

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3. ΑΝΑΛΥΣΗ τών ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

#### 3.1 Οι Καταγραφές

Η ισχυρή σεισμική δόνηση καταγράφηκε από έναν σημαντικό αριθμό επιταχυνσιογράφων που είχαν εγκατασταθεί στην ευρύτερη περιοχή τής Αθήνας. Όπως όμως προαναφέρθηκε, δεν υπήρξαν καταγραφές στην πλειόσειστη περιοχή --- πράγμα εντελώς φυσικό μιά που αφενός κανείς δέν υποψιάζονταν σημαντικόν σεισμό στην θέση αυτή, ενώ αφετέρου από την περιοχή αυτή έλειπαν τα σημαντικά δημόσια έργα που θα "δικαιολογούσαν" την εγκατάσταση επιταχυνσιογράφων.

Συγκεκριμένα, το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο είχε αναπτύξει ένα δίκτυο ψηφιακών επιταχυνσιογράφων σε συνεργασία με την "Αττικό Μετρό" σε κάμποσους σταθμούς τού Μετρό, 10 από τους οποίους κατέγραψαν τον κύριο σεισμό. Οι 6 από τις καταγραφές έγιναν μέσα στους σταθμούς σε βάθος από 7 έως 26 m από την επιφάνεια (σε διάφορα δηλαδή επίπεδα τών σταθμών). Δύο από αυτές, στο Μοναστηράκι και στην Αγ. Παρασκευή (στο ερευνητικό κέντρο Δημόκριτος) ελήφθησαν σε "ελεύθερο" πεδίο.

Τρείς άλλοι αναλογικοί επιταχυνσιογράφοι εγκατεστημένοι από το μόνιμο εθνικό δίκτυο τού Ι.Τ.Σ.Α.Κ. κατέγραψαν την σεισμική δόνηση στο Χαλάνδρι (στο ισόγειο διορόφου κτιρίου), στην Κυψέλη (στο ισόγειο 3 ορόφου κτιρίου τής Γ.Υ.Σ.) και στον Ταύρο (στο δάπεδο ισογείου κτιρίου τού Κ.Ε.Δ.Ε.). Τέλος, τρείς ακόμα καταγραφές ελήφθησαν από το δίκτυο τής Δ.Ε.Η. στα εργοστάσιά της στο Αλιβέρι, στο Κερατσίνι, και στο Λαύριο.

Αμέσως μετά τον σεισμό εγκαταστάθηκαν, τόσο από το Ι.Τ.Σ.Α.Κ. όσο και από το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, επιταχυνσιογράφοι στις πλειόσειστες περιοχές, οι οποίοι κατέγραψαν σημαντικόν αριθμό μετασεισμών.

Στον χάρτη τού Σχήματος 1.1 δίδεται η θέση τών επιταχυνσιογράφων (του κυρίου σεισμού) ενώ στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί δίδονται οι μέγιστες επιταχύνσεις που κατεγράφησαν στους σταθμούς αυτούς με την επικεντρική απόσταση, τις επικρατούσες γεωλογικές συνθήκες στις θέσεις αυτές, και την τοποθέτησή τους στο αντίστοιχο κτίριο.

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα αυτόν, σχεδόν όλες οι καταγραφές έγιναν σε επικεντρική απόσταση 15 - 25 km περίπου (εκτός από το Αλιβέρι, το Λαύριο και την Ραφήνα), ενώ αρκετές από αυτές ελήφθησαν σε σκληρές εδαφικές αποθέσεις. Η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση κυμάνθηκε μεταξύ 0.04 g και 0.36 g, εκτός από την καταγραφή στο Μοναστηράκι που είχε μέγιστη επιτάχυνση 0.51 g.

Στα Σχήματα 3.1 έως 3.7 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες τών επιταχύνσεων στα Σεπόλια (στην Στάθμη -2, και στην ελεύθερη επιφάνεια), στο Κ.Ε.Δ.Ε., (στο ισόγειο διορόφου κτιρίου), στο Σύνταγμα (στην Στάθμη -1 τού Μετρό), στο Μοναστηράκι (στην επιφάνεια), στο Χαλάνδρι (ισόγειο διορόφου), καθώς και τα φάσματα αποκρίσεως τών καταγραφών αυτών. Είναι σαφής η διαφοροποίηση τού σεισμικού κραδασμού, είτε από θέση σε θέση, είτε από το βάθος στην επιφάνεια (Σεπόλια Α και Β).

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1  
Καταγραφές Ισχυρού Σεισμικού Κραδασμού σόν Σεισμό τής 7 - 9 - 99

Περιοχή	Κωδικός Σταθμού	Χώρος Εγκατάστασης	Βάθος Οργάνου (m)	Τοπικές Εδαφικές Συνθήκες	Απόσταση* από προβολή ρήγματος (km)	Επιτάχυνση LONG	Επιτάχυνση TRANS	Επιτάχυνση VERT
Δημόκριτος	DMK	Ελεύθερο πεδίο	0	αβεστούλιθος	16	0.05	0.08	0.04
Νέος Κόσμος (ΦΙΞ)	FIX	Σταθμός Μετρό Στάθμη-1	15	αθηναϊκός σχιστόλιθος	12	0.09	0.12	0.05
Μοναστηράκι	MNSA	Ελεύθερο πεδίο	0	αλλούβια- αποσπασμένοι αθηναϊκός σχιστόλιθος	10	0.23	0.51	0.16
Πεντάγωνο	PNT	Μετρό Στάθμη -2	15	αλλούβια	13	0.09	0.08	0.06
Νέο Ψυχικό	ATHA	Υπόγειο 3-ορόφου	0	αθηναϊκός σχιστόλιθος	12	0.08	0.10	0.11
Δάφνη	DFNA	Μετρό Στάθμη -2	13.5	3.5 m εδάφους επί σχιστόλιθου	13	0.04	0.08	0.04
Σύνταγμα	SGMA	Μετρό Στάθμη -1	7	αθηναϊκός σχιστόλιθος	11	0.15	0.24	0.05
Σύνταγμα	SGMB	Μετρό Στάθμη -3	26	αθηναϊκός σχιστόλιθος	11	0.11	0.09	0.09
Σεπτόλια	SPLA	Μετρό Στάθμη -1	13	13m αλλουβιακές αποθέσεις επί σχιστολίθου	9	0.25	0.22	0.08
Σεπτόλια	SPLB	Υπόγειο 2-ορόφου	0	10-15 m εδάφους επί σχιστολίθου	9	0.32	0.31	0.19
Χαλάνδρι	ATH-02	Υπόγειο 2-ορόφου	0	αλλούβια	12	0.11	0.16	0.09
Κ.Ε.Δ.Ε	ATH-03	Ισόγειο 1-ορόφου	0	μάργα	11	0.26	0.30	0.16
Γ.Υ.Σ.	ATH-04	Ισόγειο 3-ορόφου	0	αλλουβιακές αποθέσεις	10	0.12	0.11	0.05
Ραφήνα	RFN	-	0		30	0.08	0.01	0.03
Αλιβέρι	ALIB	-	0		54	0.02	0.02	0.01
Κερατσίνι	KERA	Υπόγειο Νομαρχίας	0		8	0.22	0.19	0.16
Λαύριο	LAVR	-	0		62	0.04	0.05	0.05

### 3.2 Περιγραφή και Ανάλυση των Καταγραφών

Έμφαση στην εδώ ανάλυση δίδεται στους τέσσερις επιταχυνσιογράφους που κατέγραψαν χρονοϊστορίες με τις υψηλότερες μέγιστες επιταχύνσεις (στο σχήμα δείχνονται ως συμπαγή τρίγωνα). Στον Πίνακα 3.2 δίδονται το όνομα τού καταγραφικού σταθμού, η μέγιστη PGA, και η προσεγγιστική απόστασή του από την σεισμική πηγή. Τα επιταχυνσιογραφήματα τών τεσσάρων αυτών σταθμών, μαζί με τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες τής ταχύτητας και τής μετατόπισης έχουν δοθεί στα Σχήματα 3.1 έως 3.7. Τα φάσματα αποκρίσεως τών ανωτέρω καταγραφών συγκρίνονται στο Σχήμα 3.8.

*Πίνακας 3.2*

*Καταγραφικοί σταθμοί με τις ισχυρότερες (ως προς την PGA) δονήσεις (Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, ΙΤΣΑΚ)*

Όνομα σταθμού (Σύμβολο)	Μέγιστη PGA	Απόσταση (km)
ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ (MNSA)	0.51 g	10
ΣΕΠΟΛΙΑ : B (SPLB)	0.36 g	8
ΚΕΔΕ (ΚΕΔΕ)	0.30 g	12
ΣΥΝΤΑΓΜΑ : A (SGMA)	0.23 g	11

Καταρχάς εξετάζουμε σύντομα αυτές τις καταγραφές για να διαπιστωθεί εάν και κατά πόσον επηρεάσθηκαν από το υποκείμενο έδαφος και την παρουσία γειτονικών (υπογείων και υπεργείων) δομημάτων. Μία ανάλογη λεπτομερής ανάλυση δίδεται καί στο Κεφάλαιο Η του Μέρους Β.

#### *Η καταγραφή στο Μοναστηράκι (MNSA)*

Ο καταγραφικός σταθμός MNSA κατέγραψε στην μία οριζόντια διεύθυνση την ιδιαιτέρως υψηλή τιμή επιτάχυνσης  $PGA = 0.51 \text{ g}$ . Το επιταχυνσιογράφημα και το αντίστοιχο ελαστικό φάσμα αποκρίσεως,

SA(T), για 5% απόσβεση, απεικονίζονται στα Σχήματα 3.5, 3.7, και 3.8. Οι πολύ μικρές δεσπόζουσες περίοδοι που είναι εμφανείς σε αυτήν την καταγραφή (0.08 και 0.15 sec) θα μπορούσαν μόνον μερικώς να ερμηνεύσουν τον χαμηλό βαθμό δομητικών βλαβών στην γειτονιά τού σταθμού, παρόλο που οι φασματικές επιταχύνσεις υπερβαίνουν το 1.50 g. Πάντως, το επιταχυνσιογράφημα αυτό, έχοντας καταγραφεί δίπλα σε βαθύ φρέαρ ενός υπό-κατασκευής σταθμού τού Μετρό, δημιουργήσε υπόνοιες ότι θα μπορούσε να είχε επηρεασθεί από την υπόγεια «κατασκευή». Μάλιστα, εκτός από το φρέαρ, πολύ κοντά στον επιταχυνσιογράφο βρίσκονταν άλλες δύο υπόγειες «κατασκευές». Όπως δείχνεται στο Σχήμα 3.9, σε μία κατακόρυφη τομή σχεδόν παράλληλη προς την διεύθυνση τής ισχυρότερης δόνησης, βρίσκονται η εγκιβωτισμένη προέκταση του σταθμού τής παλιάς γραμμής τού Μετρό, με ιδιαιτέρως άκαμπτα τοιχώματα (πλάτους 18 m και βάθους 10 m), και επιπλέον μία ανοικτή αρχαιολογική εκσκαφή βάθους 5 m μεταξύ τής θέσης τού οργάνου και τού σταθμού του Μετρό. Η εδαφική κατατομή περιλαμβάνει στιφρές αμμώδεις αργίλους και αποσαθρωμένους ημι-βραχώδεις σχηματισμούς σε βάθος τουλάχιστον 60 m. Η μέση τιμή της ταχύτητας του διατμητικού κύματος για βάθη  $z \leq 30$  m είναι περίπου 400 m/s --- κατηγορία C κατά τις διατάξεις τού NEHRP 1997 (Dobry et al 2000), ή B κατά EC8 (Draft 2001).

Χρησιμοποιώντας προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων (με την διακριτοποίηση τής «κατασκευής» όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.9), εφαρμόσαμε αντίστροφη "θαμιστική" αριθμητική διαδικασία, όπου η υπό-εξέταση καταγραφή αποτελούσε τον αναζητούμενο επιφανειακό κραδασμό. Στα εδαφικά στρώματα δόθηκαν ισοδυνάμως-γραμμικές ιδιότητες, έγινε δε η συνήθης παραδοχή για την διέγερση, ότι δηλαδή είναι σύνθεση κατακορύφως διαδιδομένων κυμάτων SV.

Οι λεπτομέρειες αυτής τής μελέτης δεν αναπτύσσονται σ' αυτήν εδώ την έκθεση όμως, η μέθοδος αναλύσεως είναι ουσιαστικώς η ίδια με αυτήν που περιγράφεται λίγο παρακάτω για την μελέτη τής τοπογραφικής επίδρασης στις Αδάμες.

Η μελέτη επιβεβαιώνει ότι η παρουσία τών τριών υπογείων «κατασκευών» έχει επαυξήσει τα επίπεδα επιταχύνσεων κατά την μία από τις δύο οριζόντιες συνιστώσες τού οργάνου. Κυματική περίθλαση στις γωνίες έχει προφανώς συμβάλλει σε αύξηση τής μέγιστης επιτάχυνσης PGA κατά 30 % περίπου, σε σύγκριση με αυτό που θα είχε καταγραφεί σε ένα *απολύτως ελεύθερο πεδίο*. Το Σχήμα 3.10 συνοψίζει τα αποτελέσματα τής έρευνας. Καταδεικνύει ότι η δόνηση που κατέγραψε ο επιταχυνσιογράφος MNSA (PGA = 0.51g) :

- (i) θα μπορούσε να είχε προκύψει αριθμητικώς από έναν σεισμικό κραδασμό υποβάθρου (-60 m) με  $PGA \approx 0.20 \text{ g}$ , και
- (ii) είναι συμβιβαστή με επιτάχυνση στην επιφάνεια πραγματικώς ελευθέρου πεδίου με τιμή  $PGA \approx 0.35 \text{ g}$ .

Η τελευταία τιμή βρίσκεται σε καλύτερη συμφωνία με τις μέγιστες τιμές επιταχύνσεων γειτονικών σταθμών (Κέδε 0.31 g και Σύνταγμα 0.25 g). Για μία γενική περιγραφή τής διέγερσης στην βάση, προσδιορίσθηκε η επονομαζόμενη δόνηση *rock-outcrop*, η οποία δείχνεται στο Σχήμα 3.9 μαζί με το αντίστοιχο ελαστικό φάσμα αποκρίσεως. (Η δόνηση αυτή δέν πρέπει να συγχέεται με την διέγερση στην βάση η οποία δείχνεται στο Σχήμα 3.10). Προφανώς, τόσο η ευκαμψία τού εδάφους, όσο και τα υπόγεια “εμπόδια” διαδραμάτισαν τον ρόλο τους στην καταγραφή (κατά μονοδιάστατον και διδιάστατον τρόπο).

### **Καταγραφές στο ΚΕΔΕ (KEDE) και στα Σεπόλια (SPLA)**

Οι δύο αυτές καταγραφές είναι πρακτικώς (αν όχι απολύτως) δονήσεις ελευθέρου πεδίου. Κατεγράφησαν στην επιφάνεια στιφρών εδαφικών σχηματισμών. Η εδαφική κατατομή (προφίλ) τού ΚΕΔΕ αποτελείται από ένα εδαφικό στρώμα 10 m με μέση τιμή  $V_s \approx 320 \text{ m/s} - 400 \text{ m/s}$ , και τον υποκείμενο μαλακό βράχο που χαρακτηρίζεται από δυστημσία παρόμοια με αυτήν τής βάσης τού σταθμού στο Μοναστηράκι. Η κατατομή στα Σεπόλια είναι κατά τι μαλακότερη : 13 m εδάφους με  $V_s \approx 300 \text{ m/s}$ , υπερκειμένη πιο στιφρού βραχώδους σχηματισμού.

Μονοδιάστατες ισοδυνάμως-γραμμικές αναλύσεις ανέλιξης (deconvolution) έχουν οδηγήσει στους κραδασμούς rock-outcrop που χρησιμοποιούνται ως "διεγέρσεις βάσης" σ' αυτήν εδώ την μελέτη.

### **Καταγραφή στο Μετρό τού Συντάγματος (SGMA)**

Η συγκεκριμένη δόνηση (SGMA) κατεγράφη στο εσωτερικό τού σταθμού τού μόλις (εκείνη την περίοδο) ολοκληρωθέντος Μετρό, σε βάθος 7 m. Υπάρχουν λόγοι να πιστεύει κανείς ότι η καταγραφή επηρεάστηκε από την κατασκευή. Πάντως, το έδαφος που υποστηρίζει και περιβάλλει τον σταθμό τού Μετρό είναι ελαφρώς αποσαθρωμένος βράχος, ενώ τα φασματικά χαρακτηριστικά τής καταγραφής είναι μάλλον παρόμοια με αυτά τού κοντινού σταθμού Μοναστηρακίου. Συνεπώς, αποφασίστηκε να θεωρηθεί η καταγραφή αυτή ως δόνηση σε επιφανειακή εκδήλωση βράχου (rock outcrop), χωρίς τροποποιήσεις.

### **Άλλες Πιθανές Καταγραφές**

Τα τέσσερα ανωτέρω επιταχυνσιογραφήματα rock-outcrop χρησιμοποιήθηκαν ως διεγέρσεις στις Αδάμες, λαμβάνοντας υπόψη και την περίπου ίση (με αυτή τών Αδαμών) απόσταση τους από την



ρηξιγενή ζώνη. Υπάρχουν όμως λόγοι να πιστεύουμε (και μερικές σαφείς ενδείξεις) ότι ο κραδασμός στην πλειόσειστη περιοχή ήταν πιο υψηλοπερίοδος απ' ότι στις καταγραφές κυρίως λόγω "κατευθυντικότητας". Για να καλυφθεί το ενδεχόμενο αυτό επελέχθησαν δύο επιπλέον (μή-τροποποιημένα) επιταχυνσιογραφήματα από την διεθνή τράπεζα ισχυρών σεισμικών δονήσεων. Και τα δύο προέρχονται από τον σεισμό του Parkfield της Καλιфорνίας (1966) με μέγεθος  $M_s = 5.6$ . Κατεγράφησαν σε μαλακό βράχο στους σταθμούς Cholame Shandon No. 8 και Temblor (Leeds, 1992). Οι καταγραφές αυτές (που και οι δύο παρουσιάζουν τιμές PGA περίπου 0.27 g) μοιάζουν με τις προαναφερθείσες τέσσερις δονήσεις rock-outcrop στο σεισμικό γεγονός της 7-9-99, τόσο εν-χρόνω όσο και κατά συχνότητα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το ελαστικό φάσμα αποκρίσεως της καταγραφής TEMBLOR ενέχει ένα σημαντικό εύρος περιόδων (0.20 έως 0.40 sec) όπου η φασματική επιτάχυνση κυμαίνεται περί το 0.70 g.

Πιστεύουμε ότι τα έξι μαζί επιλεγθέντα επιταχυνσιογραφήματα προσφέρουν μία ρεαλιστική και πλήρη περιγραφή της διέγερσης στην βάση ελευθέρου πεδίου.

### **3.3 Χαρακτηριστικά τών Καταγραφών, Σύγκριση**

#### **Αποκρίσεων Ελαστικών και Ανελαστικών Συστημάτων**

Διερευνάται η επίδραση τών τεσσάρων (4) ισχυροτέρων κραδασμών που καταγράφησαν στην Αθήνα, επί απλών ελαστικών και ανελαστικών συστημάτων, με στόχο να διαπιστωθεί εάν και κατά πόσον οι καταγραφές αυτές είναι συμβιβαστές με τις παρατηρηθείσες βλάβες. Προς τον σκοπό αυτόν υπολογίζονται:

- τα φάσματα αποκρίσεως ελαστικού μονοβαθμίου ταλαντωτή (με παραμέτρους: την περίοδο  $T$  και την απόσβεση  $\xi$ ).

- τα ανελαστικά φάσματα αποκρίσεως και τα φάσματα πλαστιμότητας τού αντιστοίχου ελαστο-πλαστικού μονοβάθμιου ταλαντωτή [( $T$ ,  $\xi$ ,  $\mu$ ) και ( $T$ ,  $\xi$ ,  $\varepsilon'$ ), όπου  $\mu$  η πλαστιμότητα, και  $\varepsilon' = F_{\max}/mg$  η μέγιστη αντίσταση τού ελατηρίου]
- οι παραμένουσες ολισθήσεις ενός ακάμπτου σώματος εδραζομένου στο έδαφος μέσω απλής τριβής (με επιτάχυνση “ολισθήσεως”  $A_c = \mu_s g$ , όπου  $\mu_s$  = συντελεστής τριβής)
- ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ανατροπής υψίκορμου στερεού σώματος εδραζομένου στο έδαφος και υφισταμένου λικνισμού χωρίς ολίσθηση [ψευδοστατική επιτάχυνση ανατροπής:  $A_c = (b/h)g$ , όπου  $b$  και  $h$  οι συντεταγμένες τού κέντρου μάζας ως προς άξονες με κέντρο την μία ακμή τής βάσης].

Οι αποκρίσεις τών ανωτέρω συστημάτων συγκρίνονται με τις αντίστοιχες αποκρίσεις στα επιταχυνσιογραφήματα Αιγίου (1995), Πύργου (1993), και Καλαμάτας (1986). Συγκεκριμένα:

#### **α. Ελαστικά και Ανελαστικά Φάσματα Αποκρίσεως**

Τα ελαστικά και ανελαστικά φάσματα αποκρίσεως τών ανωτέρω εφτά καταγραφών συγκρίνονται μεταξύ τους στο Σχήμα 3.11. Τα ανελαστικά φάσματα αναφέρονται παραμετρικώς σε σταθερή πλαστιμότητα  $\mu = 2$  και 4. Λεπτομέρειες τής χρονοϊστορίας αποκρίσεως και τού διαγράμματος φορτίου – μετατοπίσεως δίδονται ως παράδειγμα μόνον για το Αίγιο και το Μοναστηράκι.

Γίνεται αμέσως αντιληπτό ότι η υπεροχή τής καταγραφής Μοναστηρακίου έναντι τής τού Αιγίου περιορίζεται στην ελαστική ή σχεδόν ελαστική απόκριση, σε πολύ δε μικρό εύρος περιόδων ( $T < 0.20$  sec). Τα αντιστοιχούντα όμως σε τέτοιες περιόδους κτίρια έχουν παράλληλα και *μεγάλη αντοχή* λόγω τοιχοπληρώσεων. Στην ανελαστική απόκριση και η μικρή αυτή υπεροχή εξανεμίζεται.

Ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον έχει η σύγκριση τών φασμάτων τής πλαστιμότητας την οποία επιβάλλουν οι ως άνω διεγέρσεις σε ελαστικοπλαστικούς ταλαντωτές με “ενεργόν” συντελεστή διατμητικής αντίστασης

$$\varepsilon' = F_{\max} / mg$$

ανάλογον τού σεισμικού συντελεστή  $\varepsilon$  στην αντίστοιχη περιοχή. Μια ρεαλιστική προσέγγιση είναι η:

$$\varepsilon' \approx 2.50 \varepsilon$$

η οποία για μὲν την Αθήνα δίνει  $\varepsilon' = 0.10$ , για δε τις άλλες τρεις πόλεις (Αίγιο, Πύργο, Καλαμάτα)  $\varepsilon' = 0.20$ , έχει ληφθεί υπόψιν ότι συνήθως ο σεισμικός συντελεστής στις πόλεις αυτές ήταν 0.08 (και όχι ο ελάχιστος δυνατός, 0.06).

Η σύγκριση τών επιβαλλομένων πλαστιμοτήτων γίνεται μέσω τών λόγων  $\mu_{\text{ΑΙΓΙΟΥ}} / \mu_{\text{ΑΘΗΝΑΣ}}$ ,  $\mu_{\text{ΠΥΡΓΟΥ}} / \mu_{\text{ΑΘΗΝΑΣ}}$ , και  $\mu_{\text{ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ}} / \mu_{\text{ΑΘΗΝΑΣ}}$ . Τα φάσματα τών λόγων αυτών για τους τέσσερις ισχυρότερους κραδασμούς που κατεγράφησαν στην Αθήνα απεικονίζονται στο Σχήμα 3.11. Πρώτος στόχος μας ήταν να δείξουμε ότι τα φάσματα αυτά είναι ενδεικτικά τών πραγματικών διαφορών στην έκταση τών βλαβών τών συγκρινομένων περιοχών.

Πράγματι δε, η διέγερση Αιγίου προκαλεί κατά μέσον όρο 2-3 φορές μεγαλύτερη πλαστιμότητα στα δομήματα τού Αιγίου, από ότι για παράδειγμα η διέγερση ΚΕΔΕ στα δομήματα τής Αθήνας. Η παρατηρηθείσα έκταση τών βλαβών στο Αίγιο ήταν όντως τουλάχιστον υπερδιπλάσια από ότι στον Ταύρο. (Σημειώνεται ότι εάν είχε χρησιμοποιηθεί κοινός συντελεστής διατμητικής αντίστασης, ο λόγος  $\mu_{\text{ΑΙΓΙΟΥ}} / \mu_{\text{ΚΕΔΕ}}$  θα ήταν ακόμη μεγαλύτερος, 4–6.)

Παρόμοια είναι η σύγκριση τών άλλων δύο επιταχυνσιογραφημάτων τής Αθήνας (Μοναστηρακίου και Συντάγματος). Αντιθέτως, τα Σεπόλια δίδουν πιο δυσμενή απόκριση, έτσι ώστε ο

λόγος  $\mu_{\text{ΑΙΓΙΟΥ}} / \mu_{\text{SPLB}}$  να μην είναι συστηματικά μεγαλύτερος τής μονάδας, να πλησιάζει δε στο 2 για περιόδους (κατά προσέγγισιν):  $0.20 \text{ sec} \leq T \leq 0.35 \text{ sec}$ , και  $0.60 \text{ sec} \leq T \leq 0.80 \text{ sec}$ . Η μικρή μόνον αυτή υπεροχή τής καταγραφής Αιγίου είναι επίσης ποιοτικώς σύμφωνη με τις μεγαλύτερες ζημιές το 1995 στο Αίγιο από ότι το 1999 στα Σεπόλια.

Η σύγκριση με τον Πύργο δείχνει ότι οι τιμές τού λόγου  $\mu_{\text{ΠΥΡΓΟΥ}} / \mu_{\text{ΑΘΗΝΑΣ}}$  ελάχιστα διαφέρουν από την μονάδα, ή καλύτερα από τη ζώνη (0.75 - 1.50) την οποία θεωρούμε ως ζώνη εύλογης διασποράς περί την μονάδα. Μόνον στην στενή περιοχή  $0.25 < T < 0.40$  ο ανωτέρω λόγος πλησιάζει το 2. Με τα Σεπόλια η κατάσταση αντιστρέφεται: ο λόγος είναι παντού μικρότερος τής μονάδας, ενίοτε δε φθάνει και το  $\frac{1}{2}$ . Το προφανές συμπέρασμα, ότι δηλαδή οι βλάβες στον Πύργο ήσαν μεγαλύτερες από το κέντρο τής Αθήνας αλλά μικρότερες από τα Σεπόλια είναι και πάλι ποιοτικώς σύμφωνο με την πραγματικότητα.

Η σύγκριση με την Καλαμάτα δείχνει συμπεριφορά ενδιάμεση μεταξύ Αιγίου και Πύργου.

## **β. Ολίσθηση Στερεού Σώματος**

Η μέγιστη ολίσθηση ενός ακάμπτου σώματος εδραζομένου με συντελεστή τριβής  $\mu_s = 0.50$  στο δονούμενο έδαφος δίδεται γραφικά στο Σχήμα 3.12, συναρτήσει τού λόγου  $A_c / A_{\text{max}}$  (ή απλώς  $\mu_s/\alpha$ ). Είναι εμφανής η πολύ μικρή "ικανότητα" τής "εκ πρώτης όψεως" ισχυρής (ως προς την κορυφαία τιμή τής επιτάχυνσης δηλαδή) καταγραφής MNSA να προκαλέσει σημαντική ολίσθηση (δηλαδή ανελαστική παραμόρφωση). Η  $\Delta_{\text{max}}$  της είναι σχεδόν μία τάξη μεγέθους μικρότερη από την αντίστοιχη τού Αιγίου και 2.5 φορές μικρότερη από αυτήν τού Πύργου.

Αντίθετα, τα εμπειρικά διαγράμματα της βιβλιογραφίας κανονικοποιημένη για την ολίσθηση,  $\Delta_{\text{max}} A/V^2$  (όπου  $A$  = η κορυφαία

επιτάχυνση και  $V = \eta$  κορυφαία ταχύτητα τού διεγείροντος κραδασμού) δείχνουν ουσιαστικώς ταύτιση τών τιμών τών διαφόρων καταγραφών. Τούτο φανερώνει ότι η  $\Delta_{\max}$  είναι ανάλογη τής “τάχυνσης”  $V^2/A$ , η οποία για τις καταγραφές στο Μοναστηράκι, Πύργο, και Αίγιο λαμβάνει αντιστοίχως τις τιμές: 5, 10, και 50 περίπου.

#### γ. Ανατροπή Στερεού Σώματος

Εξίσου ενδιαφέρουσα είναι η σύγκριση τού Σχήματος 3.13, το οποίο αναφέρεται στην επιτάχυνση ανατροπής ορθογωνίου παραλληλε-πιπέδου (τύμβου) ύψους  $h$ , εγκαρσίου πλάτους  $b$ , και διαμήκους πλάτους  $L$ . Στο εδώ παράδειγμα ο λόγος  $h/b$  ισούται με 6.3. Οι άξονες τού σχήματος δηλώνουν την κορυφαία τιμή τής επιτάχυνσης,  $A$ , και την αντίστοιχη δεσπόζουσα περίοδο,  $T_{\text{δεσπόζουσα}}$ , της διέγερσης.

Τα αποτελέσματα τών αριθμητικών αναλύσεων (με το πρόγραμμα ABAQUS), βαθμονομημένων με αντίστοιχα προσφάτως δημοσιευμένα αποτελέσματα τής βιβλιογραφίας (Μακρής 2000), συνοψίζονται στο διάγραμμα τού Σχήματος 3.13. Μία σχεδόν μοναδική καμπύλη αποτελεί το όριο μεταξύ ασφαλούς και επισφαλούς (έναντι ανατροπής) περιοχής. Η καμπύλη αυτή έχει επαληθευθεί τόσο για απλούς ημιτονοειδείς παλμούς όσο και για πραγματικά επιταχυνσιογραφήματα. Η διασπορά περί την καμπύλη αυτή έχει προκύψει ανέλπιστα μικρή<sup>\*</sup> και εν πάσει περιπτώσει δεν επηρεάζει την εδώ επιχειρούμενη σύγκριση.

Τέσσερα συμπεράσματα προκύπτουν από το σχήμα αυτό:

- (i) Καμία από τις τέσσερις καταγραφές τής Αθήνας δεν ανατρέπει τον μαρμάρινο αυτόν τύμβο, παρά το γεγονός ότι η απαιτούμενη στατικώς–επιβαλλόμενη επιτάχυνση ανατροπής ισούται μόλις με  $A_c = (b/h) g = (1 / 6.3) g \approx$

0.16 g --- τιμή 2 και 3 φορές μικρότερη από τις κορυφαίες τιμές των καταγραφών. Αντίθετα, το επιταχυνσιογράφημα Αιγίου θα το ανέτρεπε ακόμη και εάν οι τεταγμένες του,  $a(t)$ , είχαν πολλαπλασιασθεί επί  $\frac{1}{2}$  !

- (ii) Είναι προφανές ότι η τιμή της δεσπόζουσας περιόδου είναι ίσως σημαντικότερη από την τιμή της κορυφαίας επιτάχυνσης για την ανατροπή. Με δεσπόζουσες περιόδους μικρότερες του 0.30 sec (δηλαδή δεσπόζουσα συχνότητα άνω των 3 Hz) η ανατροπή ακόμη και ενός τόσο υψίκορμου στερεού σώματος απαιτεί επιταχύνσεις της τάξεως του 1 g. Αντίθετα, με περίοδο 0.50 sec η κρίσιμη επιτάχυνση μειώνεται στο 0.30 g (το πολύ). Παραπέμπουμε σε πρόσφατο άρθρο των Anoushehpoor et al (1999) για ποιοτική επαλήθευση του υπό-συζήτησιν διαγράμματος.
- (iii) Η καταγραφή των Σεπολίων είναι η μόνη που παρά λίγο θα οδηγούσε σε ανατροπή, γεγονός οφειλόμενο στην μεγαλύτερη δεσπόζουσα περίοδό της. Σημειώνουμε ότι η θέση της καταγραφής αυτής είναι η πλησιέστερη εκ των τεσσάρων στην νοητή προέκταση του ρήγματος.
- (iv) Δεδομένου ότι ο εν-λόγω τύμβος όντως ανατράπηκε στο νεκροταφείο των Ανω Λιοσίων και ότι ανάλογοι τύμβοι ανατράπηκαν καί στην Φυλή καί (σε μικρότερη έκταση) στο Μενίδι, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είτε η μέγιστη επιτάχυνση, είτε η δεσπόζουσα περίοδος, είτε καί οι δύο, ήσαν μεγαλύτερες από ότι στις καταγραφές MNSA και ΚΕΔΕ.

Το γεγονός ότι η καταγραφή “Σεπολίων” είναι ήδη πλουσιότερη σε υψηλές περιόδους, και με ίδια περίπου κορυφαία επιτάχυνση όπως τα ΚΕΔΕ, MNSA, SGMA υποδεικνύει την αύξηση της περιόδου ως της πλέον καθοριστικής πιθανής

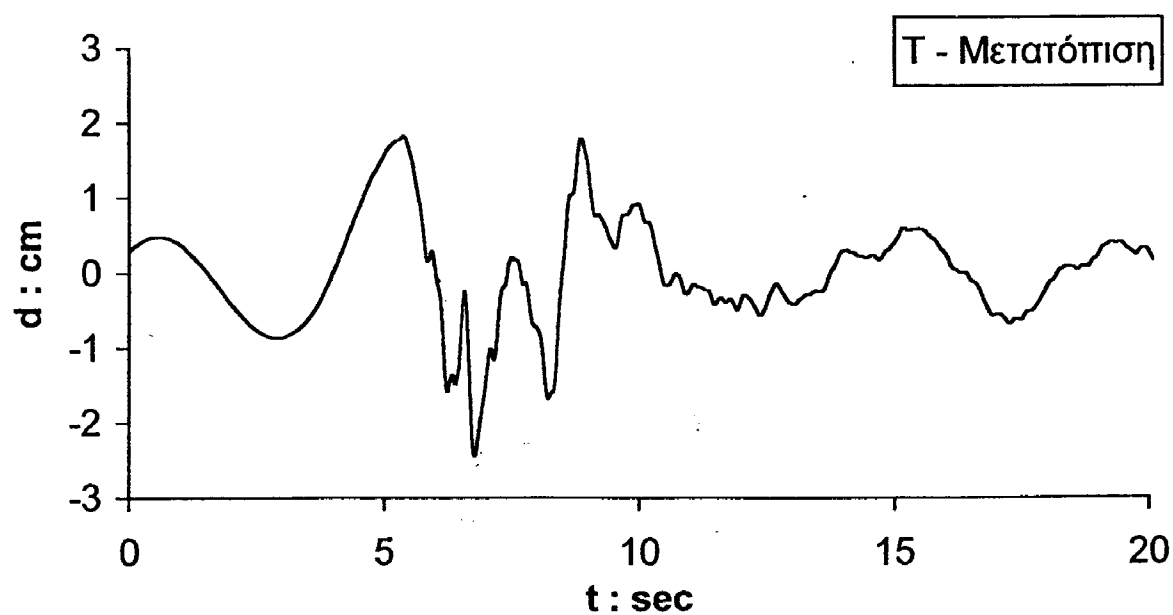
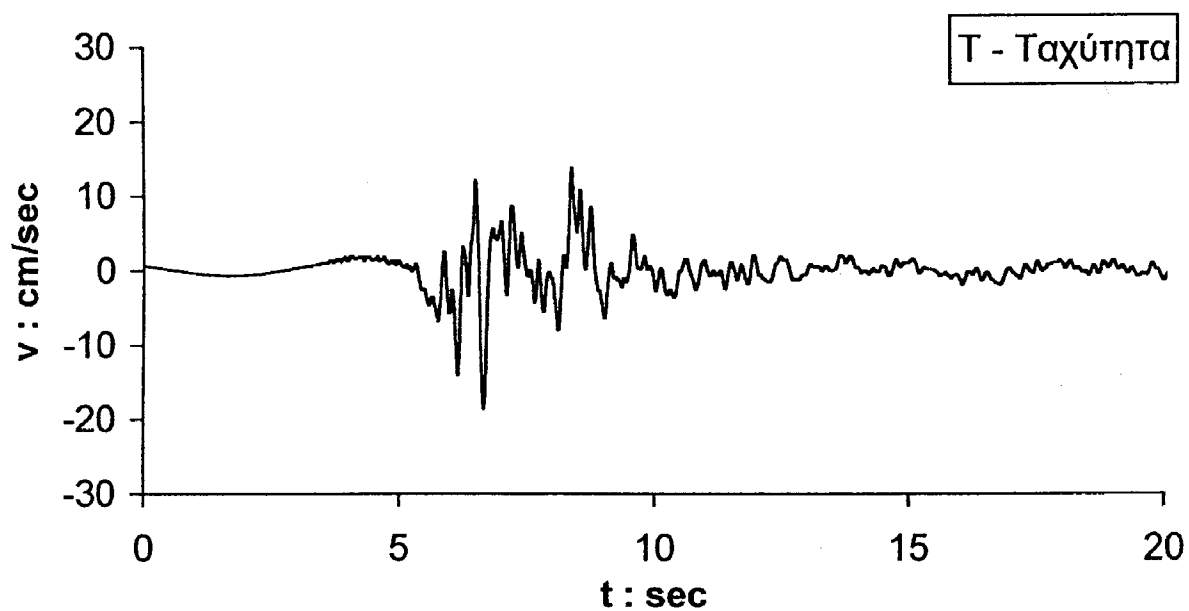
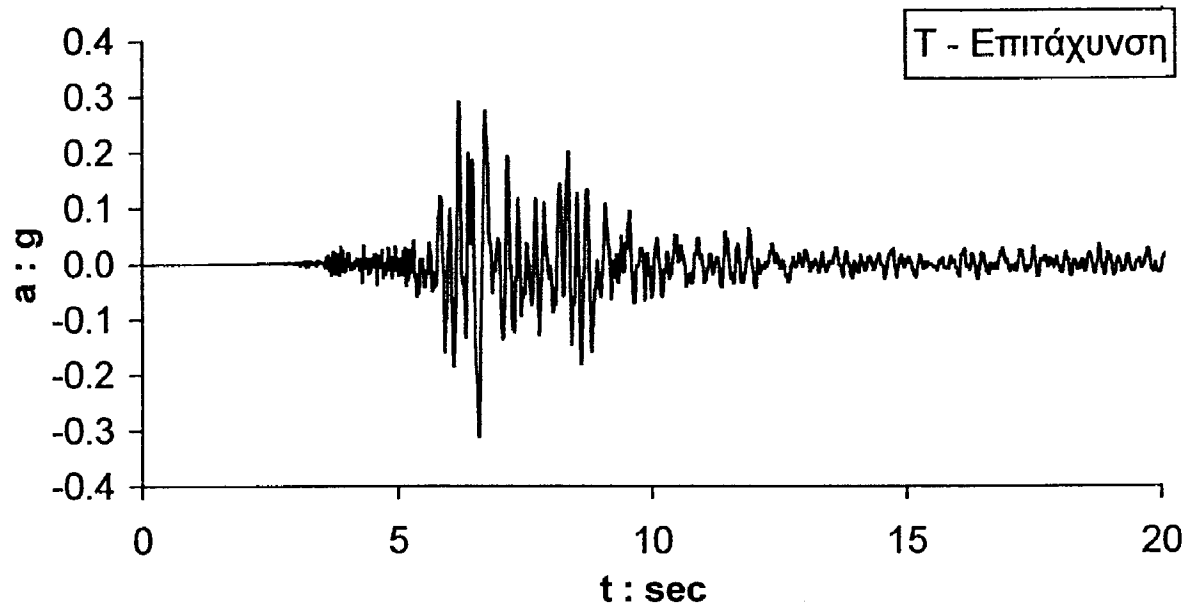
μεταβολής. Τούτο συνάδει και με την αναμενόμενη επίδραση  
τής κατευθυντικότητας της σεισμικής διαρρήξεως.

Περισσότερες λεπτομέρειες για την ανάλυση της ανατροπής του  
τύμβου δίδονται στο Κεφάλαιο Δ του Μέρους Β.

**ΣΧΗΜΑΤΑ**  
**ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3**

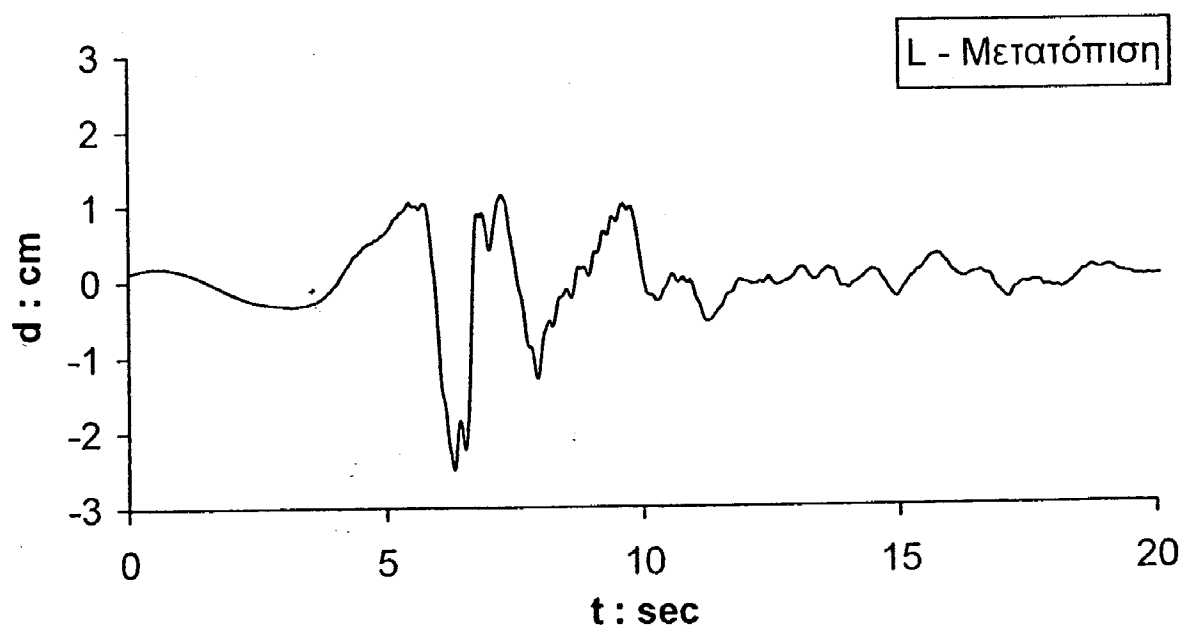
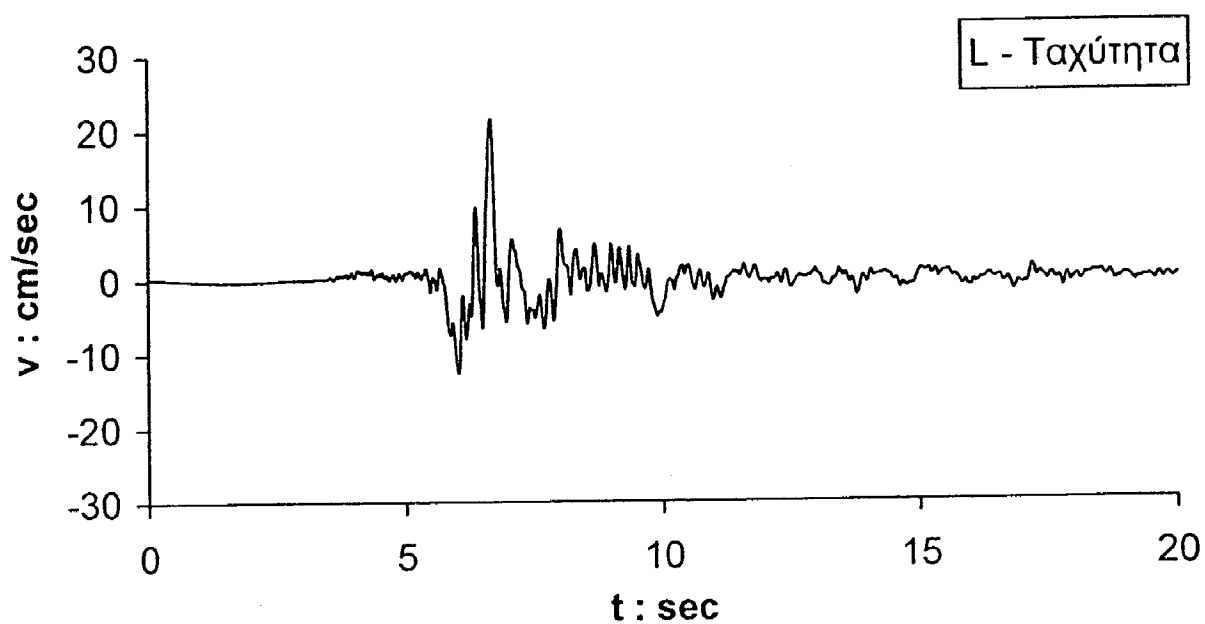
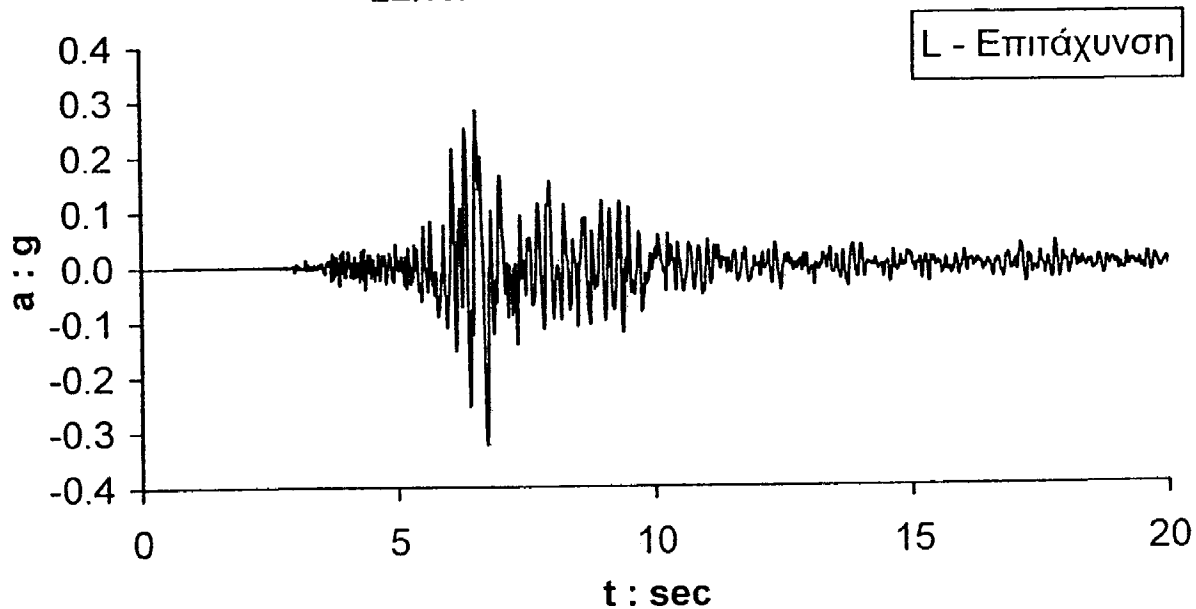


ΣΕΠΟΛΙΑ - SPLB1



Σχήμα 3.1

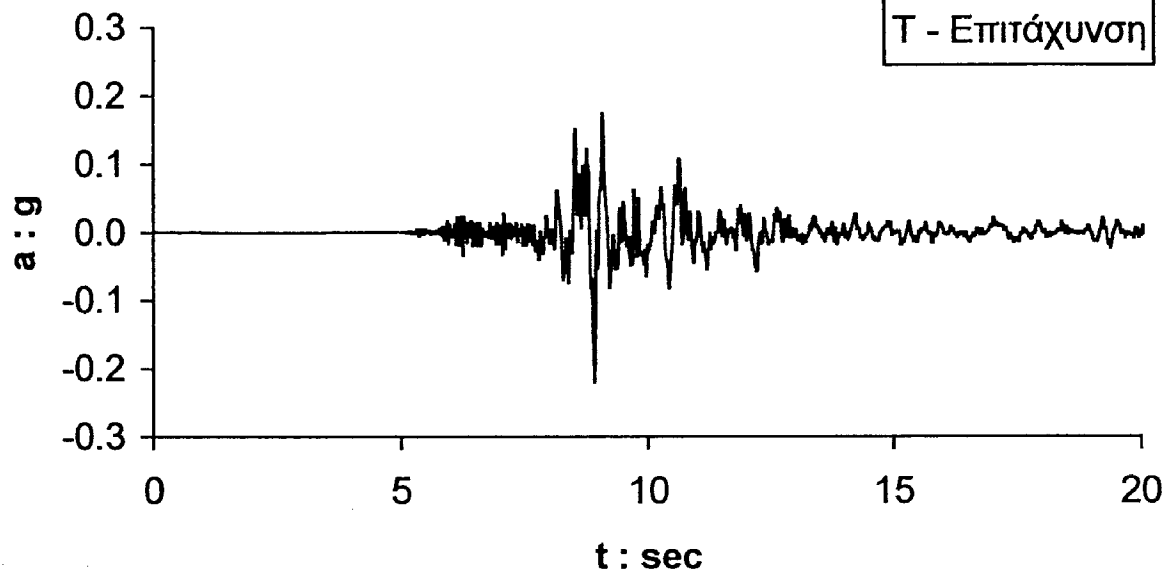
ΣΕΠΟΛΙΑ - SPLB1



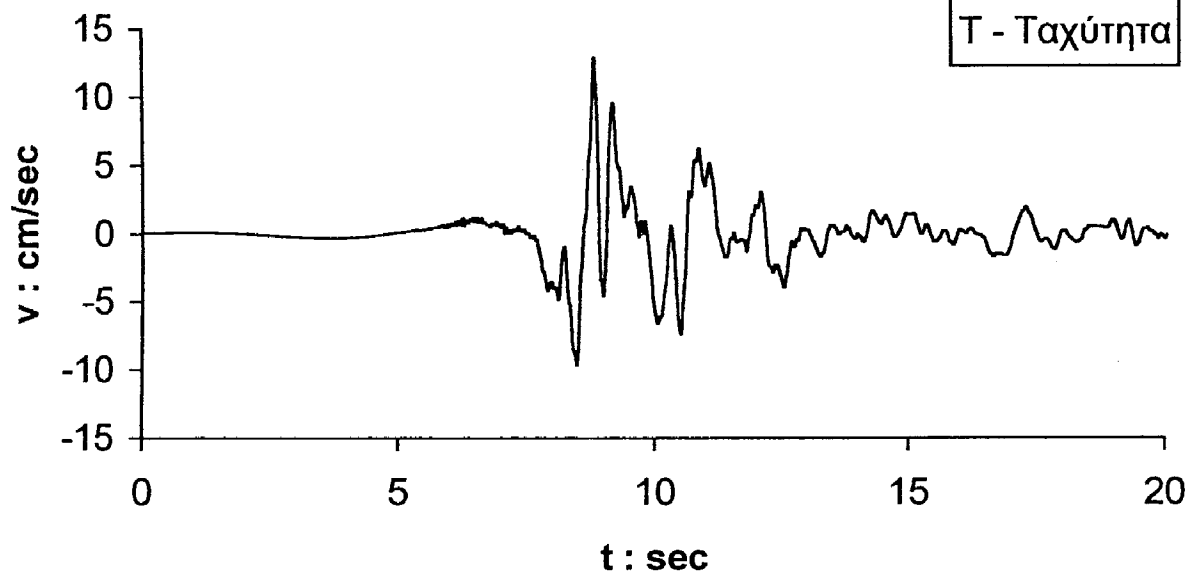
Σχήμα 3.1 (συνέχεια)

ΣΕΠΟΛΙΑ - SPLA1

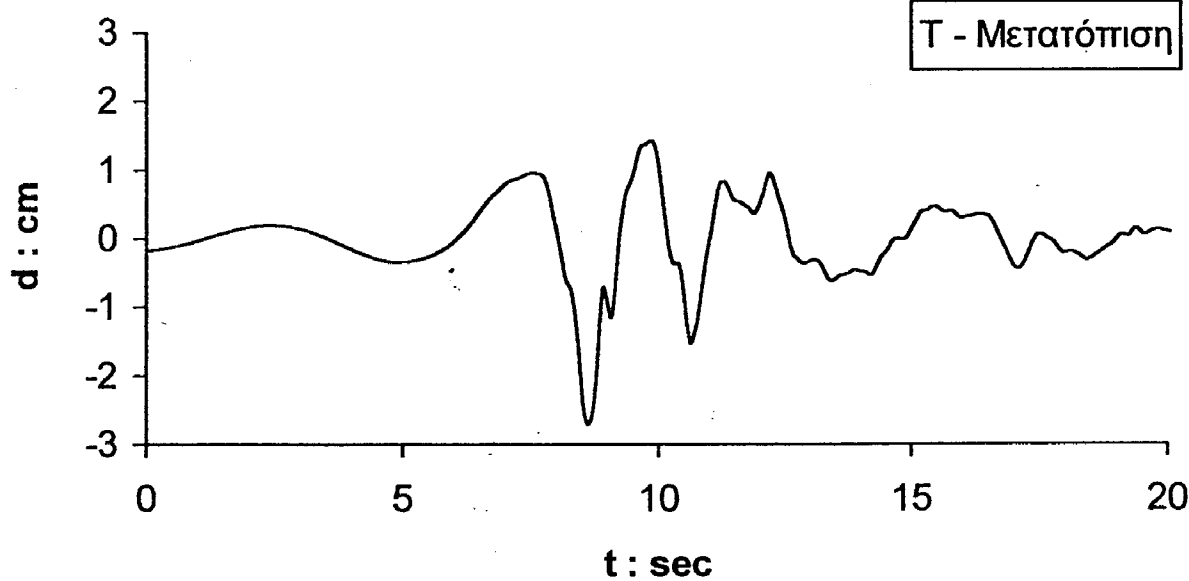
Τ - Επιτάχυνση



Τ - Ταχύτητα



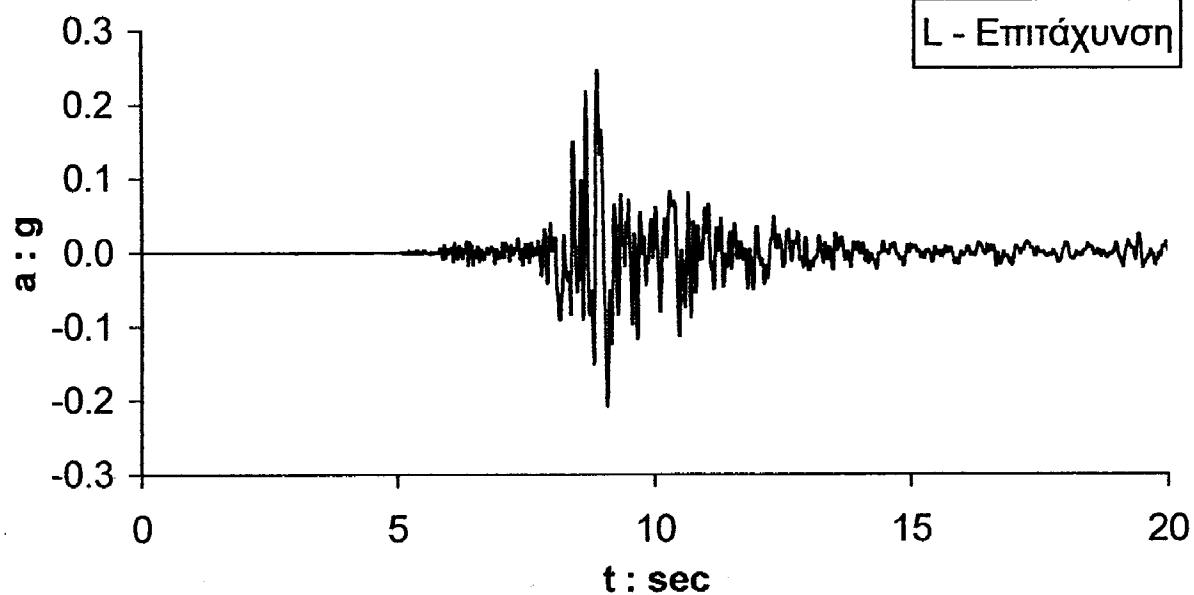
Τ - Μετατόπιση



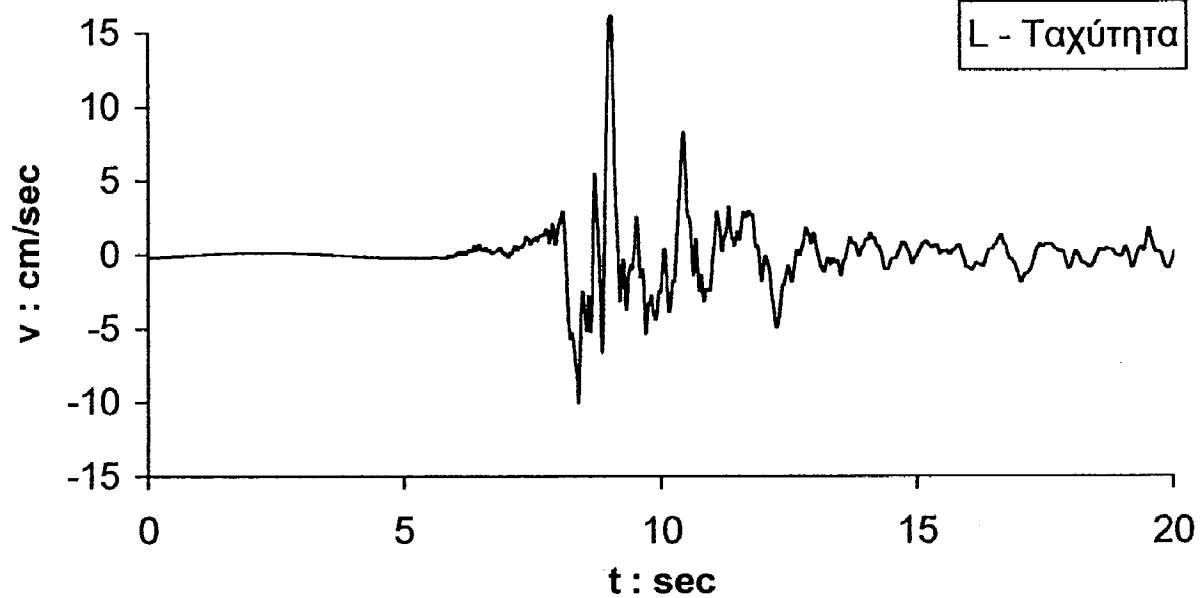
Σχήμα 3.2

ΣΕΠΟΛΙΑ - SPLA1

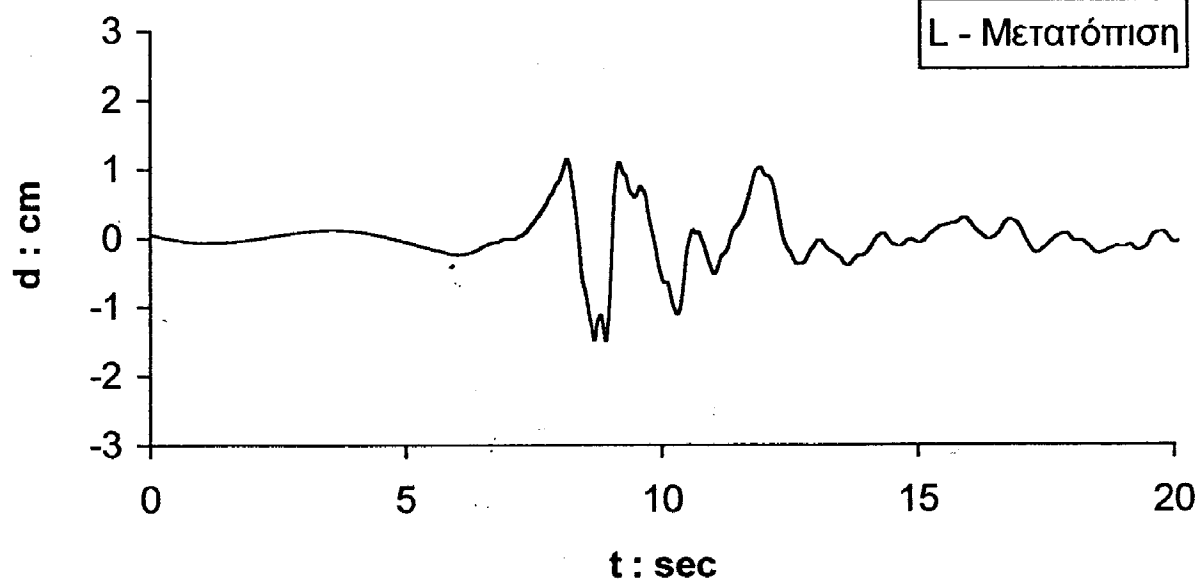
L - Επιτάχυνση



L - Ταχύτητα

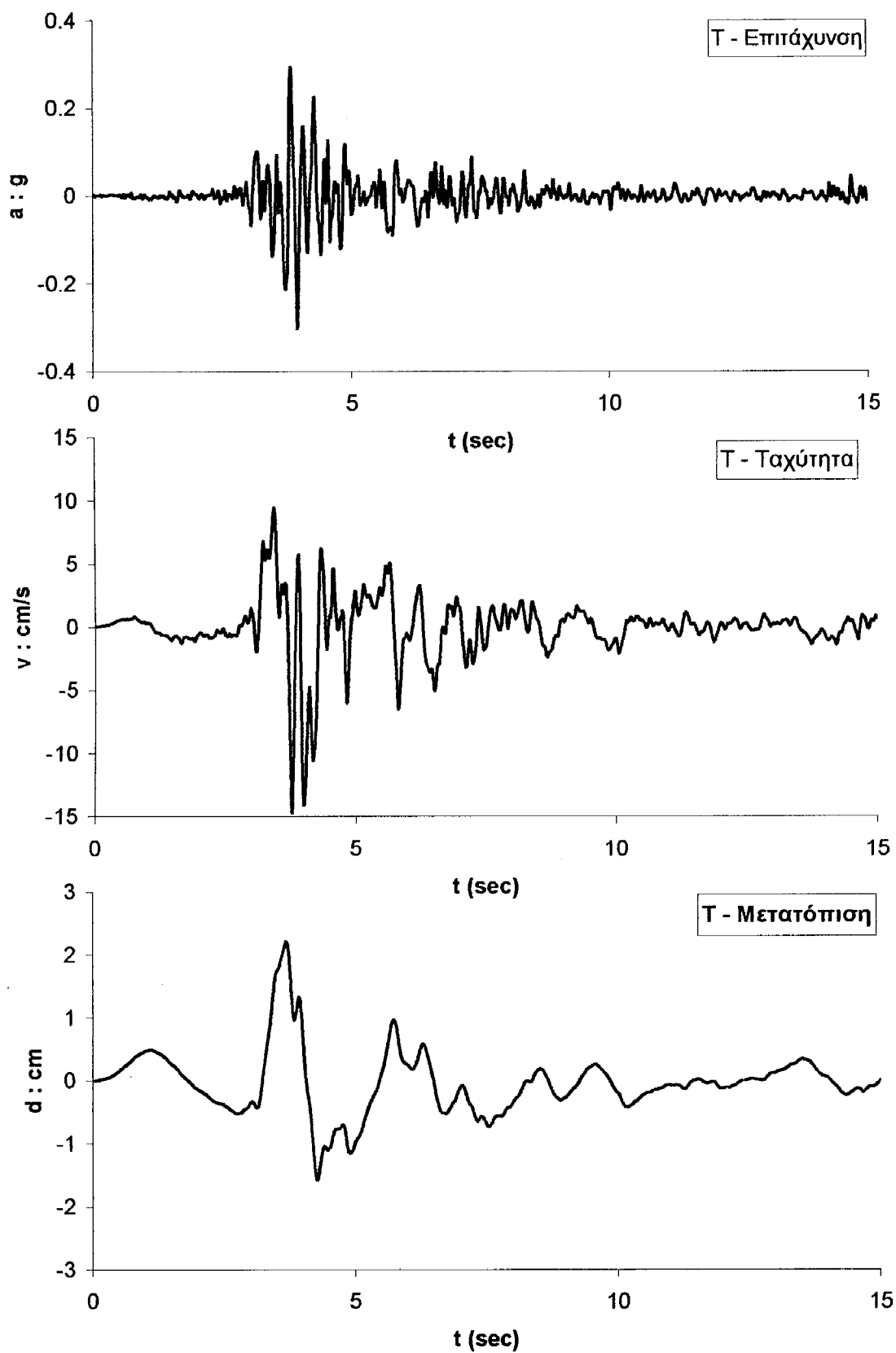


L - Μετατόπιση



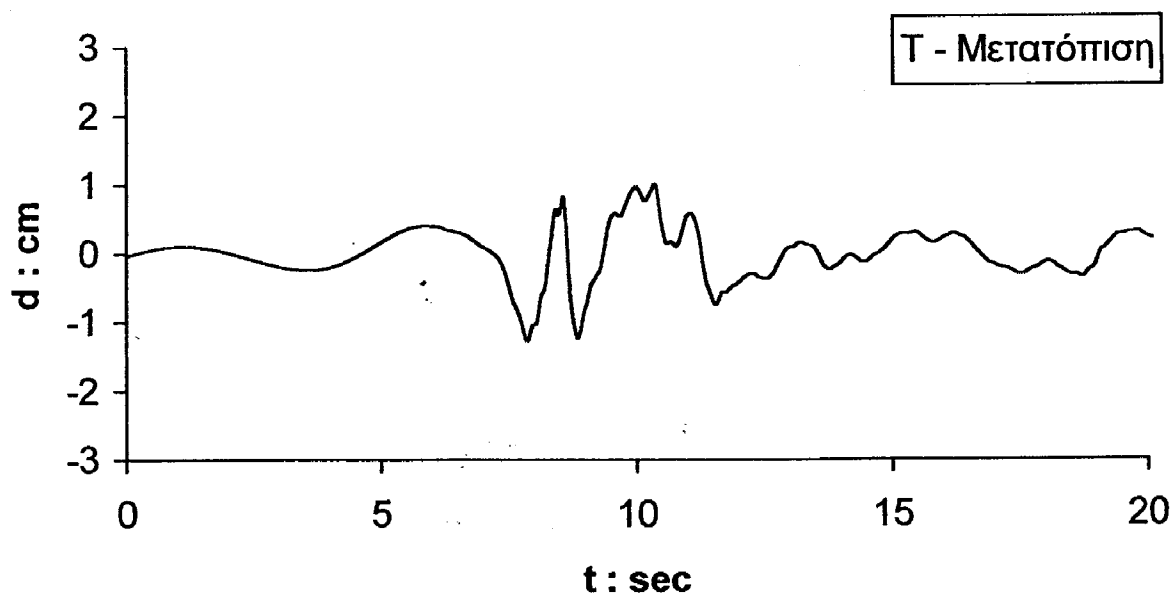
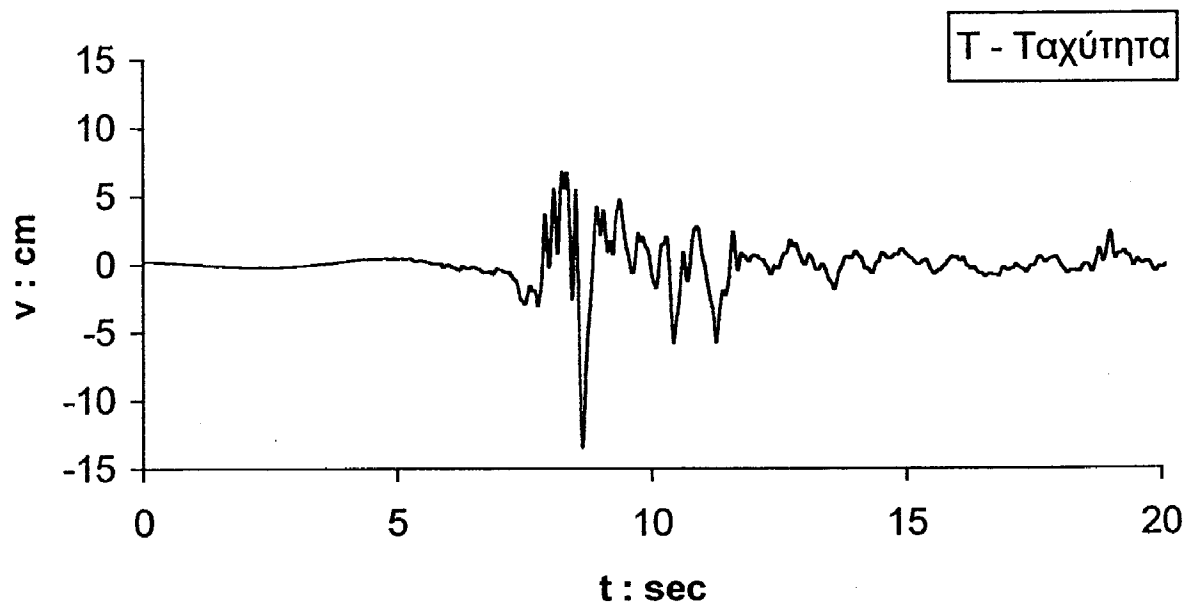
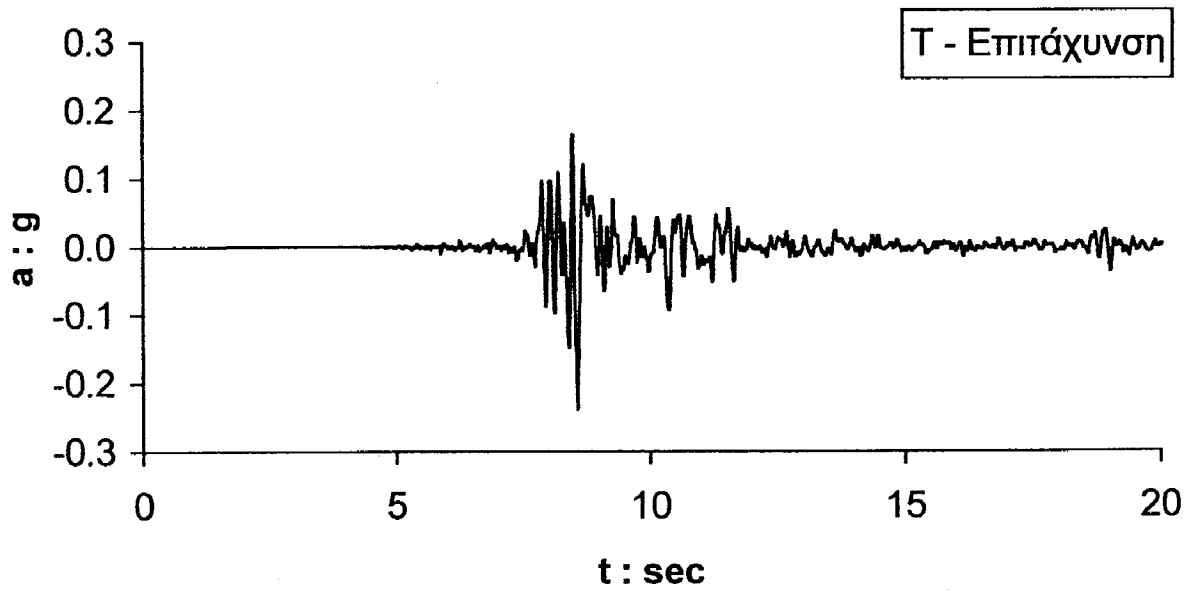
Σχήμα 3.2 (συνέχεια)

### ΚΕΔΕ (N 130°)



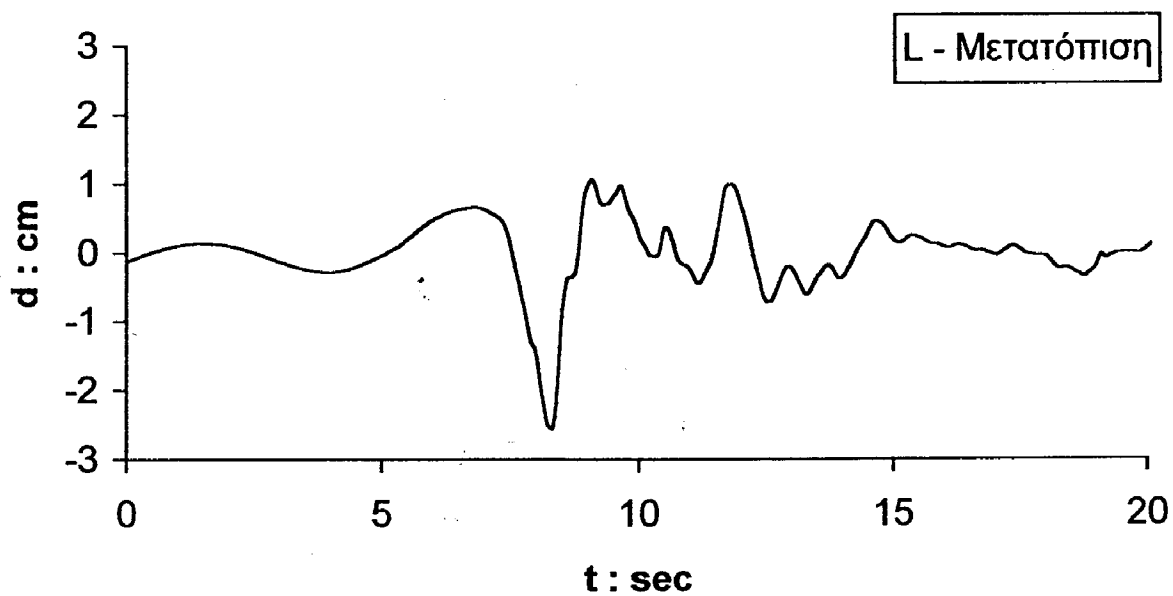
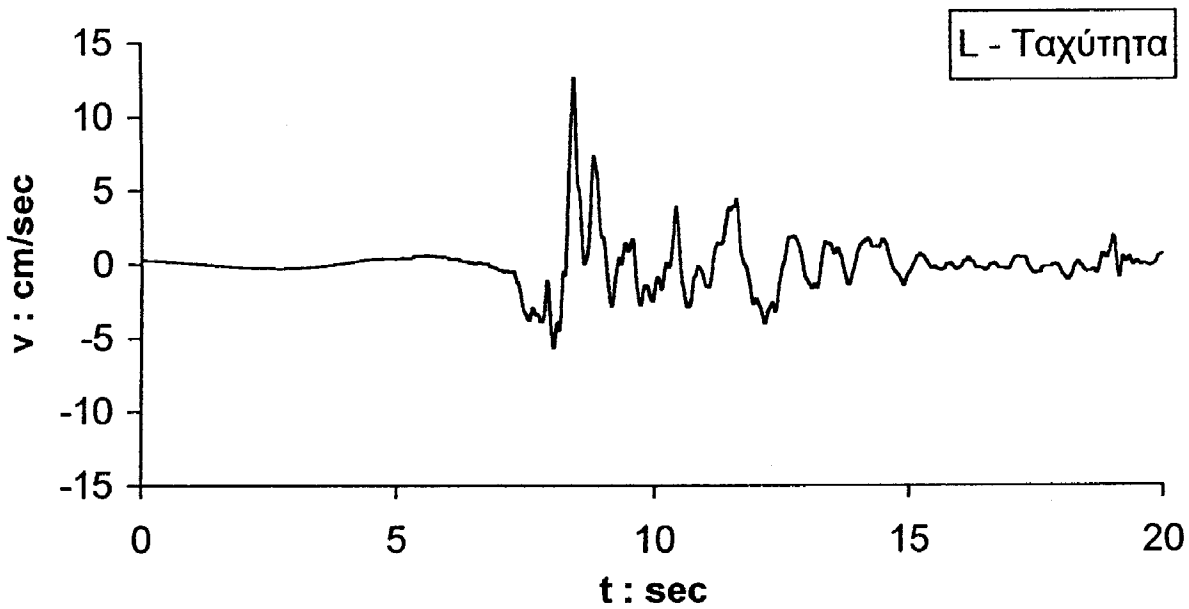
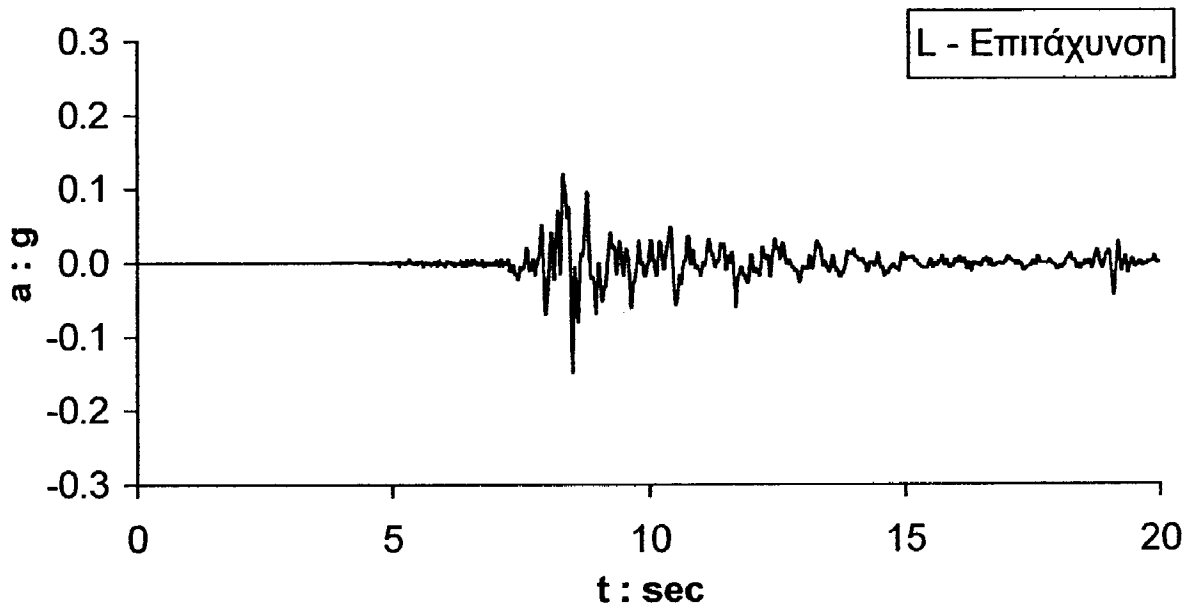
*Σχήμα 3.3*

# ΣΥΝΤΑΓΜΑ - SGMA1



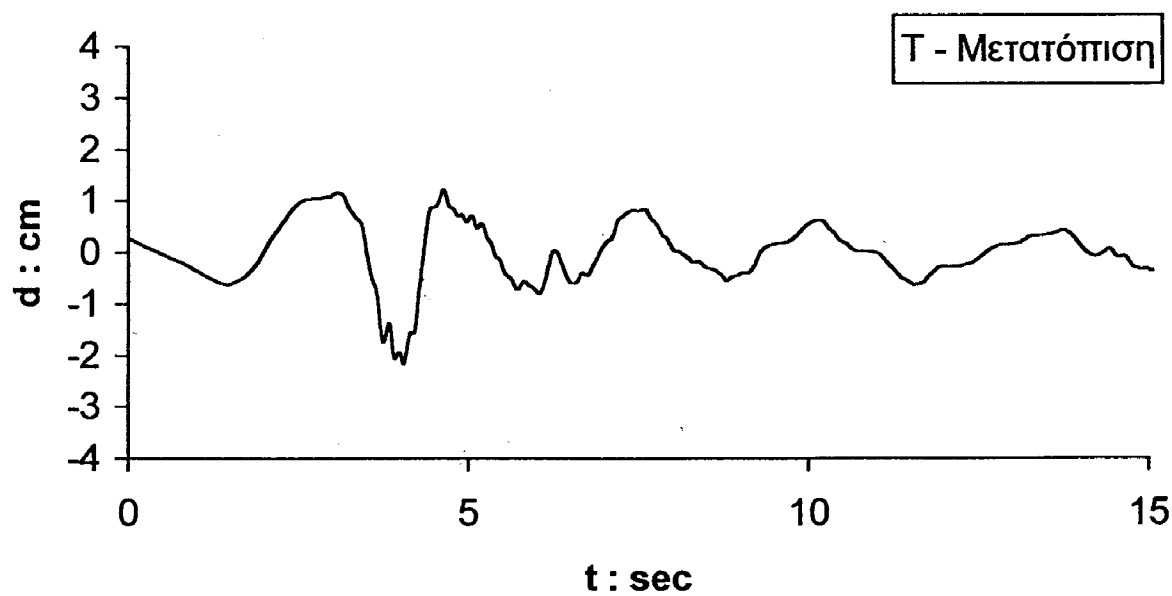
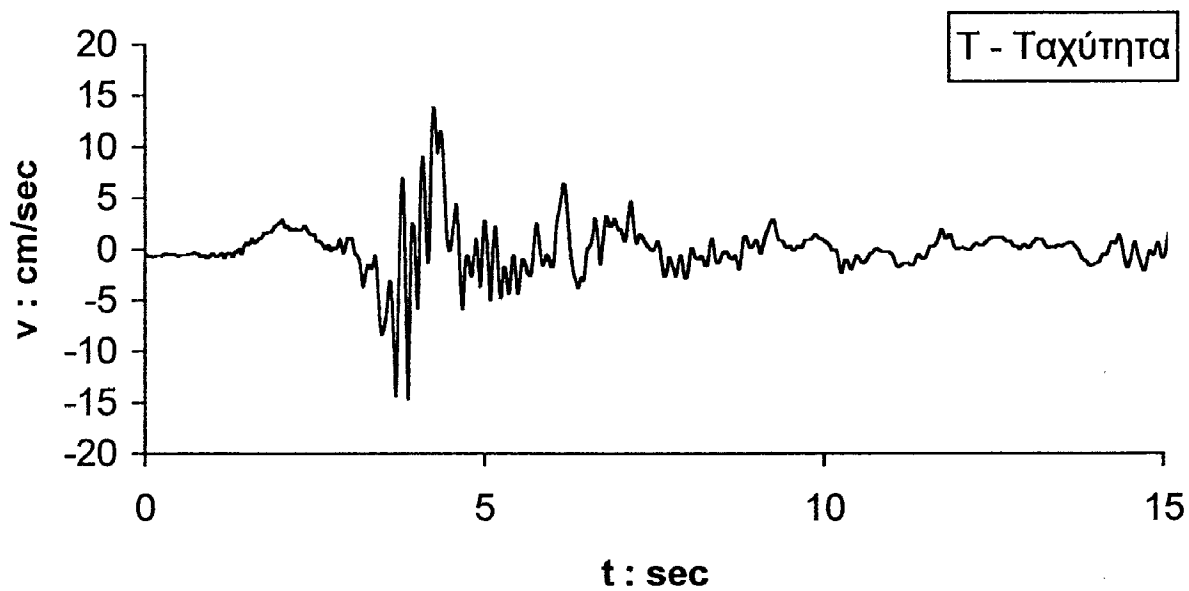
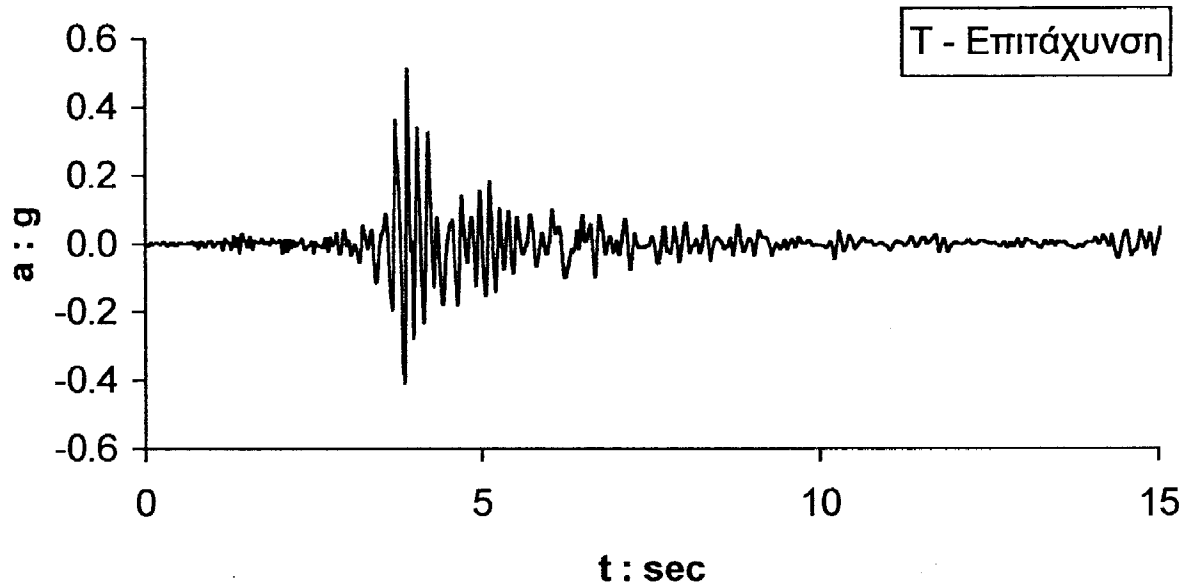
Σχήμα 3.4

# ΣΥΝΤΑΓΜΑ - SGMA1



Σχήμα 3.4 (συνέχεια)

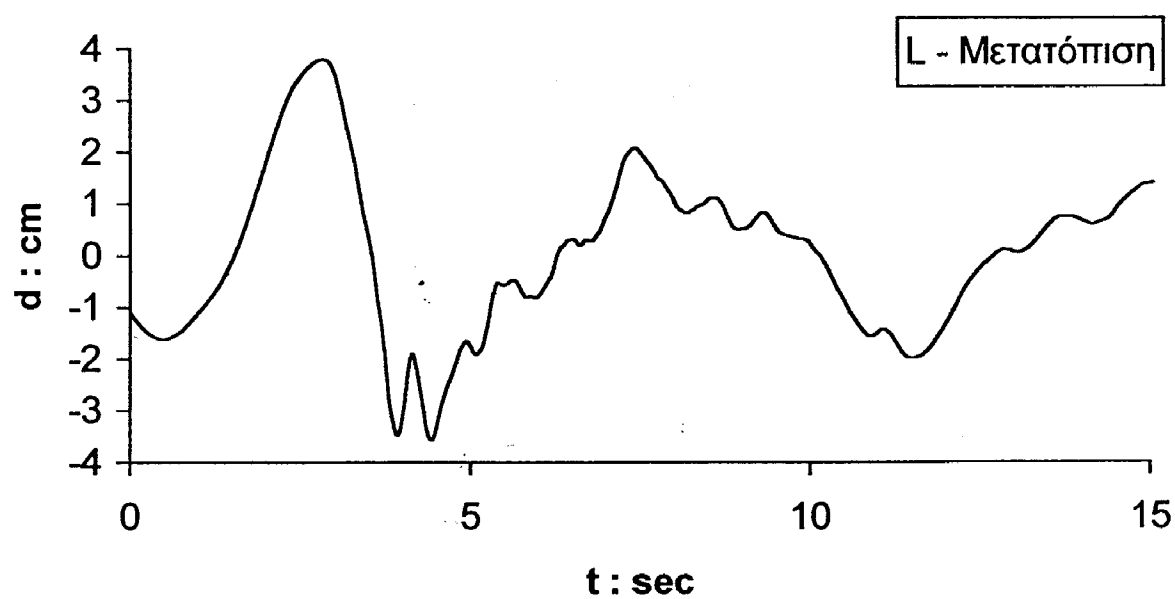
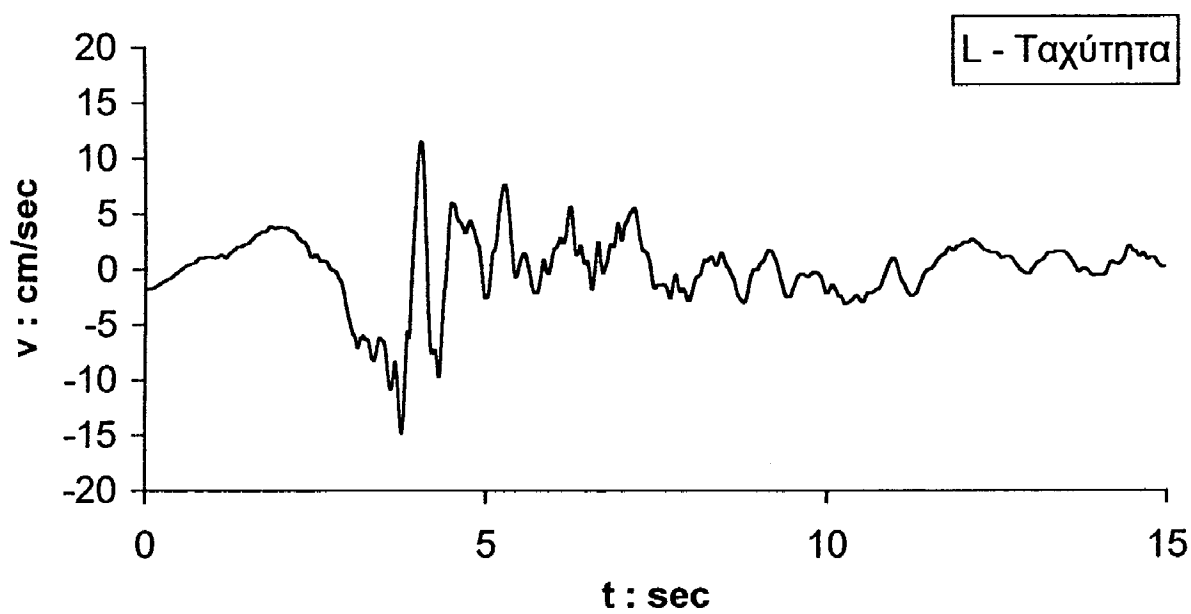
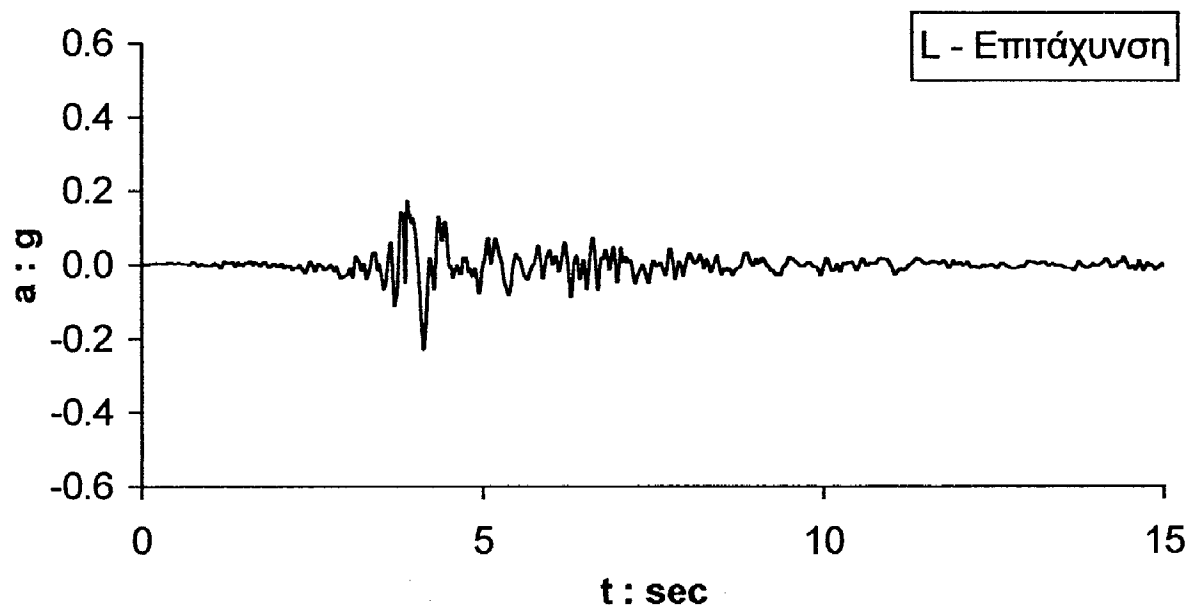
ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ - ΜΝSΑ1



Σχήμα 3.5

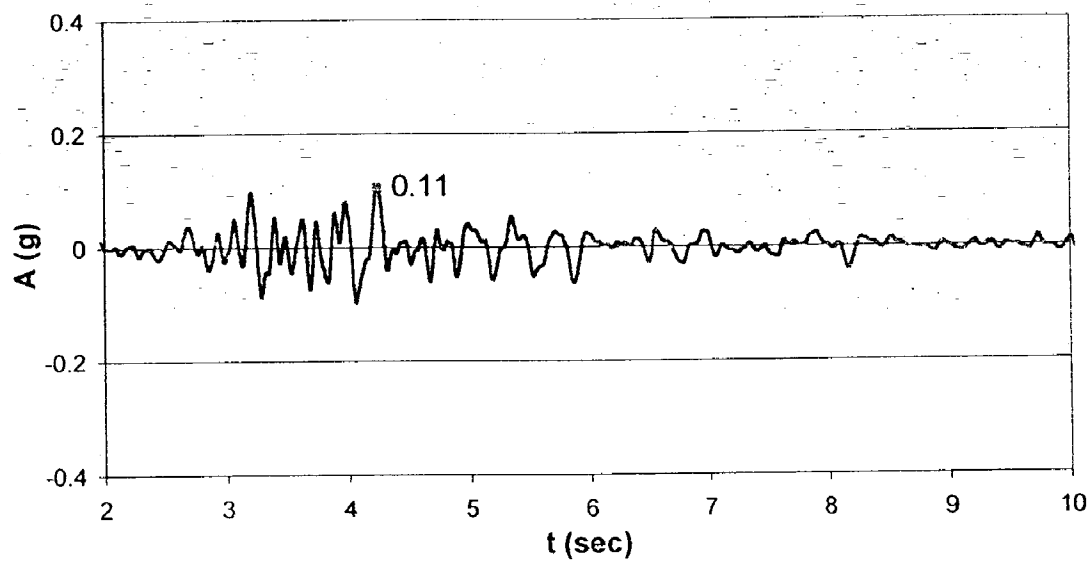


ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ - ΜΝSΑ1

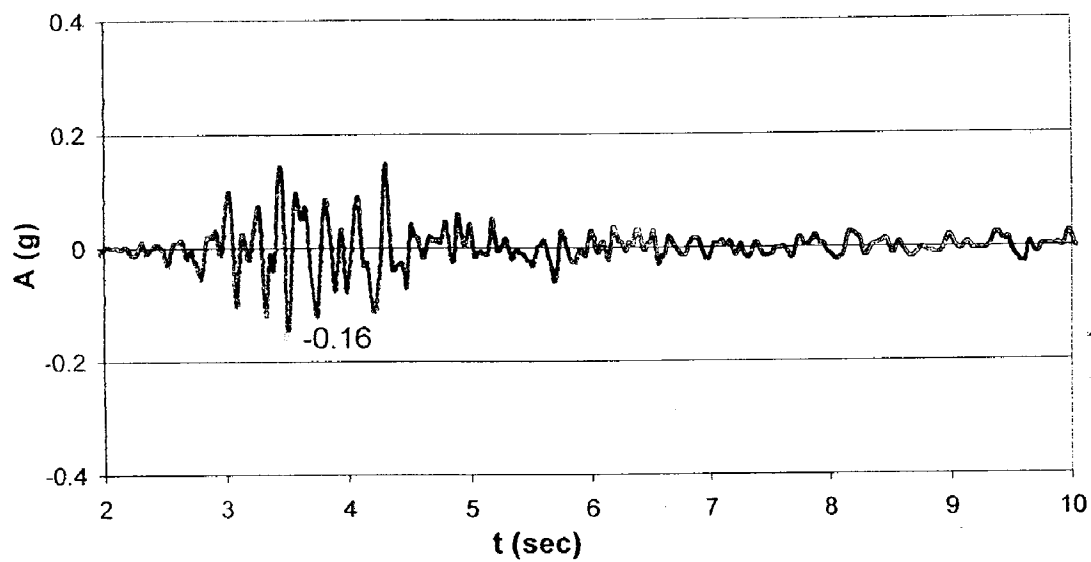


Σχήμα 3.5 (συνέχεια)

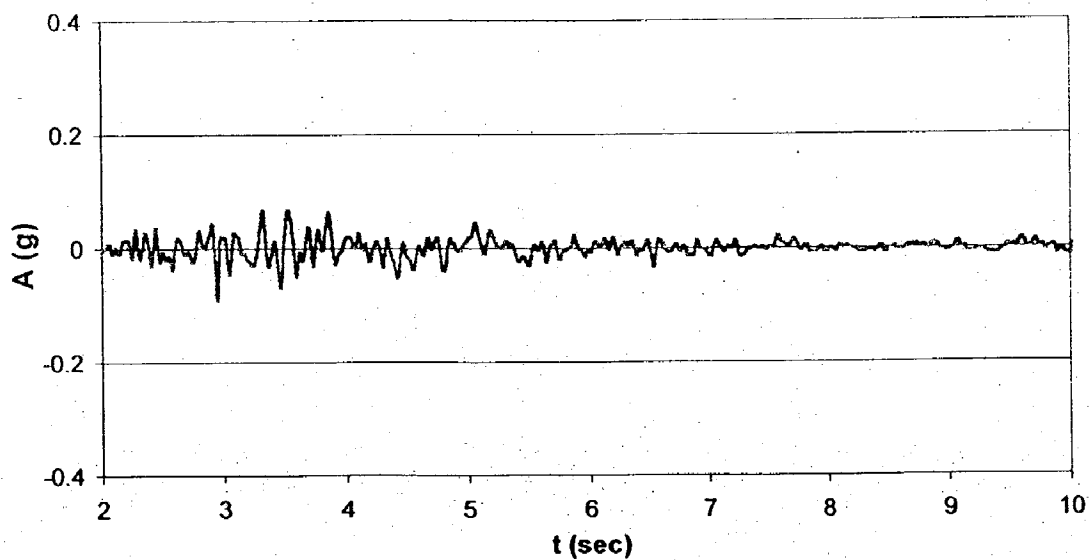
### HALANDRI ( N 240°)

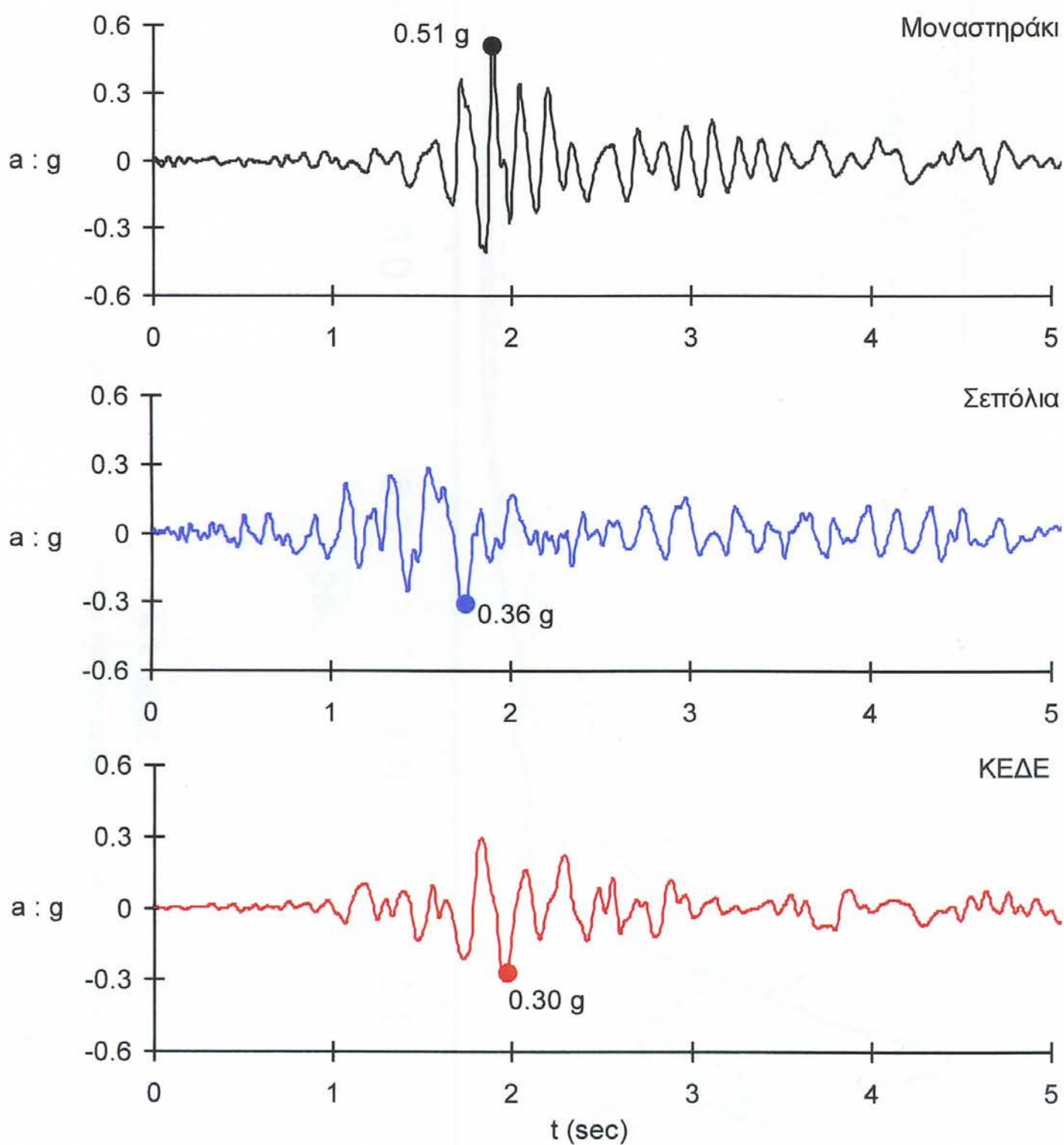


### HALANDRI -- ( N 330°)

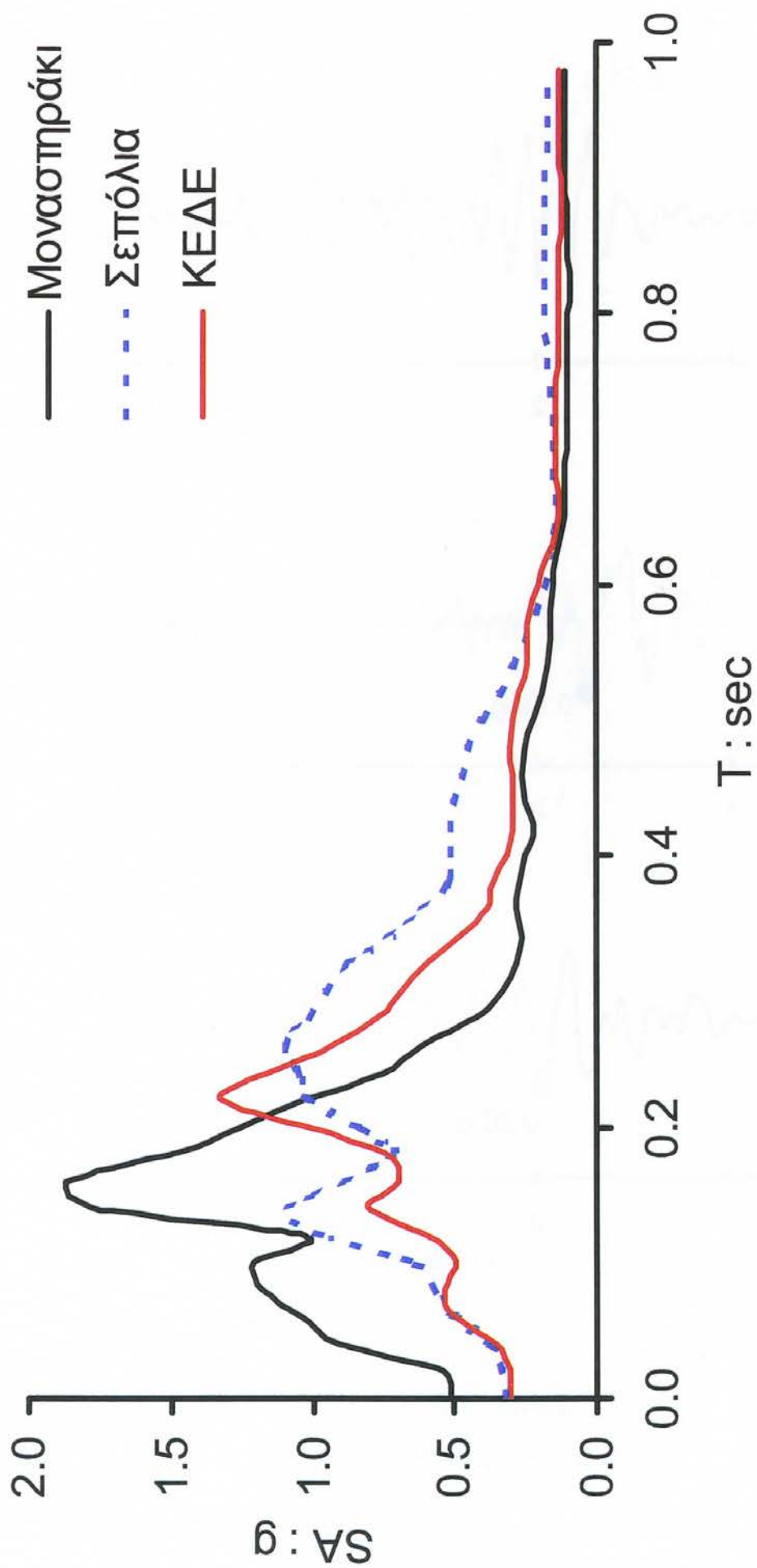


### HALANDRI -- Vertical



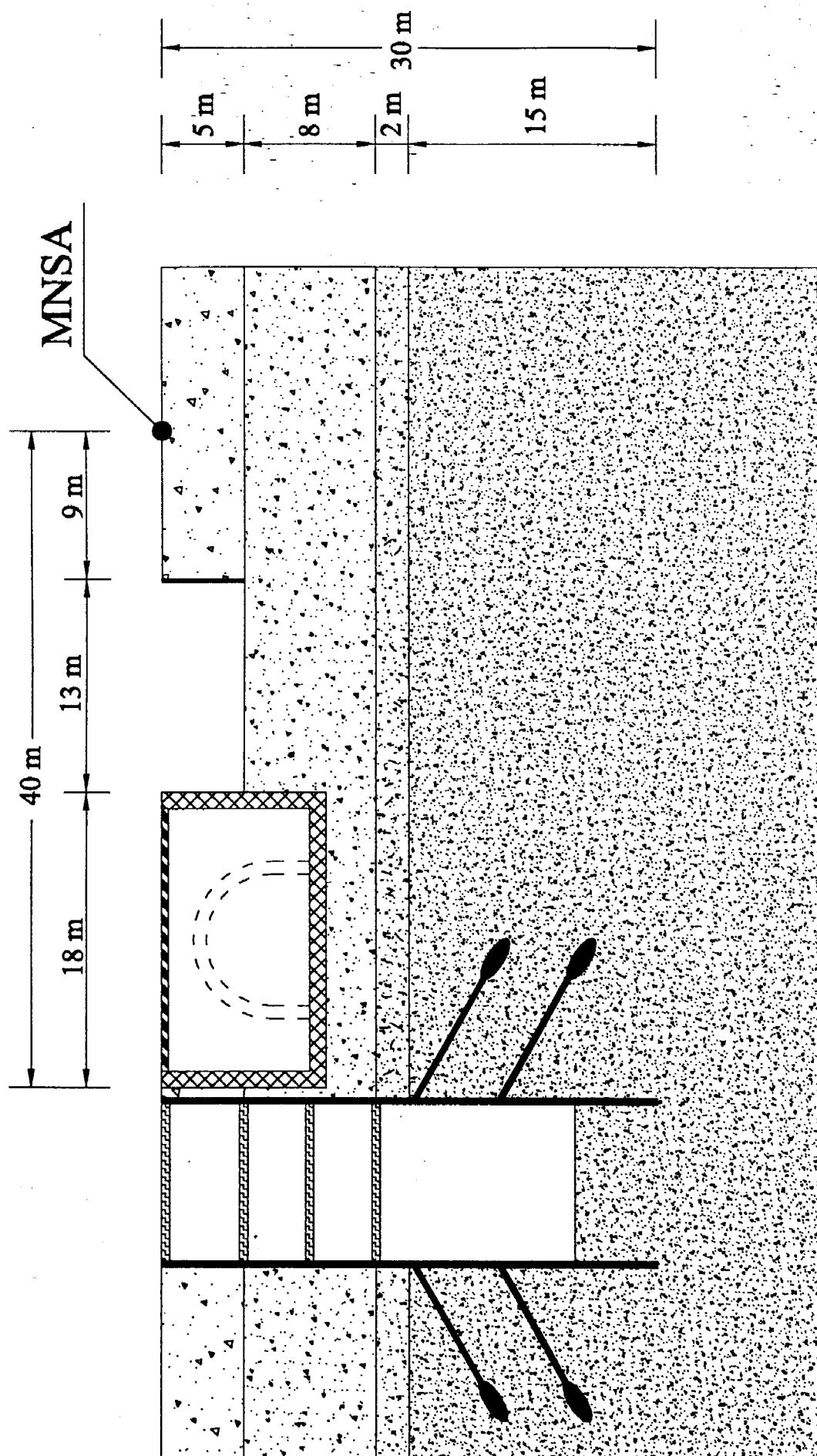


**Σχήμα 3.7**  
*Οι Ισχυρότερες Καταγραφές*



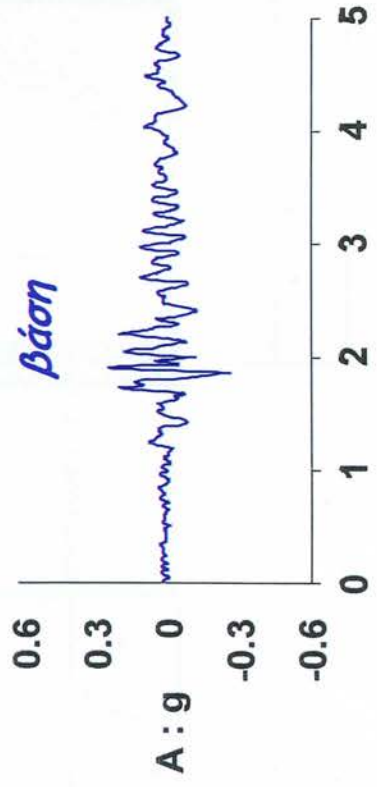
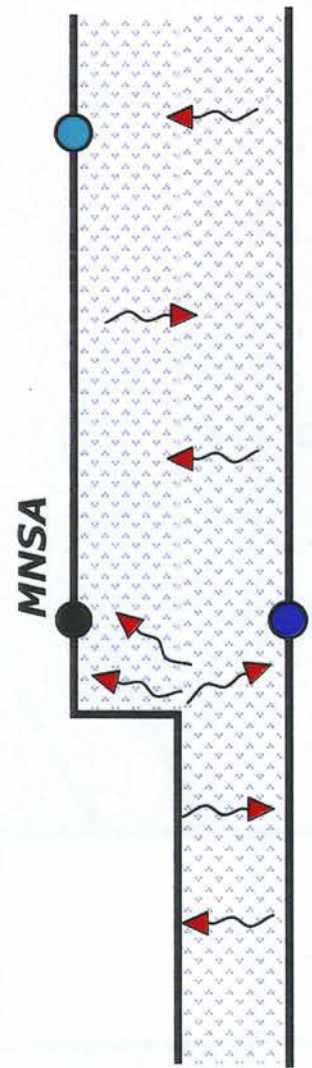
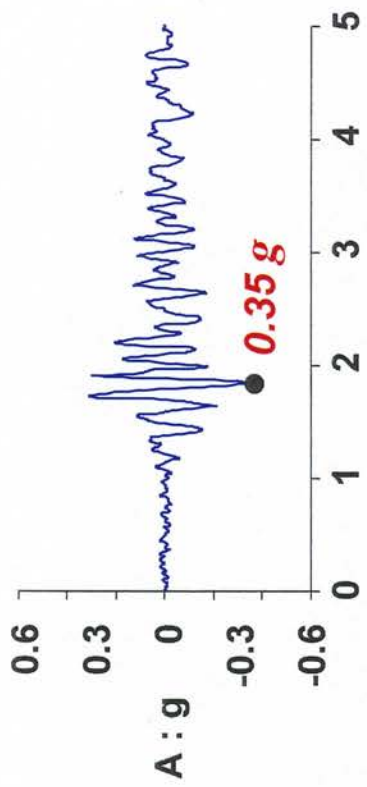
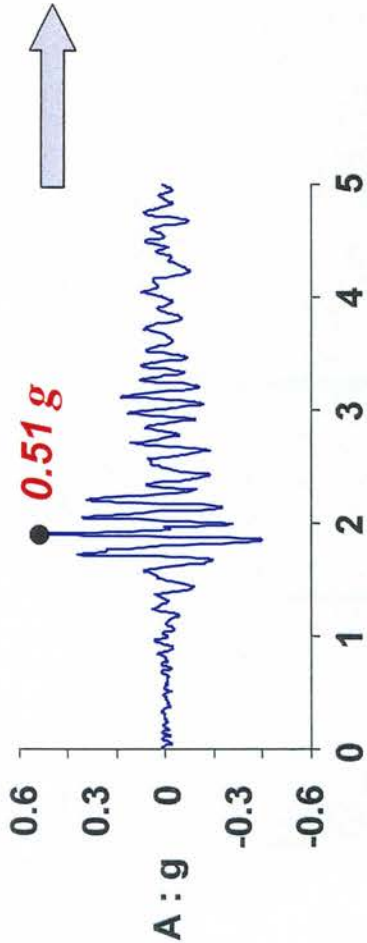
Σχήμα 3.8

Ελαστικά φάσματα αποκρίσεως των ισχυροτέρων καταγραφών



Σχήμα 3.9

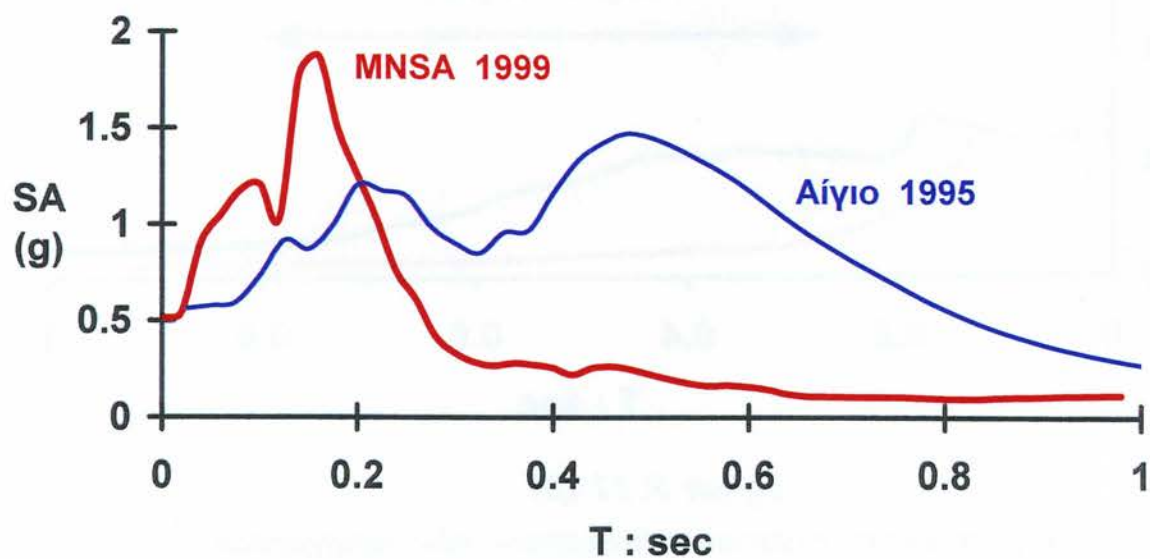
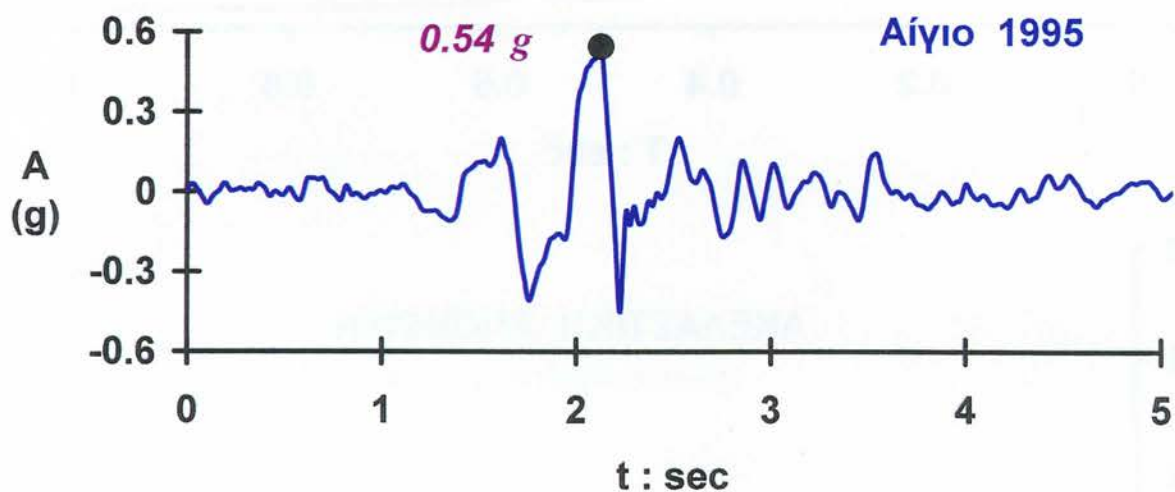
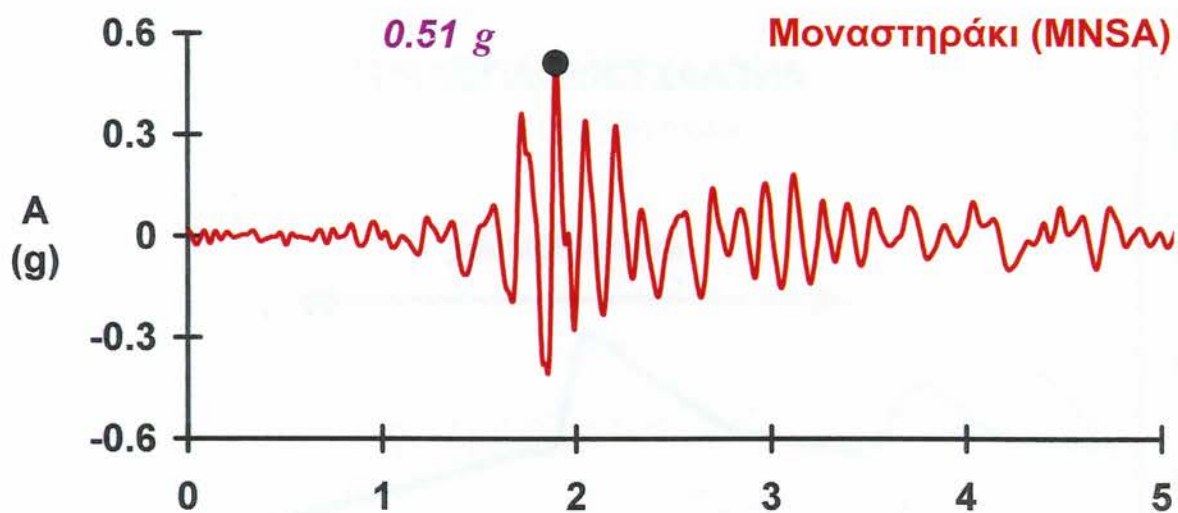
καταγραφή



Μοναστηράκι : MNSA  
" διόρθωση " A ( t )

Σχήμα 3.10

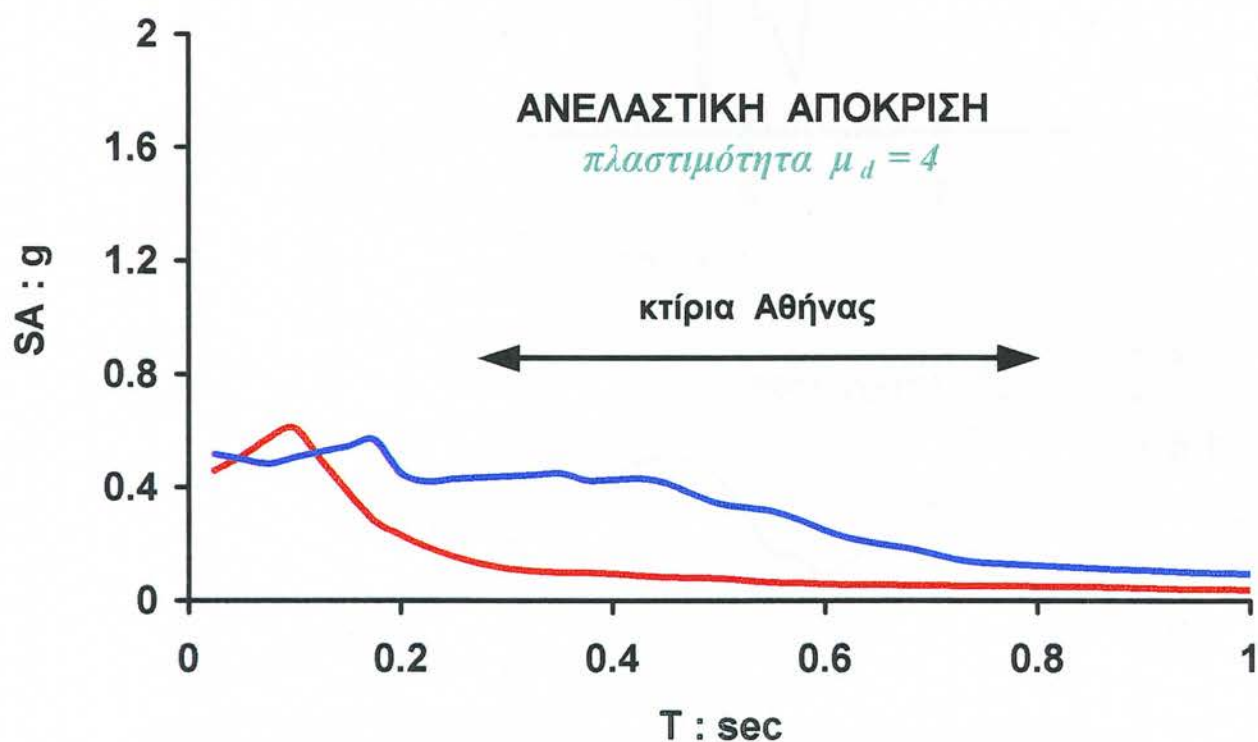
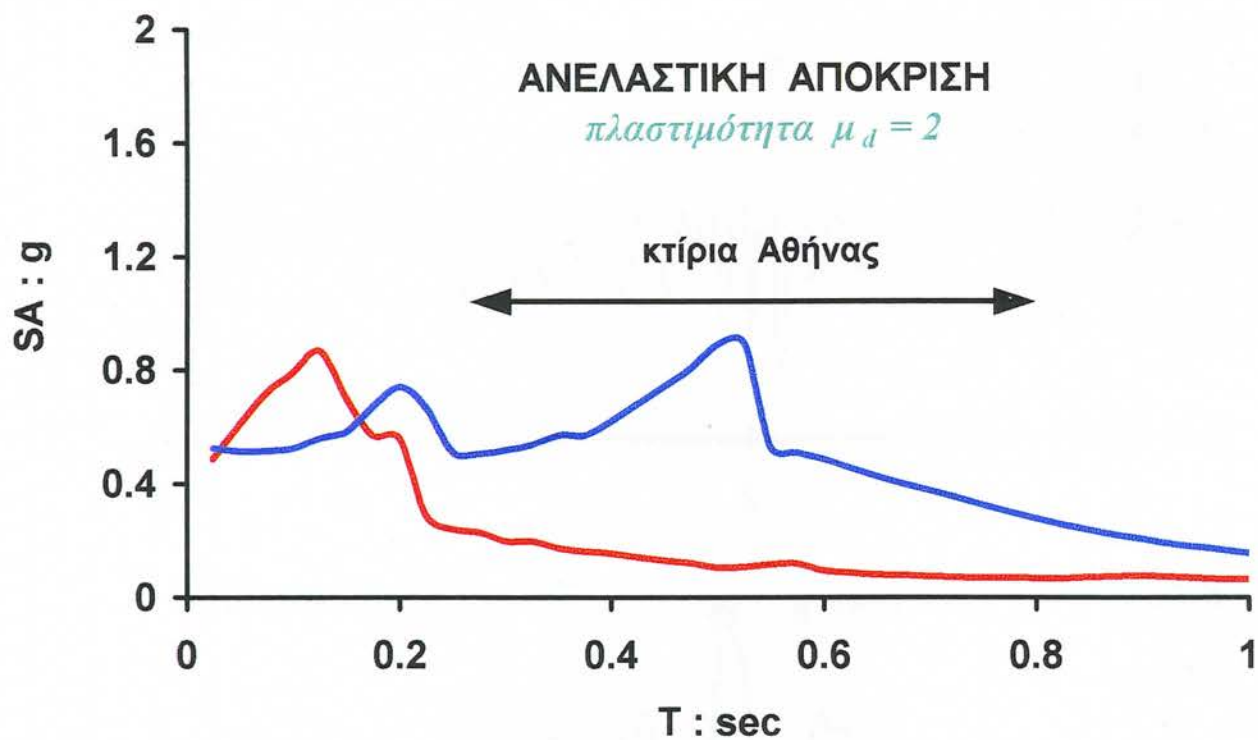
Αποτέλεσμα τής 2-διάστατης αντίστροφης κυματικής ανάλυσης με βάση την καταγραφή MNSA.



Σχήμα 3.11 (α)

Σύγκριση των καταγραφών MNSA (1999) και Αιγίου (1995). [Συνεχίζεται]

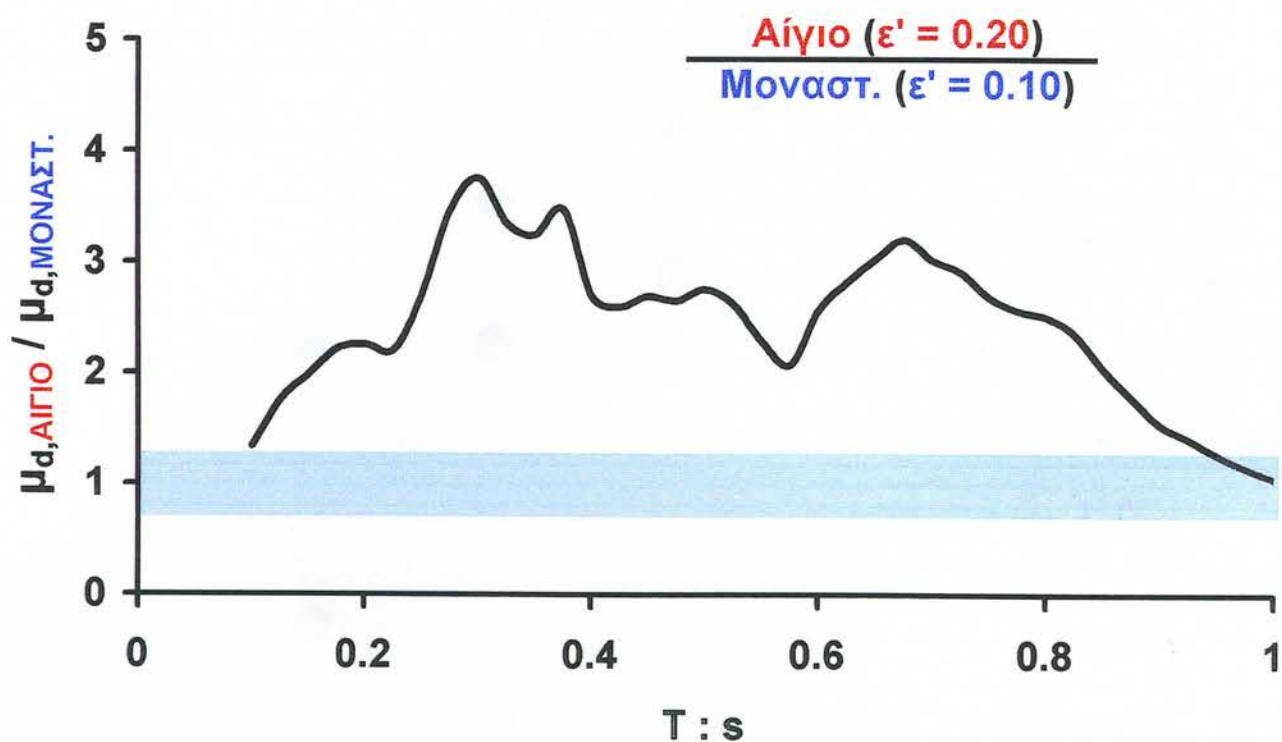




**Σχήμα 3.11 (β)**

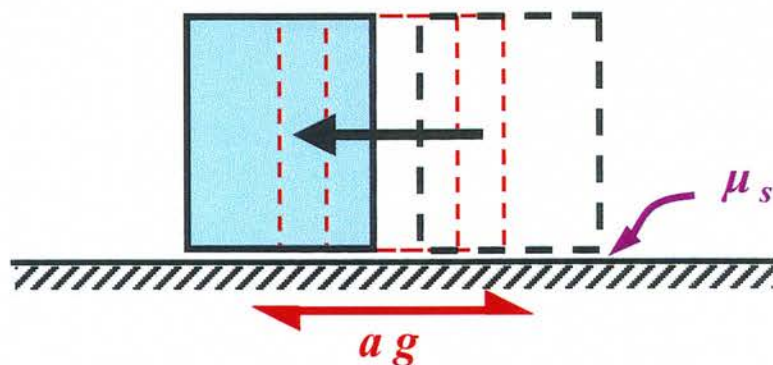
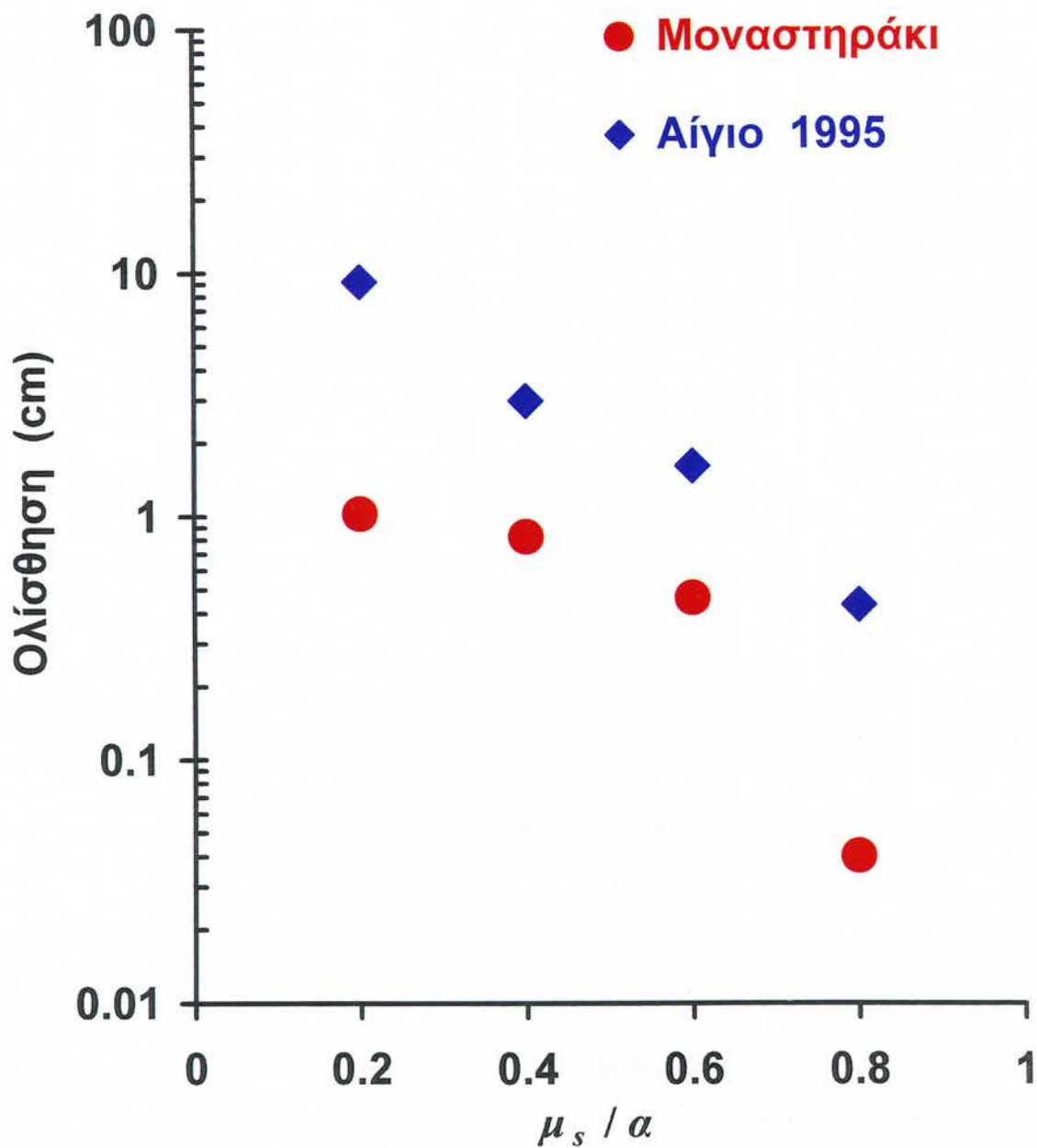
Σύγκριση ελαστοπλαστικών φασμάτων τών καταγραφών  
 MNSA (1999) και Αιγίου (1995). [Συνεχίζεται]





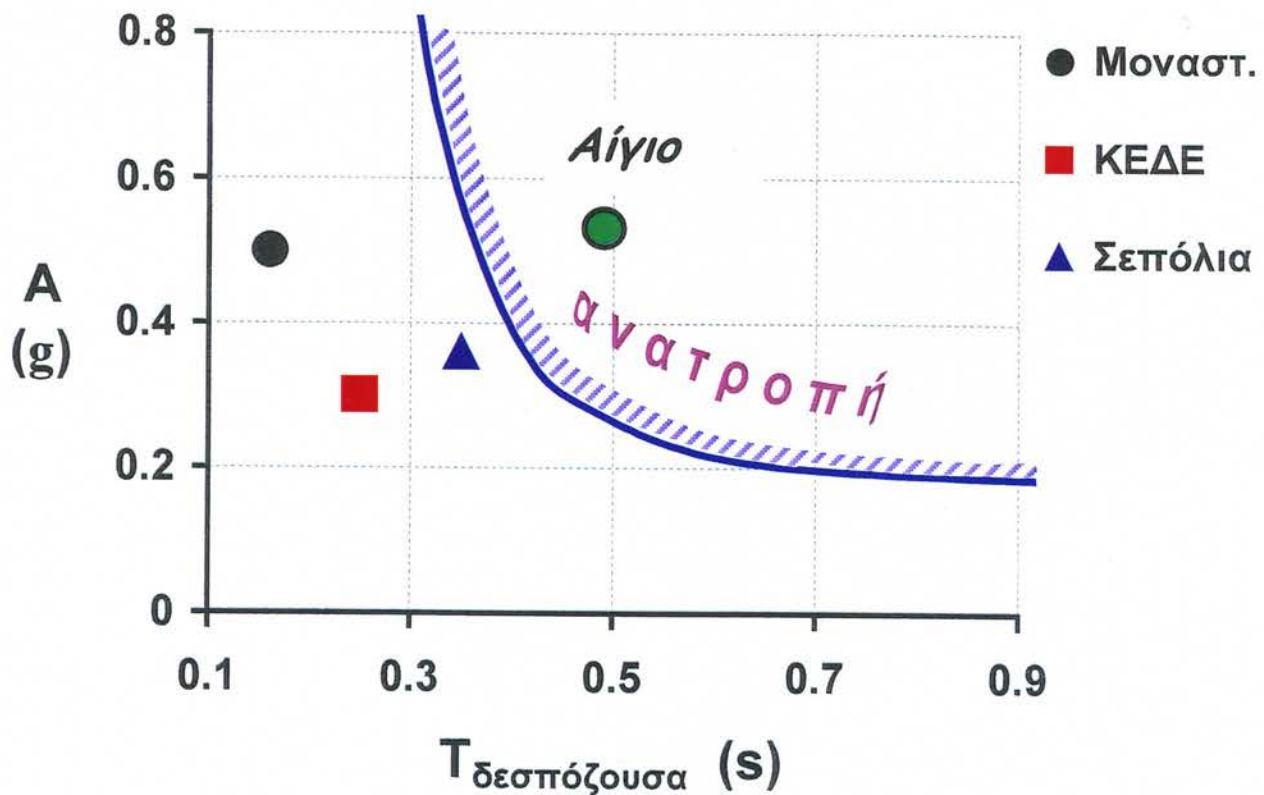
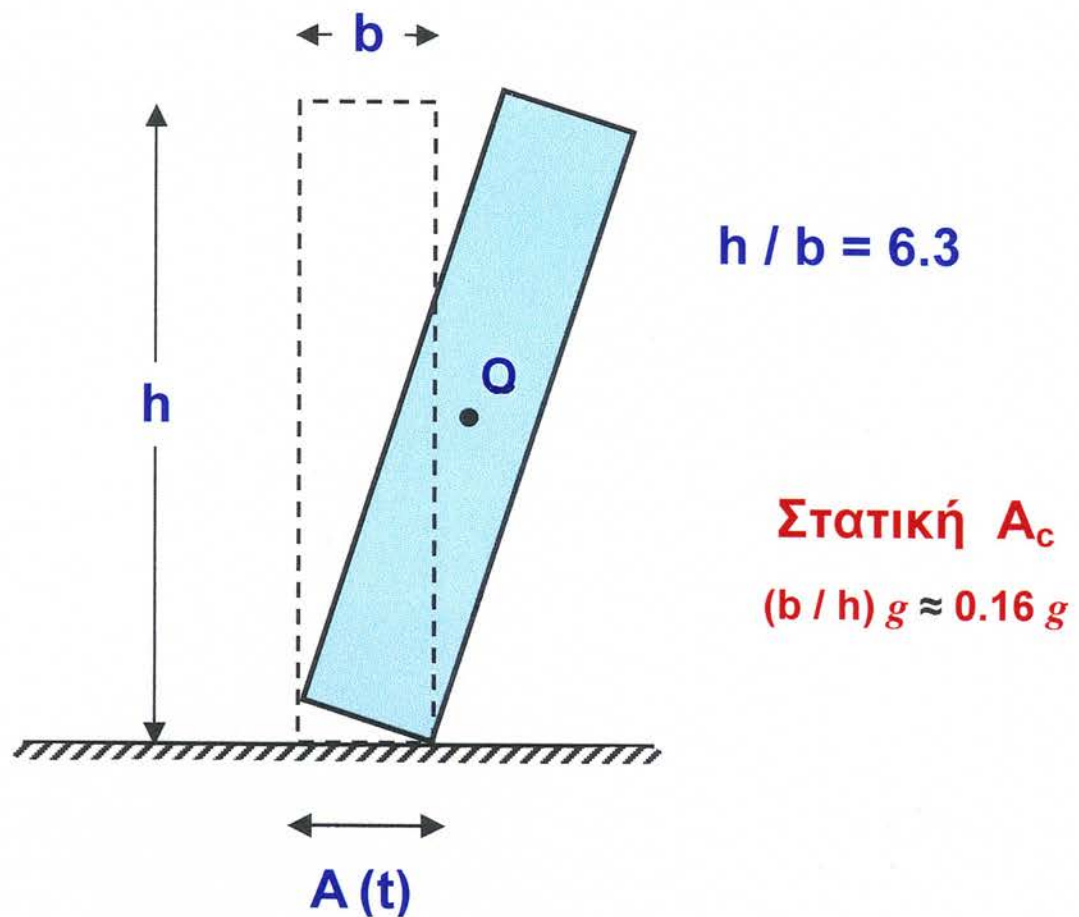
**Σχήμα 3.11 (γ)**

Λόγος τών επιβαλλομένων πλαστιμοτήτων στο Μοναστηράκι και στο Αίγιο, όπου λαμβάνεται υπόψη ο διαφορετικός σεισμικός συντελεστής ( $\epsilon' = 2.5 \epsilon$ ) τών δύο περιοχών.



Σχήμα 3.12

Σύγκριση παραμενουσών μετακινήσεων ολισθαίνοντος σώματος εδραζομένου σε βάση που διεγείρεται από τις καταγραφές Αιγίου (1995) και ΜΝΣΑ (1999).



Σχήμα 3.13

Λικνισμός και ανατροπή υψίκορμου στερεού σώματος σε σεισμικώς δονούμενη ανένδοτη βάση: η επιτάχυνση ανατροπής είναι ευαίσθητη συνάρτηση τού συχνοτικού περιεχομένου τής διέγερσης.