική αξία κατά την προσομοίωση της ισχυρής σεισμικής κίνησης.

Η προσομοίωση στις θέσεις MND (Μενίδι) και FRN (Faran S.A.) έγινε τόσο για δικατευθυντική όσο και για κυκλική διάρρηξη και για χρόνους ανάδυσης $\tau=0.3, 0.2$ και 0.1sec . Ως εμπειρική συνάρτηση του Green χρησιμοποιήθηκε εκείνος ο μετασεισμός που χρησιμοποιήθηκε κατά την τεκμηρίωση και καταγράφηκε στις θέσεις MND (Σχ. 14) και FRN (Σχ. 15). Στο Παράρτημα 2 δίνονται τα συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα που προέκυψαν από την προσομοίωση στις παραπάνω θέσεις. Στον Πίνακα 6 δίνονται οι τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης και ταχύτητας των συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων για τα δύο μοντέλα διάρρηξης του σεναρίου 5 και για χρόνους ανάδυσης $\tau=0.1, 0.2, 0.3\text{sec}$.

Πίνακας 6. Τιμές μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης(PGA) και ταχύτητας(PGV) των συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων στις θέσεις MND και FRN, για διάφορους χρόνους ανάδυσης της σεισμικής εστίας του κυρίου σεισμού.

Μοντέλο Διάρρηξης	Χρόνος(sec) Ανάδυσης	MND		FRN	
		PGA(cm/sec ²)	PGV(cm/sec)	PGA(cm/sec ²)	PGV(cm/sec)
5-Κυκλική	0.3	232	6.7	122	4.4
5-Κυκλική	0.2	237	8.2	133	6.8
5-Κυκλική	0.1	367	11.4	294	10.9
5-Δικατευθυντική	0.3	165	4.0	93	3.2
5-Δικατευθυντική	0.2	180	6.7	118	4.2
5-Δικατευθυντική	0.1	300	12.3	203	6.7

Στα Σχήματα 24 και 25 δίνονται τα συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα στις θέσεις MND και FRN, αντίστοιχα, για μοντέλο δικατευθυντικής διάρρηξης και χρόνο ανάδυσης $\tau=0.2, 0.1\text{sec}$. Η ισχυρή σεισμική κίνηση στις δύο θέσεις φαίνεται να παρουσιάζει σημαντικές διαφορές. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι ότι οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις στη θέση MND είναι κατά 50% υψηλότερες από εκείνες στη θέση FRN στην οποία όμως η διάρκεια της ισχυρής δόνησης (~8sec) είναι διπλάσια της αντίστοιχης στη θέση MND (~4sec). Η κατά 40% μεγαλύτερη επικεντρική απόσταση της θέσης FRN από την αντίστοιχη της θέσης MND μπορεί να ερμηνεύσει ένα μέρος της αύξησης της ισχυρής διάρκειας στην πρώτη. Ωστόσο, η επίδραση της τοπογραφίας στη θέση FRN φαίνεται, μεταξύ των άλλων, ότι συνέβαλλε στην αύξηση της διάρκειας της ισχυρής δόνησης (Γκαζέτας 2000, προσωπική επικοινωνία).

Τα φάσματα απόκρισης επιτάχυνσης, για παράγοντα απόσβεσης $D=0.05$, των συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων στη θέση MND και FRN, δίνονται στα Σχήματα 26 και 27, αντίστοιχα. Είναι εμφανής η επίδραση του χρόνου ανάδυσης κυρίως στα φασματικά πλάτη τα οποία σχεδόν τριπλασιάζονται για τη μείωση του χρόνου ανάδυσης από 0.3sec σε 0.1sec. Ωστόσο, η αβεβαιότητα αυτή που προέρχεται από την αδυναμία ακριβούς εκτίμησης μιας παραμέτρου της σεισμικής εστίας είναι συγκρίσιμη με εκείνη που ενυπάρχει σε εμπειρικά μοντέλα πρόβλεψης φασματικών τιμών που έχουν προταθεί για τον ελληνικό χώρο (Theodulidis and Papazachos 1994).

Στα Σχήματα 28 και 29 γίνεται σύγκριση των μεγίστων φασματικών τιμών επιτάχυνσης των συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων στις θέσεις MND και FRN όπως προέκυψαν από την αιτιοκρατική μεθοδολογία των εμπειρικών συναρτήσεων του Green και τη στοχαστική μεθοδολογία για πηγή πεπερασμένων διαστάσεων, αντίστοιχα, με τα ελαστικά φάσματα σχεδιασμού κατά τον Ε.Α.Κ. (2000), για τη ζώνη II και για εδαφικές κατηγορίες Α και Β. Στα ίδια σχήματα δίνεται και το φάσμα απόκρισης του κύριου σεισμού στη θέση KER. Είναι προφανής η υπέρβαση των προβλεπόμενων από τον Ε.Α.Κ. φασματικών τιμών και στις δύο περιπτώσεις συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων. Για την περίπτωση της αιτιοκρατικής προσομοίωσης γίνεται υπέρβαση των φασματικών πλατών κατά Ε.Α.Κ. (2000) μέχρι και 3 φορές στην εύρος ιδιοπεριόδων 0.1sec – 0.4sec. Κάτι αντίστοιχο παρατηρείται και για την περίπτωση της φασματικής προσομοίωσης με τη διαφορά ότι η υπέρβαση παρατηρείται για μεγαλύτερο εύρος ιδιοπεριόδων, 0.1sec – 0.8sec. Στο Σχήμα 30 συγκρίνονται οι περιβάλλουσες των φασματικών τιμών επιταχύνσεων των Σχημάτων 28 και 29, με τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το κοντινό πεδίο από εμπειρικά μοντέλα απόσβεσης της ισχυρή κίνησης που προτάθηκαν για τον Ελληνικό χώρο (Σχ. 10). Είναι ενδιαφέρουσα η ικανοποιητική συμφωνία των άνω ορίων των τιμών φασματικής επιτάχυνσης που προκύπτουν από τρεις ανεξάρτητες μεθοδολογίες. Παρατηρείται, μεταξύ των άλλων, ότι η ισχυρή εδαφική κίνηση σε τιμές φασματικής επιτάχυνσης στην πλειόσειστη περιοχή (θέσεις MND και FRN), μπορεί να είχε υπερβεί έως και τρεις φορές τις αντίστοιχες τιμές του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού κατά Ε.Α.Κ., για το κρίσιμο εύρος ιδιοπεριόδων 0.1sec-0.5sec.

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχ. 12. Οριζόντια συνιστώσα με τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση του επιταχυνσιογραφήματος του κύριου σεισμού στη θέση KER.

Σχ. 13. Οριζόντια συνιστώσα με τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση του επιταχυνσιογραφήματος μετασεισμού στη θέση KER που επιλέχθηκε για την προσομοίωση.

Σχ. 14. Οριζόντια συνιστώσα με τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση του επιταχυνσιογραφήματος μετασεισμού στη θέση MND που επιλέχθηκε για την προσομοίωση.

Σχ. 15. Οριζόντια συνιστώσα με τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση του επιταχυνσιογραφήματος μετασεισμού στη θέση FRN που επιλέχθηκε για την προσομοίωση.

Σχ. 16. Επίκεντρα μετασεισμών και οι θέσεις των επιταχυνσιογράφων στην ευρύτερη πλειόσειστη περιοχή του σεισμού της 7/9/1999 (Παπαζάχος και συνεργ. 2000). Με κίτρινο μεγάλο και μικρό τετράγωνο δίνεται, αντίστοιχα, η θέση επικέντρου του κύριου σεισμού και του επιλεγμένου για την προσομοίωση μετασεισμού.

Σχ. 17. Διάφορα σενάρια (1,2,...12) έναρξης της διάρρηξης του κύριου σεισμού για δύο μοντέλα διάρρηξης στο σεισμικό ρήγμα, (α) δικατευθυντικό (πάνω) και (β) κυκλικό (κάτω).

Σχ. 18. Φάσματα Fourier επιτάχυνσης του κύριου σεισμού (ker001) και του επιλεγμένου για την προσομοίωση μετασεισμού (ker073) στη θέση KER.

Σχ. 19. Φάσματα Fourier μετάθεσης του κύριου σεισμού (ker001) και του επιλεγμένου για την προσομοίωση μετασεισμού (ker073) στη θέση KER.

Σχ. 20. Λόγοι των παρατηρημένων μεγίστων εδαφικών τιμών (PGA, PGV, PGD) προς τις αντίστοιχες που προέκυψαν από την αιτιοκρατική προσομοίωση, για τα δύο μοντέλα διάρρηξης στη σεισμική πηγή και για 12 σενάρια έναρξης της διάρρηξης.

Σχ. 21. Σύγκριση του παρατηρημένου επιταχυνσιογραφήματος με το συνθετικό στη θέση KER, για τα δύο μοντέλα διάρρηξης (δικατευθυντικό, κυκλικό) και για το σενάριο 5 έναρξης της διάρρηξης.

Σχ. 22. Σύγκριση των φασμάτων Fourier επιτάχυνσης του παρατηρημένου επιταχυνσιογραφήματος (μαύρη γραμμή) με το συνθετικό (κόκκινη γραμμή) στη θέση KER, για το δικατευθυντικό μοντέλο διάρρηξης και για το σενάριο 5 έναρξης της διάρρηξης.

Σχ. 23. Σύγκριση των φασμάτων Fourier επιτάχυνσης του παρατηρημένου επιταχυνσιογραφήματος (μαύρη γραμμή) με το συνθετικό (κόκκινη γραμμή) στη θέση KER, για το κυκλικό μοντέλο διάρρηξης και για το σενάριο 5 έναρξης της διάρρηξης.

Σχ. 24. Συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα (κόκκινη γραμμή) στη θέση MND για χρόνο ανάδυσης $\tau=0.2\text{sec}$ και 0.1sec και για δικατευθυντικό μοντέλο διάρρηξης (σενάριο 5), με βάση το παρατηρημένο επιταχυνσιογράφημα του επιλεγμένου μετασεισμού (μπλε γραμμή).

Σχ. 25. Συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα (κόκκινη γραμμή) στη θέση FRN για χρόνο ανάδυσης $\tau=0.2\text{sec}$ και 0.1sec και για δικατευθυντικό μοντέλο διάρρηξης (σενάριο 5), με βάση το παρατηρημένο επιταχυνσιογράφημα του επιλεγμένου μετασεισμού (μπλε γραμμή).

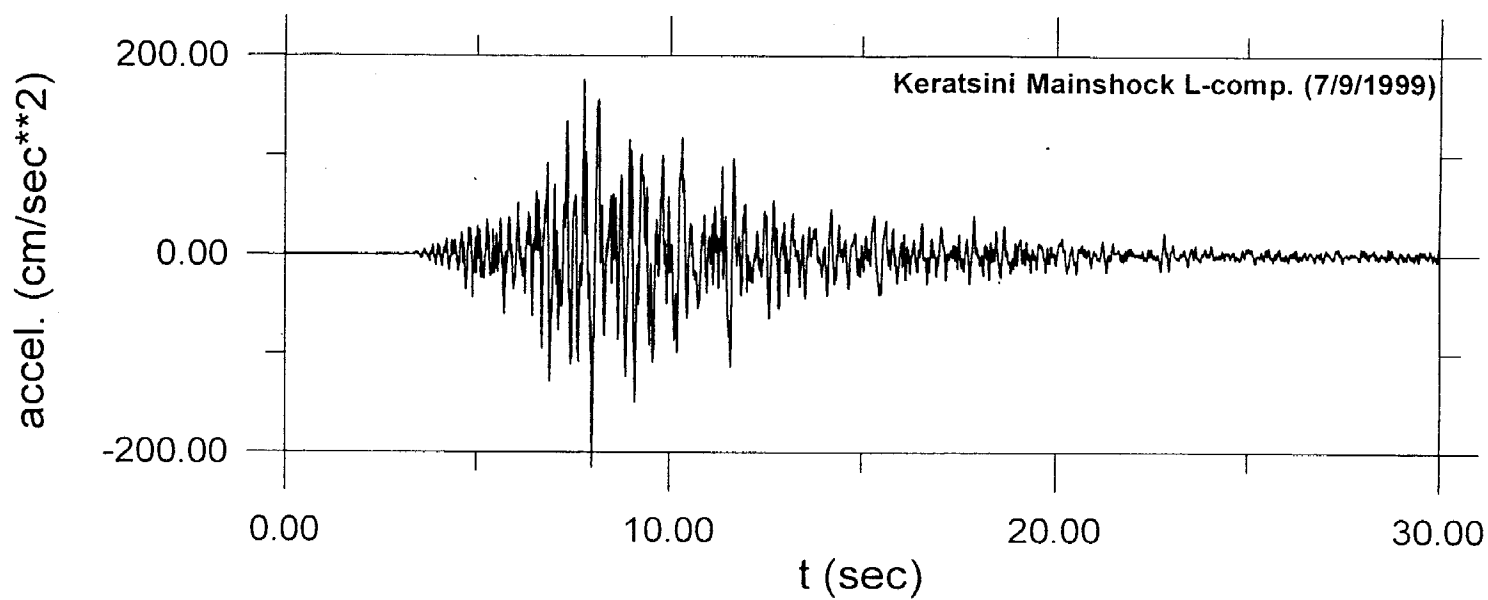
Σχ. 26. Φάσματα απόκρισης επιτάχυνσης των συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων, με βάση την αιτιοκρατική μέθοδο των εμπειρικών συναρτήσεων του Green, στη θέση MND, για χρόνο ανάδυσης $\tau=0.3\text{sec}$, 0.2sec , 0.1sec , για δικατευθυντικό μοντέλο διάρρηξης (σενάριο 5).

Σχ. 27. Φάσματα απόκρισης επιτάχυνσης των συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων, με βάση την αιτιοκρατική μέθοδο των εμπειρικών συναρτήσεων του Green, στη θέση FRN, για χρόνο ανάδυσης $\tau=0.3\text{sec}$, 0.2sec , 0.1sec , για δικατευθυντικό μοντέλο διάρρηξης (σενάριο 5).

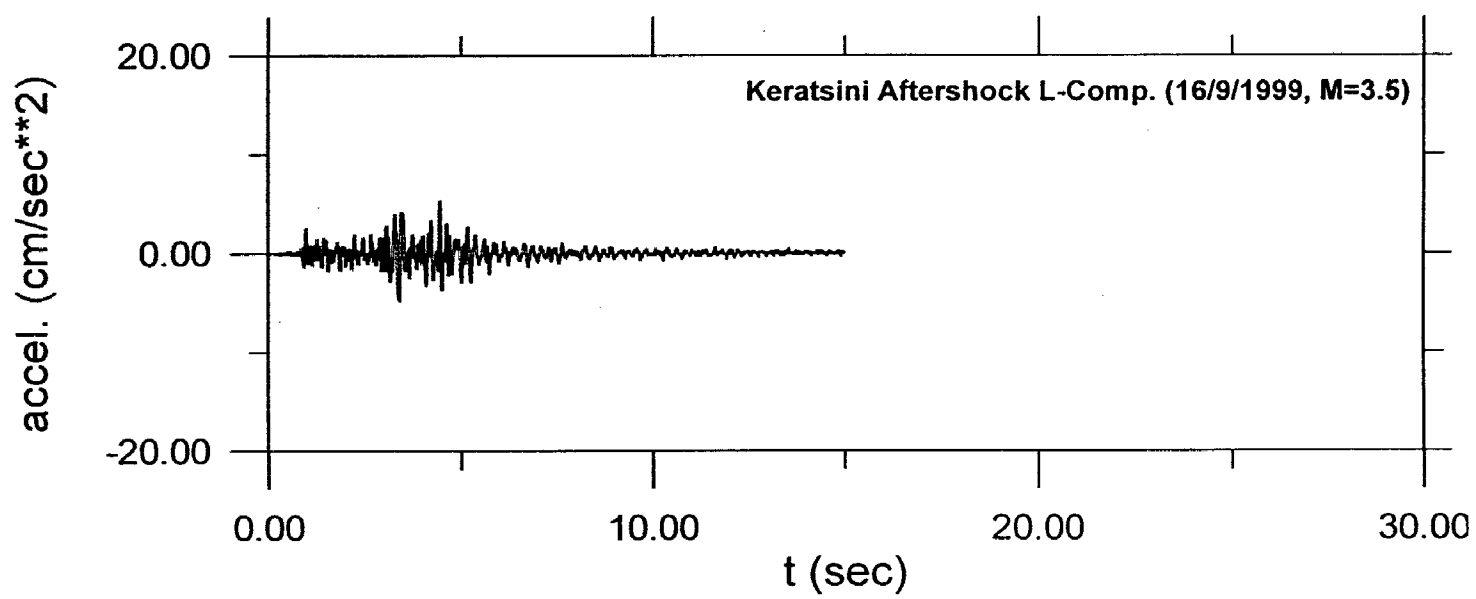
Σχ. 28. Σύγκριση των φασμάτων απόκρισης επιτάχυνσης των συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων, με βάση την αιτιοκρατική μέθοδο των εμπειρικών συναρτήσεων του Green και για χρόνο ανάδυσης $\tau=0.1\text{sec}$, στις θέσεις MND και FRN, με τα ελαστικά φάσματα σχεδιασμού του E.A.K. (2000) για τη ζώνη II και για εδαφικές κατηγορίες A, B.

Σχ. 29. Σύγκριση των φασμάτων απόκρισης επιτάχυνσης των συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων, με βάση τη στοχαστική μέθοδο για πηγή πεπερασμένων διαστάσεων, στις θέσεις MND και FRN, με τα ελαστικά φάσματα σχεδιασμού του E.A.K. (2000) για τη ζώνη II και για εδαφικές κατηγορίες A, B.

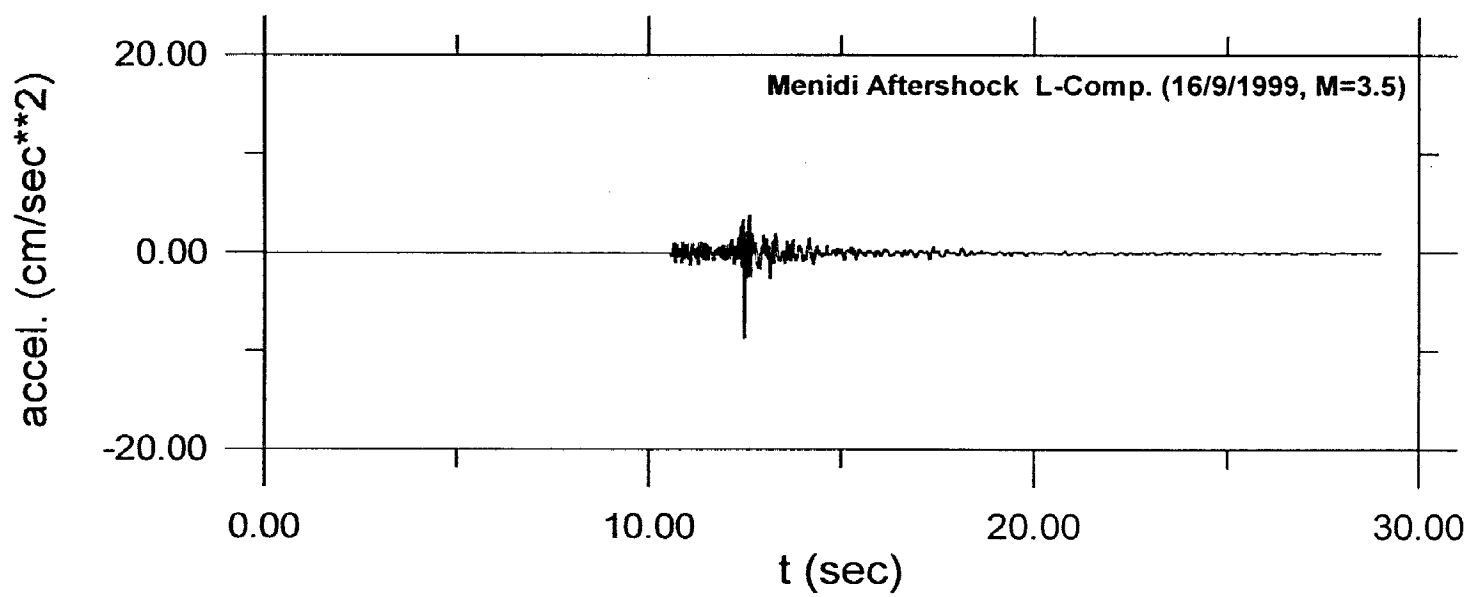
Σχ. 30. Σύγκριση των περιβαλλουσών των φασματικών τιμών επιταχύνσεων των Σχ. 28 και 29, με τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το κοντινό πεδίο από εμπειρικά μοντέλα πρόβλεψης της ισχυρή κίνησης (βλ. Σχ. 10) και τα ελαστικά φάσματα σχεδιασμού του E.A.K. (2000) για τη ζώνη II και για εδαφικές κατηγορίες A, B.



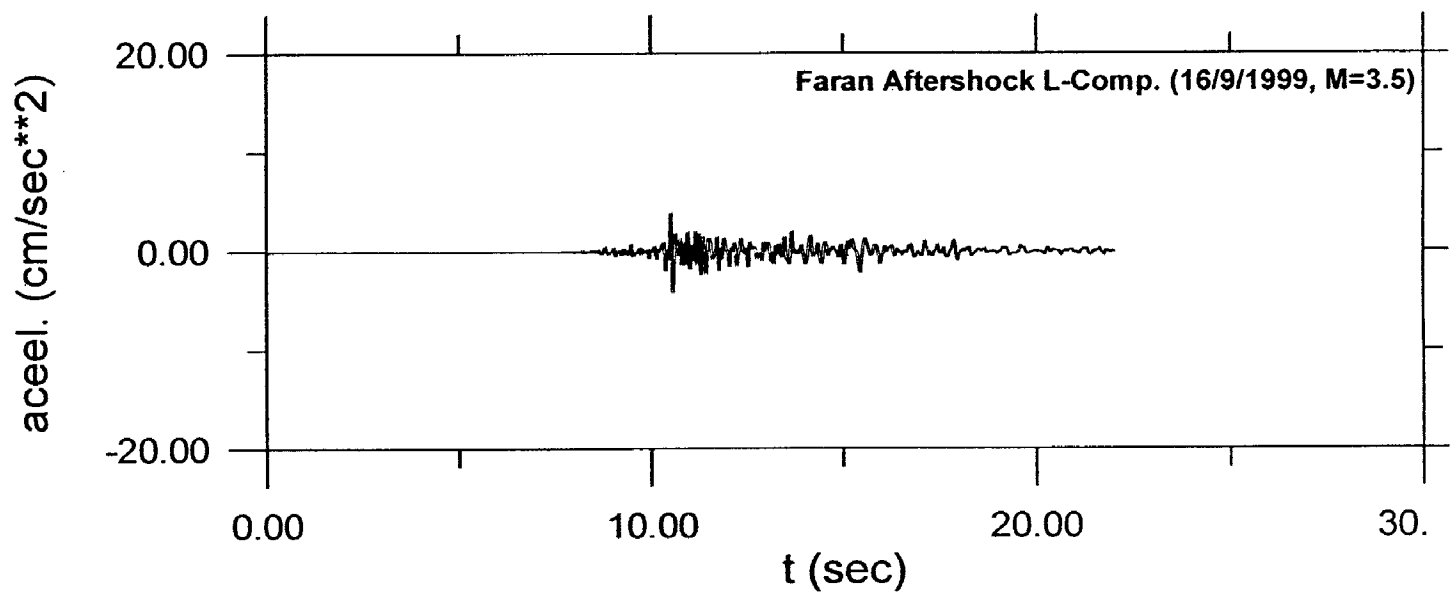
Σχ. 12



$\Sigma\chi. 13$

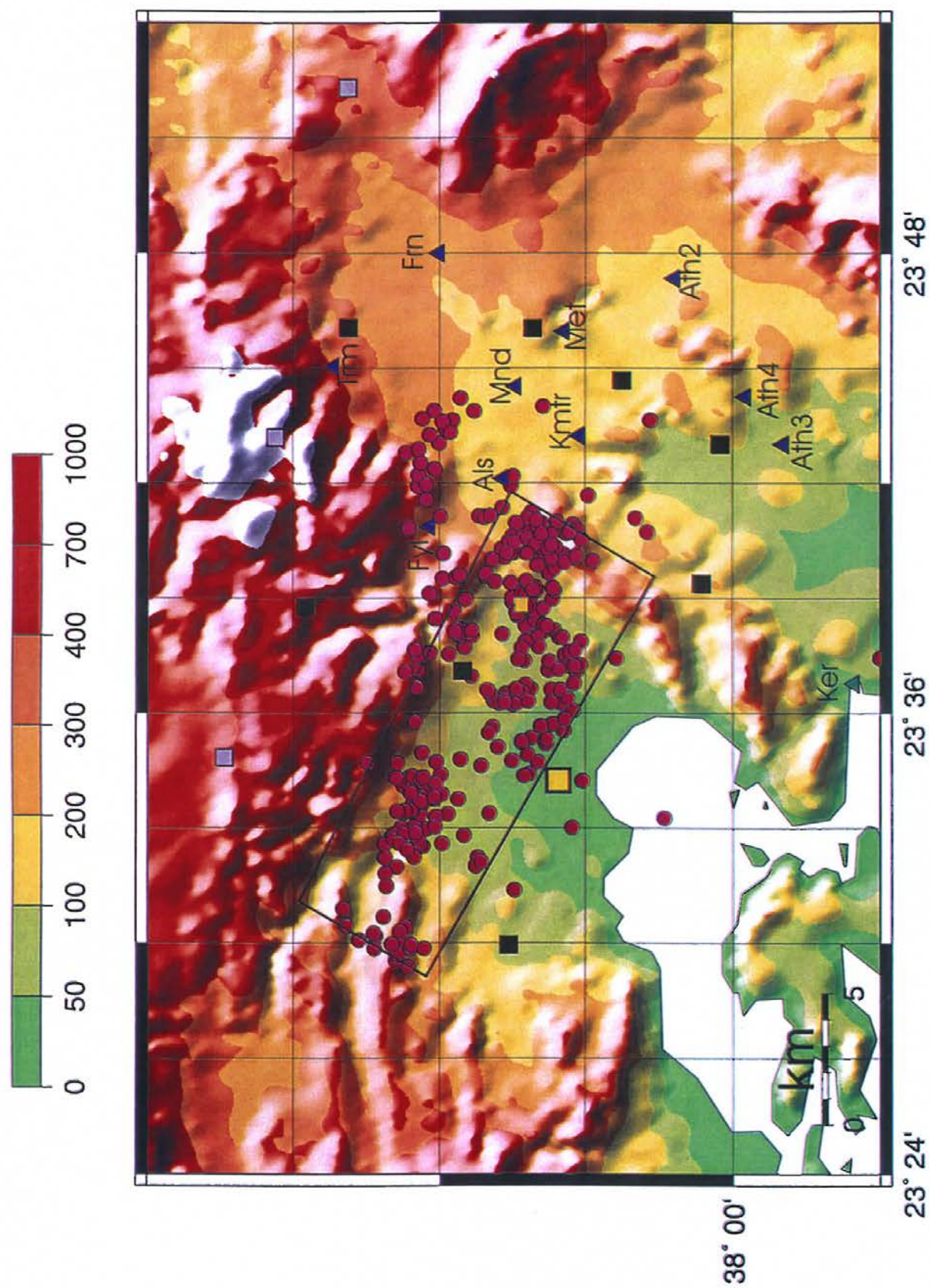


$\Sigma\chi$. 14

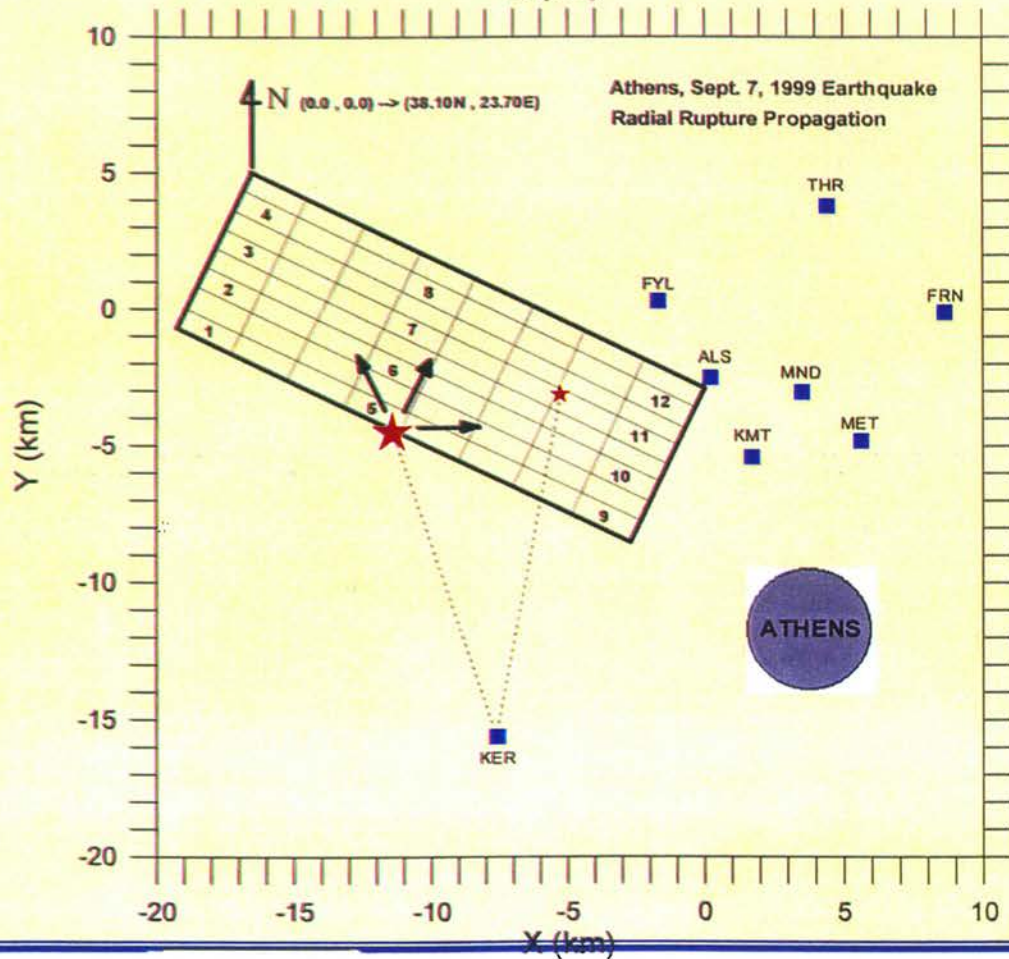
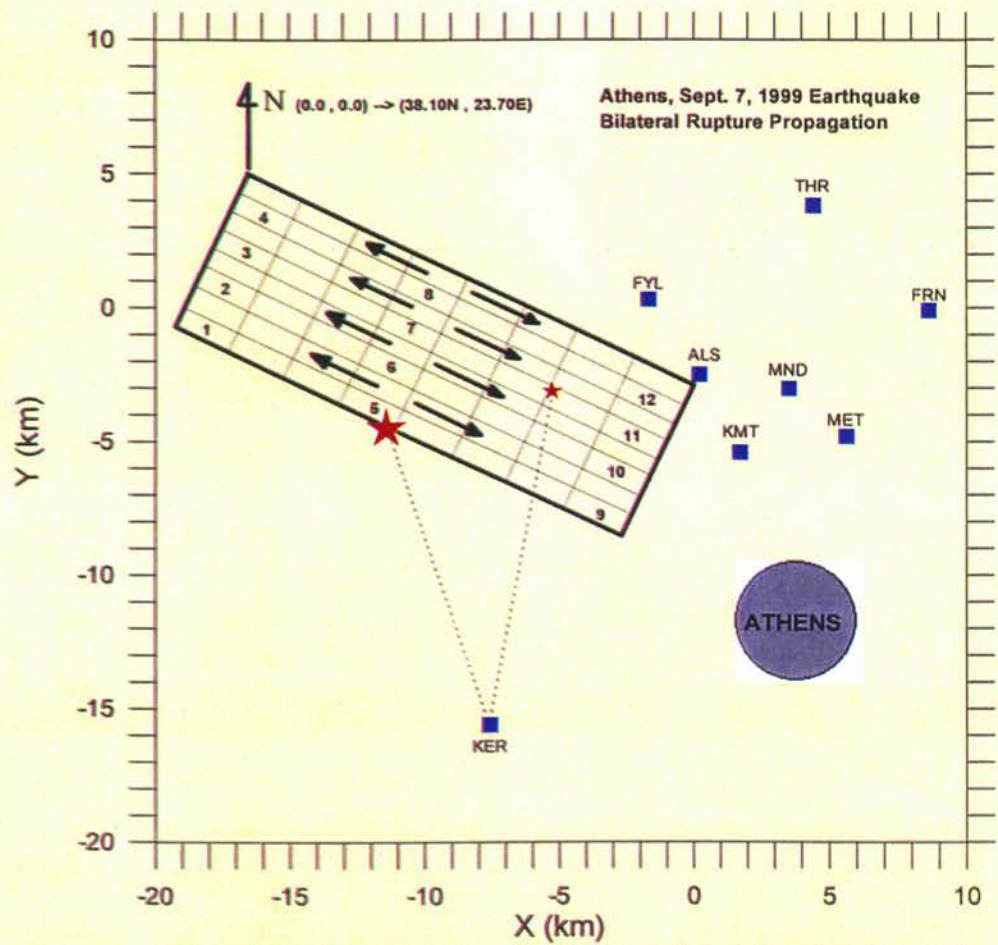


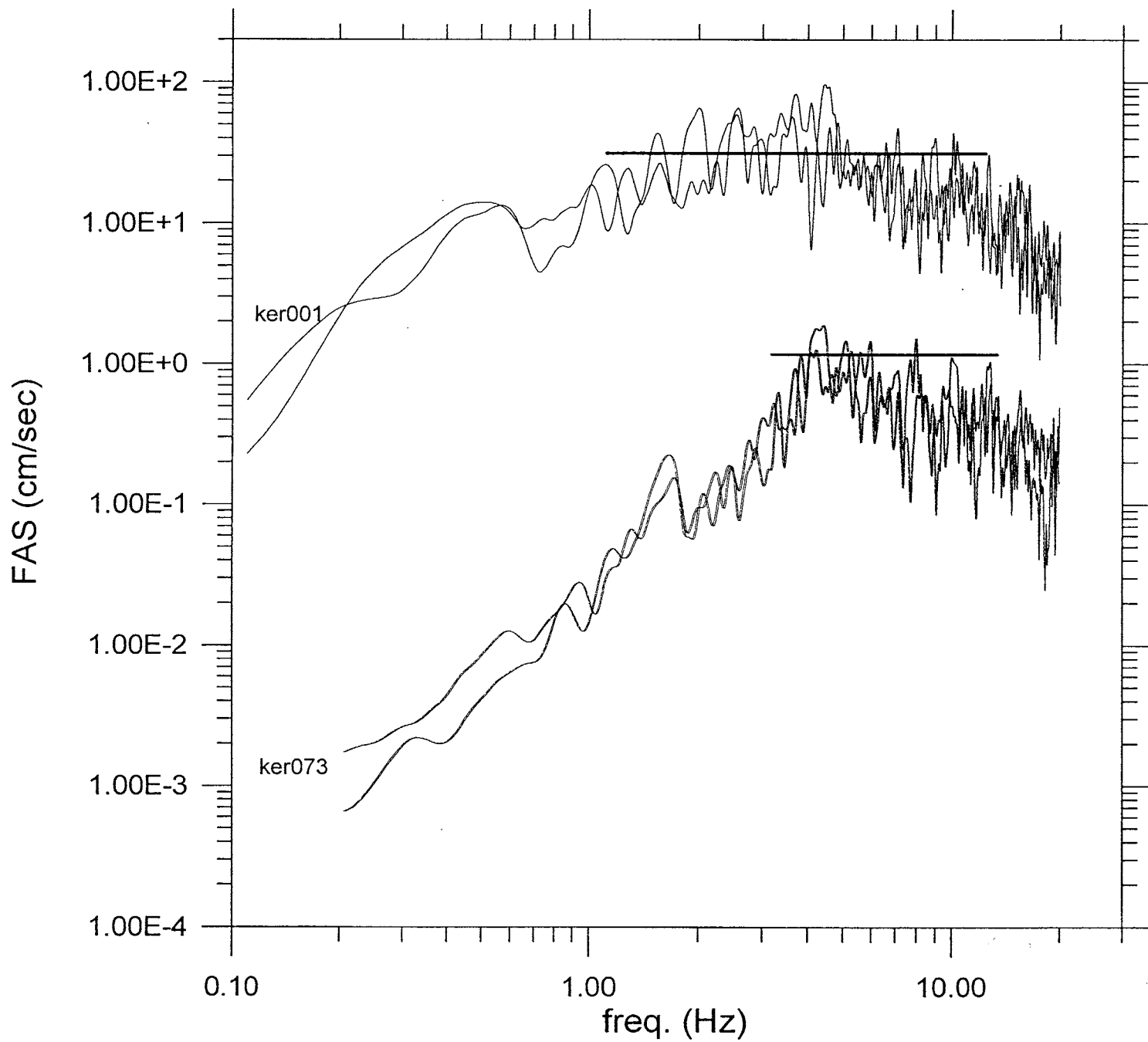
$\Sigma\chi.15$

Partial Data 16/9(13:30)-24/9

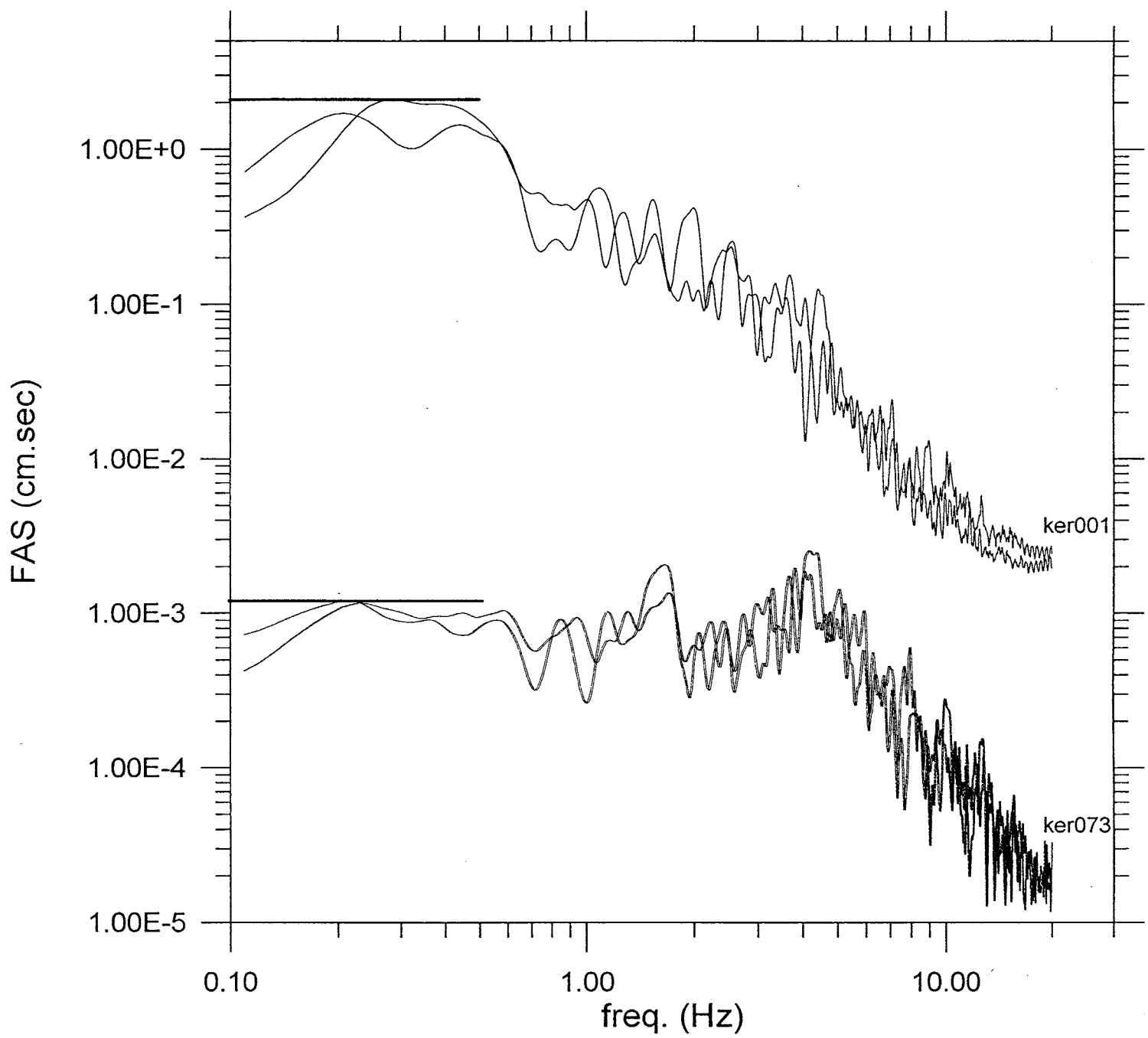


Σχ. 16

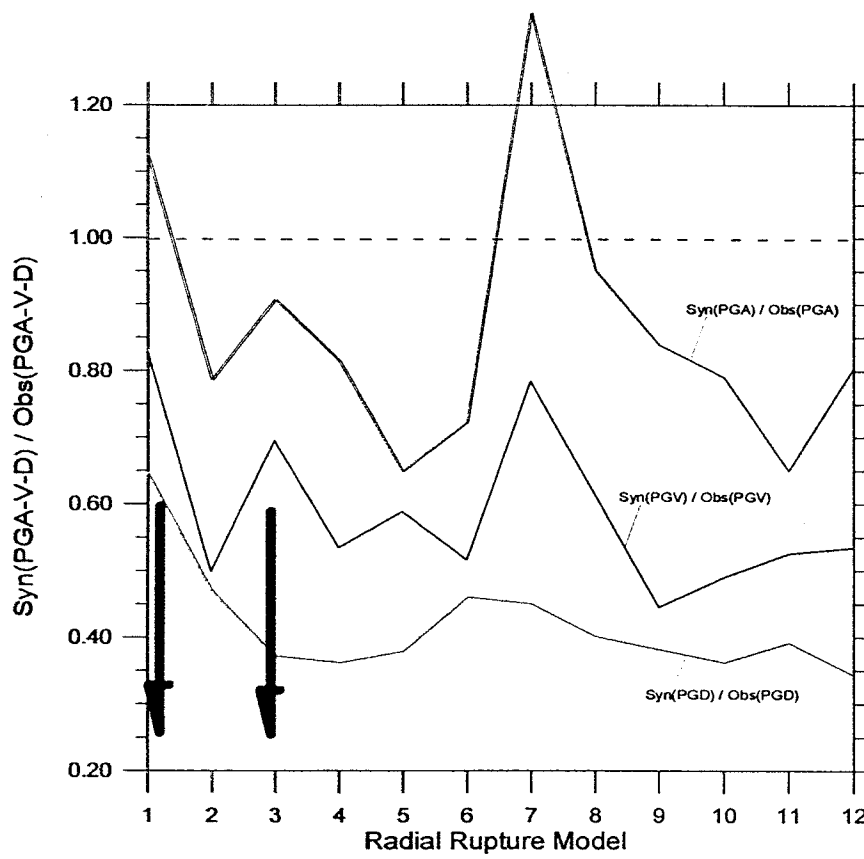
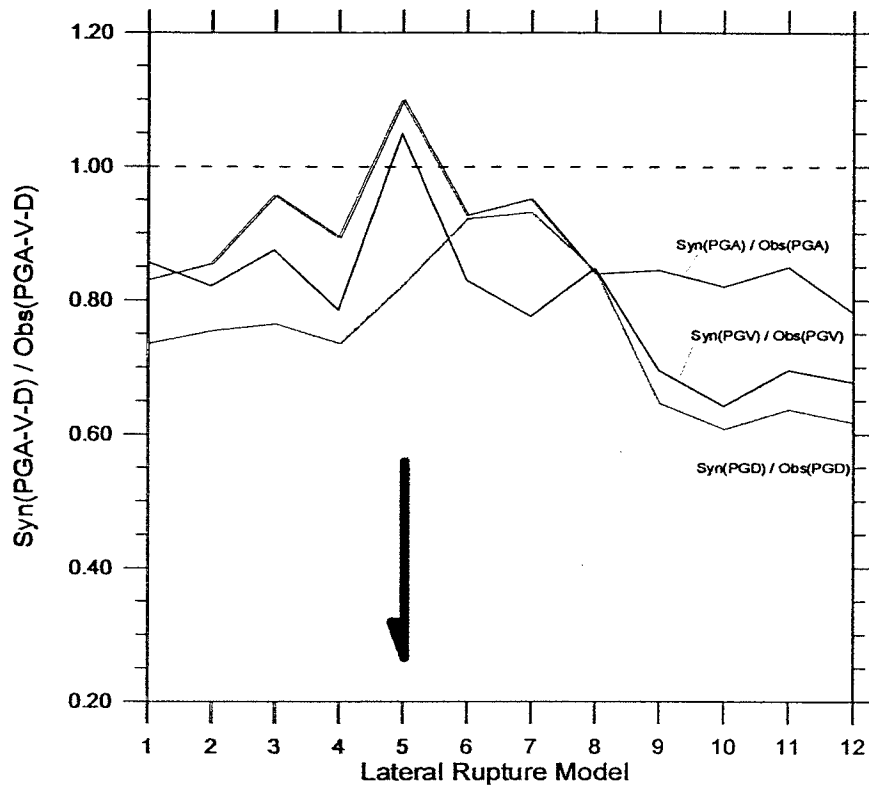


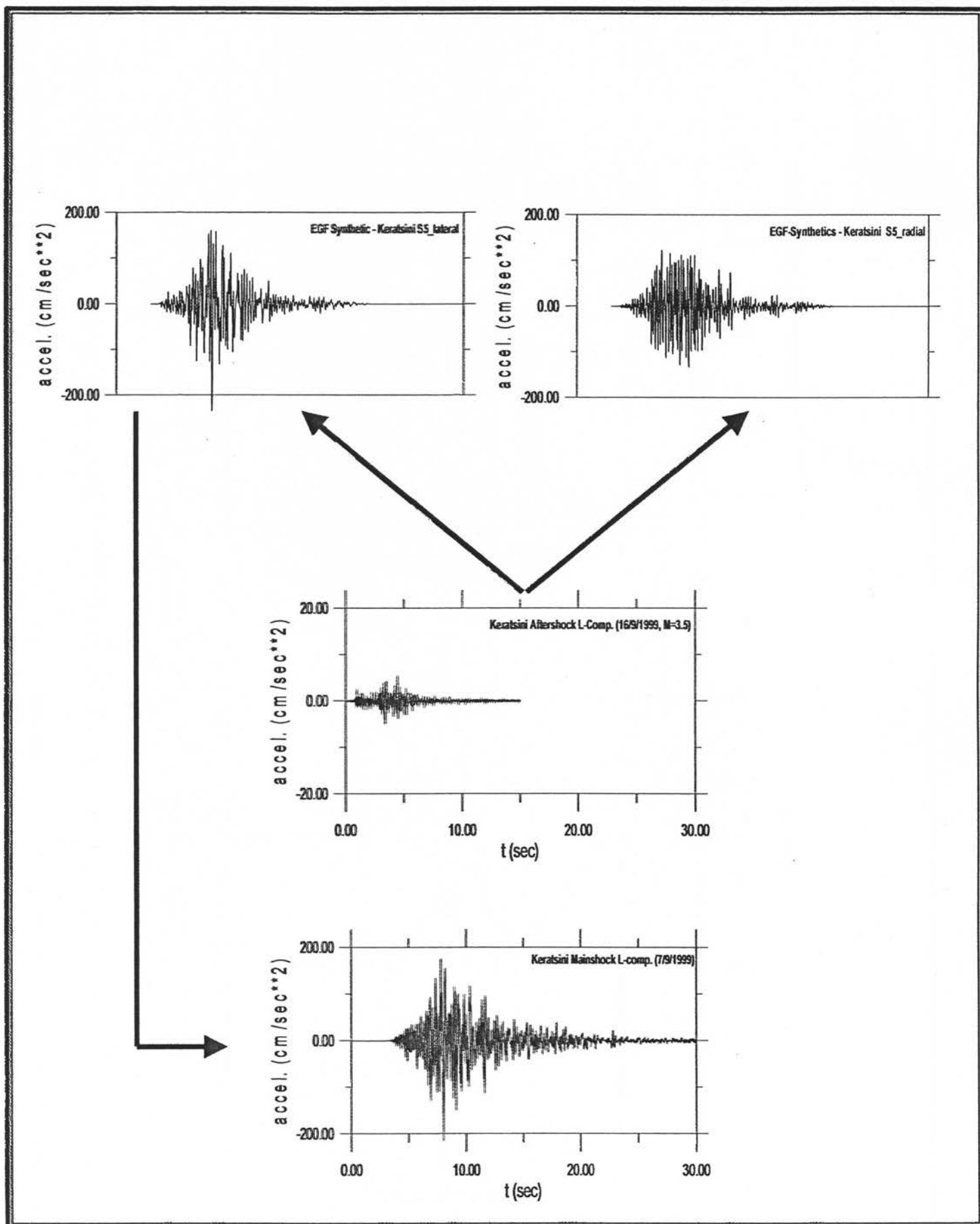


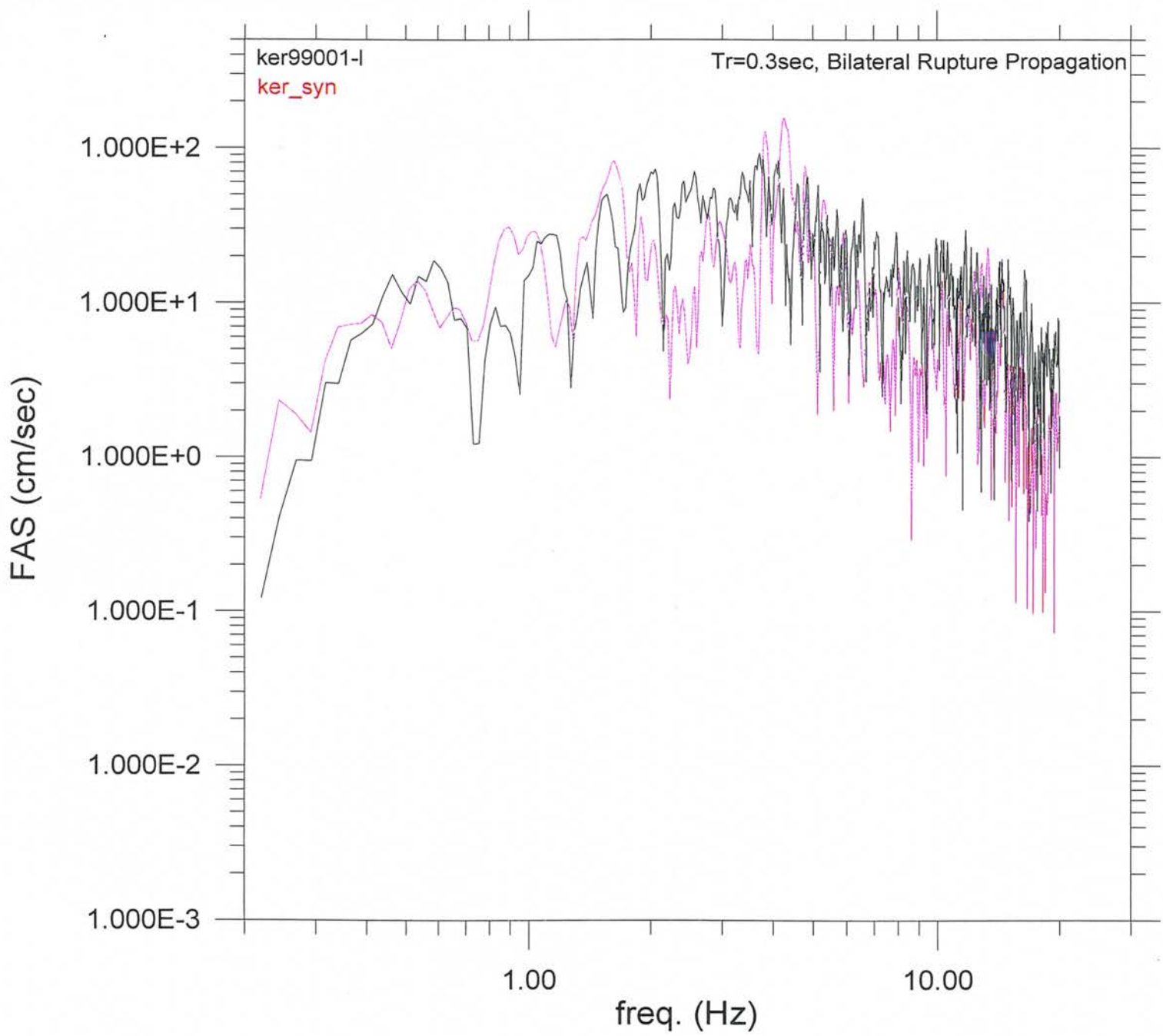
$\Sigma\chi. 18$



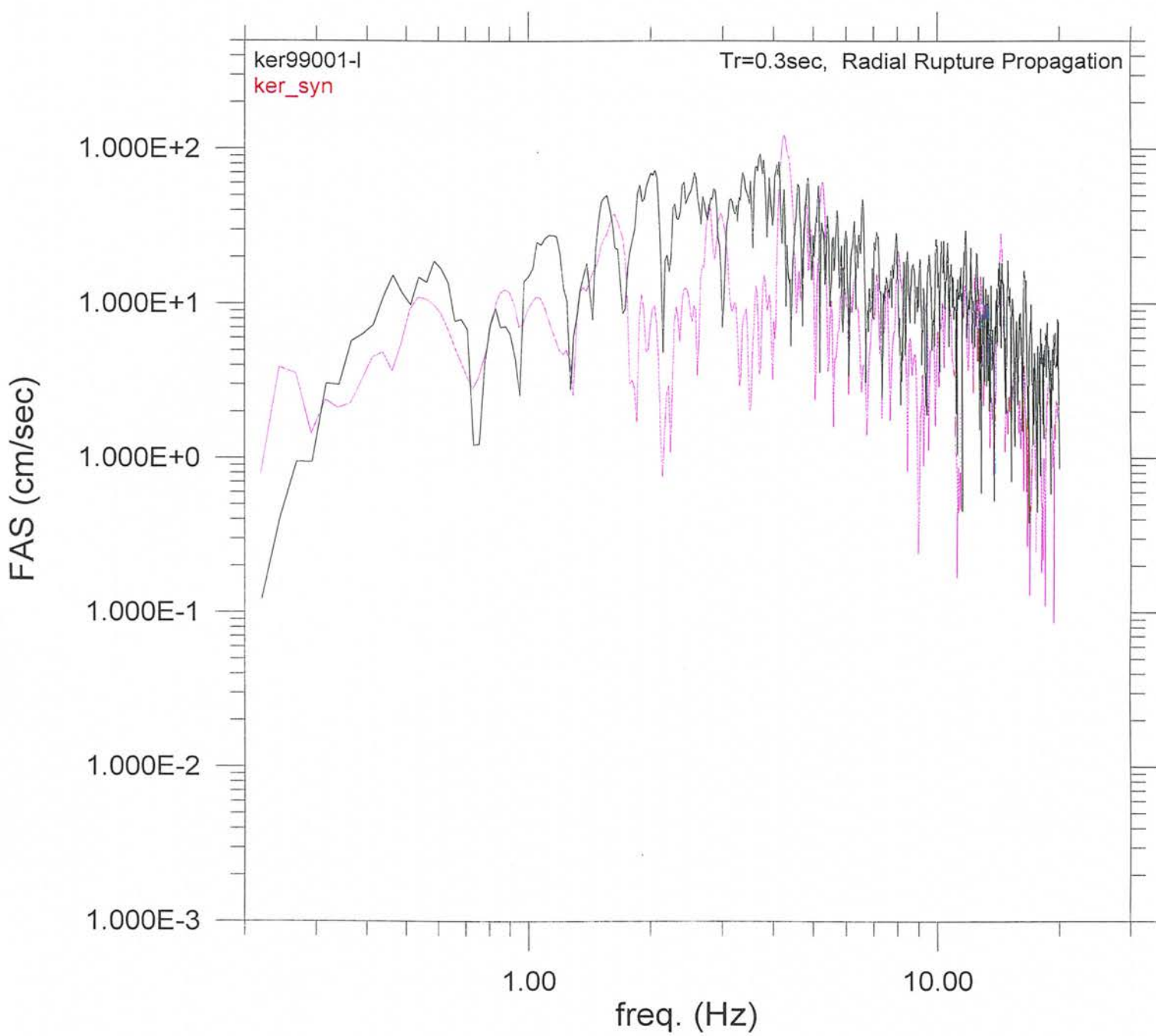
$\Sigma\chi. 19$



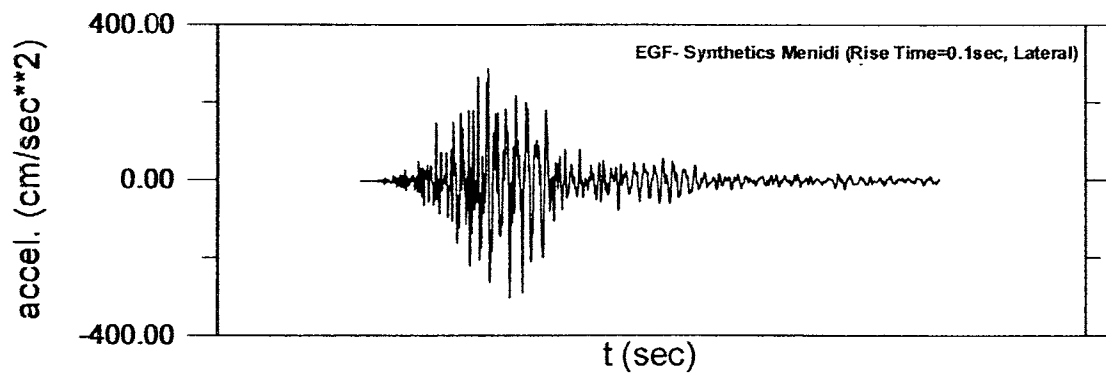
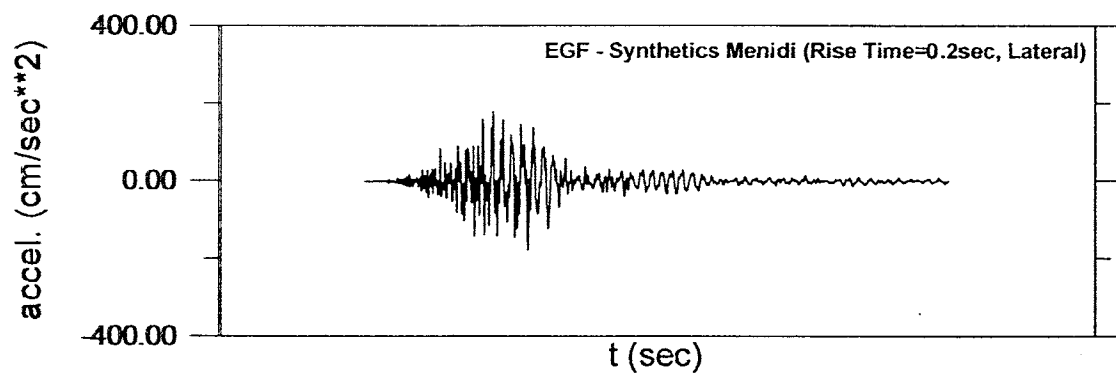
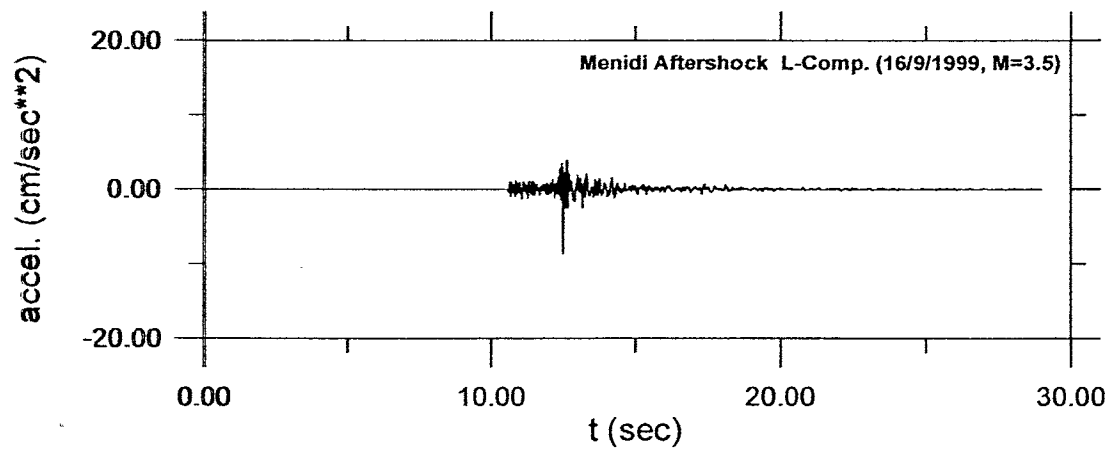


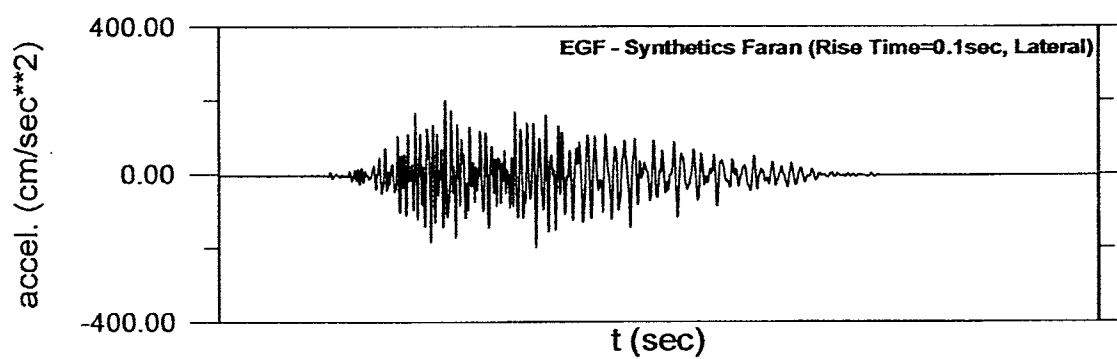
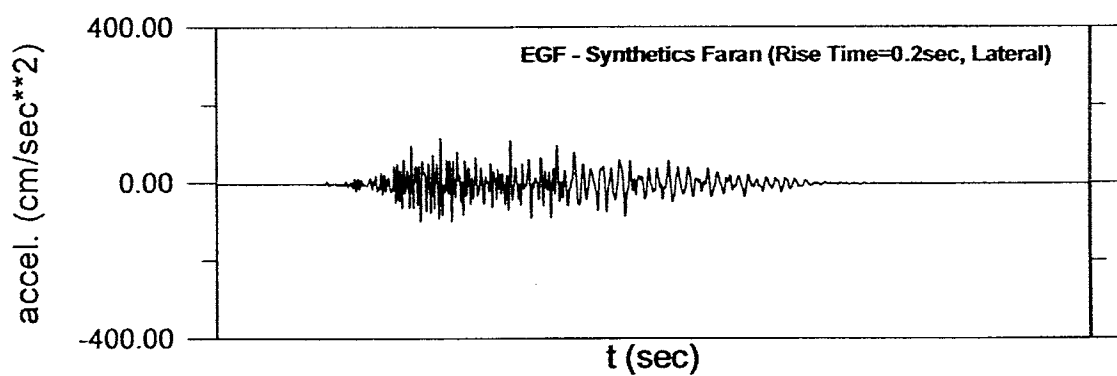
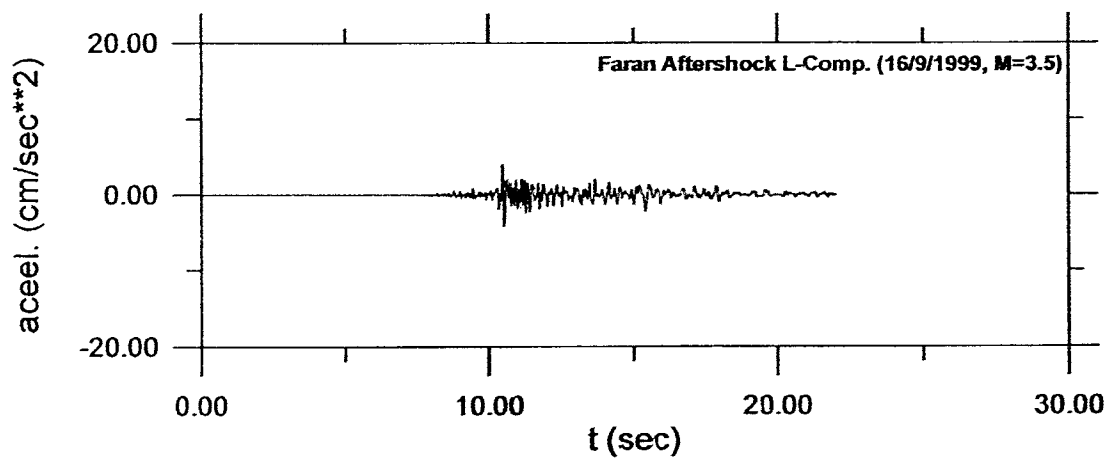


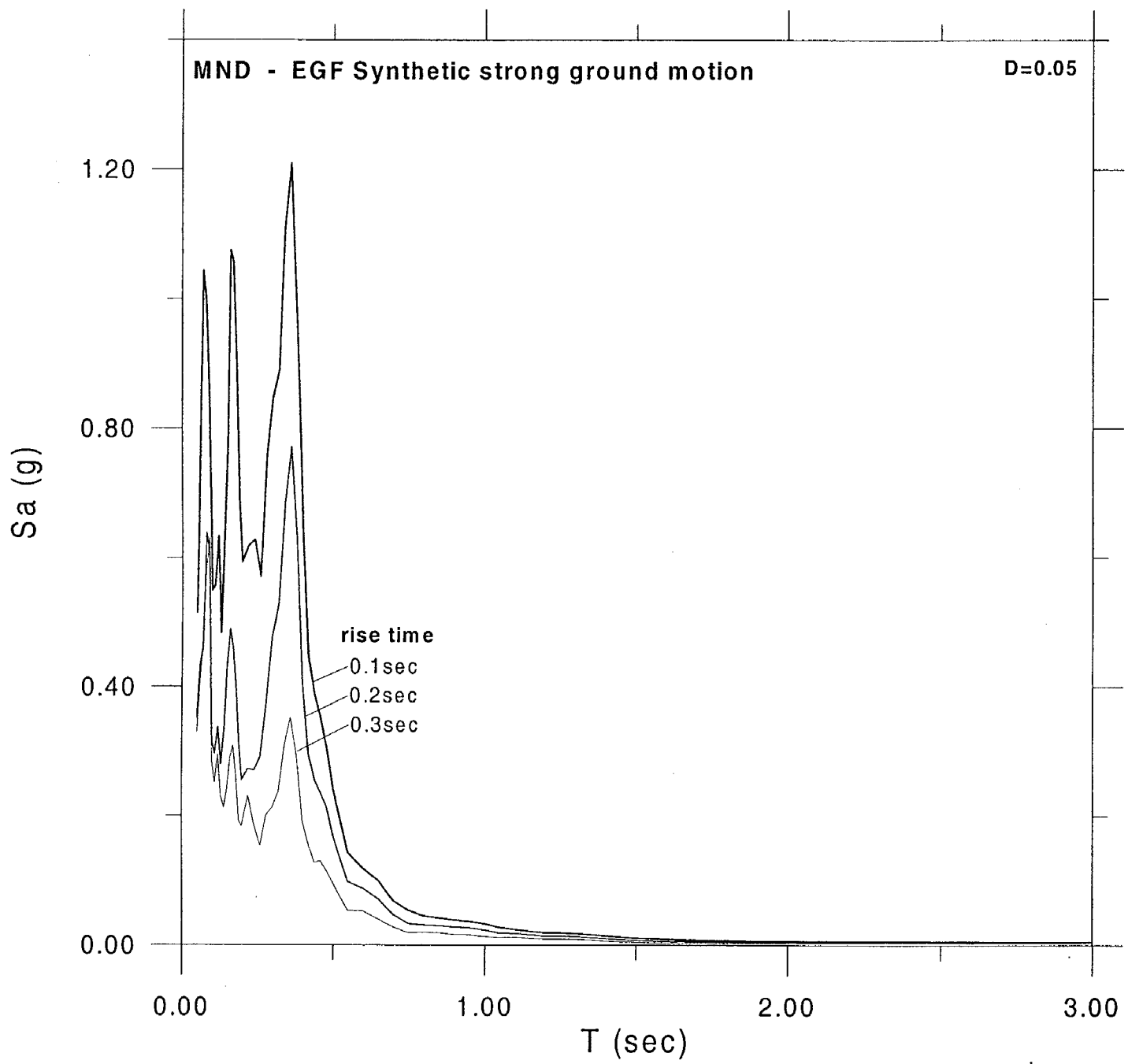
$\Sigma\chi. 22$



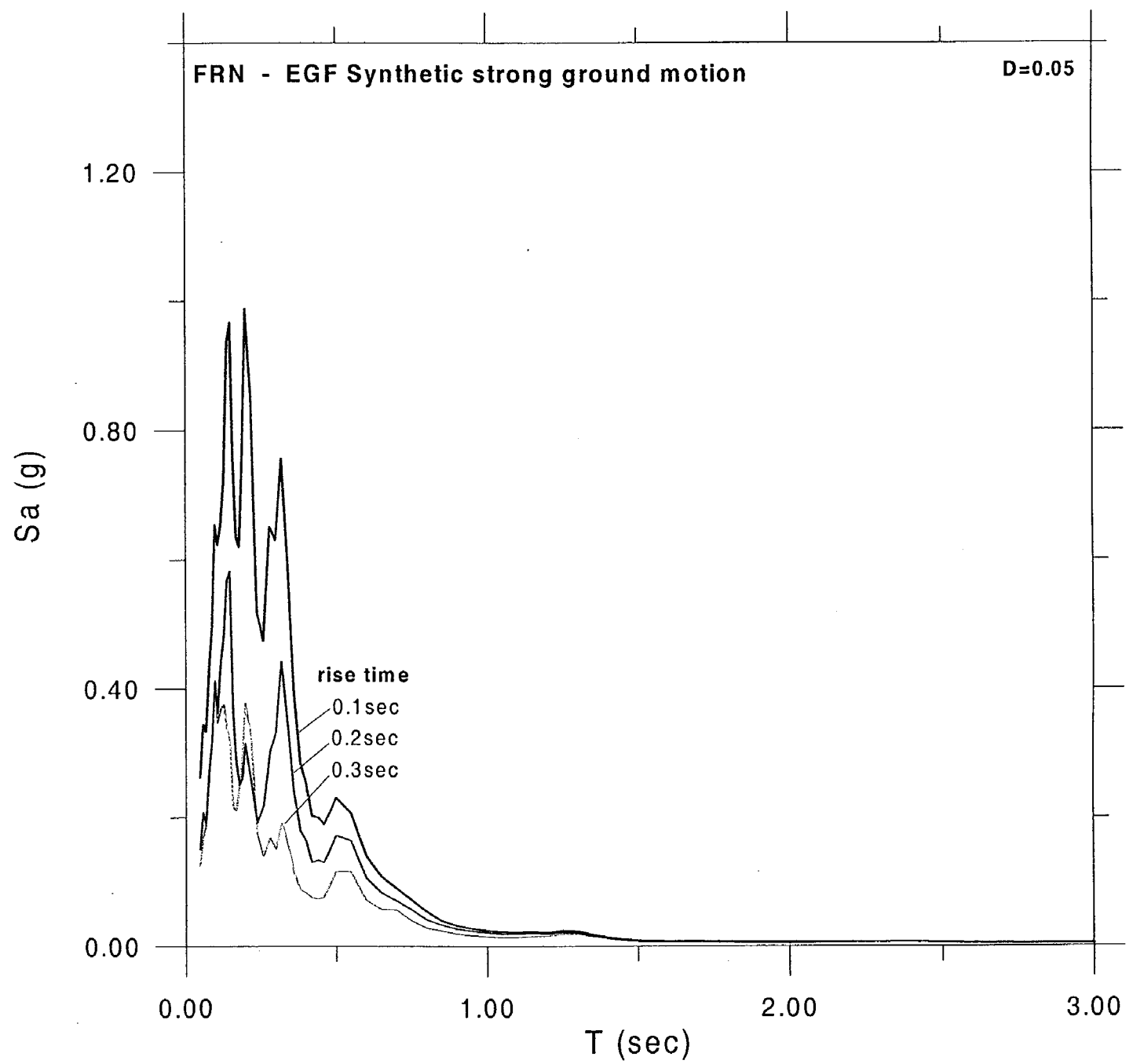
$\Sigma\chi. 23$



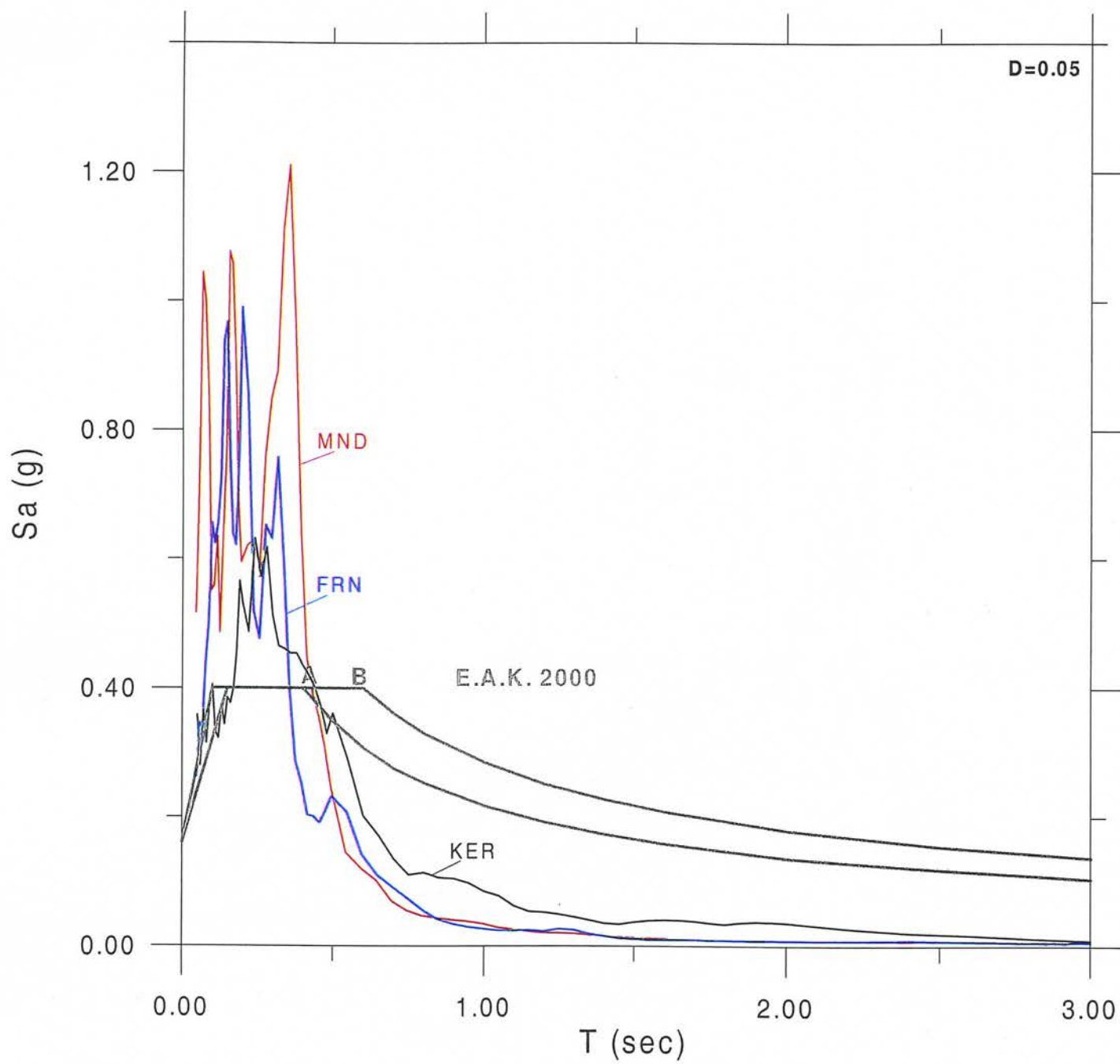




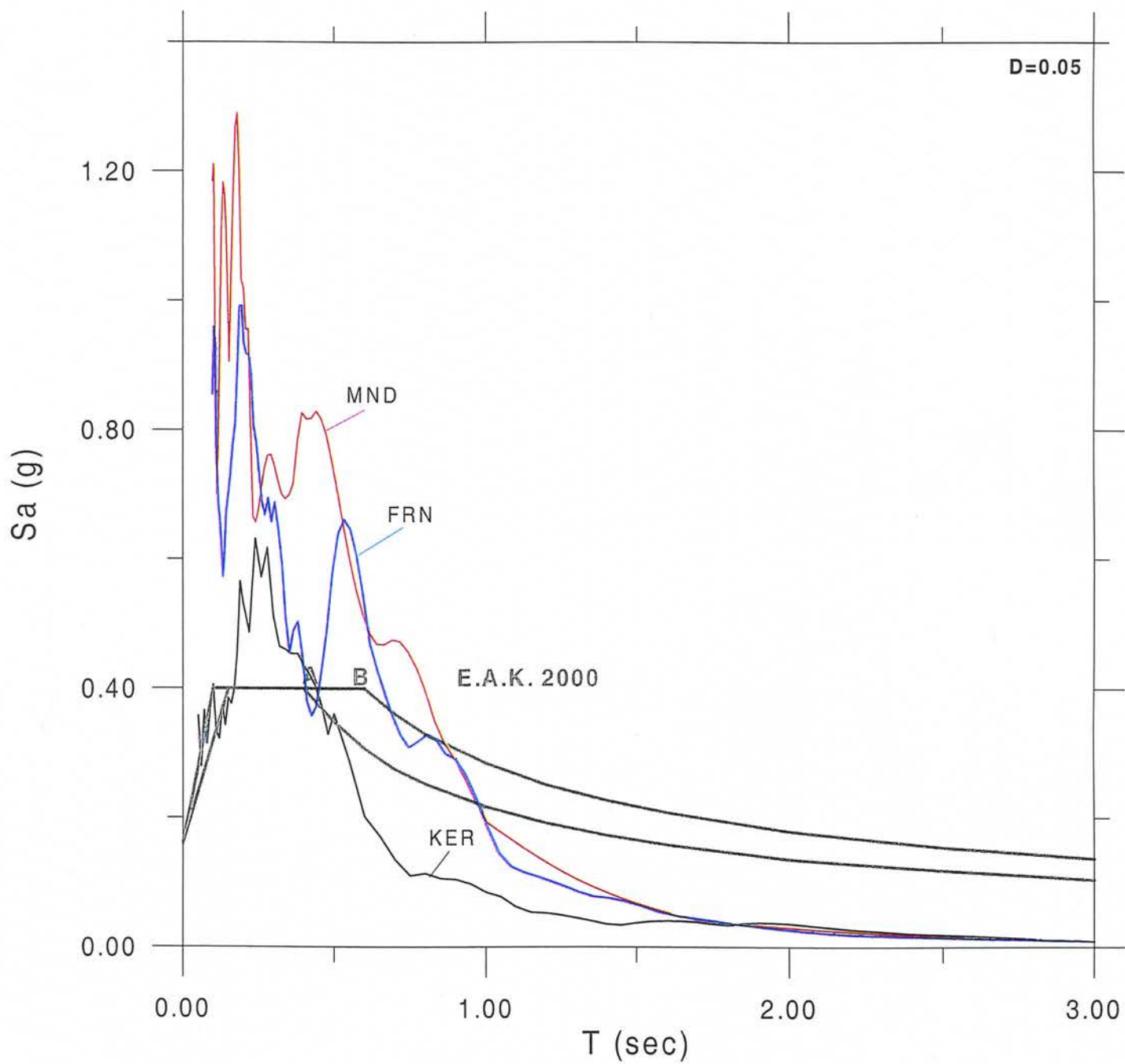
$\Sigma\chi. 26$



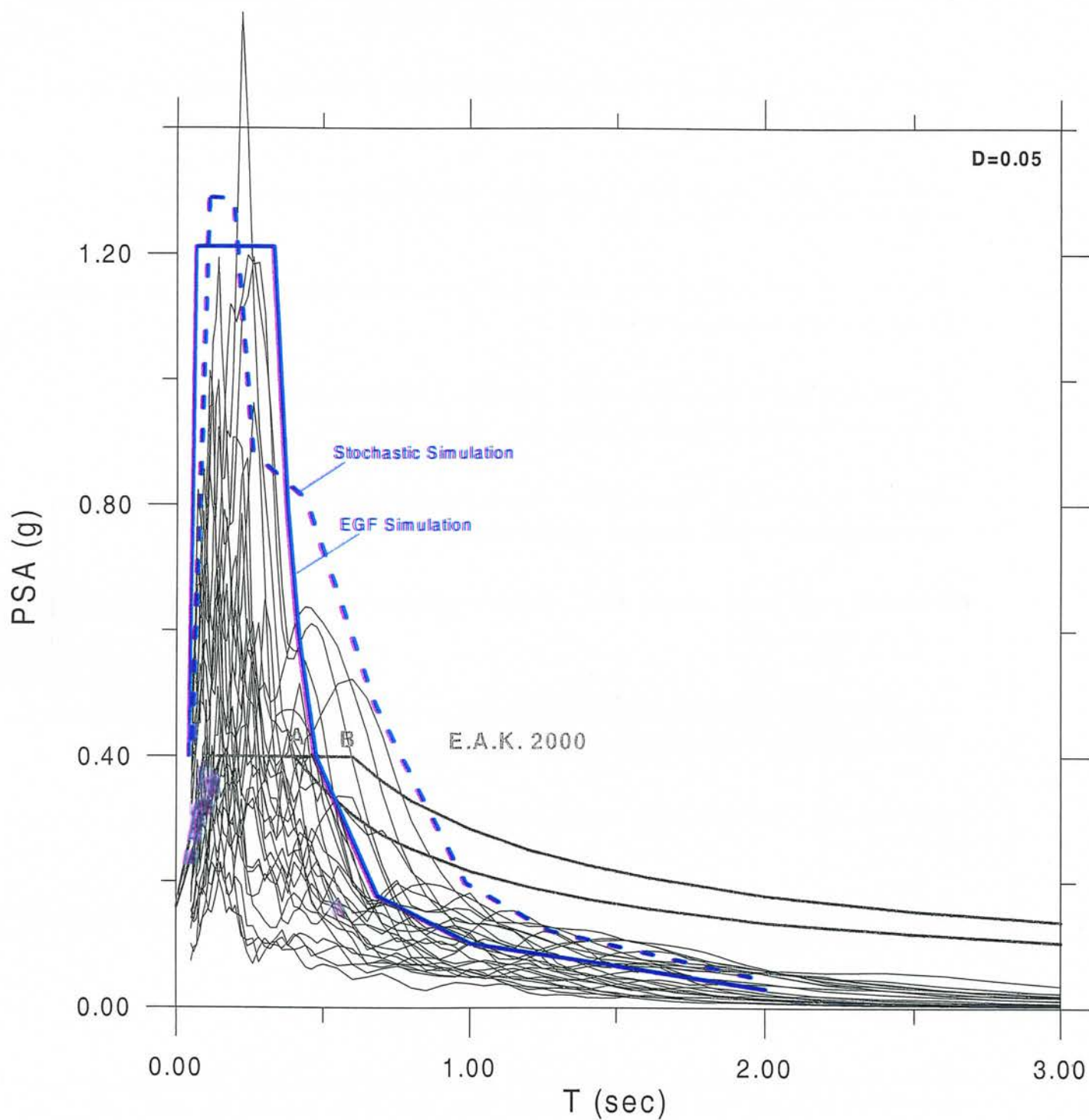
$\Sigma \chi. 27$



Σχ. 28



$\Sigma\chi. 29$



$\Sigma\chi. 30$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anastasiadis A., Demosthenous M., Karakostas C., Klimis N., Lekidis V., Margaris B., Papaioannou C., Papazachos C. and Theodulidis N. (2000). The Athens (Greece) earthquake of Sep[tember 7, 1999: Preliminary report on strong ground motion data and structural response, Stop Disasters (in press).
- Anderson, J.G. and S. E. Hough (1984). " A Model for the Shape of the Fourier Spectrum of Acceleration at High Frequencies", Bull. Seism. Soc. Am., 74, 1969-1993.
- Anderson, J.G. and S.E. Hough (1984). A model for the shape of the fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies. Bull. Seism. Soc. Am., 74, 1969-1993.
- Atkinson, G. M. and W. Silva (1997). "An Empirical Study of Earthquake Source Spectra for California Earthquake", Bull. Seism. Soc. Am., 87, 97-113.
- Beresnev, I. A. and G. M. Atkinson (1998). "FINSIM- a FORTRAN Program for Simulating Stochastic Acceleration Time Histories from Finite Faults", Seism. Res. Lett., 69, 27-32.
- Beresnev, I. A. and G. M. Atkinson (1999). "Generic Finite-Fault Model for Ground-Motion Prediction in Eastern North America ", Bull. Seism. Soc. Am., 89, 608-625.
- Beresnev, I. A. and G. M. Atkinson (1997). "Modeling Finite-Fault radiation from the ω^n Spectrum", Bull. Seism. Soc. Am., 87, 67-84.
- Boore, D. M. (1983). " Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motion Based on Seismological Models of tha Radiated Spectra", Bull, Seism. Soc. Am., 73, 1865-1894.
- Boore, D.M. and J. Boatwright (1984). Average body wave radiation coefficients. Bull. Seism. Soc. Am., 74, 1615-1621.
- Dimitriou P., Papaioannou Ch. and Theodulidis N. (1999). Euro- Seistest strong motion array near Thessaloniki, northern Greece: A study of site effects. Bull. Seism. Soc. Am., 88, 862-873, 1998.
- E.A.K. (2000). Greek Seismic Code. Editor E.P.P.O., 152pp. (in Greek).
- Frankel, A. (1995). Simulating Strong Motions of Large Earthquakes Using Recordings of Small Earthquakes : the Loma Prieta Mainshock as a Test Case, Bull. Seism. Soc. Am. 85, 1144 – 1160.
- Frankel, A., C. Mueller, T. Barnhard, D. Perkins E.V. Leyendecker, N. Dickman, S.hanson and M. Hopper (1996). National seismic hazard maps. U.S. Geol. Survey. Open File report 96-532, 55pp. & 2 Appendices.
- Geller, R. J. (1976). Scaling Relations for Earthquake Source Parameters and Magnitudes, Bull. Seism. Soc. Am. 66, 1501 – 1523.

- Hadley, D. M. and D. V. Helmberger (1980). Simulation of Strong Ground Motions, *Bull. Seism. Soc. Am.* 70, 617 – 630.
- Hartzell, S. (1978). Earthquake Aftershocks as Green's Functions, *Geophys. Res. Let.* 5, 1 – 4.
- Heaton T. (1990). Evidence for and implications of self-healing pulses of slip in earthquake rupture. *Physics of the Earth and Planet. Inter.*, 64, 1-20.
- Irikura K. (1986). Prediction of strong motion acceleration using empirical Green's functions, *Proc. 7th Japan Earthquake Engin.*, 151-156.
- Irikura K. and Kamae K. (1994). Estimation of strong ground motion in broad-frequency band based on a seismic source scaling model and an empirical Green's function technique. *Annali di Geofisica*, 1721-1743.
- Irikura, K. (1983). Semi – Empirical Estimation of Strong Ground Motions during Large Earthquakes, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst.* 33, Kyoto Univ., 63 – 104.
- Joyner, W. B. and D. M. Boore (1988). "Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion", *Proc. Earthquake Eng. Soil Dyn. II, GT Div/ASCE*, Park City, Utah, 1988, 43-102.
- Joyner, W.B. and D.M. Boore (1988). Measurement, characterization and prediction of strong ground motion. *Proc. Earthq. Eng. & Soil Dynamics II, GT Div/ASCE Park City-UTAH*, June 27-30, 1988, 43-102.
- Kamae, K., P-Y. Bard, and K. Irikura (1998). Prediction of strong ground motion at EURO – SEISTEST site using the empirical Green's function method, *J. Seismology* 2, 193 – 207.
- Kanamori, H. (1979). A semi – empirical approach to prediction of long – period ground motions from great earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.* 69, 1645 – 1670.
- Kanamori, H. and D. L. Anderson (1975). Theoretical Basis of Some Empirical Relations in Seismology, *Bull. Seism. Soc. Am.* 65, 1073 – 1095.
- Klimis, N.S., B.N. Margaris and P.K. Koliopoulos (1999). Site-dependent amplification functions and response spectra in Greece. *J. Earthq. Engineering*, 3, 237-270.
- Klimis, N.S., B.N. Margaris and P.K. Koliopoulos (1999). "Site-Dependent Amplification Functions and Response Spectra in Greece", *Jour. of Earthq. Eng.*, 3, 237-270.
- Lermo J. and Chavez-Garcia F. (1993). Site-effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 1574-1594.

- Margaris, B.N. and D.M. Boore (1998) . Determination of $\Delta\sigma$ and κ_0 from response spectra of large earthquakes in Greece. Bull. Seism. Soc. Am., 88, 170-182.
- Margaris B. and Papazachos C. (1999). Moment-magnitude relations based on strong-motion records in Greece. Bull. Seism. Soc. Am., 89, 442-455.
- Margaris, B.N. and P.M. Hatzidimitriou (1999). “ Seismic Estimates of Stress Parameters Using Source Spectral Scaling from Accelerograms of Strong Earthquakes in Greece”, Proc. AGU Fall Meeting Dec. 13-17, 1999, (Abstr), 707.
- Margaris, B.N. (2001).“ Variability of PSV Response Spectra including Effects of Source, Path, and Site During the Athens Earthquake in Greece”, Presented in the 6th Inter. Conf.on Seism. Zon.California, Nov. 2000.
- Nakamura (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, QR of RTRI, 30, 1, 25-33.
- Παπαζάχος, Κ., Β. Καρακώστας, Γ. Καρακαίσης και Χρ. Παπαϊωάννου (2000). Μελέτη της σεισμικής ακολουθίας του σεισμού της Αθήνας της 7/9/99 ($M_w=5.9$). Έκθεση ερευν. Προγρ. Εργαστήριο Γεωφυσικής ΑΠΘ, σελ 27 & 1 Παράρτημα.
- Papazachos B. and Papazachou K. (1997). The earthquakes of Greece. Ziti Editions, 304pp.
- Pitarka A., Irikura K., Iwata T. and Sekiguchi H. (1998). Three-dimensional simulation of the near-fault ground motion for the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) , Japan, earthquake. Bull. Seism. Soc. Am. 88, 428-440.
- Raptakis D., Theodulidis N. and Pitilakis K. (1998). Data analysis of the Euroseistest strong motion array in Volvi (Greece): Standard and horizontal-to-vertical spectral ratio techniques. Earthquake Spectra, 14, 203-224.
- Theodulidis N. (1991). Contribution to the study of strong ground motion in Greece, Ph. D. thesis, Aristotle University of Thessaloniki, 500pp. (in Greek).
- Theodulidis, N. and Bard, P-Y. (1995) Horizontal to vertical spectral ratio and geological conditions: An analysis of strong motion data from Greece and Taiwan (SMART-1). Soil Dyn. and Earth. Eng., 14, 177-197.
- Theodulidis, N. and Papazachos, B. (1994). Dependence of strong ground motion on magnitude-distance, site geology and macroseismic intensity for shallow earthquakes in Greece: II, Horizontal pseudovelocity. Soil Dyn. and Earth. Eng., 13, 317-343.
- Tselentis G-A. and Zahradnik J. (2000). The Athens earthquake of 7 September 1999. Bull. Seism. Soc. Am., 90, 1143-1160.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

**Καταγραφή του κύριου σεισμού στη θέση KER και συνθετικά
επιταχυνσιογραφήματα για τα δύο μοντέλα διάρρηξης (δικατευθυντικό, κυκλικό)
και για 12 σενάρια έναρξης της διάρρηξης.**

PPC NETWORK

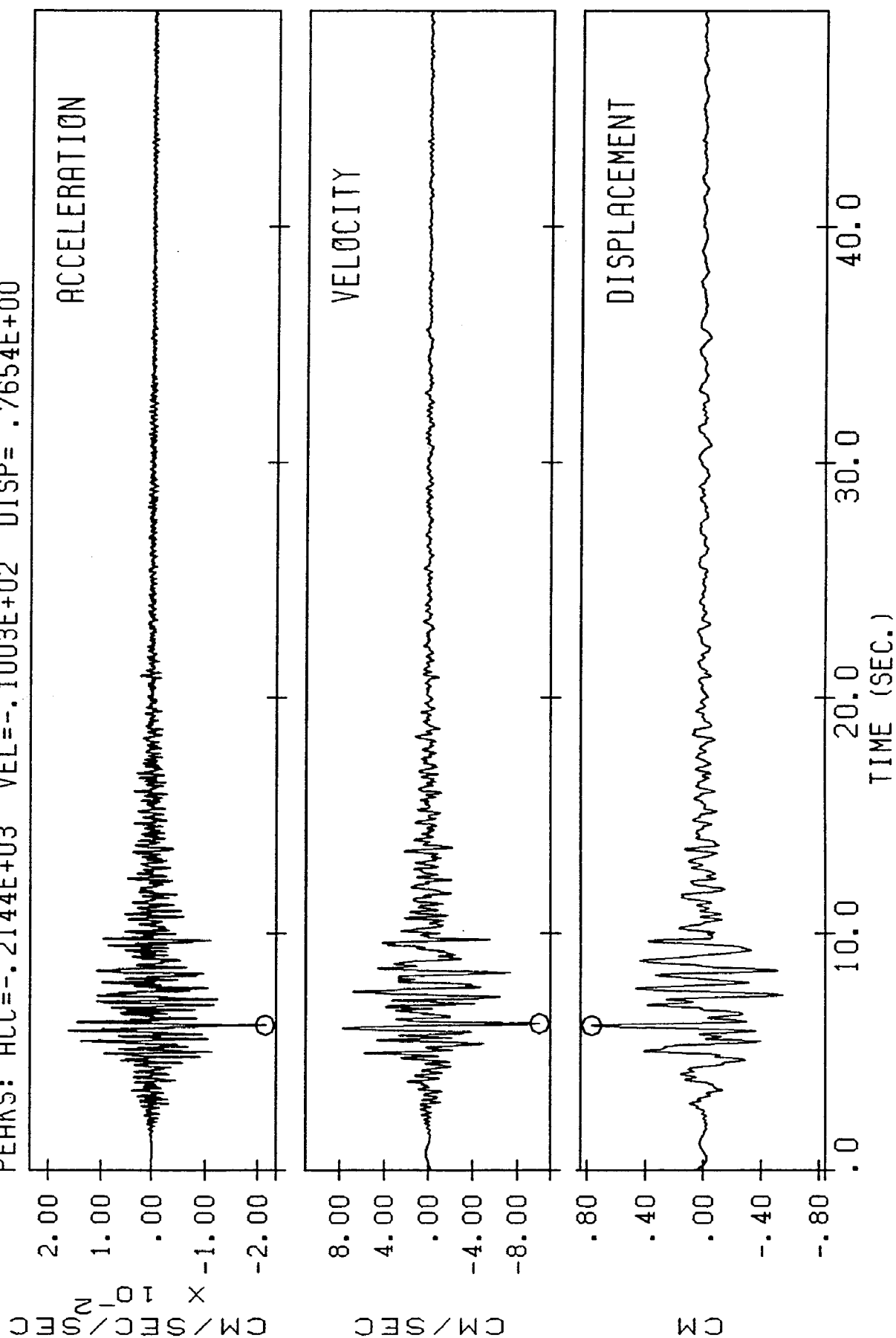
KERATSINI (MAIN SHOCK RECORD)

BANDPASS FILTER LIMITS: .600- .650

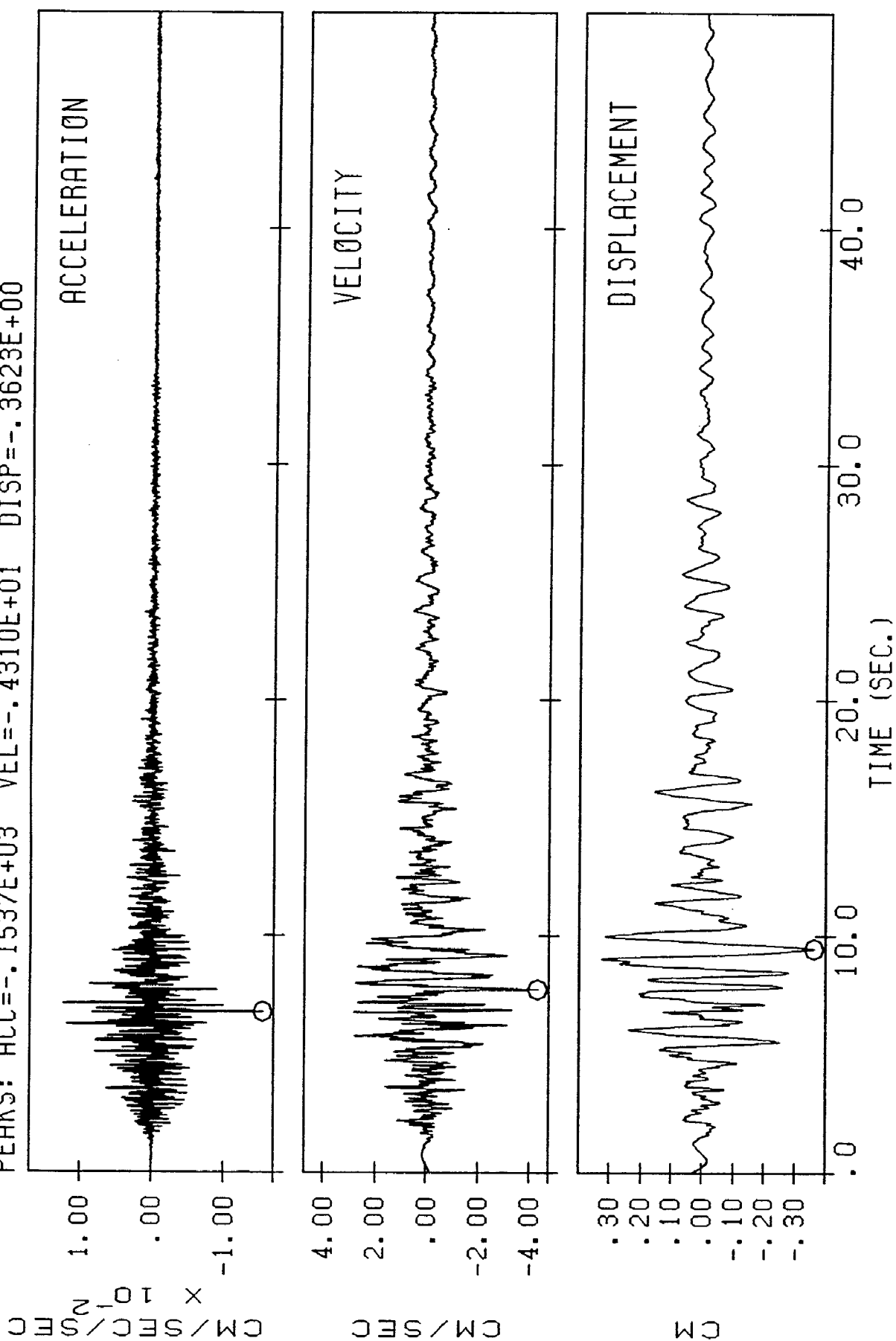
PEAKS: ACC=-.2144E+03 VEL=-.1003E+02 DISP= .7654E+00

COMP 1 KERA

KERT99-1.V2



PPC NETWORK
 KERATSINI (MAIN SHOCK RECORD)
 BANDPASS FILTER LIMITS: .600- .650
 PEAKS: ACC=-.1537E+03 VEL=-.4310E+01 DISP=-.3623E+00
 COMP 2 KERA
 20.00-22.00
 KERT99-1.V2



PPC NETWORK

KERATSI NI (MAIN SHOCK RECORD)

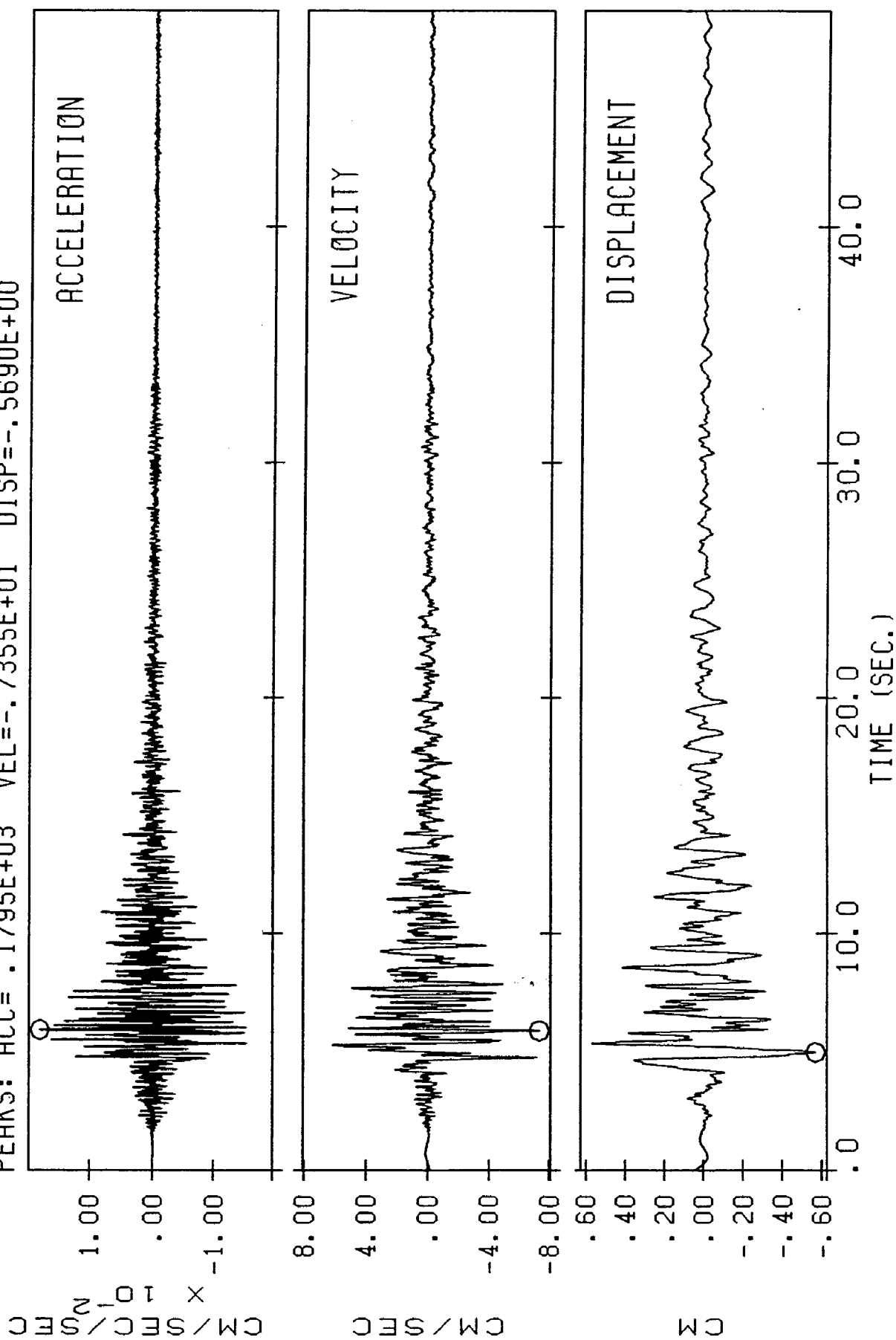
BANDPASS FILTER LIMITS: .600- .650

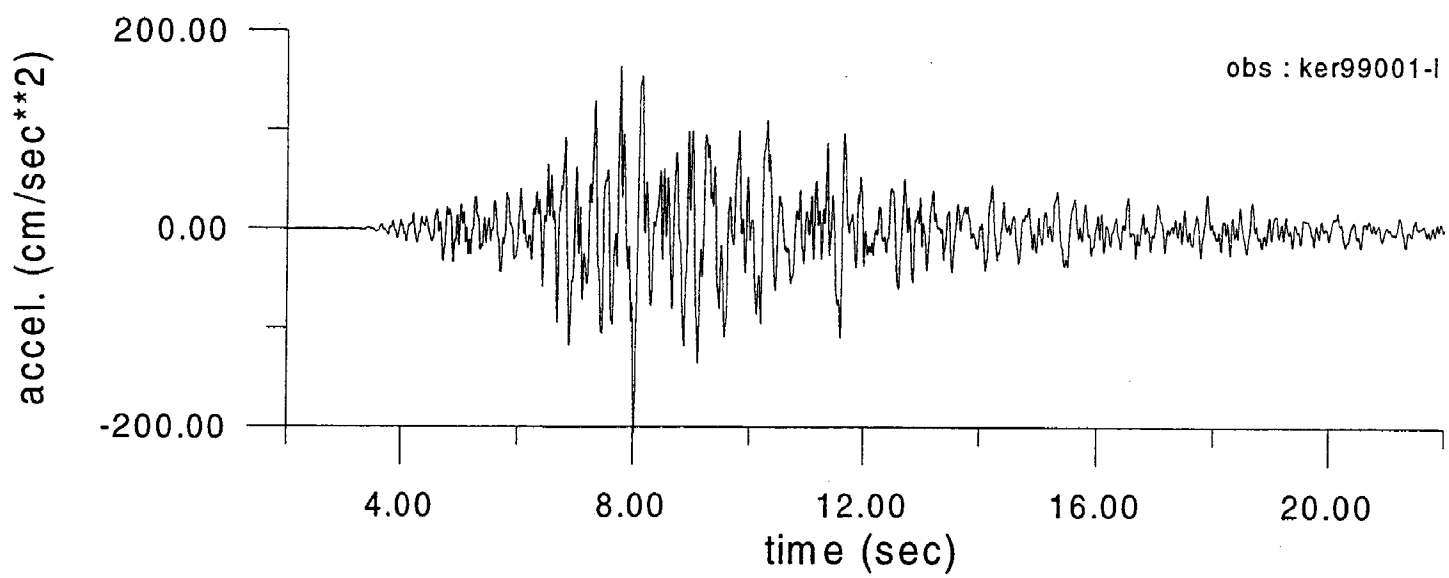
PEAKS: ACC= .1795E+03 VEL=-.7355E+01 DISP=-.5690E+00

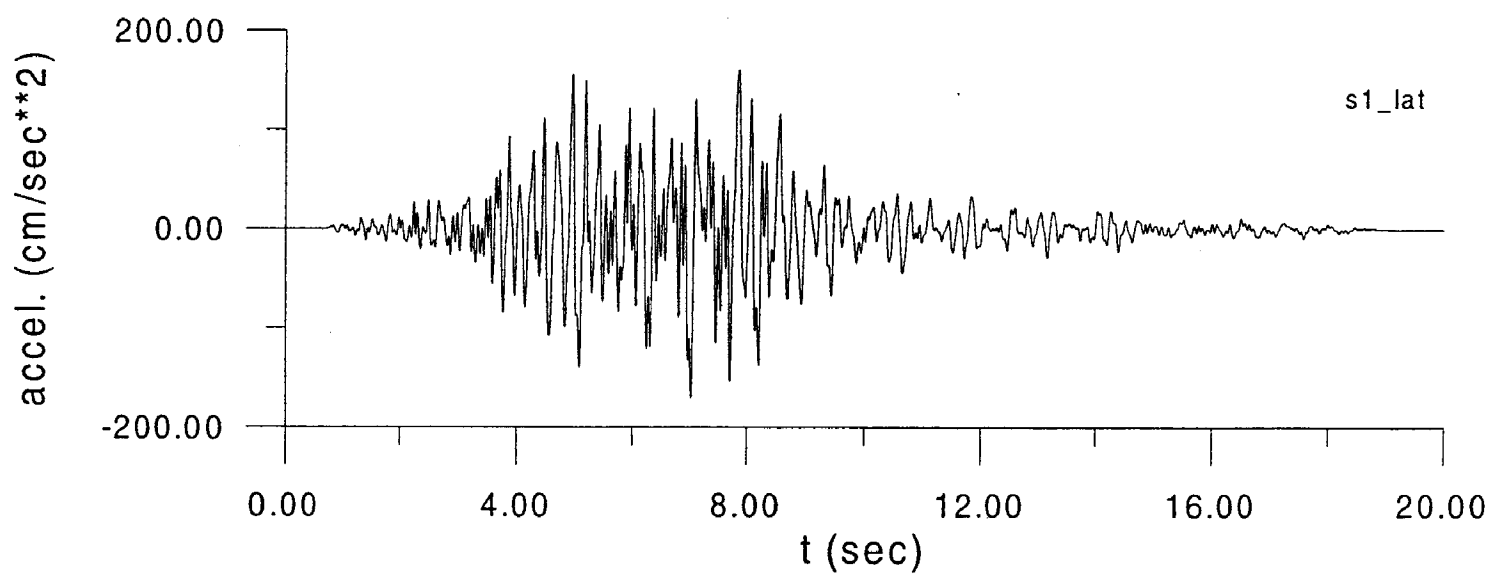
COMP 3 KERA

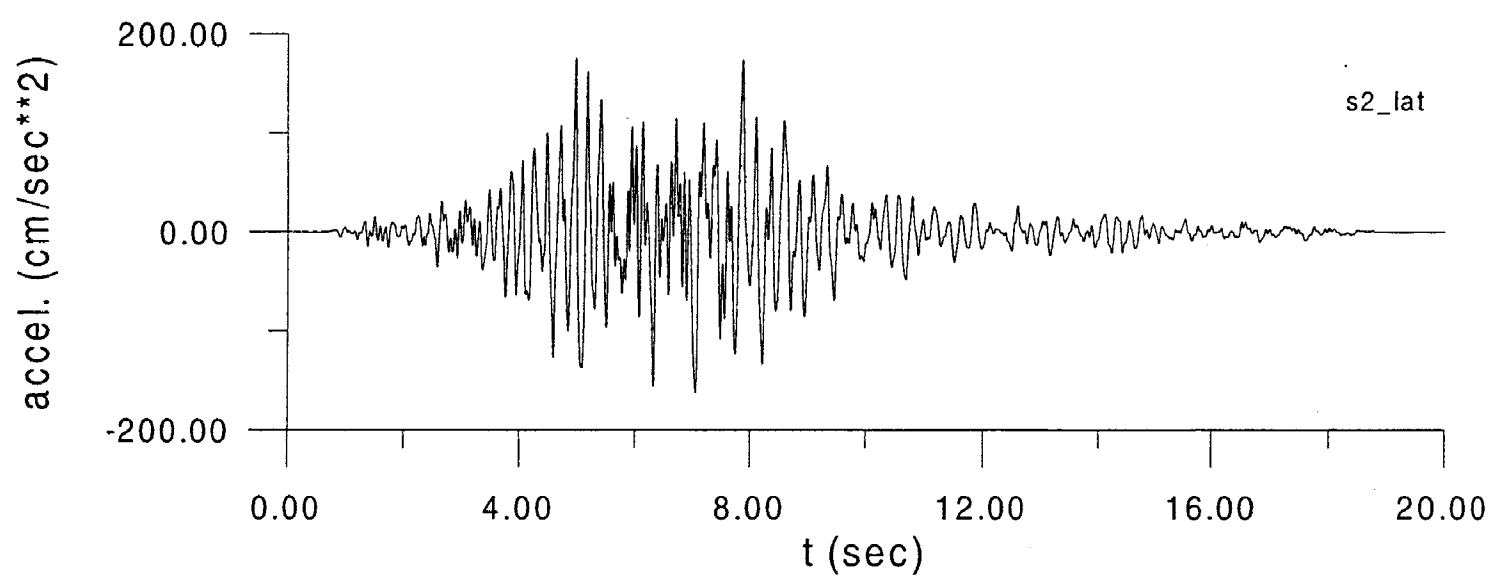
20.00-22.00

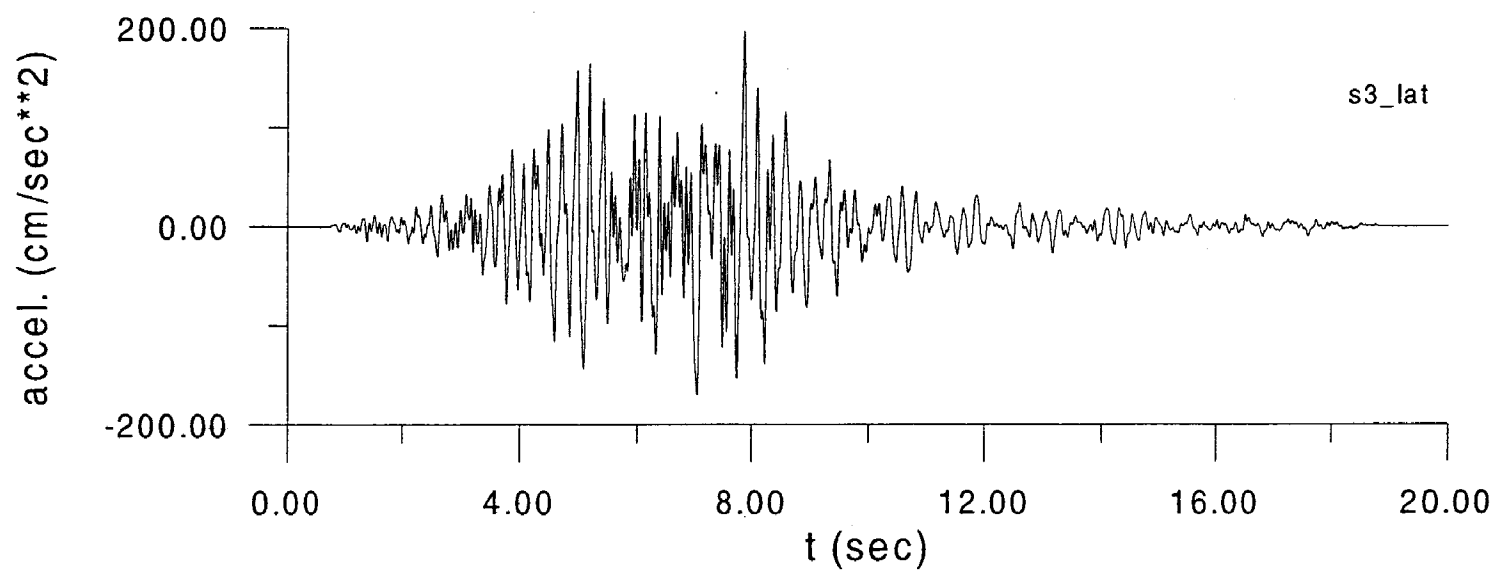
KERT99-1. V2

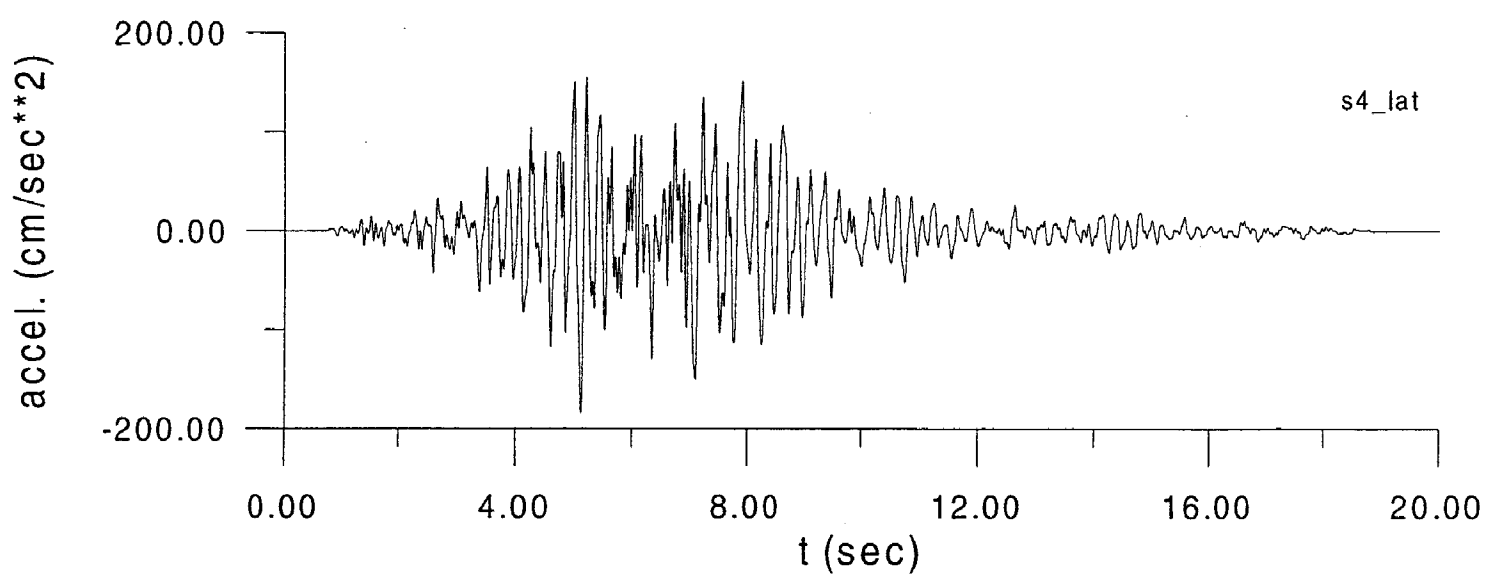


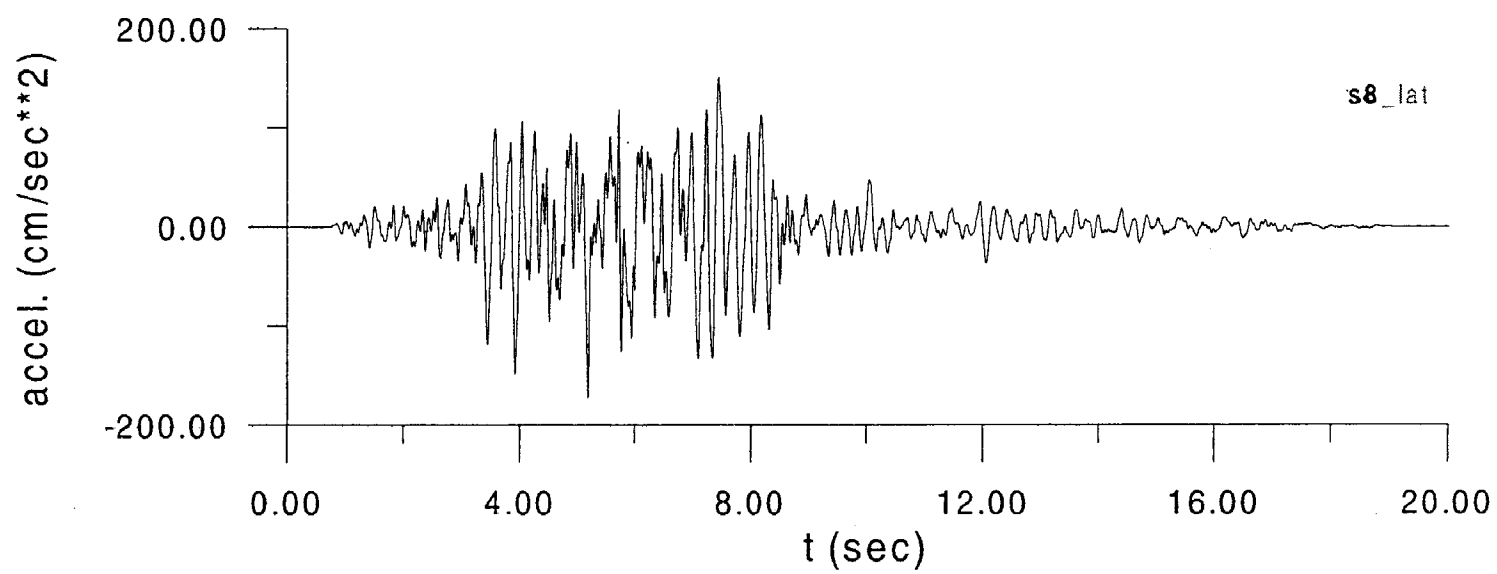


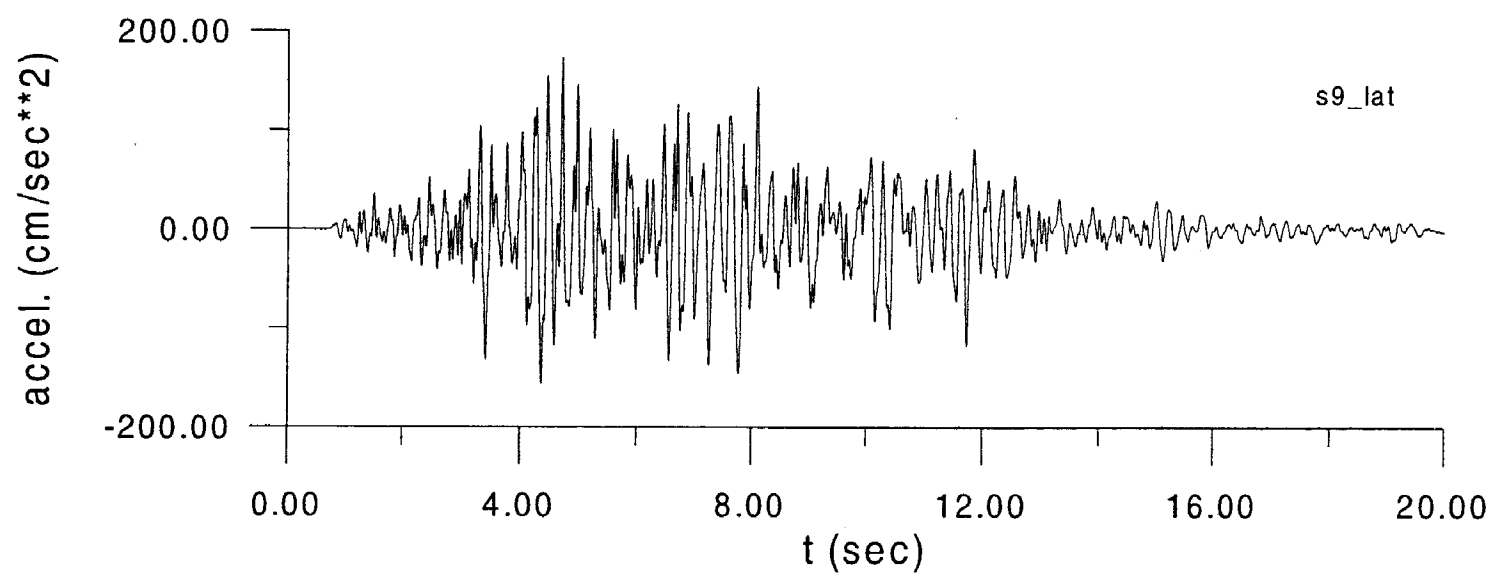


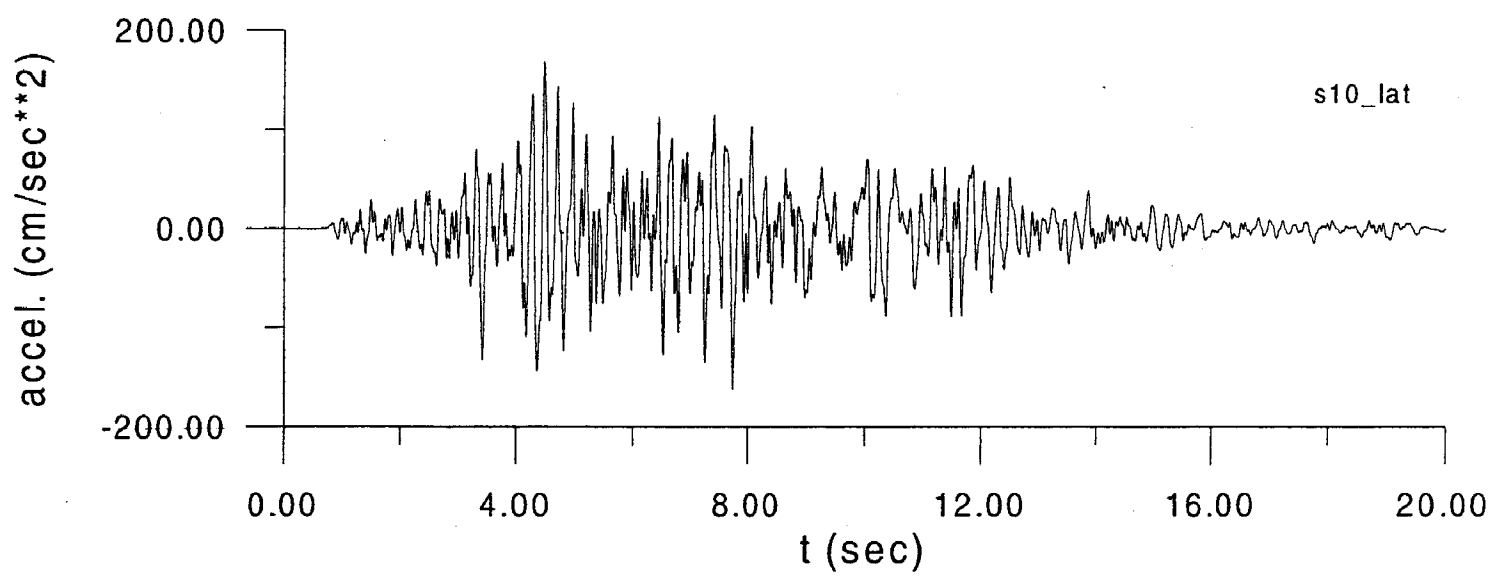


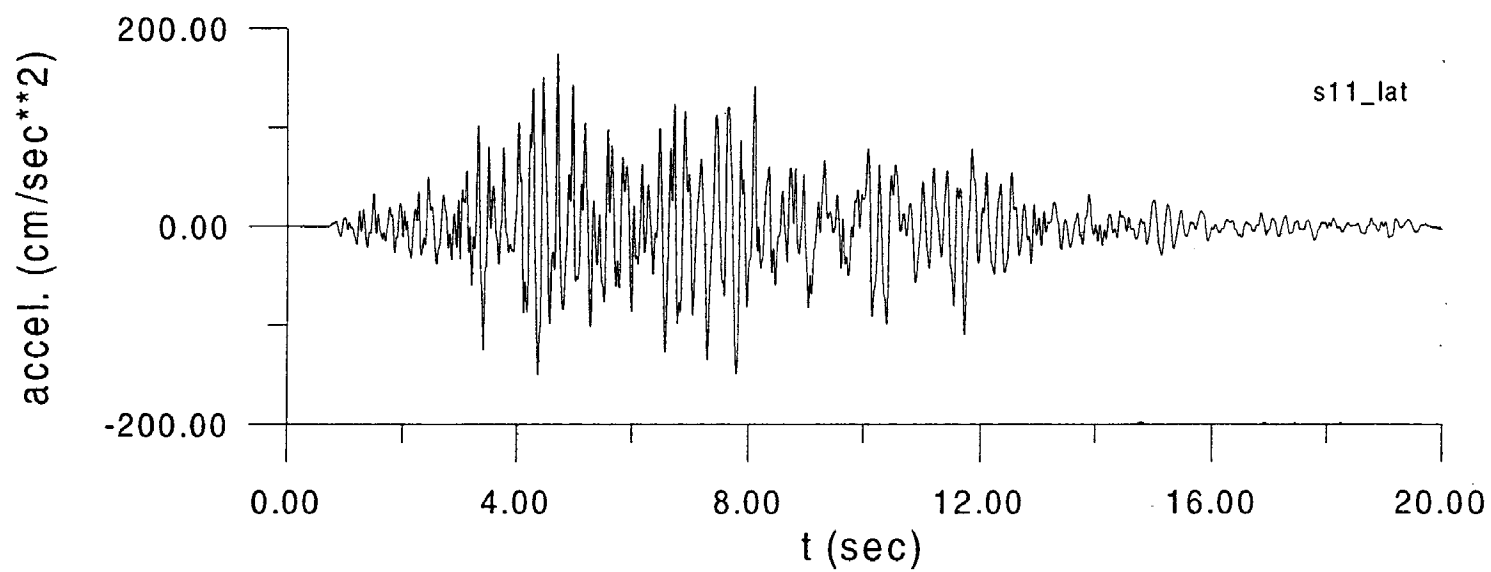


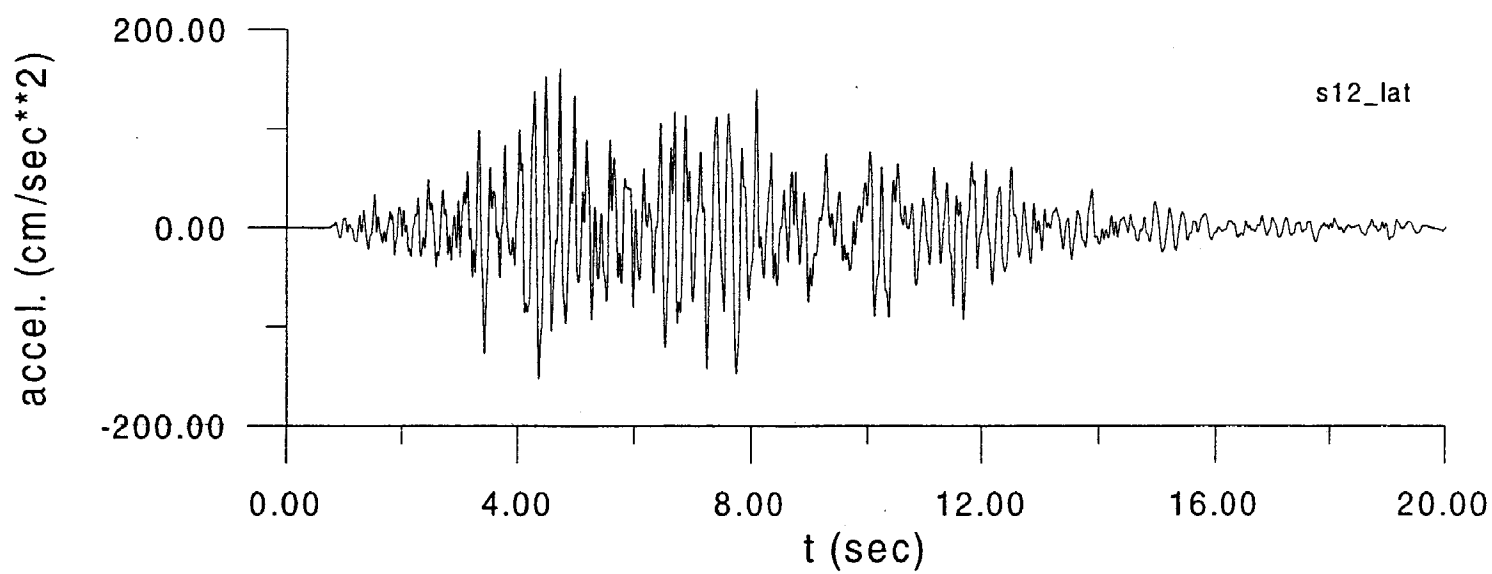


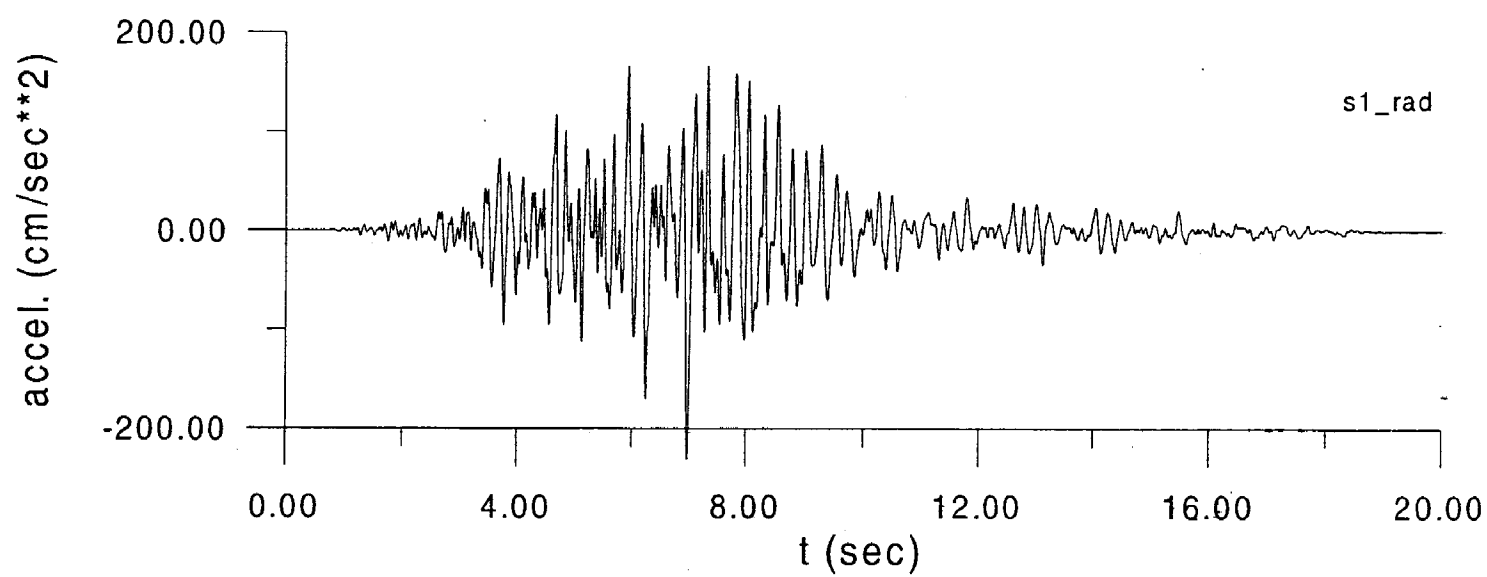


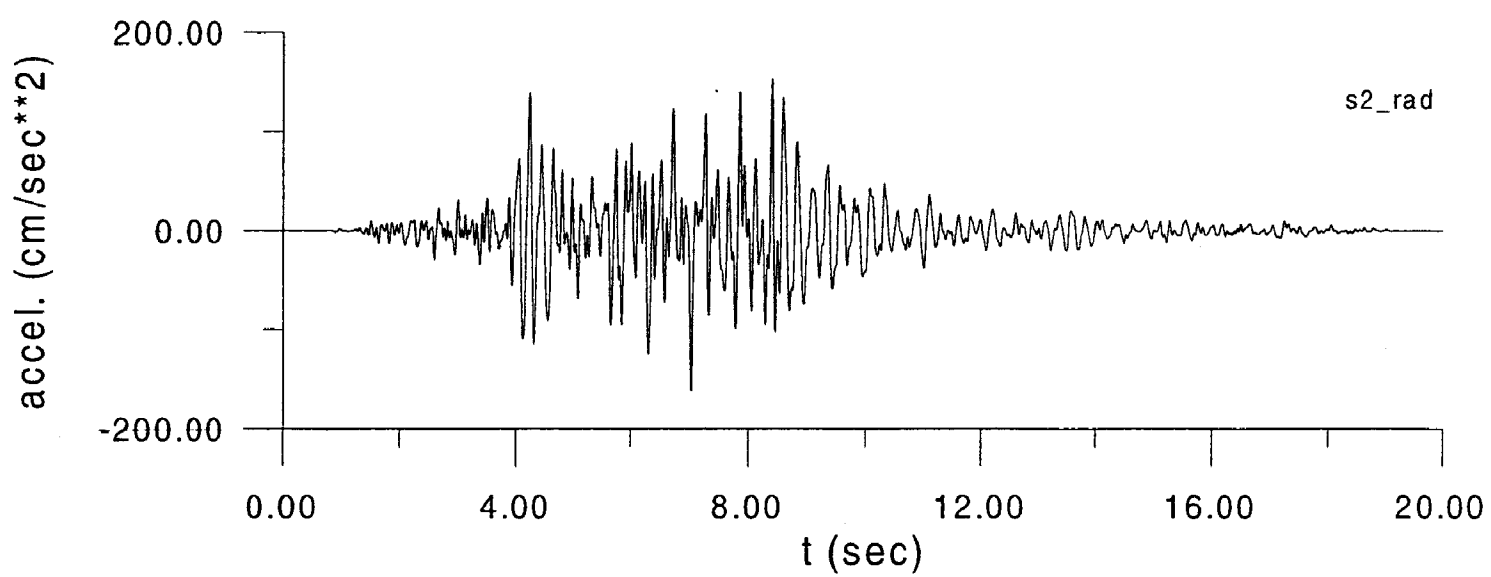


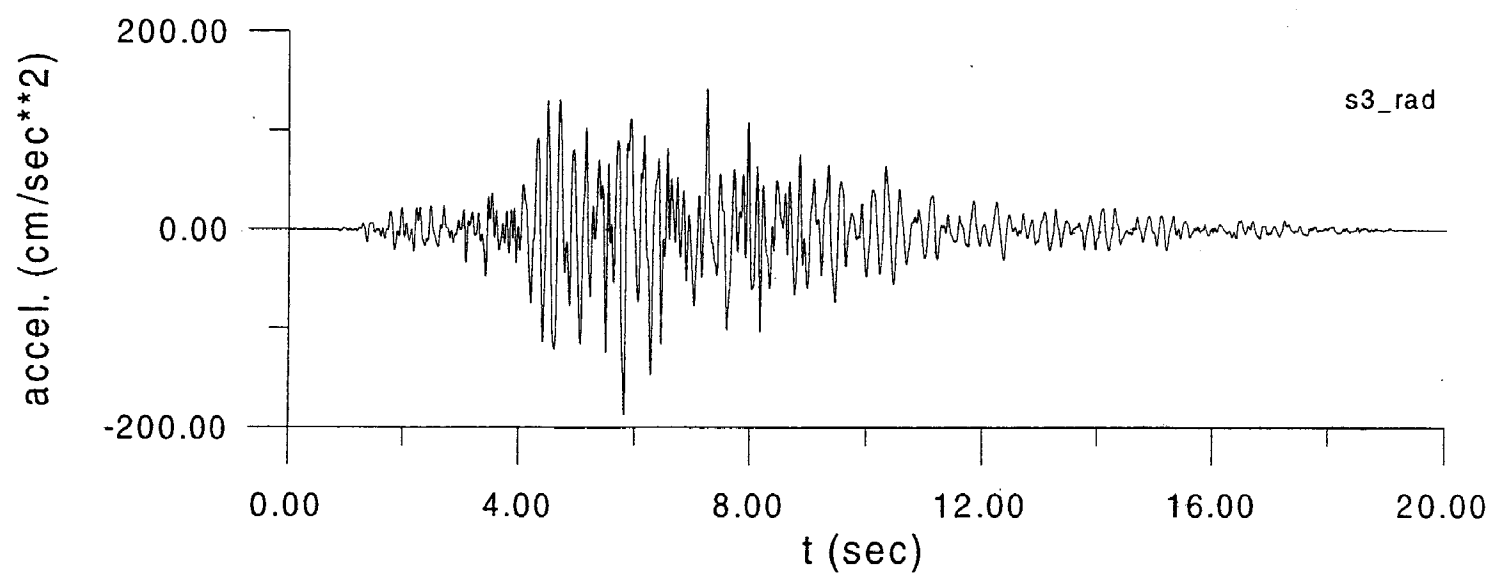


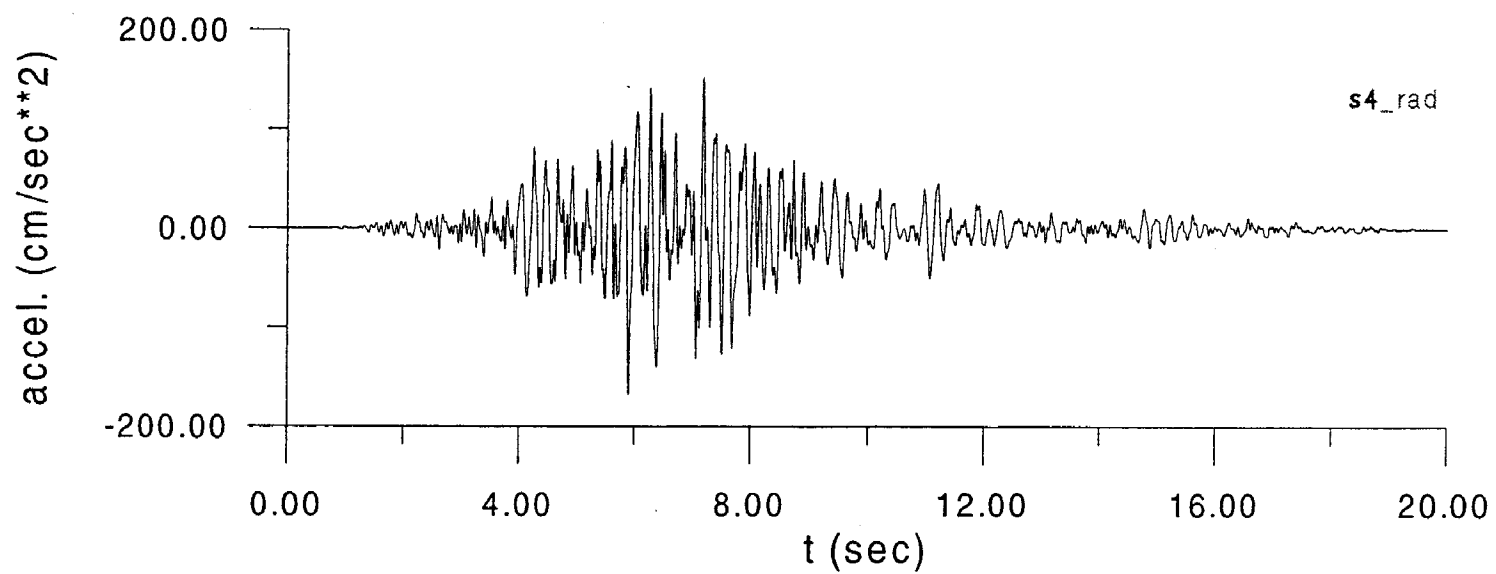


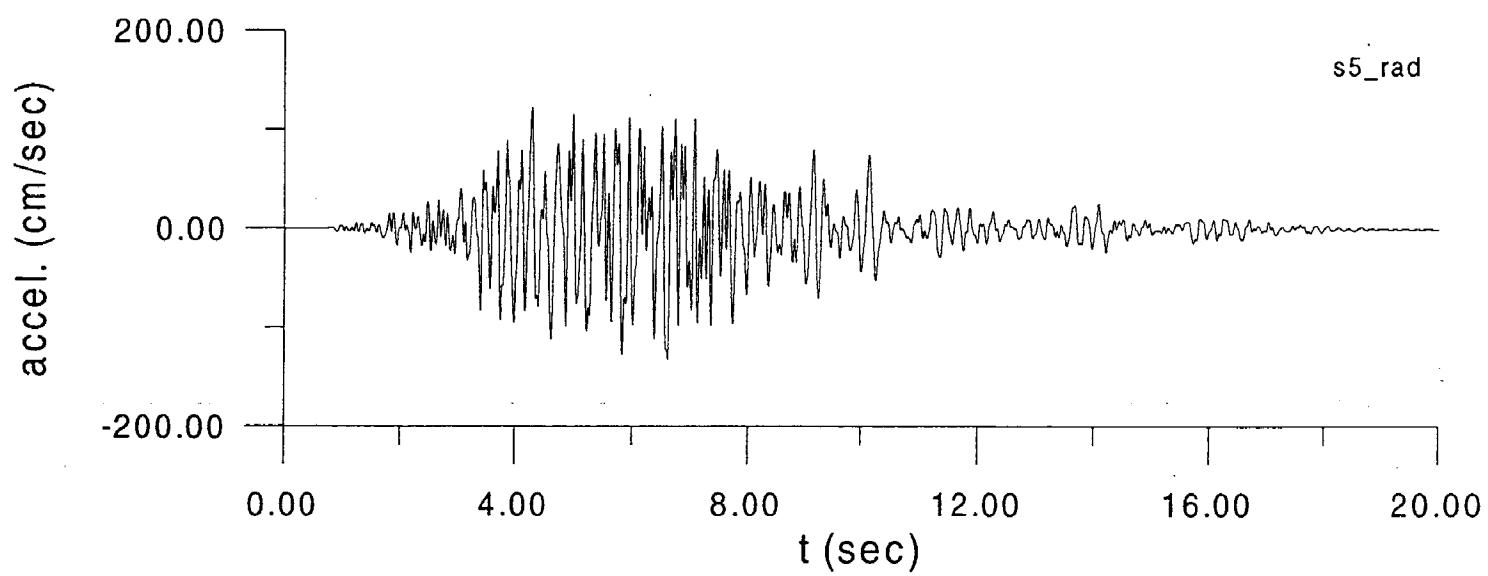


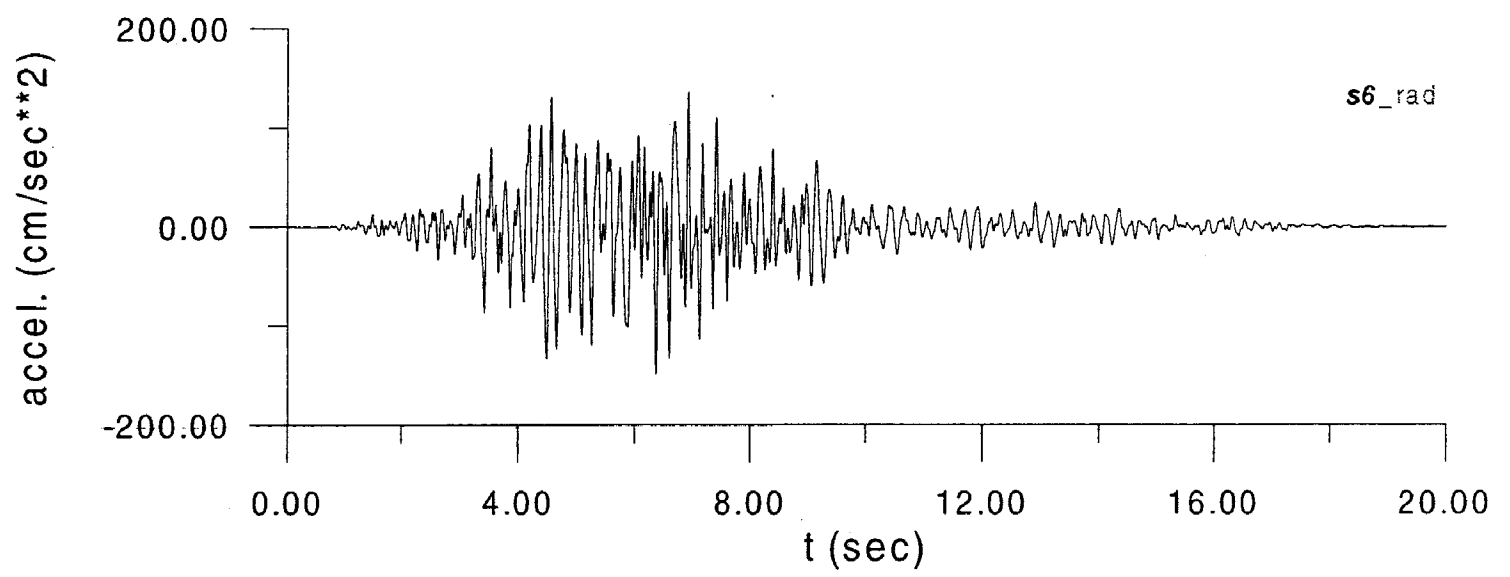


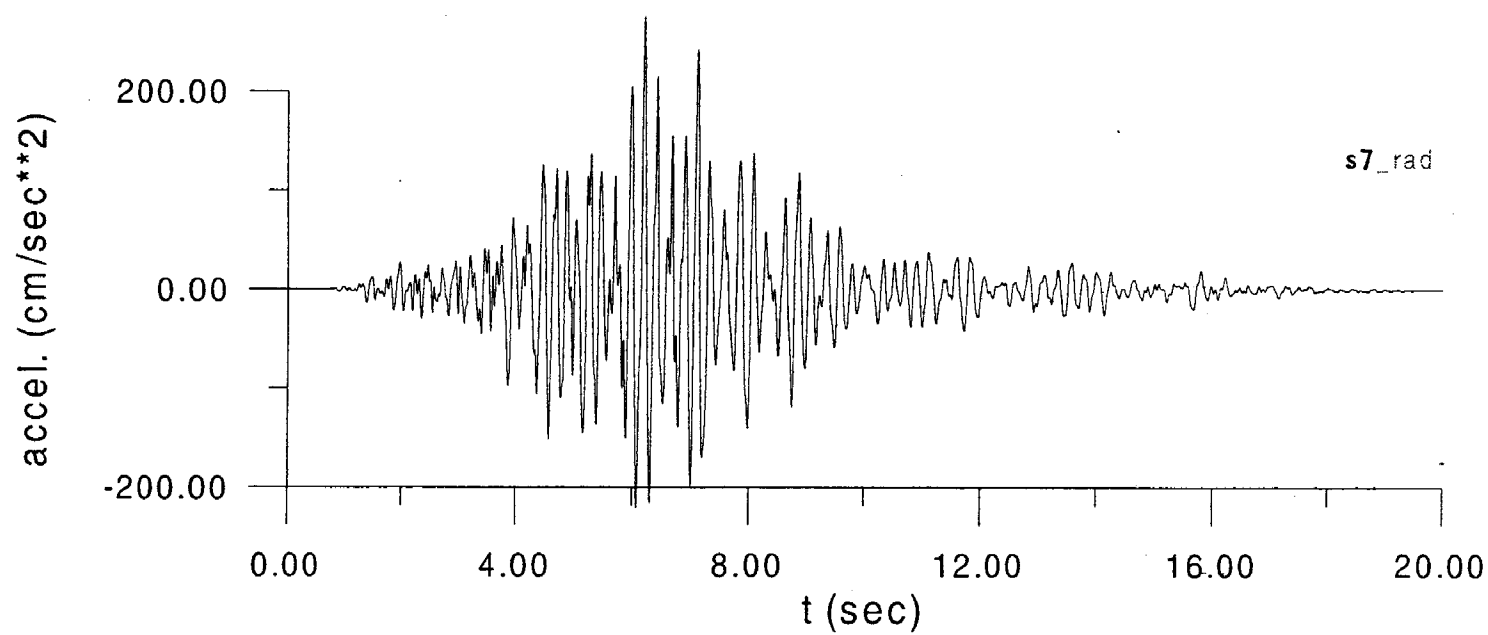


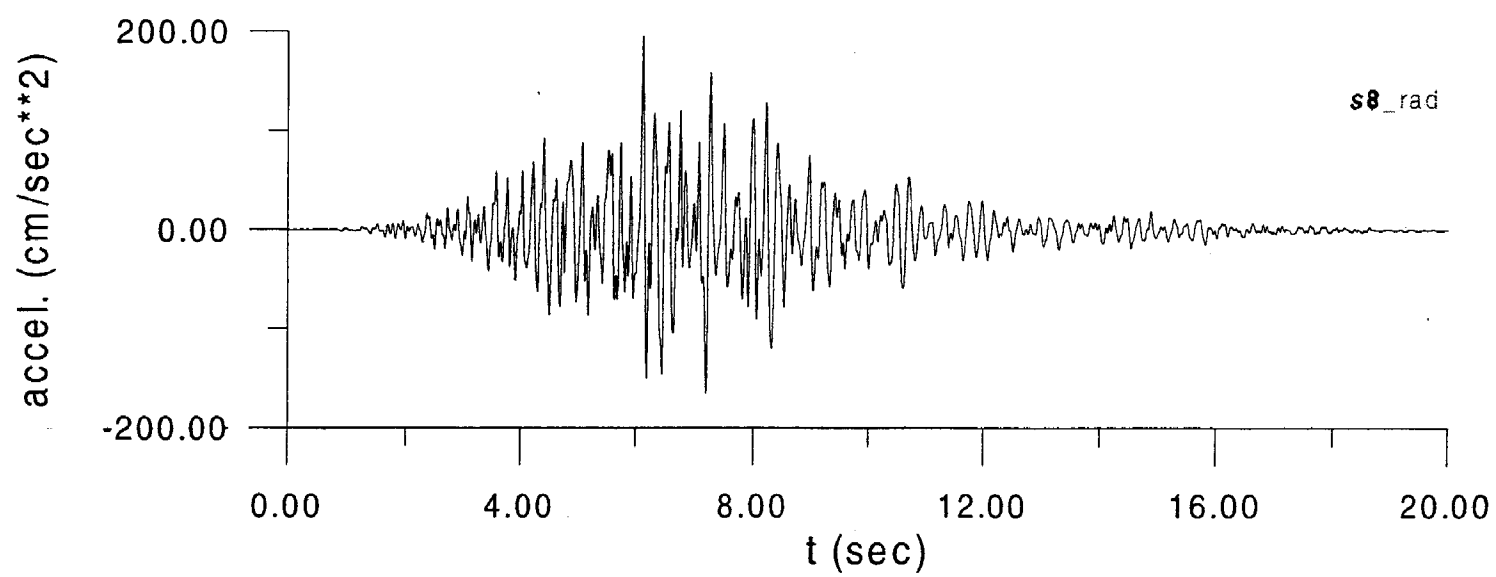


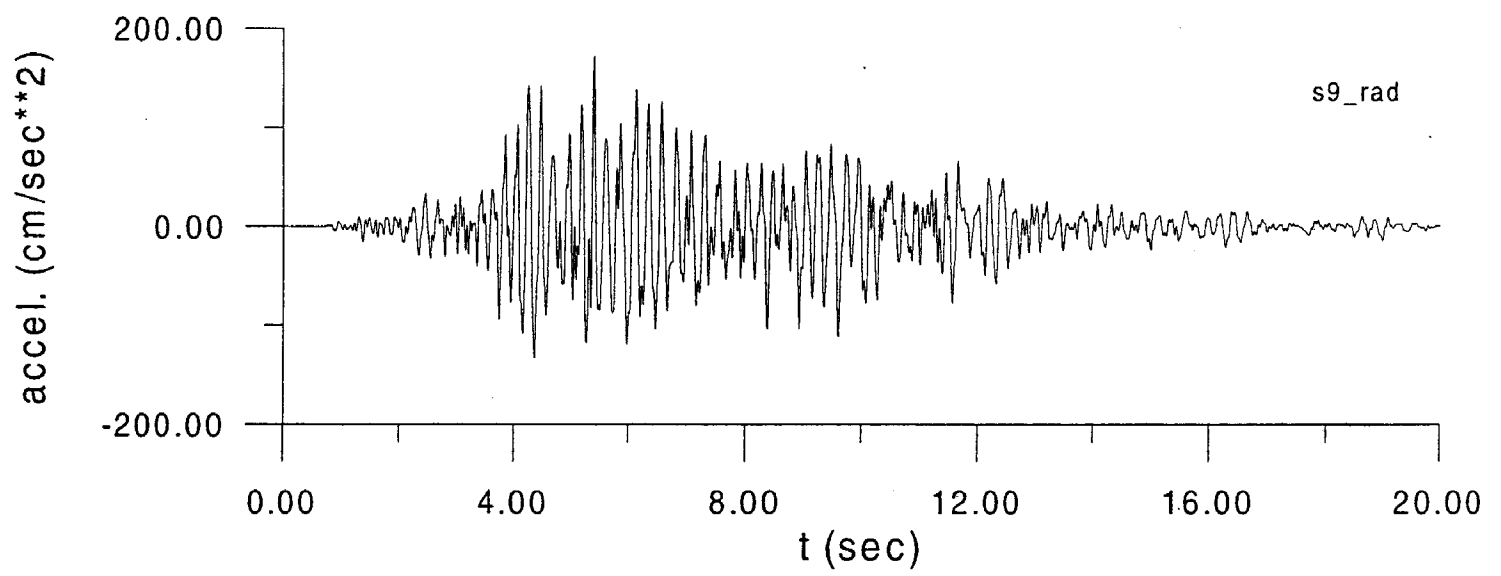


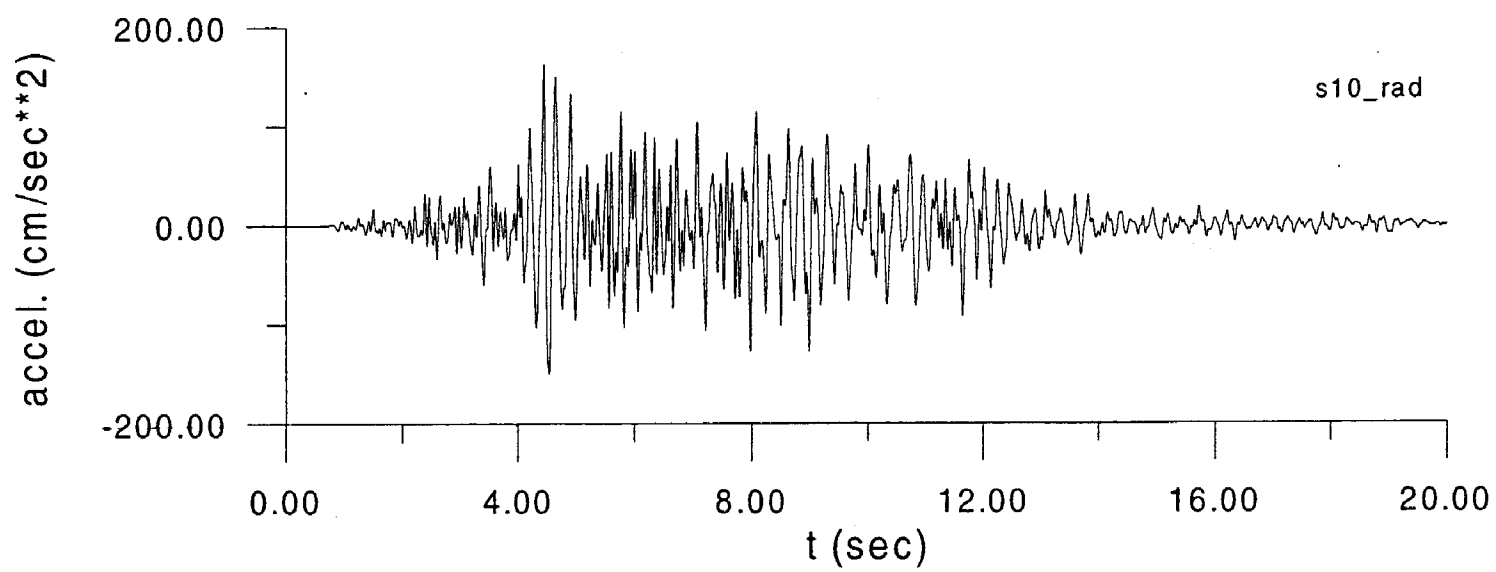


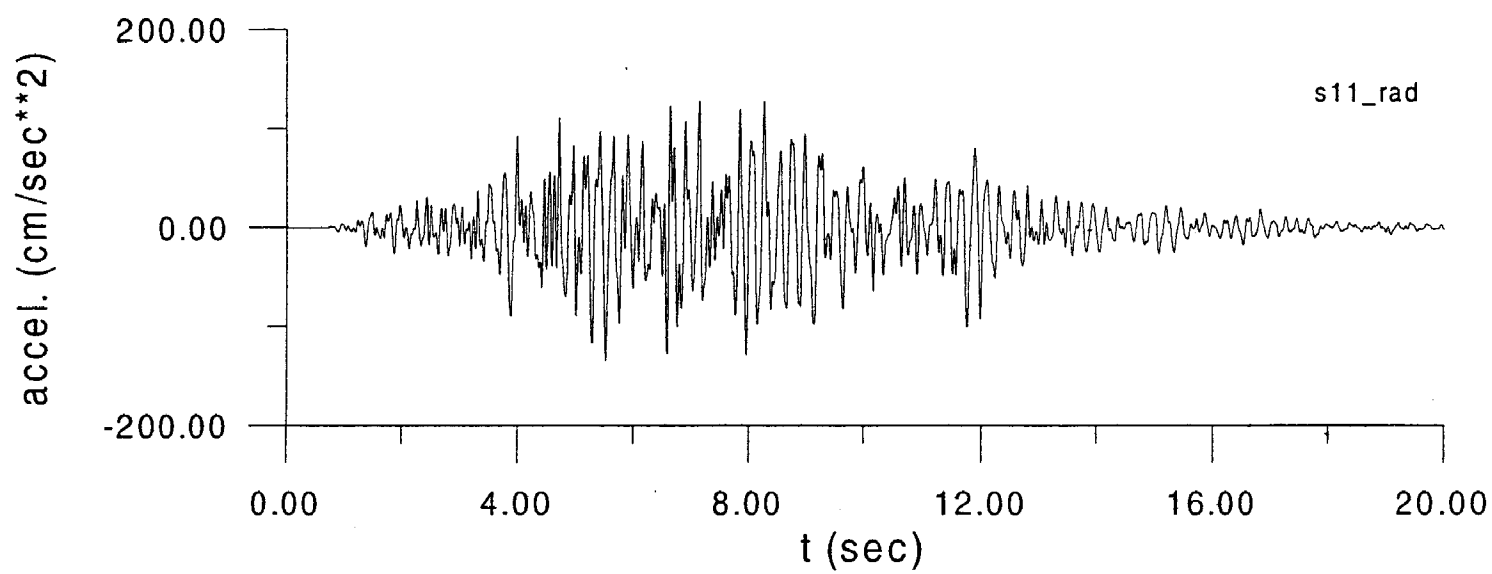


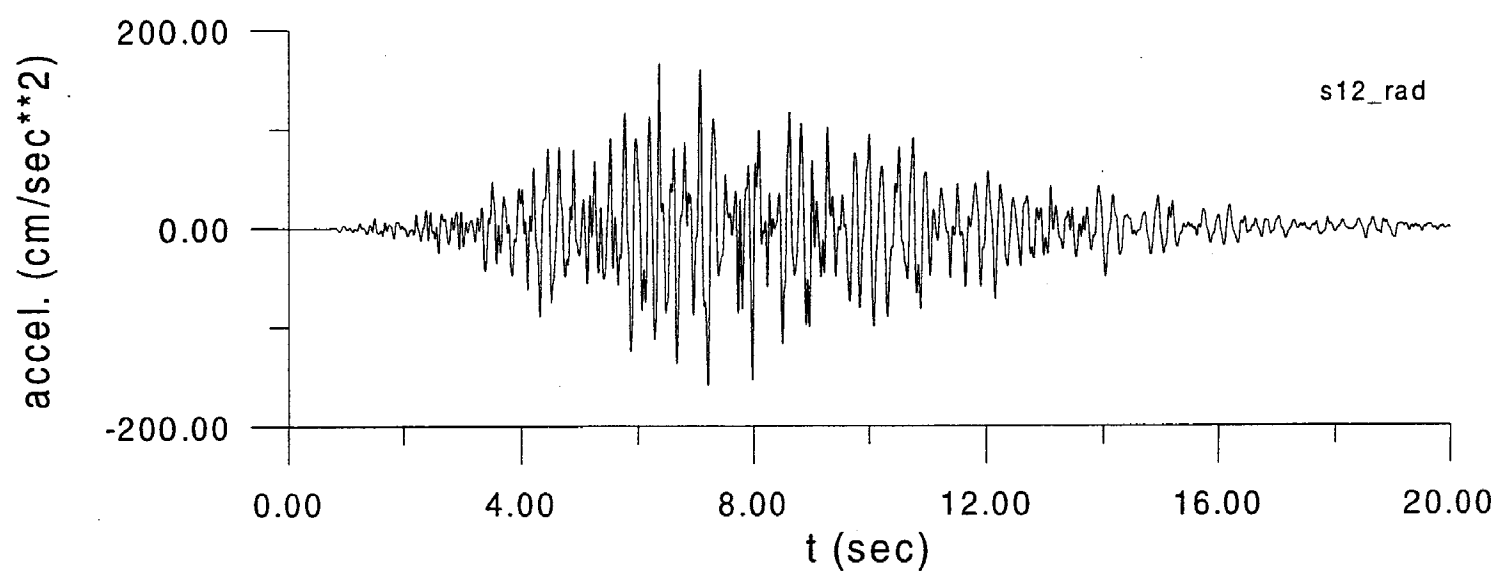












ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II

**Συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα στις θέσεις MND και FRN για τα δύο μοντέλα
διάρρηξης (δικατευθυντικό, κυκλικό) και για το σενάριο 5 έναρξης της
διάρρηξης.**

