

ΠΡΑΚΤΙΚΑ

ΤΟΜΟΣ 2 / VOL.2

Proceedings

4^o

Πανελλήνιο
Συνέδριο
Γεωτεχνικής &
Γεωπεριβαλλοντικής
Μηχανικής

*4th Hellenic Conference
on Geotechnical &
Geoenvironmental Engineering*

Athens
30/5 - 1/6/2001

ΑΘΗΝΑ 2001

30/5-1/6 2001
ΑΘΗΝΑ-ΣΤΑΔΙΟ ΕΙΡΗΝΗΣ ΚΑΙ ΦΙΛΙΑΣ

ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ TECHNICAL CHAMBER OF GREECE

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ

HELLENIC SOCIETY OF SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING

Καθορισμός της Παραμέτρου κ και Συσχέτιση με την Ταχύτητα v_{S30} με Βάση Καταγραφές Ισχυρής Κίνησης από το Σεισμό της Αθήνας 7/9/99.

Determination of κ Value and its Correlation with v_{S30} , Based on Strong Motion Records of the Athens Earthquake, September 1999.

ΠΑΠΑΙΩΑΝΝΟΥ, Χ. Δρ. Σεισμολόγος, Επικ. Ερευνητής ΙΤΣΑΚ.
ΚΑΛΟΓΕΡΑΣ, Ι. Δρ. Σεισμολόγος Ερευνητής Γ' Γ.Ι.Ε.Α.Α
ΧΑΤΖΗΔΗΜΗΤΡΙΟΥ, Π. Αν. Καθηγητής, ΑΠΘ.
ΜΑΡΓΑΡΗΣ, Β. Δρ. Σεισμολόγος, Επικ. Ερευνητής ΙΤΣΑΚ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην εργασία αυτή γίνεται υπολογισμός των παραμέτρων κ και κ_0 (Anderson and Hough, 1984) από την κλίση του φάσματος πλατών των επιταχύνσεων με βάση τα δεδομένα ισχυρής κίνησης του σεισμού της Αθήνας τον Σεπτέμβριο του 1999 (M5.9). Οι τιμές αυτές συσχετίζονται με την ταχύτητα V_{S30} , για την κατηγοριοποίηση των εδαφικών συνθηκών στις θέσεις καταγραφής. Γίνεται διερεύνηση της επίδρασης των φασματικών παραμέτρων και των συντελεστών ενίσχυσης για τις διάφορες κατηγορίες εδαφών και τέλος γίνεται εφαρμογή στην προσομοίωση της ισχυρής σεισμικής κίνησης.

ABSTRACT: In the present study, using strong motion data recorded after the devastating Athens earthquake (September 1999, M5.9), the spectral decay parameters, κ and κ_0 , (Anderson and Hough, 1984) are determined. The resulted values are related to the shear wave velocity of the shallow layer, V_{S30} , for the geotechnical classification of the examined sites. Furthermore an attempt is made to investigate the influence of the spectral parameters and the values of V_{S30} for various soil categories on spectral shapes and finally an application of these values is made for the simulation of the strong ground motion

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις 7 Σεπτεμβρίου 1999 και ώρα 14:56 ένας ισχυρός σεισμός συνέβη στην περιοχή της Αθήνας. Το επίκεντρο του κυρίου σεισμού εντοπίζεται στο ΒΔ τμήμα της Αττικής.

Επιταχυνσιογράμματα του κύριου σεισμού καταγράφηκαν σε 24 θέσεις στη ευρύτερη περιοχή της Αττικής καθώς επίσης και σε γειτονικές θέσεις σε διάφορες εδαφικές συνθήκες. Το ΙΤΣΑΚ περί τα μέσα της δεκαετίας του '80 είχε εγκαταστήσει ένα δίκτυο από τρεις επιταχυνσιογράφους στην μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών. Ταυτόχρονα η ισχυρή κίνηση του κύριου σεισμού καταγράφηκε και από τους σταθμούς που έχουν εγκατασταθεί στις πόλεις των Θηβών, Κορίνθου και της Χαλκίδος σε διάφορες επικεντρικές αποστάσεις από 10 ως

60 km (Anastasiadis et al., 1999). Το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του ΕΑΑ (ΓΙΕΑΑ) εκτός από το μόνιμο δίκτυο του είχε εγκαταστήσει σε νέους σταθμούς του METRO της Αθήνας και σε διάφορα βάθη από την ελεύθερη επιφάνεια (max ~26m) ψηφιακούς καταγραφείς ισχυρής κίνησης, οι οποίοι κατέγραψαν τον κύριο σεισμό. Συνολικά η ισχυρή σεισμική κίνηση καταγράφηκε σε 14 επιταχυνσιογράφους σε αποστάσεις 14 έως 106 km. (Kalogeras and Stavrakakis, 1999). Ο κύριος σεισμός καταγράφηκε και από το δίκτυο της ΔΕΗ σε 3 ψηφιακούς επιταχυνσιογράφους εγκατεστημένους στο Κερατσίνι, Λαύριο και Αλιβέρι

Στη παρούσα εργασία γίνεται μία προσπάθεια γεωτεχνικής ταξινόμησης των σταθμών καταγραφής της ισχυρής κίνησης. Δύο βασικές παράμετροι εξετάζονται για το σκοπό αυτό: η παράμετρος κ η οποία καθορίζει την πτώση

του φάσματος της επιτάχυνσης στις υψηλές συχνότητες και η οποία θεωρείται εξαρτώμενη από τη θέση καταγραφής καθώς και η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων στα πρώτα 30 m, V_{S30} , των επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών. Εδαφικές κατηγορίες και εδαφικοί παράγοντες ενίσχυσης έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορους Αντισεισμικούς Κανονισμούς και συσχετίζονται με την ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων στους επιφανειακούς γεωλογικούς σχηματισμούς.

Έχει δειχθεί ότι τα ανώτερα 30 m των εδαφικών σχηματισμών έχουν σημαντική συνεισφορά στην τελική διαμόρφωση του υψίσυχνου τμήματος των καταγραφών ισχυρής κίνησης (Anderson et al., 1996). Με βάση τις τιμές αυτές μπορεί να γίνει μία πρώτη ταξινόμηση των καταγραφών ισχυρής κίνησης του σεισμού της Αθήνας σε διάφορες εδαφικές κατηγορίες (NEHRP, 1997). Από την κατηγοριοποίηση αυτή και με βάση τους προτεινόμενους συντελεστές εδαφικής ενίσχυσης του Ελληνικού χώρου (Margaris and Boore, 1998; Klimis et al., 1999) είναι δυνατόν να προταθούν συνθετικές καταγραφές σε θέσεις οι οποίες δεν διέθεταν καταγραφές ισχυρής κίνησης.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να συσχετισθούν οι ταχύτητες των διατμητικών κυμάτων των ανώτερων 30 m των επιφανειακών στρωμάτων, V_{S30} , των επιταχυνσιογράφων με τις αντίστοιχες παραμέτρους κ και κ_0 , της απόσβεσης της ισχυρής κίνησης, η οποία καταγράφηκε στην ίδια θέση. Οι τιμές των V_{S30} ταχυτήτων καθορίζονται με γεωτεχνικές μεθόδους. Η συσχέτιση των τιμών αυτών είναι δυνατόν να δώσει μία πρώτη εκτίμηση των τοπικών εδαφικών συνθηκών των θέσεων των επιταχυνσιογράφων.

Η παράμετρος εξασθένησης, κ , η οποία προτάθηκε από τους Anderson and Hough (1984), καθορίζει ότι το υψίσυχνο φάσμα των εδαφικών επιταχύνσεων μεταβάλλεται εκθετικά με τη συχνότητα, f , με βάση τη σχέση

$$A(f) \sim A_0 \exp(-\pi \kappa f) \quad f > f_E \quad (1)$$

όπου f_E είναι μία συχνότητα όχι σαφώς καθορισμένη. Σε μερικές περιπτώσεις η f_E είναι περίπου ίση με την f_0 ενώ σε άλλες περιπτώσεις είναι μεγαλύτερη. Αυτή η φασματική εξασθένηση έχει αποδοθεί σε απόσβεση κοντινού πεδίου (Hanks, 1982; Anderson and Hough, 1984; Anderson, 1991) ή στη

διαδικασία της σεισμικής πηγής (Papageorgiou and Aki, 1983). Η τιμή της παραμέτρου κ βρέθηκε να είναι μικρότερη σε θέσεις καταγραφής που ήταν εγκατεστημένες σε εδαφικές συνθήκες "βράχου" σε σύγκριση με αντίστοιχες σε εδαφικές συνθήκες "αλλουβίων" (Anderson and Hough, 1984). Οι βασικές ιδιότητες της παραμέτρου κ είναι ότι μπορεί να περιγράψει το σχήμα των φασμάτων πλατών Fourier της επιτάχυνσης σε ένα διάστημα συχνοτήτων από 1 - 20 Hz περίπου. Επίσης η παράμετρος κ , εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την επιφανειακή γεωλογία κοντά στη θέση καταγραφής λόγω της μικρής εξάρτησης από την απόσταση. Εκτίμηση της παραμέτρου κ από το φασματικό σχήμα των επιταχύνσεων έγινε σε μία σειρά από εφαρμογές στον διεθνή χώρο (Anderson and Hough, 1984; Hough et al., 1988; Rovelli et al., 1988; Silva and Darragh, 1989; Margaris and Hatzidimitriou, 1999; Margaris, 2000).

Στο ίδιο μοντέλο απόσβεσης (Anderson and Hough, 1984) ως τιμή κ_0 ορίζεται η τιμή του κ σε επικεντρική απόσταση $R=0$. Η τιμή κ_0 μπορεί να αποδοθεί σε απόσβεση στα επιφανειακά γεωλογικά στρώματα ακριβώς κάτω από τη θέση καταγραφής.

Στη παρούσα μελέτη η παράμετρος κ υπολογίστηκε με βάση τη μεθοδολογία η οποία προτάθηκε από τους Anderson and Hough (1984). Η μεθοδολογία αυτή στοχεύει στην προσαρμογή με γραμμική παλινδρόμηση μίας ευθείας λαμβάνοντας υπόψη τον λογάριθμο των πλατών του φάσματος Fourier της επιτάχυνσης με τη συχνότητα. Οι ευθείες γραμμές προσαρμογής εκτείνονται από 1 ως 30 Hz περίπου. Για κάθε μία συνιστώσα της εξεταζόμενης καταγραφής υπολογίζεται ανεξάρτητα η ευθεία γραμμή με παλινδρόμηση. Οι τιμές αυτές που υπολογίζονται είναι σε ικανοποιητική συμφωνία με άλλες οι οποίες έχουν εκτιμηθεί στον Ελληνικό χώρο (Hatzidimitriou et al., 1993; Tselentis, 1993; Margaris and Boore, 1998; Margaris and Hatzidimitriou, 1999).

Οι υπολογισμένες τιμές της παραμέτρου κ περιλαμβάνουν την εδαφική ενίσχυση και ολόκληρο το παράγοντα του δρόμου διάδοσης. Εάν χρησιμοποιηθούν οι τιμές της παραμέτρου κ αντί της κ_0 , σε προσομοίωση της ισχυρής κίνησης η εδαφική ενίσχυση και ο παράγοντας του δρόμου θα ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς της απομείωσης των υψηλών συχνοτήτων του φάσματος δύο φορές. Για τον λόγο αυτό η εκτίμηση της παραμέτρου κ_0 γίνεται με κατάλληλη διόρθωση της επίδρασης

της εδαφικής ενίσχυσης και του δρόμου διάδοσης κατά τον υπολογισμό του φάσματος Fourier της επιτάχυνσης.

Οι εδαφικοί συντελεστές ενίσχυσης είναι αποτέλεσμα αύξησης του πλάτους των σεισμικών κυμάτων κατά τη διάδοσή τους από βαθείς σχηματισμούς υψηλών ταχυτήτων σε αντίστοιχους χαμηλότερης ταχύτητας. Ο φυσικός μηχανισμός ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ενίσχυση είναι η διατήρηση της ενέργειας. Μέσους συντελεστές ενίσχυσης θέσεων σε εδαφικές συνθήκες "βράχου" έχουν προτείνει οι Boore (1986) και Boore and Joyner (1997) με βάση τη μέθοδο των Joyner and Fumal (1984), η οποία χρησιμοποιεί ένα μέσο μοντέλο ταχύτητας διατμητικών κυμάτων και παίρνει υπόψη μία σειρά από παράγοντες όπως σεισμικές ταχύτητες κοντά στην επιφάνεια, δεδομένα χρόνου διάδοσης κλπ. Αντίστοιχους μέσους συντελεστές ενίσχυσης για διάφορες κατηγορίες εδαφικών σχηματισμών κατά NEHRP (1997), για τον Ελληνικό χώρο έχουν προταθεί από τους Margaris and Boore (1998) και Klimis et al. (1999).

3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΙΣΧΥΡΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Στη εργασία αυτή περιλαμβάνονται οι διαθέσιμες καταγραφές ισχυρής κίνησης όπως καταγράφηκαν στις διάφορες θέσεις.

Κάθε σταθμός καταγραφής ταξινομήθηκε σύμφωνα με τα διαθέσιμα γεωτεχνικά στοιχεία και την περιγραφή της επιφανειακής γεωλογίας κατά NEHRP(1997). Θεωρήθηκε ότι η κατηγορία D περιλαμβάνει γενικά μαλακούς εδαφικούς σχηματισμούς με μέση ταχύτητα $V_s = 270$ m/sec. Η κατηγορία C περιλαμβάνει "σκληρά εδάφη" με μία μέση ταχύτητα $V_s = 560$ m/sec, ενώ η κατηγορία B αναφέρεται σε σκληρά βραχώδη πετρώματα με μία μέση ταχύτητα διατμητικών κυμάτων $V_s = 760-1500$ m/sec. Με βάση τις εδαφικές κατηγορίες, χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές ενίσχυσης των θέσεων των καταγραφών όπως προτάθηκαν από τους Klimis et al. (1999).

Οι ταχύτητες των διατμητικών κυμάτων των επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών, V_{S30} , των σταθμών καταγραφής ισχυρής κίνησης, του ΙΤΣΑΚ και του ΓΙΕΑΑ, έχουν υπολογισθεί από τους Boukovalas et al. (2001). Οι σταθμοί των επιταχυνσιογράφων της Κορίνθου (ΙΤΣΑΚ: KOR_ATH) και (ΓΙΕΑΑ: KOR), και της ΔΕΗ (ALIV991 και LAVR991), εκτιμήθηκαν με βάση προϋπάρχοντα γεωτεχνικά στοιχεία τόσο από το ΙΤΣΑΚ (Αναστασιάδης, προσ. επικοινων.) όσο και από το ΕΜΠ (Μπουκοβάλας και

Κουρετζής, προσ. επικοινων.). Οι δύο σταθμοί επιταχυνσιογράφων του ΓΙΕΑΑ, στον Δημόκριτο (DMK1) και στην Ιστιαία (IST), με βάση τα διαθέσιμα γεωλογικά στοιχεία των δύο περιοχών καθώς και τις αντίστοιχες προσομοιώσεις που επιχειρήθηκαν για τις θέσεις αυτές, ταξινομήθηκαν κατά NEHRP (1997) ως B και D αντίστοιχα. Οι τιμές δε των διατμητικών κυμάτων των επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών, V_{S30} , εκτιμήθηκαν ως οι μέσοι όροι των αντίστοιχων τιμών που προτείνονται για τις αντίστοιχες κατηγορίες κατά NEHRP (1997).

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

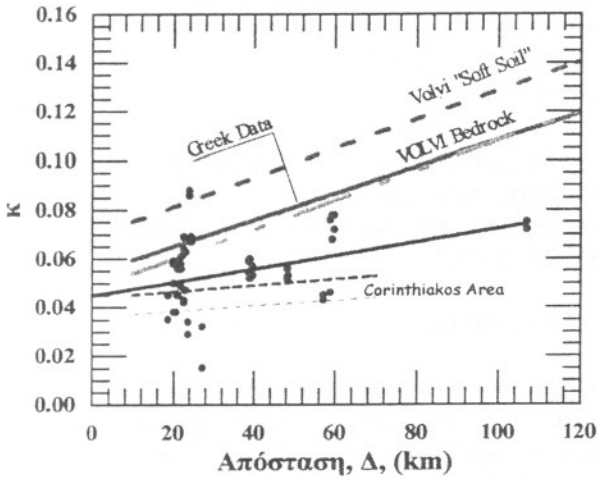
Στην ανάλυση των καταγραφών για τον υπολογισμό του φάσματος Fourier χρησιμοποιήθηκαν οι οριζόντιες συνιστώσες τους και επιλέχθηκε ένα παράθυρο το οποίο περιελάμβανε τα εγκάρσια κύματα. Σε περιπτώσεις όπου η μετάβαση από τα εγκάρσια κύματα στα κύματα ουράς (coda waves) δεν ήταν ευκρινής προτιμήθηκε να επιλεγεί πιθανό τμήμα των κυμάτων ουράς παρά να εξαιρεθεί τμήμα των απ' ευθείας κυμάτων. Διαπιστώθηκε από την ανάλυση των δεδομένων ότι το φασματικό σχήμα δεν είχε ισχυρή εξάρτηση από το μήκος του επιλεγμένου παράθυρου της καταγραφής. Οι μετασχηματισμοί έγιναν αφού εφαρμόστηκε ένα παράθυρο Hamming στο 10% των σημείων.

Οι Anderson and Hough (1984) βρήκαν ότι για τις υψηλές συχνότητες το φάσμα πλατών της επιτάχυνσης στη θέση καταγραφής παρουσιάζει μία εξασθένηση με την συχνότητα και πρότειναν ότι σε πρώτη προσέγγιση το φασματικό σχήμα το οποίο περιγράφεται από την εξίσωση (1).

Για να υπολογίσουμε την τιμή της σταθεράς, κ , έγινε εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων στα φάσματα πλατών. Το εύρος συχνοτήτων το οποίο χρησιμοποιήθηκε κυμαινόταν ανάλογα με τις καταγραφές μεταξύ 1 Hz έως 30 Hz. Μία ακόμη παράμετρος η οποία υπολογίστηκε από το ίδιο διάστημα συχνοτήτων ήταν η συχνότητα, f_{95} , η οποία αντιστοιχούσε το 95% της ενέργειας του φάσματος Fourier. Στο Σχήμα (1) δίνεται η χαρτογράφηση των τιμών της παραμέτρου, κ , με την απόσταση. Λόγω της έλλειψης επικεντρικών αποστάσεων σε επαρκές εύρος τιμών δεν ήταν δυνατόν να γίνουν ξεχωριστά οι υπολογισμοί για κάθε εδαφική κατηγορία. Η εξίσωση της ευθείας η οποία προσεγγίζει τα

δεδομένα (συνεχής μαύρη γραμμή, Σχήμα. 1) είναι:

$$\kappa = 0.045 \text{ sec} + (0.0003 \text{ sec/km}) * \Delta \quad (2)$$



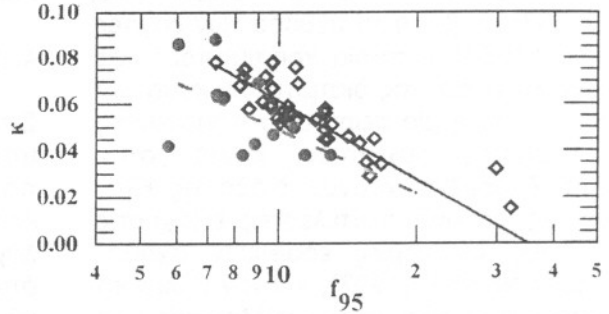
Σχήμα 1. Τιμές της παραμέτρου, κ , σε συνάρτηση με την υποκεντρική απόσταση και η ευθεία η οποία προσεγγίζει τις τιμές (συνεχής μαύρη γραμμή) για τις καταγραφές του κύριου σεισμού της Αθήνας. Οι αντίστοιχες ευθείες από άλλες περιοχές δίνονται επίσης.

Figure 1. Spectral decay parameter, κ_0 , as a function of the hypocentral distance. The least squares' best fit line through the data is also shown (thick black line). The corresponding attenuation lines from other areas of Greece are also shown.

Στο ίδιο σχήμα έχουν χαραχθεί για λόγους σύγκρισης οι αντίστοιχες ευθείες από το σύνολο των Ελληνικών δεδομένων (Hatzidimitriou et al., 1993), από τις καταγραφές στο EuroSeisTest (Βόλβη) (Hatzidimitriou et al., 1996) και από τον Κορινθιακό Κόλπο (Tselentis, 1993). Όπως φαίνεται από την σύγκριση η απόσβεση είναι χαμηλότερη σε σχέση από τη μέση του Ελληνικού χώρου και την περιοχή της Βόλβης ενώ είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη για τον Κορινθιακό Κόλπο. Η σταθερά της ευθείας, κ_0 , σύμφωνα με τους Anderson and Hough (1984) σχετίζεται με τις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Ωστόσο στην διεθνή βιβλιογραφία έχει βρεθεί μεγάλη διακύμανση των τιμών της παραμέτρου κ_0 . Οι τιμές της παραμέτρου, κ , για τον σταθμό στον Δημόκριτο (DMK1) βρέθηκαν ιδιαίτερα μικρές ενώ οι αντίστοιχες τιμές της παραμέτρου, f_{95} , υπολογίστηκαν αρκετά υψηλές (~33 Hz). Αυτό πιθανώς να οφείλεται στην διαδικασία επεξεργασίας του επιταχυνσιογράμματος και στις πα-

ραμέτρους του επιταχυνσιογράφου. Αντίθετα οι τιμές κ στον σταθμό της Δάφνης (DFNA) βρέθηκαν ιδιαίτερα υψηλές. Γενικά παρατηρήθηκε ότι οι καταγραφές στις θέσεις οι οποίες ήταν σε βάθος στους σταθμούς του Metro είχαν διαφοροποιημένο συχνοτικό περιεχόμενο (ήταν εμφανής η παρουσία χαμηλών συχνοτήτων). Αυτό πιθανώς να οφείλεται στην επίδραση της κατασκευής.

Στο Σχήμα (2) δίνεται η χαρτογράφηση των τιμών της παραμέτρου κ σε συνάρτηση με την παράμετρο f_{95} .



Σχήμα 2. Τιμές της παραμέτρου, κ , σε συνάρτηση με την συχνότητα, f_{95} , για τις καταγραφές στη επιφάνεια (ρόμβοι) και σε βάθος (κύκλοι). Οι ευθείες οι οποίες προσεγγίζουν τα δύο σύνολα δεδομένων φαίνονται επίσης.

Figure 2. Spectral decay parameter, κ , as a function of the frequency f_{95} . Open diamonds stand for the records obtained at free-field stations, while circles represent the corresponding values from recorders located at depths 7-26m.

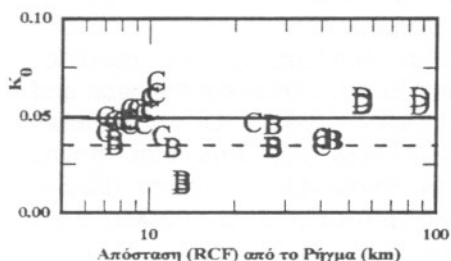
Οι μαύροι ρόμβοι και οι γκρι κύκλοι παριστάνουν τις τιμές από τις καταγραφές στην επιφάνεια και σε βάθος αντίστοιχα. Είναι εμφανής η διάκριση των δύο ομάδων. Οι ευθείες οι οποίες προσεγγίζουν τα δύο σύνολα δεδομένων είναι:

$$\begin{aligned} \kappa &= 0.174 - 0.049 \log f_{95} \text{ (επιφάνεια)} \\ \kappa &= 0.141 - 0.040 \log f_{95} \text{ (βάθος)} \end{aligned} \quad (3)$$

Οι δύο τιμές στις συχνότητες ~33Hz είναι οι τιμές από τον Δημόκριτο και δεν χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό της αντίστοιχης ευθείας.

Με βάση τα αποτελέσματα των υπολογισμών της παραμέτρου κ_0 , εξετάστηκε αν υπάρχει οποιαδήποτε εξάρτηση της παραμέτρου αυτής με τις προτεινόμενες αποστάσεις των σταθμών των επιταχυνσιογράφων από το κοντινότερο σημείο της επιφανειακής προβο-

λής του σεισμικού ρήγματος (RCF), το επίκεντρο (REP), ή το υπόκεντρο (RHP). Στο Σχήμα (3) παρουσιάζονται οι τιμές κ_0 των διαφόρων συνιστωσών των καταγραφών σε σχέση με την απόσταση (RCF) σε συνδυασμό με τις διάφορες εδαφικές κατηγορίες (NEHRP, 1997) των σταθμών καταγραφής. Όπως αναμένεται δεν παρουσιάζεται κάποια εξάρτηση του κ_0 με την εξεταζόμενη απόσταση.



Σχήμα 3. κ_0 σε συνάρτηση με την απόσταση (RCF) για τις διάφορες εδαφικές κατηγορίες των σταθμών καταγραφής.

Figure 3. κ_0 versus distance (RCF) for different soil categories of the recording sites.

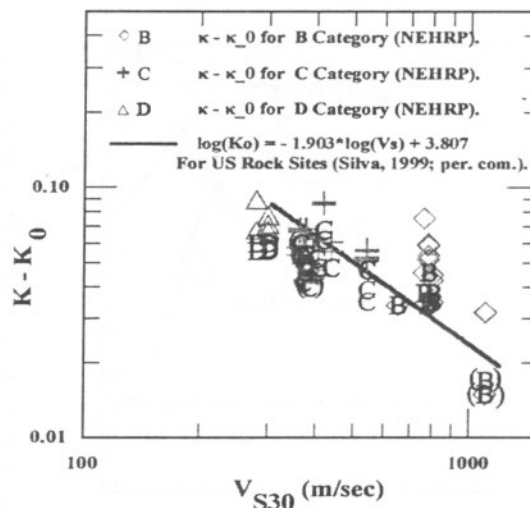
Η μέση τιμή της παραμέτρου κ_0 για την εδαφική κατηγορία B είναι ίση με 0.035 ± 0.009 (στιγμμένη γραμμή στο Σχήμα 3). Η αντίστοιχη μέση τιμή της παραμέτρου κ_0 για την εδαφική κατηγορία C είναι ίση 0.049 ± 0.008 . Οι τιμές αυτές βρέθηκαν σε ικανοποιητική συμφωνία με την αντίστοιχη μέση τιμή που υπολογίσθηκε από τη σχέση (2).

Προσπάθειες συσχέτισης της παραμέτρου κ_0 με την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων των σκληρών εδαφικών σχηματισμών έχει γίνει στις ΗΠΑ (Silva, 2000; pers. com.). Έχει επίσης προταθεί για τον σκοπό αυτό και κατάλληλη σχέση η οποία σχετίζει το φυσικό λογάριθμο της παραμέτρου κ_0 με την V_{S30} . Η σχέση αυτή δίνεται παρακάτω:

$$\ln(\kappa_0) = 3.807 - 1.093 \ln(V_{S30}) \quad (4)$$

Στο Σχήμα (4) παρουσιάζεται η συσχέτιση των παραπάνω παραμέτρων (κ και κ_0 με την V_{S30}) λαμβάνοντας υπόψη και τη κατηγοριοποίηση των θέσεων καταγραφής ισχυρής κίνησης κατά NEHRP (1997) σε B, C και D. Στο ίδιο σχήμα επίσης παρουσιάζεται και η σχέση (4) η οποία έχει προταθεί για σκληρά πετρώματα των ΗΠΑ (Silva, 1999; pers. com.). Παρότι τα δεδομένα τα οποία έχουν προκύψει από τις καταγραφές του σεισμού της Αθήνας είναι αρκετά περιορισμένα εντούτοις παρουσιάζουν την ίδια τάση εξάρτησης με την ταχύτητα, V_{S30} . Στο ίδιο

σχήμα οι τιμές των ταχυτήτων, V_{S30} , που έχουν εκτιμηθεί εμπειρικά για τις δύο θέσεις καταγραφής της Ιστιαίας (IST) και Δημόκριτου, (DMK1) θεωρώντας ότι αποτελούν τη μέση τιμή του διαστήματος των ταχυτήτων, V_{S30} , των δύο κατηγοριών B και C (NEHRP, 1997), παρουσιάζονται μέσα σε παρενθέσεις.

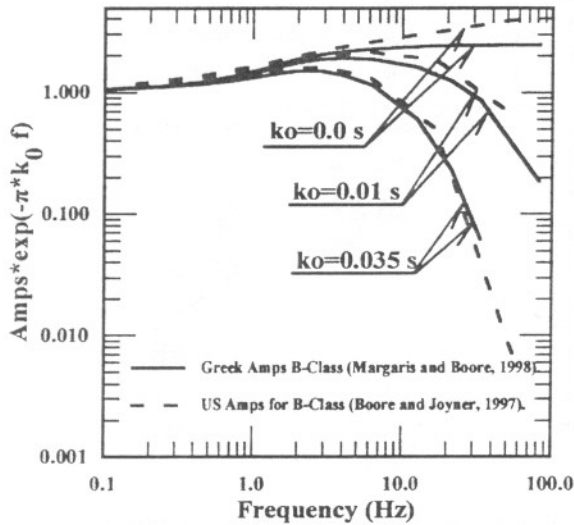


Σχήμα 4. κ_0 σε συνάρτηση με την ταχύτητα V_{S30} για τις διάφορες εδαφικές κατηγορίες των σταθμών καταγραφής. Η αντίστοιχη σχέση για τις ΗΠΑ δίνεται από την ευθεία γραμμή.

Figure 4. κ_0 versus shear wave velocity, V_{S30} , for different soil categories of the recording sites. The corresponding relation for WUS is presented by the continuous line.

Η εκτίμηση των δύο τιμών κ_0 και V_{S30} χρησιμοποιούνται κυρίως σε διάφορα μοντέλα προσομοίωσης ισχυρής κίνησης. Είναι επομένως χρήσιμο να εξετασθεί η συνδυασμένη επίδραση της απόσβεσης του κοντινού πεδίου (κ_0) και των συντελεστών ενίσχυσης των διαφόρων κατηγοριών (NEHRP, 1997), B, C και D. Στο Σχήμα (5) παρουσιάζεται ο συνδυασμός των συντελεστών ενίσχυσης για την κατηγορία B (NEHRP, 1997) σκληρού πετρώματος με την αντίστοιχη απόσβεση κ_0 , για μία σειρά τιμών $\kappa_0 = 0.00, 0.01$ και 0.035 , οι οποίες θεωρούνται αντιπροσωπευτικές για σκληρούς εδαφικούς σχηματισμούς (Anderson and Hough, 1984; Hough et al., 1988; Boore and Joyner, 1997; Klimis et al., 1999). Όπως φαίνεται από το Σχήμα (5) οι μεγάλες εδαφικές ενισχύσεις στις υψηλές συχνότητες είναι ισχυρά απομειούμενες με την απόσβεση. Αντίστοιχες καμπύλες έχουν παρατηρηθεί και για τις υπόλοιπες κατηγορίες εδαφικών

συντελεστών ενίσχυσης C και D. Ικανοποιητική συμφωνία της απομείωσης αυτής σε σχέση με τις αντίστοιχες που έχουν προταθεί για τις ΗΠΑ (Boore and Joyner, 1997) παρουσιάζεται στο ίδιο σχήμα. Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι ολόκληρη η επίδραση του συνδυασμού της εδαφικής ενίσχυσης και της απόσβεσης του κοντινού πεδίου είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα για ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων.



Σχήμα 5. Συνδυασμένη επίδραση των συντελεστών ενίσχυσης και της απόσβεσης k_0 , αντιπροσωπευτικού για εδαφική κατηγορία B. Figure 5. The combined effect of the site amplification and the attenuation for representative k_0 for soil B category.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα (5) η επίδραση της παραμέτρου k_0 (για $k_0 = 0.035$) έχει σαν αποτέλεσμα να συμπίπτει η συνδυασμένη επίδραση των συντελεστών ενίσχυσης και της απόσβεσης για τα Αμερικάνικα και Ελληνικά δεδομένα. Για χαμηλότερες τιμές του k_0 οι τιμές της συνδυασμένης αυτής επίδρασης είναι μεγαλύτερες για τα αμερικανικά δεδομένα.

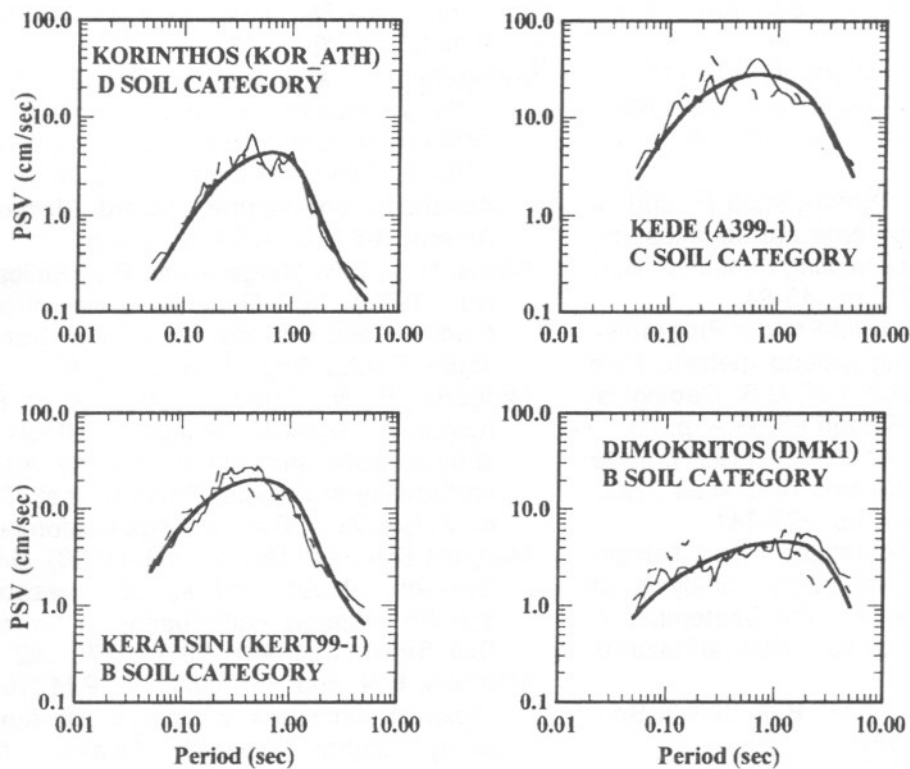
Η συνέπεια των παραπάνω εκτιμήσεων τόσο στην χρησιμοποίηση των εδαφικών ενισχύσεων όσο και στις αντίστοιχες κατηγορίες κατά NEHRP (1997) των θέσεων καταγραφής ισχυρής κίνησης του σεισμού της Αθήνας 1999 είναι δυνατόν να επαληθευτεί με προσομοιώσεις της ισχυρής κίνησης στις αντίστοιχες θέσεις. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το μοντέλο της στοχαστικής προσομοίωσης της σημειακής πηγής που βασίζεται στην αρχή ότι ένα ω^2 -φασματικό σχήμα σε απόσταση R από το υπόκεντρο του σεισμού μπορεί να καθορισθεί ως μία συνάρτηση της σεισμικής ροπής του σεισμού,

M_0 , και της απόστασης αυτής. Το συγκεκριμένο ω^2 -φάσμα μίας εδαφικής κίνησης εξαρτάται από τη σεισμική ροπή, M_0 , τη γωνιακή συχνότητα, f_0 , και την παράμετρο τάσης, $\Delta\sigma$ (Margaris and Boore, 1998). Έχει δειχθεί ότι ένα απλό θεωρητικό μοντέλο είναι δυνατό να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια δεδομένα ισχυρής κίνησης τα οποία καταγράφηκαν από αντίστοιχα όργανα παίρνοντας υπόψη το μέγεθος του σεισμού. Η αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου περιγράφεται με λεπτομέρεια στις εργασίες των Joyner and Boore (1988) και Atkinson and Boore (1995) μεταξύ άλλων. Οι υπολογισμοί με βάση το μοντέλο της σημειακής πηγής έγιναν με το πρόγραμμα H/Y, SmSim (Boore, 1996) το οποίο τροποποιήθηκε κατάλληλα για το σκοπό αυτό.

Με βάση το μοντέλο της στοχαστικής προσομοίωσης και τα δεδομένα εισόδου για κάθε σταθμό καταγραφής του δικτύου ισχυρής κίνησης το οποίο ήταν εγκατεστημένο στο λεκανοπέδιο της Αττικής (Margaris, 2000), επιλέγησαν 4 καταγραφές ισχυρής κίνησης με βασική προϋπόθεση να καλύπτουν και τις 3 κατηγορίες εδαφικών ενισχύσεων B, C και D οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν. Οι καταγραφές αυτές είναι, η KOR_ATH η οποία ταξινομήθηκε στην κατηγορία D, η A399-1 ταξινομημένη στην κατηγορία C, η KERT991 και η DMK1. Οι δύο τελευταίες καταγραφές ισχυρής κίνησης ταξινομήθηκαν στην κατηγορία B. Στην πρώτη (KERT991) χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές ενίσχυσης της αντίστοιχης κατηγορίας, ενώ για την δεύτερη δεν χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές ενίσχυσης κατά την προσομοίωση. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα (6), όπου οι δύο λεπτές γραμμές είναι τα φάσματα απόκρισης για 5% απόσβεση της κίνησης των δύο οριζοντίων συνιστωσών της καταγραφής ενώ η έντονη ομαλοποιημένη γραμμή είναι το αντίστοιχο συνθετικό φάσμα απόκρισης (απόσβεσης 5%).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παράμετρος κ και k_0 , οι οποίες εκτιμώνται από τις κλίσεις των φασμάτων Fourier των καταγραφών ισχυρής κίνησης συσχετίζονται με παρόμοιο τρόπο με τις αντίστοιχες τιμές από τις ΗΠΑ. Γεγονός το οποίο είναι δυνατόν να βοηθήσει στον καθορισμό σε ένα πρώτο στάδιο των τοπικών εδαφικών συνθηκών μίας θέσης καταγραφής ισχυρής κίνησης. Φυσικά



Σχήμα 6. Προσομοίωση της ισχυρή κίνησης με φάσματα απόκρισης (απόσβεση 5%) για 4 θέσεις καταγραφής σε διαφορετικές εδαφικές συνθήκες συγκρινόμενα με τις αντίστοιχες παρατηρημένες φασματικές τιμές των δύο οριζοντίων συνιστωσών των καταγραφών.
 Figure 6. Strong motion simulation of 5%-response spectra for 4 accelerographs recorded at different site conditions in comparison with the observed values of the two horizontal components.

ένας εμπλουτισμός της τράπεζας δεδομένων ισχυρής κίνησης με αξιόπιστα γεωτεχνικά δεδομένα, όπως η ταχύτητα, V_{S30} , είναι δυνατόν σε μεταγενέστερο στάδιο να δώσει απόλυτες συσχετίσεις των δύο παραμέτρων.

Διαπιστώνεται ότι και στις 4 προσομοιώσεις των αντιστοίχων καταγραφών ισχυρής κίνησης και για ιδιοπερίόδους από 0.05 – 5 sec οι επιλεγμένες διαφορετικές εδαφικές κατηγορίες και συνεπώς οι αντίστοιχοι συντελεστές ενίσχυσης μπορούν να προβλέψουν με ικανοποιητική ακρίβεια τις παρατηρημένες φασματικές τιμές. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξε και ο Margaris (2000), χρησιμοποιώντας το σύνολο των καταγραφών ισχυρής κίνησης του σεισμού της Αθήνας και τους ίδιους συντελεστές ενίσχυσης για τις αντίστοιχες κατηγορίες, B, C και D (NEHRP, 1997).

Από την ανάλυση των τιμών της παραμέτρου κ , της κλίσης του φάσματος πλατών για τις υψηλές συχνότητες, βρέθηκε ότι η μέση απόσβεση είναι χαμηλότερη από αυτή του

Ελληνικού χώρου και η σύγκρισή τους με τις τιμές της συχνότητας f_{95} , παρουσιάζει διαφοροποίηση για τις καταγραφές ελεύθερου πεδίου με αυτές, οι οποίες λήφθηκαν σε βάθος.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anastasiadis, A., Demosthenous, M., Karakostas, Ch., Klimis, N., Lekidis, B., Margaris, B., Papaioannou, Ch., Papazachos, C. and Theodulidis, N. (1999), "The Athens (Greece) earthquake of September 7, 1999: Preliminary Report on Strong Motion Data and Structural Response", MCEER Bulletin, 3, pp. 1-6.
- Anderson, J.G. (1991), "A preliminary descriptive model for the distance dependence of the spectral decay parameters in southern California". Bull. Seism. Soc. Am., 81, pp. 2186-2193.
- Anderson, J.G. and Hough S.E. (1984), "A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high

- frequencies". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74, pp. 1969-1993.
- Atkinson, G. M. and Boore, D. M. (1995), "Ground-Motion Relations for Eastern North America", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, pp. 17-30.
- Boore, D. M. (1986), "Short-period P- and S-wave radiation from large earthquakes: implications for special scaling relations", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76, pp. 43-64.
- Boore D.M. (1996), "SMSIM-Fortran Programs for simulating ground motions from earthquakes: Version 1.0", U.S. Geological Survey, Open-File Report 96-08-A, p. 73.
- Boore, D., and Joyner W. B. (1997), "Site amplifications for generic rock sites", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87, pp. 327-341.
- Boukouvalas, G.D., Kouretzis G. and Kalogeras, I. (2001), "Site-specific analysis of strong motion data from the September 7, 1999, Greece earthquake", *Natural Hazards* (in press).
- Hanks, T. C., (1982), "fmax", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, pp. 1867-1879.
- Hatzidimitriou, P., Papazachos, C., Kiratzi, A., and Theodulidis, N. (1993), "Estimation of attenuation structure and local earthquake magnitude based on acceleration records in Greece". *Tectonophysics*, 217, pp. 243-253.
- Hatzidimitriou, P.M., Papaioannou, Ch. A., Margaris, B.N., Koukogiorgou G. and V. Pliatsika (1996), "Shallow attenuation of S-waves in the Mygdonia graben northern Greece". XXV Gen. Ass. ESC, Reykjavik-ICELAND, September 1996, (abstracts volume), p. 93.
- Hough, S.E., Anderson, J.G., Brune, J., Vernon, III, F., Berger, J., Fletcher, J., Haar, L., Hanks, T. and Baker L. (1988), "Attenuation near Anza California", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78, pp. 672-691.
- Joyner, W. B. and Fumal, T. E. (1984), "Use of measured shear-wave velocity for predicting geologic site effects on strong ground motions", *Proc. 8th W.C.E.E. S. Francisco Ca*, 2, pp. 777-783.
- Joyner, W. B. and Boore, D. M. (1988), "Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion", *Proc. Earthquake Eng. Soil Dyn. II, GT Div/ASCE, Park City, Utah*, 1988, pp. 43-102.
- Kalogeras, I., and Stavrakakis, G. (1999), "Strong motion observation: from the destructive earthquake of September 7th, 1999 in Athens Greece", 1st Conf. of the Advances on Natural Hazard Mitigation, Athens, 3-5 Nov. 1999, (Abstract).
- Klimis, N.S., B.N. Margaris and P.K. Koliopoulos. (1999), "Site-Dependent amplification functions and response spectra in Greece", *Journ. Earthq. Eng.*, 3, pp. 237-270.
- Margaris, B. N. (2000). "Variability of PSV response spectra including effects of source, path and site during the Athens earthquake in Greece", *Proc. 6th Inst. Conf. on Seism. Zon.*, Palm Springs California.
- Margaris B.N., and Boore, D.M. (1998), "Determination of $\Delta\sigma$ and κ_0 from response spectra of large earthquakes in Greece," *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, pp. 170-182.
- Margaris, B.N. and Hatzidimitriou, P.M (1999), "Seismic estimates of stress parameters using source spectral scaling from accelerograms of strong earthquakes in Greece", *AGU Fall Meeting Dec. 13-17, 1999*, (Abstr), p. 707.
- NEHRP (1997). "NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures", Part 1, 2.
- Papageorgiou, A. S. And Aki, K. (1983), "A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motions, Part II, Application of the Model", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, pp. 953-978.
- Rovelli, A., Bonamassa, O., Cocco, M., Di Bonna, M. and Mazza, S. (1988). "Scaling laws and spectral parameters of the ground motion in active extensional areas in Italy", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78, pp. 530-560.
- Silva, W. J. and Darragh, R. B. (1989). "Engineering characterization of strong ground motion recorded at rock sites", Report RP2556-48 prepared for the EPRI by Woodward-Clyde Cons.
- Tselentis, G.-A. (1993), "Shallow attenuation in the west Corinth-Patras rift, Greece". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, pp. 603-609.