

Εξομαλυμένοι Συντελεστές Ενίσχυσης Βραχώδων Σχηματισμών στον Ελληνικό Χώρο

Smoothed Hellenic Rock Site Amplification Factors

ΚΛΗΜΗΣ, Ν. Σ. Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Κύριος Ερευνητής, ΙΤΣΑΚ
ΜΑΡΓΑΡΗΣ, Β. Ν. Δρ Σεισμολόγος, Κύριος Ερευνητής, ΙΤΣΑΚ
ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ, Α.Ι. Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Κύριος Ερευνητής, ΙΤΣΑΚ
ΚΟΛΙΟΠΟΥΛΟΣ, Π. Κ. Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, ΑΤΕΙ Σερρών
ΚΙΡΤΑΣ, ΕΜΜ. M. Sc. Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ, Υποψήφιος Διδάκτωρ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η ισχυρή εδαφική δόνηση σε μία θέση εξαρτάται κατά κύριο λόγο από 3 βασικούς παράγοντες: τον μηχανισμό γένεσης του σεισμού, το δρόμο διάδοσης και τα γεωλογικά εδαφικά χαρακτηριστικά της θέσης καταγραφής. Έχει δειχθεί ότι τα επιφανειακά εδαφικά στρώματα είναι υπεύθυνα για μία σειρά αστοχιών και προβλημάτων τα οποία παρουσιάζονται μετά από έναν ισχυρό σεισμό. Κύριος στόχος της εργασίας είναι να παρουσιασθεί η V_s ταχύτητα διάδοσης των επιφανειακών στρώσεων και να προσδιορισθεί η ενίσχυση της κίνησης σε βραχώδεις σχηματισμούς σε συνάρτηση με την συχνότητα. Η βασική μεθοδολογία είναι του τέταρτου μήκους κύματος ($\lambda/4$) η οποία βασίζεται στην εκτίμηση της ταχύτητας V_s και της πυκνότητας σε συνάρτηση με το βάθος.

ABSTRACT: The strong ground motion is mainly dependent upon 3 basic parameters: seismic source mechanism, attenuation path and site conditions of the recording station. It has been pointed out that surficial geological layers are responsible for a series of problems, which arise after a strong earthquake. The main goal of this work is to define the shear wave velocity, V_s , of the upper soil layers and to calculate local, frequency dependent, site amplification factors of rock formations, in Greece. The quarter-wavelength approximation ($\lambda/4$) is based on the estimate of shear wave velocity V_s , with the density of the material as a function of the depth of soil layers.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται η εκτίμηση ή η προσομοίωση της ισχυρής δόνησης η οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως δεδομένο εισόδου στον Αντισεισμικό Κανονισμό και σε κάθε αντισεισμικό σχεδιασμό. Ο καθορισμός αυτός της ισχυρής κίνησης πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές κατά περίπτωση γεωλογικές συνθήκες του σταθμού καταγραφής. Όπως στην περίπτωση των “χαλαρών” εδαφικών σχηματισμών όπου οι προσομοιώσεις ενισχύονται κατάλληλα με συντελεστές ενίσχυσης, έτσι και στους “βραχώδεις” σχηματισμούς απαιτούνται συντελεστές ενίσχυσης της ισχυρής δόνησης προκειμένου η συνθετική δόνηση να είναι περισσότερο ρεαλιστική. Σε μερικές περιπτώσεις η προσομοίωση μπορεί να γίνει με τη χρησιμοποίηση “γενικευμένων – generic”

συντελεστών ενίσχυσης της ισχυρής δόνησης.

Ο κύριος στόχος της εργασίας αυτής είναι να παρουσιασθούν σχέσεις μέσης ταχύτητας, V_s , διατμητικών κυμάτων με το βάθος των γεωλογικών στρώσεων και συντελεστών ενίσχυσης με την συχνότητα κυρίως για “βραχώδεις” σχηματισμούς του Ελληνικού χώρου. Οι συντελεστές ενίσχυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατ’ ευθείαν στην προσομοίωση της ισχυρής δόνησης, ενώ το συγκεκριμένο άρθρο είναι συνέχεια και επέκταση προηγούμενης προσπάθειας για καθορισμό συντελεστών ενίσχυσης εδαφικών σχηματισμών (Klimis et al., 1999).

Οι συντελεστές ενίσχυσης βασίζονται στον υπολογισμό της διατμητικής ταχύτητας, V_s και της πυκνότητας του υλικού, σε συνάρτηση με το βάθος των επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα σύνολο από μετρήσεις

χρόνων διαδρομής διατμητικών κυμάτων σε γεωτρήσεις για να εκτιμηθούν οι ταχύτητες, V_s , των επιφανειακών στρώσεων. Επίσης χρησιμοποιούνται μελέτες υπολογισμού διαμήκων Ρ-κυμάτων στο φλοιό της γής προκειμένου να καθορισθούν ταχύτητες βαθύτερων εδαφικών σχηματισμών. Οι συντελεστές αυτοί υπολογίζονται με βάση την μεθοδολογία 1/4 ή του τέταρτου μήκους κύματος (Joyner et al., 1981).

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΕΤΑΡΤΟΥ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (1/4)

Για μία συγκεκριμένη συχνότητα, η εδαφική ενίσχυση δίνεται από την τετραγωνική ρίζα του λόγου της ακουστικής αντίστασης με το βάθος του εδαφικού σχηματισμού προς την ακουστική αντίσταση στο βάθος της σεισμικής πηγής. Η προσέγγιση αυτή δεν είναι ευαίσθητη στις ασυνέχειες της κυματικής ταχύτητας και επομένως η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοσθεί κυρίως για τον υπολογισμό ομαλοποιημένων συναρτήσεων εδαφικής ενίσχυσης, όπως επιχειρείται στην παρούσα ερευνητική εργασία.

Ο αλγόριθμος ο οποίος ακολουθείται κατά τη μεθοδολογία 1/4 είναι ο παρακάτω: οι χρόνοι διαδρομής των διατμητικών κυμάτων, $S_H(z)$, από την επιφάνεια και ως ένα βάθος, z , υπολογίζονται με γεωφυσικές μεθόδους. Η μέση τιμή της ταχύτητας διάδοσης των S κυμάτων, $\langle V(z) \rangle$ σε ένα τυχαίο βάθος, υπολογίζεται ως ο λόγος του βάθους προς τον χρόνο διαδρομής, $z / S_H(z)$, ενώ η συχνότητα που αντιστοιχεί επίσης στο ίδιο τυχαίο βάθος δίνεται από την σχέση $f(z)=1/[4*S_H(z)]$. Η σχέση η οποία δίνει τη συνάρτηση της εδαφικής ενίσχυσης είναι:

$$AF(f) = \sqrt{[\rho_s * V_s] / [\bar{\rho}(z) * \bar{V}(z)]} \quad (1)$$

όπου ο δείκτης s αναπαριστά τις τιμές της πυκνότητας και της ταχύτητας στην γειτονία της σεισμικής πηγής, ενώ $\bar{\rho}(z)$ και $\bar{V}(z)$ είναι οι μέσοι χρόνοι διαδρομής της πυκνότητας και της κυματικής ταχύτητας σε κάθε βάθος. Αν και η εξίσωση 1 αναφέρεται σε εδαφική ενίσχυση χωρίς απόσβεση, στην πραγματικότητα η εδαφική απόκριση δεν μπορεί να αποσυνδεθεί από την απόσβεση. Για λόγους απλοστεύσης των υπολογισμών ο παράγοντας της εδαφικής ενίσχυσης και απόσβεσης μελετώνται χωριστά ενώ η απόσβεση μπορεί να παρασταθεί από

τον εκθετικό παράγοντα $\exp(-\tau k_0 f)$ (Anderson & Hough, 1984).

3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Η εδαφική κατηγοριοποίηση που επιχειρείται στην παρούσα εργασία, βασίζεται στην εκτίμηση της μέσης διατμητικής ταχύτητας, V_s , των σεισμικών κυμάτων με γεωφυσικές μεθόδους μέσα σε γεωτρήσεις στα ανώτερα 30m των επιφανειακών σχηματισμών. Η ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων (V_s) στις επιφανειακές στρώσεις, έχει προταθεί ως παράμετρος κατάταξης των εδαφικών σχηματισμών από διάφορους ερευνητές και κανονισμούς (Borchardt 1994, 2002a, 2002b, NEHRP 2000, Anderson et al., 1996; Finn, 1996; Boore & Joyner, 1997; Joyner & Boore, 2000). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 63 γεωτρήσεις στην παρούσα εργασία σε διαφορετικές θέσεις στον Ελληνικό χώρο. Το εδαφικό προφίλ των γεωτρήσεων αυτών έχει ληφθεί από τις παρακάτω εργασίες (Athanasopoulos, 1989; Pitilakis et al., 1992; Raptakis et al., 1994, 1997) καθώς και αδημοσίευτες μελέτες και τεχνικές εκθέσεις (Klimis et al., 1999). Η ταξινόμηση των αποτελεσμάτων γίνεται κατά NEHRP 2000 με βάση την ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων, V_s .

Η κατανομή των ταχυτήτων των διατμητικών κυμάτων, V_s , στα ανώτερα 30m των εδαφικών σχηματισμών για την κατηγορία Β κατά NEHRP παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Η σχέση που συνδέει τον χρόνο διάδοσης των διατμητικών κυμάτων, S , σε σχέση με το βάθος, z , για την κατηγορία Β (βραχώδεις σχηματισμοί) βασίσθηκε σε δεδομένα ενός μικρού δείγματος (μόνον 9 γεωτρήσεις) και επομένως θα πρέπει να θεωρηθεί ως μία πρόδρομη σχέση η οποία πρέπει να επαληθευτεί με περισσότερα δεδομένα. Προκειμένου να καθορισθούν τιμές των συντελεστών εδαφικής ενίσχυσης σε χαμηλότερες συχνότητες χρησιμοποιούνται ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων S του επιφανειακού γήινου φλοιού, στις ίδιες θέσεις όπου ανορύχθηκαν οι γεωτρήσεις και πραγματοποιήθηκαν οι γεωφυσικές διασκοπήσεις. Τα αποτελέσματα αυτά προήλθαν από υπολογισμούς τομογραφίας του χρόνου διαδρομής S κυμάτων (Papazachos & Nolet, 1997).

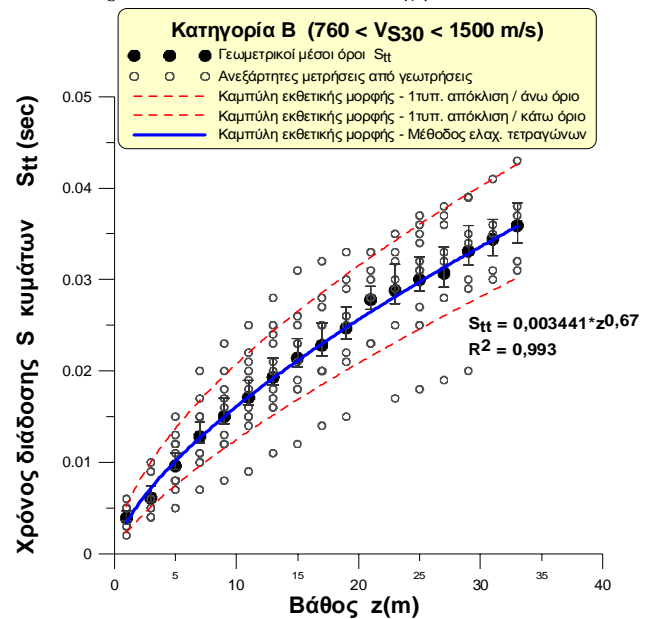
4. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται η μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων και της πυκνότητας, συναρτήσει του βάθους, για τους βραχώδεις σχηματισμούς (εδαφική κατηγορία B), όπως έγινε και σε παλαιότερη εργασία για τις εδαφικές κατηγορίες C & D κατά NEHRP (Klimis et al., 1999). Προκειμένου να καθορισθεί η εξίσωση που περιγράφει μαθηματικά τη μεταβολή του μέσου χρόνου διάδοσης ανά κατηγορία εδάφους, προσδιορίζονται τιμές του χρόνου διάδοσης των κυμάτων S με το βάθος από τις εξισώσεις μεταβολής της ταχύτητας διάδοσης ανά γεώτρηση με σταθερό βήμα 2m. Λαμβάνοντας το μέσο όρο του χρόνου διαδρομής (S_{tt}) ανά βήμα βάθους 2m, και στη συνέχεια εκφράζοντας τη μεταβολή του μέσου χρόνου διάδοσης, S_{tt} , ως μαθηματική εξίσωση, συναρτήσει του βάθους, z, καθορίζεται η συνάρτηση μεταβολής της ταχύτητας διάδοσης των S κυμάτων με το βάθος. Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογική προσέγγιση του ενός τετάρτου του μήκους κύματος ($\lambda/4$) προσδιορίζεται μια εξομαλυμένη συνάρτηση ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης εξαρτημένη από τη συχνότητα για κάθε κατηγορία εδάφους (B, D, E).

Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται οι ανεξάρτητοι χρόνοι διάδοσης, οι γεωμετρικοί μέσοι όροι, το μέσο τυπικό σφάλμα και η μαθηματική έκφραση των γεωμετρικών μέσων όρων με τη μορφή καμπύλης εκθετικής μορφής για τα πρώτα 40m (δηλ. εκεί όπου υπάρχουν μετρήσεις της ταχύτητας διάδοσης των S κυμάτων από γεωτρήσεις). Οι λευκοί κύκλοι συμβολίζουν τις ανεξάρτητες μετρήσεις του χρόνου διάδοσης των S κυμάτων με το βάθος ανά εξεταζόμενη γεώτρηση, ενώ οι μαύροι κύκλοι είναι οι γεωμετρικοί μέσοι όροι των χρόνων διάδοσης με σταθερό βήμα 2m. Η έντονη γραμμή συμβολίζει την εξίσωση εκθετικής μορφής η οποία προκύπτει με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και η οποία αποτελεί τη μαθηματική έκφραση της μεταβολής των γεωμετρικών μέσων όρων του χρόνου διάδοσης των κυμάτων S για εδάφη κατηγορίας B (βράχοι), με πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης ($R^2=0.993$).

Η παραπάνω συνάρτηση εκθετικής μορφής επιλέχθηκε αφενός μεν για την απλότητά της, αφετέρου δε, και κυρίως, γιατί προσομοιώνει ακριβέστερα τις επιμέρους παρατηρήσεις (ανεξάρτητες τιμές χρόνου διάδοσης S

κυμάτων). Ωστόσο, το βασικό της μειονέκτημα είναι ότι καθορίζει μηδενική τιμή ταχύτητας διάδοσης στην επιφάνεια του εδάφους. Για το λόγο αυτό οι Boore & Joyner (1997), προτείνουν τη διατήρηση σταθερής τιμής της ταχύτητας από 0 έως 1m ίδια με εκείνη της ταχύτητας στο 1m. Για την κατηγορία B η τιμή αυτή είναι 434m/sec. Με απ' ευθείας παραγωγή της συνάρτησης μεταβολής του χρόνου διάδοσης, προκύπτει η συνάρτηση μεταβολής της ταχύτητας διάδοσης S κυμάτων με το βάθος για τα επιφανειακά μέτρα. Η παραπάνω εξίσωση που περιγράφει τα αρχικά επιφανειακά μέτρα συμπληρώνεται με τομογραφικές μετρήσεις σε βάθη 1 έως 8 Km. Δεδομένου ότι οι Ελληνικοί σεισμοί διαθέτουν εστιακά βάθη συνήθως μεταξύ 5 και 10 Km (Παπαζάχος & Παπαζάχου, 2003), ένα αντιπροσωπευτικό βάθος της τάξης των 8 Km για την πηγή θεωρείται λογικό για την περίπτωση του Ελληνικού χώρου, με μέσες εκτιμώμενες τιμές $V_s^{πηγή} \cong 3400 \text{ m/sec}$ & $\rho_{πηγή} \cong 2700 \text{ Kg/m}^3$.



Σχήμα 1. Χρόνοι διάδοσης των S κυμάτων με το βάθος για την κατηγορία B (βράχοι: $760 < V_{S30} < 1500 \text{ m/sec}$). Η εξίσωση εκθετικής μορφής (έντονη γραμμή) αντιπροσωπεύει τη μεταβολή των γεωμετρικών μέσων του χρόνου διάδοσης των S κυμάτων για βάθη έως 40m από μικρό δείγμα 9 γεωτρήσεων σε διάφορες θέσεις στον Ελληνικό χώρο.

Figure 1. S-wave travel time versus depth for site class B ($760 < V_{S30} < 1500 \text{ m/sec}$). The least square fit of a power law is representative of the geometric means evolution for depths less than 40m and results from a small subset of 9 boreholes located at different sites in Greece

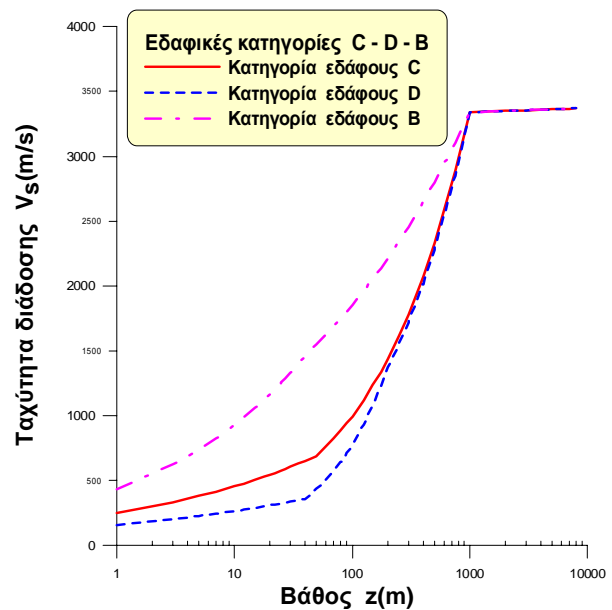
Η μεταβολή της ταχύτητας V_s σε βάθη $>1\text{Km}$ είναι πολύ μικρή και επομένως το εκτιμώμενο βάθος θεώρησης της πηγής έχει τελικώς πολύ μικρή επίδραση στον προσδιορισμό των εξομαλυμένων συντελεστών ενίσχυσης. Για λόγους ομοιομορφίας η μεταβολή της ταχύτητας και του χρόνου διάδοσης των S κυμάτων σε μεγάλα βάθη περιγράφεται επίσης με εξίσωση εκθετικής μορφής, παρόλο που και μια εξίσωση γραμμικής μορφής θα ήταν εξίσου ικανοποιητική. Τέλος, η μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης σε βάθη μεταξύ 40m και 1Km περιγράφεται επίσης με ίδια μορφή εξίσωσης καθώς η μεταβολή της ταχύτητας σε βάθη έως 40m, αλλά και μεγαλύτερα, ήτοι από 1 έως 8Km έγινε δεκτό ότι ακολουθεί νόμο εκθετικής μορφής. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με τη μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων με το βάθος, υπολογίζεται και η μεταβολή της πυκνότητας με το βάθος ως συνάρτηση της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων.

Για βραχώδεις σχηματισμούς (κατηγορία B), σύμφωνα με το υπάρχον δείγμα των 9 ερευνητικών γεωτρήσεων, ευρισκόμενες σε απόσταση μεγαλύτερη του 1Km μεταξύ τους, περιγράφεται καλύτερα με την ακόλουθη εξίσωση εκθετικής μορφής: $S_H=0,00344z^{0,67}$ (για $z<40\text{m}$) με συντελεστή συσχέτισης $R^2=0,9923$. Με απ' ευθείας παραγωγή της συνάρτησης του χρόνου διάδοσης, προκύπτει η εξίσωση: $V_s \cong 434z^{0,33}$ m/sec για βάθη $z<40\text{m}$, ενώ για βάθη $1000<z<8000\text{m}$ η αντίστοιχη εξίσωση μεταβολής της ταχύτητας προκύπτει $V_s=3242,3z^{0,0043}$ m/sec. Με παρεμβολή ίδιας μορφής εξίσωσης η οποία να περιγράφει τη μεταβολή της ταχύτητας για $40<z<1000\text{m}$, λαμβάνεται η παρακάτω εξίσωση: $V_s \cong 570,64z^{0,2558}$ m/sec. Εξ' άλλου, η μεταβολή της πυκνότητας με το βάθος λαμβάνεται ως γραμμική συνάρτηση της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων:

$$\rho(z) \cong 2,15 + [V_s(z)-434] * \left(\frac{2,7-2,15}{3400-434} \right) \quad (2)$$

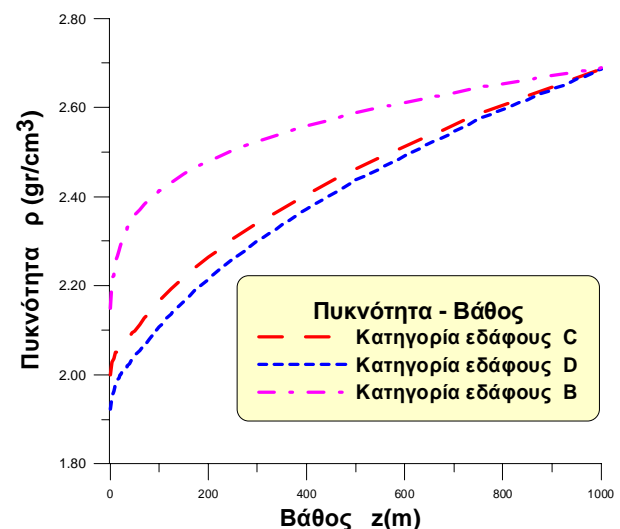
όπου: ρ (gr/cm^3 ή Mg/m^3) είναι η πυκνότητα και V_s (m/sec) η μέση ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων των εδαφικών στρώσεων. Το κάτω και άνω όριο της πυκνότητας είναι 2,15 και $2,70 \text{ Mg}/\text{m}^3$ και αντιστοιχεί σε μέσες ταχύτητες διάδοσης 434m/sec και 3400m/sec. Το μεν κάτω όριο προσδιορίζεται από απευθείας μετρήσεις σε ερευνητικές γεωτρήσεις κατηγορίας B (κατά

NEHRP 2000), ενώ το άνω όριο συνιστά μέσες τιμές που έχουν προταθεί από τους Παπαζάχος κ.α. (1966) για τον Ελληνικό χώρο.



Σχήμα 2. Μέση συνάρτηση μεταβολής της ταχύτητας διάδοσης των S κυμάτων με το βάθος (z) από 1m έως 8Km για τις εδαφικές κατηγορίες B, C & D (κατά NEHRP 2000).

Figure 3. Average shear wave velocity (V_s) modification versus depth (z) ranging from 1m down to 8Km for site classes B, C and D (according to NEHRP 2000).



Σχήμα 3. Μέση συνάρτηση μεταβολής της πυκνότητας με το βάθος από 1m έως 1Km για τις 3 εδαφικές κατηγορίες B, C & D (κατά NEHRP 2000).

Figure 2. Average density functions (ρ) versus depth (z) ranging from 1m down to 1Km for site classes B, C and D (according to NEHRP 2000).

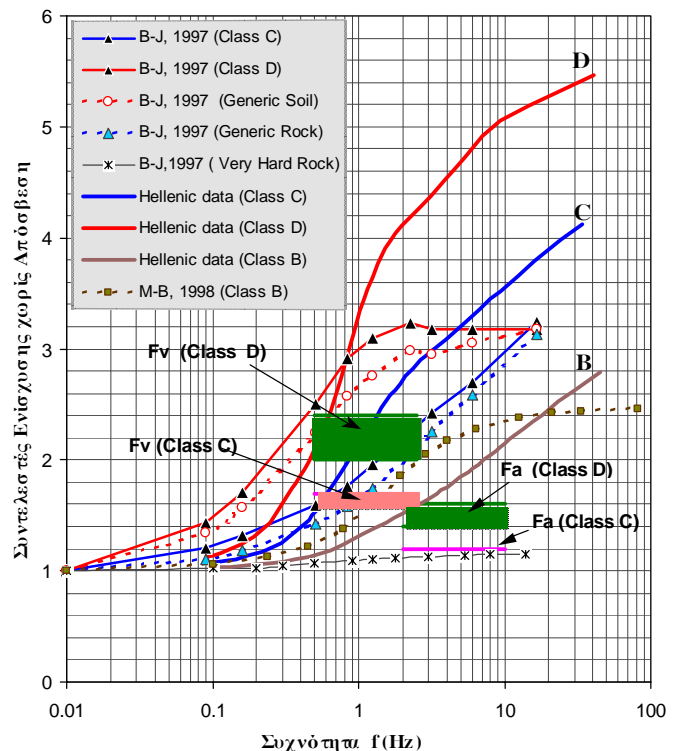
Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται οι ταχύτητες διάδοσης των διατμητικών κυμάτων με το βάθος για τις εδαφικές κατηγορίες B, C και D (κατά NEHRP 2000), ενώ η μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει του βάθους για τις αντίστοιχες εδαφικές κατηγορίες εμπεριέχονται στο σχήμα 3. Παρά τις μικρές διαφορές σχετικά με τη μεταβολή της πυκνότητας μεταξύ των εδαφικών κατατάξεων C και D, θεωρήθηκε ορθότερα να υπάρχουν διαφορετικές συναρτήσεις ώστε να αποφευχθούν παρεμβάσεις εξομάλυνσης στα χρησιμοποιούμενα δεδομένα.

Η συγκριτική παρουσίαση της μεταβολής της ταχύτητας διάδοσης των S κυμάτων και της πυκνότητας με το βάθος (z), εξηγεί τη διαφοροποίηση των εξομαλυμένων συντελεστών ενίσχυσης για κάθε μία από τις παραπάνω εδαφικές κατηγορίες με βάση την εξίσωση (1).

5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΣΕ ΒΡΑΧΩΔΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

Ο κώδικας *Site_Amp* (Boore, 2002), ο οποίος βασίζεται στη μεθοδολογία του τετάρτου του μήκους κύματος ($\lambda/4$), χρησιμοποιεί ως δεδομένα τις ήδη υπολογισθείσες μέσες εξισώσεις της μέσης ταχύτητας διάδοσης των S κυμάτων και της πυκνότητας, σε συνάρτηση με το βάθος για οποιαδήποτε από τις 3 εδαφικές κατηγορίες (B, C & D), προκειμένου να υπολογίσει τους εξομαλυμένους συντελεστές ενίσχυσης για ένα εύρος συχνοτήτων που ενδιαφέρουν τα έργα πολιτικού μηχανικού. Ειδικότερα, στην Ελλάδα οι συχνότητες αυτές κυμαίνονται από 0,5 έως 10Hz. Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι ο εν λόγω κώδικας H/Y παράγει ως αποτέλεσμα εξομαλυμένους (ανά κατηγορία εδάφους) συντελεστές ενίσχυσης εξαρτώμενους από τη συχνότητα για μέσα διάδοσης χωρίς απόσβεση ($Q \rightarrow \infty$). Για τον προσδιορισμό των συντελεστών ενίσχυσης σε μέσα με απόσβεση απαιτείται να υπολογισθεί το γινόμενο των συντελεστών ενίσχυσης σε μέσα διάδοσης χωρίς απόσβεση (unattenuated amplification functions) με τον εκθετικό παράγοντα $\exp(-\pi k_s f)$. Τα απο-τελέσματα που παρουσιάζονται στο σχήμα 4 περιλαμβάνουν 9 καμπύλες που αντιστοιχούν σε Ελληνικές και Αμερικάνικες συναρτήσεις εξομαλυμένης ενίσχυσης για διαφορετικές κατηγορίες εδαφών. Σύμφωνα με τον NEHRP 2000, η μονο-παραμετρική αποτίμηση της τοπικής εδαφικής ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης σε αντισεισμικούς κώδικες και κανονισμούς

(κυρίως πριν το 1994), αντικαταστάθηκε από προσομοιώματα δύο παραμέτρων (Dobry et al., 2000) τα οποία χαρακτηρίζονται από έναν συντελεστή ενίσχυσης σε μικρές περιόδους (F_a , στην περιοχή $T=0,3\text{sec}$: από 0,1 έως 0,5sec), και από έναν συντελεστή ενίσχυσης σε μεγάλες περιόδους (F_v , στην περιοχή όπου $T=1,2\text{ sec}$: από 0,4 έως 2,0sec). Αυτοί οι συντελεστές ενίσχυσης εξαρτώνται τόσο από την κατάταξη του εδάφους, όσο και από την ένταση της σεισμικής κίνησης. Γι' αυτό, προκειμένου να είναι δυνατή σύγκριση μεταξύ των εξομαλυμένων συντελεστών ενίσχυσης, με τους συντελεστές ενίσχυσης κατά NEHRP 2000 στην ίδια κατηγορία εδάφους, θα πρέπει να περιορίζεται για κορυφαίες εδαφικές επιταχύνσεις μικρότερες των 0,2g όπου οι μη γραμμικότητες είτε δεν εμφανίζονται, είτε είναι ήσσονος σημασίας.



Σχήμα 4. Εξομαλυμένοι συντελεστές ενίσχυσης χωρίς απόσβεση, συναρτήσει της συχνότητας. Αποτελέσματα Ελληνικών και Αμερικάνικων δεδομένων με τη μεθοδολογία του $\lambda/4$ και σύγκριση με τους συντελεστές ενίσχυσης κατά NEHRP 2000.

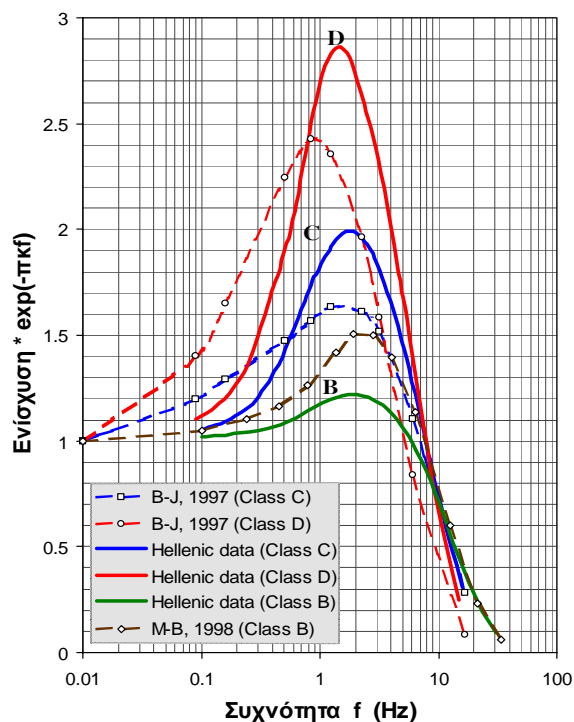
Figure 4. Unattenuated amplification functions versus frequency. Results from the $\lambda/4$ approximation are presented based on American and Hellenic data. Comparison with NEHRP 2000 site factors.

Η γενική τάση που παρουσιάζουν οι υπολογιζόμενοι εξομαλυμένοι συντελεστές

ενίσχυσης δείχνουν μεγαλύτερη ενίσχυση του φάσματος του βράχου σε μεγάλες περιόδους, κάτι που βρίσκεται σε καλή ποιοτική συμφωνία με τους προτεινόμενους κατά NEHRP 2000 συντελεστές φασματικής ενίσχυσης για μικρές και μεγάλες περιόδους του φάσματος. Ωστόσο, ποσοτικά οι τιμές των συντελεστών ενίσχυσης που προκύπτουν από τις αναλύσεις με την μεθοδολογία του $\lambda/4$ σε σχέση με τις κανονιστικές τιμές μπορεί τουλάχιστον μερικώς να αποδοθεί στο γεγονός ότι στην πρώτη περίπτωση ($\lambda/4$) η ενίσχυση δίδεται ως προς τη σεισμική κίνηση στο βραχώδες υπόβαθρο (πηγή – bedrock), ενώ στην περίπτωση του NEHRP πρόκειται για ενισχύσεις σε σχέση με τη δόνηση σε επιφανειακή εκδήλωση βράχου (rock outcrop). Η γενική μορφή των φασματικών ενισχύσεων (Σχ. 4) είναι μονοτονικές καμπύλες οι οποίες για την περίπτωση των Ελληνικών δεδομένων παρουσιάζουν πιο απότομη κλίση μέχρι τη συχνότητα των 2Hz περίπου για τις κατηγορίες εδαφών C και D συγκρινόμενες με τα Αμερικάνικα δεδομένα. Η παρατήρηση αυτή αντιστρέφεται στην περίπτωση των βραχωδών σχηματισμών (κατηγορία B).

Στο σχ. 5 παρουσιάζονται οι εξομαλυμένες ενισχύσεις για τις κατηγορίες B, C και D έχοντας ενσωματώσει και τον παράγοντα της απόσβεσης της σεισμικής κίνησης, οπότε οι τιμές των ενισχύσεων παρουσιάζουν κορυφαίες τιμές ενίσχυσης από 1,2 / 2,0 / 2,8 ανά εδαφική κατηγορία (B / C / D αντίστοιχα) σε συχνότητες 1,5 / 1,9 / 2,0Hz. Η σύγκριση των Ελληνικών με τα Αμερικάνικα δεδομένα οδηγεί στις ακόλουθες διαπιστώσεις:

1. οι Αμερικάνικοι εξομαλυμένοι συντελεστές ενίσχυσης για την κατηγορία C εδαφικών σχηματισμών εμφανίζουν μικρότερες τιμές έως 15% περίπου σε σχέση με τους αντίστοιχους Ελληνικούς για συχνότητες μεγαλύτερες των 0,5Hz,
2. η ίδια τάση διαπιστώνεται και στην περίπτωση των εδαφών κατηγορίας D μεταξύ Αμερικανικών και Ελληνικών δεδομένων με λίγο μικρότερες διαφορές (έως 12%) για συχνότητες μεγαλύτερες των 0,7Hz, και τέλος,
3. η παραπάνω τάση αντιστρέφεται στην περίπτωση των βραχωδών σχηματισμών (κατηγορία B), όπου οι Αμερικάνικοι συντελεστές ενίσχυσης δείχνουν αυξημένοι έως 25% σε σχέση με τους Ελληνικούς σε συχνότητες μεταξύ 0,7 και 3Hz.



Σχήμα 5. Εξομαλυμένοι συντελεστές ενίσχυσης με απόσβεση, συναρτήσεως της συχνότητας. Αποτελέσματα Ελληνικών και Αμερικάνικων δεδομένων με τη μεθοδολογία του $\lambda/4$. Σύγκριση Ελληνικών και Αμερικάνικων ενισχύσεων για τις κατηγορίες B, C και D. Figure 5. Attenuated amplification functions (combined effect of amplification and attenuation) versus frequency. Comparison of U.S and Hellenic data based on the $\lambda/4$ approximation for B, C and D sites.

6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

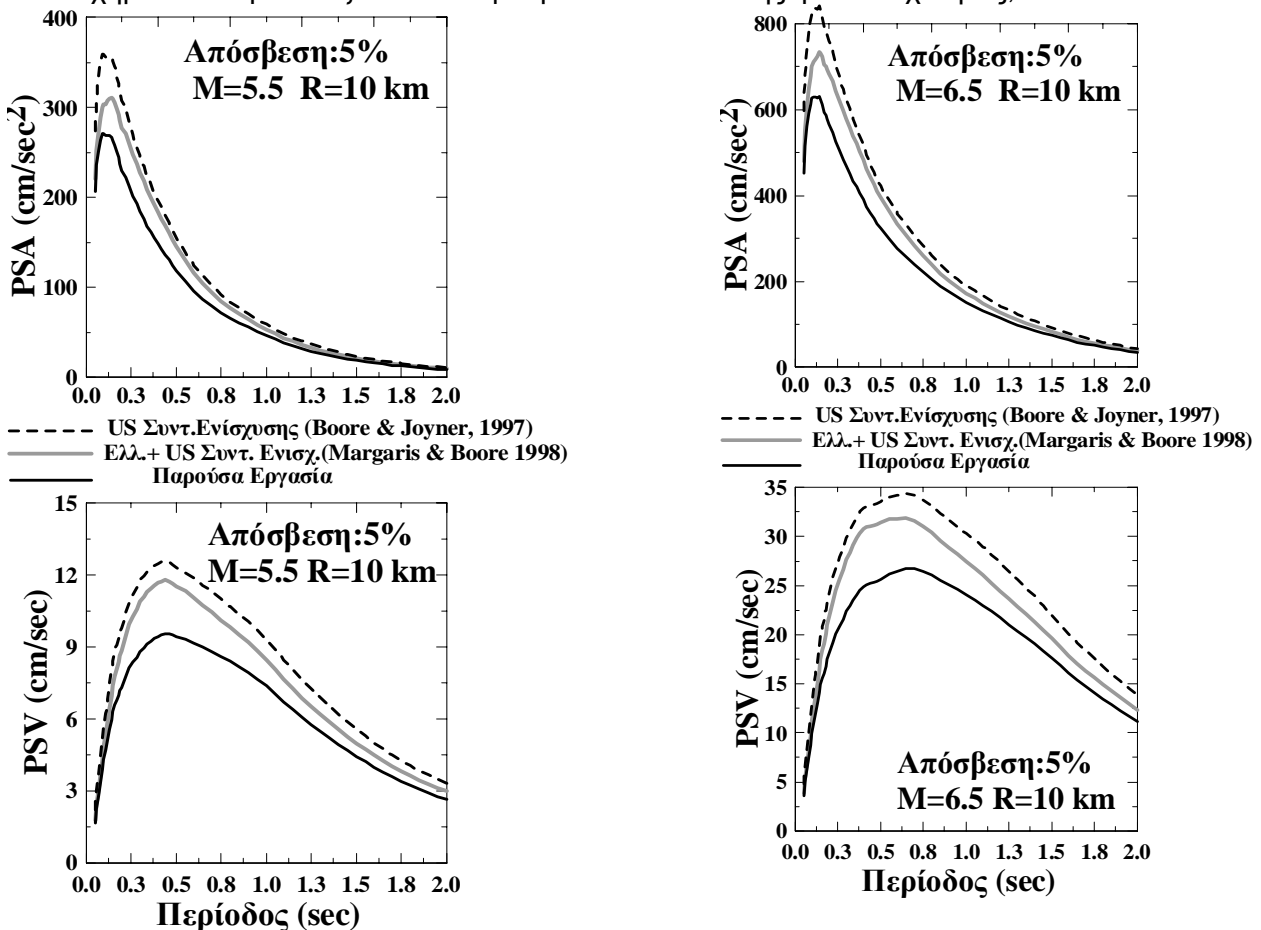
Οι εξομαλυμένοι συντελεστές εδαφικής ενίσχυσης για συνθήκες βραχωδών σχηματισμών όπως και αυτοί που έχουν προταθεί από παλιότερη εργασία (Klimis et al., 1999) για εδαφικές κατηγορίες C & D, έχει καταδειχθεί ότι αποτελούν πολύ χρήσιμο εργαλείο κυρίως για τον υπολογισμό μέσων τιμών εδαφικών παραμέτρων της ισχυρής δόνησης (π.χ. κορυφαία εδαφική επιτάχυνση, PGA, ταχύτητα, PGV, ή των αντίστοιχων φασματικών τιμών PSA, PSV για διάφορες τιμές της κρίσιμης απόσβεσης). Οι εδαφικοί συντελεστές ενίσχυσης επίσης συνεισφέρουν σημαντικά στην εκτίμηση συνθετικών καταγραφών ισχυρής δόνησης με την χρησιμοποίηση ρεαλιστικών δεδομένων κατά τους υπολογισμούς.

Προκειμένου να συσχετισθούν οι εξομαλυμένοι συντελεστές ενίσχυσης για εδαφικές συνθήκες

βραχωδών σχηματισμών χρησιμοποιήθηκε το στοχαστικό προσομοίωμα της σημειακής πηγής (Margaris & Boore, 1998) και για μία σειρά σεισμών σχεδιασμού (διάφορα μεγέθη και αποστάσεις) υπολογίσθηκαν φάσματα απόκρισης της ψευδοεπιτάχυνσης, PSA, και της ψευδοταχύτητας, PSV. Τα φάσματα αυτά υπολογίσθηκαν για 3 διαφορετικές ομάδες συντελεστών ενίσχυσης βραχωδών σχηματισμών σε συνάρτηση με τη συχνότητα. Χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές ενίσχυσης που προέκυψαν από την παρούσα εργασία και οι συντελεστές που προέκυψαν με βάση τους αμερικάνικους συντελεστές ενίσχυσης βραχωδών σχηματισμών προσαρμοσμένους στις Ελληνικές εδαφικές συνθήκες (Margaris & Boore, 1998). Τέλος χρησιμοποιήθηκαν αυτούσιοι οι συντελεστές ενίσχυσης αμερικανικών βραχωδών σχηματισμών όπως προτάθηκαν από τους Boore & Joyner (1997).

Στο σχήμα 6 παρουσιάζονται τα φάσματα

απόκρισης PSA και PSV, για μέγεθος σχεδιασμού $M=5,5$ και $6,5$ και απόσταση σχεδιασμού $R=10$ Km. Από το σχήμα 6 φαίνεται ότι οι υψηλότερες φασματικές τιμές λαμβάνονται συστηματικά από την χρησιμοποίηση των συντελεστών ενίσχυσης βραχωδών σχηματισμών που προέκυψαν για τις ΗΠΑ. Ενδιάμεσες φασματικές τιμές παρουσιάζονται από τη χρήση των συντελεστών ενίσχυσης του Ελληνικού χώρου με βάση τις αντίστοιχες αμερικάνικες. Τέλος, οι συντελεστές ενίσχυσης βραχωδών σχηματισμών από Ελληνικά δεδομένα γεωτρήσεων και τομογραφίας παρουσιάζουν τις μικρότερες φασματικές τιμές για όλο το πεδίο των ιδιοπεριόδων του εξεταζόμενου ταλαντωτή. Η σύγκριση αυτή παρουσιάζεται κατά το ίδιο τρόπο τόσο για όλα τα μεγέθη σεισμών και εξεταζόμενων αποστάσεων όσο και για τις δύο εξεταζόμενες φασματικές παραμέτρους της ψευδοεπιτάχυνσης, PSA, και της ψευδοταχύτητας, PSV.



Σχήμα 6. Φάσματα απόκρισης για ($D=5\%$) της ψευδοεπιτάχυνσης, PSA και της ψευδοταχύτητας, PSV, για 3 διαφορετικές κατηγορίες συντελεστών ενίσχυσης βραχωδών σχηματισμών.

Figure 6. 5%-response spectra of pseudo-acceleration, PSA and pseudo-velocity, PSV, for three different categories of rock site amplification coefficients

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι οι διαφορές μεταξύ Ελληνικών και Αμερικάνικων εξομαλυμένων συντελεστών ενίσχυσης δεν διέπονται από κάποιον γενικό κανόνα, αλλά εξαρτώνται άμεσα από το χρησιμοποιούμενο δείγμα όπου πιθανότατα η γεωλογία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο που αποτυπώνεται στις μετρούμενες τιμές διάδοσης των S κυμάτων. Θεωρείται συνεπώς λογικότερο να χρησιμοποιούνται κατά προτεραιότητα οι τοπικοί εξομαλυμένοι συντελεστές ενίσχυσης, ανάλογα με τον τόπο που διεξάγεται η έρευνα.

8. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο Πρόγραμμα EUROSEISRISK (EVG1-CT-2001-00040).

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anderson, J. G. and S. E. Hough (1984) "A model for the shape of the Fourier spectrum of acceleration at high frequencies", *Bull. Seism. Soc. Am.* **74**, 1969-1993.
- Anderson, J.G., Y., Lee, Y., Zeng and S. Day (1996) "Control of strong motion by the Upper 30 meters", *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**, 1749-1759.
- Athanassopoulos, G.A. (1989) "The method of cross-hole for the assignment of the shear wave velocity propagated in the soil", *A' National Congress of Geophysical research*, 19-21 April 1989, 10 pp, [in Greek].
- Boore, D.M. (2000) "SMSIM - Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes: Version 2.16", *U.S. Geological Survey, Open file Rept.*
- Boore, D.M. and W.B. Joyner (1997). "Site Amplifications for generic rock sites", *Bull. Seism. Soc. Am.*, **87**, 327-341.
- Borcherdt, R.D. (1994) "Estimates of site-dependent response spectra for design (Methodology and Justification)", *Earthquake Spectra* **10** (4), 617-653.
- Borcherdt, R.D. (2002a). "Empirical evidence for acceleration-dependent amplification factors", *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 761-782.
- Borcherdt, R.D. (2002b). "Empirical evidence for site coefficients in building code provisions", *Earthquake Spectra*, **18**(2), 189-782.
- Finn, W. D. L., (1996) "Ground motion amplification factors for use in building codes", *Proc. of the Inter. Workshop on Site Resp. Subjected to Strong Earthq. Mo.ons*, Vol.1, Yokosuka, Japan, pp.104-117.
- Joyner, W.B., and Boore, D.M. (2000). "Recent developments in earthquake ground motion estimation", *Proc. 6th Intern. Conf. on Seism. Zonation*, Nov. 12-15, Palm Springs, CA, EERI, CA.
- Klimis N., Margaris B. and Koliopoulos, P. (1999), "Site - dependent amplification functions and response spectra in Greece", *J.E.E.*, Vol. 3, No2, p. 237-270.
- 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.* **89**, p. 442-455.
- NEHRP (2000), "Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings", FEMA 222A/223A, May, Vol.1 (Provisions) and Vol. 2 (Commentary).
- Papazachos, B.C., Comninakis, P. and Drakopoulos J. (1966) "Preliminary results of an investigation of crustal structure in southeastern Europe", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **56**, pp.1241-1268.
- Papazachos, B. and C. Papazachou (2003) "The earthquakes in Greece" 3rd edition (Ziti Editor), 286pp
- Papazachos, C.B. and Nolet G. (1997) "P & S deep velocity structure of the Hellenic area obtained by robust nonlinear inversion of travel times", *J. Geophys. Res.* **102**, 8349-8367.
- Pitilakis, K.D., Anastasiadis, A.J. and Raptakis, D.G. (1992) "Field and laboratory determination of dynamic properties of natural soils deposits", *Proc. 10th World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain, pp.1275-1280.
- Raptakis, D.G., Anastasiadis, A.J., Pitilakis, K.D. and Lontzetidis, K. (1994) "Shear wave velocities and damping of Greek natural soils", *Proc. 10th ECEE*, Vol. 1, pp. 477-482.
- Raptakis, D.G., Tolis, S.V., Lontzetidis, K. and Pitilakis, K.D. (1997) "Comparison of instrumental and theoretical studies of seismic response during the earthquake of Kozani-Grevena", *Proceedings 3rd National Conference of Geotechnical Engineering*, Patra, Greece, [in Greek].