

H.

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΙΣΧΥΡΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ
(ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ & ΚΟΥΡΕΤΖΗΣ)**

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ-ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΙΣΧΥΡΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ
ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΣΤΙΣ
ΕΠΙΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΣΕΙΣΜΟ
ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

Α' ΦΑΣΗ ΕΡΕΥΝΩΝ

ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Γ. ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ και Γ.ΚΟΥΡΕΤΖΗΣ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σεισμική κίνηση από τον κύριο σεισμό της Αθήνας καταγράφηκε από 18 επιταχυνσιογράφους, 14 από τους οποίους ήταν εγκατεστημένοι στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και 4 σε απομακρυσμένα αστικά κέντρα (Ραφήνα, Λαύριο, Αλιβέρι και Θήβα). Ο κύριος όγκος των καταγραφών προέρχεται από το μόνιμο δίκτυο επιταχυνσιογράφων που διατηρεί το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Αστεροσκοπείου Αθηνών, ενώ οι υπόλοιπες καταγραφές προέρχονται από τα δίκτυα του ΙΤΣΑΚ και της ΔΕΗ. Οι περισσότερες καταγραφές έγιναν σε μεγάλα δημόσια έργα, όπως σε επιφανειακές εγκαταστάσεις ή υπόγειους σταθμούς του Μετρό. Κατέστη έτσι δυνατό, με συστηματική έρευνα, να συγκεντρωθούν στοιχεία από προηγούμενες γεωτεχνικές έρευνες ώστε να καθοριστούν οι τοπικές εδαφικές συνθήκες στις θέσεις των καταγραφών.

Τα επιπλέον αυτά στοιχεία μας επέτρεψαν να χρησιμοποιήσουμε τα σεισμολογικά δεδομένα σαν τα αποτελέσματα ενός πειράματος φυσικής κλίμακας, με σκοπό να ερευνηθεί η επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών στις μέγιστες τιμές των παραμέτρων της ισχυρής κίνησης και το φασματικό της περιεχόμενο. Παρέχονται έτσι τα μέσα ώστε να μπορούν να γίνουν εκτιμήσεις για τα χαρακτηριστικά της ισχυρής κίνησης στις πλειόσειστες περιοχές, όπου δεν υπήρχαν καταγραφές του κύριου σεισμού. Συγκεκριμένα, στην πρώτη αυτή φάση των ερευνών εξετάστηκαν τα παρακάτω θέματα:

- η κύρια διεύθυνση της ισχυρής κίνησης
- η ακρίβεια των καθαρά σεισμολογικών μεθόδων σε ότι αναφορά την εκτίμηση των χαρακτηριστικών του υπεδάφους και τον

χαρακτηρισμό των καταγραφών (χρησιμοποιώντας και επιπλέον καταγραφές από μετασεισμούς)

- η ακρίβεια των μονοδιάστατων αναλύσεων σεισμικής απόκρισης του εδάφους
- η επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών στις μέγιστες και τις φασματικές επιταχύνσεις του εδάφους.
- ο συνδυασμών όλων των παραπάνω δεδομένων χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών της ισχυρής κίνησης στις περιοχές όπου σημειώθηκαν οι μεγαλύτερες απώλειες σε ανθρώπινες ζωές και καταστροφές (Άνω Λιόσια, Μενίδι, Θρακομακεδόνες).

2. ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ

Στο Σχήμα 1 και στον Πίνακα 1 συνοψίζονται οι βασικές πληροφορίες για τον μηχανισμό διάρρηξης του σεισμού της Αθήνας και τις καταγραφές της ισχυρής κίνησης του κύριου σεισμού. Στο Σχήμα 1 φαίνονται:

- Το αρχικό και το αναθεωρημένο επίκεντρο του κύριου σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999, όπως ανακοινώθηκαν από το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο
- Τα επίκεντρα των μετασεισμών που καταγράφηκαν κατά την περίοδο από 8 Σεπτεμβρίου έως 29 Οκτωβρίου 1999 από το δίκτυο του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου
- Τα ίχνη των δύο ενεργών ρηγμάτων (Φυλής και Ασπροπύργου) που είναι τα προς βορράν όρια των επικέντρων της μετασεισμικής

ακολουθίας και παρουσιάζουν γεωμετρία συμβατή με την κύρια επιφάνεια διάρρηξης (Papadopoulos et. al., 2000) και

- Οι θέσεις των καταγραφών του κύριου σεισμού

Ο Πίνακας 1 περιλαμβάνει:

- Τις μέγιστες τιμές των καταγεγραμμένων επιταχύνσεων και ταχυτήτων
- Τις αποστάσεις των θέσεων των καταγραφών από την διάρρηξη, με την υπόθεση ότι το ίχνος της κείται μεταξύ των ρηγμάτων Φυλής και Ασπροπύργου
- Την διεύθυνση της μέγιστης συνισταμένης επιτάχυνσης σε σχέση με τον Βορρά, που προκύπτει από την διανυσματική σύνθεση των δύο οριζοντίων συνιστωσών (Long και Trans) της χρονοιστορίας της επιτάχυνσης
- Τις δεσπόζουσες περιόδους της ισχυρής κίνησης, προερχόμενες από τις δύο οριζόντιες συνιστώσες των καταγραφών
- Τις γεωλογικές συνθήκες του υπεδάφους στην θέση κάθε καταγραφής και
- Πληροφορίες σχετικά με την κτιριακή κατασκευή όπου ήταν εγκαταστημένοι οι επιταχυνσιογράφοι

Παρατηρούμε ότι όλες οι καταγραφές (εκτός από αυτή της Θήβας-THVC) έχουν γίνει ανατολικά της ζώνης διάρρηξης, στο ολισθαίνον τέμαχος του ρήγματος και σε αποστάσεις μεταξύ 9 και 52 km από την διάρρηξη. Το σημαντικό αυτό εύρος αποστάσεων βοηθάει στην διατύπωση αξιόπιστων σχέσεων απομείωσης της ισχυρής κίνησης με την

απόσταση από την διάρρηξη. Πρέπει όμως να συνεκτιμηθεί και η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στις καταγραφές, καθώς οι ποικίλες γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή του Λεκανοπεδίου (από αλλουβιακές αποθέσεις μέχρι σχιστόλιθος) έχουν σημαντική επίδραση στα χαρακτηριστικά των καταγραφών.

3. ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΡΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Από τα στοιχεία του Πίνακα 1 προκύπτει ότι η διεύθυνση του διανύσματος της μέγιστης επιτάχυνσης κυμαίνεται από $N45^\circ$ μέχρι $N180^\circ$ με μέση τιμή (\pm τυπική απόκλιση) τις $N109^\circ$ ($\pm 39^\circ$). Οι τιμές αυτές συμφωνούν με παρατηρήσεις των μελών της ομάδας σε νεκροταφεία στην πλειόσειστη περιοχή, όπου οι μαρμάρινες διακοσμήσεις και τα μαρμάρινα καλύμματα των μνημείων έχουν ολισθήσει και ανατραπεί γενικά προς μια διεύθυνση Α-Δ.

Εξάλλου, οι Papadopoulos et. al. (2000), βασιζόμενοι στην πολικότητα των κυμάτων P, κατέληξαν σε μια επίλυση για την επιφάνεια διάρρηξης με τα εξής χαρακτηριστικά: κανονική διάρρηξη, επιφάνειες θραύσης με διευθύνσεις $N113^\circ$ και $N290^\circ$ και βύθιση 56° προς τα βορειοανατολικά και 39° προς τα νοτιοδυτικά αντίστοιχα. Επιπλέον, τα διανύσματα θέσης των επιταχυνσιογράφων που κατέγραψαν τον κύριο σεισμό έχουν μια μέση διεύθυνση $N140^\circ$ ως προς το αρχικό και $N120^\circ$ ως προς το αναθεωρημένο επίκεντρο.

Τα στοιχεία αυτά δείχνουν ότι η κύρια διεύθυνση των καταγραφών της ισχυρής κίνησης είναι λίγο-πολύ παράλληλη στις επιφάνειες διάρρηξης και κάθετη στην διεύθυνση της κίνησης του ρήγματος. Η συσχέτισή της με τα μέσα διανύσματα θέσης δεν είναι το ίδιο καλή, ειδικά στην

περίπτωση θεώρησης του αρχικού επικέντρου, όπου η απόκλιση φτάνει τις 30°.

4. ΕΔΑΦΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΘΕΣΕΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ

Αρκετές εμπειρικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών του εδάφους στις θέσεις καταγραφής άμεσα, από ανάλυση σεισμολογικών δεδομένων. Αυτό είναι και ένα πρώτο, απαραίτητο βήμα πριν προχωρήσουμε στην περαιτέρω ανάλυση των καταγραφών. Στην παρούσα έρευνα έχουν χρησιμοποιηθεί, δυο από τις συχνότερα εφαρμοζόμενες μεθόδους. Μια βασισμένη στο λόγο των ελαστικών φασμάτων απόκρισης της οριζόντιας και της κατακόρυφης συνιστώσας της σεισμικής κίνησης (HVSr) και μια άλλη βασισμένη στο λόγο της μέγιστης ταχύτητας προς την μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους. Δοκιμάσθηκε επίσης η μέθοδος του κλασσικού λόγου φασμάτων απόκρισης. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών του εδάφους σε μια συγκεκριμένη θέση χρησιμοποιείται ο λόγος των κανονικοποιημένων φασμάτων απόκρισης στη θέση αυτή προς το κανονικοποιημένο φάσμα απόκρισης μιας καταγραφής στο αναδυόμενο βραχώδες υπόβαθρο (π.χ. στο Δημόκριτο). Πάντως, στην συγκεκριμένη περίπτωση η μέθοδος αυτή δεν έδωσε αξιόπιστα αποτελέσματα.

Η μέθοδος HVSr βασίζεται στην υπόθεση ότι οι εδαφικές συνθήκες δεν επηρεάζουν την κατακόρυφη συνιστώσα της καταγραφής παρά μόνο τις δυο οριζόντιες (Long & Trans). Έτσι, διαιρώντας τα ελαστικά φάσματα των οριζοντίων συνιστωσών με το ελαστικό φάσμα της κατακόρυφης συνιστώσας λαμβάνουμε μια συνάρτηση μεταφοράς (χωρίς κλίμακα όμως) που εκτιμά τα δυναμικά χαρακτηριστικά της στήλης του εδάφους που βρίσκεται πάνω από το σεισμικό υπόβαθρο. Η μέθοδος αυτή

εφαρμόστηκε αρχικά για ένα απλό, προκαταρκτικό υπολογισμό της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου του εδάφους από τα φάσματα Fourier καταγραφών εδαφικού θορύβου (Nakamura, 1989). Αργότερα, η χρήση της επεκτάθηκε και σε καταγραφές ισχυρής σεισμικής κίνησης, με ενθαρρυντικά αποτελέσματα. (Dimitriu et. al. 1999, Bonilla et. al. 1997, Theodulidis et. al. 1996, Yamazaki and Ansary 1997).

Στην παρούσα μελέτη, η μέθοδος HVSR εφαρμόζεται σε όλες τις καταγραφές της ισχυρής κίνησης στην επιφάνεια του εδάφους. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, χρησιμοποιήσαμε τα κανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα απόκρισης (NHVSR) (για απόσβεση 5%) των καταγραφών αντί για τα αντίστοιχα φάσματα Fourier, που χρησιμοποιούνται συχνότερα στην βιβλιογραφία. Οι λόγοι για την διαφοροποίηση αυτή εξηγούνται εκτενώς στο Παράρτημα (Μέρος II Κεφ. Α.1). Εδώ αναφέρουμε απλώς ότι τα φάσματα Fourier είναι πολύ ευαίσθητα στο βαθμό ομαλοποίησης (smoothing) που εφαρμόζεται, κάτι που δυσκολεύει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και μειώνει την ακρίβειά τους. Επιπλέον, η χρησιμοποίηση των κανονικοποιημένων ελαστικών φασμάτων παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι η μέγιστη τιμή του λόγου NHVSR αυξάνεται παρράλληλα προς την θεμελιώδη ιδιοπερίοδο, καθώς η εδαφική στήλη γίνεται πιο εύκαμπτη. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή του λόγου NHVSR αυξάνει από 2.13 σε 4.85 καθώς η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του εδάφους αυξάνεται από 0.10 σε 0.30sec. Στην πραγματικότητα, η μέγιστη τιμή του λόγου των φασμάτων είναι πιο ευαίσθητη στην διαφοροποίηση των εδαφικών συνθηκών και πλεονεκτεί σαν δείκτης για την κατηγοριοποίηση των καταγραφών, αν και δεν έχει κάποιο προφανές φυσικό νόημα.

Η δεύτερη μέθοδος κατηγοριοποίησης των καταγραφών, που βασίζεται στον λόγο V_{\max}/a_{\max} ανατρέχει στην σχέση μεταξύ του V_{\max} και του a_{\max} για αρμονικές διεγέρσεις:

$$V_{\max} = \frac{1}{\omega} \cdot \alpha_{\max}$$

(1)

ή

$$T = 2\pi \cdot \frac{V_{\max}}{\alpha_{\max}}$$

(2)

Οι παραπάνω σχέσεις δείχνουν ότι ο λόγος V_{\max}/a_{\max} είναι ανάλογος με την θεμελιώδη ιδιοπερίοδο του εδάφους. Ο Donovan (1989), χρησιμοποιώντας εμπειρικές σχέσεις απομείωσης απέδειξε την υπόθεση έμμεσα με σεισμολογικά δεδομένα. Πρότεινε μάλιστα ως ενδεικτικές οριακές τιμές τις $V_{\max}/a_{\max}=61\text{cm/sec/g}$ και $V_{\max}/a_{\max}=122\text{cm/sec/g}$ για βραχώδεις και μαλακούς, εδαφικούς σχηματισμούς αντίστοιχα.

Από εφαρμογή και των δύο μεθόδων προκύπτει ικανοποιητική συσχέτιση της μέγιστης τιμής του λόγου NHVSR (A_{NHVSR}) και του λόγου V_{\max}/a_{\max} με την αντίστοιχη εκτιμώμενη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο T_{NHVSR} . Επιπλέον διαπιστώνεται ότι οι τιμές A_{NHVSR} και V_{\max}/a_{\max} παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στις τοπικές εδαφικές συνθήκες, από την ιδιοπερίοδο T_{NHVSR} και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για χαρακτηρισμό των καταγραφών. Τα πλήρη αποτελέσματα της εφαρμογής των δύο μεθόδων φαίνονται Παράρτημα (Μέρος I Κεφ. 3).

Συνεκτιμώντας τα αποτελέσματα των παραπάνω καθαρά σεισμολογικών μεθόδων με τα δεδομένα από τις γεωτεχνικές έρευνες, οι θέσεις των καταγραφών κατατάχθηκαν σε δύο κατηγορίες:

(α) **Βραχώδεις-ημιβραχώδεις σχηματισμοί.** Περιλαμβάνει όλες τις θέσεις με A_{NHVSR} μικρότερο του 3, V_{max}/a_{max} μικρότερο του 60cm/sec/g και θεμελιώδεις ιδιοπεριόδους T_{NHVSR} μεταξύ 0.07 και 0.26sec. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί με τα χαρακτηριστικά αυτά είναι υγιείς έως μετρίως αποσαθρωμένες φάσεις του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου (καταγραφή *ATH-04*), μεταμορφωμένοι σχιστόλιθοι και μάρμαρα (καταγραφές *DMK* και *LAVR*), συνεκτικοί κώνοι κορημάτων και μέτρια έως καλά συγκολλημένα κροκαλοπαγή (καταγραφή *THVC*) ή νεογενείς μάργες (καταγραφή *ALIV*).

(β) **Εδαφικοί σχηματισμοί.** Περιλαμβάνει τις υπόλοιπες θέσεις με A_{NHVSR} μεγαλύτερο του 3, V_{max}/a_{max} μεγαλύτερο του 60cm/sec/g και θεμελιώδεις ιδιοπεριόδους T_{NHVSR} μεταξύ 0.22 και 0.50sec. Σε γεωλογικούς όρους, οι εδαφικοί σχηματισμοί αποτελούνται από ικανού πάχους προϊόντα αποσάθρωσης του γεωλογικού υποβάθρου (καταγραφές *ATHA* και *KERA*), αλλούβια με μέτρια έως πυκνή δομή (καταγραφές *ATH-02*, *ATH-03* και *SPLB*) ή ιστορικές και πρόσφατες ανθρωπογενείς αποθέσεις (καταγραφή *MNSA*)

5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ

Οι αναλύσεις σεισμικής απόκρισης του εδάφους έγιναν κυρίως για την μεταφορά των σεισμικών διεγέρσεων που καταγράφηκαν στην επιφάνεια εδαφικών σχηματισμών, στην ελεύθερη επιφάνεια του σεισμικού υποβάθρου δηλ. στην επιφάνεια ενός υποθετικού βραχώδους σχηματισμού στην ίδια θέση. Στην περίπτωση καταγραφών που έγιναν σε βάθος, (στους υπόγειους σταθμούς του Μετρό) οι αναλύσεις έγιναν για

την εκτίμηση των χαρακτηριστικών της ισχυρής κίνησης στην επιφάνεια των υπερκείμενων εδαφικών στρώσεων και στην ελεύθερη επιφάνεια του αναδυόμενου σεισμικού υποβάθρου. Με τον τρόπο αυτό, τα δεδομένα των πραγματικών καταγραφών στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους συμπληρώνονται με αναλυτικές προβλέψεις συμβατές με τις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Έτσι, ο συνολικός αριθμός των δεδομένων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί η απομείωση της ισχυρής κίνησης με την απόσταση από την διάρρηξη αυξάνεται σημαντικά.

Αναλύσεις σεισμικής απόκρισης έγιναν σε όλες τις θέσεις των καταγραφών, εκτός από τους σταθμούς RFN, LAVR και ALIV, που βρίσκονται εγκατεστημένοι στη Ραφήνα, στο Λαύριο και στο Αλιβέρι αντίστοιχα. Στις περιπτώσεις αυτές στάθηκε αδύνατο να βρεθούν τα αναγκαία γεωτεχνικά στοιχεία για την διαμόρφωση του αρχείου δεδομένων των αναλύσεων. Επίσης, για την καταγραφή στο Δημόκριτο (DMK) δεν κρίθηκε αναγκαίο να γίνουν αναλύσεις, μιας και η καταγραφή έγινε στην επιφάνεια του σεισμικού υποβάθρου και δεν έχει επηρεαστεί από τοπικές εδαφικές συνθήκες.

Το θεωρητικό πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του εδάφους περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα (Μέρος I Κεφ. 4.2). Παρόλα αυτά, κατά τον ορισμό των εδαφικών παραμέτρων προέκυψαν δυο αντικειμενικές δυσκολίες:

- (α) Οι γεωτεχνικές έρευνες στην πλειονότητα των περιπτώσεων έγιναν στην ευρύτερη περιοχή, παρά πλησίον της θέσης του οργάνου και,
- (β) Δεν περιλαμβάνουν ειδικές δοκιμές (Crosshole και Downhole) για την μέτρηση των δυναμικών χαρακτηριστικών του εδάφους.

Έτσι ορίστηκε ένα πιθανό εύρος για τις παραμέτρους του εδάφους, χρησιμοποιώντας περισσότερες από μια γεωτρήσεις σε κάθε περιοχή. Επιπλέον, η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο υπέδαφος εκτιμήθηκε έμμεσα από τα αποτελέσματα δοκιμών πρότυπης διείδυσης (SPT) με την εμπειρική σχέση των Imai and Tonuchi (1982):

$$V_s \text{ (m/sec)} = 97.0 N_{\text{SPT}}^{0.314}$$

Αρχικά έγιναν δύο αναλύσεις για κάθε θέση καταγραφής-μια για κάθε οριζόντια συνιστώσα της διέγερσης-χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές για τις εδαφικές παραμέτρους. Όπου η θεμελιώδης περίοδος του εδάφους που προέκυπτε από την μονοδιάστατη ανάλυση απόκλινε περισσότερο από 0.10sec από την ιδιοπερίοδο T_{NHVSR} που είχε υπολογιστεί με την σεισμολογική μέθοδο NHVSR, οι αναλύσεις επαναλήφθηκαν για να μειωθεί η διαφορά. Οι συμπληρωματικές αναλύσεις έγιναν προσαρμόζοντας ομοιόμορφα το προφίλ ταχυτήτων διάδοσης των διατμητικών κυμάτων του εδαφικού μοντέλου, με οδηγό πάντα το εύρος τιμών που έχει προκύψει από τα γεωτεχνικά δεδομένα και την εμπειρική σχέση των Imai and Tonuchi. Από τις 12 αναλύσεις που έγιναν με το μέσο εδαφικό προφίλ, οι 7 επαναλήφθηκαν με κατάλληλα προσαρμοσμένες ταχύτητες διατμητικών κυμάτων.

6. ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων των μονοδιάστατων αναλύσεων σεισμικής απόκρισης του εδάφους μπορεί να ελεγχθεί στην περίπτωση των Σεπολίων. Στην θέση αυτή, η ισχυρή κίνηση από τον κύριο σεισμό αλλά και κάποιους μετασεισμούς έχει καταγραφεί από δυο επιταχυνσιογράφους σε απόσταση 170m, του ενός από το άλλο (SPLA και SPLB). Ο πρώτος επιταχυνσιογράφος βρίσκεται εγκατεστημένος σε

βάθος 13.5m στον υπόγειο σταθμό του Μετρό, ενώ ο δεύτερος βρίσκεται εγκατεστημένος στην επιφάνεια του εδάφους. Οι οριζόντιες συνιστώσες της επιφανειακής καταγραφής SPLB έχουν στραφεί διανυσματικά, έτσι ώστε οι άξονες των δύο οργάνων να συμπίπτουν. Οι προβλέψεις στην επιφάνεια του εδάφους των αναλύσεων με δεδομένες τις διεγέρσεις σε βάθος (SPLA) συγκρίνονται με τις πραγματικές καταγραφές στο ελεύθερο πεδίο (SPLB) (Μέρος Ι Κεφ. 4.4.8). Σαν μέτρο σύγκρισης χρησιμοποιούνται τα ελαστικά φάσματα απόκρισης για απόσβεση 5%.

Οι αρχικές αναλύσεις με το μέσο εδαφικό προφίλ εκτιμούν μια θεμελιώδη ιδιοπερίοδο για το έδαφος της τάξης των 0.18-0.19sec, ενώ η T_{NHVSR} που εκτιμάται από την καταγραφή SPLB είναι περίπου 0.30sec. Η διαφορά αυτή πρακτικά μηδενίζεται, μειώνοντας ομοιόμορφα τις ταχύτητες διάδοσης των διατμητικών κυμάτων κάθε στρώσης κατά 15%. Οι προβλέψεις συμφωνούν πολύ καλά με τις καταγραφές στις αναλύσεις με την συνιστώσα Trans των οργάνων, τόσο για τον κύριο σεισμό όσο και με μετασεισμούς. Αντίθετα, οι προβλέψεις για την συνιστώσα Long, που συμπίπτει με τον διαμήκη άξονα του υπόγειου σταθμού, παρουσιάζουν σε κάθε περίπτωση μεγάλες διαφορές με τις καταγραφές, κάτι που δεν αλλάζει με αναπροσαρμογή του προφίλ ταχυτήτων V_s . Αυτή είναι μια πιθανή ένδειξη φαινομένων δυναμικής αλληλεπίδρασης του δύσκαμπτου υπόγειου σταθμού από οπλισμένο σκυρόδεμα με το εύκαμπτο έδαφος που τον περιβάλλει. Τα φαινόμενα αυτά θα αποτελέσουν αντικείμενο διερεύνησης στις προσεχείς φάσεις του προγράμματος. Τα πλήρη αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών και τα συγκριτικά σχήματα παρατιθενται στο Παράρτημα (Μέρος ΙΙ Κεφ. Α.3)

Τα βασικά αποτελέσματα των αναλύσεων, που χρησιμοποιούμε στην έρευνα περιλαμβάνουν:

- Την θεμελιώδη ιδιοπερίοδο του εδάφους,
- Τις μέγιστες επιταχύνσεις στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους και στο αναδυόμενο σεισμικό υπόβαθρο,
- Τις μέσες φασματικές επιταχύνσεις για εύρος περιόδων 0.01-0.10sec, 0.10-0.25sec, 0.25-0.50sec και 0.50-1.00sec

Η σύγκριση των θεμελιωδών ιδιοπεριόδων που προκύπτουν από τις μονοδιάστατες αναλύσεις και τις σεισμολογικές μεθόδους δείχνει ότι οι αναλυτικές προβλέψεις συστηματικά υποεκτιμούν την θεμελιώδη ιδιοπερίοδο κατά 32% (μέσος όρος) σε σχέση με την T_{NHVSR} . Μια μέση μείωση στα προφίλ των ταχυτήτων της τάξης του 5-20% είναι αρκετή όμως για να εξαλειφθεί αυτή η διαφορά, χωρίς μεγάλη επίδραση στις προβλεπόμενες μέγιστες επιταχύνσεις. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι τα δεδομένα από τις καταγραφές MNSA Trans και ATH-02 Trans έχουν εξαιρεθεί από την εφαρμογή της μεθόδου λόγω σαφών ενδείξεων επηρεασμού τους από φαινόμενα αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής. Για τις υπόλοιπες καταγραφές δεν υπάρχουν σαφείς ενδείξεις που να αποδίδουν την διαφορά αυτή στην μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των σεισμολογικών δεδομένων ή στις υποθέσεις που βασίστηκαν οι μονοδιάστατες αναλύσεις (π.χ. στην έμμεση εκτίμηση της ταχύτητας V_s από τα αποτελέσματα των δοκιμών πρότυπης διείσδυσης).

7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΩΝ

Από την μετασεισμική ακολουθία του σεισμού της Αθήνας έχουν επιλεγεί οι 5 μεγαλύτεροι μετασεισμοί που έχουν καταγραφεί από ικανοποιητικό αριθμό οργάνων. Τα μεγέθη τους κυμαίνονται από $M=4$

έως $M=4.4$. Οι μέγιστες επιταχύνσεις που καταγράφησαν στην επιφάνεια του εδάφους φτάνουν τα $0.096g$.

Για τις 25 καταγραφές μετασεισμών υπολογίσθηκαν και σχεδιάστηκαν (Μέρος II Κεφ. Γ.2) τα ελαστικά φάσματα απόκρισης και οι λόγοι NHVSR. Σε 4 χαρακτηριστικές θέσεις όπου υπάρχουν πολλές καταγραφές, (ATHA, SPLA, SPLB, DMK) παρουσιάζεται το εύρος των λόγων NHVSR όλων των καταγραφών (κύριου σεισμού και μετασεισμών) και οι μέσες τιμές των λόγων NHVSR των μετασεισμών και του κύριου σεισμού ξεχωριστά. Από τους μέσους λόγους NHVSR καταγραφών στην επιφάνεια του εδάφους (ATHA, SPLB) προκύπτει ότι η μη-γραμμική συμπεριφορά του εδάφους κατά τον κύριο σεισμό έδωσε λόγους NHVSR με χαρακτηριστικά μέγιστα στη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο του εδάφους. Αντίθετα οι καταγραφές μετασεισμών, με πολύ μικρότερες μέγιστες επιταχύνσεις, δεν δίνουν μια σαφή ένδειξη για την θεμελιώδη ιδιοπερίοδο. Το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρείται σε καταγραφές στο αναδυόμενο σεισμικό υπόβαθρο (DMK) ή σε βάθος (SPLA) όπου τα μη-γραμμικά φαινόμενα παίζουν λιγότερο σημαντικό ρόλο.

Καταγραφές μετασεισμών έχουμε από δυο επιταχυνσιογράφους επιπλέον, που δεν κατέγραψαν τον κύριο σεισμό-στο Πλανητάριο (ATHB) και στο Ρέντη (RNT). Ελλείπει καταγραφών του κύριου σεισμού στις θέσεις αυτές, έγιναν αναλύσεις σεισμικής απόκρισης χρησιμοποιώντας σαν διέγερση επιταχυνσιογράμματα μετασεισμών.

8. ΑΠΟΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΡΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΔΙΑΡΡΗΞΗ

Η μέγιστη οριζόντια και κατακόρυφη επιτάχυνση συσχετίζεται με την απόσταση από την διάρρηξη στα Σχήματα 2 και 3 αντίστοιχα. Παρομοίως τα Σχήματα 4, 5, 6 και 7 δείχνουν την αντίστοιχη απομείωση των μέσων φασματικών επιταχύνσεων. Παρουσιάζεται χωριστά η συσχέτιση για βραχώδεις-ημιβραχώδεις και εδαφικούς σχηματισμούς και περιλαμβάνονται δεδομένα από πραγματικές καταγραφές στην επιφάνεια του εδάφους καθώς και έμμεσες εκτιμήσεις από τις μονοδιάστατες αναλύσεις. Σε όλα τα σχήματα τα διαθέσιμα δεδομένα παραβάλλονται με τις εμπειρικές σχέσεις των Abrahamson and Silva (1997) για μικρού βάθους σεισμούς μεγέθους $M=5.9$. Μιας και όλες οι καταγραφές έχουν γίνει σε μέσες έως μεγάλες αποστάσεις από την διάρρηξη, οι παραπάνω εμπειρικές σχέσεις χρησιμοποιούνται σαν οδηγός για την επέκταση των δεδομένων στις επικεντρικές περιοχές.

Οι μέσες τιμές των μέγιστων και κανονικοποιημένων φασματικών επιταχύνσεων για βραχώδεις-ημιβραχώδεις και εδαφικούς σχηματισμούς φαίνονται στον Πίνακα 2 για διαφορετικές αποστάσεις από την διάρρηξη. Η επιρροή των εδαφικών συνθηκών εκτιμάτε ποσοτικά μέσω του λόγου εδαφικής ενίσχυσης (SAR), που ορίζεται σαν ο λόγος της επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους προς την επιτάχυνση στο αναδύμενο σεισμικό υπόβαθρο. Παρατηρούμε ότι οι μέγιστες κατακόρυφες επιταχύνσεις είναι πρακτικά ανεξάρτητες από τις εδαφικές συνθήκες. Οι εκτιμώμενες τιμές του SAR κυμαίνονται μεταξύ 1.47 και 2.00 για τις μέγιστες επιταχύνσεις και γενικά αυξάνουν με την απόσταση από την διάρρηξη. Το αντίστοιχο εύρος τιμών για τις κανονικοποιημένες φασματικές επιταχύνσεις κυμαίνεται από 0.96-0.99 για μικρές και 1.13-

1.37 για μεγαλύτερες περιόδους, ενώ δεν φαίνεται πρακτική συσχέτιση τους με την απόσταση από την διάρρηξη.

Συνεπώς, ενώ η μέγιστη οριζόντια και κατακόρυφη επιτάχυνση απομειώνεται με την απόσταση από την διάρρηξη, δεν συμβαίνει το ίδιο και με την κανονικοποιημένη φασματική επιτάχυνση. Βασιζόμενοι σ' αυτή τη παρατήρηση, στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα φάσματα απόκρισης για βραχώδεις-ημιβραχώδεις και για εδαφικούς σχηματισμούς, που προκύπτουν σαν μέση τιμή όλων των ελαστικών φασμάτων των καταγραφών στην επιφάνεια, ανεξάρτητα από την απόσταση του σταθμού από την διάρρηξη. Παρατηρούμε ότι οι καταγραφές σε βραχώδεις-ημιβραχώδεις σχηματισμούς έχουν φάσματα απόκρισης πλούσια σε περιόδους μεταξύ 0.07 και 0.30sec και δεσπόζουσα περίοδο της τάξης των 0.10sec. Για τις καταγραφές σε εδαφικούς σχηματισμούς, το εύρος των σημαντικών περιόδων κυμαίνεται από 0.10 έως 0.40sec και η αντίστοιχη δεσπόζουσα περίοδος είναι περίπου 0.25sec. Οι προαναφερθείσες περίοδοι αντιστοιχούν στις ιδιοπεριόδους τυπικών κατασκευών με 1-5 ορόφους, την πλειονότητα των κτηρίων δηλαδή που υπάρχουν στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας.

Αναφορικά με την επικεντρική περιοχή, σε απόσταση 1-3 km από την διάρρηξη εκτιμάται ότι, οι μέγιστες κατακόρυφες επιταχύνσεις ανέρχονται σε 0.23-0.28g ενώ οι μέγιστες οριζόντιες επιταχύνσεις εκτιμάται αντίστοιχα ότι έφτασαν τα 0.33-0.42g και 0.48-0.51g στην επιφάνεια βραχωδών-ημιβραχωδών και εδαφικών σχηματισμών αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας επιπλέον τα μέσα κανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα του Σχήματος 8, εκτιμάται ότι οι μέγιστες φασματικές επιταχύνσεις στην ίδια περιοχή έφτασαν τα 0.89-1.13g για βραχώδεις-ημιβραχώδεις σχηματισμούς και τα 1.30-1.38g για εδαφικούς σχηματισμούς. Επισημαίνεται ότι οι παραπάνω τιμές είναι στατιστικά

μέσες τιμές και είναι πιθανόν να ξεπεράστηκαν τοπικά έως και κατά 70%. Σε κάθε περίπτωση όμως, αυτές είναι παραπάνω από διπλάσιες από τις τιμές που προτείνει ο Ε.Α.Κ. για την ευρύτερη περιοχή των Αθηνών.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κυριότερα ευρήματα της συστηματικής αυτής έρευνας συνοψίζονται παρακάτω:

- *Κύρια διεύθυνση της ισχυρής κίνησης:* Οι μέγιστες οριζόντιες επιταχύνσεις που προκύπτουν από την διανυσματική σύνθεση των οριζόντιων συνιστωσών των καταγραφών έχουν μέση διεύθυνση N109°-σχεδόν παράλληλη δηλαδή με την επιφάνεια διάρρηξης, όπως αυτή έχει προταθεί από τους Papadopoulos et. al. (200) Η μέση αυτή διεύθυνση αποκλίνει κατά 10° και 30° από το μέσο διάνυσμα θέσης των σταθμών σε σχέση με το επανεκτιμώμενο και το αρχικό επίκεντρο αντίστοιχα.
- *Σεισμολογικές μέθοδοι αποτίμησης της εδαφικής επίδρασης:* Ο λόγος των οριζόντιων προς το κατακόρυφο ελαστικό φάσμα απόκρισης (NHVSR) όπως επίσης και ο λόγος της μέγιστης ταχύτητας προς την μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους (V_{max}/a_{max}) συσχετίζονται ικανοποιητικά με τις τοπικές γεωλογικές συνθήκες και τα αντίστοιχα γεωτεχνικά δεδομένα. Οι θεμελιώδεις ιδιοπερίοδοι που προκύπτουν από την μέθοδο NHVSR είναι συστηματικά μεγαλύτερες (32% κατά μέσο όρο) από τις αντίστοιχες που προκύπτουν με τις αναλυτικές προβλέψεις. Η διαφορά αυτή εξαλείφεται με μικρή μείωση της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (κατά 5-20%), στα δεδομένα, σε μέρος από τις μονοδιάστατες αναλύσεις.
- *Ανάλυση μετασεισμών:* Συγκρίνοντας τους μέσους λόγους NHVSR καταγραφών του κύριου σεισμού και μετασεισμών, στην επιφάνεια του

εδάφους, διαπιστώνεται ότι η μη-γραμμική συμπεριφορά του εδάφους κατά τον κύριο σεισμό έδωσε λόγους NHVSR με χαρακτηριστικά μέγιστα στη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο του εδάφους. Αντίθετα οι καταγραφές μετασεισμών, με πολύ μικρότερες μέγιστες επιταχύνσεις, δεν δίνουν μια σαφή ένδειξη για την θεμελιώδη ιδιοπερίοδο. Το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρείται σε καταγραφές στο αναδυόμενο σεισμικό υπόβαθρο ή σε βάθος όπου τα μη-γραμμικά φαινόμενα παίζουν λιγότερο σημαντικό ρόλο.

- *Επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών:* Οι μέγιστες οριζόντιες και οι φασματικές επιταχύνσεις αυξάνονται σε θέσεις εμφάνισης εδαφικών σχηματισμών, παρά την σχετικά πυκνή δομή που χαρακτηρίζει τους σχηματισμούς στο Λεκανοπέδιο. Η εκτιμώμενη μέση αύξηση φτάνει, για τις οριζόντιες και φασματικές επιταχύνσεις, το 47% στην επικεντρική περιοχή και ακόμη και το 100% σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 30 km από την διάρρηξη. Αντίθετα, οι μέγιστες κατακόρυφες και οι κανονικοποιημένες φασματικές επιταχύνσεις δεν δείχνουν να εξαρτώνται από τις τοπικές εδαφικές συνθήκες.

- *Παράμετροι της ισχυρής κίνησης στις επικεντρικές περιοχές:* Η εκτιμώμενη μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στις πλειόσειστες περιοχές, σε αποστάσεις 1-3 km από την διάρρηξη φτάνει τα 0.33-0.42g για βραχώδεις-ημιβραχώδεις και τα 0.48-0.51g για εδαφικούς σχηματισμούς. Οι αντίστοιχες μέγιστες κατακόρυφες επιταχύνσεις φτάνουν τα 0.23-0.28g, ανεξαρτήτως των τοπικών εδαφικών συνθηκών. Οι μέγιστες φασματικές επιταχύνσεις (για 5% απόσβεση) φτάνουν τα 0.89-1.13g και τα 1.30-1.38g για βραχώδεις-ημιβραχώδεις και εδαφικούς σχηματισμούς αντίστοιχα. Οι παραπάνω τιμές δεν αποκλείεται τοπικά να έχουν ξεπεραστεί έως και κατά 70%.

Τα δυο τελευταία ευρήματα εξαρτώνται άμεσα από την υπόθεση για την επιφάνεια διάρρηξης, ένα θέμα το οποίο δεν έχει ακριβώς ξεκαθαριστεί ακόμη, λόγω αντικειμενικών δυσκολιών. Συνεπώς και οι παραπάνω αριθμητικές εκτιμήσεις θα πρέπει να θεωρηθούν προκαταρκτικές, τουλάχιστον ως προς την ακρίβειά τους.

10. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι καταγραφές της ισχυρής κίνησης προέρχονται από τα δίκτυα του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, του Ινστιτούτου Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ) και της ΔΕΗ. Η Αττικό Μετρό Α.Ε. παρείχε τα γεωτεχνικά στοιχεία για όλους τους σταθμούς όπου ήταν εγκατεστημένοι επιταχυνσιογράφοι. Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται προς τον κ. Ι. Καλογερά, Ερευνητή Γ' του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου, για τη στενή συνεργασία κατά την αξιολόγηση των καταγραφών.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ - ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΙΣΧΥΡΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ
ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΣΤΙΣ
ΕΠΙΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΣΕΙΣΜΟ
ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

Α' ΦΑΣΗ ΕΡΕΥΝΩΝ

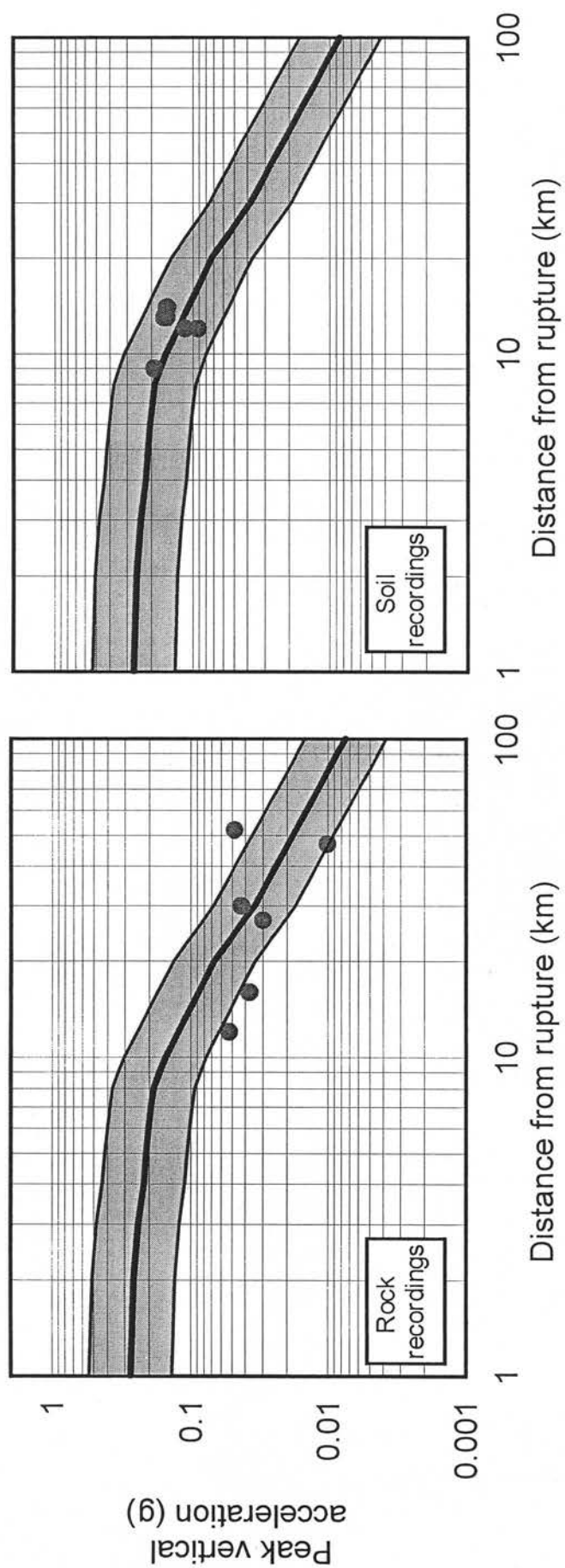
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

καταγραφή	συνιστώσα	απόσταση από διάρρηξη (km)	a_{max} (m/s ²)	v_{max} (m/sec)	διεύθυνση της a_{max}	δυσπόροι περιόδους	γεωλογικές συνθήκες	θέση του a_{gr} γάνου
ATHA (Νέο Ψυχικό)	Long	12	0.084	0.053	N60°	0.18-0.27	τεταρτογενείς αποθέσεις	3-όροφο Ο/Σ-ιδιωτικό κτίριο
	Trans		0.101	0.074		0.13-0.17		
	Vert		0.114	0.034		0.05-0.07		
MNSA (Μοναστηράκι)	Long	13	0.229	0.149	N110°	0.12-0.22	ανθρακωγενείς αποθέσεις/σχιστόλιθος/φυλλίτης	ελεύθερο πεδίο-σταθμός Μετρό
	Trans		0.512	0.149		0.13-0.19		
	Vert		0.162	0.035		0.04-0.07		
SPLB (Σεπτόλια)	Long	9	0.324	0.214	N180°	0.20-0.34	ανθρακωγενείς αποθέσεις/αλλοβια/σχιστόλιθος	3-όροφο μεταλλική κατασκευή-Deport Μετρό
	Trans		0.312	0.189		0.15-0.33		
	Vert		0.192	0.074		0.08-0.14		
DMK (Αγ. Παρασκευή)	Long	16	0.046	0.025	N45°	0.08-0.13	ασβεστόλιθος	μικρό σπίτι Ο/Σ-Δημόκριτος
	Trans		0.076	0.025		0.09-0.13		
	Vert		0.038	0.030		0.10-0.14		
ATH-02 (Χαλάνδρι)	Long	12	0.110	0.051	N135°	0.11-0.20	αλλοβια/σχιστόλιθος	2-όροφο Ο/Σ-Δημαρχείο
	Trans		0.159	0.069		0.08-0.25		
	Vert		0.092	0.034		0.08-0.11		
ATH-03 (Καλλιθέα)	Long	13	0.284	0.161	N100°	0.09-0.13	αλλοβια/σχιστόλιθος	1-όροφο Ο/Σ-Κ.Ε.Δ.Ε.
	Trans		0.303	0.147		0.19-0.26		
	Vert		0.157	0.070		0.04-0.07		
ATH-04 (Κυψέλη)	Long	12	0.121	0.089	N90°	0.09-0.11	σχιστόλιθος	3-όροφο Ο/Σ-Γ.Υ.Σ.
	Trans		0.110	0.085		0.11-0.30		
	Vert		0.053	0.034		0.07-0.12		
KERA (Κερατσίνι)	Long	14	0.223	0.100	N125°	0.17-0.40	τεταρτογενείς αποθέσεις	εργαστάσιο ΔΕΗ
	Trans		0.186	0.073		0.20-0.27		
	Vert		0.155	0.042		0.06-0.13		
SPLA (Σεπτόλια)	Long	9	0.255	0.179	N135°	0.09-0.13	αλλοβια/σχιστόλιθος	-2 επίπεδο (-13m)-σταθμός Μετρό
	Trans		0.221	0.128		0.19-0.52		
	Vert		0.082	0.059		0.05-0.07		
SGMA (Σύνταγμα)	Long	13	0.149	0.127	N100°	0.10-0.18	σχιστόλιθος	-1 επίπεδο (-7m)-σταθμός Μετρό
	Trans		0.239	0.134		0.13-0.17		
	Vert		0.054	0.030		0.11-0.21		
SGMB (Σύνταγμα)	Long	13	0.111	0.099	N100°	0.19-0.29	σχιστόλιθος	-3 επίπεδο (-26m)-σταθμός Μετρό
	Trans		0.087	0.108		0.23-0.59		
	Vert		0.089	0.036		0.13-0.16		
DFNA (Δάφνη)	Long	16	0.045	0.044	N55°	0.12-0.23	αλλοβια/σχιστόλιθος	-2 επίπεδο (-14m)-σταθμός Μετρό
	Trans		0.080	0.077		0.16-0.25		
	Vert		0.041	0.028		0.11-0.18		
PNT (Παπάγου)	Long	13	0.088	0.076	N140°	0.16-0.25	τεταρτογενείς αποθέσεις	-2 επίπεδο (-15m)-σταθμός Μετρό
	Trans		0.079	0.051		0.15-0.27		
	Vert		0.055	0.038		0.08-0.11		
FIX (Συγγρού-Fix)	Long	15	0.086	0.079	N70°	0.17-0.22	αλλοβια/σχιστόλιθος	-2 επίπεδο (-15m)-σταθμός Μετρό
	Trans		0.124	0.110		0.16-0.29		
	Vert		0.046	0.035		0.08-0.14		
RFN (Ραφήνα)	Long	27	0.081	0.035	N160°	0.09-0.12	τεταρτογενείς αποθέσεις/ασβεστόλιθος	μικρό ξύλινο σπίτι-ιδιωτικό κτίριο
	Trans		0.100	0.053		0.09-0.15		
	Vert		0.030	0.029		0.04-0.11		
ALIV (Αλιβερί)	Long	47	0.020	0.009		0.20-0.23	νεογενείς μάργες	εργαστάσιο ΔΕΗ
	Trans		0.017	0.009		0.11-0.23		
	Vert		0.010	0.005		0.10-0.14		
LAVR (Λαύριο)	Long	52	0.042	0.020		0.06-0.11	σχιστόλιθος/ασβεστόλιθος	εργαστάσιο ΔΕΗ
	Trans		0.053	0.018		0.22-0.30		
	Vert		0.048	0.018		0.22-0.31		
THVC (Θήβα)	Long	30	0.058	0.036	N150°	0.27-0.42	κροκαλοπαγή	3-όροφο Ο/Σ-Δημαρχείο
	Trans		0.056	0.026		0.09-0.11		
	Vert		0.044	0.019		0.17-0.23		

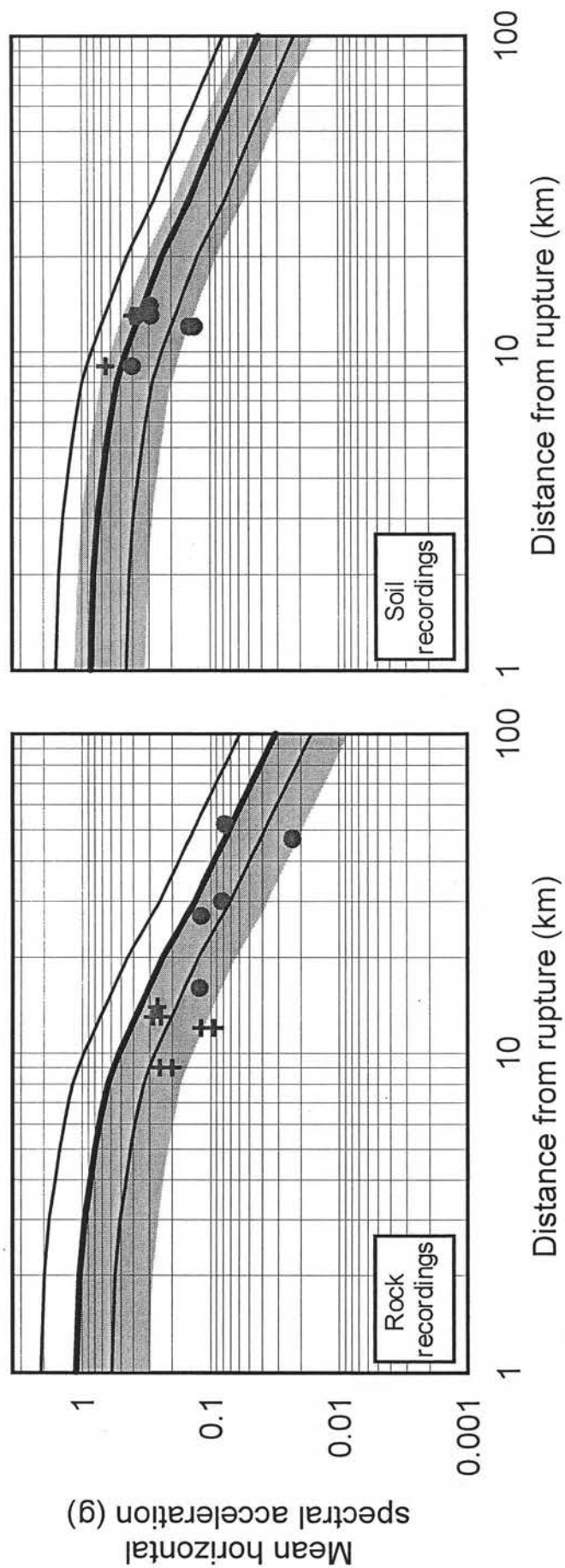
Πίνακας 1 Τεκμηρίωση των καταγραφών της ισχυρής κίνησης

απόσταση από την διάρρηξη (km)	1	3	5	10	30	50
μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση (g)	ROCK	0.29	0.24	0.20	0.18	0.03
	SOIL	0.29	0.24	0.20	0.18	0.03
	SAR	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση (g)	ROCK	0.40	0.34	0.30	0.19	0.03
	SOIL	0.59	0.50	0.44	0.30	0.06
	SAR	1.475	1.471	1.467	1.579	2.000
κανονικοποιημένη μέση φασματική επιτάχυνση για 0.01<T<0.10 sec	ROCK	1.388	1.468	1.387	1.384	1.200
	SOIL	1.234	1.234	1.232	1.233	1.230
	SAR	0.889	0.841	0.888	0.891	1.025
κανονικοποιημένη μέση φασματική επιτάχυνση για 0.10<T<0.25 sec	ROCK	2.348	2.307	2.265	2.214	2.206
	SOIL	2.329	2.281	2.229	2.158	2.119
	SAR	0.992	0.989	0.984	0.975	0.961
κανονικοποιημένη μέση φασματική επιτάχυνση για 0.25<T<0.50 sec	ROCK	1.374	1.331	1.298	1.293	1.432
	SOIL	1.887	1.803	1.728	1.658	1.662
	SAR	1.373	1.354	1.331	1.282	1.161
κανονικοποιημένη μέση φασματική επιτάχυνση για 0.50<T<1.00 sec	ROCK	0.830	0.879	0.830	0.832	0.820
	SOIL	0.939	0.938	0.939	0.937	0.930
	SAR	1.131	1.067	1.131	1.126	1.134
						1.174

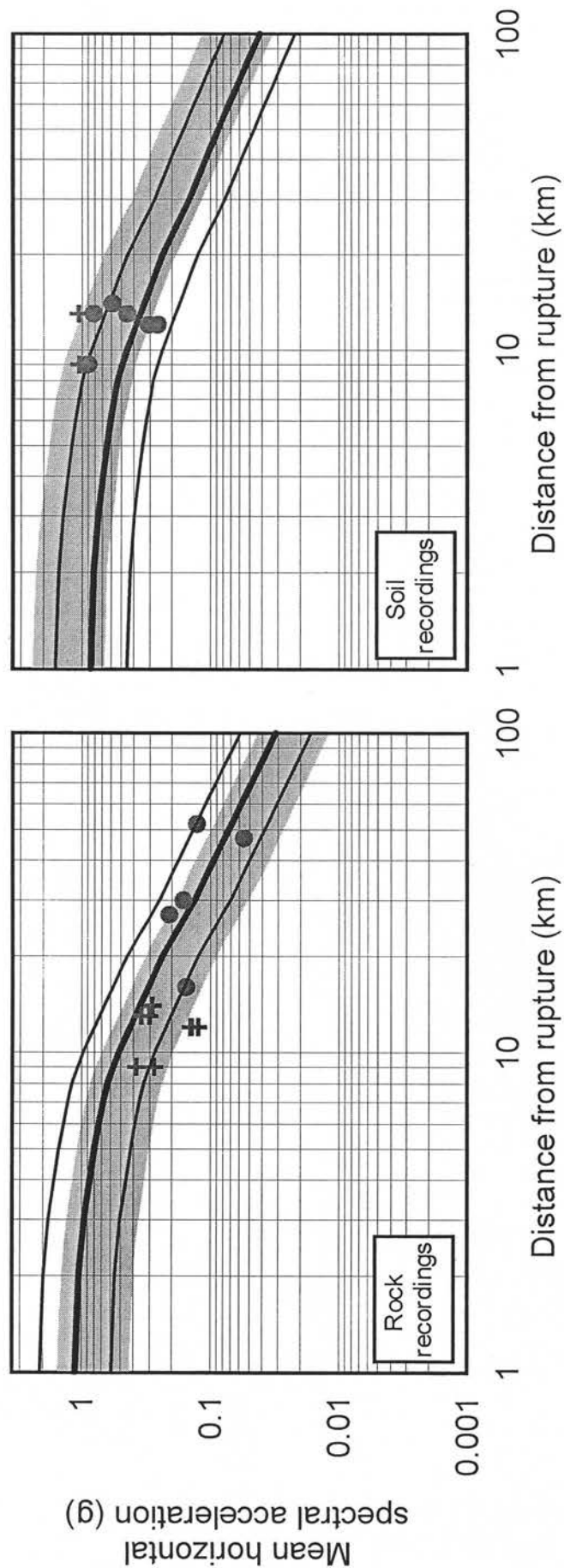
Πίνακας 2 Εκτιμώμενες μέσες παράμετροι της ισχυρής κίνησης για διαφορετικές αποστάσεις από την διάρρηξη



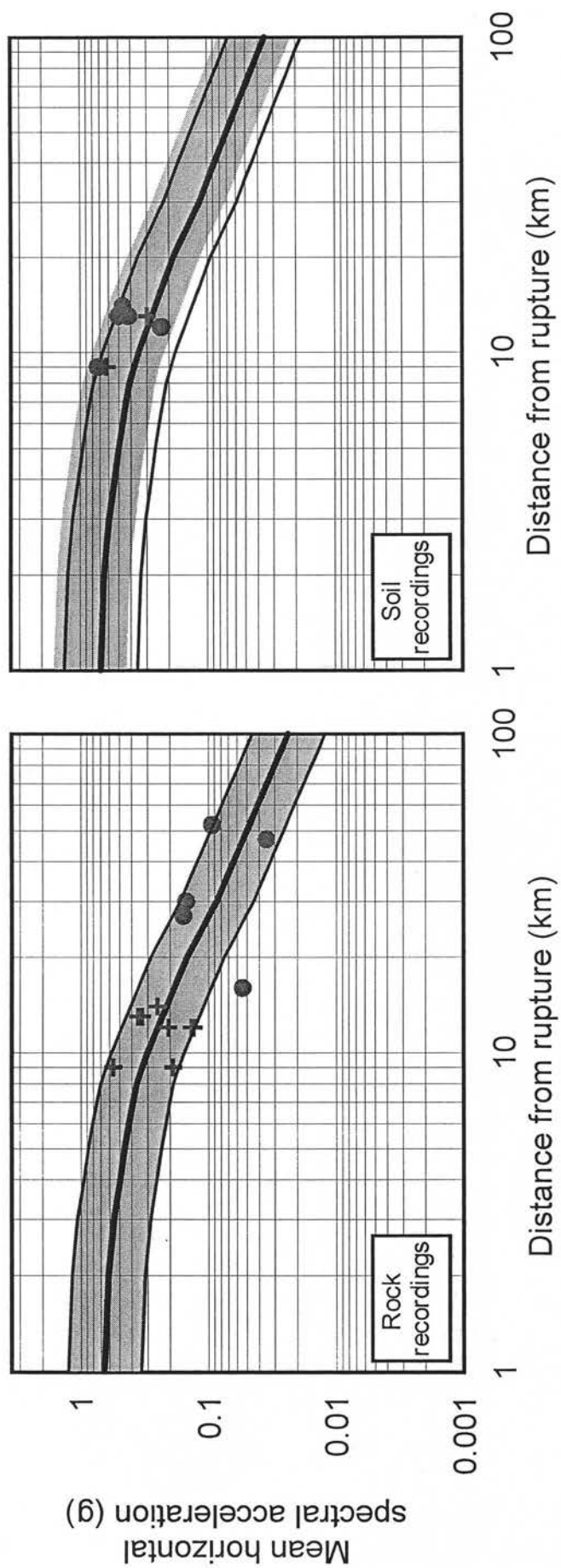
Σχήμα 3 Απομείωση της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης με την επικεντρική απόσταση



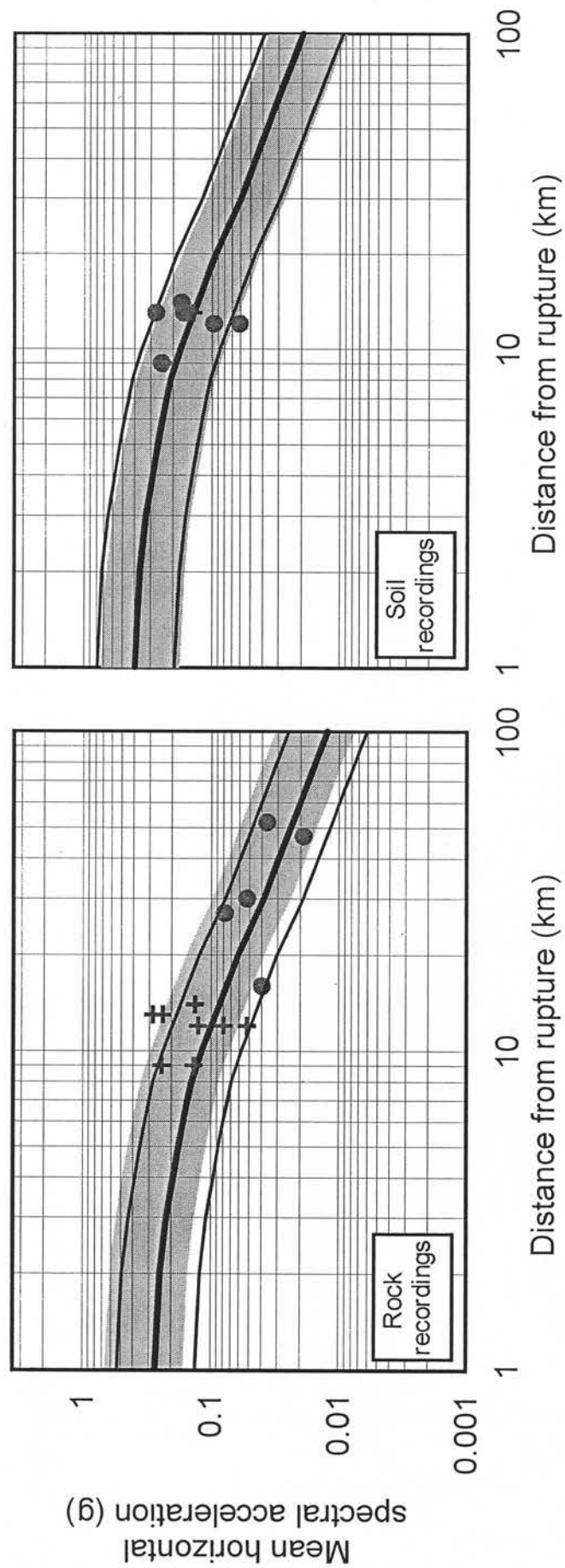
Σχήμα 4 Απομείωση της μέσης φασματικής επιτάχυνσης με την επικεντρική απόσταση
(εύρος περιόδων 0.01-0.1sec)



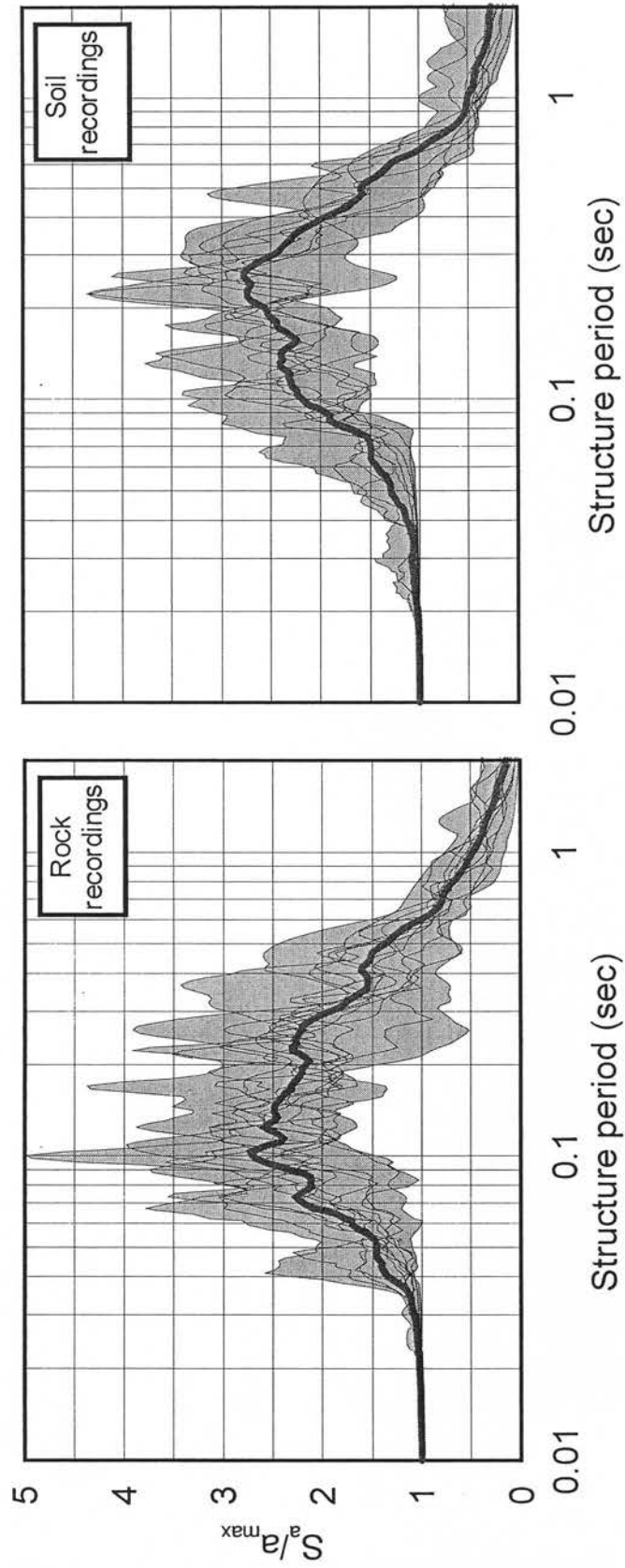
Σχήμα 5 Απομείωση της μέσης φασματικής επιτάχυνσης με την επικεντρική απόσταση
(εύρος περιόδων 0.1-0.25sec)



Σχήμα 6 Απομείωση της μέσης φασματικής επιτάχυνσης με την επικεντρική απόσταση
(εύρος περιόδων 0.25-0.50sec)



Σχήμα 7 Απομείωση της μέσης φασματικής επιτάχυνσης με την επικεντρική απόσταση (εύρος περιόδων 0.50-1.0sec)



Σχήμα 8 Ελαστικά φάσματα απόκρισης καταγραφών στην επιφάνεια του εδάφους

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

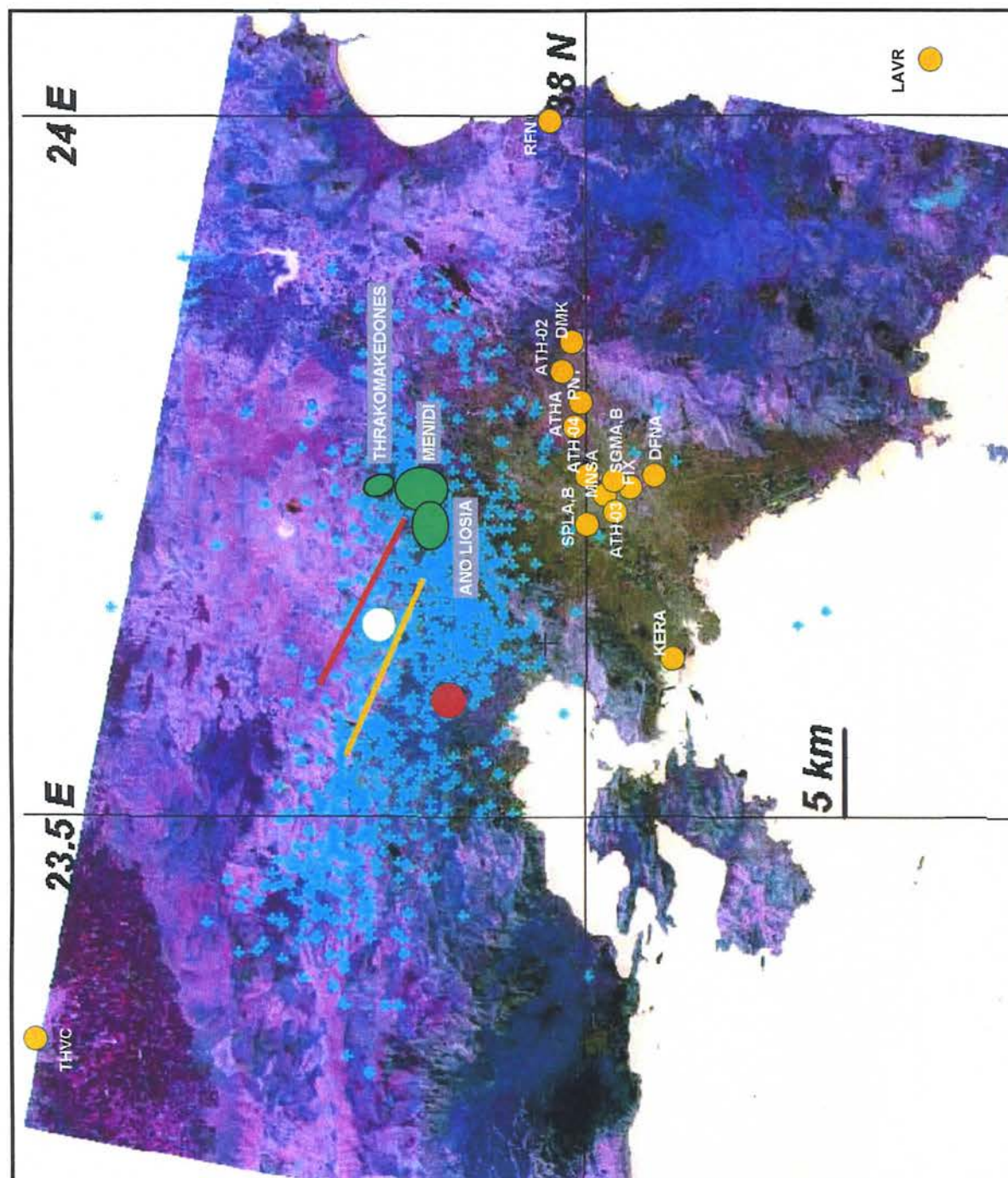
Την 7^η Σεπτεμβρίου 1999 ένας καταστροφικός σεισμός μεγέθους $M_s=5.9$ χτύπησε την ευρύτερη περιοχή των Αθηνών, προκαλώντας πολλές απώλειες σε ανθρώπινες ζωές αλλά και μεγάλες καταστροφές σε κτήρια, κυρίως στα βορειοδυτικά προάστια της Αθήνας (Άνω Λιόσια, Μενίδι κτλ). Την ισχυρή σεισμική κίνηση κατέγραψαν 17 επιταχυνσιογράφοι στο νομό Αττικής από τα μόνιμα δίκτυα του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, του ΙΤΣΑΚ και της ΔΕΗ. Δυστυχώς όμως, παρότι πολλά όργανα κατέγραψαν την ισχυρή σεισμική κίνηση, κανένα δεν ήταν εγκατεστημένο στην πλειόσειστη περιοχή.

Σκοπός αυτής της Ερευνητικής Εργασίας είναι η διερεύνηση της πιθανής επίδρασης του εδάφους και άλλων τοπικών συνθηκών στις καταγραφές αυτές. Συγκεντρώθηκαν λοιπόν, εκτός από τις ίδιες τις ψηφιοποιημένες καταγραφές και στοιχεία για τη σύσταση και τις ιδιότητες του εδάφους, την τοπογραφία και την φύση των κατασκευών στις οποίες ήταν τοποθετημένα τα όργανα. Σε πρώτη φάση έγινε διανυσματική σύνθεση των οριζοντίων συνιστωσών των καταγραφών ώστε να βρεθεί η μέγιστη συνισταμένη επιτάχυνση και ο προσανατολισμός της σε σχέση με το βορρά. Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο λόγος των οριζοντίων προς τα κατακόρυφα φάσματα απόκρισης (HVSr) και ο λόγος της μέγιστης ταχύτητας προς τη μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους (v_{max}/a_{max} ratio) για όλες τις καταγραφές. Αυτές οι δύο μέθοδοι οδηγούν σε μια πρώτη αποτίμηση των εδαφικών συνθηκών στις περιοχές των καταγραφών.

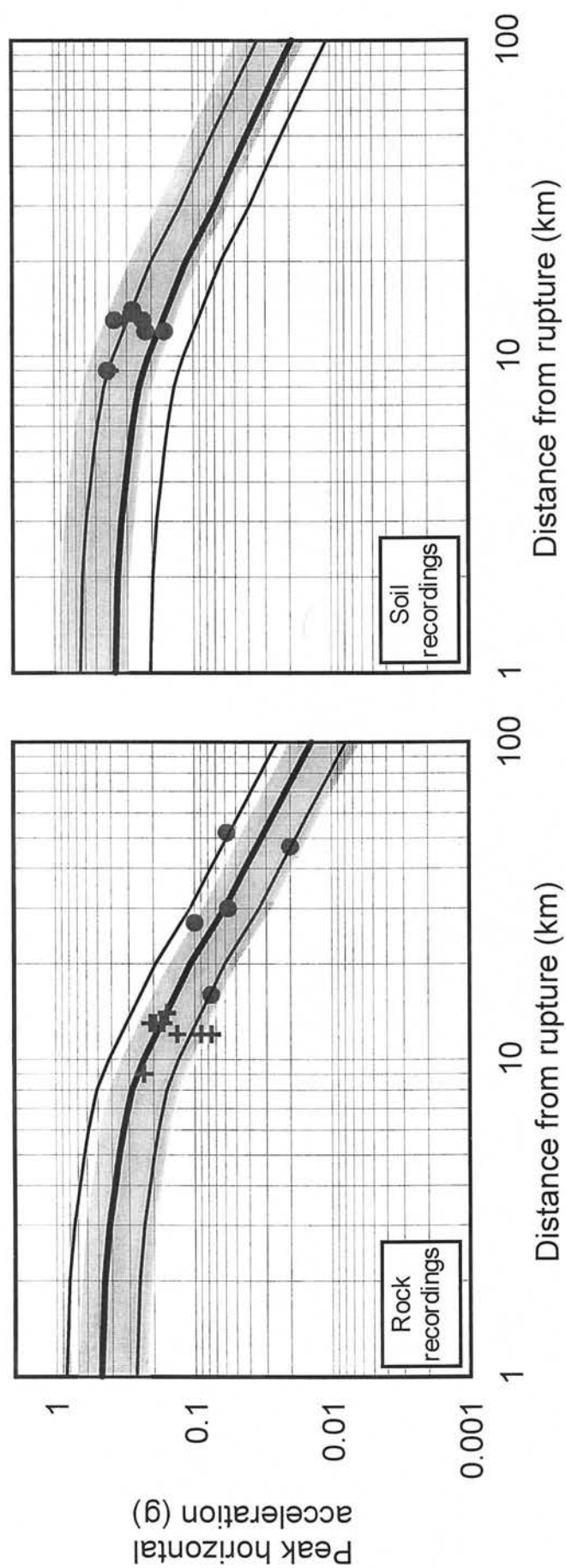
Το κύριο μέρος της Εργασίας περιλαμβάνει 1-Δ αναλύσεις σεισμικής απόκρισης εδάφους για 13 καταγραφές με το πρόγραμμα H/Y SHAKE91 με τις οποίες αποτιμάται η συμπεριφορά του εδάφους κατά την διέλευση των σεισμικών κυμάτων μέσω ενός απλοποιημένου προσομοιώματος. Με τις αναλύσεις αυτές εκτιμήθηκαν οι συνιστώσες της ισχυρής σεισμικής κίνησης στην επιφάνεια του εδάφους, στη διεπιφάνεια σεισμικού υποβάθρου-εδάφους και στην επιφάνεια του σεισμικού υποβάθρου. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των αναλύσεων σεισμικής απόκρισης και της μεθόδου HVSr χαρακτηρίζονται οι καταγραφές ανάλογα με τις τοπικές εδαφικές

συνθήκες, εντοπίζονται οι ενδείξεις αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής στις καταγραφές που δεν έγιναν σε ελεύθερο πεδίο και εκτιμάται η αξιοπιστία τους.

Οι καταγεγραμμένες και οι προερχόμενες από τις θεωρητικές αναλύσεις μέγιστες επιταχύνσεις στην επιφάνεια του εδάφους και στο αναδυόμενο βραχώδες υπόβαθρο, σε σταθμούς που μπορούν να θεωρηθούν ανεπηρέαστοι, συσχετίζονται με γνωστές σχέσεις απομείωσης της ισχυρής σεισμικής κίνησης εφαρμόσιμες για σεισμούς με κοινά χαρακτηριστικά με τον σεισμό της Αθήνας. Με βάση την συσχέτιση αυτή μπορούμε να εκτιμήσουμε την μέγιστη επιτάχυνση στην πλειόσειστη περιοχή για «εδαφικές» και «βραχώδεις» τοπικές συνθήκες.



Σχήμα 1 Χάρτης με τις θέσεις των καταγραφών



Σχήμα 2 Απομείωση της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης με την επικεντρική απόσταση

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
2. ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ.....	9
3. ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ	14
3.1 Γενικά.....	14
3.2 Λόγος Φασμάτων Απόκρισης (HVSR).....	14
3.3 Λόγος Μέγιστης Ταχύτητας προς Μέγιστη Επιτάχυνση (v_{max}/a_{max} method)	23
3.4 Συμπεράσματα	28
4. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΕΛΑΦΟΥΣ.....	52
4.1 Γενικά.....	52
4.2 Μεθοδολογία και Παραδοχές Αναλύσεων Σεισμικής Απόκρισης	53
4.3 Στοιχεία από τις Αναλύσεις Σεισμικής Απόκρισης	59
4.4 Αναλύσεις στη θέση Μοναστηράκι (MNSA).....	62
4.5 Αναλύσεις στη θέση Πεντάγωνο (PNT)	68
4.6 Αναλύσεις στη θέση Δάφνη (DFNA)	72
4.7 Αναλύσεις στη θέση Σύνταγμα (SGMA & SGMB).....	76
4.8 Αναλύσεις στη θέση Σεπόλια (SPLA & SPLB)	83
4.9 Αναλύσεις στη θέση Νέος Κόσμος (FIX).....	89
4.10 Αναλύσεις στη θέση Νέο Ψυχικό (ATHA)	93
4.11 Αναλύσεις στη θέση Γ.Υ.Σ. (ATH-04).....	97
4.12 Αναλύσεις στη θέση Κ.Ε.Δ.Ε. (ATH-03).....	101
4.13 Αναλύσεις στη θέση Χαλάνδρι (ATH-02).....	105
4.14 Αναλύσεις στη θέση Κερατσίνι (KERA).....	109
4.14 Συμπεράσματα από τις αναλύσεις σεισμικής απόκρισης	113
5. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ	127
5.1 Γενικά.....	127
5.2 Αξιολόγηση Αναλύσεων και Καταγραφών	127
5.3 Σχέσεις Απομείωσης της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης (Attenuation Relationships)	134
5.4 Τελικές Παρατηρήσεις.....	138
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	139
Α. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α-Αναλυτικά Αποτελέσματα από τις Αναλύσεις Σεισμικής Απόκρισης	
Β. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β-Πίνακας Λιθολογίας	
Γ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ-Βιβλιογραφία-Παραπομπές	

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο καταστροφικός σεισμός της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 που έπληξε την Αθήνα προκάλεσε μεγάλες απώλειες σε ανθρώπινα θύματα και υποδομές. Οι πολλές καταγραφές της ισχυρής σεισμικής κίνησης που έγιναν στο νομό Αττικής (17 συνολικά) παρέχουν αρκετά στοιχεία για την αξιολόγηση των επιπτώσεων του σεισμού, αν καμία δεν έγινε στην πλειόσειστη περιοχή στις βορειοδυτικές συνοικίες της Αθήνας.

Η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην ισχυρή σεισμική κίνηση είναι αδιαμφισβήτητη και ο σημαντικός της ρόλος έχει υπογραμμισθεί δυστυχώς από καταστροφικά γεγονότα (π.χ. σεισμός του Μεξικού 1985). Τα στοιχεία που προκύπτουν από την εργασία αυτή αποτελούν την βάση για την εκτίμηση της επιτάχυνσης του εδάφους στις πλειόσειστες περιοχές όπου δεν υπήρχαν καταγραφές.

Η εκτίμηση λοιπόν της επίδρασης του εδάφους και των ιδιαίτερων τοπικών συνθηκών στις καταγραφές του σεισμού της Αθήνας μπορεί να επίσης να παρέχει αρκετά σημαντικά στοιχεία για τα εδάφη της περιοχής και την συμπεριφορά τους κατά την διέλευση σεισμικών κυμάτων. Τα στοιχεία που προκύπτουν από την εργασία αυτή αποτελούν επίσης την βάση για περαιτέρω αναλύσεις σε συγκεκριμένα θέματα (π.χ. μικροζωνικές μελέτες) που συσχετίζονται άμεσα με εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου στην πυκνοκατοικημένη περιοχή των Αθηνών.

Θα θέλαμε να αναγνωρίσουμε την σημαντική συνεισφορά κάποιων ανθρώπων και φορέων και να ευχαριστήσουμε:

- Το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών για τις καταγραφές της ισχυρής σεισμικής κίνησης από το δίκτυο που έχει αναπτύξει σε συνεργασία με την Αττικό Μετρό Α.Ε. και ιδιαίτερα τους κκ. Ι. Καλογερά και Γ. Παπαδόπουλο για την βοήθεια τους στο σεισμολογικό μέρος.

- Την Αττικό Μετρό Α.Ε. για την παροχή γεωτεχνικών στοιχείων από τις μελέτες για την κατασκευή του Μετρό και πληροφοριακών στοιχείων για τους σταθμούς όπου υπήρχαν εγκατεστημένοι επιταχυνσιογράφοι.
- Το Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ) για της καταγραφές της ισχυρής σεισμικής κίνησης από το δίκτυο του στην Αθήνα και ιδιαίτερα τον κ. Ν. Θεοδουλίδη για τις συμβουλές του στο σεισμολογικό μέρος.
- Την ΔΕΗ και συγκεκριμένα τον κ. Κ. Σκούρτη για τις καταγραφές του δικτύου που διατηρούν στα εργοστάσια της ΔΕΗ.
- Τον Υποψήφιο Διδάκτορα του ΕΜΠ κ. Α. Αντωνίου για την πολύτιμη βοήθεια του στη συλλογή των γεωτεχνικών στοιχείων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Την 7η Σεπτεμβρίου 1999 και ώρα 11:56:50 (GMT) ένας καταστροφικός σεισμός με μέγεθος $M_s=5.9$ (σύμφωνα με το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών) χτύπησε την ευρύτερη περιοχή της πόλης των Αθηνών. Ήταν ο πρώτος ισχυρός σεισμός που έχει αναφερθεί σε τόσο κοντινή επικεντρική απόσταση από το ιστορικό κέντρο των Αθηνών και ένας από τους καταστροφικότερους σεισμούς που έχουν καταγραφεί ποτέ στην Ελλάδα. Περισσότερα από 40 κτήρια κατέρρευσαν, 143 θάνατοι και εκατοντάδες τραυματισμοί αποδόθηκαν στο σεισμό. Οι περισσότερες καταστροφές συνέβησαν στα βορειοδυτικά προάστια των Αθηνών σε απόσταση 10-15Km από το κέντρο της πόλης στους πρόποδες της Πάρνηθας (Άνω Λιόσσια, Αχαρνές, Μενίδι, Μεταμόρφωση, Θρακομακεδόνες κτλ). Η ένταση του σεισμού στην πλειόσειστη αυτή περιοχή έφτασε τους VIII και τοπικά IX βαθμούς της κλίμακας MM.

Η αρχική εκτίμηση του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου και του Γεωφυσικού Εργαστηρίου του Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης τοποθετούσε το επίκεντρο στο βόρειο τμήμα του ρήγματος της Φυλής (38.15°N, 23.62°E) που εντοπίζεται στους νοτιοδυτικούς πρόποδες της Πάρνηθας. Για μεγαλύτερη ακρίβεια το επίκεντρο ξαναυπολογίστηκε, προσθέτοντας στα δεδομένα του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου τους χρόνους αφίξεως από τα δίκτυα σειсмоγράφων του Γεωφυσικού Εργαστηρίου του Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης και της ΔΕΗ και 9 καταγραφές ισχυρής σεισμικής κίνησης από το δίκτυο του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου στην περιοχή των Αθηνών. Ο ακριβής υπολογισμός τοποθετεί το επίκεντρο περίπου 15km ΝΔ από το αρχικό, με συντεταγμένες 38.10°N, 23.56°E και εστιακό βάθος περίπου 16.8km. (Papadopoulos et al. 1999) Η θέση του επικέντρου και του ρήγματος της Φυλής φαίνονται στο Σχήμα 1.1

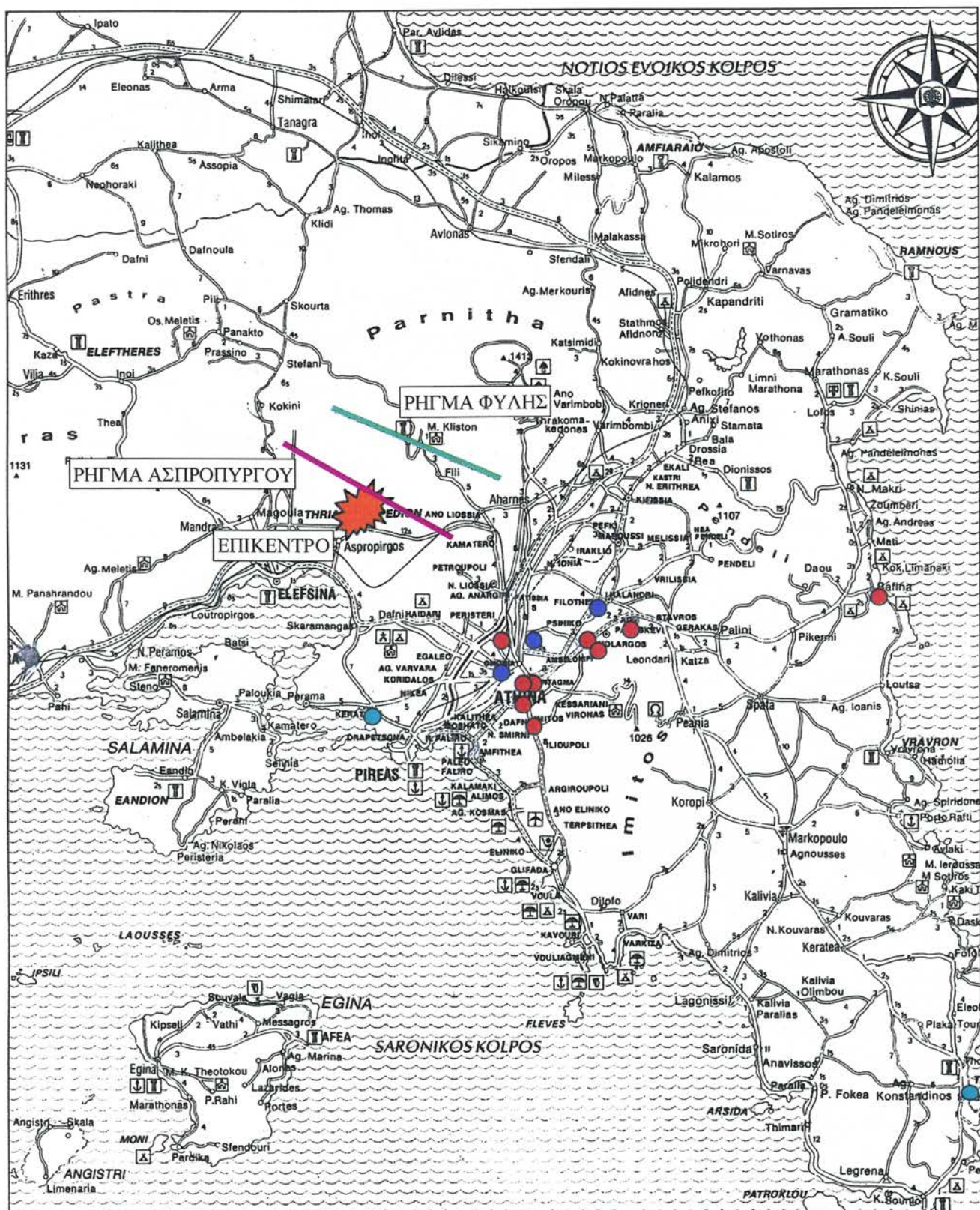
Ο μηχανισμός γένεσης, όπως προτείνεται από το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, είναι κανονική διάρρηξη με τις επιφάνειες του ρήγματος να έχουν διευθύνσεις 113°N και 290°E με βύθιση 56° προς τα ΒΑ και 39° προς τα ΝΔ αντίστοιχα. Ο μηχανισμός αυτός βρίσκεται σε συμφωνία με άλλες επιλύσεις που προτάθηκαν (Papadopoulos et

al. 1999). Περισσότεροι από 1200 μετασεισμοί καταγράφηκαν από το φορητό δίκτυο που αναπτύχθηκε στη περιοχή μετά τον κύριο σεισμό

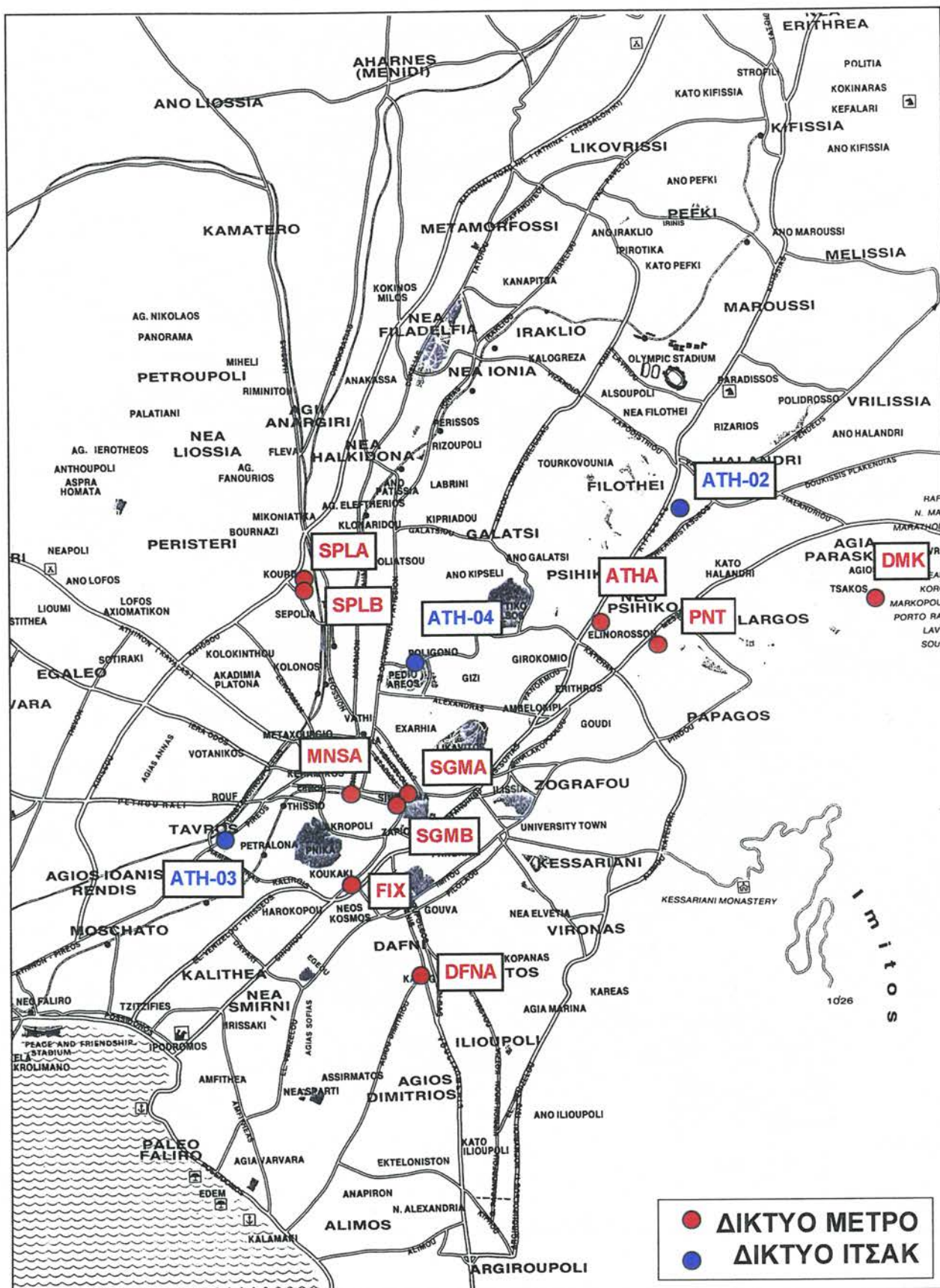
Το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Αθηνών σε συνεργασία με την Αττικό Μετρό Α.Ε. είχαν αναπτύξει ένα δίκτυο ψηφιακών επιταχυνσιογράφων στην Αθήνα, 10 από τους οποίους κατέγραψαν τον κύριο σεισμό. Οι 6 καταγραφές έχουν γίνει μέσα σε σταθμούς του Αττικού Μετρό σε βάθη από 7 έως 26 μέτρα από την επιφάνεια. Επίσης 6 καταγραφές στην επιφάνεια είχαμε από το δίκτυο του ΙΤΣΑΚ (στο Χαλάνδρι, στη Κυψέλη και στη Καλλιθέα) και από το δίκτυο της ΔΕΗ (στα εργοστάσια της στο Κερατσίνι, στο Αλιβέρι και στο Λαύριο). Τον κύριο σεισμό κατέγραψε επίσης ένας επιταχυνσιογράφος του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου στην Ραφήνα. Συνολικά δηλαδή είχαμε 17 καταγραφές ισχυρής σεισμικής κίνησης. Οι μέγιστες τιμές των επιταχύνσεων για τις καταγραφές αυτές, το βάθος στο οποίο έγιναν και οι επικεντρικές τους αποστάσεις φαίνονται στον παρακάτω πίνακα, ενώ ακολουθούν 2 χάρτες με τις θέσεις τους. Στο σχήμα 1.3 φαίνονται οι μέγιστες επιταχύνσεις των 11 καταγραφών που έγιναν στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της επικεντρικής τους απόστασης.

Πίνακας 1.1 Μέγιστες τιμές επιταχύνσεως κάθε καταγραφής

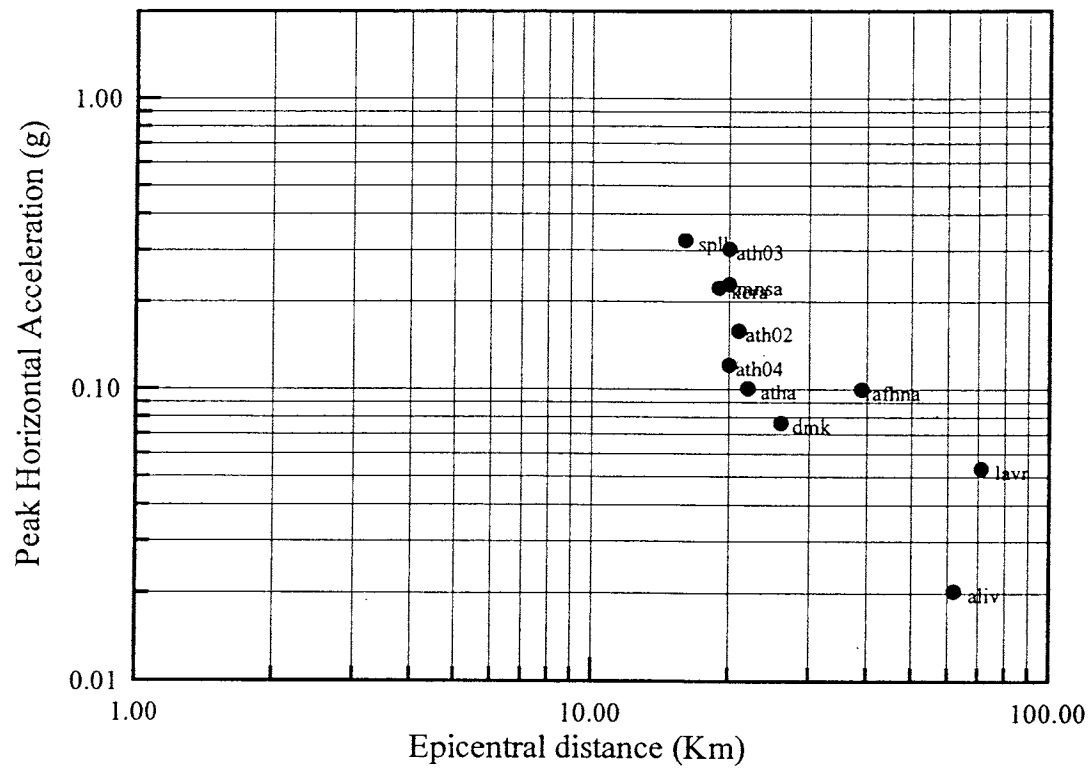
Περιοχή	Κωδικός σταθμού	Βάθος οργάνου (m)	Επικεντρική Απόσταση (Km)	Επιτάχυνση LONG	Επιτάχυνση TRANS	Επιτάχυνση VERT
Δημόκριτος	DMK	0	26	0.04592	0.07648	0.03756
Νέος Κόσμος (ΦΙΞ)	FIX	15	22	0.08582	0.12422	0.04562
Μοναστηράκι	MNSA	0	20	0.22926	0.51166	0.16203
Πεντάγωνο	PNT	15	23	0.08813	0.07906	0.05527
Νέο Ψυχικό	ATHA	0	22	0.08358	0.1006	0.11425
Δάφνη	DFNA	13.5	23	0.0445	0.08013	0.04083
Σύνταγμα	SGMA	7	21	0.14874	0.23899	0.05404
Σύνταγμα	SGMB	26	21	0.11091	0.08738	0.08862
Σεπόλια	SPLA	13	16	0.25476	0.22083	0.08216
Σεπόλια	SPLB	0	16	0.32445	0.31226	0.19215
Χαλάνδρι	ATH-02	0	21	0.11016	0.15857	0.09222
Κ.Ε.Δ.Ε.	ATH-03	0	20	0.2636	0.30294	0.15668
Γ.Υ.Σ.	ATH-04	0	20	0.12087	0.10997	0.05255
Ραφήνα	RFN	0	39	0.08083	0.09981	0.03004
Αλιβέρι	ALIB	0	62	0.02035	0.01655	0.01014
Κερασίни	KERA	0	19	0.22276	0.18609	0.15503
Λαύριο	LAVR	0	71	0.04239	0.0533	0.04814



Σχήμα 1.1 Θέση του επικέντρου και των επιταχυνσιογράφων που κατέγραψαν τον κύριο σεισμό στο Νομό Αττικής



Σχήμα 1.2 Θέσεις επιταχυνσιογράφων στην ευρύτερη περιοχή Αθηνών



Σχήμα 1.3 Μέγιστες καταγραφές επιταχύνσεων στην επιφάνεια και αντίστοιχες
επικεντρικές αποστάσεις.

2. ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ

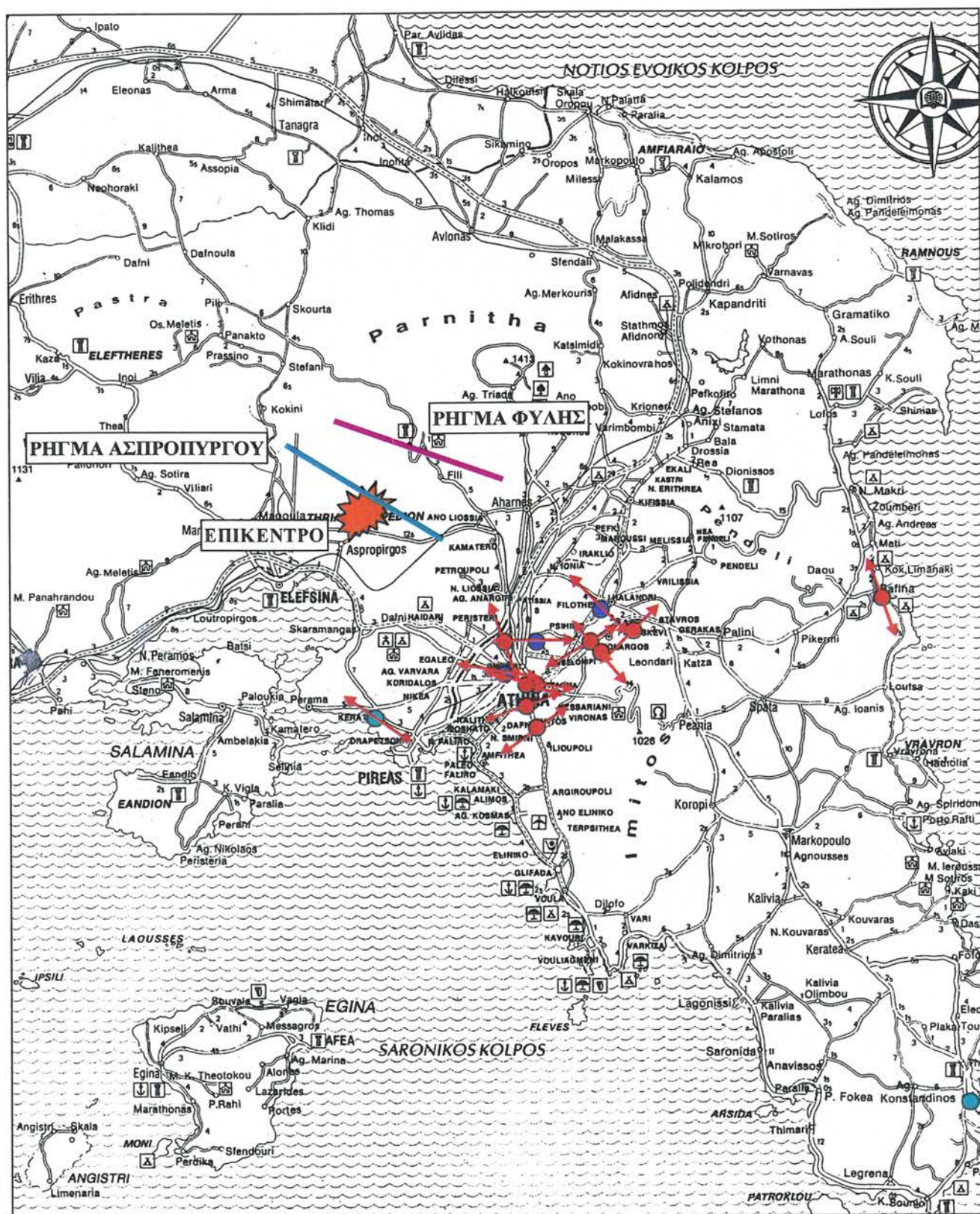
Οι επιταχυνσιογράφοι που καταγράφουν την σεισμική κίνηση μας δίνουν δυο οριζόντιες και μια κατακόρυφη συνιστώσα της επιτάχυνσης. Οι δυο οριζόντιες (Long και Trans) συνιστώσες είναι κάθετες μεταξύ τους και ο προσανατολισμός τους σε σχέση με τον βορρά μπορεί να μετρηθεί με πυξίδα. Ο προσανατολισμός αυτός δεν είναι ο ίδιος για όλα τα όργανα που κατέγραψαν το σεισμό και συνήθως εξαρτάται από την κατασκευή που έχει τοποθετηθεί.

Υπολογίζοντας το διανυσματικό άθροισμα των δυο οριζόντιων καταγραφών, μπορούμε να υπολογίσουμε την μέγιστη συνισταμένη οριζόντια επιτάχυνση (Kramer 1996). Η διανυσματική άθροιση γίνεται με ένα πρόγραμμα H/Y σε γλώσσα Fortran. Η διεύθυνση της συνισταμένης επιτάχυνσης γενικά δεν συμπίπτει με καμία από τις αρχικές διευθύνσεις. Προκύπτει έτσι για όλες τις καταγραφές μια μέγιστη και μια ελάχιστη τιμή οριζόντιας επιτάχυνσης και οι αντίστοιχες διευθύνσεις όπου αυτές συμβαίνουν. Θεωρητικά οι διευθύνσεις της μέγιστης και της ελάχιστης επιτάχυνσης θα έπρεπε να διαφέρουν μεταξύ τους κατά 90° . Τα αποτελέσματα όμως μας δείχνουν ότι στην πράξη δεν συμβαίνει πάντα αυτό. Πιθανόν αυτό να γίνεται γιατί υπεισέρχονται και άλλοι παράγοντες στις καταγραφές των δύο κατευθύνσεων (επηρεασμός από τις κατασκευές στις οποίες ήταν τοποθετημένα τα όργανα, τις τοπικές γεωλογικές και γεωφυσικές συνθήκες κτλ). Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς.

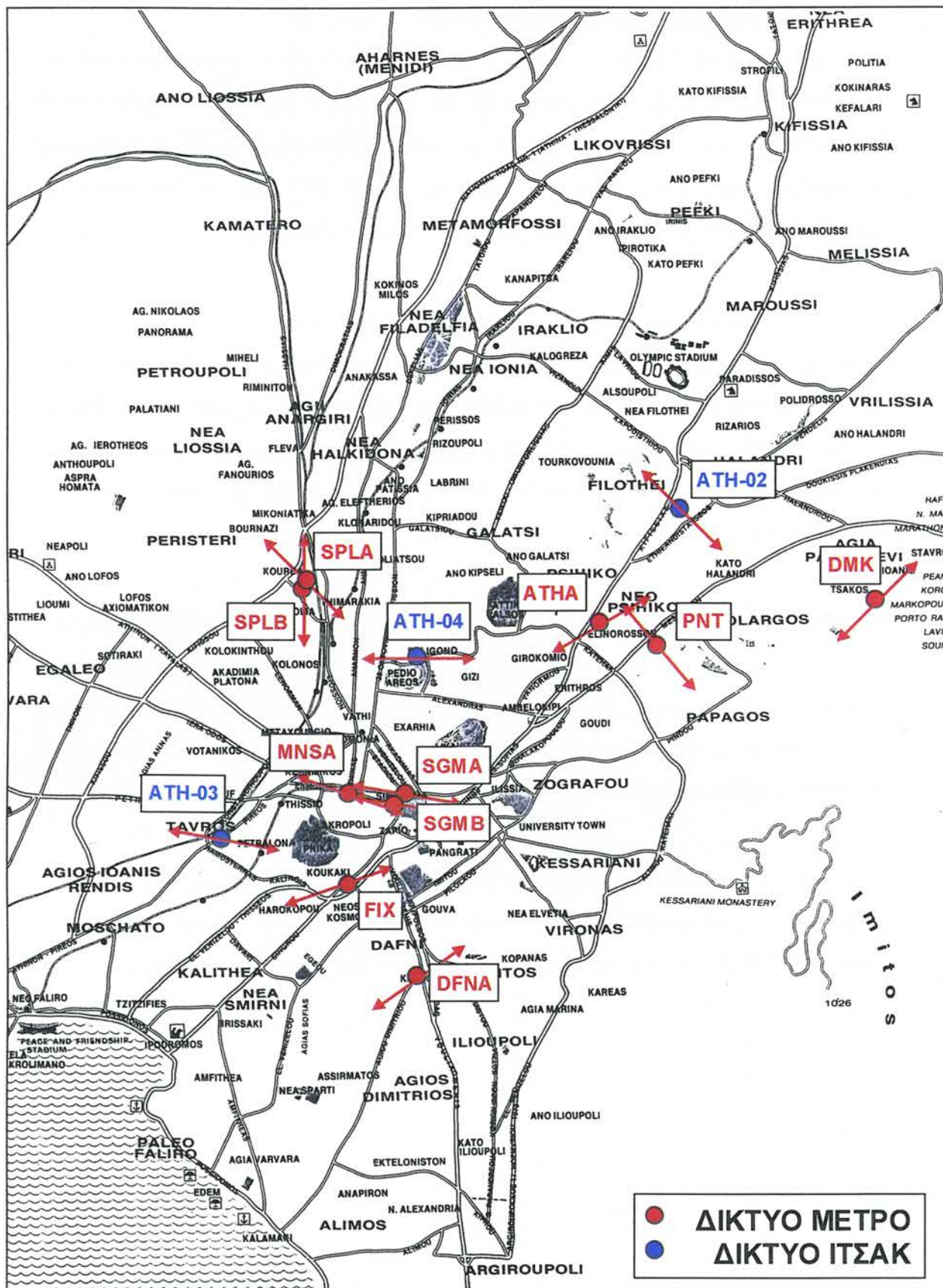
Εκτός από την μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης, ενδιαφέρον έχει και η διεύθυνση στην οποία αυτή συμβαίνει καθώς σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία (μηχανισμό γένεσης σεισμού, κατανομή βλαβών κτλ.) πιθανόν να μπορεί να μας δώσει στοιχεία κατευθυντικότητας κατά την διάδοση των σεισμικών κυμάτων. Οι διευθύνσεις αυτές φαίνονται στους παρακάτω χάρτες σε σχέση με το ρήγμα που έδωσε τον σεισμό και το με επίκεντρο.

Πίνακας 2.1 Κατευθύνσεις μέγιστης-ελάχιστης συνισταμένης επιτάχυνσης

Περιοχή	Κωδικός σταθμού	Βάθος οργάνου (m)	Λόγος της μέγιστης οριζόντιας προς την κατακόρυφη επιτάχυνση	Μέγιστη τιμή επιτάχυνσης (g)	σε προσανατολισμό (Deg)	Ελάχιστη τιμή επιτάχυνσης (g)	σε προσανατολισμό (Deg)
Δημόκριτος	DMK	0	0.5	0.076	45	0.044	150
Νέος Κόσμος (ΦΙΞ)	FIX	15	0.34	0.134	70	0.082	175
Μοναστηράκι	MNSA	0	0.70(?)	0.511	110	0.205	30
Πεντάγωνο	PNT	15	0.63	0.088	140	0.073	175
Νέο Ψυχικό	ATHA	0	1.09(?)	0.105	60	0.08	160
Δάφνη	DFNA	13.5	0.50	0.08	55	0.037	135
Σύνταγμα	SGMA	7	0.23	0.239	100	0.137	175
Σύνταγμα	SGMB	26	0.66	0.135	100	0.087	45
Σεπόλια	SPLA	13	0.28	0.288	135	0.159	50
Σεπόλια	SPLB	0	0.46	0.413	180	0.204	110
Χαλάνδρι	ATH-02	0	0.57	0.161	135	0.088	15
Κ.Ε.Δ.Ε.	ATH-03	0	0.43	0.368	100	0.195	15
Γ.Υ.Σ.	ATH-04	0	0.40	0.131	90	0.093	140
Ραφήνα	RFN	0	0.30	0.099	160	0.072	30
Αλιβέρι	ALIB	0	0.5	0.020		0.015	
Κερατσίνι	KERA	0	0.57	0.273	125	0.175	60
Λαύριο	LAVR	0	0.83	0.058		0.036	



Σχήμα 2.1 Διευθύνσεις της μέγιστης συνισταμένης επιτάχυνσης καταγραφών στο νομό Αττικής.



Σχήμα 2.2 Διευθύνσεις της μέγιστης συνισταμένης επιτάχυνσης καταγραφών στην ευρύτερη περιοχή Αθηνών.

Από ότι φαίνεται από τους παραπάνω χάρτες, δεν προκύπτει συνέπεια στη διεύθυνση των επιταχύνσεων. Πάντως οι καταγραφές που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών δίνουν μια μέση διεύθυνση γύρω στις $N101^\circ$ (η μέτρηση γίνεται πάντα δεξιόστροφα από τον βορρά), αλλά με σημαντική διασπορά. Οι κατευθύνσεις διάρρηξης όπως είδαμε είναι 56° προς τα ΒΑ και 39° προς τα ΝΔ, οπότε και σχηματίζουν με τη μέση διεύθυνση γωνίες 45° και 62° αντίστοιχα.

Η μέση διεύθυνση της μέγιστης επιτάχυνσης δείχνει λοιπόν μια κατευθυντικότητα προς τα Α-ΝΑ, αν λάβουμε υπ' όψιν μας φυσικά και τον μηχανισμό γένεσης του σεισμού και πιο συγκεκριμένα το γεγονός ότι η διάρρηξη του ρήγματος έγινε προς τα Ν-ΝΔ. Αντίστοιχα, οι μεγαλύτερες βλάβες παρατηρήθηκαν σε μικρές σχετικά αποστάσεις Α-ΝΑ του ρήγματος της Φυλής που έδωσε και τον σεισμό (περιοχές Αχαρνών, Μενιδίου κτλ).

Η μέθοδος αυτή από μόνη της δεν μπορεί παρά να μας δώσει μόνο χονδρικές εκτιμήσεις, χωρίς να έχει ιδιαίτερη συνέπεια σε μικροκλίμακα. Το γεγονός αυτό πιθανόν να οφείλεται και στην επιρροή των κατασκευών (σταθμοί του Μετρό) μέσα στις οποίες ήταν τοποθετημένα τα όργανα. Δεν παύει όμως, σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία πάντοτε, να προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες.

Από την άλλη, οι μέγιστες τιμές της συνισταμένης επιτάχυνσης που υπολογίζονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συσχετίσεις της μέγιστης επιτάχυνσης με την επικεντρική απόσταση για την πρόβλεψη των τιμών της κοντά στο επίκεντρο.

3. ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

3.1 Γενικά

Δεδομένης της μεγάλης σημασίας της εκτίμησης της απόκρισης του εδάφους σε ισχυρούς σεισμούς για την τεχνική σεισμολογία, ελλείψει λεπτομερών γεωτεχνικών στοιχείων, έχουν αναπτυχθεί και προταθεί τρόποι εκτίμησης που χρησιμοποιούν μόνο τις καταγραφές της ισχυρής σεισμικής κίνησης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουν χρησιμοποιηθεί οι τεχνικές του λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη φασματική απόκριση (Horizontal-to-Vertical spectral ratio method –HVSr) καθώς και του λόγου της μέγιστης ταχύτητας προς την μέγιστη επιτάχυνση (v_{max}/a_{max} ratio method). (Donovan 1989) ενώ γίνεται στη συνέχεια και μια προσπάθεια συσχέτισης των αποτελεσμάτων των μεθόδων αυτών.

Χρησιμοποιήθηκαν οι 17 καταγραφές του κύριου σεισμού, 11 από τις οποίες έγιναν επιφανειακά και 6 σε βάθος από 7 έως 26 μέτρα. Φυσικά οι μη-επιφανειακές καταγραφές δεν μπορούν να συγκριθούν άμεσα με τις επιφανειακές. Από τις καταγραφές αυτές προκύπτουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την εφαρμογή των μεθόδων αυτών (φάσματα απόκρισης, μέγιστες τιμές επιταχύνσεων και ταχυτήτων κτλ). Όλες οι καταγραφές έχουν περαστεί από φίλτρο (Low pass filter) 25.0-27.0 Hz το οποίο όμως δεν επηρεάζει συχνότητες της ισχυρής σεισμικής κίνησης του ενδιαφέροντός μας.

3.2 Λόγος Φασμάτων Απόκρισης (HVSr)

Η μέθοδος αυτή για την εκτίμηση των δυναμικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους χρησιμοποιεί τον λόγο των φασμάτων απόκρισης των οριζοντίων συνιστωσών της ισχυρής σεισμικής κίνησης προς την κατακόρυφη. Είναι παρόμοια με την «receiver-function technique», μέθοδο που προτάθηκε από τον Langston (1979) για να βρεθεί η κατανομή των ταχυτήτων στον φλοιό της Γης από το λόγο των φασμάτων απόκρισης οριζοντίων και κατακόρυφων συνιστωσών σεισμικών κυμάτων P που είχαν διανύσει

μεγάλη εστιακή απόσταση (teleseismic P waves). Η μέθοδος αυτή υποθέτει ότι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες δεν επηρεάζουν σημαντικά την κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης.

Μια παρόμοια μέθοδος έχει προταθεί από τον Nakamura, η οποία βασίζει την εκτίμηση των δυναμικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους στο λόγο των οριζόντιων προς το κατακόρυφο φάσμα απόκρισης καταγραφών εδαφικού θορύβου (Nakamura 1989). Η μέθοδος αυτή έχει ευρέως διαδοθεί για τον απλό και φτηνό υπολογισμό της θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας του εδάφους.

Εφαρμογές της μεθόδου HVSR και η σύγκρισή της με κλασσικά φάσματα απόκρισης (συμπεριλαμβανομένων καταγραφών στο ίδιο σημείο ταυτόχρονα και στην επιφάνεια και στο υπέδαφος) και με θεωρητικές μεθόδους 1-Δ ανάλυσης έδειξαν ότι η απόλυτη τιμή του HVSR εξαρτάται από το είδος των προσπιπόντων κυμάτων. Συνεπώς ο απόλυτος βαθμός ενίσχυσης δεν μπορεί να υπολογιστεί μονοσήμαντα από την μέθοδο HVSR. Παρ' όλα αυτά σε πολλές περιπτώσεις έχει αποδειχθεί ότι δίνει με ικανοποιητική ακρίβεια τις ιδιοσυχνότητες και κυρίως την πρώτη ιδιοσυχνότητα του εδαφικού προφίλ, στην κορυφή του οποίου έχουμε την καταγραφή. Έτσι, σε συνδυασμό με την απλότητα της, έχει βρει ευρεία εφαρμογή και στον Ελληνικό χώρο (Dimitriu et al. 1999, Theodulidis and Bard 1995, Theodulidis et al. 1996, Bonilla et al. 1997). Έχει επίσης αποδειχθεί ότι η μέθοδος είναι εν πολλοίς ανεξάρτητη από το μέγεθος του σεισμού, την επικεντρική απόσταση και το βάθος οπότε είναι και ανεξάρτητη από την ένταση της σεισμικής κίνησης, τουλάχιστον σε καταγραφές μέσης έως μεγάλης επικεντρικής απόστασης που έχουν αναλυθεί (Yamazaki and Ansary 1997).

Στη περίπτωση μας έχουν χρησιμοποιηθεί οι 11 καταγραφές ελευθέρου πεδίου και οι 6 καταγραφές σε βάθος του κυρίου σεισμού από τις οποίες έχει υπολογιστεί ο λόγος των κανονικοποιημένων φασμάτων απόκρισης (NHVSR). Κανονικοποιούμε τον λόγο των φασμάτων ώστε η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης να μην παίζει ρόλο, μιας και η οριζόντια και η κατακόρυφη συνιστώσα της ισχυρής σεισμικής κίνησης απομειώνονται με διαφορετικούς ρυθμούς. Στις 6 αυτές καταγραφές έχει γίνει πρόβλεψη του λόγου NHVSR στην επιφάνεια μετά από 1-Δ ανάλυση διάδοσης

σεισμικών κυμάτων (πρόγραμμα SHAKE) μέσα από το εδαφικό προφίλ της περιοχής και την παραδοχή ότι η κατακόρυφη συνιστώσα της καταγραφής δεν επηρεάζεται κατά την διάδοσή της μέσα από τις εδαφικές στρώσεις. Οι λεπτομέρειες σχετικά με την μεθοδολογία εκτέλεσης των αναλύσεων αναπτύσσονται διεξοδικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Από την μορφή του λόγου των κανονικοποιημένων φασματικών αποκρίσεων μπορούμε να κάνουμε προβλέψεις για την κύρια ιδιοσυχνότητα και τον γεωλογικά χαρακτηριστικά του εδαφικού προφίλ. Στον παρακάτω πίνακα έχουμε τους σταθμούς από όπου είχαμε καταγραφές, το βάθος των καταγραφών και τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές του NHVSR.

Πίνακας 3.1 Μέγιστοι λόγοι NHVSR και βάθος κάθε καταγραφής

Περιοχή	Κωδικός σταθμού	Βάθος οργάνου	NHVSR max	
			LONG	TRANS
Δημόκριτος	DMK	Επιφάνεια	1.3259	1.4745
Νέος Κόσμος (ΦΙΞ)	FIX	15 m	1.9727	1.9812
Μοναστηράκι	MNSA	Επιφάνεια	6.2183	3.8077
Πεντάγωνο	PNT	15 m	1.9898	2.8188
Νέο Ψυχικό	ATHA	Επιφάνεια	3.7398	3.4761
Δάφνη	DFNA	13.5 m	2.1489	1.8165
Σύνταγμα	SGMA	7 m	1.8184	1.6775
Σύνταγμα	SGMB	26 m	4.2876	3.8719
Σεπόλια	SPLA	13 m	2.3663	1.7569
Σεπόλια	SPLB	Επιφάνεια	4.4639	4.852
Χαλάνδρι	ATH-02	Επιφάνεια	3.7733	2.3631
Κ.Ε.Δ.Ε. (Πειραιώς)	ATH-03	Επιφάνεια	2.8015	3.1584
Γ.Υ.Σ. (Κυψέλη)	ATH-04	Επιφάνεια	2.709	2.0873
Ραφήνα	RFN	Επιφάνεια	2.1464	1.6711
Αλιβέρι	ALIB	Επιφάνεια	1.5604	2.3574
Κερασίνη	KERA	Επιφάνεια	3.25326	3.32352
Λαύριο	LAVR	Επιφάνεια	2.5	2.3078

Είναι προφανές πως οι τιμές των λόγων των επιφανειακών καταγραφών και των καταγραφών σε βάθος δεν μπορούν να συγκριθούν. Οι προβλεπόμενες τιμές για τους λόγους αυτών των καταγραφών στην επιφάνεια φαίνονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 3.2 Προβλεπόμενοι μέγιστοι λόγοι NHVSR στην επιφάνεια του εδάφους για τις καταγραφές που έγιναν σε βάθος

Περιοχή	Κωδικός σταθμού	Βάθος οργάνου	Predicted NHVSR max	
			LONG	TRANS
Νέος Κόσμος (ΦΙΞ)	FIX	15 m	2.400305	1.5451
Πεντάγωνο	PNT	15 m	2.204539	1.997884
Δάφνη	DFNA	13.5 m	3.013091	1.761333
Σύνταγμα	SGMA	7 m	1.656531	1.377234
Σύνταγμα	SGMB	26 m	4.506511	5.717793
Σεπόλια	SPLA	13 m	2.163068	1.814456

Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται τα διαγράμματα για κάθε καταγραφή (πραγματικά και προβλεπόμενα στην επιφάνεια όπου η καταγραφή έχει γίνει σε βάθος). Στα σχήματα φαίνονται τα φάσματα απόκρισης για τις δυο οριζόντιες (Long και Trans σύμφωνα με τον προσανατολισμό του οργάνου) και την κατακόρυφη συνιστώσα της καταγραφής καθώς και ο λόγος των δυο κανονικοποιημένων φασμάτων (NHVSR).

Από την μελέτη των σχημάτων για κάθε καταγραφή προκύπτουν ενδιαφέροντα στοιχεία για τις τοπικές εδαφικές συνθήκες στην περιοχή του κάθε επιταχυνσιογράφου. Συγκεκριμένα υπάρχουν επιφανειακές καταγραφές όπου η μέγιστη τιμή του NHVSR είναι μικρή (κυμαίνεται έως 2-2.5) και η μορφή του διαγράμματος του λόγου NHVSR συναρτήσει της περιόδου είναι ομαλή [βλέπε για παράδειγμα τις καταγραφές στο Δημόκριτο (DMK), στη Γ.Υ.Σ. που βρίσκεται στην Κυψέλη (ATH-04), στη Ραφήνα (RFN) και στο Αλιβέρι (ALIB)]. Τα διαγράμματα αυτά αντιστοιχούν σε καταγραφές που έχουν γίνει είτε σε εμφανίσεις του βραχώδους σεισμικού υποβάθρου στην επιφάνεια (Δημόκριτος) είτε σε εδαφικά προφίλ με πολύ μικρό πάχος και δύσκαμπτες στρώσεις.

Από την άλλη μεριά υπάρχουν επιφανειακές καταγραφές με μέγιστη τιμή του λόγου NHVSR έως 4.5 ή ακόμη και 6.2 στην ιδιάζουσα περίπτωση του Μοναστηρακίου (MNSA), η οποία όμως εξετάζεται ξεχωριστά. Καταγραφές όπως αυτή στα Σεπόλια (SPLB), στο Νέο Ψυχικό (ΑΤΗΑ), στο Κ.Ε.Δ.Ε. που βρίσκεται στη οδό Πειραιώς (ΑΤΗ-03) ή στο εργοστάσιο της Δ.Ε.Η. στο Κερατσίνι (ΚΕΡΑ) δίνουν, εκτός από μεγάλη συγκριτικά μέγιστη τιμή, και μεγάλες τιμές του λόγου NHVSR για περιόδους πάνω από 0.3 sec και δείχνουν ότι έχουν γίνει πάνω σε εδαφικές στήλες με σχετικά μεγάλες χαρακτηριστικές περιόδους. Η χαρακτηριστική περίοδος T_s είναι η περίοδος που αντιστοιχεί στη θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα f_s της εδαφικής στήλης. Ας μην ξεχνάμε ότι μεγάλη χαρακτηριστική περίοδος σημαίνει ότι το βραχώδες υπόβαθρο βρίσκεται σε μεγάλο σχετικά βάθος και ότι τα υπερκείμενα του εδάφη έχουν σχετικά μικρή μέση ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων V_s .

Είναι προφανές λοιπόν πως ο υπολογισμός του NHVSR μας δίνει σημαντικά στοιχεία για τις τοπικές εδαφικές συνθήκες ώστε ακόμη και στην περίπτωση που δεν υπάρχουν καθόλου γεωτεχνικά στοιχεία να μπορούμε να κάνουμε κάποιες εκτιμήσεις. Ακόμη όμως και να έχουν γίνει γεωτρήσεις στην περιοχή, έχουμε στα χέρια μας επιπλέον στοιχεία για να αξιολογήσουμε κατάλληλα τα γεωτεχνικά δεδομένα και να προχωρήσουμε σε αναλύσεις.

Μέχρι στιγμής αναφερθήκαμε μόνο σε επιφανειακές καταγραφές. Στα χέρια μας όμως, από τον κύριο σεισμό της Αθήνας, έχουμε και 6 καταγραφές κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, όπως προαναφέραμε, σε σταθμούς του Μετρό. Οι καταγραφές αυτές έχουν σαφώς επηρεαστεί από την όλη κατασκευή των σταθμών και η παραδοχή 1-Δ συνθηκών ώστε να μπορούν να γίνουν αναλύσεις και εκτιμήσεις από τις καταγραφές αυτές είναι παρακινδυνευμένη. Για παράδειγμα στο σταθμό του Μετρό στο Σύνταγμα υπήρχαν δυο επιταχυνσιογράφοι σε βάθη 7m (SGMA) και 26m (SGMB) τοποθετημένοι στο επίπεδο -1 και στο επίπεδο -3 του σταθμού αντίστοιχα. Θεωρητικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι λόγοι NHVSR για τις δυο αυτές καταγραφές δίνουν μια ιδέα για την συμπεριφορά της εδαφικής στήλης από το βάθος στο οποίο βρίσκονται έως το σεισμικό υπόβαθρο. Παρ' όλα αυτά, η καταγραφή του SGMB που βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος δείχνει ότι έχει γίνει πάνω σε μαλακό εδαφικό προφίλ με μεγάλη χαρακτηριστική περίοδο, αντίθετα με την καταγραφή

SGMA που δείχνει ότι υπέρκειται δύσκαμπτων εδαφικών στρώσεων, ακριβώς αντίθετα δηλαδή από ότι θα περιμέναμε. Προφανώς λοιπόν οι δυο καταγραφές ή τουλάχιστον η καταγραφή του SGMB έχουν επηρεαστεί από την κατασκευή του σταθμού και δεν μπορούν να συγκριθούν με τις καταγραφές ελευθέρου πεδίου.

Παρ' όλα αυτά, για τις καταγραφές σε βάθος έχει γίνει πρόβλεψη του NHVSR στην επιφάνεια χρησιμοποιώντας τα φάσματα για τις οριζόντιες συνιστώσες της καταγραφής που προέκυψαν από 1-Δ ανάλυση διάδοσης σεισμικών κυμάτων (πρόγραμμα SHAKE) υποθέτοντας ότι η κατακόρυφη συνιστώσα δεν επηρεάζεται κατά την διάδοση της μέσα από τις εδαφικές στρώσεις (παραδοχή αρκετά ακριβής και βασική στη μέθοδο HVSR). Με τα στοιχεία που έχουμε από γεωτεχνικές έρευνες για τα δυναμικά χαρακτηριστικά των εδαφικών στρώσεων που υπέρκεινται του επιταχυνσιογράφου, σχηματίζουμε ένα μοντέλο αλληλουχίας εδαφικών στρώσεων, στην βάση της οποίας έγινε η καταγραφή. Τις οριζόντιες συνιστώσες της καταγραφής αυτής χρησιμοποιούμε ως διέγερση στο πρόγραμμα SHAKE, ώστε με την διάδοση κυμάτων που αναλυτικά υπολογίζει το πρόγραμμα να λάβουμε τα χαρακτηριστικά της σεισμικής κίνησης στην επιφάνεια.

Φυσικά οι αναλύσεις με το πρόγραμμα SHAKE προϋποθέτουν την γνώση των εδαφικών σχηματισμών της τοποθεσίας και των γεωτεχνικών τους χαρακτηριστικών που στην ουσία ψάχνουμε με την μέθοδο HVSR. Έτσι όμως μπορούμε να κάνουμε συγκρίσεις και να βγάλουμε συμπεράσματα για την ορθότητα των προηγούμενων προβλέψεών μας.

Με βάση τα στοιχεία λοιπόν που έχουμε από τα διαγράμματα του λόγου NHVSR συναρτήσει της περιόδου μπορούμε να κατατάξουμε τις καταγραφές σε κατηγορίες. Εκτός από την μέγιστη τιμή του λόγου NHVSR όμως, σημασία έχει και το εύρος των περιόδων που αντιστοιχεί σε μια ενεργό τιμή του λόγου αυτού. Στις παρακάτω συσχετίσεις χρησιμοποιήσαμε μόνο καταγραφές στην επιφάνεια, ώστε οι μάλλον επηρεασμένες καταγραφές σε βάθος να μην μας οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα και μεγάλη διασπορά.

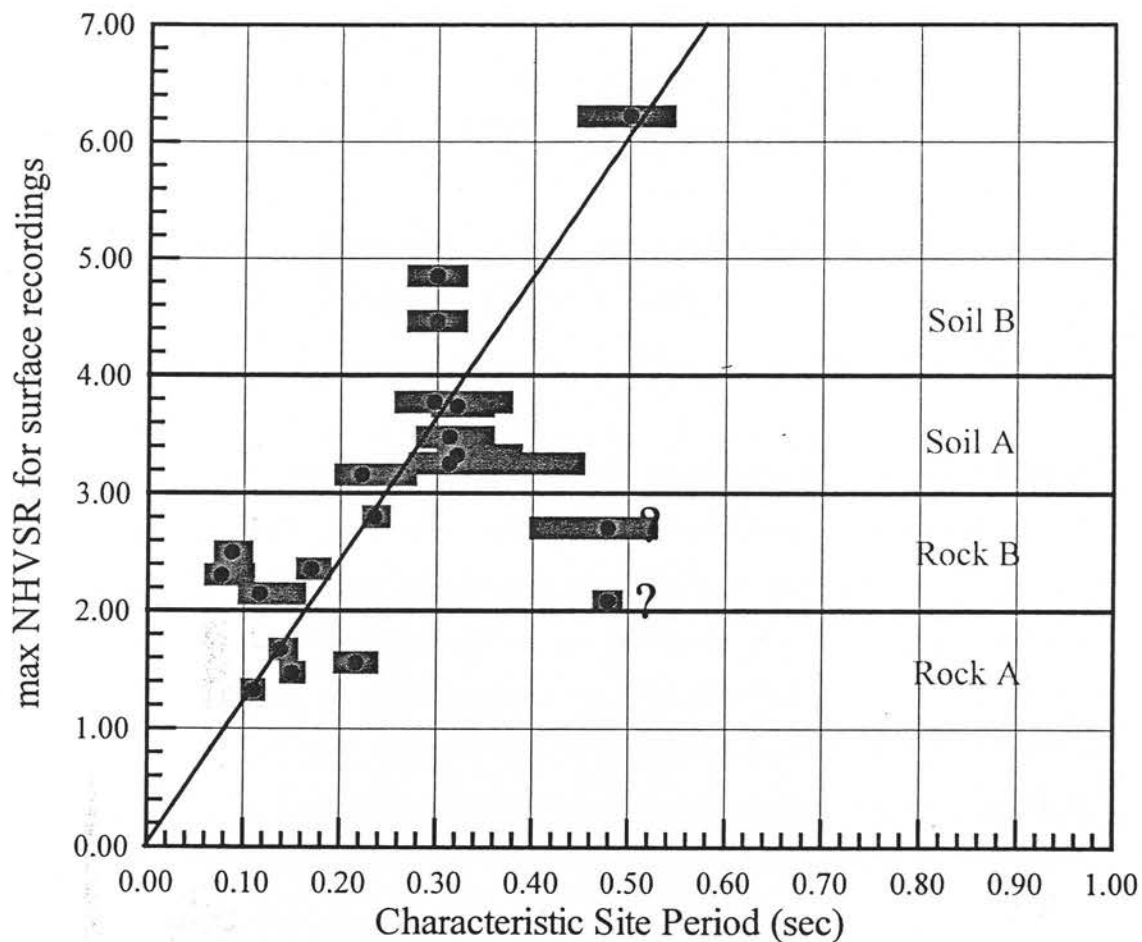
Υπολογίζεται για κάθε επιφανειακή καταγραφή η ενεργός τιμή του λόγου NHVSR

ίση με α .(NHVSR-1). Ο συντελεστής α προκύπτει από μια διαδικασία best fit που έγινε για τα δεδομένα και θεωρήθηκε τεχνικά ίσος με 2/3. Για κάθε διάγραμμα NHVSR συναρτήσει της περιόδου υπολογίζονται κάποιες τιμές περιόδων για τις οποίες ο λόγος NHVSR ξεπερνά την ενεργό τιμή του. Το πρώτο εύρος περιόδων αντιστοιχεί σε μια εκτίμηση της χαρακτηριστικής περιόδου της εδαφικής στήλης. Επίσης εκτιμάται και η προέχουσα περίοδος που αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή του λόγου NHVSR.

Παρακάτω φαίνεται ένα γράφημα, στον άξονα των x του οποίου έχει μπει η εκτίμηση της χαρακτηριστικής περιόδου που προκύπτει από κάθε καταγραφή, η οποία έχει κάποιο εύρος τιμών που φαίνεται γκρι στο σχήμα, και η τιμή της περιόδου, που σημειώνεται με μια μαύρη κουκίδα, και αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή του λόγου NHVSR. Στον άξονα των y μπαίνει η αντίστοιχη μέγιστη τιμή του λόγου NHVSR. Επίσης φαίνονται οι 4 κατηγορίες (Rock A, Rock B, Soil A, Soil B) στις οποίες χωρίζουμε τις καταγραφές ανάλογα με την μέγιστη τιμή του λόγου NHVSR. Φέρνοντας λοιπόν την best fit ευθεία έχουμε 4 ζώνες περιόδων που αντιστοιχούν στις 4 κατηγορίες. Οι κατηγορίες αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα μαζί με τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές περιόδους:

Πίνακας 3.3 Κατηγορίες καταγραφών και αντίστοιχες χαρακτηριστικές περιόδοι

Κατηγορία	NHVSR max	Εύρος χαρακτηριστικής περιόδου
Rock A	<2	<0.16 sec
Rock B	2-3	0.16-0.24 sec
Soil A	3-4	0.24-0.33 sec
Soil B	>4	>0.33



Σχήμα 3.1 Συσχέτιση του μέγιστου λόγου NHVSR με την θεμελιώδη ιδιοπερίοδο

Οι κατηγορίες αυτές μας δείχνουν πόσο εύκαμπτη ή δύσκαμπτη είναι η, υποκείμενη της κάθε καταγραφής, εδαφική στήλη και πόσο μαλακές είναι οι εδαφικές στρώσεις. Αποτελούν έτσι κατά κάποιον τρόπο ένα οδηγό για την περαιτέρω διερεύνηση των εδαφικών συνθηκών και των αναμενόμενων φαινομένων ενίσχυσης της ισχυρής σεισμικής κίνησης από τα επιφανειακά εδαφικά στρώματα. Στη κατάταξη έχουν χρησιμοποιηθεί οι τιμές μόνο από τις ανεπηρέαστες επιφανειακές καταγραφές. Η κατάταξη έχει γίνει κατά αύξουσα σειρά του μέγιστου λόγου NHVSR χρησιμοποιώντας την σχέση $max\ NHVSR = 12.07 \cdot T_{NHVSR}$ που προκύπτει από το γράφημα.

Πίνακας 3.4 Κατάταξη των επιφανειακών καταγραφών ανάλογα με την μέγιστη τιμή του λόγου NHVSR

Περιοχή	Κωδικός σταθμού	Long			Trans			Κατάταξη
		max NHVSR	Εύρος χαρακτηριστικής περιόδου	περίοδος που αντιστοιχεί στο max NHVSR	max NHVSR	Εύρος χαρακτηριστικής περιόδου	περίοδος που αντιστοιχεί στο max NHVSR	
Δημόκριτος	DMK	1.3259	0.109-0.111	0.11	1.4745	0.149-0.153	0.15	Rock A
Ραφήνα	RFN	2.1464	0.106-0.153	0.117	1.6711	0.138-0.145	0.138	Rock B
Αλιβέρι	ALIB	1.5604	0.205-0.228	0.216	2.3574	0.166-0.179	0.17	Rock B
Λαύριο	LAVR	2.5	0.081-0.098	0.088	2.3078	0.071-0.1	0.077	Rock B
Γ.Υ.Σ.	ATH-04	2.709	0.408-0.518	0.478	2.0873	0.474-0.482	0.478	Rock B
Κ.Ε.Δ.Ε.	ATH-03	2.8015	0.234-0.24	0.235	3.1584	0.205-0.267	0.222	Soil A
Κερατσίνι	KERA	3.2536	0.282-0.442	0.313	3.32352	0.313-0.377	0.321	Soil A
Νέο Ψυχικό	ATHA	3.7398	0.305-0.348	0.321	3.4761	0.289-0.348	0.313	Soil A
Χαλάνδρι	ATH-02	3.7733	0.267-0.367	0.297	2.3631	0.141-0.153	0.141	Soil A
Σεπόλια	SPLB	4.4639	0.455-0.505	0.50	4.852	0.465-0.505	0.50	Soil A
Μοναστηράκι	MNSA	6.2183	0.289-0.357	0.305	3.8077	0.149-0.205	0.2	Soil B

Σημείωση: Με πλάγια γράμματα φαίνονται οι καταγραφές που δεν χρησιμοποιήθηκαν ως μάλλον επηρεασμένες από τις τοπικές συνθήκες.

Οι μέγιστες τιμές του λόγου NHVSR κυμαίνονται λοιπόν από 1.4745 στο Δημόκριτο, όπου πράγματι η καταγραφή έχει γίνει σε εμφάνιση του σεισμικού υποβάθρου στην επιφάνεια έως 6.2183 στην ιδιάζουσα περίπτωση του Μοναστηρακίου, η οποία εξετάζεται άλλωστε και ξεχωριστά. Έχουμε 2 καταγραφές στην κατηγορία Rock A, 7 καταγραφές στην κατηγορία Rock B, 5 καταγραφές στην κατηγορία Soil A και 3 καταγραφές στην κατηγορία Soil B.

3.3 Λόγος Μέγιστης Ταχύτητας προς Μέγιστη Επιτάχυνση (v_{max}/a_{max} ratio method)

Η δεύτερη αυτή τεχνική που χρησιμοποιήθηκε αφορά τον υπολογισμό του λόγου της μέγιστης ταχύτητας προς τη μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους σε κάθε καταγραφή. Είναι γεγονός ότι η ταχύτητα και η επιτάχυνση του εδάφους απομειώνονται με διαφορετικούς ρυθμούς με την επικεντρική απόσταση. Παρότι συμβαίνει αυτό και παρότι ο λόγος v_{max}/a_{max} εξαρτάται και από το μέγεθος του σεισμού, οι σχέσεις που έχουν δώσει οι Cambell (1988), Donovan (1983), Joyner & Boore (1988) και McGuire (1978) δείχνουν μικρή εξάρτηση του λόγου v_{max}/a_{max} από την επικεντρική απόσταση, τουλάχιστον στην περιοχή του ενδιαφέροντός μας (Donovan 1989). Αντίθετα η τιμή του λόγου εξαρτάται από τις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Ο Uniform Building Code (UBC 1988) δεν αναφέρεται συγκεκριμένα στο λόγο v_{max}/a_{max} , τον χρησιμοποιεί όμως για τον υπολογισμό των αντιπροσωπευτικών φασμάτων σχεδιασμού για διαφορετικά εδαφικά προφίλ. Οι τιμές του λόγου που χρησιμοποιήθηκαν κυμαίνονται από 61 cm/sec/g για βραχώδεις τοπικές εδαφικές συνθήκες έως 122 cm/sec/g για μαλακά εδάφη. Η τιμή των 122 cm/sec/g χρησιμοποιήθηκε επίσης ως στάνταρ από την NRC (Nuclear Regulatory Commission) στα τέλη του 1970 για τον υπολογισμό των φασμάτων σχεδιασμού.

Υπολογίζοντας λοιπόν τους λόγους αυτούς για τις καταγραφές μας θα έχουμε ένα επιπλέον στοιχείο για τις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Συγκρίνοντας μάλιστα τις προβλέψεις που παίρνουμε με την χρήση της μεθόδου αυτής και της μεθόδου NHVSR μπορούμε να δοκιμάσουμε να συσχετίσουμε τις δύο μεθόδους.

Οι λόγοι v_{max}/a_{max} για κάθε καταγραφή φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Ο Donovan

(1989) κατατάσσει τα εδαφικά προφίλ ανάλογα με τη τιμή του λόγου v_{max}/a_{max} που καταγράφεται στην επιφάνεια. Προφίλ με v_{max}/a_{max} μικρότερο από 91 cm/sec/g κατατάσσονται σαν βραχώδη (Rock) και καταγραφές με μεγαλύτερο λόγο σαν εδαφικά (Soil). Η τιμή βεβαία των 91 cm/sec/g είναι μάλλον σχετική αφού δεν αναφέρεται σε βραχώδεις σχηματισμούς του Ελληνικού χώρου και συγκεκριμένα του Αθηναϊκού σχιστόλιθου που εμφανίζεται κυρίως στην περιοχή που μας ενδιαφέρει (η τιμή αυτή αναφέρεται σε βραχώδεις σχηματισμούς της California-«μαλακούς» βράχους). Συνεπώς δεν μπορεί να χαρακτηρίσει τις καταγραφές μας.

Ο λόγος v_{max}/a_{max} των καταγραφών που είχαμε σε βάθος δεν μπορεί να συγκριθεί άμεσα με τους αντίστοιχους λόγους στην επιφάνεια, κάτι που φαίνεται και από τις πολύ μεγάλες τιμές που παίρνει συγκριτικά με τις επιφανειακές καταγραφές. Υπολογίστηκε λοιπόν ένας προβλεπόμενος λόγος v_{max}/a_{max} στην επιφάνεια, αντίστοιχα με τους προβλεπόμενους λόγους NHVSR. Ολοκληρώνοντας αριθμητικά την χρονοιστορία της επιτάχυνσης στην επιφάνεια, όπως αυτή προέκυψε από την 1-Δ ανάλυση διάδοσης σεισμικών κυμάτων, παίρνουμε την χρονοιστορία της ταχύτητας και κρατάμε την μέγιστη τιμή της.

Οι προβλεπόμενοι λόγοι v_{max}/a_{max} στην επιφάνεια φαίνονται στον αντίστοιχο πίνακα.

Πίνακας 3.5 Τιμές του λόγου v_{\max}/a_{\max} για κάθε καταγραφή

Περιοχή	Κωδικός σταθμού	v_{\max}/a_{\max}	
		LONG	TRANS
Κερατσίνι	KERA	44.67	39.14
Χαλάνδρι	ATH-02	46.31	43.53
Λαύριο	LAVR	46.78	33.84
Ραφήνα	RFN	43.869	53.03
Δημόκριτος	DMK	53.87	32.61
Αλιβέρι	ALIB	45.89	54.803
Κ.Ε.Δ.Ε.	ATH-03	61.08	48.51
Μοναστηράκι	MNSA	65.16	29.21
Σεπόλια	SPLB	65.98	60.64
Σεπόλια	SPLA	72.76	58.1
Νέο Ψυχικό	ATHA	63.72	73.79
Γ.Υ.Σ.	ATH-04	73.55	77.59
Σύνταγμα	SGMA	85.25	55.86
Πεντάγωνο	PNT	85.7	64.3
Νέος Κόσμος	FIX	91.68	88.55
Δάφνη	DFNA	98.92	95.92
Σύνταγμα	SGMB	89.7	123.6

Πίνακας 3.6 Προβλεπόμενες τιμές του λόγου v_{\max}/a_{\max} στην επιφάνεια για τις καταγραφές που έγιναν σε βάθος

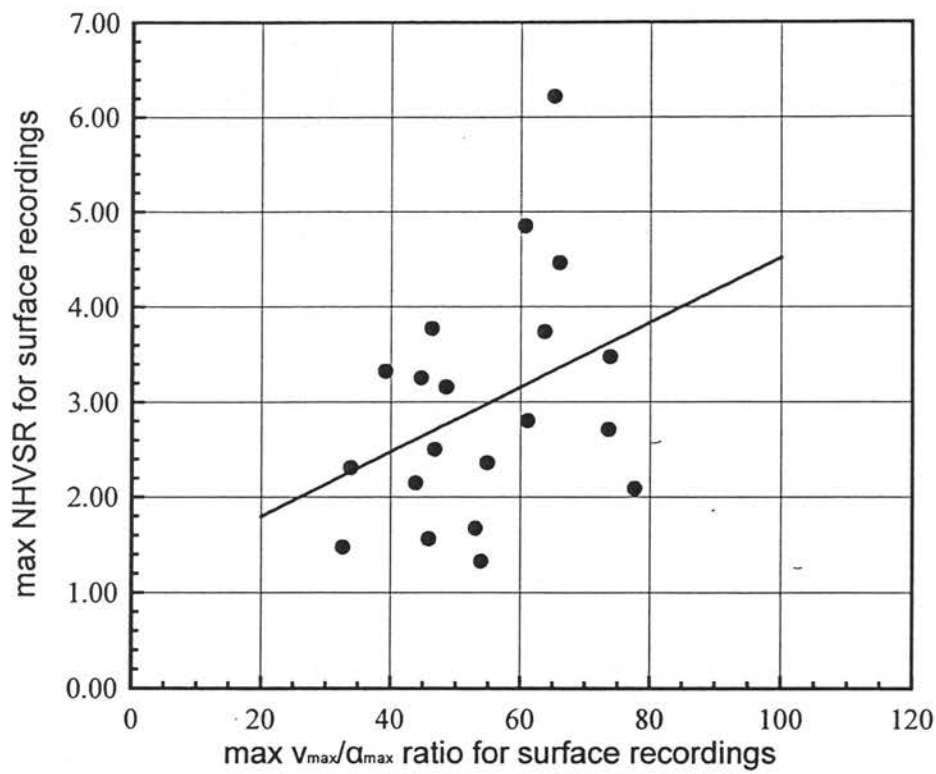
Περιοχή	Κωδικός σταθμού	Βάθος οργάνου	Predicted v_{\max}/a_{\max}	
			LONG	TRANS
Νέος Κόσμος (ΦΙΞ)	FIX	15 m	41.000	41.726
Πεντάγωνο	PNT	15 m	42.789	38.261
Δάφνη	DFNA	13.5 m	72.976	65.613
Σύνταγμα	SGMA	7 m	61.256	50.7237
Σύνταγμα	SGMB	26 m	58.941	61.510
Σεπόλια	SPLA	13 m	44.168	43.825

Εάν οι δύο μέθοδοι (Horizontal-to-Vertical Spectral ratio method & v_{\max}/a_{\max} ratio method) που χρησιμοποιήθηκαν είναι απόλυτα ακριβείς θα πρέπει να οδηγούν στα ίδια συμπεράσματα (αν η μέθοδος του μέγιστου λόγου v_{\max}/a_{\max} βαθμονομηθεί κατάλληλα για τα εδάφη της Αθήνας).

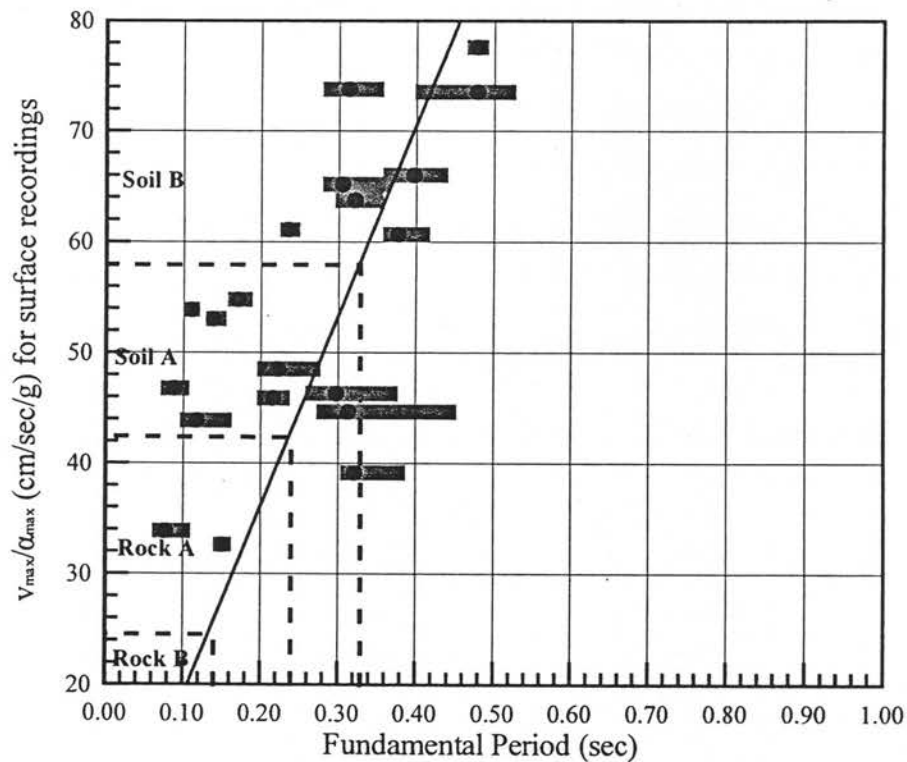
Ο πιο απλός τρόπος για να βρούμε αν υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στις δυο μεθόδους είναι να κάνουμε ένα γράφημα των μέγιστων λόγων NHVSR συναρτήσει των αντίστοιχων μέγιστων λόγων v_{\max}/a_{\max} για κάθε καταγραφή καθώς και ένα γράφημα των μέγιστων λόγων v_{\max}/a_{\max} συναρτήσει της χαρακτηριστικής περιόδου που προκύπτει από την μέθοδο NHVSR. Και πάλι εδώ, για τους ίδιους λόγους που εξηγήσαμε νωρίτερα χρησιμοποιούμε μόνο τις επιφανειακές καταγραφές. Το πρώτο σχήμα (3.2), όπου ο λόγος v_{\max}/a_{\max} συσχετίζεται με την μέγιστη τιμή του λόγου NHVSR δεν δείχνει σαφή συσχέτιση των δυο μεθόδων. Με την υπόθεση ότι υπάρχει μια γραμμική σχέση ($Y=A*X+B$) των δεδομένων και κάνοντας curve-fitting προκύπτει η ευθεία του σχήματος, η οποία δείχνει μεν μια τάση αύξησης του NHVSR καθώς αυξάνεται ο λόγος v_{\max}/a_{\max} , όπως άλλωστε θα αναμέναμε, η διασπορά όμως των δεδομένων είναι τόσο μεγάλη που δεν μας αφήνει πολλά περιθώρια για σαφή συμπεράσματα. Στο δεύτερο σχήμα (3.3) όμως, όπου ο λόγος v_{\max}/a_{\max} συσχετίζεται με την χαρακτηριστική περίοδο που προκύπτει από την μέθοδο HVSR, φαίνεται να υπάρχει ικανοποιητική συσχέτιση. Στον άξονα των x του γραφήματος μπαίνει το εύρος της χαρακτηριστικής περιόδου που προκύπτει για κάθε καταγραφή και γίνεται ξανά curve-fitting υποθέτοντας γραμμική σχέση των δεδομένων μας. Χρησιμοποιώντας τα εύρη των περιόδων που προέκυψαν με την κατηγοριοποίηση βάση της μέγιστης τιμής του λόγου NHVSR, προκύπτουν αντίστοιχες τιμές του λόγου v_{\max}/a_{\max} για κάθε κατηγορία.

Πίνακας 3.7 Κατηγορίες καταγραφών με βάση το λόγο v_{\max}/a_{\max}

Κατηγορία	NHVSR max
Rock A	<24
Rock B	24-42
Soil A	42-58
Soil B	>58



Σχήμα 3.2 Συσχέτιση των λόγων v_{\max}/a_{\max} και NHVSR για τις καταγραφές στην επιφάνεια



Σχήμα 3.3 Συσχέτιση του λόγου v_{\max}/a_{\max} και της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου που προκύπτει από την μέθοδο HVSR

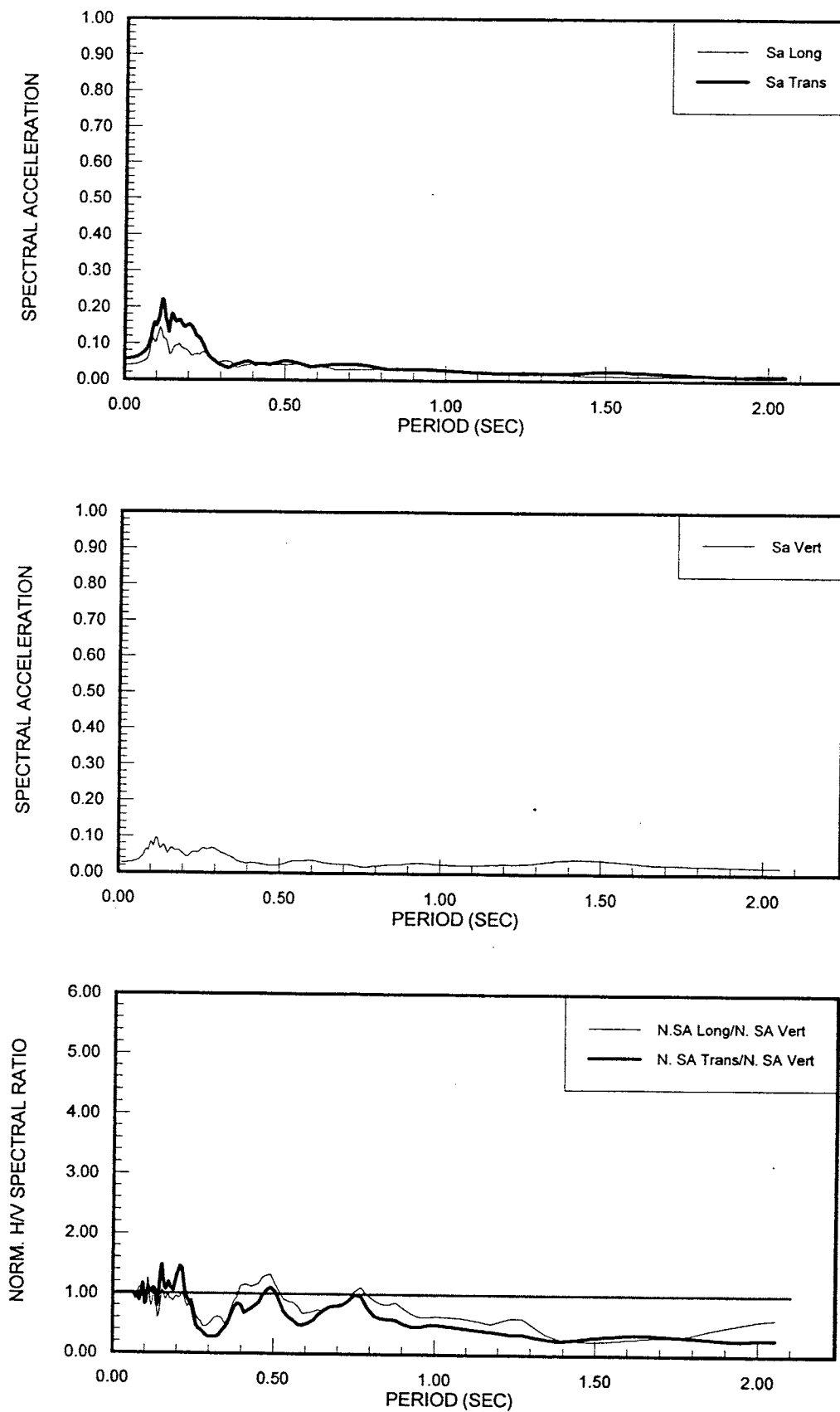
3.4 Συμπεράσματα

Η απολύτως μέγιστη τιμή του λόγου HVSR εξαρτάται από το είδος των προσπιπτόντων κυμάτων και δεν αποτελεί ικανοποιητικό κριτήριο από μόνη της για εξαγωγή συμπερασμάτων. Σε γενικές γραμμές πάντως, η μέγιστη τιμή του λόγου NHVSR δείχνει ικανοποιητική διακύμανση και συσχετίζεται αδρά με τις εδαφικές συνθήκες, όπως διαπιστώνεται και από τα γεωτεχνικά στοιχεία που έχουμε στα χέρια μας. Αντίστοιχα συμπεράσματα βγαίνουν και για την διακύμανση του εύρους της περιόδου που αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή του λόγου NHVSR.

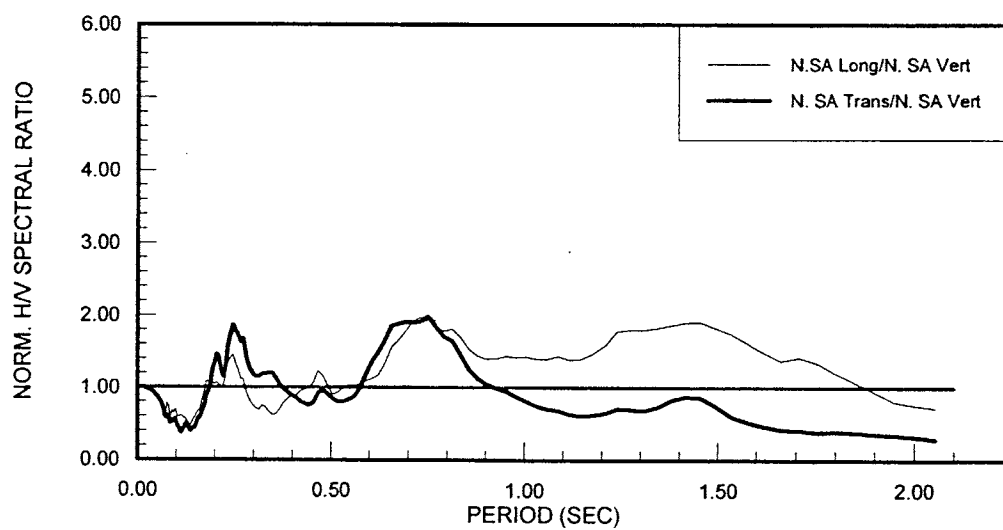
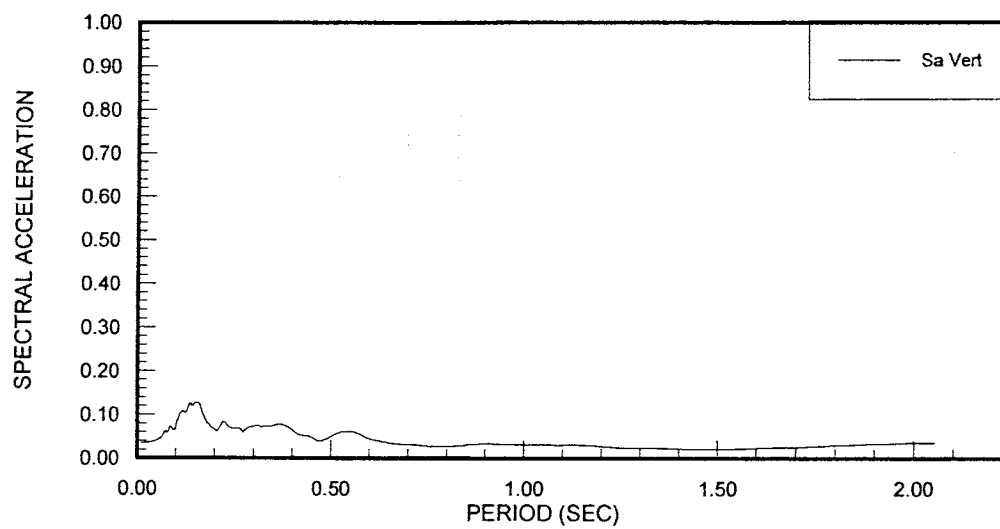
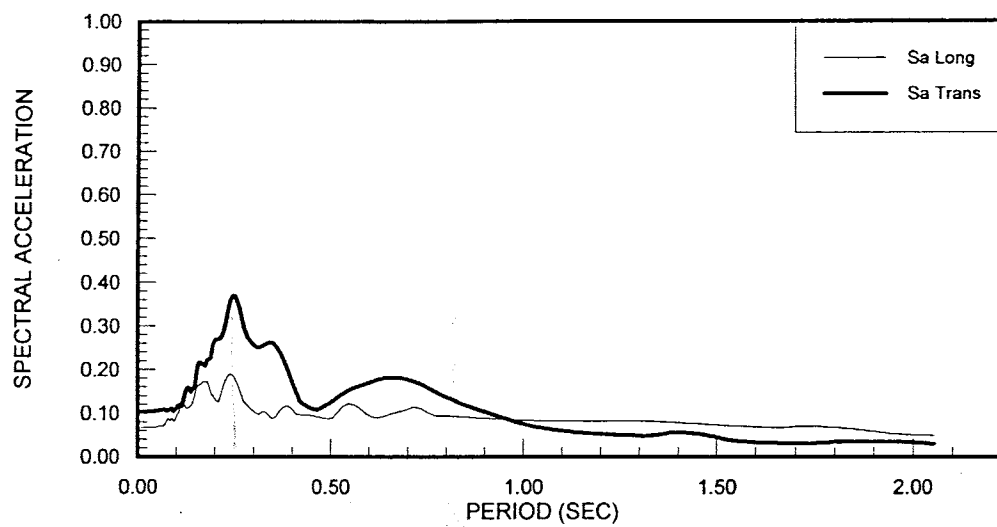
Η μεταβολή του λόγου v_{\max}/a_{\max} από την άλλη, δεν είναι τόσο έντονη από καταγραφή σε καταγραφή και δεν παρέχει σαφείς ενδείξεις για την επίδραση του εδάφους. Από ότι φαίνεται οι τιμές του λόγου v_{\max}/a_{\max} και του λόγου NHVSR των επιφανειακών καταγραφών δεν συσχετίζονται. Αντίθετα μια αδρή συσχέτιση προκύπτει για την μέγιστη τιμή του λόγου v_{\max}/a_{\max} με το εύρος της χαρακτηριστικής περιόδου και την προέχουσα περίοδο που προκύπτουν από την μέθοδο NHVSR.

Έχουμε στα χέρια μας λοιπόν επιπλέον στοιχεία από την εφαρμογή της μεθόδου HVSR που μπορούν να βοηθήσουν σημαντικά στην αξιολόγηση των αναλύσεων σεισμικής απόκρισης του εδάφους που θα επακολουθήσουν. Η μέθοδος HVSR αποδεικνύεται αξιόπιστη και απλή για αρχικές πάντα εκτιμήσεις, μιας και μας δίνει πληροφορίες για τα δυναμικά χαρακτηριστικά του εδαφικού προφίλ χωρίς πολυέξοδες γεωτεχνικές έρευνες.

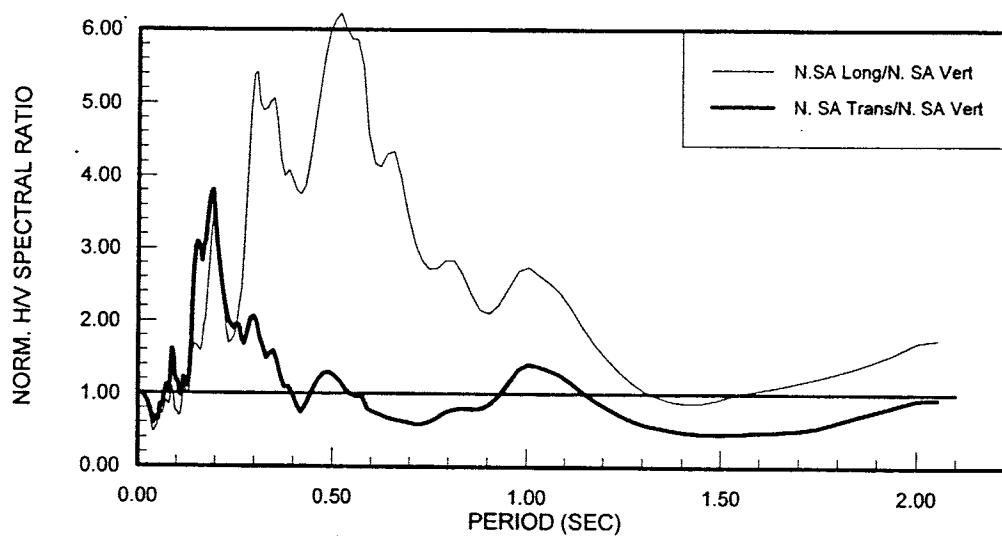
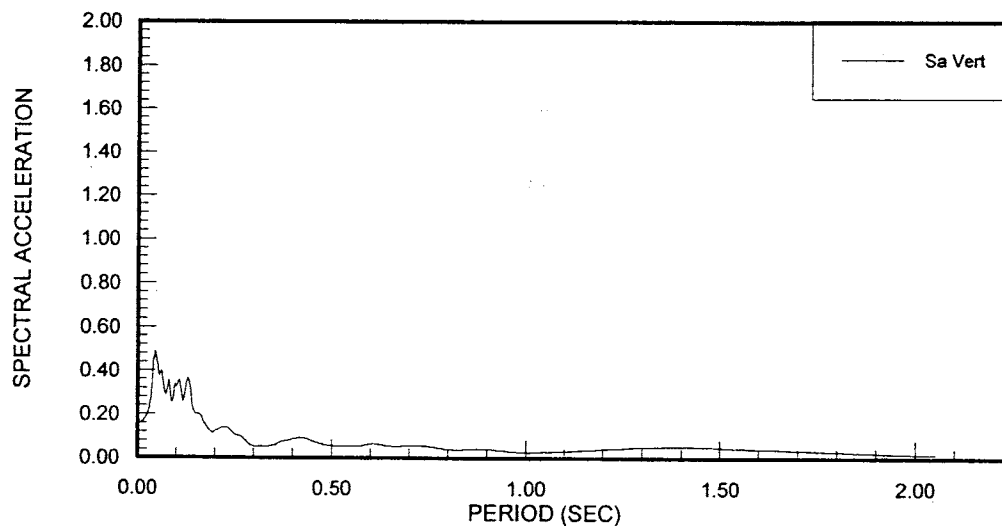
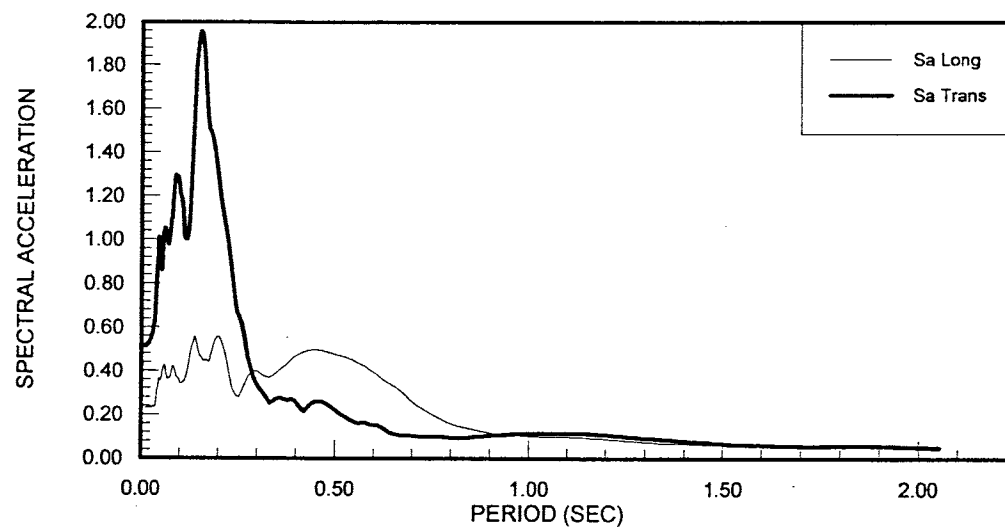
ΣΧΗΜΑ 3.4 ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ – ΣΤΑΘΜΟΣ
ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΥ (DMK) – ΒΑΘΟΣ = 0 m



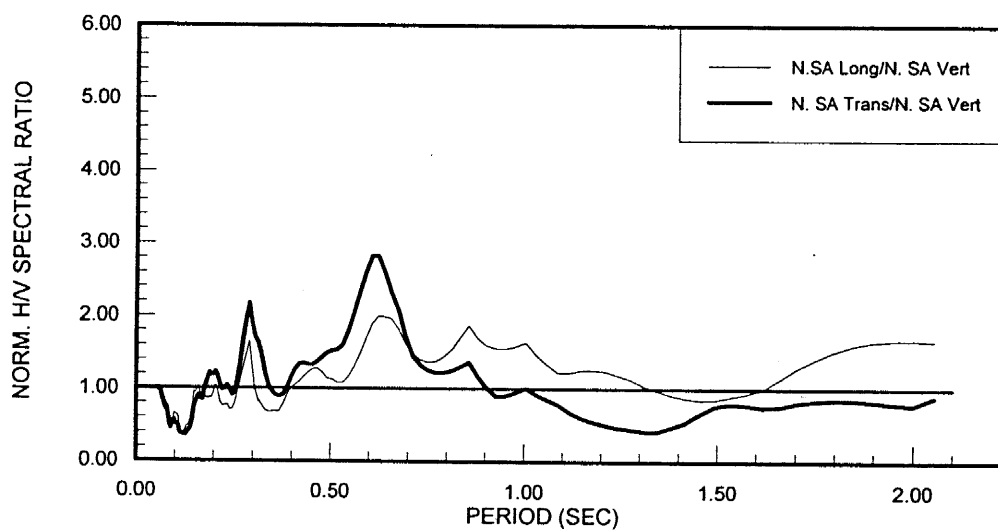
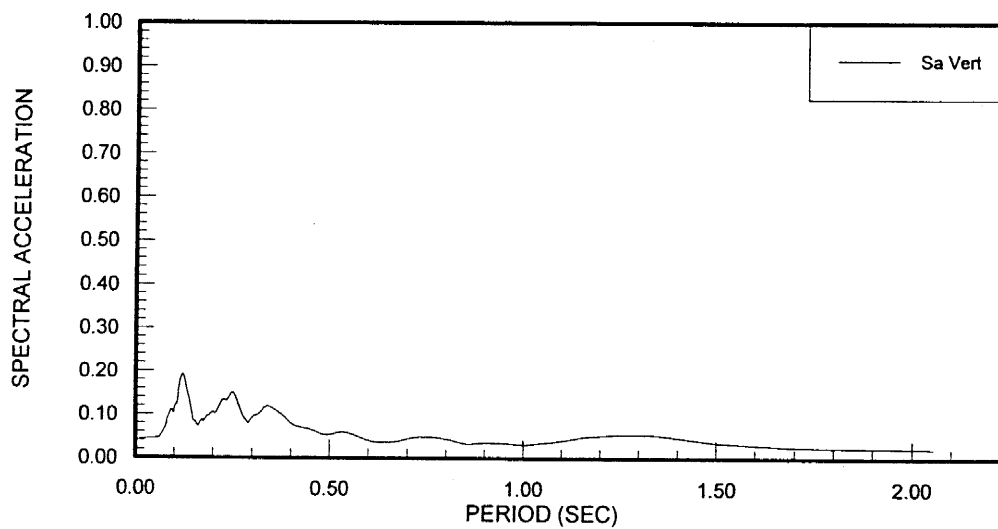
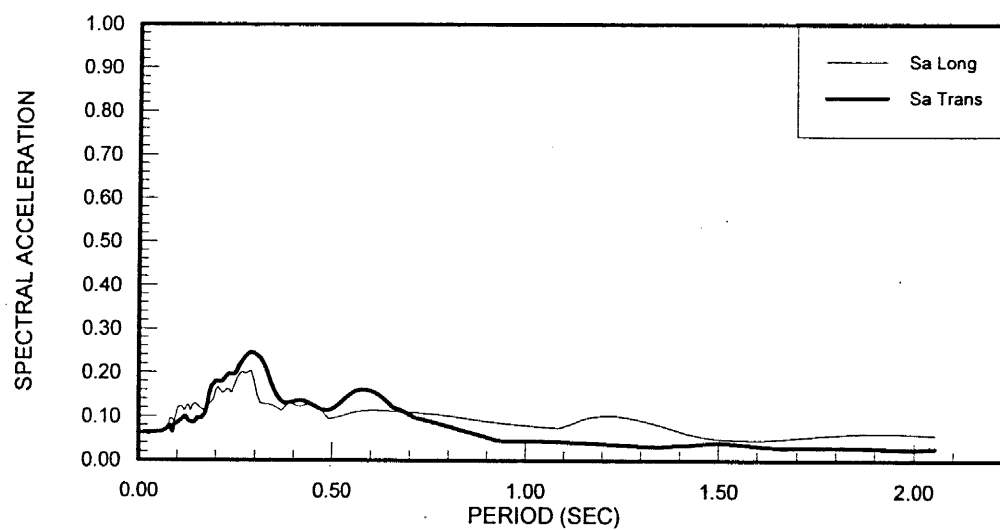
ΣΧΗΜΑ 3.5 ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ – ΣΤΑΘΜΟΣ ΝΕΟΥ
ΚΟΣΜΟΥ (FIX) – ΒΑΘΟΣ = 15 m



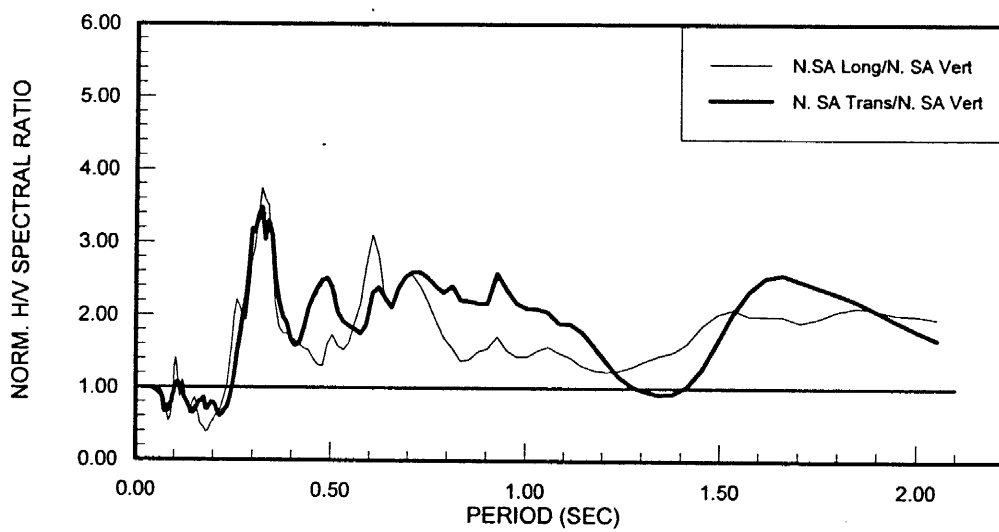
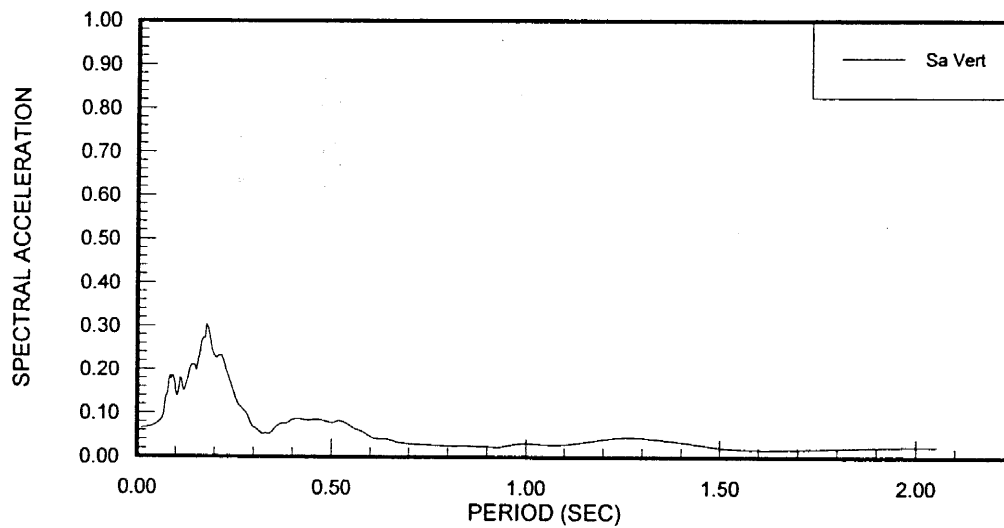
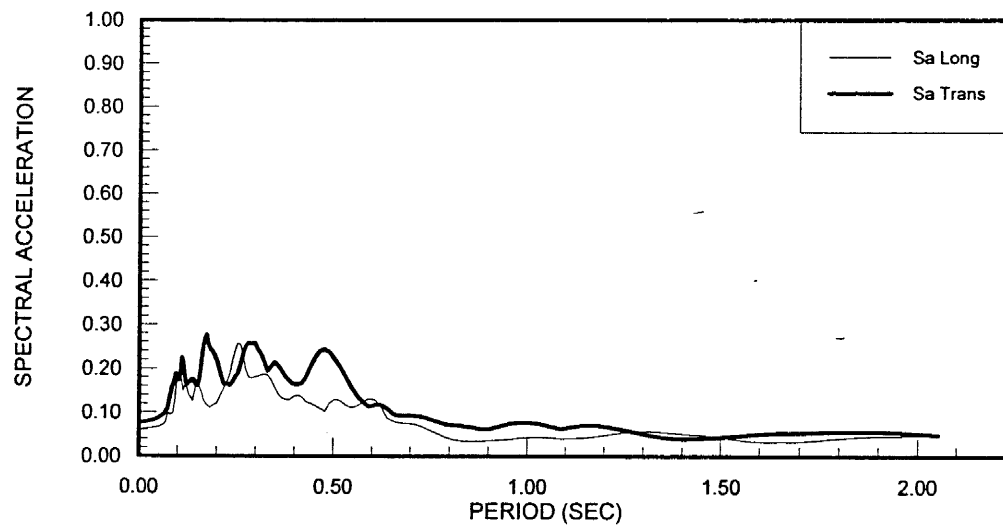
ΣΧΗΜΑ 3.6 ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ – ΣΤΑΘΜΟΣ
ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙΟΥ (MNSA) – ΒΑΘΟΣ = 0 m



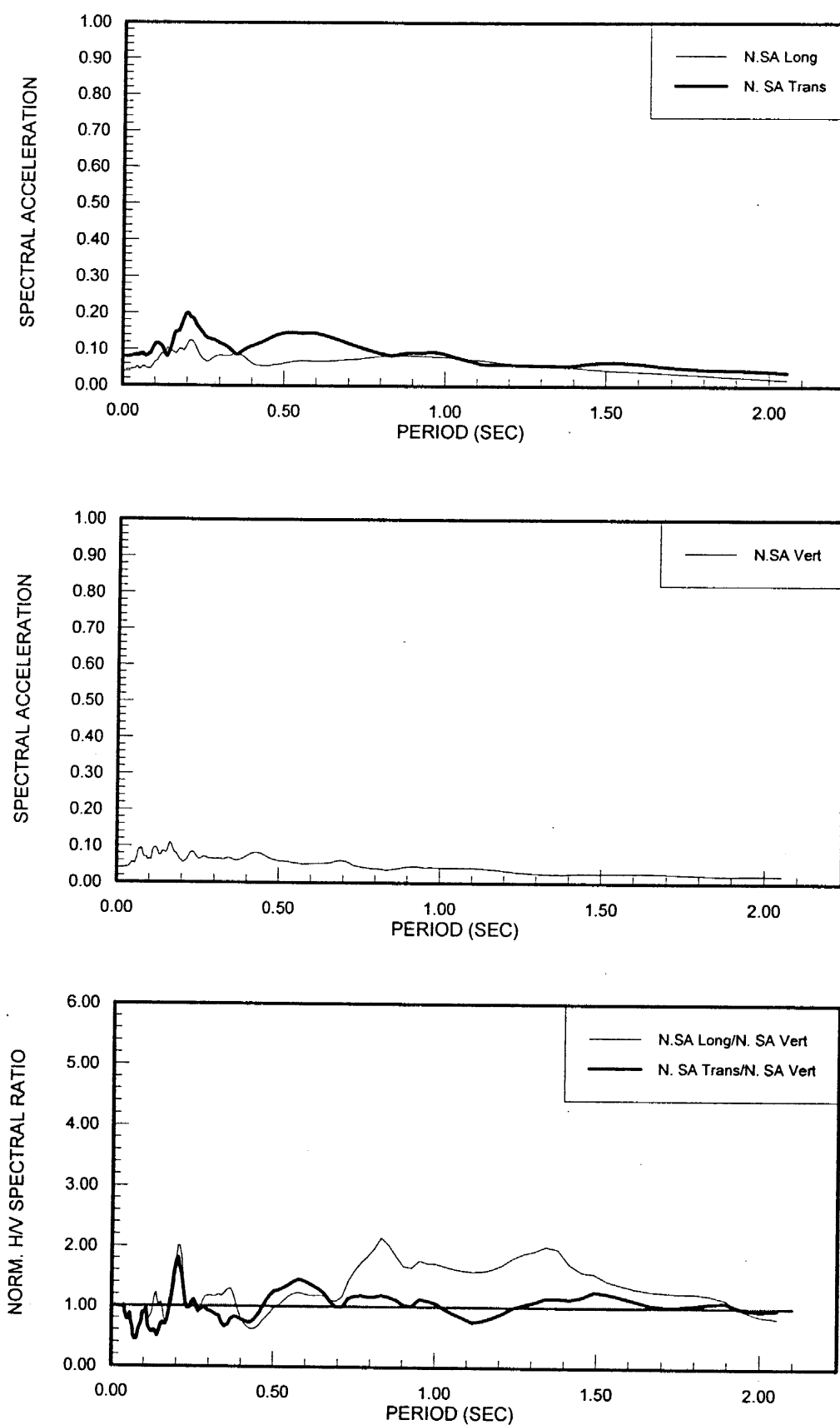
ΣΧΗΜΑ 3.7 ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ – ΣΤΑΘΜΟΣ
ΠΕΝΤΑΓΩΝΟΥ (PNT) – ΒΑΘΟΣ = 15 m



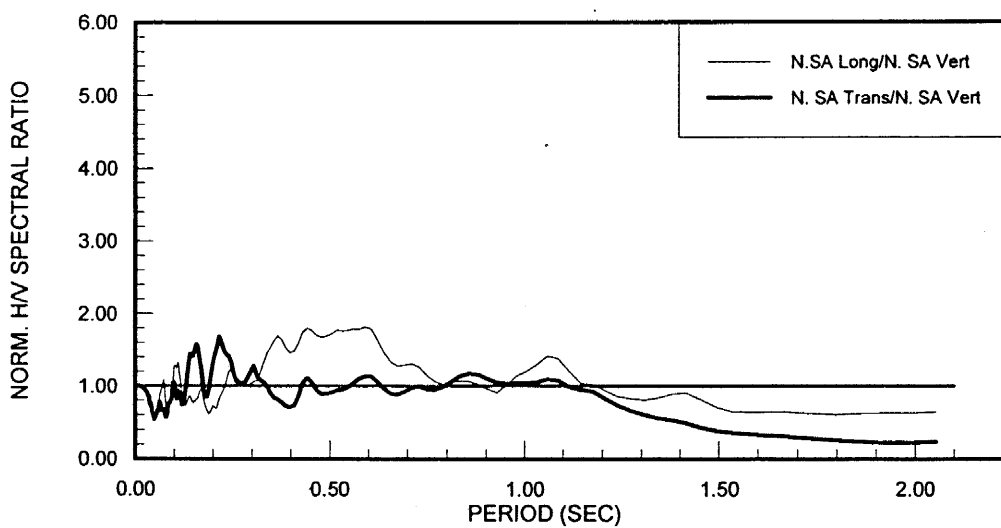
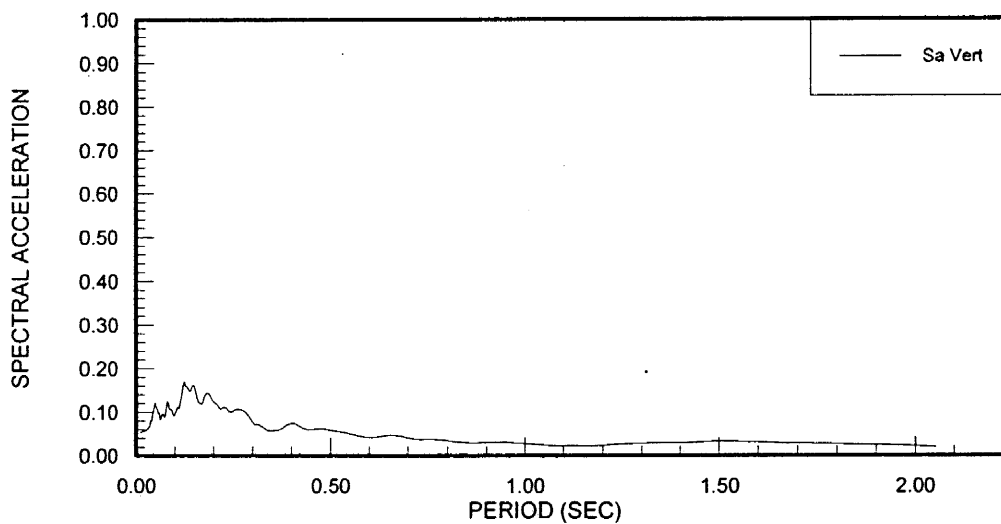
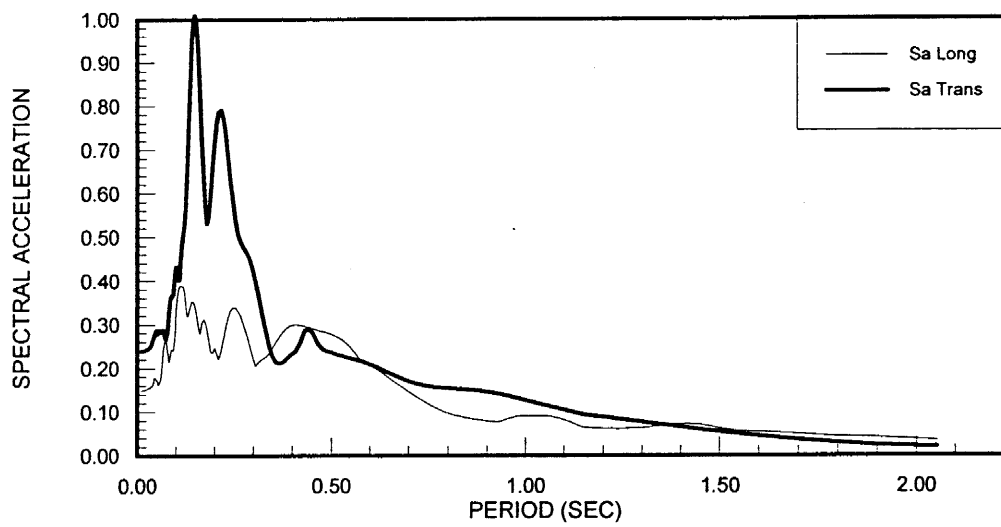
**ΣΧΗΜΑ 3.8 ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ – ΣΤΑΘΜΟΣ ΝΕΟΥ
ΨΥΧΙΚΟΥ (ΑΘΗΝΑ) – ΒΑΘΟΣ = 0 m**



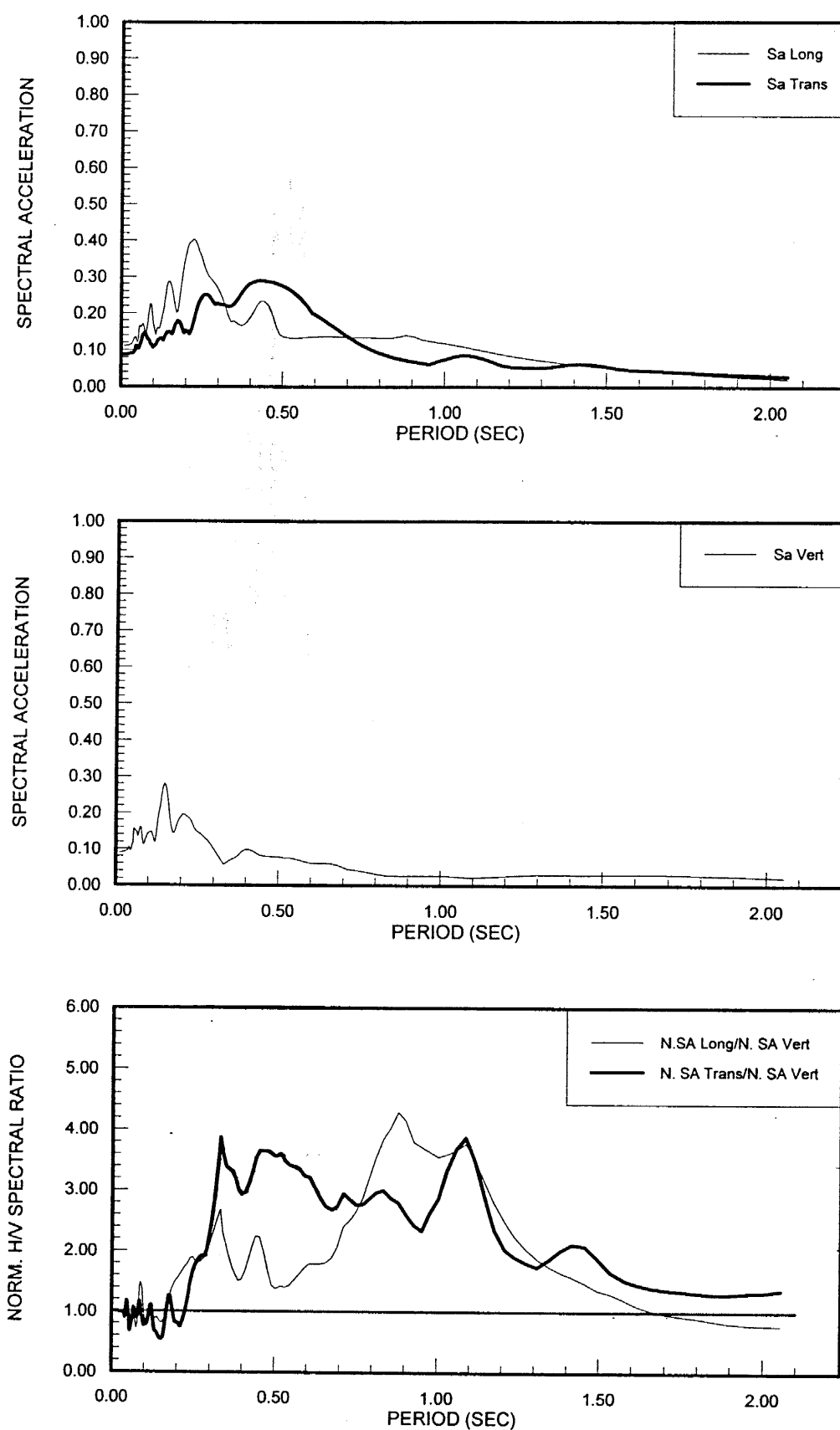
ΣΧΗΜΑ 3.9 ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ – ΣΤΑΘΜΟΣ ΔΑΦΝΗΣ
(DFN) – ΒΑΘΟΣ = 13.5 m

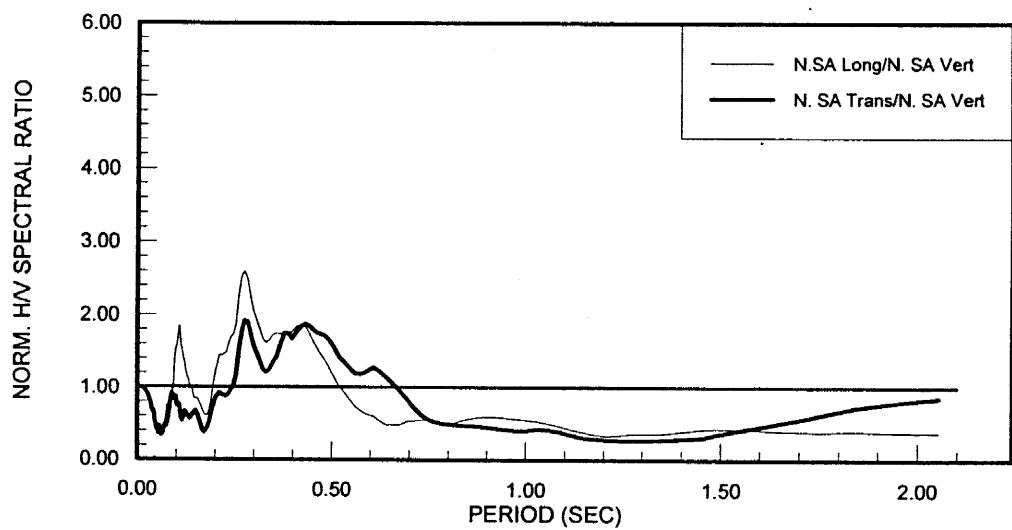
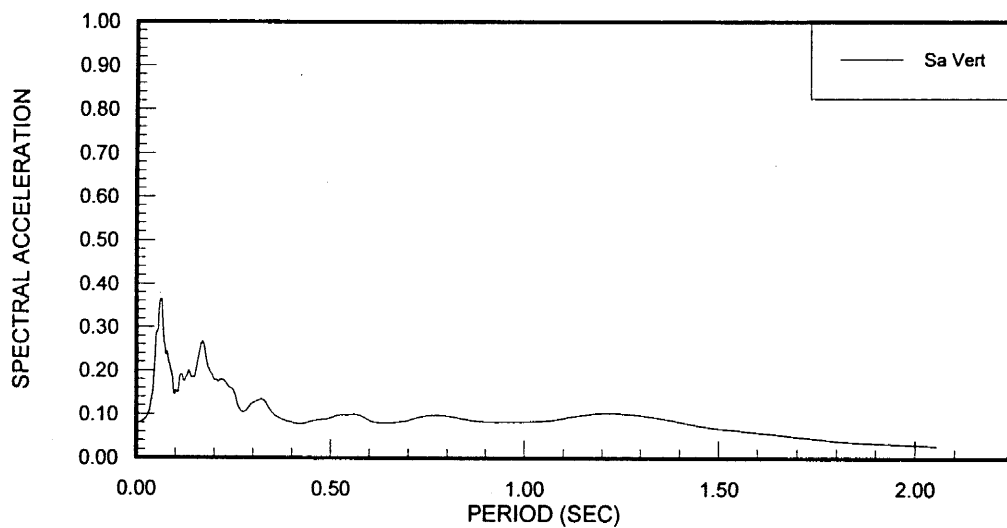
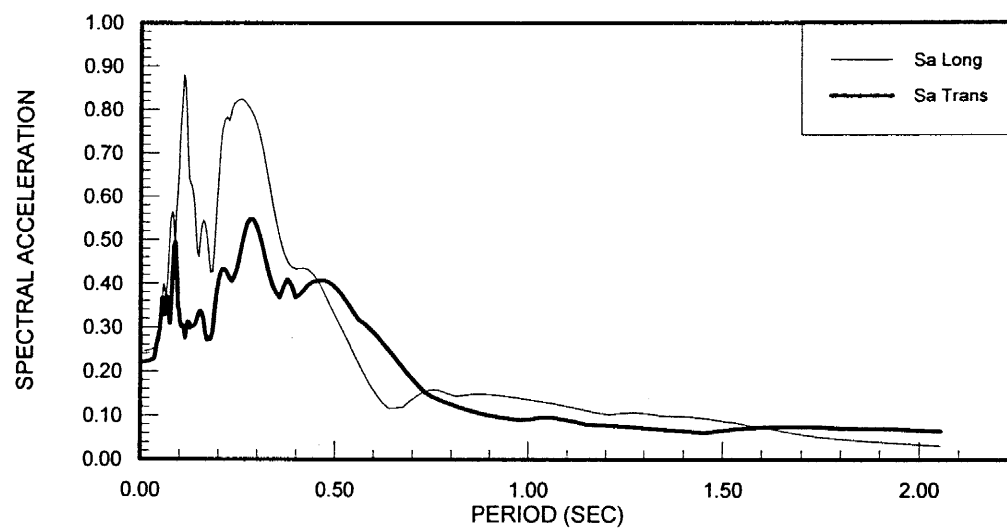


ΣΧΗΜΑ 3.10 ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ – ΣΤΑΘΜΟΣ
ΣΥΝΤΑΓΜΑΤΟΣ (SGMA) – ΒΑΘΟΣ = 7 m

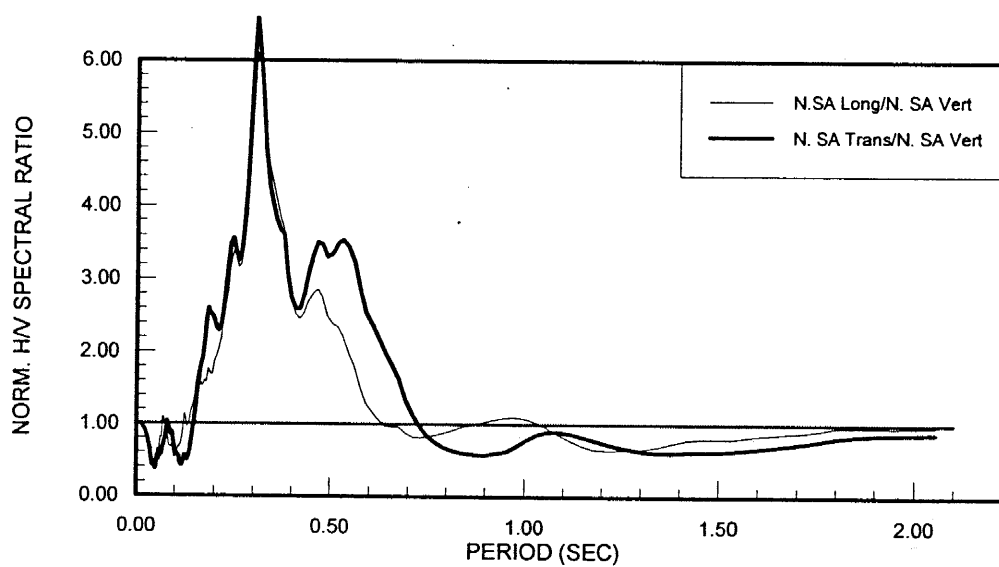
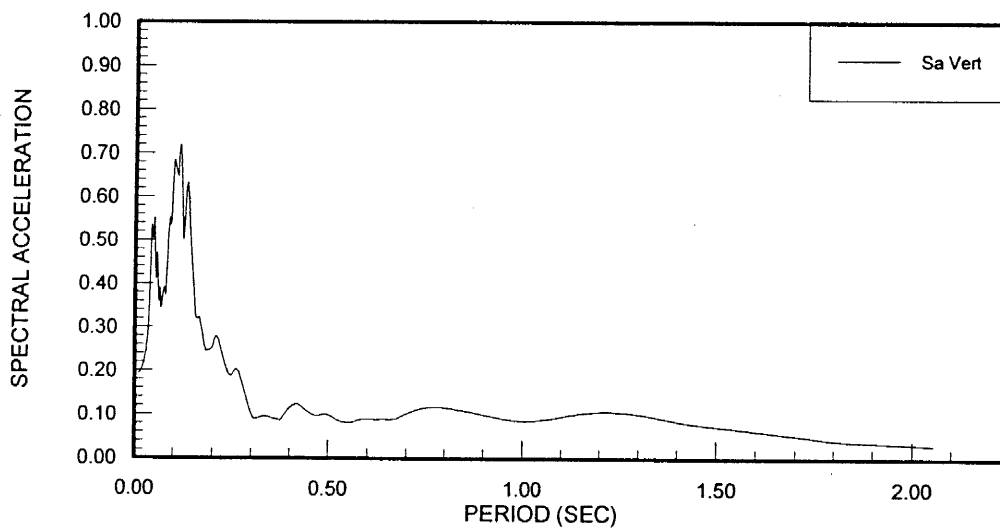
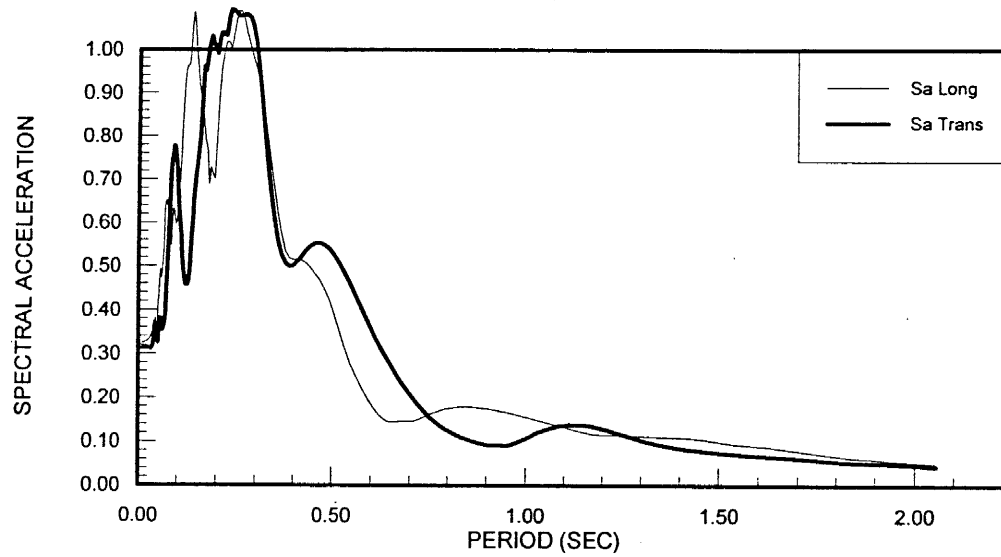


ΣΧΗΜΑ 3.11 ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ – ΣΤΑΘΜΟΣ
ΣΥΝΤΑΓΜΑΤΟΣ (SGMB) – ΒΑΘΟΣ = 26 m

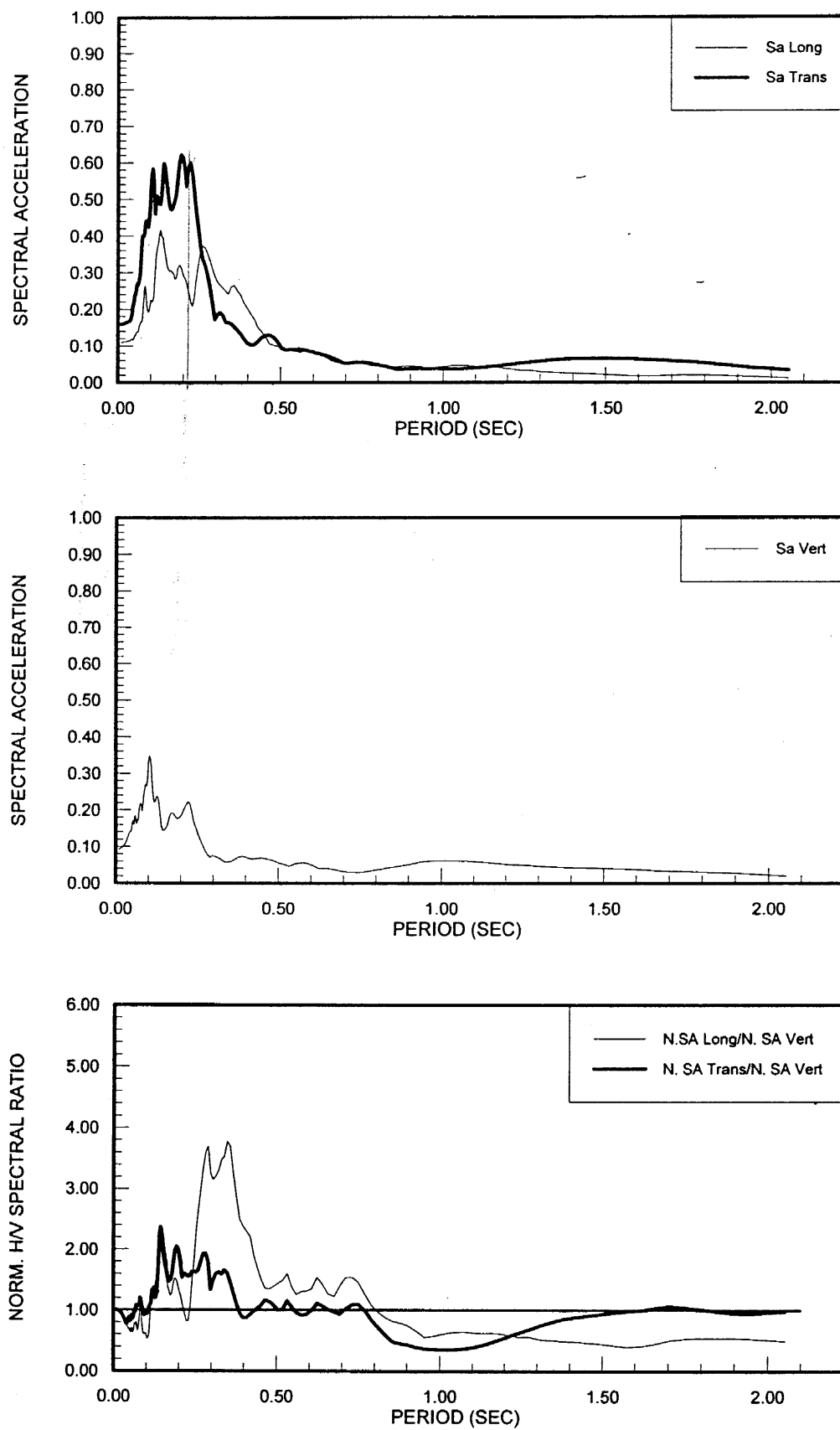


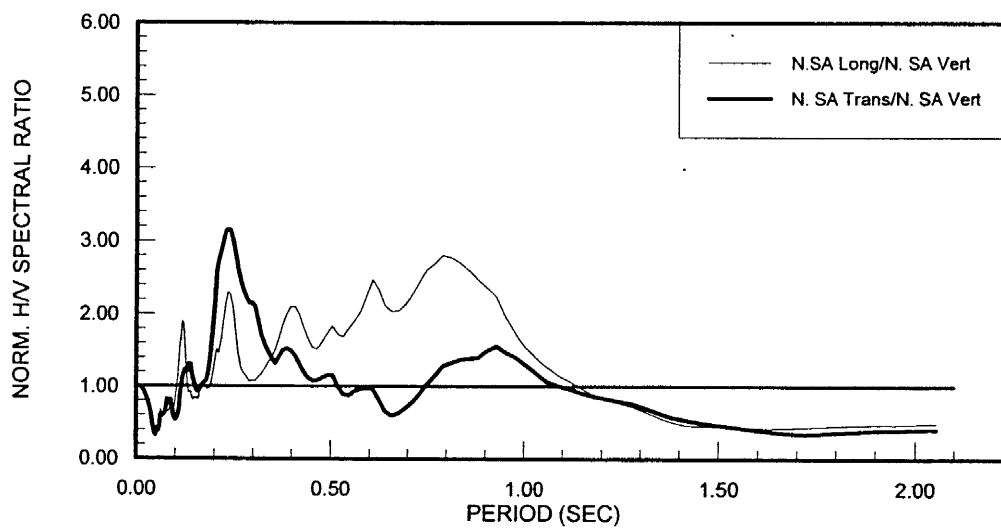
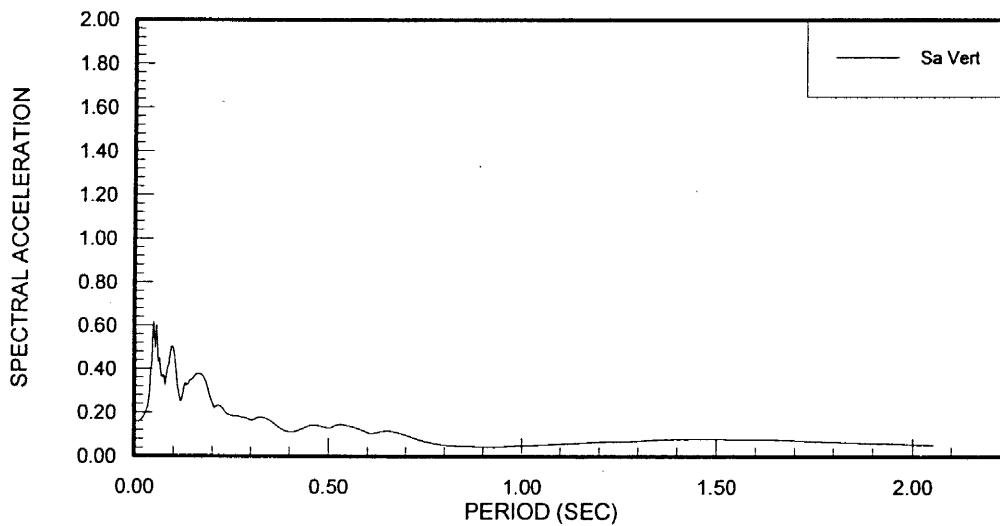
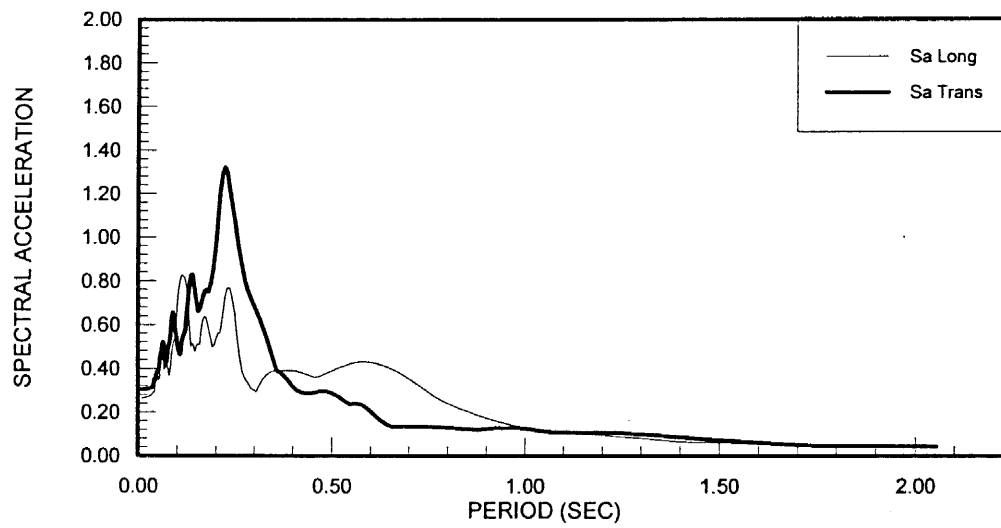


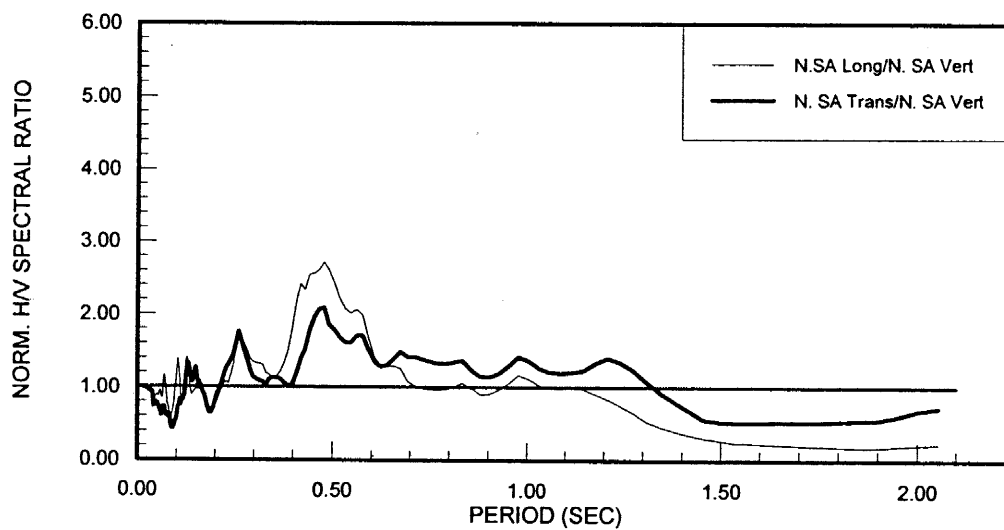
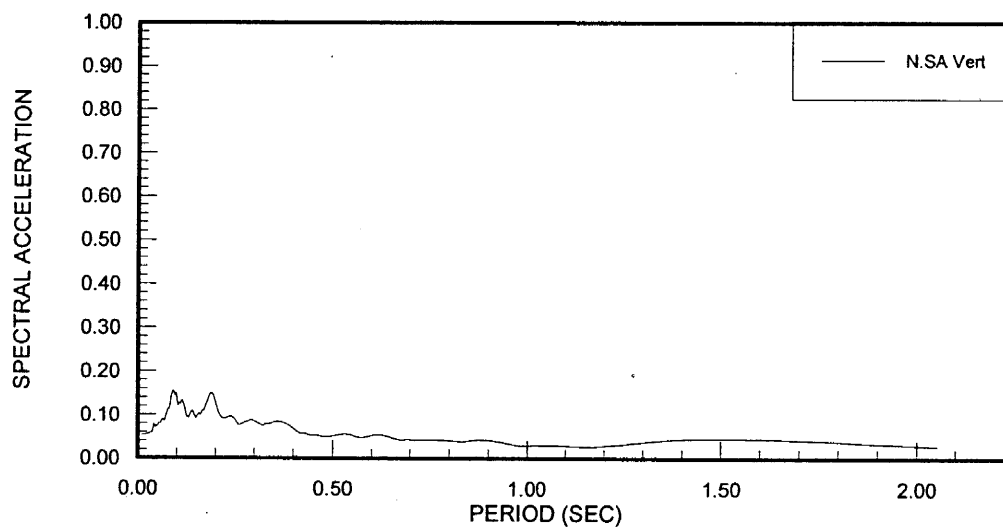
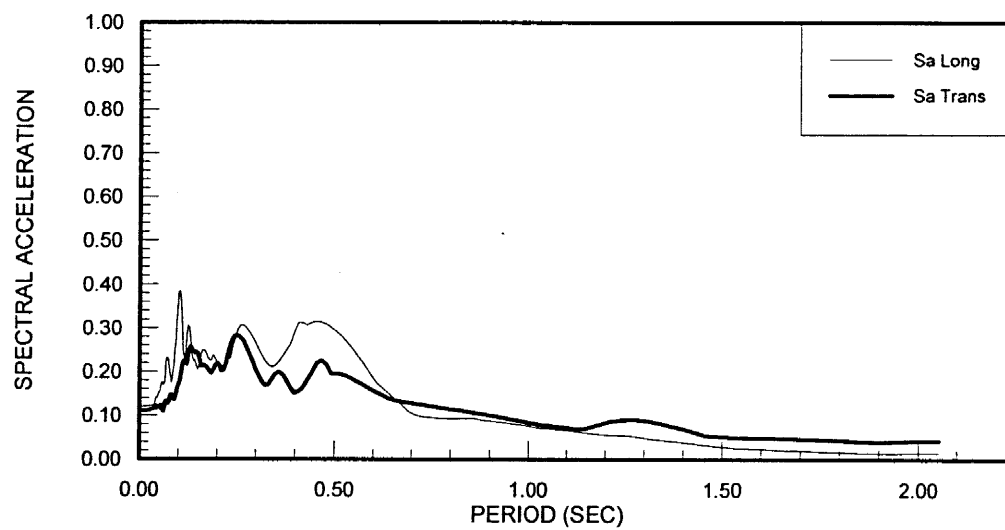
ΣΕΠΟΛΙΩΝ (SPLB) – ΒΑΘΟΣ = 0 m

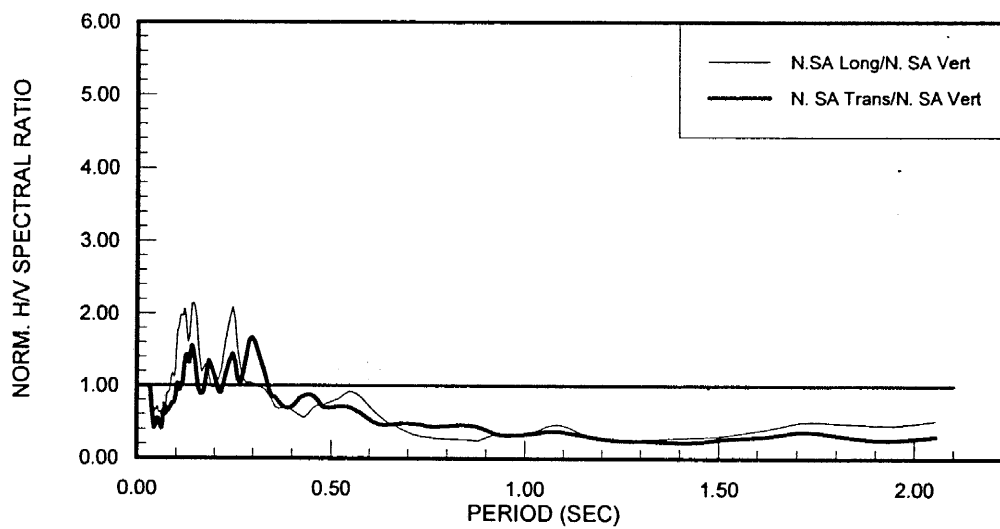
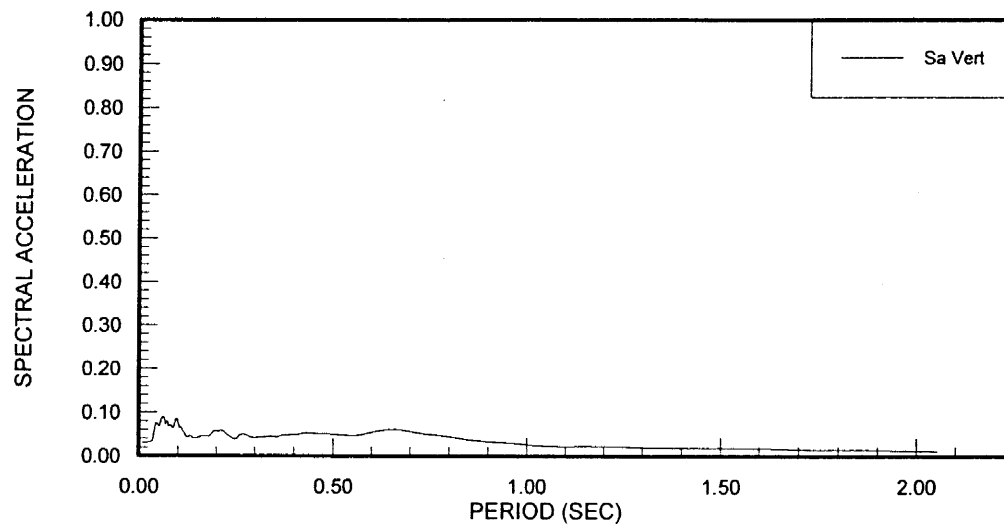
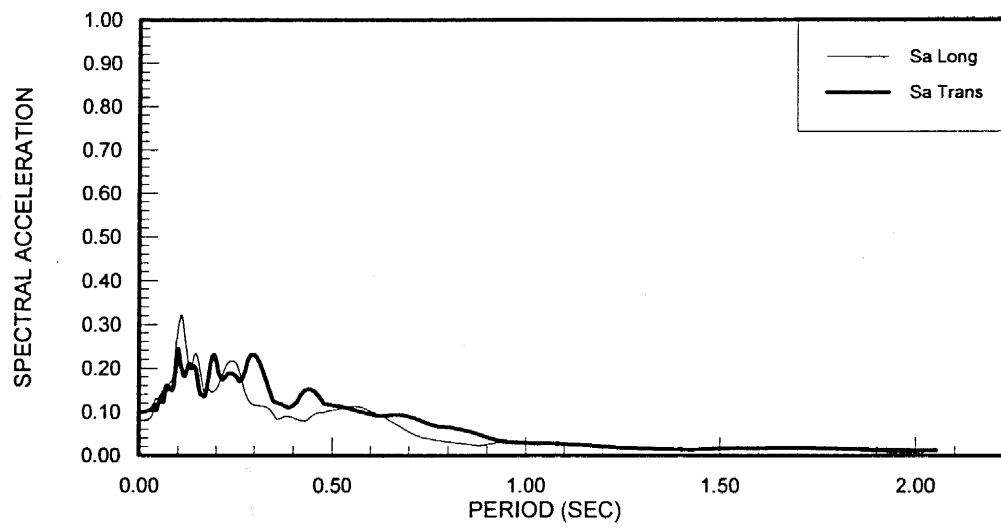


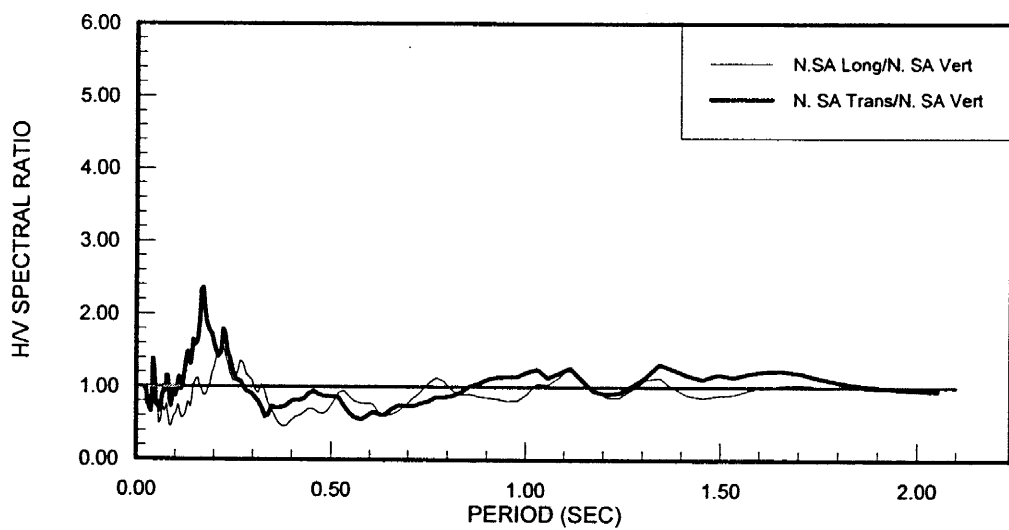
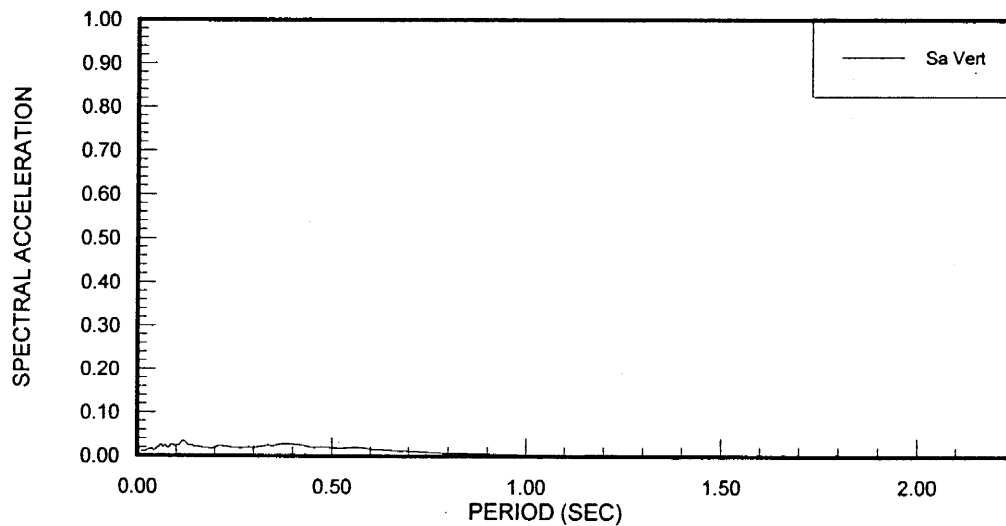
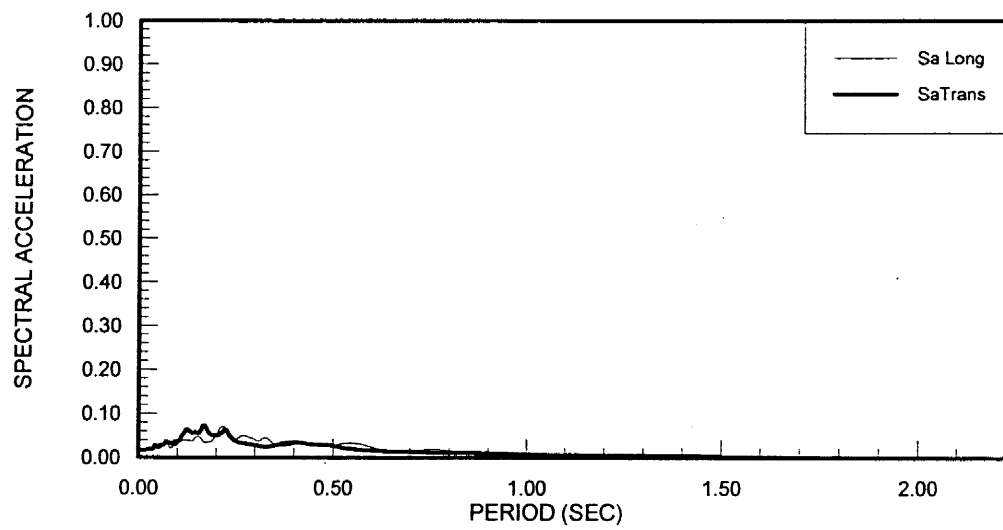
ΣΧΗΜΑ 3.14 ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ – ΣΤΑΘΜΟΣ
ΧΑΛΑΝΔΡΙΟΥ (ATH-02) – ΒΑΘΟΣ = 0 m



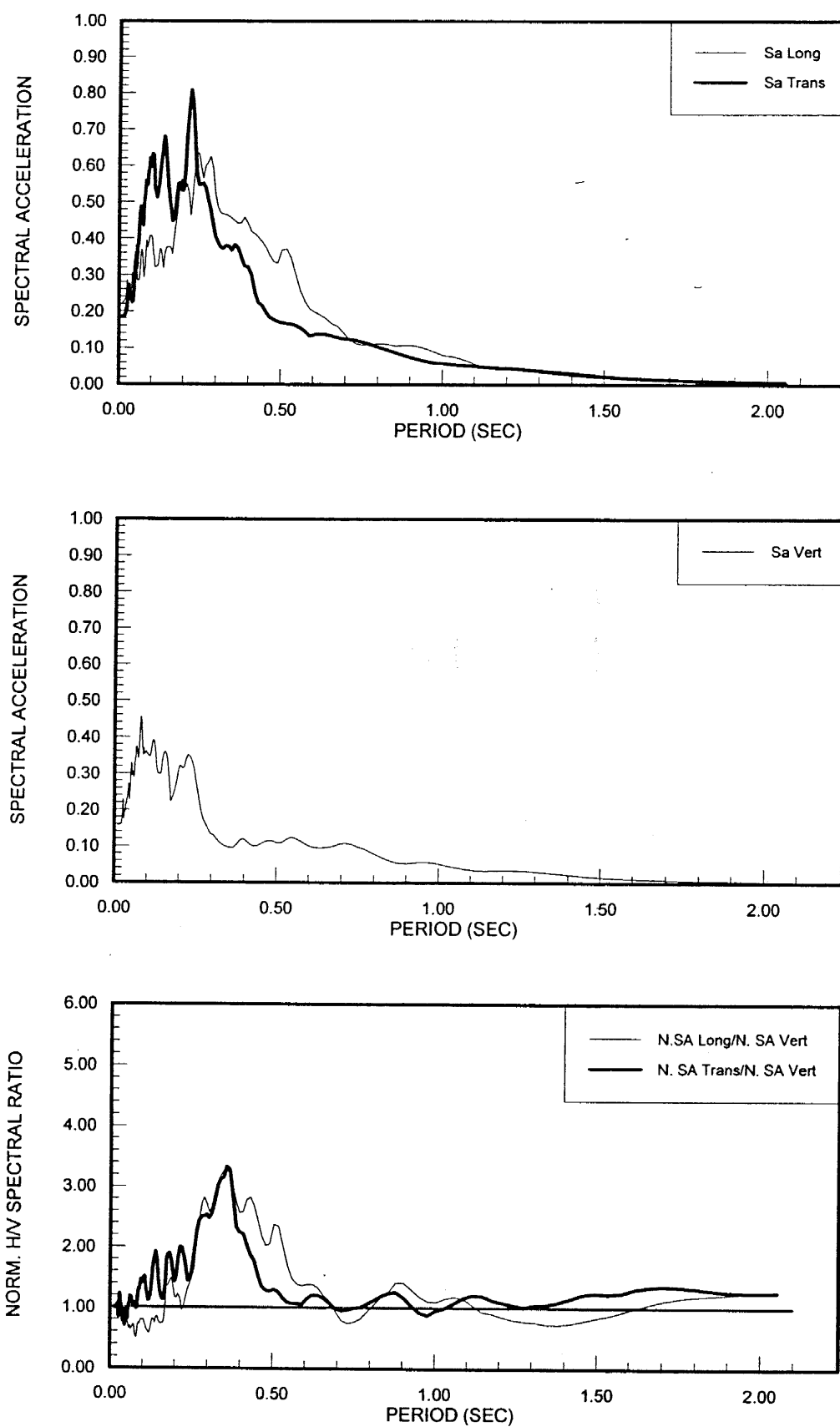




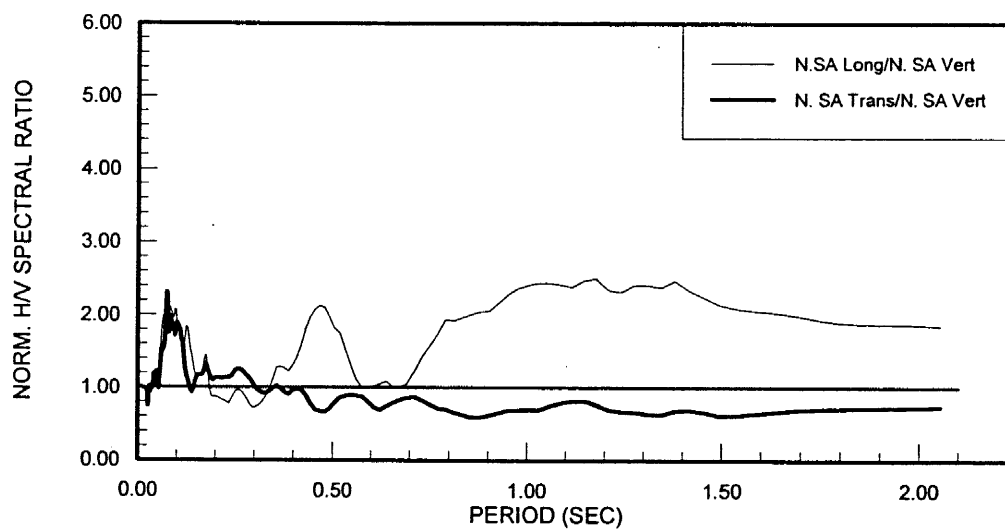
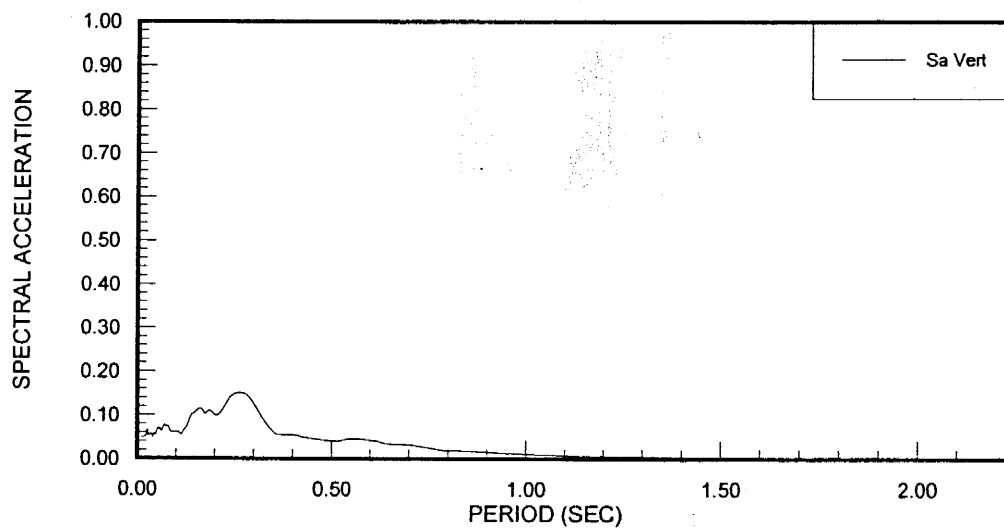
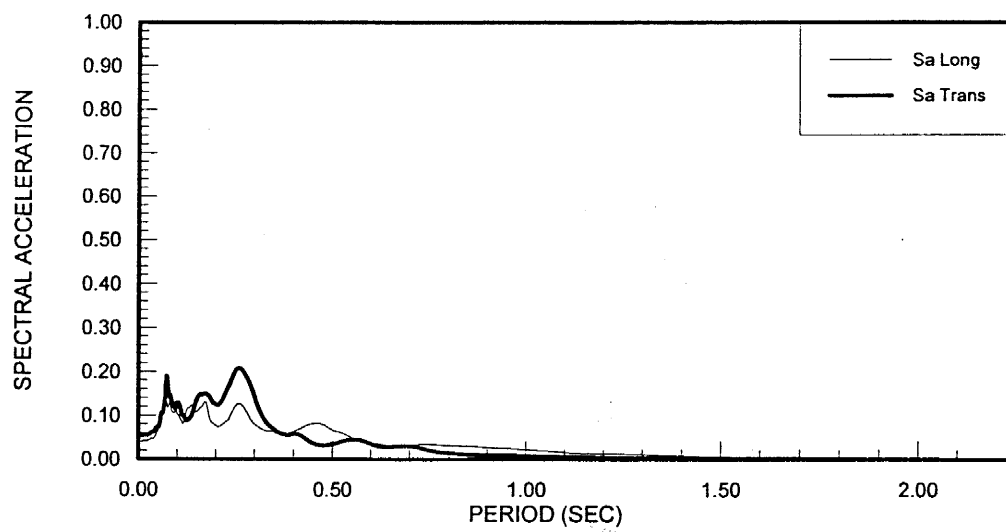




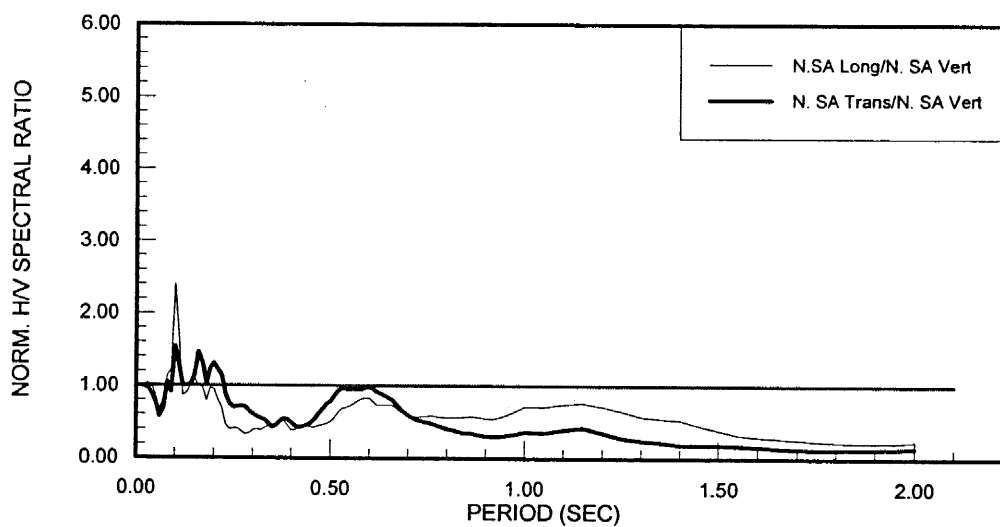
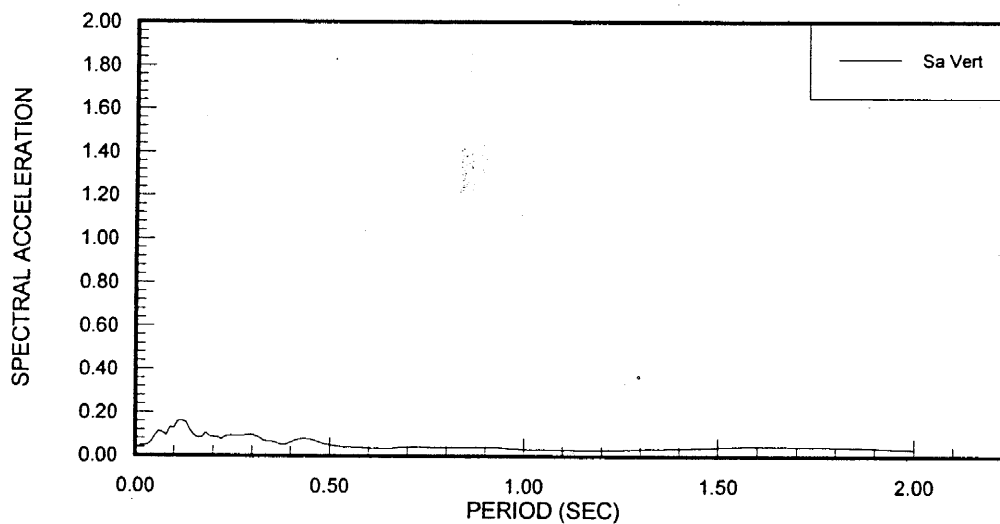
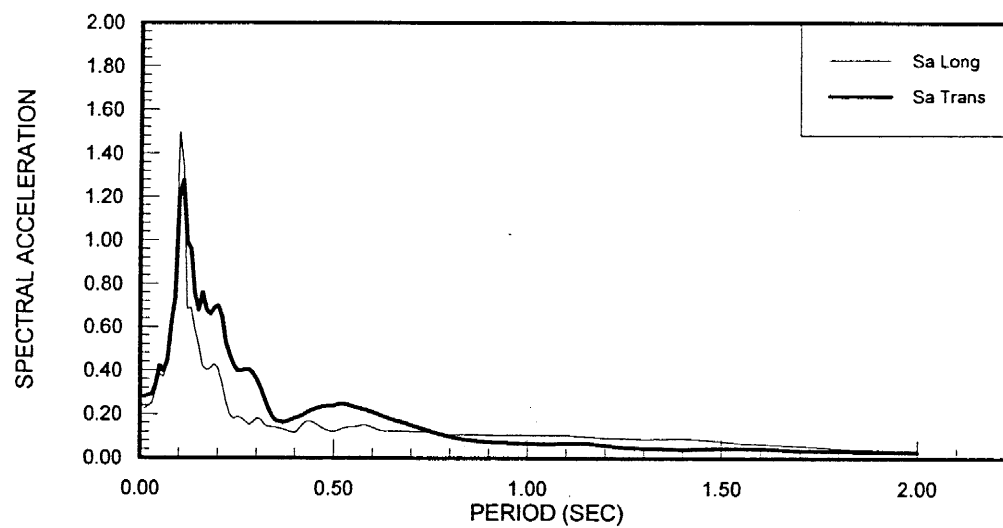
ΣΧΗΜΑ 3.19 ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ – ΣΤΑΘΜΟΣ
ΚΕΡΑΤΣΙΝΙΟΥ (ΚΕΡΑ) – ΒΑΘΟΣ = 0 m



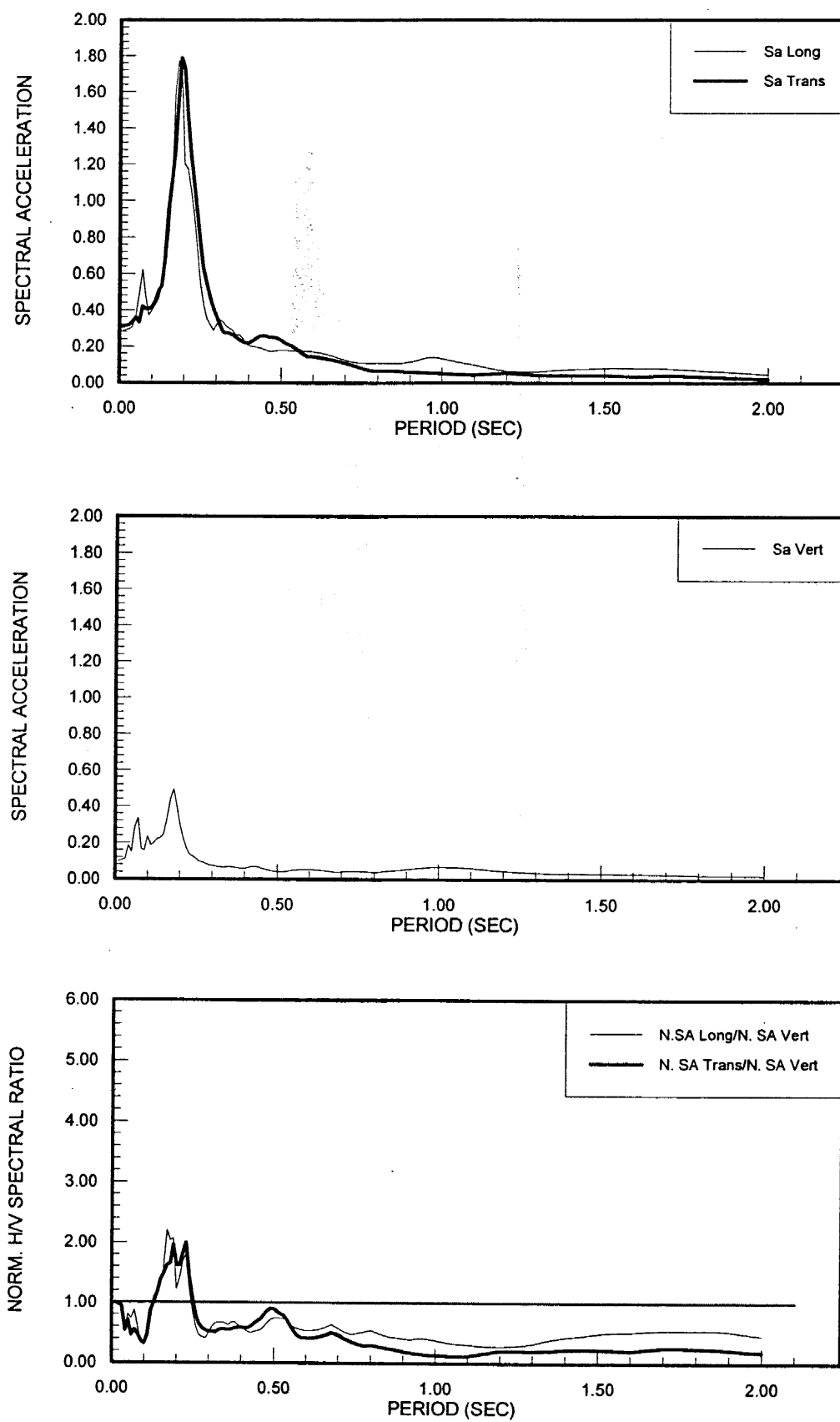
ΛΑΥΡΙΟΥ (LAVR) – ΒΑΘΟΣ = 0 m



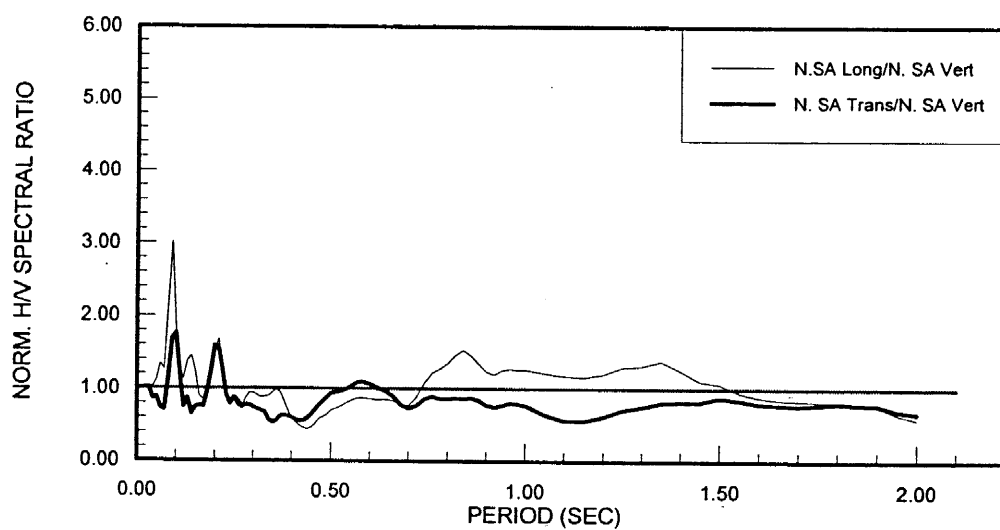
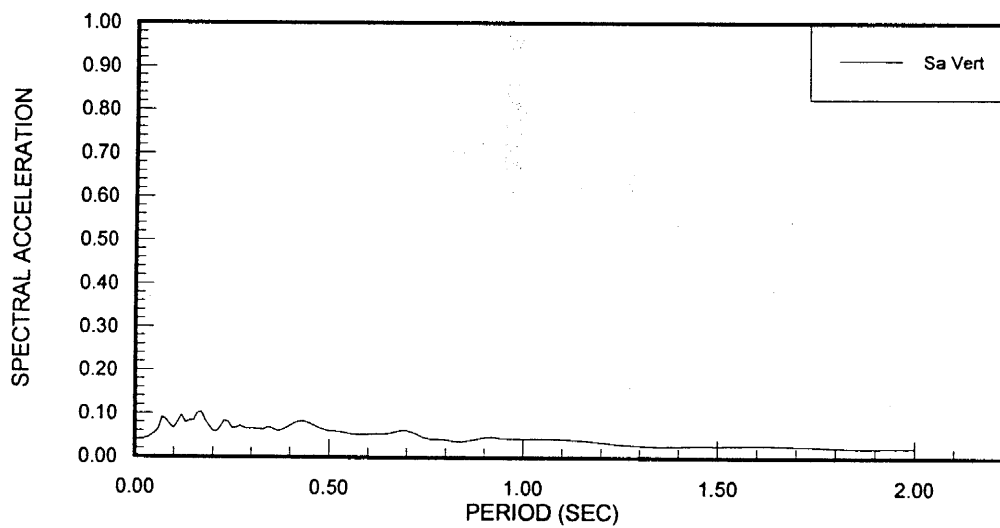
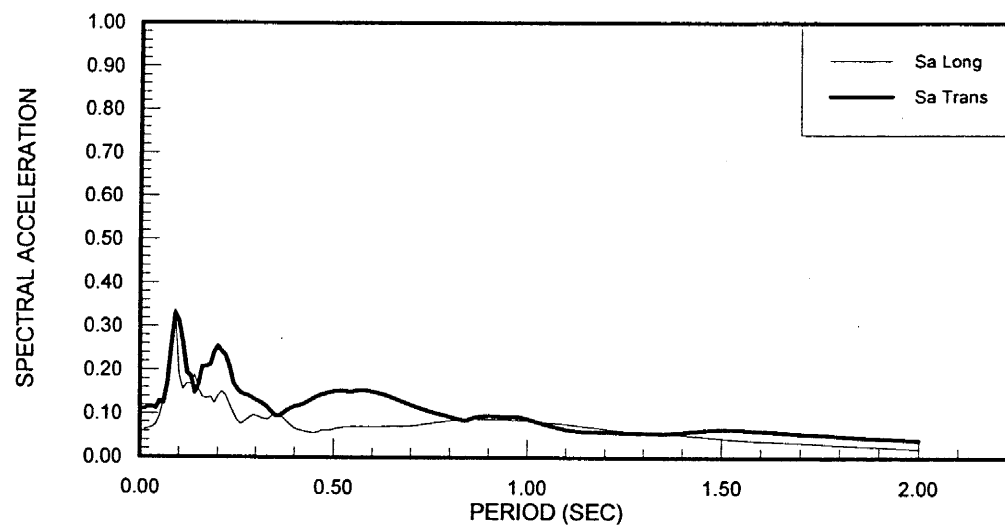
ΣΧΗΜΑ 3.21 ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΑ ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ
ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΣ – ΣΤΑΘΜΟΣ ΝΕΟΥ ΚΟΣΜΟΥ (FIX) – ΒΑΘΟΣ = 15 m



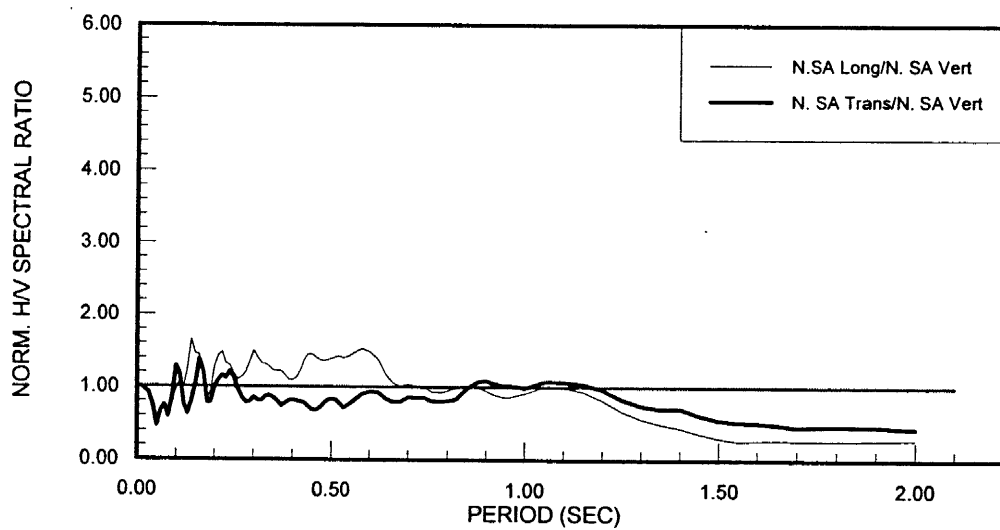
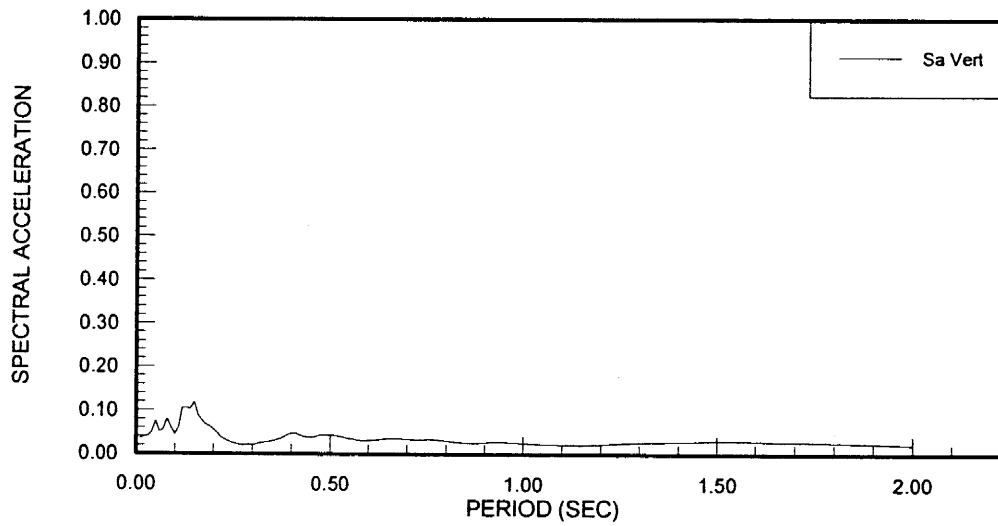
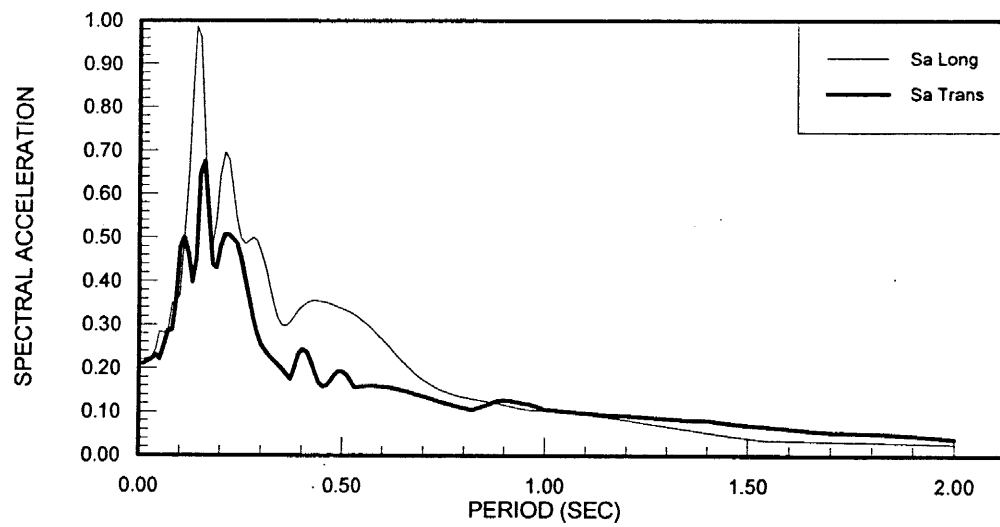
ΣΧΗΜΑ 3.22 ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΑ ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ
ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΣ – ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΕΝΤΑΓΩΝΟΥ (PNT) – ΒΑΘΟΣ = 15 m



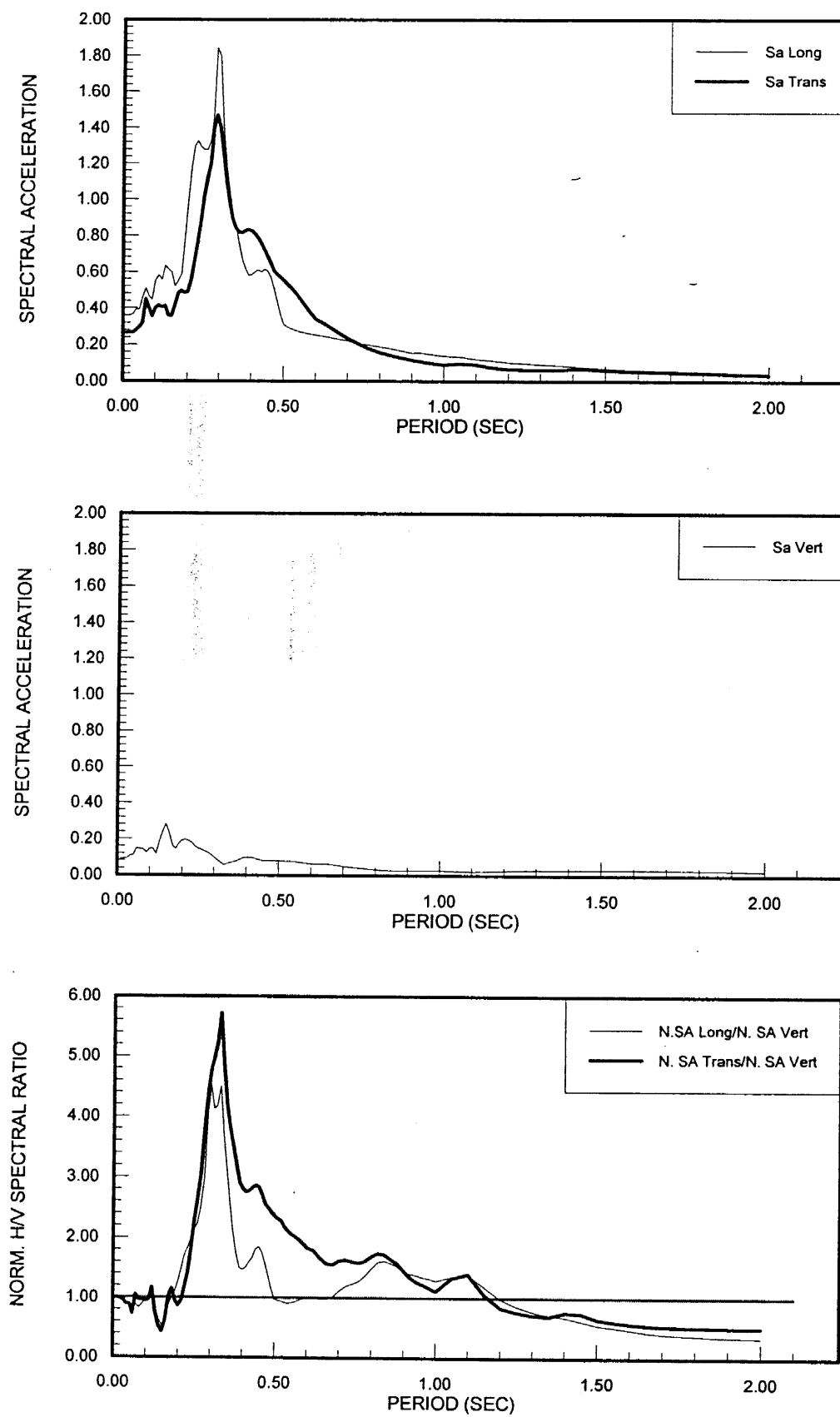
ΣΧΗΜΑ 3.23 ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΑ ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ
ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΣ – ΣΤΑΘΜΟΣ ΔΑΦΝΗ (DFN) – ΒΑΘΟΣ = 13.5 m



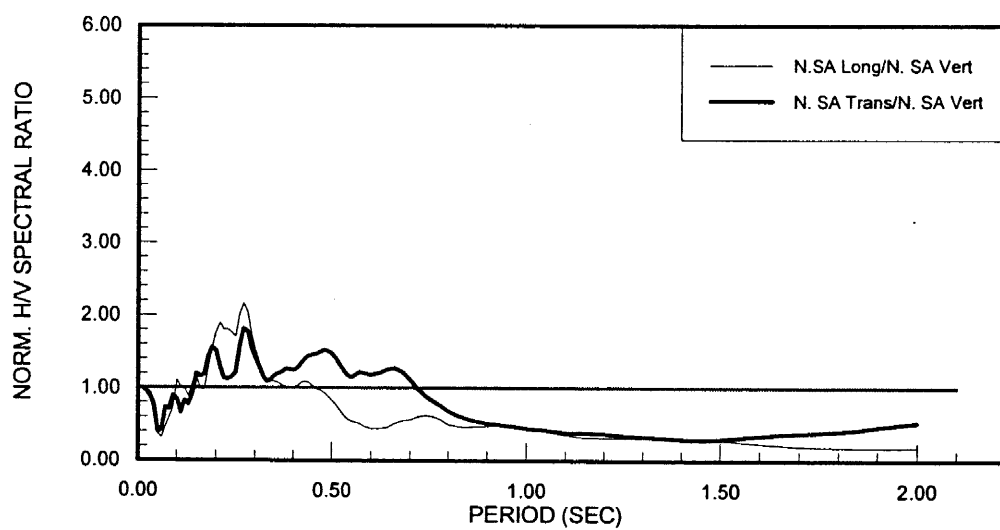
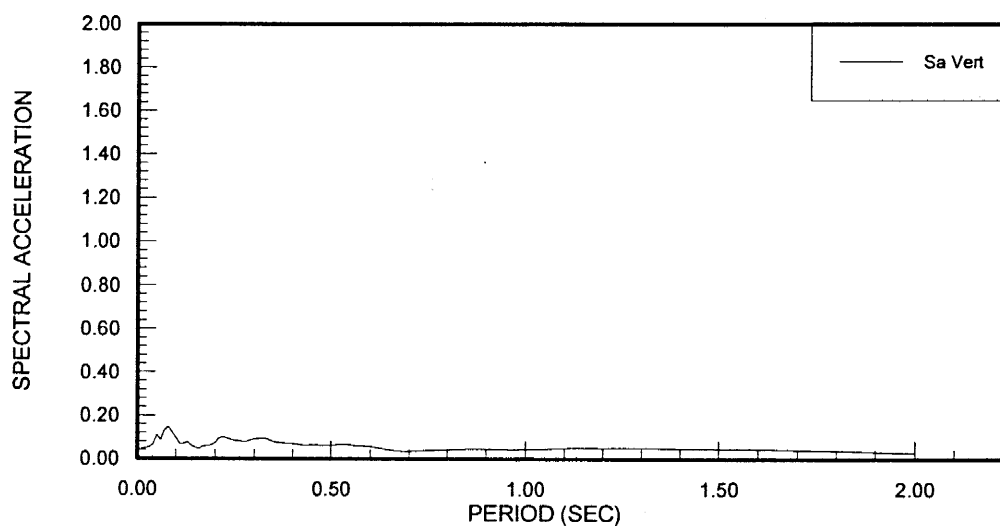
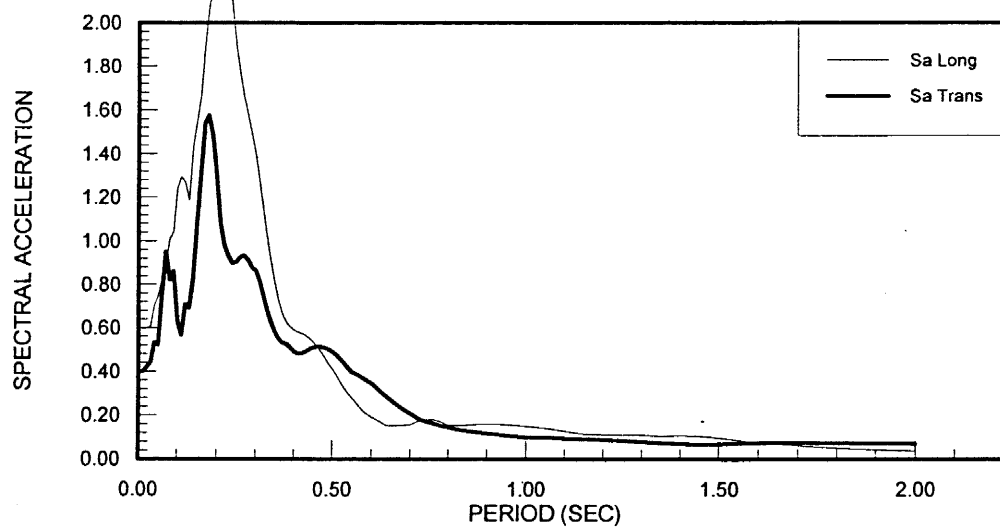
ΣΧΗΜΑ 3.24 ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΑ ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ
ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΣ – ΣΤΑΘΜΟΣ ΣΥΝΤΑΓΜΑΤΟΣ (SGMA) – ΒΑΘΟΣ = 7 m



ΣΧΗΜΑ 3.25 ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΑ ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ
ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΣ – ΣΤΑΘΜΟΣ ΣΥΝΤΑΓΜΑΤΟΣ (SGMB) – ΒΑΘΟΣ = 26 m



ΣΧΗΜΑ 3.26 ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΑ ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ
ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΣ – ΣΤΑΘΜΟΣ ΣΕΠΟΛΙΩΝ (SPLA) – ΒΑΘΟΣ = 13 m



4. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΕΛΑΦΟΥΣ

4.1 Γενικά

Οι αναλύσεις σεισμικής απόκρισης, που αποτελούν και το κυρίως κομμάτι της εργασίας αυτής, έχουν γίνει σε 11 θέσεις όπου είχαμε καταγραφές και ικανοποιητικά γεωτεχνικά στοιχεία ώστε να μορφωθεί ένα αξιόπιστο μοντέλο. (Στις περιοχές των Σεπολίων και του Συντάγματος είχαμε από 2 εγκατεστημένους επιταχυνσιογράφους που κατέγραψαν τον κύριο σεισμό). Οι θέσεις αυτές είναι: Στο σταθμό του Μετρό στο Μοναστηράκι, στο σταθμό του Μετρό στο Πεντάγωνο (καταγραφή σε βάθος), στο σταθμό του Μετρό στη Δάφνη (καταγραφή σε βάθος), στο σταθμό του Μετρό στο Σύνταγμα (2 καταγραφές σε βάθος), στο σταθμό του Μετρό και στο αμαξοστάσιο στα Σεπόλια (1 καταγραφή σε βάθος και μια επιφανειακή), στο σταθμό του Μετρό στο ΦΙΞ, στο Νέο Ψυχικό, στη Γ.Υ.Σ. στη Κυψέλη, στο Κ.Ε.Δ.Ε. στην οδό Πειραιώς, στο Πνευματικό Κέντρο στο Χαλάνδρι και στο εργοστάσιο της Δ.Ε.Η. στο Κερατσίνι.

Με τις αναλύσεις παίρνουμε ενδιαφέροντα στοιχεία για την συμπεριφορά του εδάφους στις συγκεκριμένες θέσεις και την πιθανή ενίσχυση της ισχυρής εδαφικής κίνησης. Στοιχεία όπως τα φάσματα απόκρισης και οι χρονιστορίες της επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές της στην επιφάνεια του εδάφους, στο σεισμικό υπόβαθρο (bedrock within) και στην εμφάνιση του σεισμικού υποβάθρου στην επιφάνεια (bedrock outcropping) αποτελούν πολύτιμα δεδομένα για περαιτέρω συμπεράσματα και αναλύσεις σε κατασκευές που επλήγησαν από την σεισμό. Επίσης στοιχεία όπως η συνάρτηση μεταφοράς (transfer function) ο λόγος των φασμάτων απόκρισης της επιφάνειας προς του σεισμικού υποβάθρου μαζί με τον λόγο NHVSR βοηθούν στην κατανόηση της συμπεριφοράς του εδαφικού προφίλ κατά την διέγερση.

4.2 Μεθοδολογία και Παραδοχές Αναλύσεων Σεισμικής

Απόκρισης

Η σεισμική απόκριση του εδάφους στις 11 αυτές θέσεις, όπου είχαμε και τις καταγραφές υπολογίσθηκε αναλυτικά, υποθέτοντας ότι τα σεισμικά κύματα έχουν την μορφή οριζόντια πολωμένων διατμητικών κυμάτων τα οποία μεταδίδονται κατακόρυφα, από το σεισμικό υπόβαθρο προς την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Η βασική αυτή παραδοχή είναι ικανοποιητικά ακριβής, όπου οι καταγραφές είναι επιφανειακές, καθώς η τοπογραφία της περιοχής είναι σε γενικές γραμμές ομαλή.

Οι καταγραφές όμως που έχουν γίνει στους υπόγειους σταθμούς του Μετρό, είναι πολύ πιθανόν να έχουν επηρεαστεί από την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής. Η πολυπλοκότητα της κατασκευής των σταθμών (όπως αυτού στο Σύνταγμα) κάνει την βασική παραδοχή μας, που οδηγεί σε μονοδιάστατη ανάλυση (1-Δ), επισφαλή και παρακινδυνευμένη. Άλλωστε, όπως είδαμε στα φάσματα απόκρισης και τον λόγο NHVSR στις καταγραφές στο σταθμό του Συντάγματος, κάθε άλλο παρά αναμενόμενα ήταν τα αποτελέσματα. Μια ορθολογική αντιμετώπιση του προβλήματος απαιτεί διδιάστατη (2-Δ) ανάλυση ώστε να ληφθεί υπ' όψιν και η επιρροή των σταθμών, πράγμα που φυσικά ξεφεύγει από τα πλαίσια της εργασίας αυτής. Όμως, χωρίς να ξεχνάμε όλες τις αβεβαιότητες που την ακολουθούν, η μονοδιάστατη ανάλυση προσφέρει στοιχεία που αν εκτιμηθούν σωστά μπορούν να βοηθήσουν στη κατανόηση του προβλήματος.

Κρατώντας λοιπόν όλα τα παραπάνω, ανάγουμε το πρόβλημα της σεισμικής απόκρισης στο απλούστερο πρόβλημα της μονοδιάστατης μετάδοσης σεισμικών κυμάτων στο έδαφος. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται αριθμητικά με την βοήθεια του προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή SHAKE (Schnabel et. al., 1972). Οι διαφορικές εξισώσεις της μετάδοσης των σεισμικών κυμάτων για τυχούσα σεισμική διέγερση επιλύονται αναλυτικά με χρήση της ανάλυσης Fourier (Frequency Domain Analysis). Συγκεκριμένα:

- η τυχούσα σεισμική διέγερση αναλύεται σε πεπερασμένο αριθμό αρμονικών συνιστωσών
- η απόκριση της εδαφικής στήλης υπολογίζεται αναλυτικά για κάθε μια αρμονική συνιστώσα της διέγερσης, και
- όλες οι επιμέρους αποκρίσεις που υπολογίσθηκαν κατ' αυτό τον τρόπο επαλληλίζονται με την αντίστροφη μεθοδολογία Fourier προκειμένου να δώσουν την τελική απόκριση της εδαφικής επιφάνειας.

Η ακριβής εφαρμογή της ανωτέρω μεθοδολογίας προϋποθέτει ένα γραμμικώς βισκο-ελαστικό μέσον, με σταθερό μέτρο διατμητικής παραμόρφωσης (G) και σταθερό λόγο υστερητικής απόσβεσης (D). Η πραγματική συμπεριφορά του εδάφους υπό δυναμική-επαναλαμβανόμενη εξαίτηση, όπου τόσο το (G) όσο και το (D) αποτελούν συναρτήσεις της επαναλαμβανόμενης διατμητικής παραμόρφωσης (γ), προσομοιάζεται με επαναληπτική εφαρμογή της ανωτέρω μεθοδολογίας: οι χρησιμοποιούμενες τιμές των παραμέτρων (G) και (D) τροποποιούνται διαδοχικά μέχρι να γίνουν συμβιβαστές τελικώς με τις αντίστοιχες τιμές της διατμητικής παραμόρφωσης (γ) που προκύπτουν από την ανάλυση.

Στην πράξη, η εφαρμογή της μεθοδολογίας ξεκινάει με τον ορισμό του σεισμικού υποβάθρου. Ως «σεισμικό υπόβαθρο» μιας περιοχής ορίζεται το δύσκαμπτο ελαστικό μέσον επί του οποίου επικάθονται οι σχετικά μαλακότερες επιφανειακές στρώσεις του εδάφους και μέσω του οποίου μεταδίδονται τα σεισμικά κύματα πριν από την άφιξή τους στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Από μαθηματική σκοπιά τις προϋποθέσεις του σεισμικού υποβάθρου πληρεί οποιαδήποτε συνεχής στρώση εδάφους ή βράχου μεγάλου πάχους με διατμητική δυσκαμψία σημαντικά μεγαλύτερη των υπερκείμενων γαιών.

Για τον αντικειμενικό προσδιορισμό της θέσεως του σεισμικού υποβάθρου έχουν διατυπωθεί κριτήρια τα οποία ουσιαστικά συνίστανται στον καθορισμό μιας ελάχιστης τιμής της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_s) (π.χ. 700 m/sec) ή του ελαστικού μέτρου διάτμησης (G_0) (π.χ. 1000 MPa). Οι ορισμοί αυτοί όμως δεν βρίσκουν γενική εφαρμογή μια και πέρα από την απόλυτη τιμή

των (V_s) και (G_0), σημαντικό ρόλο παίζει και η μεταβολή τους με το βάθος, από την ελεύθερη επιφάνεια έως το σεισμικό υπόβαθρο.

Εναλλακτικά, το σεισμικό υπόβαθρο μιας περιοχής μπορεί να ορισθεί με βάση την γεωλογική ηλικία των σχηματισμών που συναντώνται σε μια θέση, με το σκεπτικό ότι η πυκνότητα και η δυσκαμψία αυξάνουν κατά κανόνα με την ηλικία του σχηματισμού. Έτσι είναι λογικό να αναμένεται ότι το γεωλογικό υπόβαθρο μιας θέσης, το οποίο αποτελείται από νεογενείς ή παλαιότερους σχηματισμούς, ικανοποιεί εν γένει τις προϋποθέσεις του σεισμικού υποβάθρου σε σχέση με τις υπερκείμενες πρόσφατες αποθέσεις. Το βασικό πλεονέκτημα του ορισμού αυτού είναι ότι προσφέρει έναν αντικειμενικό και παράλληλα πρακτικό τρόπο αντιμετώπισης του προβλήματος μια και έτσι η θέση του γεωλογικού υποβάθρου είναι γνωστή, έστω και κατά προσέγγιση, από γεωλογικές μελέτες.

Μετά από μελέτη των αποτελεσμάτων των γεωτρήσεων στις περιοχές άμεσου ενδιαφέροντος και της γεωλογίας της περιοχής των Αθηνών, διαπιστώθηκε ότι πρακτικά το σεισμικό υπόβαθρο μπορεί να τοποθετηθεί στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των πιο πρόσφατων αλλούβιων αποθέσεων και του Αθηναϊκού σχιστόλιθου ιζηματογενούς προέλευσης, ο οποίος με διάφορους βαθμούς αποσάρθρωσης εμφανίζεται σε όλες της περιοχές. Πάντως υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο βαθμός αποσάρθρωσης του σχιστόλιθου είναι τόσο μεγάλος (π.χ. Μοναστηράκι) ώστε να χαρακτηρίζεται πλέον σαν έδαφος και να δίνει τιμές N_{SPT} μικρότερες του 50. Στις περιπτώσεις αυτές φυσικά το σεισμικό υπόβαθρο ορίστηκε βαθύτερα, σε λιγότερο εξαλλοιωμένες εμφανίσεις του μητρικού πετρώματος. Σε κάθε περιοχή υπάρχει γεωλογική τομή με την λιθολογία των σχηματισμών που συναντώνται και το βάθος όπου έχει οριστεί το σεισμικό υπόβαθρο.

Σαν ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων V_s στο σεισμικό υπόβαθρο έχουν ληφθεί παντού τα 600 m/sec, από παλιότερες δοκιμές Crosshole που μέτρησαν την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων μέσα στον Αθηναϊκό σχιστόλιθο.

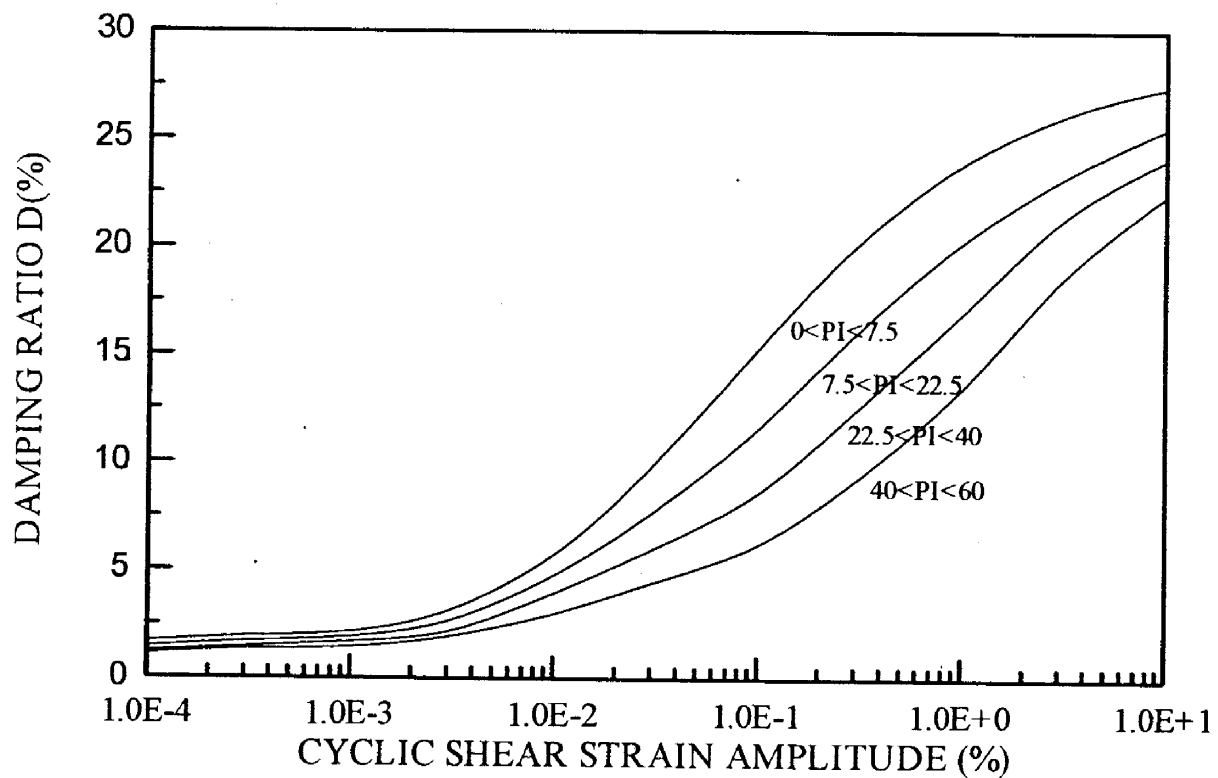
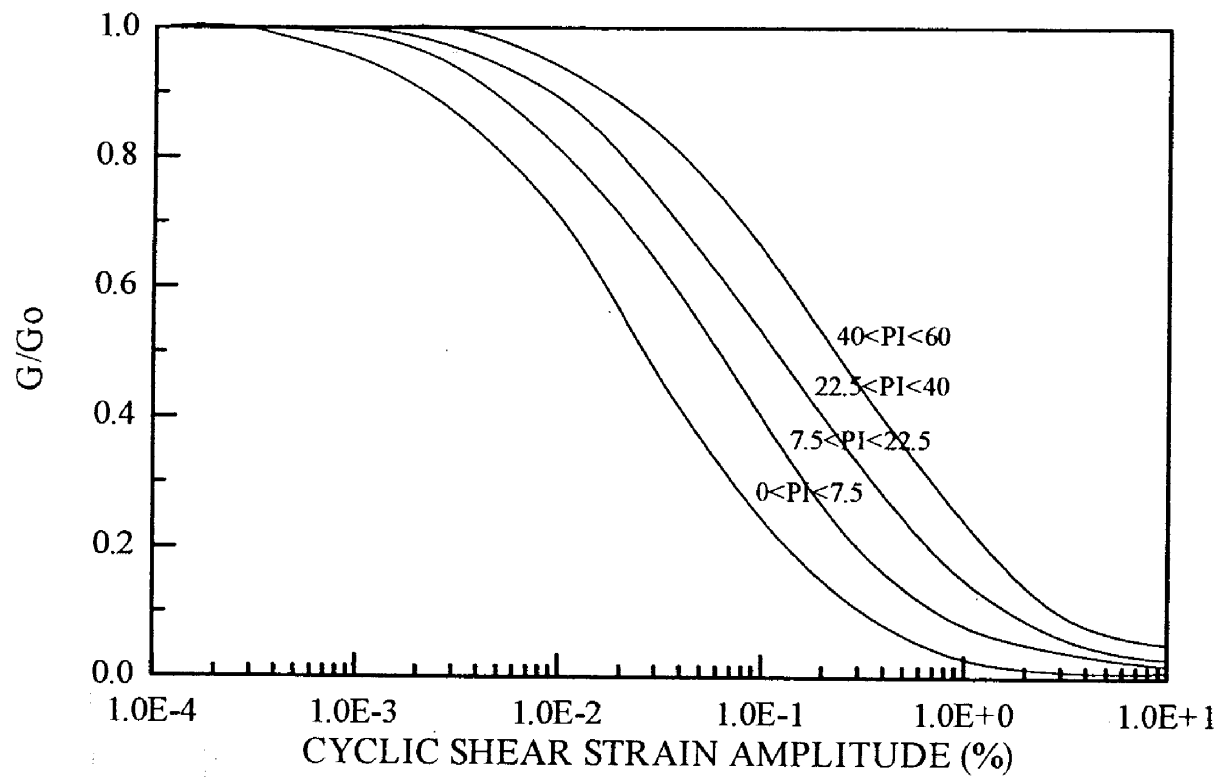
Η αποτίμηση της διατμητικής δυσκαμψίας των εδαφικών στρώσεων για πολύ μικρό εύρος επιβαλλόμενων παραμορφώσεων ($\gamma < 10^{-5}$) γίνεται είτε με το ελαστικό μέτρο διάτμησης του εδάφους (G_0) ή με την ταχύτητα μετάδοσης των διατμητικών κυμάτων μέσα στο έδαφος (V_s). Τα δύο μεγέθη αυτά συνδέονται άλλωστε με την σχέση: $G_0 = \rho \cdot V_s^2$ όπου ρ είναι η πυκνότητα του εδάφους. Για την προσομοίωση λοιπόν των, υπερκείμενων του σεισμικού υποβάθρου, εδαφικών στρώσεων έγινε έμμεση εκτίμηση της ταχύτητας-διάδοσης των διατμητικών κυμάτων V_s από τα αποτελέσματα των δοκιμών πρότυπης διείσδυσης (SPT) που εκτελέστηκαν σε γεωτρήσεις στις περιοχές που γίνονται οι αναλύσεις. Οι εμπειρικές σχέσεις των Imai και Tonuchi (1982) συσχετίζουν το (V_s) με τον αριθμό κρούσεων (N_{SPT}) για διαφορετικά εδάφη. Για τους σχηματισμούς που συναντάμε στις γεωτρήσεις της περιοχής μας θεωρήθηκε ικανοποιητική η σχέση $V_s = 97.0 N^{0.314}$ m/sec. Η προσέγγιση αυτή είναι στο πνεύμα της ποιότητας των γεωτεχνικών δεδομένων που υπάρχουν για τις αναλύσεις και στην μη δυνατότητα φυσικά να εκτελεστούν δοκιμές Crosshole για άμεσο υπολογισμό της ταχύτητας V_s .

Όπως είναι φυσικό δεν ήταν δυνατόν να υπάρχουν παντού γεωτρήσεις ακριβώς στο σημείο όπου ήταν εγκατεστημένος ο επιταχυνσιογράφος. Συγκεντρώνοντας όμως τιμές δοκιμών πρότυπης διείσδυσης (SPT) σε διάφορα βάθη, από γεωτεχνικές έρευνες που έγιναν σε μικρή ακτίνα από την θέση του οργάνου (οι πηγές των στοιχείων αυτών αναφέρονται αναλυτικά αλλού) μπορούμε να φτιάξουμε μια περιβάλλουσα των τιμών N_{SPT} , άρα και της ταχύτητας V_s . Συνεπώς επιλέγουμε μια κατανομή της ταχύτητας V_s συναρτήσει του βάθους με βάση την περιβάλλουσα αυτή και τα υπόλοιπα στοιχεία που έχουμε στη διάθεσή μας για το υπέδαφος της περιοχής. Την ίδια λογική της περιβάλλουσας τιμών με στοιχεία από περισσότερες από μια γεωτρήσεις ακολουθούμε και για τα υπόλοιπα δεδομένα που χρειαζόμαστε για τις αναλύσεις (πυκνότητα εδάφους, δείκτης πλαστικότητας κτλ).

Σύμφωνα με την ακολουθούμενη μέθοδο ανάλυσης, η ανελαστική συμπεριφορά της κάθε εδαφικής στρώσης (ή εδαφικού στοιχείου) περιγράφεται από καμπύλες μεταβολής του αδιάστατου λόγου των μέτρων διάτμησης (G/G_0) και του λόγου

κρίσιμης υστερητικής απόσβεσης (D) συναρτήσει του εύρους της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης (γ). Λόγω έλλειψης κατάλληλων πειραματικών δεδομένων, στην παρούσα εργασία τα στοιχεία αυτά λαμβάνονται από την σχετική βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα υιοθετούνται οι ευρέως αποδεκτές και δοκιμασμένες καμπύλες του Σχήματος 3.1, οι οποίες έχουν προταθεί από τους Vucetic and Dobry (1991), με βάση σωρεία πειραματικών δεδομένων από δοκιμές συντονισμού (Resonant Column Tests).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, η ανελαστική συμπεριφορά του εδάφους είναι συνάρτηση του δείκτη πλαστικότητας (PI) και συγκεκριμένα το έδαφος είναι τόσο περισσότερο ανελαστικό όσο ο δείκτης πλαστικότητας μειώνεται. Στην παρούσα εφαρμογή, για κάθε εδαφική στρώση επελέγησαν διαφορετικές πειραματικές καμπύλες ($G/G_0-\gamma$) και ($D-\gamma$) ανάλογα με την τιμή του (PI) που προέκυψε από τα γεωτεχνικά στοιχεία που συγκεντρώθηκαν.



Σχήμα 4.1 Επίδραση της διατμητικής παραμόρφωσης στο μέτρο διάτμησης G και στο λόγο υστερητικής απόσβεσης D .

4.3 Στοιχεία από τις Αναλύσεις Σεισμικής Απόκρισης

A. Εδαφικές Τομές

Για κάθε θέση που έχουν γίνει αναλύσεις παρουσιάζεται μια τυπική εδαφική τομή από την πλησιέστερη στη θέση της καταγραφής γεωτρήση μαζί με τα γεωτεχνικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν. Παρέχονται τα παρακάτω στοιχεία:

- Λιθολογία και πάχος όλων των εδαφικών στρώσεων κατά μήκος της πλησιέστερης γεωτρήσεως (στο Παράρτημα Β υπάρχει πίνακας με τις επεξηγήσεις των συμβόλων).
- Θέση του σεισμικού υποβάθρου
- Περιβάλλουσα της μεταβολής με το βάθος των τιμών N_{SPT} που προέκυψαν από δοκιμές πρότυπης διείσδυσης σε γεωτρήσεις στη περιοχή της καταγραφής.
- Αντίστοιχες περιβάλλουσες για τον δείκτη πλαστικότητας (PI), το ειδικό βάρος του εδάφους (γ), την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη q_u , την πυκνότητα του εδάφους (ρ), που υπολογίστηκε από το ειδικό του βάρος και τις τιμές της ταχύτητας διάδοσης διατμητικών κυμάτων (V_s), που προέκυψαν από τις αντίστοιχες του N_{SPT} με την σχέση των Imai και Tonuchi.

B. Σεισμική διέγερση

Σε κάθε θέση έγιναν δυο αναλύσεις: μια για την Long συνιστώσα της διέγερσης και μια για την Trans. Οι δυο αυτές συνιστώσες προκύπτουν από τον προσανατολισμό των οργάνων που δεν ήταν ο ίδιος παντού. Στις περιπτώσεις όπου είχαμε δυο επιταχυνσιογράφους σε μικρή απόσταση (Σύνταγμα και Σεπόλια), οι καταγραφές του ενός οργάνου στράφηκαν ώστε να έχουν και οι δυο τον ίδιο προσανατολισμό. Το πρόγραμμα SHAKE που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις δίνει την δυνατότητα να ορίσουμε μια μέγιστη συχνότητα της ισχυρής σεισμικής κίνησης (Frequency cut-off) για να «κόψουμε» το υψίσυχο κομμάτι της καταγραφής που δεν μας ενδιαφέρει. Αυτή η τιμή ορίστηκε παντού στα 50Hz. Επίσης το πρόγραμμα αυτό μπορεί να διαβάσει το μέγιστο 4096 τιμές

επιτάχυνσης από το αρχείο της καταγραφής ώστε να κάνει τον μετασχηματισμό Fourier. Οπότε στα επιταχυνσιογράμματα που είχαμε περισσότερα σημεία κρατήσαμε μόνο το κομμάτι της ισχυρής σεισμικής κίνησης, που άλλωστε είναι και αυτό που πρέπει να μπει στην ανάλυση. Για κάθε σεισμική διέγερση για την οποία έγινε ανάλυση παρουσιάζονται τα επιταχυνσιογράμματα των δύο συνιστωσών και τα βασικά τους χαρακτηριστικά (μέγιστες τιμές επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης).

Γ. Αποτελέσματα αναλύσεων

Οι πίνακες με τα αποτελέσματα των αναλύσεων περιλαμβάνουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά μεγέθη:

- Την θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της εδαφικής στήλης που υπέρκειται του σεισμικού υποβάθρου (T_s), περί την οποία έχουμε σημαντική ενίσχυση της φασματικής επιτάχυνσης κατά την διέλευση του σεισμικού κραδασμού, και την μέση ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων.
- Το πάχος των εδαφικών στρώσεων στις οποίες χωρίσαμε τις επιφανειακές αποθέσεις για την ανάλυση.
- Την πυκνότητα και τις τελικές τιμές της κρίσιμης υστερητικής απόσβεσης (D) και του μέτρου διάτμησης (G) κάθε στρώσης.
- Την μέγιστη τροπή, τάση, και ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_s) στο μέσο κάθε στρώσης
- και τέλος την μέγιστη επιτάχυνση (a_{max}) στην κορυφή κάθε στρώσης και στην εμφάνιση του σεισμικού υποβάθρου στην επιφάνεια.

Από τις αναλύσεις προκύπτουν και τα παρακάτω διαγράμματα:

- Κατανομή κατά βάθος της μέγιστης επιτάχυνσης στην κορυφή κάθε στρώσης
- Ελαστικά φάσματα απόκρισης για λόγο κρίσιμης απόσβεσης της ανωδομής $D=5\%$ στην επιφάνεια του εδάφους, στο σεισμικό υπόβαθρο, στην επιφανειακή εμφάνιση του σεισμικού υποβάθρου και το ελαστικό φάσμα απόκρισης της καταγραφής, αν αυτή έχει γίνει σε άλλο σημείο.

- Η συνάρτηση μεταφοράς (Transfer function) που μας δίνει την μεταβολή της εδαφικής «ενίσχυσης» της σεισμικής κίνησης για μεταβολή της περιόδου της ανωδομής.
- Ο κανονικοποιημένος λόγος του φάσματος απόκρισης στην επιφάνεια προς το φάσμα απόκρισης στο σεισμικό υπόβαθρο που μαζί με τον λόγο NHVSR μας δίνει στοιχεία για την συμπεριφορά της εδαφικής στήλης.

Τα πλήρη αποτελέσματα των αναλύσεων υπάρχουν στο Παράρτημα Α. Στη συνέχεια υπάρχουν συνοπτικά αποτελέσματα για κάθε θέση. Περιλαμβάνουν τα φάσματα απόκρισης στην επιφάνεια του εδάφους, στο σεισμικό υπόβαθρο και στην εμφάνιση του σεισμικού υποβάθρου στην επιφάνεια καθώς και τον λόγο των φασμάτων απόκρισης στην επιφάνεια του εδάφους προς το φάσμα στο σεισμικό υπόβαθρο. Στο τέλος υπάρχει και ένας πίνακας όπου τα αποτελέσματα των αναλύσεων δίνονται συνοπτικά.