

ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

**ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΝΤΑΞΗ
ΝΕΟΥ ΧΑΡΤΗ ΖΩΝΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΥΜΒΑΤΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΙΣΧΥΟΝΤΑ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟ
ΚΑΝΟΝΙΣΜΟ ΚΑΙ ΤΟΝ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 8**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ
ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ**

Εμπειρικές Σχέσεις Απόσβεσης της Οριζόντιας Ισχυρής Κίνησης των Επιφανειακών Σεισμών του Ελληνικού χώρου

Empirical Attenuation Relations for the Horizontal Strong Ground Motion Parameters of Shallow Earthquakes in Greece.

ΜΑΡΓΑΡΗΣ, Β.	Δρ Σεισμολόγος, Εντετ. Ερευνητής ΙΤΣΑΚ.
ΠΑΠΑΖΑΧΟΣ, Κ.	Επικ. Καθηγητής, ΑΠΘ.
ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ, Χ.	Δρ Σεισμολόγος, Εντετ. Ερευνητής ΙΤΣΑΚ.
ΘΕΟΔΟΥΛΙΔΗΣ, Ν.	Δρ Σεισμολόγος, Κύριος. Ερευνητής ΙΤΣΑΚ.
ΚΑΛΟΓΕΡΑΣ, Ι.	Δρ Σεισμολόγος, Εντετ. Ερευνητής Γ.Ι. ΕΑΑ
ΣΚΑΡΛΑΤΟΥΔΗΣ, Α.	Φυσικός, Μεταπτυχ. Φοιτητής. ΑΠΘ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην εργασία αυτή από ένα σύνολο 474 επιταχυνσιογραμμάτων από σεισμούς του Ελληνικού χώρου επιλέχθηκε ένα σύνολο 744 καταγραφών από οριζόντιες συνιστώσες για τον υπολογισμό των σταθερών σχέσεων απόσβεσης των παραμέτρων της ισχυρής σεισμικής κίνησης (μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, rga , ταχύτητα, rgv και μετάθεση, rgd) για τους επιφανειακούς σεισμούς. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχούν στις καταγραφές 142 σεισμών (κυρίως από ρήγματα κανονικής διάρρηξης), οι οποίοι καλύπτουν μεγέθη $4.5 \leq M_w \leq 7.0$ και επικεντρικές αποστάσεις $1 \text{ km} \leq R \leq 150 \text{ km}$. Η ανάλυση των δεδομένων λαμβάνει υπ' όψη την κατηγοριοποίηση των εδαφικών συνθηκών κατά NEHRP (1994) και προτείνονται εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης των οριζοντίων συνιστωσών της ισχυρής κίνησης.

ABSTRACT: In the present paper, using 474 strong motion recordings from earthquakes in the Greek area, new attenuation relations are proposed based on 744 records of horizontal components for the peak ground acceleration, velocity and displacement for shallow earthquakes. The data set used consists of records from 142 mainly normal faulting earthquakes with magnitudes $4.5 \leq M_w \leq 7.0$ and epicentral distances $1 \text{ km} \leq R \leq 150 \text{ km}$. The data analysis incorporates the soil classification according to NEHRP (1994) and empirical predictive relations are proposed of the horizontal strong ground motion.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εκπόνηση και υιοθέτηση σχέσεων απόσβεσης των τιμών των παραμέτρων της ισχυρής σεισμικής κίνησης (μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, rga , ταχύτητα, rgv και μετάθεση, rgd) είναι ένα κρίσιμο στάδιο σε κάθε μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας. Για τον λόγο αυτό έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες σε διεθνές επίπεδο αλλά και στην Ελλάδα για την εκπόνηση σχέσεων απόσβεσης.

Μία τέτοια σχέση στην απλή της μορφή, δίνει την μεταβολή της παραμέτρου της ισχυρής σεισμικής κίνησης σε συνάρτηση με την από-

σταση (ανελαστική και γεωμετρική απόσβεση), και το μέτρο ισχύος του σεισμού (συνήθως το μέγεθος). Η επίδραση πρόσθετων παραγόντων, (μηχανισμός γένεσης, κατευθυντικότητα και διάρκεια της διάρρηξης, εδαφικές συνθήκες κα.) απαιτούν τη χρήση μεγάλου όγκου δεδομένων.

Η πρώτη αναλυτική σχέση απόσβεσης της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης προτάθηκε από τους Milne and Davenport (1969). Ευρείας εφαρμογής έτυχε η απλής μορφής σχέση που πρότεινε ο Esteva (1970), η οποία όπως και η προηγούμενη λαμβάνει υπόψη μόνον την γεωμετρική απόσβεση. Στη συνέχεια λόγω της

αύξησης του όγκου των δεδομένων και της συνεχούς εγκατάστασης νέων δικτύων επιταχυνσιογράφων προτάθηκαν πολυάριθμες σχέσεις απόσβεσης. Εκτενής αναφορά στις προσπάθειες αυτές ειδικά για τις ΗΠΑ και στη σημασία των σταθερών έχει γίνει από τον Campbell (1985), ενώ σε ειδική έκδοση της Seismological Society of America (:Seismol. Res. Lett., Vol. 68, No1) παρουσιάζονται οι πρόσφατες προσπάθειες για την πρόταση νέων σχέσεων οι οποίες λαμβάνουν υπόψη και πρόσθετους παράγοντες, έτσι ώστε οι σχέσεις να είναι αρκετά πολύπλοκες και δύσχρηστες σε προγράμματα σεισμικής επικινδυνότητας. Στην Ευρωπαϊκό-Μεσογειακό χώρο οι σημαντικότερες προσπάθειες είναι των Ambraseys and Bommer (1991), Ambraseys (1995), Sabetta and Pugliese (1996), Ambraseys et al., (1996), Rinaldis et al., (1998).. Σχέσεις απόσβεσης για περιοχές σύγκλισης στον Δυτικό Ειρηνικό έχουν προταθεί από τους Ohsaki et al., (1980), Kawashima et al., (1986), Molas and Yamazaki (1995), Si and Midorikawa (2000) για την Ιαπωνία, Loh et al., (1991), Niazzi and Bozorgnia (1991) για την Ταιβάν.

Από τις αρχές της δεκαετίας του '70 το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΓΙ) είχε αρχίσει την εγκατάσταση δικτύου επιταχυνσιογράφων ενώ από το 1982 το ΙΤΣΑΚ λειτουργεί σε εθνικό δίκτυο το μεγαλύτερο δίκτυο επιταχυνσιογράφων στον Ελληνικό χώρο. Μεταξύ των φορέων οι οποίοι εγκατέστησαν επιταχυνσιογράφους περιλαμβάνονται επίσης το ΕΜΠ και το Εργαστήριο Γεωφυσικής του ΑΠΘ (ΕΓ). Επίσης η ΔΕΗ λειτουργεί ειδικά δίκτυα στις θέσεις των παραγωγικών της μονάδων.

Ο Makropoulos (1978) πρότεινε μία "μέση" σχέση απόσβεσης με βάση τις 8 πιο αξιόπιστες και την έλεγξε με βάση τις περιορισμένες καταγραφές του Ελληνικού χώρου. Η πρώτη σχέση από καταγραφές του Ελληνικού χώρου προτάθηκε από τον Παπαϊωάννου (1984) με χρήση 14 επιταχυνσιογραμμάτων. Ο Θεοδουλίδης (1991) με βάση ένα εμπλουτισμένο δείγμα από 53 καταγραφές έκανε μία εκτενή ανάλυση και πρότεινε σχέσεις απόσβεσης των μέγιστων οριζόντιων και κατακόρυφων τιμών της εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετάθεσης, για δύο εδαφικές κατηγορίες.

Οι προηγούμενες προσπάθειες υπολογισμού των παραμέτρων της ισχυρής κίνησης, βασίσθηκαν σε ένα περιορισμένο αριθμό καταγραφών ισχυρής κίνησης. Επίσης έχουν περιληφθεί στις σχέσεις αυτές αβεβαιότητες και αποκλίσεις, λόγω των περιορισμών στην ε-

φαρμοζόμενη επεξεργασία ψηφιοποίησης και διόρθωσης των καταγραφών ισχυρής κίνησης, και της γενικής ταξινόμησης των τοπικών εδαφικών συνθηκών των θέσεων καταγραφής σε δύο κατηγορίες ("αλλούβια" και "βράχο"), Κατά την τελευταία δεκαετία η εγκατάσταση νέων ψηφιακής τεχνολογίας επιταχυνσιογράφων καθώς και η ανάπτυξη μετασεισμικών δικτύων ισχυρής κίνησης, έχουν αυξήσει σημαντικά το δείγμα των επιταχυνσιογραμμάτων καλύπτοντας μεγάλο εύρος μεγεθών και επικεντρικών αποστάσεων με αύξηση των καταγραφών στο κοντινό πεδίο. Επιπλέον ο ακριβής επανυπολογισμός των υποκέντρων με χρήση νέων μοντέλων δομής έχει περιορίσει τα σφάλματα στον καθορισμό των επικεντρικών αποστάσεων.

Η εργασία αυτή αποσκοπεί στην πρόταση νέων σχέσεων απόσβεσης των παραμέτρων της ισχυρής εδαφικής σεισμικής κίνησης με βάση το σύνολο των διαθέσιμων πλέον αξιόπιστων δεδομένων, τα οποία περιλαμβάνουν τις καταγραφές που προέρχονται από το εθνικό δίκτυο επιταχυνσιογράφων του ΙΤΣΑΚ και του ΓΙ για το χρονικό διάστημα από το 1973 έως και το 1999, τα οποία επεξεργάστηκαν με ενιαίο τρόπο. Επιπρόσθετα χρησιμοποιήθηκαν και δεδομένα από μετασεισμικά δίκτυα των δύο φορέων και του ΕΓ. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην υιοθέτηση αξιόπιστων εστιακών παραμέτρων των σεισμών οι οποίοι διέγειραν τους επιταχυνσιογράφους. Επίσης με βάση τις διαθέσιμες πληροφορίες για τις τοπικές εδαφικές συνθήκες στις θέσεις καταγραφής έγινε κατηγοριοποίηση των θέσεων σε τρεις κατηγορίες κατά NEHRP (1994) με σκοπό να περιοριστούν τα σφάλματα στην εκτίμηση των εδαφικών συνθηκών. Τέλος οι προτεινόμενες σχέσεις συγκρίνονται με σχέσεις οι οποίες έχουν προταθεί είτε για την Ελλάδα είτε για περιοχές με παρόμοιο σεισμοτεκτονικό περιβάλλον.

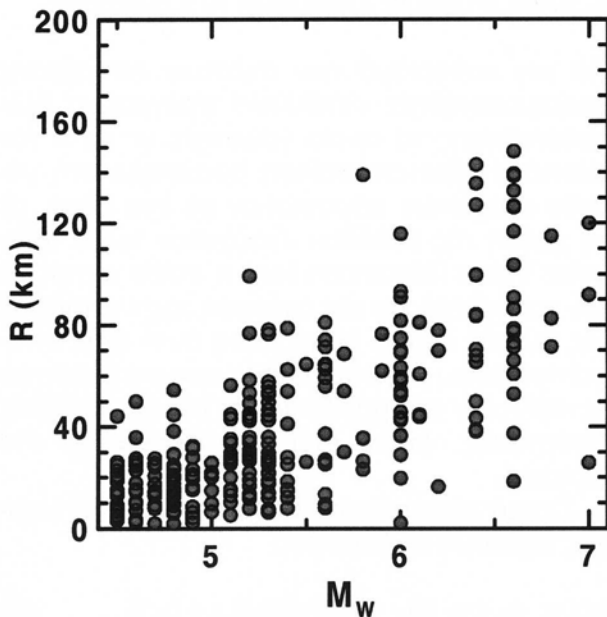
2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΙΣΧΥΡΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εργασία αυτή αποτελούνται από καταγραφές που προέρχονται από το εθνικό δίκτυο επιταχυνσιογράφων του Ι.Τ.Σ.Α.Κ. και από το δίκτυο επιταχυνσιογράφων του Εθνικού Αστεροσκοπείου των Αθηνών για το χρονικό διάστημα από το 1973 έως και το 1999. Από τις διαθέσιμες καταγραφές των δύο φορέων γενικά χρησιμοποιούνται μόνο όσες πληρούν τα κριτήρια που αναφέρονται παρακάτω:

α) Ο σεισμός που προκάλεσε τη διέγερση του επιταχυνσιογράφου να έχει μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w \geq 4.5$.

β) Η καταγραφή να έχει μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $PGA \geq 0.05g$ ανεξάρτητα από το μέγεθος του σεισμού

γ) Η καταγραφή να έχει μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $PGA < 0.05g$ αλλά να προέρχεται από τον ίδιο σεισμό για τον οποίο υπάρχει καταγραφή με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση μεγαλύτερη του 0.05g.

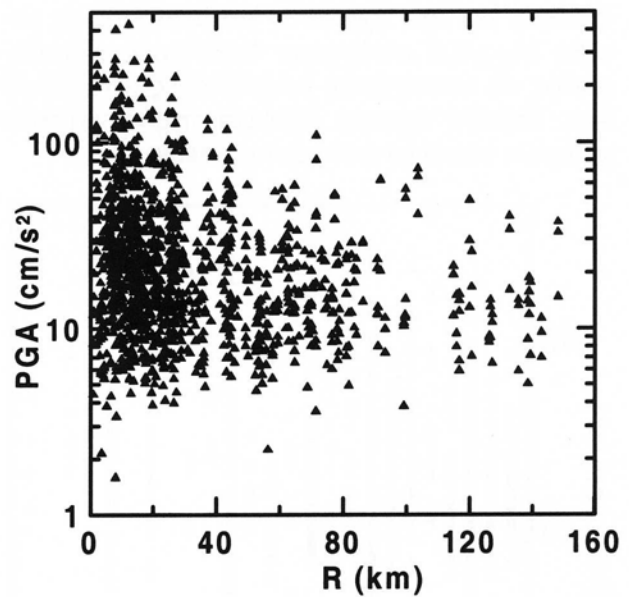


Σχήμα 1. Κατανομή των επικεντρικών αποστάσεων (R) σε συνάρτηση με το μέγεθος ροπής (M_w) των καταγραφών ισχυρής σεισμικής κίνησης οι οποίες χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.

Figure 1. Distribution of the epicentral distances (R) as a function of the moment magnitudes (M_w) of the strong motion recordings used in the present work.

Οι παραπάνω καταγραφές επεξεργάστηκαν με τη χρήση σαρωτή και κατάλληλων ψηφιακών φίλτρων, με ενιαίο και ομογενή τρόπο ο οποίος περιγράφεται σε άλλη εργασία (Σκαρλατούδης και συνεργάτες, 2001). Οι καταγραφές που αντιστοιχούν σε οριζόντιες συνιστώσες είναι 948. Από το σύνολο των καταγραφών που ήταν διαθέσιμες χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα ανάλυση αυτές που έχουν μέγεθος $M_w \geq 4.5$, δεδομένου ότι οι μικρότεροι σεισμοί δεν έχουν σημαντικά μακροσεισμικά αποτελέσματα και ενδιαφέρον για τις τεχνικές κατασκευές. Έτσι, το τελικό σύνολο των δεδομένων που επεξεργαστήκαμε στην εργασία αυτή απο-

τελείται από 744 καταγραφές οριζόντιων συνιστωσών.



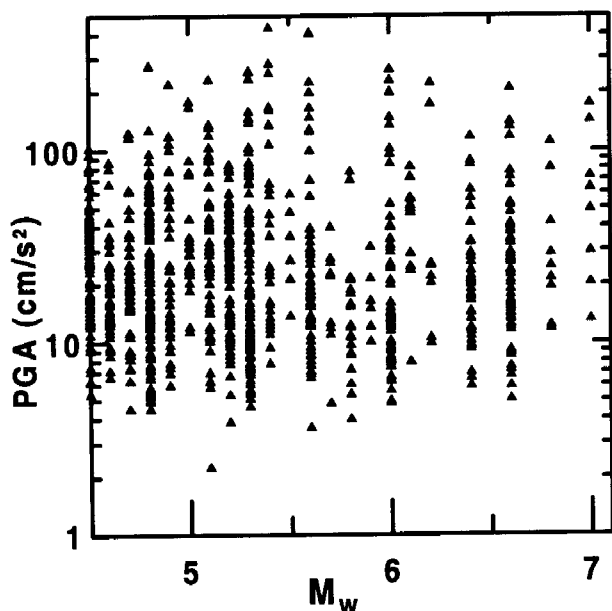
Σχήμα 2. Κατανομή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) σε συνάρτηση με την επικεντρική απόσταση (R) για τις καταγραφές ισχυρής σεισμικής κίνησης οι οποίες χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.

Figure 2. Distribution of the peak ground accelerations (PGA) as a function of the epicentral distance (R) for the strong motion recordings used in the present work.

Για τη συμπλήρωση της βάσης των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, ήταν αναγκαία η ύπαρξη πρόσθετων πληροφοριών τόσο για τις παραμέτρους των σεισμών των καταγραφών ισχυρής σεισμικής κίνησης (επίκεντρα, μέγεθος, κλπ.), όσο και για τις τοπικές εδαφικές συνθήκες των σταθμών καταγραφής. Για τις παραμέτρους των σεισμών χρησιμοποιήθηκαν τα επίκεντρα του νέου καταλόγου σεισμών του εργαστηρίου Γεωφυσικής του ΑΠΘ (Papazachos et al., 2000). Για τα μεγέθη των σεισμών χρησιμοποιήθηκαν τα μεγέθη σεισμικής ροπής, M_w , του ίδιου καταλόγου, τα οποία έχει δείχθει ότι είναι τα πιο κατάλληλα για τον καθορισμό σχέσεων απόσβεσης (Παπαζάχος και συνεργάτες, 2001).

Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται η κατανομή των μεγεθών ροπής, M_w , με την επικεντρική απόσταση καταγραφής για το επιλεχθέν σύνολο δεδομένων. Παρατηρούμε ότι υπάρχει κάποια κανονικότητα και συσχέτιση μεταξύ των δύο αυτών ποσοτήτων, η οποία δημιουργεί δυσκολίες στον υπολογισμό των σχέσεων απόσβεσης. Γενικά, για μικρά μεγέθη, ($4.0 \leq M_w \leq 5.0$) έχουμε καταγραφές σε μικρές σχετικά απο-

στάσεις (περίπου ως τα 40 Km), ενώ σεισμοί με μεγάλα μεγέθη καταγράφονται σε μεσαίες και μεγάλες αποστάσεις. Δυστυχώς, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1, για σεισμούς με μεγέθη $M_w \geq 6.0$ υπάρχουν διαθέσιμες παρατηρήσεις σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 20-40 Km, δηλαδή έχουμε έλλειψη παρατηρήσεων ισχυρών σεισμών στο κοντινό πεδίο.



Σχήμα 3. Κατανομή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) σε συνάρτηση με το μέγεθος ροπής (M_w) για τις καταγραφές ισχυρής σεισμικής κίνησης οι οποίες χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.

Figure 3. Distribution of the peak ground accelerations (PGA) as a function of the moment magnitudes (M_w) for the strong motion recordings used in the present work.

Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται οι καταγραμμένες τιμές μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) σε συνάρτηση με την επικεντρική απόσταση. Βλέπουμε μία πύκνωση σημείων για αποστάσεις ως 40 Km και τιμές PGA μέχρι και 100 cm/sec^2 . Μεγάλες τιμές επιτάχυνσης παρατηρούνται σε μικρές αποστάσεις, ενώ μικρές επιταχύνσεις καταγράφονται σε μεγάλες αποστάσεις, όπως και αναμένεται αφού μεγάλες τιμές επιτάχυνσης παρατηρούνται μακριά από το κοντινό πεδίο μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπως σε σεισμούς με έντονα φαινόμενα κατευθυντικότητας, ειδικές εδαφικές συνθήκες στην θέση καταγραφής κτλ. Αντίστοιχες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν και στο σχήμα 3, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης σε συνάρτηση με το μέγεθος ροπής, M_w , του σεισμού.

Για τις τοπικές εδαφικές συνθήκες χρησιμοποιήθηκε η κατηγοριοποίηση που προτείνεται από τον NEHRP (1994) και τον UBC(1997). Έτσι με βάση τα υφιστάμενα γεωτεχνικά-γεωλογικά στοιχεία κατατάχθηκαν οι εδαφικές κατηγορίες των σταθμών καταγραφής στις 5 βασικές κατηγορίες, A, B, C, D και E. Για τον Ελληνικό χώρο το σύνολο των σταθμών αντιστοιχεί μόνο στις κατηγορίες B, C και D, οι οποίες και τελικά υιοθετήθηκαν για κάθε σταθμό καταγραφής.

3. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΧΕΣΕΩΝ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ

Για τον καθορισμό των σχέσεων απόσβεσης χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο πρόγραμμα βελτιστοποίησης το οποίο γράφτηκε γι' αυτό τον σκοπό. Η βελτιστοποίηση βασίστηκε στη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων σε ένα βήμα, με τη χρήση της μεθόδου ιδιοζώντων τιμών (Singular Value Decomposition) η οποία επιτρέπει τον καθορισμό και την ανάλυση της ευστάθειας της τελικής λύσης. Η ανάλυση αυτή ήταν απαραίτητη λόγω της συσχέτισης των ανεξάρτητων μεταβλητών του μεγέθους και της επικεντρικής απόστασης, όπως έχει ήδη σχολιαστεί στο σχήμα 1.

Γενικά εξετάστηκαν οι δύο ακόλουθες μορφές σχέσεων απόσβεσης:

$$\ln Y = c_0 + c_1 M_w + c_2 \ln(R+R_0) + c_3 S \quad (1)$$

$$\ln Y = c_0 + c_1 M_w + c_2 \ln(R^2+h_0^2)^{1/2} + c_3 S \quad (2)$$

όπου ο όρος S περιγράφει την επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών και οι σταθερές c_0 , c_1 , c_2 και c_3 είναι παράμετροι του μοντέλου. Οι σχέσεις (1) και (2) είναι σχεδόν ταυτόσημες, με τη μόνη διαφορά ότι η σχέση (2) χρησιμοποιεί την υποκεντρική απόσταση $(R^2+h_0^2)^{1/2}$, όπου h_0 το «ενεργό» βάθος του σεισμού (βάθος έκλυσης της σεισμικής ενέργειας), ενώ η σχέση (1) έχει πιο απλουστευμένη μορφή για την απόσταση, σύμφωνα με την πρόταση του Esteva (1970). Γενικά οι σχέσεις της μορφής (1) και (2) είναι στην πράξη σχεδόν ταυτόσημες, εκτός από το κοντινό πεδίο όπου εμφανίζουν μικρές διαφορές.

Ο υπολογισμός των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της ισχυρής κίνησης έγινε με βάση μοντέλο παλινδρόμησης δύο βημάτων (Boore et al., 1983; Spudich et al., 1999). Στο πρώτο βήμα με τη χρήση του συνόλου των δεδομένων που καλύπτουν μεγάλο διάστημα μεγεθών εκτιμήθηκε η σταθερά του μεγέθους του σεισμού, c_1 . Κατόπιν προκειμένου να εκτιμηθούν οι υπόλοιπες σταθερές και να δοθεί έμφαση

στους ισχυρούς σεισμούς χρησιμοποιήθηκαν οι σεισμοί των οποίων τα μεγέθη είναι $M \geq 5.0$.

Ειδικότερα για τις εδαφικές συνθήκες οι σχέσεις (1) και (2) οδηγούν σε μία ανάγκη ποσοτικοποίησης της επίδρασης των τοπικών εδαφικών στην ισχυρή σεισμική κίνηση μέσω ενός απλού γραμμικού όρου. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε μία απλή γραμμική αντιστοιχία $B \leftrightarrow S=0$, $C \leftrightarrow S=1$ και $D \leftrightarrow S=2$ για τους τρεις τύπους εδαφικών συνθηκών (κατά UBC 1997) οι οποίοι προαναφέρθηκαν για τους σταθμούς καταγραφής του Ελληνικού χώρου. Η παραπάνω αντιστοιχία είναι αυθαίρετη, αφού δεν είναι αναγκαίο η ποσοτική επίδραση της μετάβασης $B \rightarrow C$ και $C \rightarrow D$ να είναι ίδια. Το θέμα αυτό σχολιάζεται παρακάτω, κατά τη μελέτη των τελικών σχέσεων απόσβεσης.

Για τον καθορισμό των τελικών σχέσεων απόσβεσης ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο ρόλος του «ενεργού» βάθους h_0 ή της αντίστοιχης σταθεράς R_0 . Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι απαραίτητα σωστή η χρήση του μικροσεισμικού βάθους, h , κάθε σεισμού, αφού αυτό συνήθως διαφέρει από το μέσο βάθος έκλυσης της σεισμικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό προτείνεται η χρήση μίας μέσης τιμής για το h_0 ή το R_0 . Δυστυχώς, η τιμή αυτή παρουσιάζει πολύ έντονη συσχέτιση με την παράμετρο απόσβεσης, c_2 , και δεν μπορεί να υπολογιστεί απ' ευθείας από τα δεδομένα, όπως έχει δείχθει και με κατάλληλες προσομοιώσεις Monte-Carlo (Parazachos and Papaioannou, 1998). Για το λόγο αυτό υιοθετήθηκε η τιμή $h_0=7\text{km}$, η οποία αντιστοιχεί τόσο στο μέσο όρο των βαθών των σεισμών της παρούσας μελέτης, όσο και στο μέσο «ενεργό» βάθος το οποίο έχει υπολογιστεί για σχέση ανάλογη της (2) από μακροσεισμικά αποτελέσματα του Ελληνικού χώρου (Parazachos and Papaioannou, 1997), ενώ με βάση τα ίδια αποτελέσματα, υιοθετήθηκε η τιμή $R_0=6\text{km}$. Για τις PGV και PGD τιμές h_0 και R_0 που εκτιμήθηκαν είναι 5 και 6 αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους αυτές, υπολογίστηκαν με τη μέθοδο που περιγράφηκε κατάλληλες σχέσεις απόσβεσης της μορφής (1) και (2) για τις μέγιστες οριζόντιες συνιστώσες της εδαφικής επιτάχυνσης, PGA, ταχύτητας, PGV, και μετάθεσης, PGD, οι οποίες δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\ln \text{PGA} = 4.16 + 0.69M_w - 1.24 \ln(R+6) + 0.12S \pm 0.70 \quad (3)$$

$$\ln \text{PGA} = 3.52 + 0.70M_w - 1.14 \ln(R^2 + 7^2)^{1/2} + 0.12S \pm 0.70 \quad (4)$$

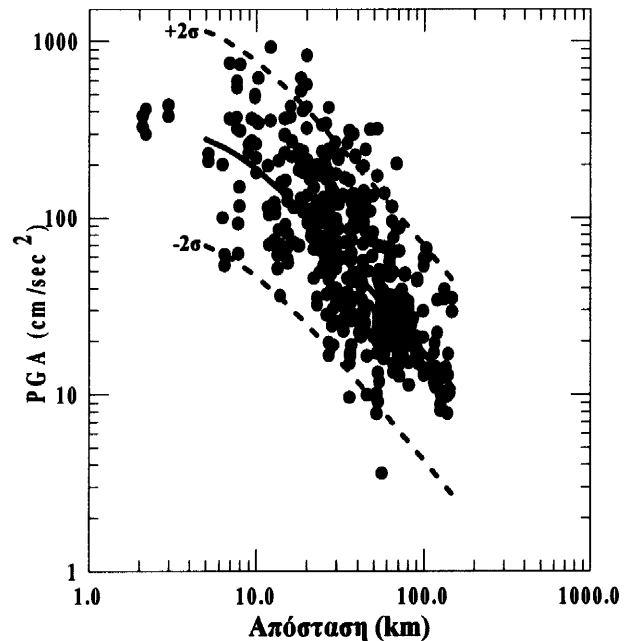
$$\ln \text{PGV} = -1.51 + 1.11M_w - 1.20 \ln(R+5) + 0.29S \pm 0.80 \quad (5)$$

$$\ln \text{PGV} = -2.08 + 1.13M_w - 1.11 \ln(R^2 + 6^2)^{1/2} + 0.29S \pm 0.80 \quad (6)$$

$$\ln \text{PGD} = -6.63 + 1.66M_w - 1.34 \ln(R+5) + 0.50S \pm 1.08 \quad (7)$$

$$\ln \text{PGD} = -7.26 + 1.68M_w - 1.24 \ln(R^2 + 6^2)^{1/2} + 0.50S \pm 1.08 \quad (8)$$

Ο τελευταίος όρος κάθε σχέσης δίνει με την μορφή μεταβολής το τυπικό σφάλμα κάθε σχέσης το οποίο υπολογίστηκε από τα δεδομένα. Στο σχήμα 4 παρουσιάζονται τα δεδομένα της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης τα οποία με βάση τη σχέση (4) έχουν αναχθεί σε μέγεθος $M=6.5$ ενώ ταυτόχρονα η ίδια σχέση ± 2 τυπικές αποκλίσεις παρουσιάζεται στο ίδιο σχήμα (4). Η εμπειρική σχέση ακολουθεί ικανοποιητικά και περιλαμβάνει το σύνολο των παρατηρήσεων.

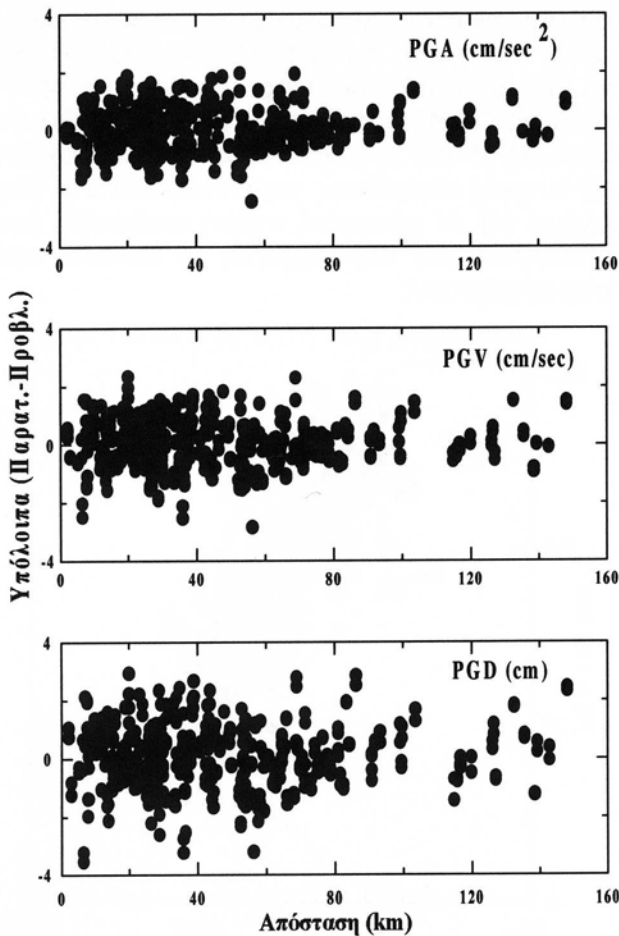


Σχήμα 4. Σύγκριση της εμπειρικής σχέσης πρόβλεψης μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης $\pm 2\sigma$ (τυπικές αποκλίσεις) με τις παρατηρημένες τιμές ανηγμένες σε $M6.5$.

Figure 4. Comparison of the PGA empirical relation with $\pm 2\sigma$ with the observed values scaled to $M6.5$.

Η μελέτη των υπολοίπων των παρατηρημένων από τις προβλεπόμενες τιμές μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετάθεσης σε συνάρτηση με την απόσταση και το μέγεθος είναι σημαντική σε εκτιμήσεις εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της ισχυρής κίνησης (Campbell, 1985). Στο σχήμα 5 απεικονίζονται τα υπόλοιπα (παρατηρημένες – προβλεπόμενες) τιμές των μεγίστων εδαφικών επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μεταθέσεων με την απόσταση (σχήμα 5) καθώς και με το μέγεθος δεν παρουσιάζουν κάποια συγκεκριμένη εξάρτηση. Η μεταβολή τους κυμαίνεται γενικά από

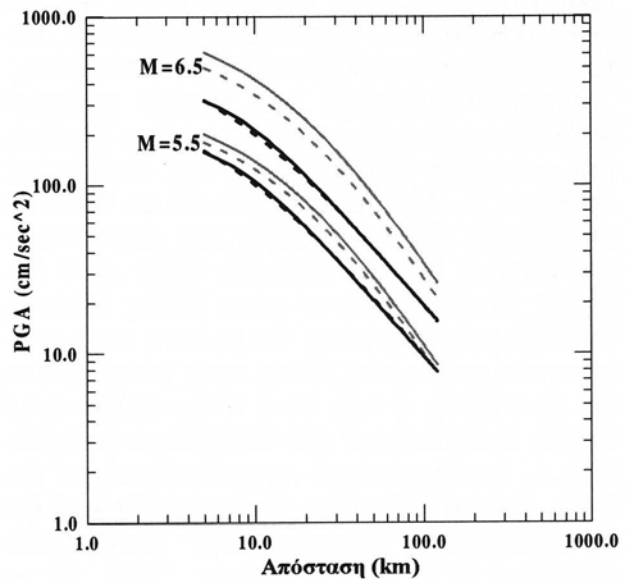
-2 έως +2 το οποίο είναι σε ικανοποιητική συμφωνία με άλλες παρόμοιες μελέτες του Ελληνικού χώρου (Θεοδουλίδης, 1991).



Σχήμα 5. Κατανομή των υπολοίπων των μεγίστων τιμών των επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μεταθέσεων με την απόσταση.
Figure 5. Distribution of the residuals of the peak ground acceleration, velocity and displacement in terms of distance.

Γενικά όλες οι σχέσεις απόσβεσης που καθορίστηκαν δείχνουν την ίδια περίπου συμπεριφορά. Χαρακτηριστική είναι η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών η οποία οδηγεί σε συστηματική ενίσχυση της ισχυρής σεισμικής κίνησης σε πιο «μαλακά» εδάφη σε σχέση με τα πιο «βραχώδη» και η οποία είναι πιο έντονη για την ταχύτητα (σε σχέση με την επιτάχυνση) και ακόμη πιο έντονη για τις μέγιστες εδαφικές μεταθέσεις. Επίσης, η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών είναι μικρότερη για τις κατακόρυφες συνιστώσες από ότι για τις οριζόντιες, όπως γενικά αναμένεται.
ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΕ ΠΑΡΟΜΟΙΕΣ ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ

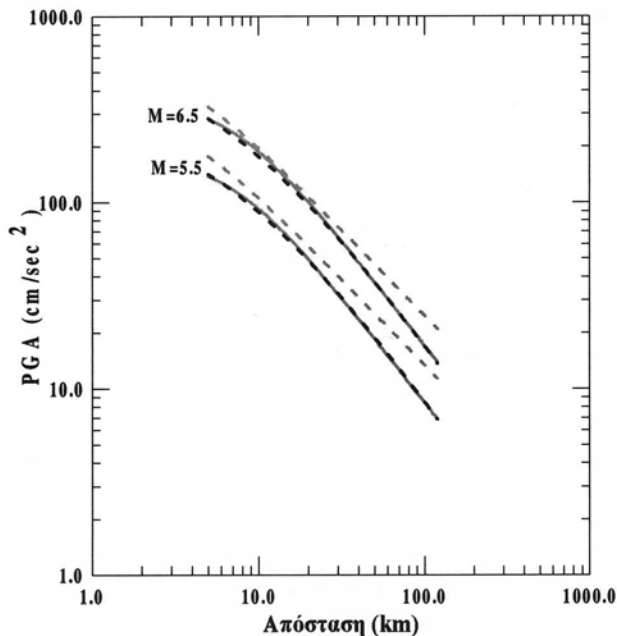
Η σύγκριση των προτεινόμενων σχέσεων απόσβεσης της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (σχέσεις 3,4) με τις υπάρχουσες σχέσεις που έχουν προταθεί στον Ελληνικό χώρο (Θεοδουλίδης, 1991) δίνονται στο σχήμα 6. Στο σχήμα αυτό για δύο μεγέθη σεισμών $M_{5.5}$ και 6.5 απεικονίζονται οι σχέσεις (3 και 4) της παρούσας μελέτης με τις αντίστοιχες που έχουν προταθεί από τον Θεοδουλίδη (1991) τόσο με βάση τις Ελληνικές καταγραφές ισχυρής κίνησης όσο και ένα ενισχυμένο δείγμα επιταχυνσιογραμμάτων με δεδομένα σεισμών μεγέθους ροπής $7.0 \leq M_w \leq 7.5$.



Σχήμα 6. Σύγκριση των PGA εμπειρικών σχέσεων 3 (μαύρη συνεχόμενη γραμμή) και 4 (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με τις αντίστοιχες του Θεοδουλίδη (1991) για Ελληνικά δεδομένα (γκρί διακεκομμένη γραμμή) και ενισχυμένων (γκρί συνεχόμενη γραμμή).
Figure 6. Comparison of the PGA empirical relations 3 (black continuous line) and 4 (black dashed line) with those proposed by Theodoulidis (1991) Greek data (gray dashed line) and Greek data enriched with other strong motion data (gray continuous line).

Στην παραπάνω σύγκριση πρέπει να αναφερθεί ότι οι συγκρινόμενες εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης έχουν αναχθεί για ενδιάμεσες εδαφικές συνθήκες. Παρουσιάζεται μία σημαντική διαφοροποίηση κυρίως στα αποτελέσματα των σχέσεων για μέγεθος $M_{6.5}$ που οφείλεται στην ισχυρή εξάρτηση των σχέσεων του Θεοδουλίδη (1991) με τον συντελεστή του μεγέθους.

Στο σχήμα 7 συγκρίνονται οι εμπειρικές σχέσεις 3 και 4 με την αντίστοιχη η οποία έχει προταθεί από τους Ambraseys et al. (1996), η οποία υπολογίστηκε με βάση ένα μεγάλο αριθμό δεδομένων ισχυρής κίνησης του Ευρωπαϊκού χώρου και των γύρω περιοχών. Η σύγκριση γίνεται για δύο μεγέθη σεισμών M5.5 και 6.5 και για εδαφικές συνθήκες σκληρού πετρώματος.



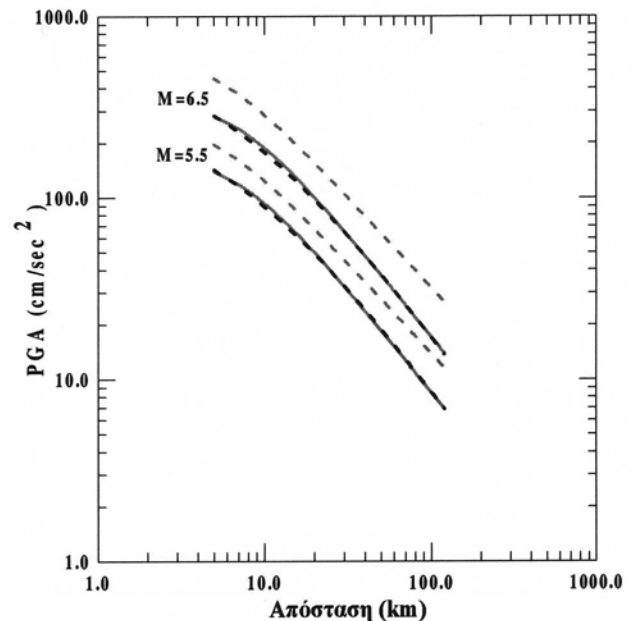
Σχήμα 7. Σύγκριση των PGA εμπειρικών σχέσεων 3 (γκρί συνεχόμενη γραμμή) και 4 (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με τις αντίστοιχες των Ambraseys et al. (1996; γκρί διακεκομμένη γραμμή) για M5.5 και 6.5 και εδαφικές συνθήκες σκληρού πετρώματος.

Figure 7. Comparison of the PGA empirical relations 3 (gray continuous line) and 4 (black dashed line) with those proposed by Ambraseys et al. (1996; gray dashed line) for M5.5 and 6.5 and rock soil conditions.

Οι εμπειρικές σχέσεις παρουσιάζουν μία ικανοποιητική συμφωνία μέχρι αποστάσεις $R=30$ km ενώ αρχίζουν και αποκλίνουν για μεγαλύτερες αποστάσεις. Η υιοθέτηση δεδομένων από διάφορα σεισμοτεκτονικά περιβάλλοντα σε μεγάλες αποστάσεις ($R>50$ km) καθώς και ο διαφορετικός ορισμός της απόστασης στον καθορισμό των εμπειρικών σχέσεων απόσβεσης από τους Ambraseys et al. (1996), μπορεί να είναι η εξήγηση της απόκλισης των παραπάνω σχέσεων.

Οι Sabetta and Pugliese (1996) με τη βάση δεδομένα ισχυρής κίνησης από σεισμούς με κανονικά και ανάστροφα ρήγματα του Ιταλικού

χώρου πρότειναν εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης. Στο σχήμα 8 οι σχέσεις αυτές συγκρίνονται με τις αντίστοιχες 3 και 4 της παρούσας μελέτης.



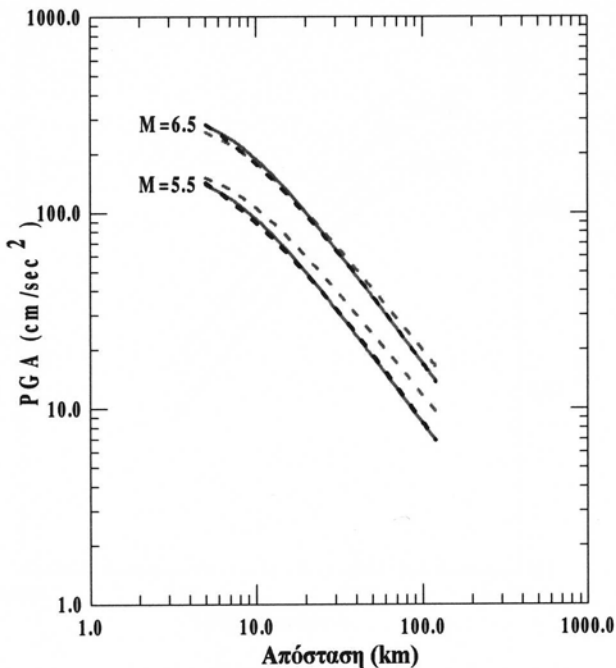
Σχήμα 8. Σύγκριση των PGA εμπειρικών σχέσεων 3 (γκρί συνεχόμενη γραμμή) και 4 (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με τις αντίστοιχες των Sabetta and Pugliese (1996; γκρί διακεκομμένη γραμμή) για M5.5 και 6.5 και εδαφικές συνθήκες σκληρού πετρώματος.

Figure 8. Comparison of the PGA empirical relations 3 (gray continuous line) and 4 (black dashed line) with those proposed by Sabetta and Pugliese (1996; gray dashed line) for M5.5 and 6.5 and rock soil conditions.

Η χρησιμοποίηση μεγάλου αριθμού καταγραφών ισχυρής κίνησης σεισμών με ανάστροφο μηχανισμό γένεσης από τους Sabetta and Pugliese (1996) για τον καθορισμό των Ιταλικών εμπειρικών σχέσεων είναι η πιθανή εξήγηση της απόκλισης των δύο σχέσεων. Τα Ελληνικά δεδομένα ισχυρής κίνησης προέρχονται κατά κύριο λόγο από σεισμούς κανονικών ρηγμάτων.

Οι Spudich et al. (1999) πρότειναν εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, PGA, με βάση καταγραφές από διάφορες περιοχές, σεισμών που προέρχονται από κανονικά ρήγματα. Η σχέση αυτή συγκρίνεται με τις σχέσεις 3 και 4 στο σχήμα 9 για δύο σεισμικά μεγέθη M5.5 και 6.5 και εδαφικές συνθήκες σκληρού πετρώματος. Οι σχέσεις αυτές βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία για M6.5 ενώ παρουσιάζουν μία απόκλιση για μικρότερα μεγέθη πράγμα που πιθανά οφείλε-

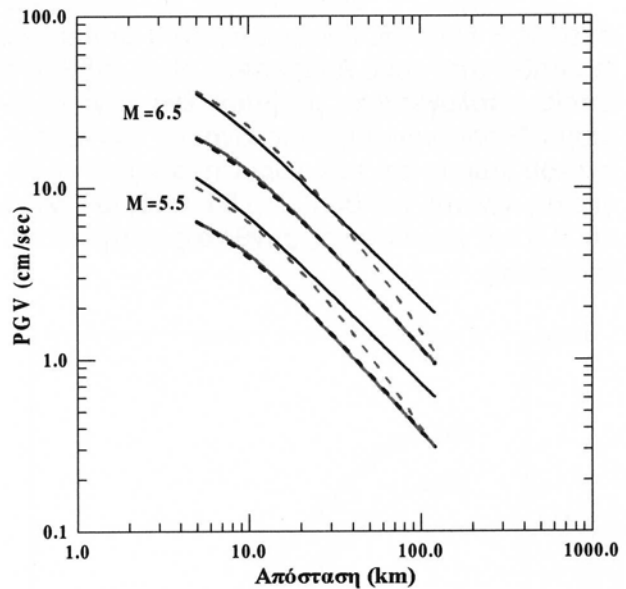
ται στο μεγάλο δείγμα ισχυρών σεισμών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν από τους Spudich et al. (1999) καθορίζοντας την εξάρτηση της εμπειρικής σχέσης από το μέγεθος.



Σχήμα 9. Σύγκριση των PGA εμπειρικών σχέσεων 3 (γκρί συνεχόμενη γραμμή) και 4 (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με τις αντίστοιχες των Spudich et al. (1999; γκρί διακεκομμένη γραμμή) για M5.5 και 6.5 και εδαφικές συνθήκες σκληρού πετρώματος.

Figure 9. Comparison of the PGA empirical relations 3 (gray continuous line) and 4 (black dashed line) with those proposed by Spudich et al. (1999; gray dashed line) for M5.5 and 6.5 and rock soil conditions.

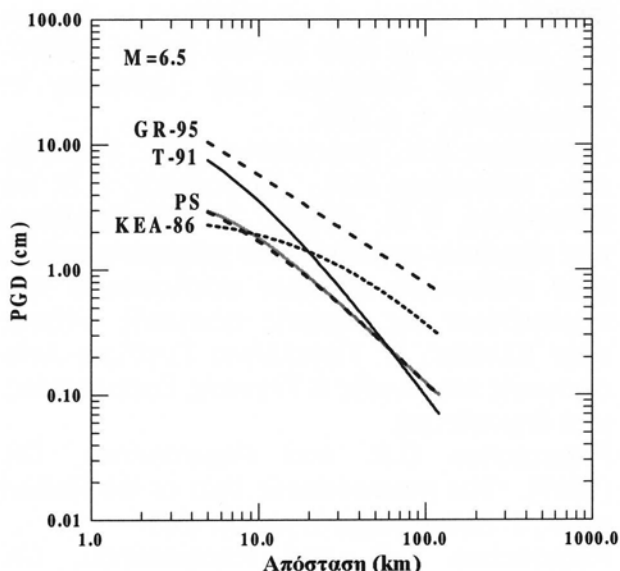
Στο σχήμα 10 απεικονίζονται οι εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης των μεγίστων εδαφικών ταχυτήτων (σχέσεις 5 και 6) σε σύγκριση με τις αντίστοιχες που έχουν προταθεί για τον Ελληνικό χώρο από τον Θεοδουλίδη (1991) με βάση τις Ελληνικές καταγραφές για M5.5 και 6.5 και εδαφικές συνθήκες σκληρού πετρώματος. Στο ίδιο σχήμα (10) δίνονται οι αντίστοιχες σχέσεις που έχουν προταθεί από τους Sabetta and Pugliese (1996). Οι σχέσεις 5 και 6 παρουσιάζουν συμφωνία με τις αντίστοιχες ιταλικές (ίδιο συντελεστή μεγέθους) αλλά η χρησιμοποίηση από τους Sabetta and Pugliese (1996) καταγραφών από σεισμούς αναστροφών ρηγμάτων έχει σαν αποτέλεσμα την συστηματική απόκλιση των Ελληνικών εμπειρικών σχέσεων σε ένα ευρύ φάσμα αποστάσεων.



Σχήμα 10. Σύγκριση των PGV εμπειρικών σχέσεων 5 (γκρί συνεχόμενη γραμμή) και 6 (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με τις αντίστοιχες των Sabetta and Pugliese (1996; μαύρη συνεχόμενη γραμμή) και Θεοδουλίδη (1991; γκρί διακεκομμένη γραμμή) για M5.5 και 6.5 και εδαφικές συνθήκες σκληρού πετρώματος.

Figure 10. Comparison of the PGV empirical relations 5 (gray continuous line) and 6 (black dashed line) with those proposed by Sabetta and Pugliese (1996; gray dashed line) and Theodoulidis (1991; gray dashed line) for M5.5 and 6.5 and rock soil conditions.

Οι εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της μέγιστης εδαφικής μετάθεσης, PGD, μπορούν να χαρακτηρισθούν ως οι πλέον ασταθείς και αυτό μπορεί να φανεί από τα αντίστοιχα σφάλματα των υπολογισμών τους. Γενικά δεν έχει προταθεί μεγάλος αριθμός εμπειρικών σχέσεων απόσβεσης της PGD. Οι προτεινόμενες σχέσεις (PS) 7 και 8 συγκρίνονται στο σχήμα 11 με την αντίστοιχη σχέση που έχει προταθεί για τον Ελληνικό χώρο (Θεοδουλίδης, 1991; T-91), την σχέση του Gregor (1995; GR-95) για τις ΗΠΑ και των Kawashima et al. (1986) για την Ιαπωνία, για M6.5 και εδαφικές συνθήκες σκληρού πετρώματος. Οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται στις σχέσεις αυτές μπορούν να αποδοθούν στα διαφορετικά δεδομένα ισχυρής κίνησης και σε διαφορετικά σεισμοτεκτονικά περιβάλλοντα.



Σχήμα 11. Σύγκριση των PGD εμπειρικών σχέσεων 7-γκρί συνεχόμενη γραμμή και 8- μαύρη διακεκομμένη γραμμή (PS) με τις αντίστοιχες του Θεοδουλίδη (1991; μαύρη συνεχόμενη γραμμή, T-91), Gregor (1995; μαύρη διακεκομμένη γραμμή) και Kawashima et al. (1986; Μαύρη διακεκομμένη γραμμή, KEA-86), για 6.5 και εδαφικές συνθήκες σκληρού πετρώματος.

Figure 11. Comparison of the PGV empirical relations 7 (gray continuous line) and 8 (black dashed line), PS, with those proposed by Theodulidis (1991; black continuous line, T-91), Gregor (1995; gray dashed line, GR-95) and Kawashima (1986; black dashed line, KEA-86), for M6.5 and rock soil conditions.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι προτεινόμενες εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης προέκυψαν από ένα μεγάλο δείγμα καταγραφών ισχυρής κίνησης του Ελληνικού χώρου οι οποίες καλύπτουν αποστάσεις από 2 έως 150 km και μεγέθη από 4.5 έως 7. Από τα σχήματα κατανομής μεγεθών και αποστάσεων των εξεταζόμενων δεδομένων φαίνεται ότι οι προτεινόμενες εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης (3 έως 8) των μεγίστων εδαφικών οριζοντιών επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μεταθέσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια για ένα διάστημα αποστάσεων $5 \leq R(\text{km}) \leq 120$ και μεγεθών $4.5 \leq M \leq 7.0$.

Οι προτεινόμενες σχέσεις (3 έως 8) συγκρίθηκαν με άλλες που έχουν προταθεί σε άλλες περιοχές με διάφορα σεισμοτεκτονικά περιβάλλοντα. Σε καλή συμφωνία οι εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της PGA (3 και 4) βρέθηκαν με τη σχέση που πρότειναν οι Spudich et al. (1999) με βάση παγκόσμια δεδομένα ισχυ-

ρής κίνησης και σεισμών που προέρχονται από κανονικά ρήγματα. Οι Ελληνικές καταγραφές ισχυρής κίνησης που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται κατά κύριο λόγο από σεισμούς κανονικών και δεξιόστροφων σεισμικών ρηγμάτων. Μία αύξηση του δικτύου επιταχυνσιογράφων του Ελληνικού χώρου στις περιοχές του Ελληνικού τόξου όπου επικρατούν κυρίως ανάστροφα ρήγματα είναι δυνατόν να εμπλουτίσει το δείγμα των καταγραφών ισχυρής κίνησης με σημαντικές εδαφικές κινήσεις.

Παρόλα αυτά οι προτεινόμενες εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της ισχυρής κίνησης του Ελληνικού χώρου μπορεί να θεωρηθεί ότι βασίζονται σε ικανοποιητικό δείγμα και κατάλληλο για τον καθορισμό της απόσβεσης των σεισμικών κυμάτων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος «Συλλογή και επεξεργασία σεισμικών δεδομένων και εκπόνηση ώλου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας συμβατού με τον ισχύοντα ΕΑΚ και του EC8» με χρηματοδότηση από τον ΟΑΣΠ. Επίσης μέρους του έργου χρηματοδοτήθηκε από το ερευνητικό πρόγραμμα του ΟΑΣΠ υπ' αριθμ. 20321 της Επιτροπής Ερευνών του ΑΠΘ, και από τα προγράμματα του ΙΤΣΑΚ, ΙΤ-15 και EVR1-CT-1999-40008.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ambraseys, N.N. (1995). "The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 24, pp 467-490.
- Ambraseys, N.N. and Bommer, J.J. (1991). "The attenuation of ground accelerations in Europe", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 20, pp 1179-1202.
- Ambraseys, N.N., Simpson, K.A. and Bommer, J.J. (1996). "Prediction of horizontal response spectra in Europe", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 25, pp 371-400.
- Boore D.M., Joyner, W.B. and Fumal, T.E. (1993). Estimation of response spectra and peak accelerations from Western North American earthquakes: An Interim report, U.S. Geological Survey, Open-File report 93-509, 72pp.
- Campbell, R.W. (1985). "Strong motion attenuation relations: A ten Year Perspective", *Earthq. Spectra*, 1, pp 759-804.
- Esteva, L. (1970). Seismic risk and seismic design. "Seismic Design for Nuclear Power

Plants, Hansen R.J. (:editor)", MIT Press, Boston, MA, pp 142-182.

Θεοδοουλίδης, Ν.Π. (1991). "Συμβολή στη μελέτη της ισχυρής σεισμικής κίνησης στον Ελληνικό χώρο". Διδ. Διατριβή, Παν. Θεσσαλονίκης, σελ. 454 και ένα παράρτημα.

Gregor, N. J. (1995). The attenuation of strong ground motion displacements, Earthquake Eng. Res. Cent., Univ. Cal. Berkeley, Rep No., UCB/EERC-95/02, 219pp.

Kawashima, K., Aizawa, K., Takahashi, K. (1986). "Attenuation of peak ground acceleration, velocity and displacement based on multiple regression analysis of Japanese strong motion data", Earthq. Eng. Struct. Dyn., 14, pp 199-215.

Loh, C-H., Yeh, Y.T. Jean, W.Y. and Yeh, Y.H. (1991). "Seismic hazard analysis in Taiwan area using bounded fault rupture model", Bull. Seism. Soc. Am., 81, pp. 265-272.

Makropoulos, K.C. (1978). "The statistics of large earthquake magnitude and an evaluation of Greek seismicity". Ph.D. thesis, Univ. Edinburgh, p. 193.

Milne, W.G. and Davenport, A.G. (1969). "Distribution of earthquake risk in Canada". Bull. Seism. Soc. Am., 59, pp 729-754.

Molas, G.L. and Yamazaki, F. (1995). "Attenuation of earthquake ground motion in Japan including deep focus events", Bull. Seism. Soc. Am., 85, pp. 1343-1358.

NEHRP (1994). "Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings", FEMA 222A/223A, May, 1, (Provisions) and 2 (Commentary).

Niazi, M. and Bozorgnia, Y. (1991). "Behaviour of near-source peak horizontal and vertical ground motions over SMART-1 array, Taiwan", Bull. Seism. Soc. Am., 81, pp. 715-732.

Ohsaki, Y., Watabe M. and Tohdo (1980). "Analyses on seismic ground motion parameters including vertical components", Proc. 7WCEE, 2, pp 97-104.

Παπαϊωάννου, Χρ.Α. (1984). "Απόσβεση των σεισμικών εντάσεων και σεισμική επικινδυνότητα στον ελληνικό χώρο", Διδ. Διατριβή, Παν. Θεσσαλονίκης, σελ. 200.

Papazachos, B. C., Comninakis, P. E., Karakaisis, G. F., Karacostas, B. G., Papaioannou, Ch. A., Papazachos, C. B. and Scordilis, E. M.

(2000). "A catalog of earthquakes in Greece and surrounding area for the period 550BC-1999". Publ. Geophys. Lab. University of Thessaloniki, 1, p. 338.

Παπαζάχος Β.Κ., Καρακώστας, Β.Κ., Κυρατζή, Α.Α., Μάργαρης, Β.Ν., Παπαζάχος, Κ.Β. και Σκορδύλης, Ε.Μ. (2001). "Η καταλληλότητα των κλιμάκων μεγέθους που χρησιμοποιούνται στον καθορισμό σχέσεων υπολογισμού των παραμέτρων της ισχυρής σεισμικής κίνησης στην Ελλάδα", 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, υπό δημοσίευση.

Papazachos C.B. and Papaioannou, Ch. (1997). "The macroseismic field of the Balkan area", J. Seismology, 1, pp 181-201.

Papazachos C.B. and Papaioannou, Ch. (1998). "Further information on the macroseismic field in the Balkan area (Reply on the comment of M. D. Trifunac on the paper "The macroseismic field of the Balkan area")", J. Seismology, 2, pp 363-375.

Rinaldis, D., Berardi, R., Theodulidis, N. and Margaris B. (1998). "Empirical predictive models based on a joint Italian & Greek strong motion database: I peak ground acceleration and velocity", Proc. 11 ECEE (cd-rom).

Sabetta, F. and Pugliese, A. (1996). "Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions", Bull. Seism. Soc. Am., 86, pp 337-352.

Si, H. and Midorikawa, S. (2000). "New attenuation relations for peak ground acceleration and velocity considering effects of fault type and site conditions", Proc. 10WCEE (cd-rom), Paper No 1964.

Σκαρλατούδης Α., Παπαζάχος, Κ. και Μάργαρης, Β. (2001). "Καθορισμός φασματικού θορύβου από διορθωμένες καταγραφές ισχυρής κίνησης του Ελληνικού χώρου", 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, υπό δημοσίευση.

Spudich, P., Joyner, W.B., Lindh, A.G., Boore, D.M., Margaris, B.N. and Fletcher, J.B (1999). SEA99: A revised ground motion prediction for use in extensional tectonic regimes, Bull. Seism. Soc. Am., 89, 1156-1170.

UBC (1997). "Uniform Building Code".

Φασματικοί Συντελεστές Ενίσχυσης: Αξιολόγηση και Αποτύπωση της μη γραμμικής Συμπεριφοράς του Εδάφους

Site Coefficients: Evaluation and Assignment of Soil Non-Linearities

ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ Α. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, ΙΤΣΑΚ
 ΚΛΗΜΗΣ Ν. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, ΙΤΣΑΚ
 ΜΑΡΓΑΡΗΣ Β. Δρ. Σεισμολόγος, ΙΤΣΑΚ
 ΛΕΚΙΔΗΣ Β. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, ΙΤΣΑΚ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται πρωταρχικά αποτελέσματα προσδιορισμού των συντελεστών ενίσχυσης(ή απομείωσης) της αναμενόμενης σεισμικής κίνησης για τις κατηγορίες εδαφών C και D κατά UBC/97 σε σχέση με την κατηγορία B η οποία θεωρείται ως σημείο αναφοράς. Ο προσδιορισμός των συντελεστών βασίζεται σε θεωρητικές αναλύσεις μονοδιάστατων πολύ καλά τεκμηριωμένων, εδαφικών τομών, με τη χρήση συνθετικών και πραγματικών σεισμικών διεγέρσεων αντιπροσωπευτικών του σεισμοτεκτονικού περιβάλλοντος του Ελλαδικού χώρου. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αντίστοιχες προτεινόμενες τιμές κανονιστικών διατάξεων και αποτυπώνουν τη μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους στις δράσεις σχεδιασμού.

ABSTRACT: This paper presents, preliminary results on evaluation of site coefficients of the expected seismic motion for soil categories C and D according UBC/97 with reference to the category B. The evaluation is based on 1D theoretical analyses, well-documented soil profiles, using synthetic and recorded acceleration time histories, with reference to the seismotectonic environment of Greece. The results are compared with proposed values of regulations and codes and assign the non-linear behavior of soil on seismic actions.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μέγεθος και το είδος των σεισμικών βλαβών των κατασκευών που έχουν κατά καιρούς καταγραφεί σε διάφορες περιοχές, αναδεικνύει τη μεγάλη επιρροή των διαφορετικών εδαφικών συνθηκών στην ένταση και στο φασματικό περιεχόμενο της εδαφικής κίνησης στην επιφάνεια. Μολονότι η συμβολή της τοπικής γεωλογίας είναι καθοριστική στη διαμόρφωση της σεισμικής δράσης, ωστόσο ο παράγοντας αυτός λαμβάνονται υπόψη στις κανονιστικές διατάξεις μόνο κατά ένα γενικό και ατελή τρόπο.

Στον ΕΑΚ 2000 για παράδειγμα, η επιρροή του υπεδάφους θεμελιώσης στον καθορισμό των σεισμικών διεγέρσεων λαμβάνεται κυρίως υπόψη δια μέσου των διαφορετικών κατηγοριών εδάφους και δια μέσου του συντελεστή φασματικής ενίσχυσης 'β'. Η κατάταξη των εδαφών όμως ακολουθεί κυρίως ποιοτικά κριτήρια ενώ οι μέγιστες τιμές του συντελεστή φασματικής ενίσχυσης εμφανίζονται ανεξάρτητες τόσο της κατηγορίας εδάφους όσο και της έντασης του αναμενόμενου σεισμικού κρα-

δασμού.

Νεότερες απόψεις, βασισμένες σε συμπεράσματα που έχουν προκύψει από την επεξεργασία πραγματικών καταγραφών και μεγάλου αριθμού αναλύσεων μετά τους πρόσφατους σεισμούς Loma Prieta (1989), Northridge (1994), Kobe (1995), έχουν επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις στις σχετικές κανονιστικές διατάξεις διεθνών κανονισμών (EC8, UBC/97). Οι διατάξεις αυτές αφενός οδηγούν σε ορθολογικότερο διαχωρισμό των εδαφών σύμφωνα με αυστηρά ποσοτικά κριτήρια (EC8, UBC/97) και αφετέρου αναγνωρίζουν ότι η φασματική ενίσχυση είναι μη γραμμική συνάρτηση της έντασης της σεισμικής κίνησης και των τοπικών εδαφικών συνθηκών (UBC/97). Ο πρώτος στόχος των διατάξεων, που αφορά τον ορθολογικότερο διαχωρισμό, επιτυγχάνεται λαμβάνοντας υπόψη τα εδαφοδυναμικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους (όπως την μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων Vs), ή παραμέτρους αντοχής (τιμές από δοκιμές κρουστικής διείδυσης N(S.P.T.) και χαρακτηριστικά της στρωματογραφίας. Ο δεύτερος

στόχος, που αφορά στην ενσωμάτωση της μη γραμμικότητας, επιτυγχάνεται με την υιοθέτηση δύο παραμέτρων ενίσχυσης (F_a , F_v) όπου ο σεισμικός κραδασμός του υποβάθρου ενισχύεται σε μικρές και μεγάλες περιόδους, αντίστοιχα, ανάλογα με την κατηγορία του εδάφους και την αναμενόμενη μέγιστη τιμή του σεισμικού κραδασμού του υποβάθρου.

Στην κατεύθυνση αυτή πρόσφατες ερευνητικές εργασίες με στόχο την αποτίμηση του ρόλου των εδαφικών συνθηκών στην ανομοιομορφία της κατανομής των βλαβών, κατά τους πρόσφατους καταστροφικούς σεισμούς του Ελληνικού χώρου (Γκαζέτας 1988, Pitilakis et.al.1992,1998, Bouckonas 1997, Athanasopoulos et.al. 1999) και στον υπολογισμό βελτιωμένων παραμέτρων της εδαφικής ενίσχυσης (Klimis et.al. 1999, Anastasiadis et.al. 1999), επιβεβαιώνουν τα συμπεράσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας και ενισχύουν την άποψη ότι οι σημαντικοί αυτοί παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη διαμόρφωση των σεισμικών δράσεων σχεδιασμού.

Η παρούσα εργασία αποτελεί μία αρχική προσπάθεια προσδιορισμού των συντελεστών ενίσχυσης για τις κατηγορίες εδαφών C και D κατά UBC/97 σε σχέση με την κατηγορία B, η οποία θεωρείται ως βασική συνθήκη αναφοράς ('μαλακός βράχος'). Ο προσδιορισμός των συντελεστών βασίζεται σε θεωρητικές αναλύσεις μονοδιάστατων πολύ καλά τεκμηριωμένων, εδαφικών τομών, με τη χρήση συνθετικών και πραγματικών σεισμικών διεγέρσεων αντιπροσωπευτικών του σεισμοτεκτονικού περιβάλλοντος του Ελλαδικού χώρου.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιελάμβανε τα παρακάτω στάδια:

- I. Προσδιορισμός/επιλογή αντιπροσωπευτικών σεισμικών διεγέρσεων σε συνθήκες 'μαλακού βράχου', (κατηγορία B/UBC-97) του σεισμοτεκτονικού περιβάλλοντος του Ελλαδικού χώρου.
- II. Επιλογή ενός αριθμού 1D εδαφικών προσομοιωμάτων που να ανήκουν στις κατηγορίες B και C κατά UBC/97.
- III. Υπολογισμός των χαρακτηριστικών απόκρισης με θεωρητικές μεθόδους για τις συγκεκριμένες σεισμικές διεγέρσεις
- IV. Υπολογισμός των λόγων των ελαστικών φασμάτων απόκρισης στην επιφάνεια με τα αντίστοιχα φάσματα των σεισμικών διεγέρσεων.

V. Στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων για τον υπολογισμό των συντελεστών ενίσχυσης σε διάφορες περιόδους συναρτήσει του πλάτους της σεισμικής διέγερσης.

3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

Στην παρούσα ερευνητική προσπάθεια χρησιμοποιήθηκαν δύο ομάδες σεισμικών διεγέρσεων. Η πρώτη περιελάμβανε σεισμικές διεγέρσεις που προσδιορίστηκαν με εφαρμογή του στοχαστικού προσομοιώματος της πεπερασμένης σημειακής πηγής όπως προτάθηκε (Boore, 1983) και προσαρμόστηκε στο σεισμοτεκτονικό περιβάλλον του Ελλαδικού χώρου (Margaris and Boore, 1998; Margaris, 2000; Margaris and Hatzidimitriou, 2001, Klimis et.al.,1999). Συνολικά προσδιορίστηκαν 25 συνθετικές ιστορίες επιταχύνσεων για μεγέθη σεισμών (5.5, 6.0, 6.5, 7.0 και 7.5), επικεντρικές αποστάσεις (10, 15, 20, 30 και 50 Km) και με κορυφαίες επιταχύνσεις από 0.07 έως 0.49g. Η δεύτερη ομάδα σεισμικών διεγέρσεων περιελάμβανε 4 καταγραφές του Ελληνικού χώρου (σε συνθήκες 'σκληρού εδάφους') και μία καταγραφή από το δίκτυο Gilroy σε συνθήκες κοντινού πεδίου με κορυφαίες επιταχύνσεις από 0.07g έως 0.42g. Στα σχήματα 1 έως 4 δίδονται μία από τις πέντε σειρές των συνθετικών σεισμικών διεγέρσεων (για επικεντρική απόσταση $R=15\text{Km}$), οι πραγματικές καταγραφές (Σχ.3) και τα αντίστοιχα ελαστικά φάσματα απόκρισης (Σχήματα 2 και 4).

Η επιλογή των εδαφικών τομών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τα παρακάτω κριτήρια: α) να ανήκουν σε μία συγκεκριμένη κατηγορία εδάφους (C ή D) κατά UBC/97, β) να υπάρχουν δεδομένα των δυναμικών ιδιοτήτων των εδαφικών σχηματισμών καθώς και το βάθος του βραχώδους υποβάθρου και τέλος γ) να πληρούν στο μέγιστο βαθμό τις απαραίτητες παραδοχές για την ανάλυση με μονοδιάστατα αναλυτικά προσομοιώματα (επίπεδη τοπογραφία, κλίση υποβάθρου, γεωλογικές ασυνέχειες, κλπ.). Συνολικά, επιλέχθηκαν 10 εδαφικές τομές, πέντε που ανήκουν στην κατηγορία C και πέντε στην D κατά UBC/97. Στα σχήματα 5 και 6 δίδονται τα εδαφικά προσομοιώματα, οι τιμές του V_{s30} καθώς και η κατάταξή τους σύμφωνα με τον ΕΑΚ2000.

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

¹Φασματικοί Συντελεστές Ενίσχυσης Αξιολόγηση και Αποτύπωση της μη-γραμμικής Συμπεριφοράς του Εδάφους.

Α.Αναστασιάδης, Ν.Κλήμης, Β.Μάργανης, Β.Λεκίδης

Οι αναλύσεις των δέκα εδαφικών τομών πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση 'ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης' στο πεδίο των συχνοτήτων (Schubel et al., 1972), τα αποτελέσματα της οποίας θεωρούνται ακριβή και έχουν χρησιμοποιηθεί για γενικευμένες αναλύσεις έως 3sec και την εκτίμηση της κορυφαίας επιτάχυνσης στην επιφάνεια (Finn, 1995; Martin & Dobry, 1994; Durward et al., 1996; Dobry et al., 2000; Dickenson and Seed, 1996). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 300 επιλύσεις (250 με τις συνθετικές διεγέρσεις και 50 με τις διεγέρσεις πραγματικών καταγραφών).

Στα σχήματα 7 και 8 εξετάζεται για κάθε κατηγορία εδαφών, η επιρροή της κορυφαίας επιτάχυνσης στο 'βραχύδες υπόβαθρο' στην τιμή της 'αναμενόμενης' επιτάχυνσης στην επιφάνεια όπως υπολογίστηκαν από τις αναλύσεις. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αντίστοιχα της διεθνούς βιβλιογραφίας και ενόργανες καταγραφές του σεισμού του 1989 στο Mexico City, 1989-Loma Prieta καθώς και ενός μικρού αριθμού από την Ελλαδικό χώρο. Οι εδαφικές τομές της κατηγορίας D παρουσιάζουν όπως ήταν αναμενόμενο έντονη μη-γραμμική συμπεριφορά για πλάτη διέγερσης μεγαλύτερα από 0.20-0.25g (σχήματα 11 και 12) σε αντίθεση με τις εδαφικές τομές κατηγορίας C όπου παρουσιάζουν ενίσχυση της αναμενόμενης κίνησης σε σύγκριση με την επιτάχυνση με συνθήκες 'μαλακού βράχου'.

Οι φασματικές τιμές επιτάχυνσης που υπολογίστηκαν τόσο με τις συνθετικές διεγέρσεις όσο και με τις διεγέρσεις πραγματικών καταγραφών (Σχήματα 9 και 10) καλύπτουν το εύρος των φασματικών τιμών επιτάχυνσης από ενόργανες καταγραφές του δικτύου του ΙΤΣΑΚ σε δύο από τις θέσεις που εξετάστηκαν (Αντιπροσωπευτικές θέσεις: Αλμυρός-κατ. C και Πύργος-κατ. D), γεγονός που αποδεικνύει ότι το δείγμα των σεισμικών διεγέρσεων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι ικανοποιητικό. Οι τιμές των συντελεστών ενίσχυσης υπολογίστηκαν σε διάφορες τιμές περιόδων διαιρώντας τα ελαστικά φάσματα απόκρισης στην επιφάνεια με τα αντίστοιχα των σεισμικών διεγέρσεων (Σχήματα 13.α.β.) και μετά από στατιστική επεξεργασία γραμμικής παλινδρόμησης υπολογίστηκε για κάθε κατηγορία η μεταβολή του συντελεστή ενίσχυσης σε συνάρτηση με την περίοδο και την κορυφαία επιτάχυνση σε συνθήκες 'μαλακού βράχου'. Η σχέση (1) περιγράφει τον συντελεστή ενίσχυσης και στον πίνακα 1 δίδονται οι τιμές των συντελεστών.

$$\ln[F_B(T)] = a_B(T) PA_B + b_B(T) + \varepsilon \quad (1)$$

Όπου $a_B(T)$ και $b_B(T)$ είναι οι συντελεστές συσχέτισης, ε είναι το μέσο τυπικό σφάλμα κανονικής κατανομής και PA_B η κορυφαία επιτάχυνση σε συνθήκες B/UBC/97 ('μαλακού βράχου').

Πίνακας 1. Συντελεστές σχέσης 1.

Table 1. Parameters of equation 1.

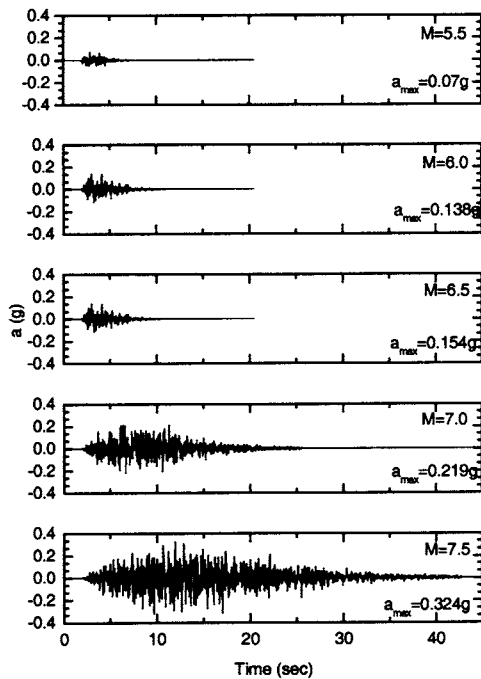
T (sec)	SC/SB			SD/SB		
	a_B	b_B	σ_ε	a_B	b_B	σ_ε
PGA	-0,965	0,638	0,274	-2,188	0,543	0,335
0,03	-1,015	0,616	0,280	-2,217	0,500	0,338
0,07	-1,879	0,578	0,358	-3,393	0,271	0,367
0,1	-1,539	0,485	0,316	-3,613	0,319	0,417
0,2	-1,512	0,819	0,383	-3,774	0,711	0,446
0,3	-0,288	0,666	0,276	-3,016	0,789	0,437
0,4	0,548	0,425	0,217	-2,402	0,839	0,404
0,5	0,500	0,345	0,157	-2,003	0,883	0,347
0,6	0,443	0,310	0,179	-1,364	0,851	0,317
0,7	0,343	0,305	0,210	-0,744	0,791	0,303
0,8	0,335	0,285	0,243	-0,076	0,660	0,264
0,9	0,318	0,273	0,251	0,323	0,584	0,257
1,0	0,267	0,237	0,247	0,869	0,471	0,245
1,2	0,242	0,206	0,218	1,102	0,378	0,232
1,5	0,170	0,172	0,167	1,046	0,299	0,216
2,0	0,202	0,147	0,158	0,892	0,293	0,200
2,5	0,109	0,193	0,175	0,529	0,376	0,218
3,0	-0,157	0,247	0,175	0,041	0,447	0,240

Στα σχήματα 14 και 15 δίδονται οι συντελεστές ενίσχυσης όπως υπολογίστηκαν από την σχέση 1 και τις τιμές του πίνακα 1 σε διάφορα πλάτη διέγερσης σε συνθήκες 'μαλακού βράχου'. Στο ίδιο σχήμα δίδονται οι συντελεστές F_a και F_v που προτείνονται από τον UBC/97 για μικρές και μεγάλες περιόδους, αντίστοιχα.

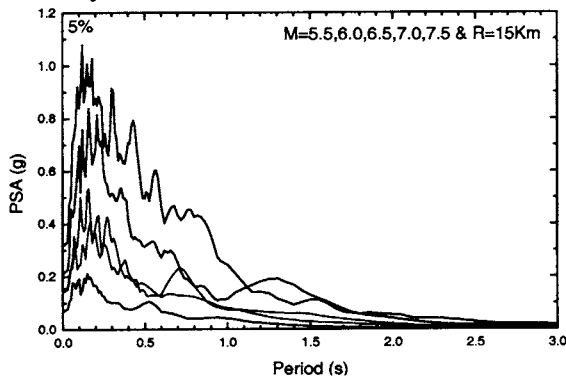
Οι συντελεστές ενίσχυσης όπως υπολογίστηκαν στα εδαφικά προσομοιώματα κατηγορίας C παρουσιάζουν μέγιστες τιμές που κυμαίνονται από 1.8 έως 2.0 για περιόδους 0.2 έως 0.4 sec και διαφέρουν από τις προτεινόμενες τιμές του UBC/97 όπου οι μέγιστες τιμές παρουσιάζονται σε μεγαλύτερες περιόδους. Οι συντελεστές ενίσχυσης στα εδαφικά προσομοιώματα της κατηγορίας D κατά UBC/97 παρουσιάζουν μέγιστες τιμές από 1.9 έως 2.3 σε περιόδους 0.45 έως 1.2 και βρίσκονται σε συμφωνία με τις προτεινόμενες τιμές του συντελεστή F_a κατά UBC/97 στην περιοχή των μικρών περιόδων. Οι διαφορές αυτές οφείλονται κυρίως στο φασματικό περιεχόμενο των σεισμικών διεγέρσεων που είναι πλούσιο στις υψηλές συχνότητες σε συνδυασμό με τα δυναμικά χαρακτηριστικά των εδαφικών τομών που εξετάστηκαν.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται πρωταρχικά αποτελέσματα προσδιορισμού των συντελεστών ενίσχυσης(ή απομείωσης) της αναμενόμενης σεισμικής κίνησης για τις κατηγορίες εδαφών C και D κατά UBC/97 σε σχέση με την κατηγορία B η οποία θεωρείται ως σημείο αναφοράς. Ο προσδιορισμός των συντελεστών βασίστηκε σε θεωρητικές αναλύσεις μονοδιάστατων πολύ καλά τεκμηριωμένων, εδαφικών τομών, με τη χρήση συνθετικών και πραγματικών σεισμικών διεγέρσεων αντιπροσωπευτικών του σεισμοτεκτονικού περιβάλλοντος του Ελλαδικού χώρου. Για τις δύο κατηγορίες που εξετάστηκαν υπολογίστηκαν συντελεστές ενίσχυσης του σει-



Σχήμα 1. Αντιπροσωπευτικά συνθετικές σεισμικές διεγέρσεις ($R=15\text{Km}$ και $M=5.5-7.5$) που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.
Figure 1. Typical series of synthetic acceleration time histories ($R=15\text{Km}$ and $M=5.5-7.5$), used in the analysis.

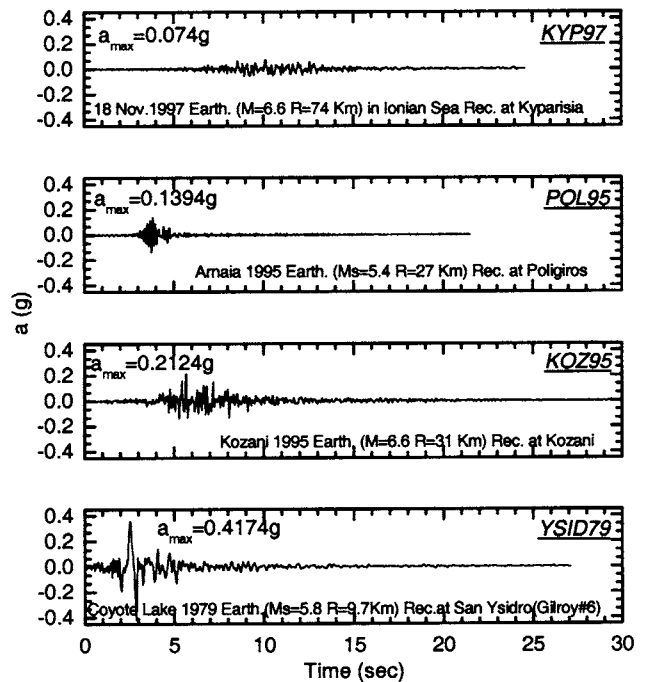


Σχήμα 2. Ελαστικά φάσματα επιτάχυνσης σειρών συνθετικών διεγέρσεων.
Figure 2. Elastic response spectra of a typical series synthetic's excitations.

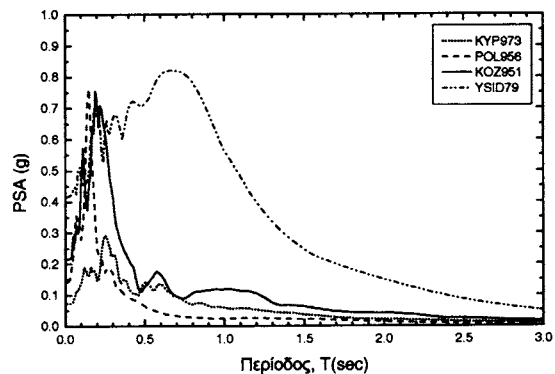
σμικού κραδασμού στην επιφάνεια σύμφωνα με διαδικασία κατηγοριοποίησης κατά UBC/97, λαμβάνοντας υπόψη την ένταση της σεισμικής κίνησης και τη μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους.

6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

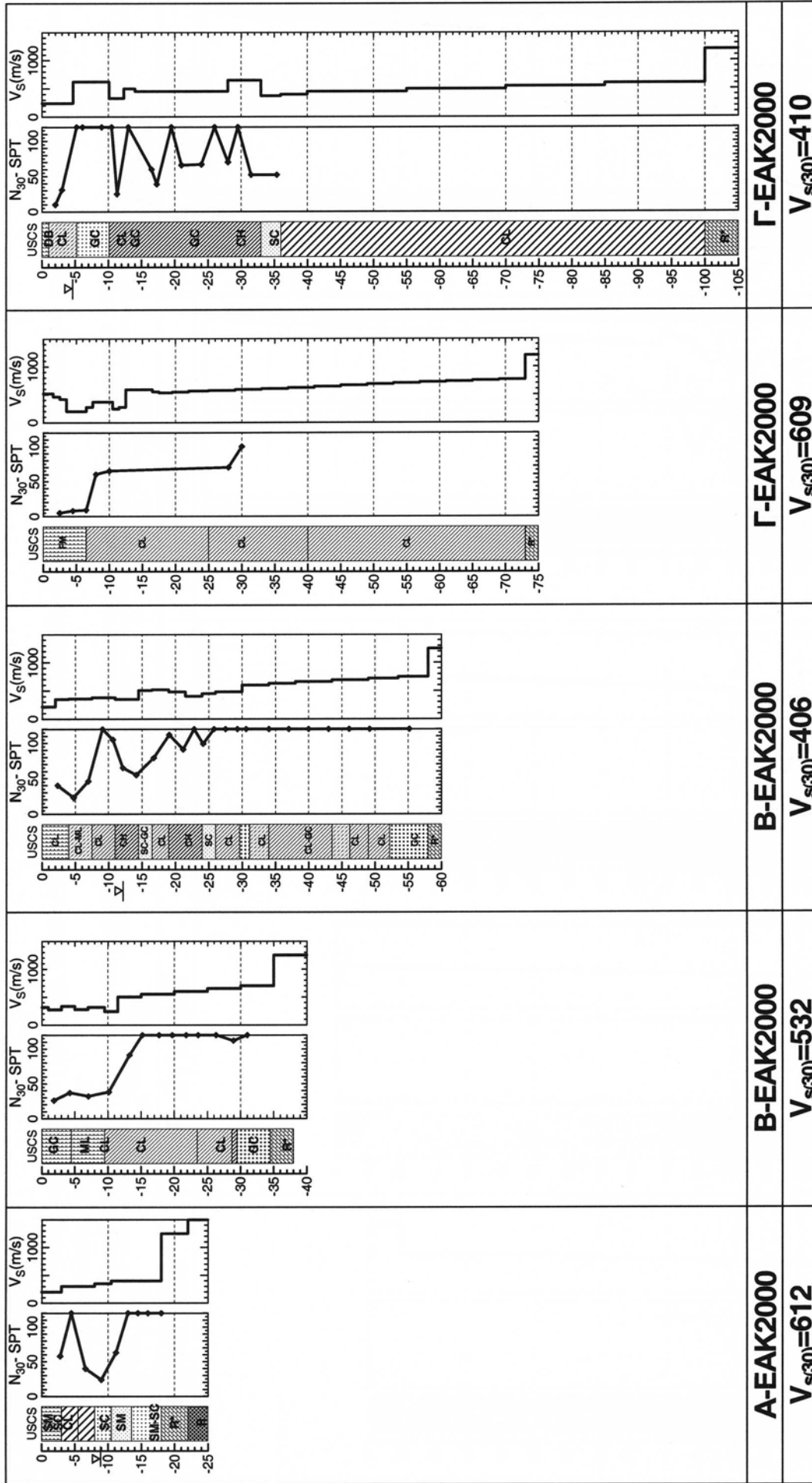
Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος για την εκπόνηση Νέου Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας συμβατού με τον ισχύοντα ΕΑΚ και EC8, που χρηματοδοτείται από τον ΟΑΣΠ.



Σχήμα 3. Καταγραφές επιταχύνσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.
Figure 3. Acceleration time histories used in the analysis.

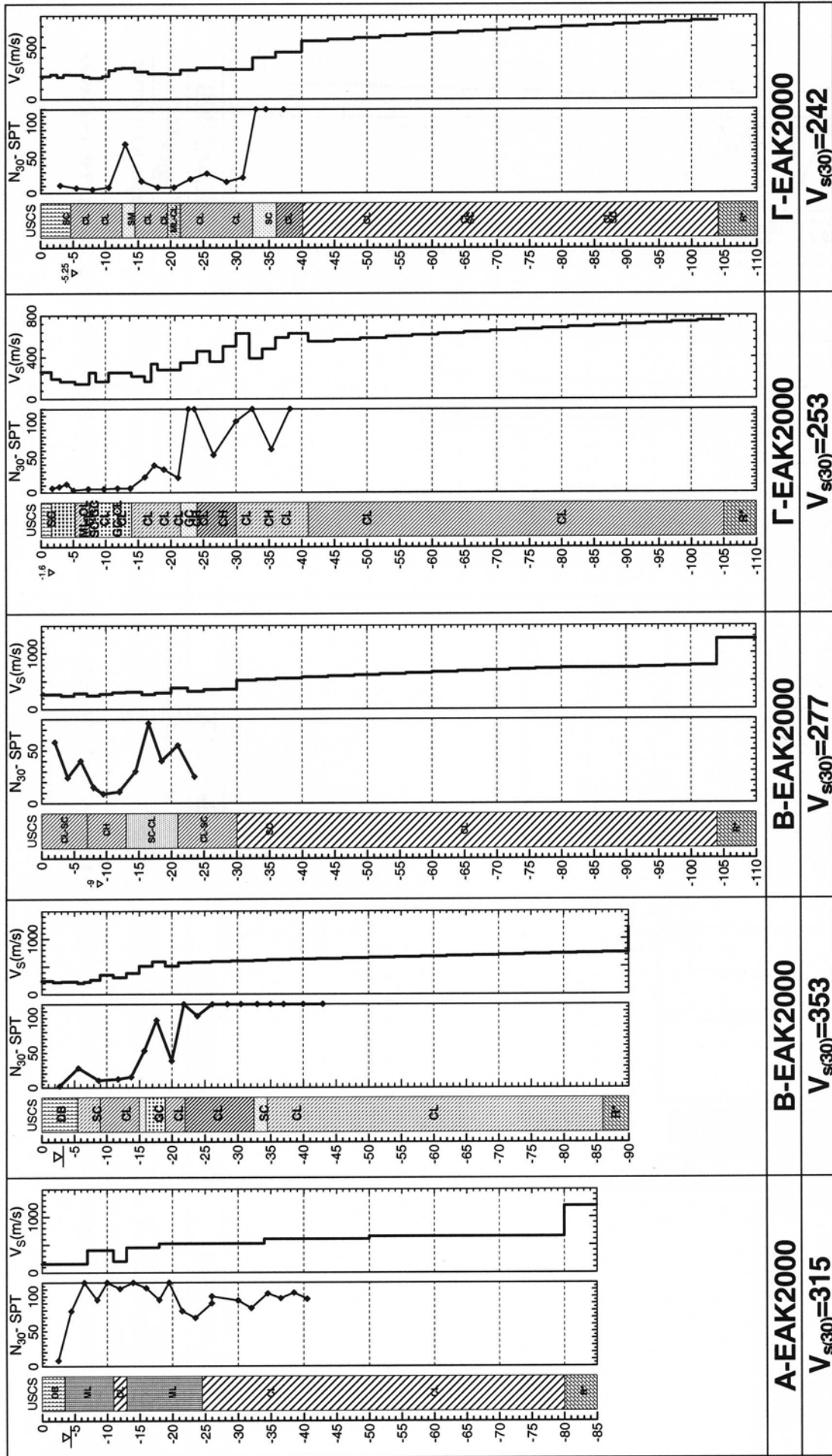


Σχήμα 4. Ελαστικά φάσματα απόκρισης πραγματικών καταγραφών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.
Figure 4. Elastic response spectra of seismic motions used in the analysis.



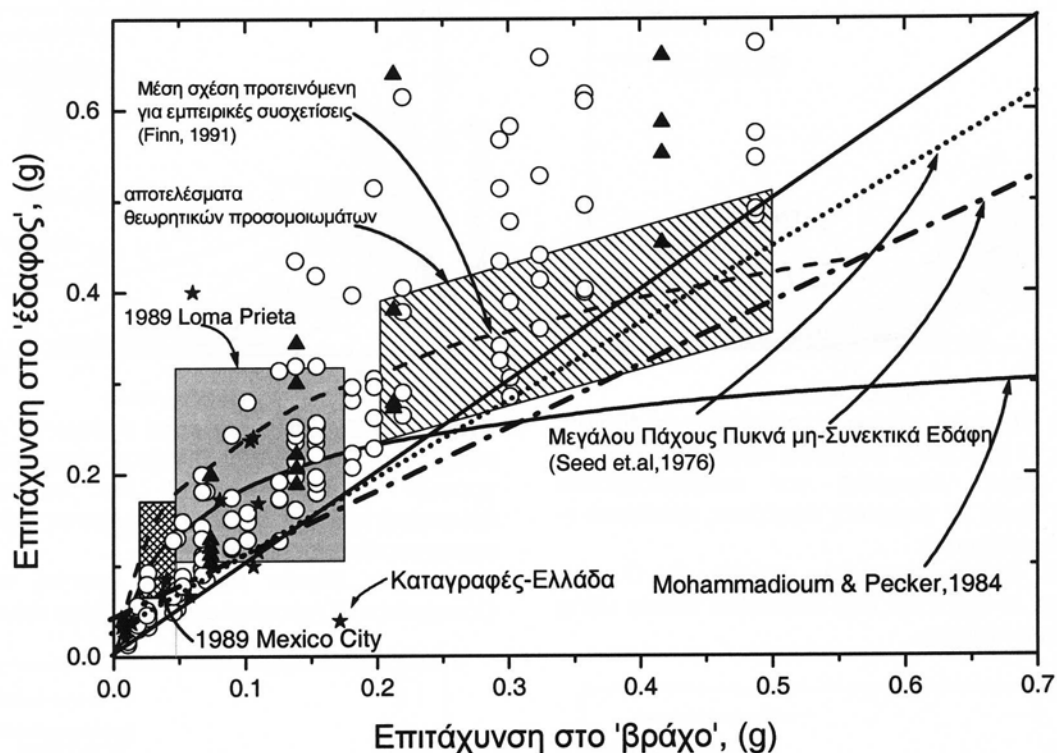
Σχήμα 5. Εδαφодυναμικές τομές σχεδιασμού κατηγορίας C κατά UBC/97 που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση (σε κάθε τομή αναγράφονται η κατάταξη κατά EAK2000 καθώς και η τιμή του V_{s30}).

Figure 5. Soil column models of category C/UBC-97 used in the analysis, (Below each soil-model the category according EAK2000 and the V_{s30} value are given).



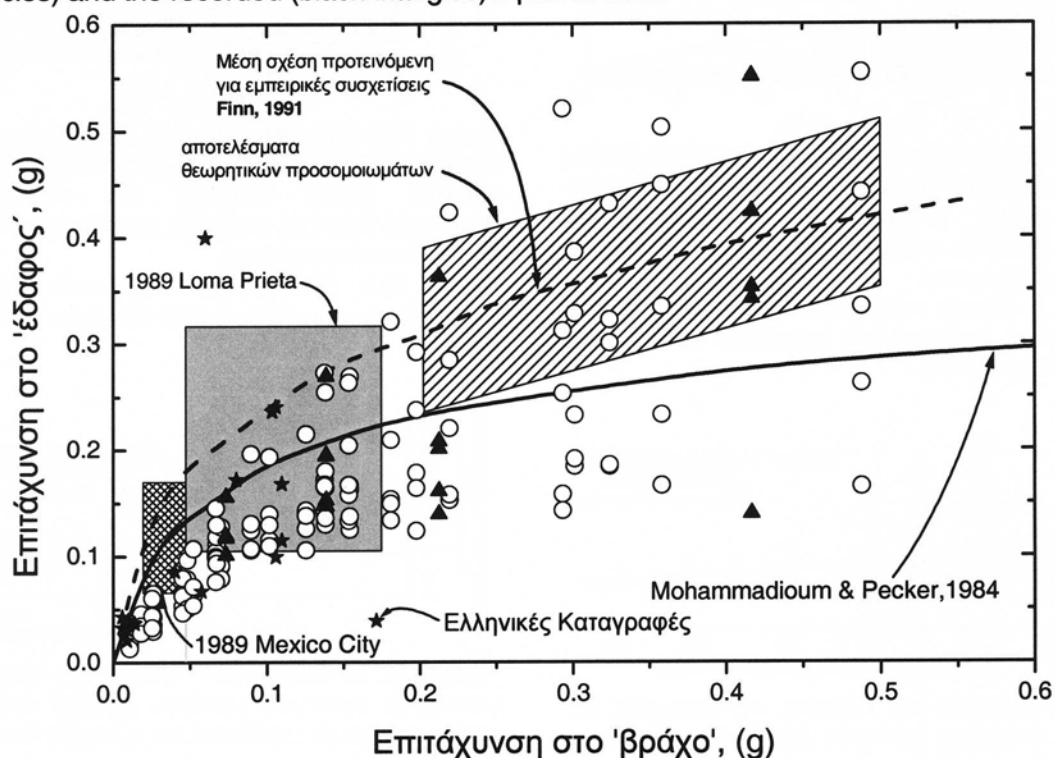
Σχήμα 6. Εδαφοδυναμικές τομές σχεδιασμού κατηγορίας D κατά UBC/97 που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση (σε κάθε τομή αναγράφονται η κατάταξη κατά EAK2000 καθώς και η τιμή του V_{s30}).

Figure 6. Soil column models of category D/UBC-97 used in the analysis, (Below each soil-model the category according EAK2000 and the V_{s30} value are given).



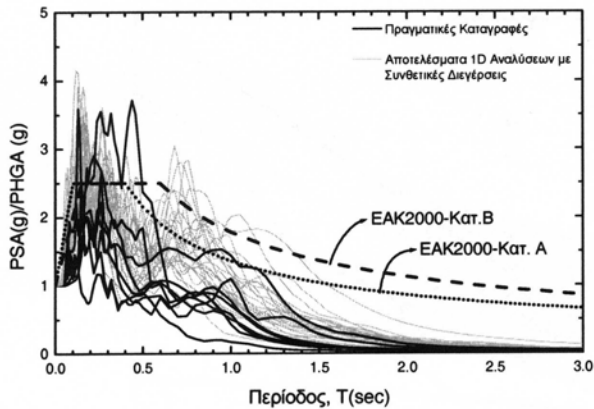
Σχήμα 7. Εδαφικά Προσομοιώματα C (UBC97): Μεταβολή της μέγιστης επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους με τις συνθετικές σεισμικές διεγέρσεις (ανοικτοί κύκλοι) και με διεγέρσεις πραγματικών καταγραφών (μαύρα τρίγωνα).

Figure 7. Soil models C (UBC/97): Variation of maximum acceleration at free surface with the synthetic (open circles) and the recorded (black triangles) input motions.



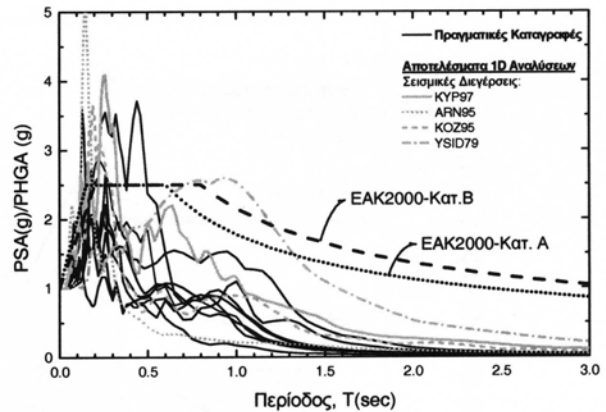
Σχήμα 8. Εδαφικά Προσομοιώματα D (UBC97): Μεταβολή της μέγιστης επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους με τις συνθετικές σεισμικές διεγέρσεις (ανοικτοί κύκλοι) και με διεγέρσεις πραγματικών καταγραφών (μαύρα τρίγωνα).

Figure 8. Soil models D (UBC/97): Variation of maximum acceleration at free surface with the synthetic (open circles) and the recorded (black triangles) input motions.



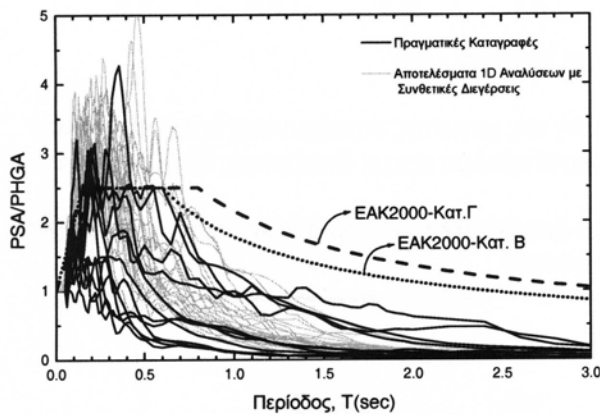
Σχήμα 9.α Ελαστικά φάσματα απόκρισης σε έδαφος κατηγορίας C (UBC/97): Σύγκριση πραγματικών καταγραφών (θέση: Αλμυρός) και υπολογιζόμενων θεωρητικά τιμών με σεισμικές διεγέρσεις συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα.

Figure 9.a Elastic response spectra at C site: Comparison of recorded and calculated values using synthetic time histories.



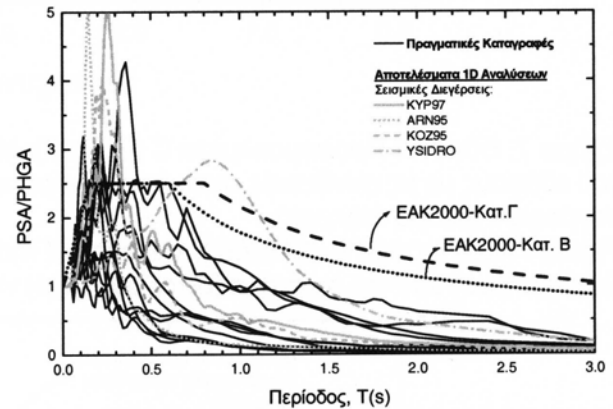
Σχήμα 9.β Ελαστικά φάσματα απόκρισης σε έδαφος κατηγορίας C (UBC/97): Σύγκριση πραγματικών καταγραφών (θέση: Αλμυρός) και υπολογιζόμενων θεωρητικά τιμών με σεισμικές διεγέρσεις πραγματικών επιταχυνσιογραφημάτων

Figure 9.b Elastic response spectra at C site: Comparison of recorded and calculated values.



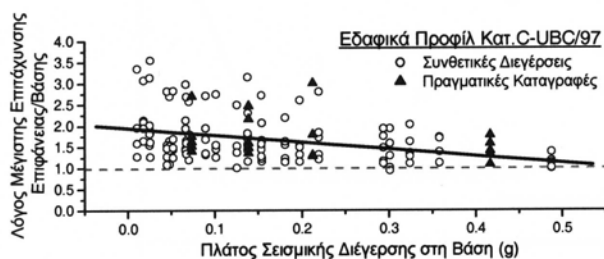
Σχήμα 10.α Ελαστικά φάσματα απόκρισης σε έδαφος κατηγορίας D (UBC/97): Σύγκριση πραγματικών καταγραφών (θέση: Πύργος) και υπολογιζόμενων θεωρητικά τιμών με σεισμικές διεγέρσεις συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα.

Figure 10.a Elastic response spectra at C site: Comparison of recorded and calculated values using synthetic time histories.



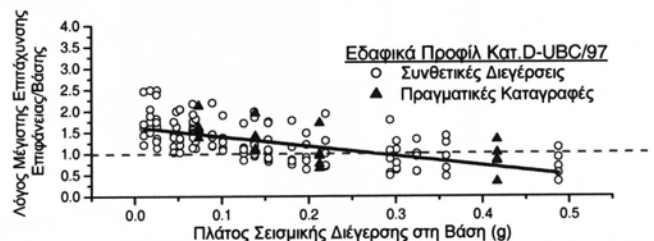
Σχήμα 10.β Ελαστικά φάσματα απόκρισης σε έδαφος κατηγορίας D (UBC/97): Σύγκριση πραγματικών καταγραφών (θέση: Πύργος) και υπολογιζόμενων θεωρητικά τιμών με σεισμικές διεγέρσεις πραγματικών επιταχυνσιογραφημάτων.

Figure 10.b Elastic response spectra at C site: Comparison of recorded and calculated values using synthetic time histories.



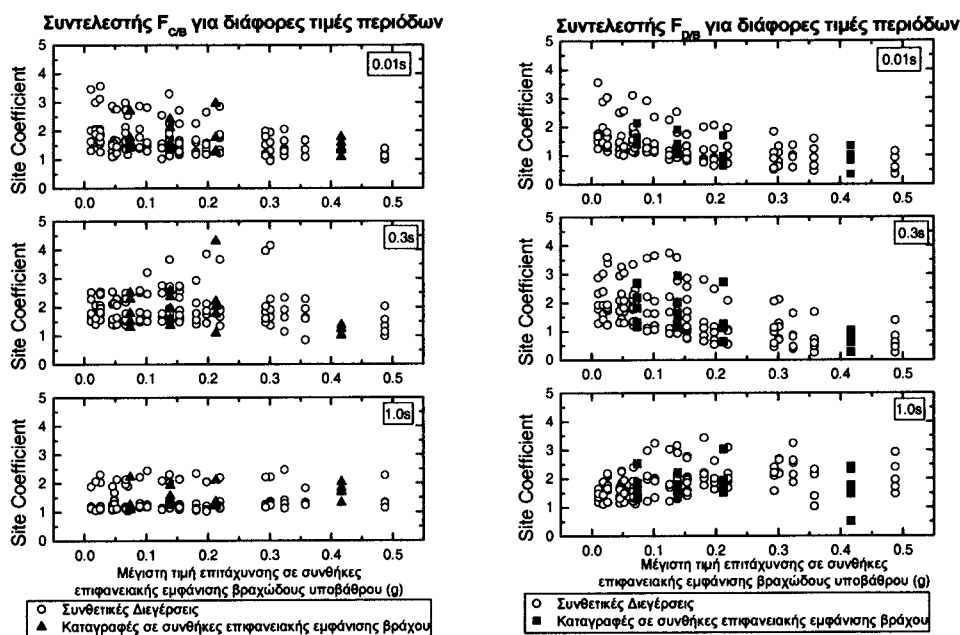
Σχήμα 11. Επιρροή του πλάτους της σεισμικής διεγέρσης σε συνθήκες 'μαλακού βράχου' στην μέγιστη επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους κατηγορίας C κατά UBC/97.

Figure 11. Effect of seismic excitation at 'soft rock sites' on the maximum acceleration at free surface of C category site, according UBC/97.

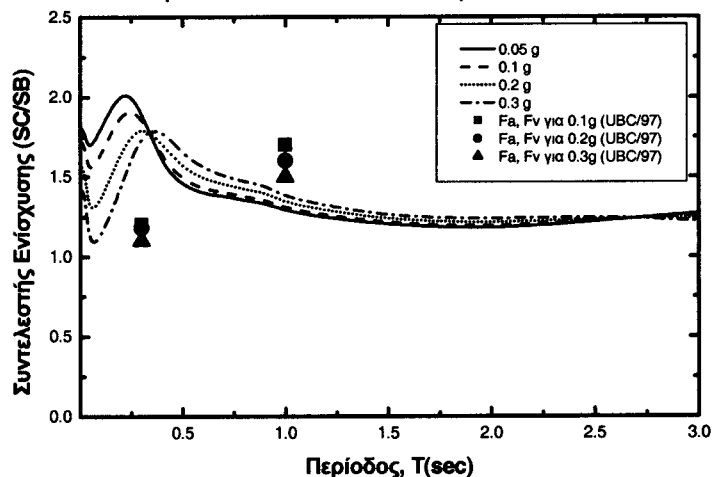


Σχήμα 12. Επιρροή του πλάτους της σεισμικής διεγέρσης σε συνθήκες 'μαλακού βράχου' στην μέγιστη επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους κατηγορίας D κατά UBC/97.

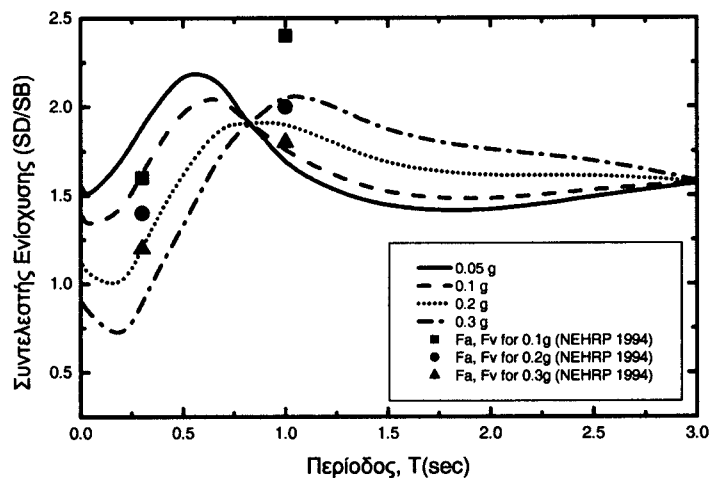
Figure 12. Effect of seismic excitation at 'soft rock sites' on the maximum acceleration at free surface of D category site, according UBC/97.



Σχήμα 13 α,β. Συντελεστές ενίσχυσης για διάφορες τιμές περιόδων και πλάτος διέγερσης για κατηγορίες C και D.
Figure 13 a,b.: Site coefficients at various periods and excitation amplitude for C and D soil categories.



Σχήμα 14. Μέσοι συντελεστές ενίσχυσης για εδάφη κατηγορίας C κατά UBC/97 για διάφορες τιμές της μέγιστης επιτάχυνσης σε συνθήκες 'μαλακού βράχου'.
Figure 14. Mean site coefficient for soil sites C according UBC/97 for various values of maximum acceleration at 'soft-rock' site.



Σχήμα 15. Μέσοι συντελεστές ενίσχυσης για εδάφη κατηγορίας D κατά UBC/97 για διάφορες τιμές της μέγιστης επιτάχυνσης σε συνθήκες 'μαλακού βράχου' και σύγκριση με αντίστοιχες προτεινόμενες τιμές από τον UBC/97
Figure 15. Mean site coefficient for soil sites D according UBC/97 for various values of maximum acceleration at 'soft-rock' site.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anastasiadis, A.J., and Pitilakis, K.D. (1997), Variation of shear modulus G and damping of typical Greek soils with strain amplitude, *Technika Chronika, Sc. J. of Tech.*
- Anastasiadis A., Klimis N. and Margaris B. (1999). "Effect of Soil Non Linearities on Evaluation of Site Dependent Spectra: A Case Study from Greece", *9th Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engin.*, Bergen, August 9-12, Abst. Volume, p.64.
- Athanasopoulos G.A., Pelekis P.C. and Leonidou E.A. (1998). "Effects of Surface topography on seismic ground response in Egion (Greece)", *Soil & Dynamics*, 18, 135-150.
- Boore, D. M. (1983), Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of radiation spectra. *Bull.Seis.Soc.Am.*, 73,1865-94.
- Bouckovalas G. (1997). "Prediction of Soil Effects on Seismic Motions: A Comparative Case Study", *Earthquake Spectra*,13, 333-362.
- Γκαζέτας Γ. (1996). Εδαφομηχανική και Σεισμική Μηχανική – Ιστορικά Περιστατικά , Καλαμάτα 1986, Northridge 1994, Αίγιο 1995, Kobe 1995, Εκδόσεις Συμείων.
- Dickenson S.E., and R.B. Seed (1996) Nonlinear Dynamic Response of Soft and Deep Cohesive Soil Deposits, *Int.Workshop on Site Response*, Yokosuka Japan, 67-81.
- DobryR., Borchert R.D., Crouse C.B., Idriss I.M., Joyner W.N., Martin G.R., Power M.S., Rinne E.E. and Seed R.B. (2000). New Site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions. *Earthquake Spectra*, 16(1), 41-67.
- Durward J.A., Boore D.M., and W.B.Joyner (1996), The Amplitude Dependence of High-Frequency Spectral Decay: Constraint on Soil Non-Linearity, *Int.Workshop on Site Response*, Yokosuka Japan, 82-103.
- EAK(2000), Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός.
- EC8 (2000), Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures, Part 1-1: General Rules-Seismic Actions and General Requirements for Structures (draft), peen 1998-5, Eur. Committee for Standardization, Brussels.
- Finn W.D., lai S., and Y.Matsunaga (1995). The effects of site conditions on ground motions. 10 ECEE,2607-2612.
- Klimis N.S., Margaris B.N. and Koliopoulos, P.K. (1999). "Site dependent amplification functions and response spectra in Greece ", *J. of Earthquake Engineering*, 3, 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 Int. Conf. on Seismic Zon.*, Palm Springs Ca. Nov. 12-15, 2000.
- Margaris B.N., and D.M. Boore (1998), Determination of $\Delta\sigma$ and κ_0 from response spectra of large earthquakes in Greece," *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88,1 170-182.
- Margaris, B.N. and P.M. Hatzidimitriou. (2001), Source spectral scaling and stress release estimates using strong-motion records in Greece", *Accepted for Publ. In Bull. Seism. Soc. Am.*
- Martin, G.R. and Dobry, R. (1994). Earthquake site response and seismic code provisions, *NCEER Bull.*, 8(4), 1-6.
- Mohammadioum, B. and pecker,A. (1984), Low-Frequency transfer of energy by superficial soil deposits and soft rocks', *Earth. Engrg. Struct. Dyn.*, 12, 537-564
- Pitilakis K.D., Margaris V., Lekidis V., Theodulidis N. and Anastasiadis A. (1992). "The Griva, northern Greece earthquake of December 21, 1990", *European Earthquake Engineering, Int. J. of Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, Vol.VI, 20-35.
- Pitilakis, K., Anastasiadis, A., and Raptakis D. (1992). Field and Laboratory Determination of Dynamic Properties of Natural Soil Deposits, *Proc. of the 10th WCEE*, Madrid, 5, 1275-1280.
- Pitilakis, K., and Anastasiadis, A. (1998), Soil and site characterization for seismic response analysis, XI ECEE, Paris, Inv.Lectures, 65-90
- Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.(1972)'SHAKE-A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites', *Rep.NoEERV-72/12*, Berkeley.
- Seed H.,B., Ugas, C. nad Lysmer, J. (1976), Site-dendent spectra for earthquake resistant design, *Bull.Seism.Soc.Am.*, 66(1), 221-243.
- Uniform Building Code (1997), *Structural Engineering Design Provisions*, *Int.Conf.of building officials*, California.

Πιθανολογική Εκτίμηση Φασμάτων Απόκρισης Στον Ελληνικό Χώρο

Probabilistic Assessment of Response Spectra in Greece.

ΜΑΡΓΑΡΗΣ, Β.Ν. Δρ. Σεισμολόγος, Ι.Τ.Σ.Α.Κ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης οι οποίες περιγράφουν την εξάρτηση των παραμέτρων της ισχυρής εδαφικής κίνησης με το μέγεθος του σεισμού τη απόσταση και τις τοπικές εδαφικές συνθήκες έχουν μεγάλη σημασία στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας και τον αντισεισμικό σχεδιασμό. Η έλλειψη όμως επαρκών καταγραφών ισχυρής κίνησης επιβάλλει τον καθορισμό εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης με ενδιάμεσες μεθόδους. Για τον σκοπό αυτό θεωρητικές προβλέψεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν αφού επαληθευτούν με τα υπάρχοντα δεδομένα. Ένα αξιόπιστο θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης υψίσυχνων εδαφικών κινήσεων είναι το στοχαστικό το οποίο συνδυάζει σεισμολογικά μοντέλα με την θεωρία των τυχαίων δονήσεων.

ABSTRACT: Empirical predictive relations which describe the dependence of the strong-motion parameters in terms of magnitude, distance and site conditions have a paramount significance in seismic hazard assessment and earthquake engineering. Lack of adequate strong-motion data necessitates determination of empirical predictions by indirect methods. For this reason, theoretical predictions, verified against existing data, can be also used. A promising theoretical model for predicting high frequency ground motions is the stochastic, combining seismological models of radiation and propagation of energy with the theory of random vibration.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες στον Ελληνικό χώρο με την ανάπτυξη των δικτύων επιταχυνσιογράφων έχει παρατηρηθεί μία εντυπωσιακή αύξηση των καταγραφών ισχυρής κίνησης. Έχει καταγραφεί σημαντικός αριθμός αξιόπιστων καταγραφών ισχυρής κίνησης σεισμών μεγέθους $M \leq 6.5$ και αποστάσεων $10 \leq R \leq 120$ km. Οι καταγραφές αυτές βελτιώνουν την ικανότητα του καθορισμού μέσων τιμών των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης των διάφορων παραμέτρων ισχυρής κίνησης (μέγιστη τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, PGA, και των φασμάτων απόκρισης, PSV). Για μεγάλους σεισμούς με μεγέθη $M > 6.5$ και αποστάσεις $R < 10$ km οι εδαφικές κινήσεις μπορούν να προβλεφθούν με επισφαλή χρήση των υπάρχουσών εμπειρικών σχέσεων. Η έλλειψη δεδομένων στις κρίσιμες περιοχές των

μεγεθών $M > 6.5$ και των αποστάσεων $R < 10$ km μπορεί να αντιμετωπισθεί με προβλέψεις της εδαφικής κίνησης που στηρίζονται σε θεωρητικά μοντέλα.

Θεωρητικές προβλέψεις της εδαφικής κίνησης οι οποίες έχουν επαληθευτεί με παρατηρημένα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια για την πρόβλεψη της εδαφικής κίνησης και σε κρίσιμες περιοχές μεγεθών και αποστάσεων. Αποτελούν ένα ρεαλιστικό τρόπο προσέγγισης της εκτίμησης της ισχυρής εδαφικής κίνησης όταν παρατηρείται έλλειψη καταγραφών. Ένα θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης υψίσυχνων εδαφικών κινήσεων είναι το στοχαστικό το οποίο συνδυάζει το ενδιαφέρον των μηχανικών για τον καθορισμό της εδαφικής επιτάχυνσης με τυχαίες κινήσεις μαζί με σεισμολογικά μοντέλα διάδοσης και ακτινοβολίας της ενέργειας από τη σεισμική πηγή.

Το στοχαστικό μοντέλο πρόβλεψης βασίζεται στη εργασία των Hanks and McGuire (1981) οι οποίοι έδειξαν ότι η παρατηρημένη PGA στις Δυτικές ΗΠΑ μπορεί να προβλεφθεί με επιτυχία από ένα στοχαστικό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει την εδαφική κίνηση ως ένα ευροπερατό πεπερασμένης διάρκειας φάσμα λευκού θορύβου κατανομής Gauss και ενός φάσματος πλατών καθορισμένου από απλά σεισμολογικά μοντέλα σεισμικών πηγών. Χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία σε διάφορες εφαρμογές τόσο στις ΗΠΑ (Boore, 1983; Boore and Joyner, 1991; 1997; Atkinson and Boore, 1995; 1998, μεταξύ άλλων), όσο και σε άλλες περιοχές. Ειδικά στις Ανατολικές ΗΠΑ το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την δημιουργία εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης λόγω έλλειψης καταγραφών ισχυρής κίνησης (Boore and Atkinson, 1987; Atkinson and Boore, 1995; 1998). Πολυ πρόσφατα η χρησιμότητα και η εφαρμοσιμότητα του μοντέλου σε διάφορες περιοχές του κόσμου παρουσιάστηκε από τον Boore (2001).

Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει εφαρμοσθεί προκειμένου να προσομοιωθούν σημειακές σεισμικές πηγές και έχει δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα κυρίως για μέσες τιμές πρόβλεψης. Περαιτέρω χρήση το ίδιου μοντέλου και προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για κοντινού πεδίου προσομοιώσεις όπου ο παράγοντας της ακτινοβολίας και της κατευθυντικότητας της σεισμικής ενέργειας παίζει τον κύριο ρόλο, το μοντέλο επεκτάθηκε και σε πεπερασμένες σεισμικές πηγές (Beresnev and Atkinson, 1997; 1998; 1999).

Στον Ελληνικό χώρο το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τους Stavrakakis and Drakopoulos (1990) με σκοπό να προσομοιωθούν τιμές PGA's με βάση καταγραφές ισχυρής κίνησης του Ελληνικού χώρου. Με σκοπό τη μελέτη της σεισμικής επικινδυνότητας και προκειμένου να εκτιμηθούν κινήσεις σχεδιασμού των διαφόρων κατηγοριών του NEAK, το μοντέλο της στοχαστικής προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε από τον Μάργαρη (1994) και τους Margaritis and Papazachos (1994). Οι Margaritis and Boore (1998) προσομοίωσαν τους ισχυρότερους σεισμούς του Ελληνικού χώρου οι οποίοι είχαν καταγραφεί από επιταχυνσιογράφους. Με βάση τα δύο μοντέλα της στοχαστικής προσομοίωσης της σημειακής και της πεπερασμένης σεισμικής πηγής καθορίστηκε η ισχυρή κίνηση του σεισμού της Αθήνας 1999, M6 (Margaritis, 2000). Το

μοντέλο της στοχαστικής προσομοίωσης (σημειακής πηγής) χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να εκτιμηθούν οι σεισμολογικοί παράμετροι 18 ισχυρών σεισμών του Ελληνικού χώρου (Margaritis and Hatzidimitriou, 2001).

Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια και εκτιμηθούν οι παράμετροι της ισχυρής κίνησης, μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, PGA, και φασματικές τιμές της ψευδο-ταχύτητας (5% απόσβεσης), PSV, με βάση το μοντέλο της στοχαστικής προσομοίωσης. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται κατάλληλα φάσματα πλατών σεισμικών εστιών τα οποία έχουν καθορισθεί για τον Ελληνικό χώρο. Οι συνθετικές τιμές των εδαφικών επιταχύνσεων, PGA, και οι αντίστοιχες φασματικές τιμές των ψευδο-ταχυτήτων, PSV, καθορίζονται για ένα ευρύ διάστημα μεγεθών $4.5 \leq M \leq 7.0$ και αποστάσεων $10 \leq R \leq 120$ km. Τα μεγέθη και οι αποστάσεις επεκτείνονται πέρα από τα συνήθη τα οποία καταγράφονται στον Ελληνικό χώρο. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιούνται 121 προσομοιώσεις διαφόρων σεισμικών μεγεθών και αποστάσεων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των μεγίστων εδαφικών επιταχύνσεων και των φασματικών τιμών τους με τη χρήση μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης υπολογίζουν εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της PGA και της PSV για διάφορες ιδιοπεριόδους. Οι σχέσεις αυτές χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας για τις διάφορες κατηγορίες του EAK2000. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας συγκρίνονται με αντίστοιχα τα οποία προέρχονται με βάση της σχέσεις οι οποίες έχουν προκύψει από πραγματικά δεδομένα του Ελληνικού χώρου.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Το προσομοίωμα της σημειακής πηγής βασίζεται στην αρχή ότι, ένα ω^2 -φασματικό σχήμα σε απόσταση R από το υπόκεντρο του σεισμού, μπορεί να καθορισθεί ως συνάρτηση της σεισμικής ροπής του σεισμού, M_0 , και της απόστασης R. Το συγκεκριμένο ω^2 -φάσμα μιάς εδαφικής κίνησης εξαρτάται από τη σεισμική ροπή, M_0 , τη γωνιακή συχνότητα, f_0 , και την παράμετρο τάσης, Δσ. Η συγκεκριμένη ανάλυση στοχεύει κατά κύριο λόγο στον καθορισμό παραμέτρων οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στη πρόβλεψη εδαφικών κινήσεων με συχνοτικό περιεχόμενο από 0.5 ως 10 Hz. Έχει δειχθεί (Margaritis and Boore,

1998) 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. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση δίνονται στον Πίνακα 1.

Είναι σκόπιμο να αναφερθεί στο σημείο αυτό ότι οι προσομοιώσεις λαμβάνουν υπόψη τον παράγοντα των εδαφικών συνθηκών. Ο παράγοντας αυτός, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, καθορίζεται κατά κύριο λόγο από την εισαγωγή κατάλληλων συντελεστών ενίσχυσης της εδαφικής κίνησης εξαρτώμενους από την συχνότητα. Επιλέγησαν ενδιάμεσες εδαφικές συνθήκες με σκοπό την καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά τα οποία έχουν προκύψει από τις παρατηρημένες τιμές. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές ενίσχυσης οι οποίοι προτάθηκαν από τους Klimis et al. (1999), και περιλαμβάνουν εδάφη με μέση ταχύτητα διατμητικών κυμάτων, $360 < V_{s30} < 760$ m/sec.

Βασικές παράμετροι οι οποίες είναι καθοριστικές στην προσομοίωση της εδαφικής κίνησης είναι η παράμετρος τάσης, $\Delta\sigma$, και οι τιμή $-k_0$ της απόσβεσης των υψηλών συχνοτήτων. Οι Margaritis and Hatzidimitriou (2001) με βάση επιταχυνσιογράμματα του Ελληνικού χώρου τα οποία καταγράφηκαν από όργανα ισχυρής κίνησης και με εφαρμογή του ω-τετράγωνο μοντέλου, εκτίμησαν μία μέση παράμετρο τάσης $\langle \Delta\sigma \rangle = 56$ bar για τον Ελληνικό χώρο. Στην ίδια μελέτη εκτιμήθηκαν οι μέσες τιμές, $\langle k_0 \rangle$ για τις τρεις βασικές κατηγορίες εδαφών κατά NEHRP, στον Ελληνικό χώρο, D- μετρίως χαλαρά εδάφη ($\langle V_{s30} \rangle = 260$ m/sec), C-σκληρά, πολύ πυκνά εδάφη ($\langle V_{s30} \rangle = 560$ m/sec) και B-σκληρό πέτρωμα ($\langle V_{s30} \rangle = 1100$ m/sec). Για την κατηγορία C- σκληρών εδαφών εκτιμήθηκε τιμή $\langle k_0 \rangle = 0.05$. Οι Παπαϊωάννου κ.α. (2001) χρησιμοποιώντας τις καταγραφές ισχυρής κίνησης του σεισμού της Αθήνας 1999, M6, και ένα εξιόπιστο δείγμα γεωτεχνικών στοιχείων, με την ίδια κατηγοριοποίηση των εδαφών (NEHRP), εκτίμησαν μία $\langle k_0 \rangle = 0.045$ με βάση την μέση ταχύτητα διατμητικών κυμάτων V_{s30} .

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε ως αντιπροσωπευτική τιμή για την κατηγορία C-σκληρών-πολύ πυκνών εδαφών, $\langle k_0 \rangle = 0.048$.

Πίνακας 1. Παράμετροι του σημειακού μοντέλου προσομοίωσης στον Ελληνικό χώρο (Margaritis and Boore, 1998).

Table 1. Parameters of the point source model in Greece (Margaritis and Boore, 1998).

Ιδιότητες Σεισμικής Πηγής

$\rho = 2.7$ gr/cm³

$\beta = 3.4$ km/sec (Papazachos, 1990).

$\Delta\sigma = 56$ bars (Margaritis and Hatzidimitriou, 2001).

Ιδιότητες Δρόμου Διάδοσης

Q : $Q = 275 (f/0.1)^{-2.0} \quad f \leq 0.2$,
 $Q = 88 (f/1.0)^{-0.9} \quad f > 0.2$

[(βλέπε Σχ. 3 Boore, 1996). Η σχέση Q δίνεται στην εργασία Boore(1996), και είναι σε καλή συμφωνία με τις τοπικές σχέσεις Q που προτάθηκαν

για την Ελλάδα (Hatzidimitriou, 1993, 1995)].

Γεωμετρική Διασπορά : $1/r$

Διάρκεια : $1/f_0 + 0.05$

Ιδιότητες Θέσης Καταγραφής

Παράγοντας Συνεισφοράς $= 0.707$

Συντελεστές Ενίσχυσης Θέσης (Klimis et al., 1999)

Τιμή - $k_0 = 0.048$.

Με βάση το προαναφερόμενο μοντέλο προσομοίωσης υπολογίζονται οι τιμές μέγιστης επιτάχυνσης, PGA, και ψευδο-ταχύτητας (5%-απόσβεσης), PSV, για διάφορες ιδιοπεριόδους. Οι υπολογισμοί γίνονται για διάστημα μεγεθών από 4.5 έως 7.0 ανά 0.25 του μεγέθους, δηλαδή λαμβάνονται υπόψη 11 τιμές μεγέθους. Επίσης το διάστημα αποστάσεων λαμβάνεται από 10km έως 120km, και συγκεκριμένα οι αποστάσεις 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 65, 80, 100 και 120 km. Οι αποστάσεις αυτές αντιστοιχούν σε ένα διάστημα ~ 0.1 του λογαρίθμου της απόστασης. Για όλους τους παραπάνω συνδυασμούς των μεγεθών και των αποστάσεων υπολογίζονται οι συνθετικές τιμές των μεγίστων τιμών της επιτάχυνσης, PGA, και των φασματικών τιμών της ψευδο-ταχύτητας, PSV για απόσβεση D=5%. Στο σχήμα (1) παρουσιάζονται οι 121 υπολογισμένες τιμές των μεγίστων επιταχύνσεων οι οποίες προέκυψαν με εφαρμογή του μοντέλου για διάφορα μεγέθη και αποστάσεις.

3. ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΡΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Οι υπολογισμένες τιμές των μεγίστων επιταχύνσεων, PGA, καθώς και των 5%- PSV ψευδοταχυτήτων για διάφορες ιδιοπεριόδους χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης. Οι σχέσεις αυτές συγκρίνονται με τις ήδη υπάρχουσες σχέσεις οι οποίες προέκυψαν με βάση τα καταγεγραμμένα δεδομένα ισχυρής κίνησης. Είναι σημαντικό σε μία εμπειρική σχέση πρόβλεψης της ισχυρής κίνησης ο καθορισμός του μαθηματικού μοντέλου το οποίο θα περιγράψει την απόσβεση της ισχυρής κίνησης σε συνάρτηση με το μέγεθος, την απόσταση και τις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας με αυτά τα οποία ήδη έχουν δημοσιευθεί στον Ελληνικό χώρο, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο μοντέλο με αυτό το οποίο προτάθηκε από τον Θεοδουλίδη (1991). Το μαθηματικό μοντέλο δίνεται από την παρακάτω εξίσωση

$$\ln Y = C0 + C1 * M + C2 * \ln(R + R_0) + C3 * S + \sigma_{ln} P \quad (1)$$

όπου Y είναι η προβλεπόμενη παράμετρος της εδαφικής κίνησης, M το μέγεθος του σεισμού, R η απόσταση, S η παράμετρος των εδαφικών συνθηκών (0=αλλουβιακές αποθέσεις και 1=σκληρό πέτρωμα). Το P είναι 0 για το μέσο όρο των τιμών $\ln Y$ και μονάδα για το μέσο όρο \pm ένα μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS), το οποίο για κανονική κατανομή των υπολοίπων εκφράζει αντίστοιχα 0.50 ή 0.84 πιθανότητα μή υπέρβασης των τιμών της $\ln Y$. Ο συντελεστής R_0 , χρησιμοποιείται προκειμένου να περιορισθεί η τιμή του Y σε μηδενικές αποστάσεις, ενώ σε κάποιες εργασίες αναφέρεται ως “ψευδο-βάθος” (Boore and Joyner, 1991). Οι τιμές C0...C3, είναι συντελεστές αναγωγής που υπολογίζονται με γραμμική παλινδρόμηση. Στην συγκεκριμένη εργασία, επειδή ο παράγοντας των εδαφικών συνθηκών έχει ήδη ληφθεί υπόψη στη εκτίμηση των παραμέτρων της ισχυρής κίνησης (PGA, PSV) με τη χρήση συντελεστών ενίσχυσης ο παράγοντας C3*S στους υπολογισμούς της γραμμικής παλινδρόμησης δεν λαμβάνεται υπόψη.

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που υιοθέτησαν οι Atkinson and Boore (1995) για τις Ανατολικές ΗΠΑ, αποκλείστηκαν από την ανάλυση οι συνθετικές τιμές που υπολογίστηκαν για αποστάσεις $R \geq 50\text{km}$ και $M \leq 5.25$, προκειμένου το δείγμα των συνθετικών καταγραφών να προσομοιώνεται

με τις πραγματικές συνθήκες καταγραφής της ισχυρής κίνησης.

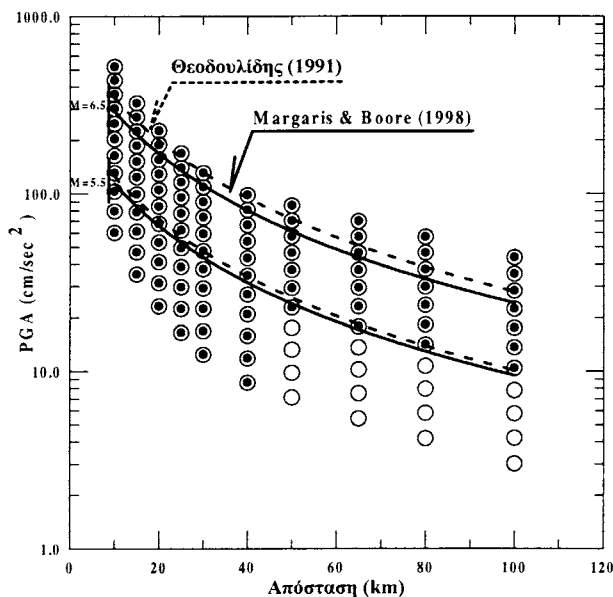
Ο συντελεστής R_0 καθορίστηκε με 2 τρόπους. Στην πρώτη περίπτωση με κατάλληλο πρόγραμμα H/Y (Κουτράκης, 2000) δόθηκαν 72 τιμές από το 0 έως 35 και επιλέχθηκε η τιμή της οποίας το RMS των υπολοίπων της ήταν το μικρότερο. Στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα γραμμικής παλινδρόμησης το οποίο εκτίμησε τον παράγοντα R_0 μαζί με τους υπόλοιπους συντελεστές αναγωγής C0...C2. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις εφαρμόστηκε κατευθείαν γραμμική παλινδρόμηση. Τελικά ως πλέον κατάλληλη τιμή επιλέχθηκε η τιμή $R_0=15$ η οποία παρουσιάζει μικρή τιμή RMS και ταυτόχρονα βρισκόταν σε ικανοποιητική συμφωνία με την αντίστοιχη που πρότεινε ο Θεοδουλίδης (1991) χρησιμοποιώντας παρατηρημένες καταγραφές ισχυρής κίνησης του Ελληνικού χώρου.

Παρόμοια διαδικασία υιοθετήθηκε για την εκτίμηση των συντελεστών της εξίσωσης (1) για τις φασματικές τιμές της ψευδο-ταχύτητας για διάφορες ιδιοπεριόδους από 0.1-2.0 sec. Στην περίπτωση των φασματικών τιμών, PSV, υιοθετήθηκε η σχέση της οποίας το R_0 παρουσίαζε το μικρότερο RMS. Στον Πίνακα 2 εμφανίζονται οι συντελεστές αναγωγής των συνθετικών μεγίστων επιταχύνσεων, PGA, και φασματικών 5%-PSV. Η πρώτη γραμμή του Πίνακα 2, στην οποία η ιδιοπερίοδος είναι 0.0, δίνει τους συντελεστές αναγωγής της PGA ενώ στις υπόλοιπες, δίνονται οι συντελεστές της 5%-PSV για διάφορες ιδιοπεριόδους.

Η συνθετική εμπειρική σχέση πρόβλεψης του Πίνακα 1 συσχετίζεται με την αντίστοιχη σχέση που προτάθηκε με βάση τα Ελληνικά δεδομένα ισχυρής κίνησης (Θεοδουλίδης, 1991) για ενδιάμεσες εδαφικές συνθήκες S=0.5. Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται οι συνθετικές τιμές των μεγίστων επιταχύνσεων που προέκυψαν με βάση τη στοχαστική προσομοίωση (ανοικτοί κύκλοι) ενώ οι γεμάτοι κύκλοι απεικονίζουν τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στη γραμμική παλινδρόμηση. Στο ίδιο σχήμα (1) παρουσιάζονται οι εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της PGA για M5.5 και 6.5 τόσο των συνθετικών καταγραφών (συνεχόμενη γραμμή) όσο και αυτή που προτάθηκε από τον Θεοδουλίδη (1991) για παρατηρημένα δεδομένα (διακεκομμένη γραμμή) του Ελληνικού χώρου.

Πίνακας 2. Συντελεστές αναγωγής εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης των PGA και 5%-PSV.
Table 2. Scaling coefficients of the empirical relations of the PGA and 5%-PSV

--T ₀ --	--C ₀ --	--C ₁ --	--C ₂ --	--R ₀ --	--RMS--
0.000	4.825	0.938	-1.631	15.000	0.170
0.050	-1.143	0.905	-1.288	3.0000	0.105
0.100	-0.096	0.912	-1.273	3.0000	0.102
0.120	0.040	0.922	-1.262	3.0000	0.103
0.150	0.133	0.937	-1.246	3.0000	0.105
0.180	0.157	0.953	-1.232	3.0000	0.107
0.200	0.225	0.964	-1.240	3.5000	0.108
0.300	-0.078	1.023	-1.187	3.0000	0.118
0.400	-0.591	1.085	-1.124	2.0000	0.126
0.500	-1.014	1.150	-1.100	2.0000	0.143
0.600	-1.471	1.216	-1.079	2.0000	0.160
0.700	-1.943	1.281	-1.060	2.0000	0.178
0.800	-2.411	1.345	-1.043	2.0000	0.194
0.900	-2.732	1.408	-1.058	3.0000	0.212
1.000	-3.186	1.468	-1.044	3.0000	0.226
1.500	-5.300	1.723	-0.960	2.0000	0.263
2.000	-6.935	1.903	-0.872	2.0000	0.273



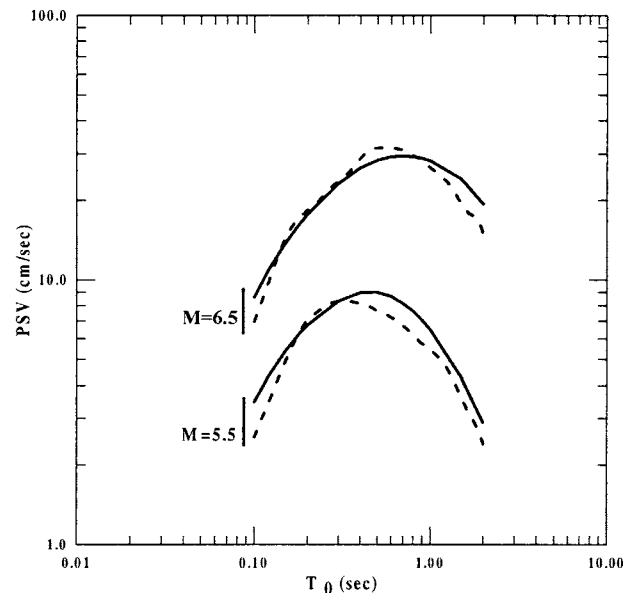
Σχήμα 1. Συνθετικά δεδομένα ισχυρής κίνησης της PGA και εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης για M5.5 και 6.5.

Figure 1. Synthetic strong motion data of PGA and empirical predictive relations for M5.5 and 6.5.

Η διαφορά που παρουσιάζεται στις δύο εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης που υπολογίστηκαν με βάση τα πραγματικά και συνθετικά δεδομένα ισχυρής κίνησης, κυρίως για τους ισχυρούς σεισμούς M6.5, μπορεί να οφείλεται στον διαφορετικό ορισμό και στον τρόπο υιοθέτησης των τοπικών εδαφικών συνθηκών στις δύο αναλύσεις με βάση τα πραγματικά δεδομένα ισχυρής κίνησης και τα αντίστοιχα συνθετικά. Στην περίπτωση των

συνθετικών καταγραφών χρησιμοποιήθηκαν γεωτεχνικές πληροφορίες οι οποίες καθόρισαν τις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Η διαφορά αυτή εντοπίζεται σε ποσοστό 15% για τις δύο σχέσεις για M6.5. Η αντίστοιχη διαφορά για M5.5 είναι ποσοστού 7%.

Αντίστοιχα συγκρίνοντας οι φασματικές τιμές, 5%-PSV, των συνθετικών δεδομένων με τις τιμές που προέκυψαν από τις παρατηρημένες καταγραφές ισχυρής κίνησης (Θεοδοουλίδης, 1991). Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται τα φάσματα απόκρισης της ψευδοταχύτητας, 5%-PSV, των συνθετικών δεδομένων (συνεχόμενη γραμμή) με τα αντίστοιχα φάσματα τα οποία προτάθηκαν με βάση τα δεδομένα του Ελληνικού χώρου (διακεκομμένη γραμμή) για δύο σεισμικά μεγέθη M5.5 και 6.5 και απόσταση R=15 km.



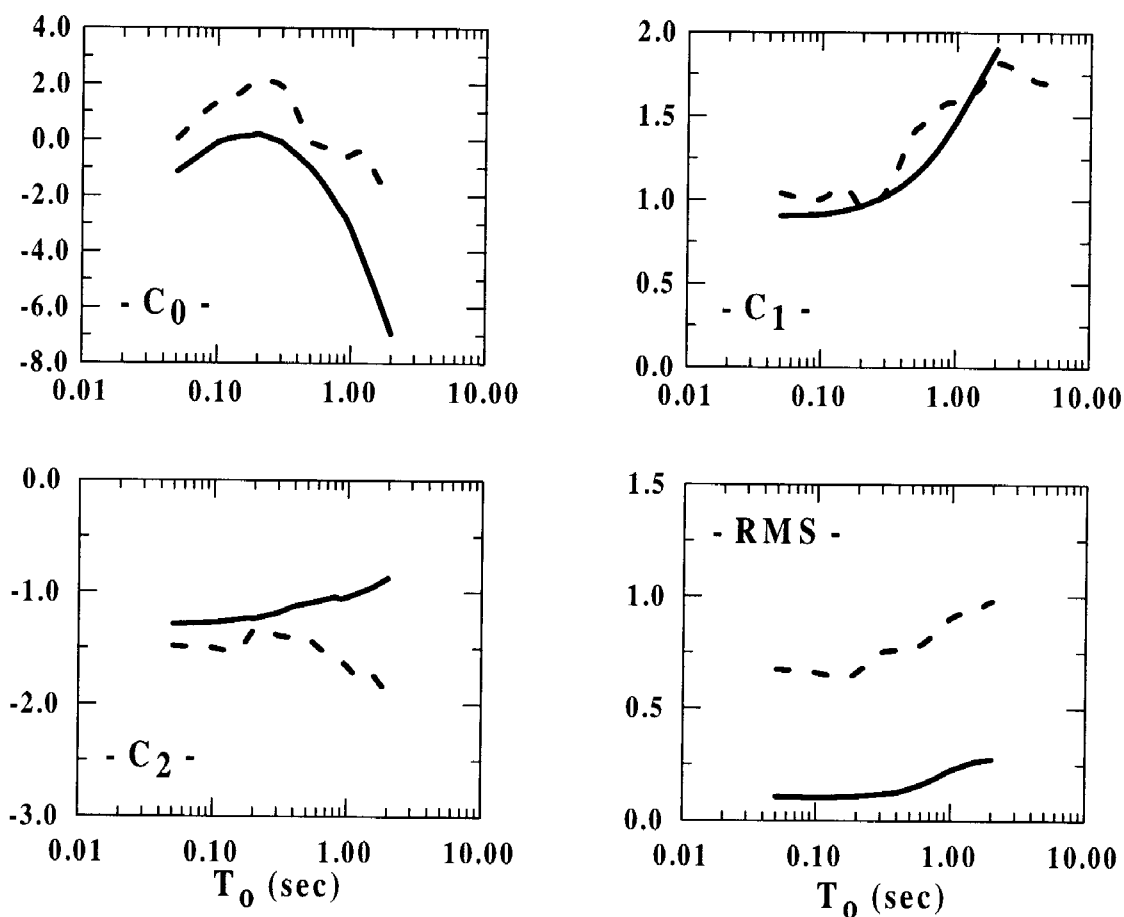
Σχήμα 2. Σύγκριση φασμάτων απόκρισης, PSV, για απόσβεση 5% των εμπειρικών σχέσεων των συνθετικών (συνεχής) και πραγματικών (διακεκομμένη) δεδομένων.

Figure 2. Comparison of the 5%-PSV response spectra of the empirical relations of the synthetic (continuous) and observed (dashed) data.

Οι συγκρίσεις των φασματικών τιμών μπορούν να θεωρηθούν ικανοποιητικές. Κάποιες αποκλίσεις στις μικρές ($T_0=0.1$ sec) και στις μεγάλες ($T_0=2.0$ sec) ιδιοπεριόδους μπορούν να αποδοθούν στη εφαρμογή διαφορετικών φίλτρων διόρθωσης των καταγραφών ισχυρής κίνησης σε σχέση με τις συνθετικές στις οποίες εφαρμόστηκε ένα μέσο φίλτρο. Είναι σκόπιμο στο σημείο αυτό να γίνει

αναλυτική σύγκριση των διαφόρων συντελεστών αναγωγής C_0 , C_1 , C_2 και RMS σε συνάρτηση με τις ιδιοπεριόδους ($T_0=0.05$ ως 2.0 sec) των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης των συνθετικών και των πραγματικών καταγραφών. Στο σχήμα 3 δίνονται οι συγκρίσεις των φασματικών συντελεστών αναγωγής $C_0...C_2$ και RMS σε συνάρτηση με την ιδιοπερίοδο ($T_0=0.05$ ως 2.0 sec) των συνθετικών (συνεχόμενη γραμμή) και των πραγματικών καταγραφών (διακεκομμένη γραμμή). Ο φασματικός συντελεστής αναγωγής C_0 παρουσιάζει μία διαφορά μεταξύ των συνθετικών και πραγματικών δεδομένων. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι ο συγκεκριμένος συντελεστής για τα πραγματικά δεδομένα (Θεοδουλίδης, 1991) περιλαμβάνει και τις

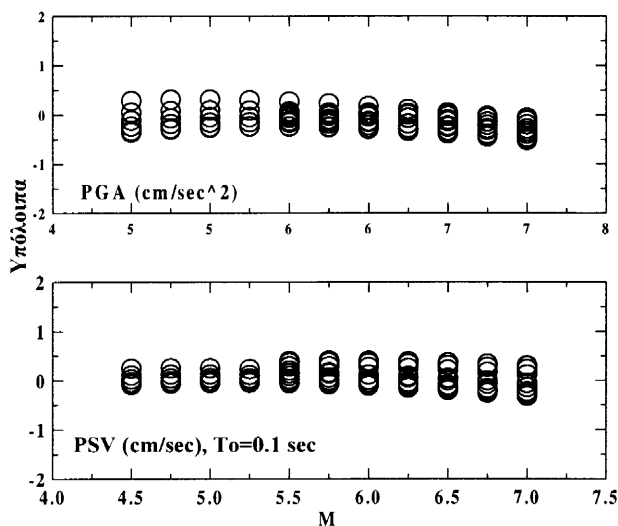
τοπικές εδαφικές συνθήκες με την απλή διαφοροποίηση 0 και 1 για αλλουβικές αποθέσεις και σκληρά πετρώματα αντίστοιχα. Ο συντελεστής C_1 παρουσιάζεται σε καλή συμφωνία και για τις δύο κατηγορίες δεδομένων. Ο συντελεστής C_2 της απόστασης παρουσιάζεται ενισχυμένος στις συνθετικές καταγραφές λόγω του εμπλουτισμού του συνθετικού δείγματος με ικανό αριθμό καταγραφών σε μεγάλες αποστάσεις $R \geq 80$ km. Ο συντελεστής του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, RMS των συνθετικών καταγραφών, στις διάφορες ιδιοπεριόδους, παρουσιάζει σαφώς μικρότερες τιμές από τις αντίστοιχες των πραγματικών δεδομένων.



Σχήμα 3. Σύγκριση των φασματικών συντελεστών αναγωγής των συνθετικών (συνεχόμενη γραμμή) και πραγματικών (διακεκομμένη γραμμή) καταγραφών (Θεοδουλίδης, 1991) σε συνάρτηση με τις ιδιοπεριόδους ($T_0=0.05 - 2.0$ sec).

Figure 3. Comparison of the spectral scaling coefficients of the simulated (continuous line) and observed (dashed line) strong motion data (Theodulidis, 1991) in terms of the periods ($T_0=0.05 - 2.0$ sec).

Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται η ανάλυση των υπολοίπων των μεγίστων και φασματικών τιμών των συνθετικών και πραγματικών δεδομένων, σε συνάρτηση με το μέγεθος του σεισμού. Οι Atkinson and Boore (1995) καθόρισαν εξάρτηση των υπολοίπων των συνθετικών και πραγματικών καταγραφών ισχυρής κίνησης για τις Ανατολικές ΗΠΑ με το μέγεθος του σεισμού. Παρόμοια ανάλυση επιχειρείται και στο σχήμα 4, και φαίνεται ότι δεν παρουσιάζεται κάποια συγκεκριμένη τάση στα υπόλοιπα των συνθετικών και πραγματικών καταγραφών ισχυρής κίνησης τόσο για τις μέγιστες τιμές, PGA, όσο και για τις αντίστοιχες φασματικές, 5%-PSV, για διάστημα μεγεθών από 4.5 ως 7. Οι τιμές των υπολοίπων τόσο για τις μέγιστες όσο και για τις φασματικές τιμές κυμαίνονται από -1 ως 1.



Σχήμα 4. Υπόλοιπα των συνθετικών και πραγματικών καταγραφών των μεγίστων τιμών των επιταχύνσεων, PGA, και των αντίστοιχων φασματικών, 5%-PSV ($T_0=0.1\text{sec}$).

Figure 4. Residuals of the simulated and observed strong motion data of the peak ground acceleration, PGA and the corresponding spectral values, 5%-PSV ($T_0=0.1\text{sec}$).

4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ.

Οι εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας. Η σύνθεση όλων των εκτιμήσεων σεισμικής επικινδυνότητας στον Ελληνικό χώρο είχε αποτέλεσμα να προταθεί ένας χάρτης 4 ζωνών ίσης σεισμικής επικινδυνότητας (Papazachos

et al., 1989), ο οποίος αποτελεί μέρος του NEAK από το 1995. Επομένως κάθε νέα εμπειρική σχέση πρόβλεψης πρέπει να επαληθεύει την εφαρμογή της στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας με βάση το Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό.

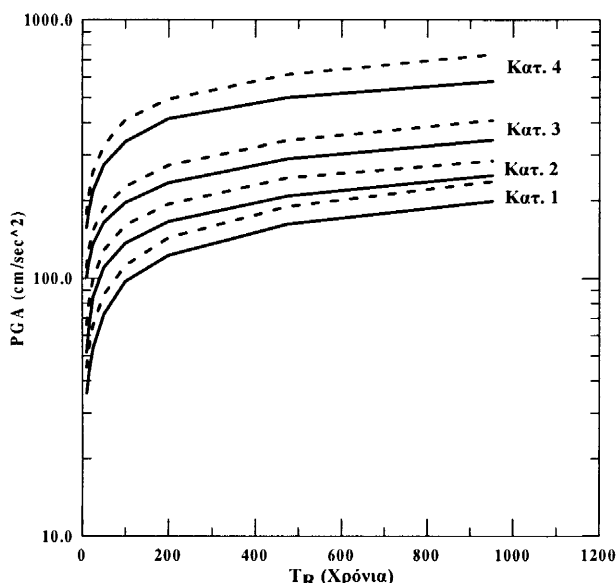
Τα βασικά βήματα στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας μιάς θέσης είναι τρία. Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τον καθορισμό ενός επαρκούς μοντέλου σεισμικών πηγών με ενδεχόμενο να επηρεάσει την εξεταζόμενη θέση. Στο δεύτερο βήμα ορίζεται ένα πιθανοτικό μοντέλο επανάλησης των σεισμικών γεγονότων. Ενώ στο τελευταίο βήμα καθορίζεται η κατάλληλη σχέση απόσβεσης (εμπειρική σχέση πρόβλεψης) της εξεταζόμενης παραμέτρου ισχυρής κίνησης. Στην παρούσα εργασία προκειμένου να εκτιμηθούν πιθανολογικά φάσματα απόκρισης με βάση τις συνθετικές καταγραφές ισχυρής κίνησης εφαρμόζεται η μεθοδολογία Cornell (1968). Η μεθοδολογία αυτή έχει τη δυνατότητα να περιλαμβάνει ιστορικά σεισμολογικά στοιχεία καθώς και γεωφυσικές και σεισμοτεκτονικές πληροφορίες.

Για την εκτίμηση πιθανολογικών φασμάτων απόκρισης χρησιμοποιείται το σεισμοτεκτονικό μοντέλο των 69 επιφανειακών και 7 ενδιάμεσου βάθους σεισμών (Papaioannou and Papazachos, 2000). Το μοντέλο Poisson χρησιμοποιείται ως μοντέλο επανάλησης των σεισμικών γεγονότων. Οι εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης του Πίνακα 2, για τις μέγιστες επιταχύνσεις, PGA, και τις φασματικές τιμές 5%-PSV, χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας. Ταυτόχρονα, οι αντίστοιχες σχέσεις οι οποίες προτάθηκαν για το Ελληνικό χώρο με βάση καταγεγραμμένα δεδομένα (Θεοδουλίδης, 1991), εφαρμόζονται επίσης στους υπολογισμούς. Δύο χαρακτηριστικές περιόδους επανάλησης υιοθετούνται για τις φασματικές τιμές, 5%-PSV, $T_H=50$ και $T_H=500$ χρόνια. Τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων αυτών συγκρίνονται μεταξύ των.

Για να συσχετισθούν τα αποτελέσματα της εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας με τον Αντισεισμικό Κανονισμό, χρησιμοποιούνται 4 θέσεις-πόλεις του Ελληνικού χώρου οι οποίες ανήκουν στις 4 κατηγορίες του ΕΑΚ. Οι πόλεις αυτές είναι το Αργοστόλι (κατηγορία 4), Πάτρα (κατηγορία 3), Θεσσαλονίκη (κατηγορία 2) και Αλεξανδρούπολη (κατηγορία 1).

Στο σχήμα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας με βάση τη μέγιστη εδαφική

επιτάχυνση, PGA για διάφορες περιόδους επανάληψης (από 10 ως 1000 χρόνια). Με την συνεχόμενη γραμμή παρουσιάζονται οι αναμενόμενες τιμές PGA με βάση τις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης που εκτιμήθηκαν από τις συνθετικές καταγραφές. Οι διακεκομμένες γραμμές παρουσιάζουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα με βάση τις σχέσεις που προέκυψαν από τις πραγματικές καταγραφές του Ελληνικού χώρου. Η διαφοροποίηση στις εκτιμήσεις της σεισμικής επικινδυνότητας με βάση τις εμπειρικές σχέσεις έχει δειχθεί στο σχήμα 1.



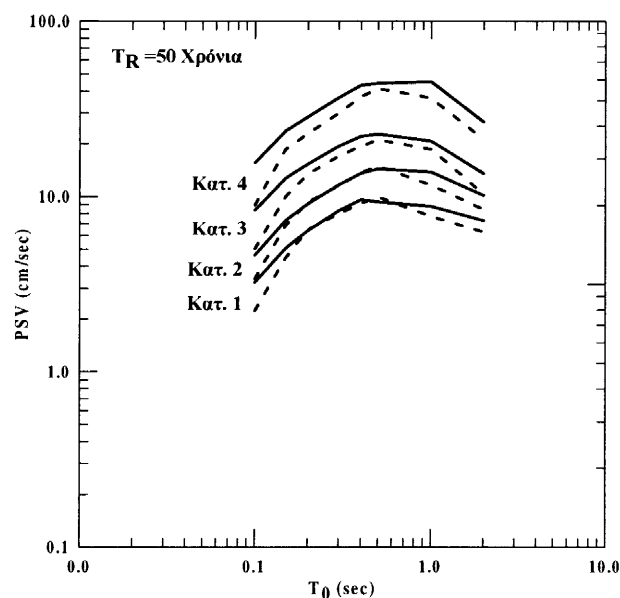
Σχήμα 5. Αναμενόμενες τιμές μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, PGA με την περίοδο επανάληψης με βάση τις συνθετικές εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης (συνεχής γραμμή) και τις αντίστοιχες με βάση παρατηρημένα δεδομένα του Ελληνικού χώρου (Θεοδουλίδης, 1991; διακεκομμένη γραμμή).

Figure 5. Expected PGA values in terms of return period based on synthetic empirical predictive relations (continuous line) and the corresponding ones based on observed data (Theodulidis, 1991; dashed line).

Είναι χρήσιμο να τονισθεί στο σημείο αυτό ότι τα αποτελέσματα από την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας με βάση και τις δύο εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης ακολουθούν την κατηγοριοποίηση του ΕΑΚ.

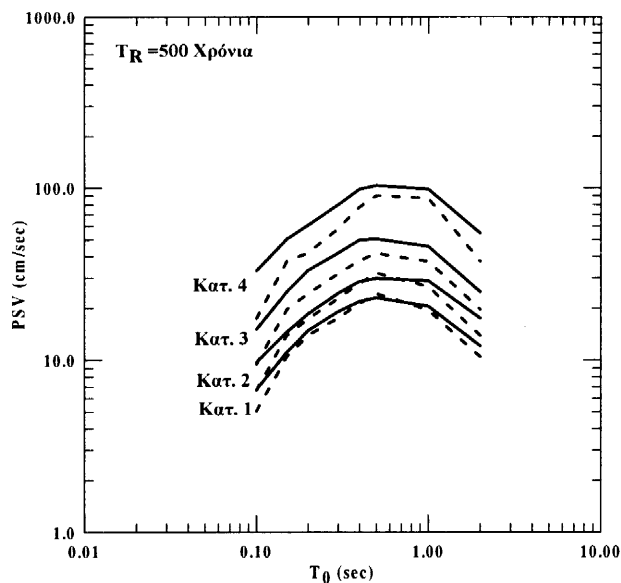
Η εκτίμηση των πιθανολογικών φασμάτων απόκρισης, 5%-PSV, πραγματοποιήθηκε για 8 διακεκριμένες ιδιοπεριόδους του Πίνακα 2, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0 και 2.0 sec και για δύο περιόδους επανάληψης $T_R=50$ και 500

χρόνια. Η εκτίμηση πραγματοποιήθηκε επίσης και με βάση τις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης που προτάθηκαν από τον Θεοδουλίδη (1991) για Ελληνικές καταγραφές ισχυρής κίνησης. Στο σχήμα 6 δίνονται οι συγκρίσεις των πιθανολογικών φασμάτων απόκρισης, 5%-PSV για τις 4 εξεταζόμενες θέσεις και για περίοδο επανάληψης, $T_R=50$ χρόνια. Με συνεχόμενη γραμμή απεικονίζονται τα 5%-PSV φάσματα απόκρισης, με βάση τις συνθετικές εμπειρικές σχέσεις απόσβεσης, ενώ με τις διακεκομμένες γραμμές τα αντίστοιχα με βάση τις σχέσεις που προτάθηκαν από τον Θεοδουλίδη (1991). Αντίστοιχα, στο σχήμα 7 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των 5%-PSV φασμάτων απόκρισης για τις 4 εξεταζόμενες θέσεις και με περίοδο επανάληψης $T_R=500$ χρόνια.



Σχήμα 6. Σύγκριση 5%-PSV πιθανολογικών φασμάτων απόκρισης για τις 4 θέσεις του ΕΑΚ, περίοδο επανάληψης, $T_R=50$ χρόνια, με βάση τις συνθετικές εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης (συνεχής γραμμή) και τις αντίστοιχες με βάση παρατηρημένα δεδομένα του Ελληνικού χώρου (Θεοδουλίδης, 1991; διακεκομμένη γραμμή).

Figure 6. Comparison of 5%-PSV response spectra for 4 examined sites of EAK, return period $T_R=50$ years, based on synthetic empirical predictive relations (continuous line) and the corresponding ones based on observed data (Theodulidis, 1991; dashed line).



Σχήμα 7. Σύγκριση 5%-PSV πιθανολογικών φασμάτων απόκρισης για τις 4 θέσεις του ΕΑΚ, περίοδο επανάληψης, $T_R=500$ χρόνια, με βάση τις συνθετικές εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης (συνεχής γραμμή) και τις αντίστοιχες με βάση παρατηρημένα δεδομένα του Ελληνικού χώρου (Θεοδουλίδης, 1991; διακεκομμένη γραμμή).

Figure 7. Comparison of 5%-PSV response spectra for 4 examined sites of EAK, return period $T_R=500$ years, based on synthetic empirical predictive relations (continuous line) and the corresponding ones based on observed data (Theodulidis, 1991; dashed line).

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2, οι διαφοροποιήσεις των φασματικών τιμών των δύο μοντέλων στις μικρές ($T_0=0.1$ sec) και μεγάλες ($T_0=2.0$ sec) ιδιοπεριόδους οφείλονται στα διαφορετικά ψηφιακά φίλτρα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διόρθωση των καταγραφών ισχυρής κίνησης τόσο των παρατηρημένων όσο και των συνθετικών. Στα σχήματα 6 και 7 όμως φαίνεται σχετικά καλή σύγκλιση των δύο μοντέλων για τις ενδιάμεσες ιδιοπεριόδους (0.3-1.0 sec) και κυρίως για τις κατηγορίες 1 και 2 του ΕΑΚ. Τα δύο φασματικά μοντέλα αποκλίνουν για το ίδιο διάστημα ιδιοπεριόδων κυρίως για τις δύο κατηγορίες του κανονισμού 3 και 4 οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλή σεισμικότητα. Ο προφανής εμπλουτισμός των συνθετικών καταγραφών με φασματικές τιμές ενδιαμέσων ιδιοπεριόδων μεγάλων σεισμών σε διάφορες αποστάσεις μπορεί να ερμηνεύσει της διαφοροποίηση των πιθανολογικών αποτελεσμάτων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εκτιμώνται συνθετικές καταγραφές ισχυρής κίνησης με βάση το μοντέλο της στοχαστικής προσομοίωσης. Οι καταγραφές αυτές καλύπτουν επαρκώς ένα ευρύ φάσμα σεισμικών μεγεθών (4.5 ως 7.0) και αποστάσεων (10 ως 120 km). Με βάση τις καταγραφές αυτές προτείνονται εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της ισχυρής κίνησης τόσο για τις μέγιστες τιμές της κίνησης, PGA, όσο και τις 5%-PSV φασματικές τιμές. Οι σχέσεις αυτές συγκρίνονται με αντίστοιχες οι οποίες έχουν προταθεί με βάση πραγματικές καταγραφές της ισχυρής κίνησης του Ελληνικού χώρου (Θεοδουλίδης, 1991).

Ο εμπλουτισμός του συνθετικού δείγματος των καταγραφών με ισχυρές εδαφικές κινήσεις ($M>6.5$) και σε αποστάσεις $R>80$ km έχει ως αποτέλεσμα, οι συνθετικές φασματικές σχέσεις πρόβλεψης να παρουσιάζουν υψηλότερες αναμενόμενες τιμές σε ενδιάμεσες ιδιοπεριόδους και κυρίως σε θέσεις οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλή σεισμικότητα, σε σύγκριση με τιμές που υπολογίζονται με βάση τις αντίστοιχες σχέσεις που έχουν προταθεί με τη χρήση δεδομένων του Ελληνικού χώρου. Αντίθετα, οι μέγιστες τιμές, PGA, των συνθετικών καταγραφών, παρουσιάζουν μικρότερες τιμές από τις αντίστοιχες σχέσεις με βάση τα Ελληνικά δεδομένα. Η υιοθέτηση ενός εμπειρικού μοντέλου καθορισμού των τοπικών εδαφικών συνθηκών είναι δυνατόν να ενισχύσει τις τιμές PGA στις σχέσεις που προτάθηκαν με βάση τα Ελληνικά επιταχυνσιογράμματα (Θεοδουλίδης, 1991).

Βασικό συμπέρασμα από την σύγκριση της εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας είναι ότι το μοντέλο των εμπειρικών προβλέψεων με βάση τη στοχαστική προσομοίωση παρακολουθεί με ικανοποιητική ακρίβεια τις κατηγορίες του ΕΑΚ.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «Εκπόνηση Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας» (6126-17) και για τον σκοπό αυτό ευχαριστώ τον επιστ. υπεύθυνο του ερευνητικού πρόγραμματος αυτού Δρ. Σεισμολόγο, Χ. Παπαϊωάννου. Ευχαριστώ επίσης τον Δρ. Πολ. Μηχ. Του ΙΤΣΑΚ Ν. Κλήμη για την κριτική ανάγνωση του κειμένου.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Atkinson, G. M. and D. M. Boore. (1995), "Ground-Motion Relations for Eastern North America", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, 17-30.
- Atkinson, G. M. and D. M. Boore. (1998), "Evaluation of models for earthquake source spectra in ENA", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 917-934.
- Beresnev, I. A. and G. M. Atkinson (1997), "Modeling Finite-Fault radiation from the ω^n Spectrum", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87, 67-84.
- Beresnev, I. A. and G. M. Atkinson (1998), "FINSIM- a FORTRAN Program for Simulating Stochastic Acceleration Time Histories from Finite Faults", *Seism. Res. Lett.*, 69, 27-32.
- Beresnev, I. A. and G. M. Atkinson (1999), "Generic Finite-Fault Model for Ground-Motion Prediction in Eastern North America", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 608-625.
- Boore, D.M. (1983). "Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 1865-1894.
- 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, 1-73.
- Boore, D.M. (2001). "Simulation of ground motion using the stochastic method", *Pageoph*, 1.3.
- Boore, D.M. and G.M. Atkinson (1987). "Stochastic prediction of ground motion and spectral response parameters at hard-rock sites in ENA", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 77, 440-467.
- Boore, D.M. and W.B. Joyner (1991). "Estimation of ground motion at deep-soil sites in Eastern NA", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 81, 2167-2185.
- Cornell, C.A. (1968). "Engineering seismic risk analysis", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 58, 1503-1606.
- Hanks, T.C. and R.K. McGuire (1981). "The character of high-frequency strong-ground motion", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71, 2071-2095.
- Hatzidimitriou, P.C. (1993), "Attenuation of Coda Waves in Northern Greece", *Pageoph*, 140, 63-78.
- Hatzidimitriou, P.C. (1995), "S-Wave Attenuation in the Crust in Northern Greece", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, 1381-1387.
- Θεοδουλίδης Ν.Π. (1991), "Συμβολή στη μελέτη της ισχυρής σεισμικής κίνησης στον Ελληνικό χώρο", *Διδ. Διατρ. Α.Π.Θ.*, 500 σελ.
- Joyner, W. B. and D. M. Boore (1988), "Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion", *Proc. Earthquake Eng. Soil Dyn. II, GT Div/ASCE, Park City, Utah, 1988*, 43-102.
- Klimis, N.S., B.N. Margaris and P.K. Koliopoulos. (1999), "Site-Dependent amplification Functions and Response Spectra in Greece", *Jour. Earthq. Eng.*, 3, 237-270.
- Μάργαρης, Β.Ν. (1994). "Αξιιμουθιακή εξάρτηση των σεισμικών κυμάτων στον Ελληνικό χώρο και επίδρασή της στη σεισμική επικινδυνότητα", *Διδ. Διατρ. Α.Π.Θ.* 324 σελ.
- Margaris, B.N. (2000). "Variability of PSV response spectra including effects of source, path and site during the Athens earthquake in Greece", *Proc. 6th Intern. Conf. on Seismic Zon., Palm Springs Ca. Nov. 12-15, 2000*.
- Margaris B.N., and D.M. Boore (1998), "Determination of $\Delta\sigma$ and κ_0 from response spectra of large earthquakes in Greece", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 170-182.
- Margaris, B.N. and P.M. Hatzidimitriou. (2001), "Source spectral scaling and stress release estimates using strong-motion records in Greece", *Accepted for Publ. In Bull. Seism. Soc. Am.*
- Παπαϊωάννου, Χ., Γ. Καλογεράς, Π. Χατζηδημητρίου και Β. Μάργαρης (2001). "Καθορισμός της Παραμέτρου κ και συσχέτιση με την ταχύτητα V_{s30} , με βάση καταγραφές ισχυρής κίνησης από το σεισμό της Αθήνας 7/9/99", *Πρακτ. 4^{ου} Παν. Συν. Γεωτ. Μ/κης, Αθήνα Απρ. 2001*, II, 265-272.
- Papaoiannou, Ch. and B. Papazachos (2000). "Time-independent and time-dependent seismic hazard in Greece based on seismogenic sources", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 22-33.
- Papazachos, B.C. (1990), "Introduction to Seismology", Ziti Publication Co., Thessaloniki, Greece, 382pp.
- Papazachos, B., K. Makropoulos, I. Latousakis and N. Theodulidis (1989). "Compilation of seismic hazard map of Greece", 2nd Prj. EPPO-Greece, 24pp.
- Stavrakakis, G. and J. Drakopoulos (1990). "Attenuation of strong ground motion in Greece based on random vibration theory", *Proc. E.C.E.E. Lisbon*.

GROUND MOTION ATTENUATION RELATIONS FOR SHALLOW EARTHQUAKES IN GREECE

B.Margaris¹, C. Papazachos², Ch.Papaioannou¹, N. Theodulidis¹, I. Kalogeras³ and
 A.Skarlatoudis²

¹ Institute of Engineering Seismology and Earthquake Engineering,
 Thessaloniki, 55102, GREECE

² Geophysical Laboratory, Aristotle University of Thessaloniki,
 Thessaloniki, 54006, GREECE

³ Geodynamic Institute, National Observatory of Athens,
 Athens, 11810, GREECE

ABSTRACT

In the present paper new attenuation relations are proposed based on 744 records of horizontal components for the peak ground acceleration, velocity and displacement for shallow earthquakes, using 474 strong motion recordings from earthquakes in the Greek area. The data set used consists of records from 142 mainly normal faulting earthquakes with magnitudes $4.5 \leq M_w \leq 7.0$ and epicentral distances $1 \text{ km} \leq R \leq 150 \text{ km}$. The data analysis incorporates the soil classification according to NEHRP (1994) [1]. Comparisons with other predictive relations from other regions are also carried out.

Keywords: Strong motion attenuation; shallow earthquakes; Greece;

INTRODUCTION

Seismic hazard assessment is commonly based on empirical predictive attenuation relations. Such relations are generally expressed as mathematical functions relating a dependent variable to parameters characterising the earthquake source, propagation path and local site conditions. To date many attenuation relations for peak ground acceleration, velocity and displacement have been published based on ever increasing number strong motion data from the Circum Pacific region [2-10], as well as from Europe and Middle East region [11-16].

Since the first installation of accelerographs in Greece – in early 1970's – strong motion data recordings are progressively increasing. Especially, during the last decade, the number of strong motion recordings has significantly increased due to digital instruments deployed both as permanent national networks and temporary arrays during aftershock sequences. Automatic digitization and new correction techniques have increased the reliability of strong motion data set particularly in the low frequency content (e.g. $f < 1 \text{ Hz}$). In addition, more accurate earth structure models in Greece led to decreasing errors in hypocenter determination. Taking into account the aforementioned, based on the to date (1973-1999) available strong motion

recordings from shallow earthquakes in Greece new attenuation relations of peak ground acceleration, velocity and displacement of horizontal strong ground motion are defined. These relations are compared with relevant recent ones proposed for Greece or for other regions with comparable seismotectonic environment.

DATA USED

The data used in the present study consist of 474 strong motion recordings, from 142 mainly normal faulting shallow earthquakes in Greece (ITSAK: www.itsak.gr and NOA: www.noa.gr). This data set come from all the available accelerograms in Greece, during the period 1973-1999, after satisfying at least one of the following criteria: (a) The earthquake which triggered the instrument has a moment magnitude of $M_w \geq 4.5$, (b) The strong motion record has a peak ground acceleration $PGA \geq 0.05g$ independently of the earthquake magnitude and (c) The record has $PGA < 0.05g$ but there is another one with $PGA \geq 0.05g$ which come from the same earthquake. All recordings of the data set used were automatically digitized and processed homogeneously [17]. Special attention was paid determining the digital filters of the data processing in order to estimate PGD. Data recorded in 4-story buildings and higher are excluded from this set. The finally chosen data set for regression analysis consist of 744 horizontal components. For the completeness of the database used in this study the epicenters of the earthquakes of a recent catalogue compiled by the Geophysical Laboratory of the Aristotle University of Thessaloniki were adopted [18]. The size of the earthquakes in this catalogue is expressed in a scale equivalent to the moment magnitude, M_w , which it was suggested to be a suitable independent variable in defining attenuation relations [19].

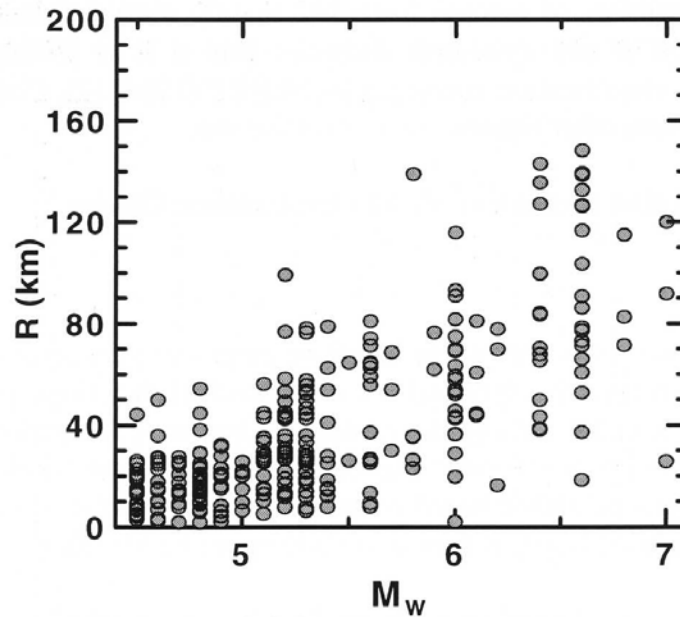


Figure 1: Distribution of epicentral distance (R) as a function of moment magnitude (M_w) of the strong motion records used in this study.

In Figure 1 the distribution of moment magnitude M_w with epicentral distance, (R), of the recordings used in this study is shown. It is observed that there is a correlation between these two parameters raising some difficulties in defining attenuation relations. In fact, for small

magnitudes $4.5 \leq M_w \leq 5.0$ recordings exist mainly in short, $R \leq 40$ km, epicentral distances. On the contrary, large magnitude events are recorded at intermediate and long distances. For $M_w > 6.0$ there is lack of observations in the near field, ($R < 20$ km).

Figure 2a and 2b show the distribution of PGA values as a function of epicentral distance and magnitude M_w . A dense area of points for distances up to 40 km is observed for PGA values less than 0.1g. Similar remarks can be made, for $M_w < 5.5$.

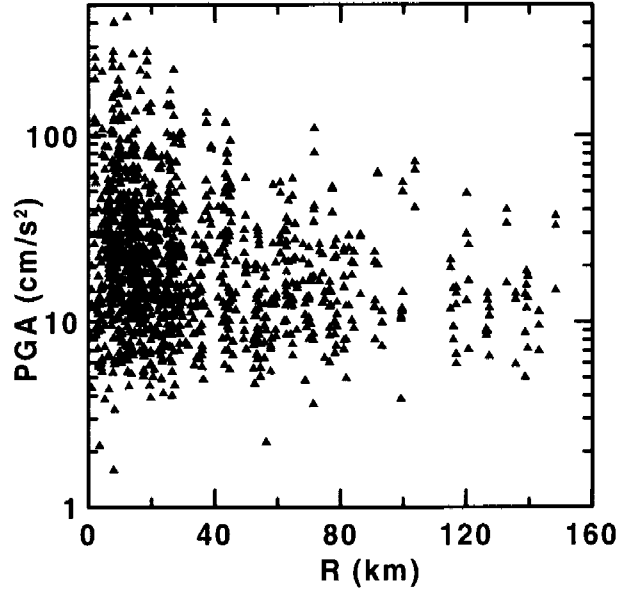


Figure 2a: Distribution of the peak ground accelerations (PGA) as a function of the epicentral distance (R) for the strong motion recordings used in the present work.

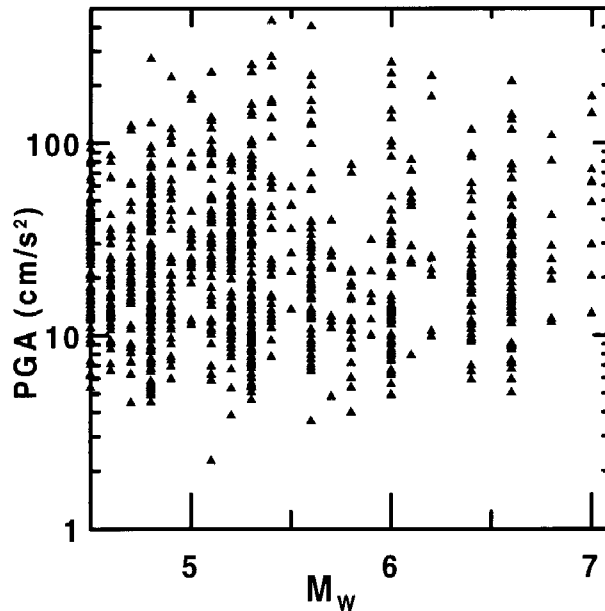


Figure 2b: Distribution of the peak ground accelerations (PGA) as a function of the moment magnitudes (M_w) for the strong motion recordings used in the present work.

Regarding the local site conditions the classification proposed by NEHRP [1] and UBC [20] was used. Based on existing geotechnical data site conditions at the recording stations were

classified in 5 categories, namely, A, B, C, D, E. In our case the vast majority of data corresponds only to the categories B, C and D that were finally adopted in this study. As a result from the total of 1488 horizontal components used, 290 belong to category B, 756 to C and 442 to D.

EMPIRICAL PREDICTIVE MODELS AND RESULTS

For the definition of the predictive relations optimization technique was used. The optimization procedure was based on the least square method in one step by using the singular value decomposition method. Such an analysis allows the stability control of the final solution and was adopted because of the observed correlation in our data set between magnitude and epicentral distance (Fig. 1).

The following two equations were examined in the regression analysis,

$$\ln Y = c_0 + c_1 M_w + c_2 \ln(R+R_0) + c_3 S \quad (1)$$

$$\ln Y = c_0 + c_1 M_w + c_2 \ln(R^2+h_0^2)^{1/2} + c_3 S \quad (2)$$

where Y is the strong motion parameter to be predicted, M_w is the moment magnitude, R is the epicentral distance, S is a variable which takes the value 0 for the soil category B, 1 for the C and 2 for the D. Scaling coefficients c_0 , c_1 , c_2 , c_3 are to be determined from regression analysis. Coefficient R_0 of Eq(1) accounts for saturation in the near field, while h_0 is known as “effective” depth of an event, that is, depth where seismic energy is released. Both Eq(1) and Eq(2) are practically similar apart from the fact that the former has a simple term for distance [21] and in the near field they give slightly different results.

A two step regression analysis was followed [22,23]. In the first step using all recordings of the data set scaling coefficient of magnitude, c_1 , was determined. In the second step scaling coefficients c_0 , c_2 , c_3 , were determined using recordings from earthquakes with $M_w \geq 5.0$. The “effective” depth, h_0 , or the parameter R_0 is difficult to be determined directly by regression analysis on the available data given its strong correlation with scaling coefficient c_2 , as it was shown using appropriate Monte-Carlo simulations [24]. For this reason values of $R_0=6\text{km}$ and $h_0=7\text{km}$ were adopted for PGA attenuation relation, that correspond to the average focal depth of the events used in the present study as well as to the average “effective” depth calculated using Eq(1), Eq(2), respectively, and macroseismic data for the area of Greece [25]. In a similar way for PGV and PGD attenuation relations values of $R_0=5\text{km}$ and $h_0=6\text{km}$ were adopted for Eq(1) and Eq(2), respectively.

Following the aforementioned method the following pairs [Eq(1), Eq(2)] attenuation relations were defined for horizontal PGA(cm/sec^2), PGV(cm/sec) and PGD(cm), respectively:

$$\ln \text{PGA} = 4.16 + 0.69 M_w - 1.24 \ln(R+6) + 0.12 S \pm 0.70 \quad (3)$$

$$\ln \text{PGA} = 3.52 + 0.70 M_w - 1.14 \ln(R^2+7^2)^{1/2} + 0.12 S \pm 0.70 \quad (4)$$

$$\ln \text{PGV} = -1.51 + 1.11 M_w - 1.20 \ln(R+5) + 0.29 S \pm 0.80 \quad (5)$$

$$\ln \text{PGV} = -2.08 + 1.13 M_w - 1.11 \ln(R^2+6^2)^{1/2} + 0.29 S \pm 0.80 \quad (6)$$

$$\ln \text{PGD} = -6.63 + 1.66 M_w - 1.34 \ln(R+5) + 0.50 S \pm 1.08 \quad (7)$$

$$\ln \text{PGD} = -7.26 + 1.68 M_w - 1.24 \ln(R^2+6^2)^{1/2} + 0.50 S \pm 1.08 \quad (8)$$

The last term gives the ± 1 standard deviation of each relation. In Figure 3 the mean ± 2 standard deviations of horizontal PGA attenuation relation proposed in this study is shown as a function of distance along with data normalized to $M_w=6.5$. It can be observed that the vast majority of the data are enveloped between $\pm 2\sigma$, showing the validity of the proposed relation. Residuals of the horizontal PGA, PGV and PGD are plotted against distance, R , using Eq(2) in Figure 4. No apparent trend of the residuals is observed.

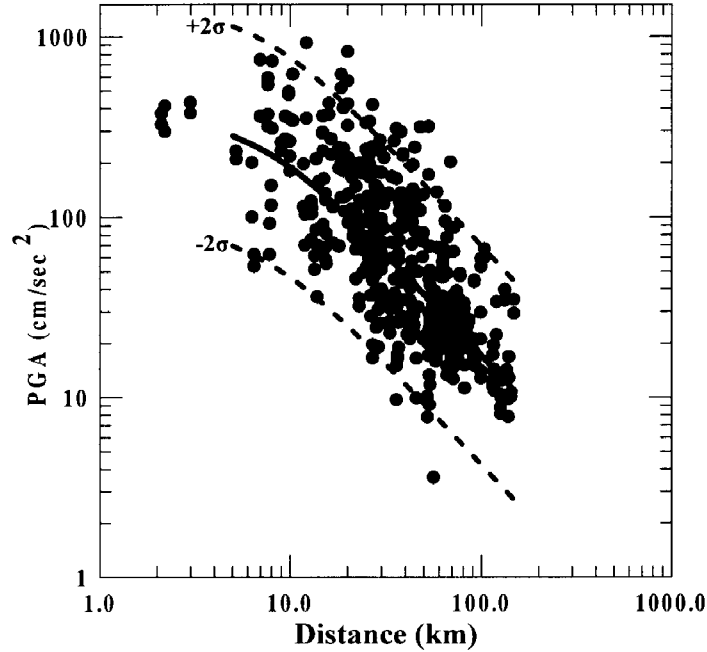


Figure 3: Comparison of the horizontal PGA empirical relation with $\pm 2\sigma$ with the observed values scaled to $M=6.5$.

From Eqs. (3) to (8) it is concluded that there is a systematic increase of predicted strong ground motion going from “hard” to “soft” soil conditions. Such an increase seems to be more intense for velocity and even more for displacement than for acceleration as is generally expected. Although a simple linear correspondence between soil categories $B \rightarrow S=0$, $C \rightarrow S=1$, $D \rightarrow S=2$ has been chosen based on geotechnical data and the available shear wave velocities of the surficial layers of the recording stations, it seems to work reasonably when quantifying soil influence on strong ground motion.

COMPARISON WITH SIMILAR ATTENUATION RELATIONS AND DISCUSSION

Comparison of the proposed horizontal PGA attenuation relations with those previously proposed for the area of Greece [26], for soil category $C \rightarrow S=1$, are shown in Figure 5. Significant differences are observed mainly for large magnitudes with the latter giving higher values of about 60%-90% than the former. This is mainly due to relatively high scaling coefficient of magnitude, $1.01 \leq c_1 \leq 1.12$, of the relations proposed by Theodulidis [26].

In Figure 6 comparison of the horizontal PGA relations with those proposed by Ambraseys [15], for “rock” ($S=0$) soil conditions, is shown. For distances up to about 30km a good agreement is observed whereas for longer distances the latter relations give higher PGA values. Such a deviation may be due to different data sets used in regression analyses. For instance, Ambraseys used data from various seismotectonic environments that extend to long site-to-source distances [15].

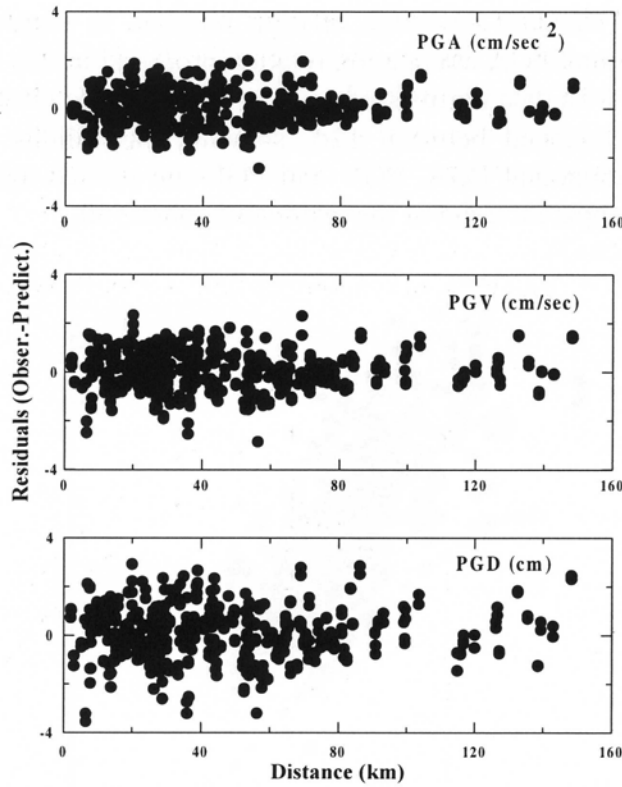


Figure 4: Distribution of the residuals of the peak ground acceleration, velocity and displacement in terms of distance.

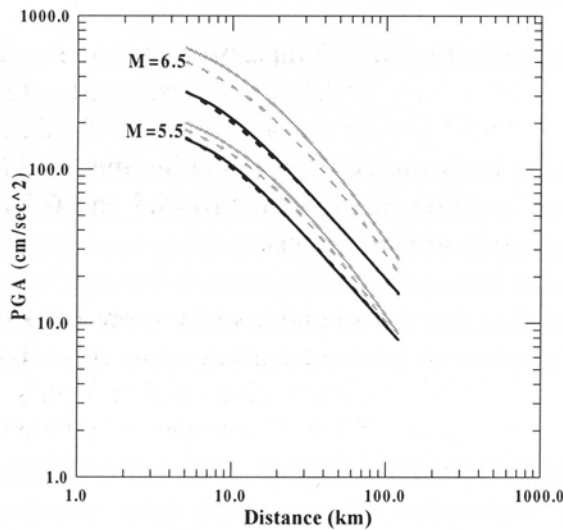


Figure 5: Comparison of the PGA empirical relations, Eqs. (3) (black continuous line) and (4) (black dashed line) with those proposed by Theodulidis [26] for Greek data (grey dashed line) and Greek data enriched with other strong motion data (grey continuous line).

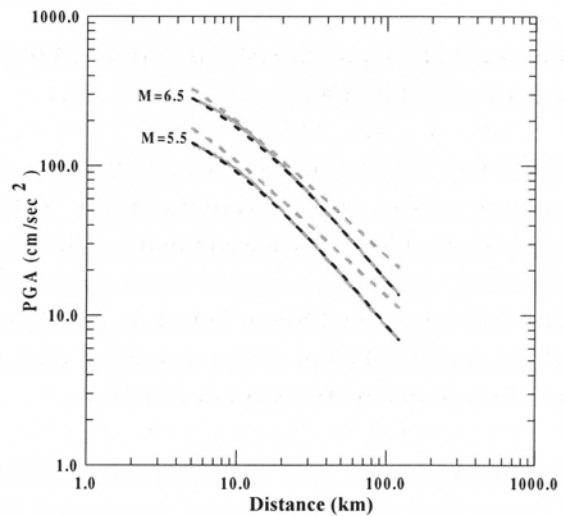


Figure 6: Comparison of the PGA empirical relations, Eqs. (3) (grey continuous line) and (4) (black dashed line) with those proposed by Ambraseys [15] (grey dashed line) for $M=5.5$ and 6.5 and rock soil conditions.

Sabetta and Pugliese based on strong motion data from normal and thrust faulting-type earthquakes occurred in Italy, proposed horizontal PGA and PGV attenuation relations [14].

In Figure 7 comparison of their horizontal PGA attenuation relation with those presented in this study, for “rock”(S=0) soil conditions, shows systematically higher values of the former. This difference may be due to the fact that Italian data come from both normal and thrust faulting events while the Greek data mainly from normal faulting. Spudich based on strong motion data from normal faulting earthquakes proposed horizontal PGA attenuation relation, [23], that is compared with PGA attenuation relation of this study, for “rock”(S=0) soil conditions (Figure 8). For magnitude $M_w=6.5$ there is good agreement between the two relations while for $M_w=5.5$ divergence mainly in long distances is observed.

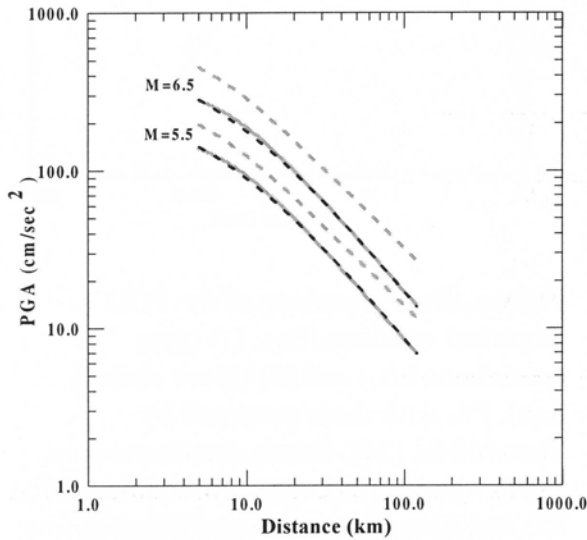


Figure 7: Comparison of the PGA empirical relations Eqs. (3) (grey continuous line) and (4) (black dashed line) with those proposed by Sabetta and Pugliese [14], (grey dashed line) for $M=5.5$ and 6.5 and rock soil conditions.

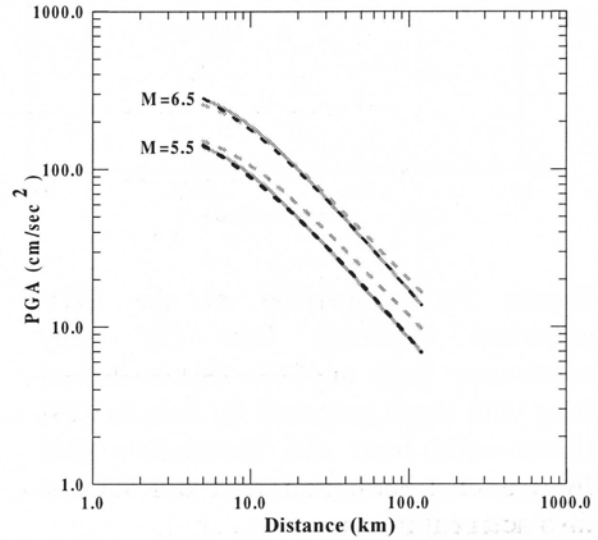


Figure 8: Comparison of the PGA empirical relations Eqs. (3) (grey continuous line) and (4) (black dashed line) with those proposed by Spudich [23], (grey dashed line) for $M=5.5$ and 6.5 and rock soil conditions.

In Figure 9 a comparison between horizontal PGV attenuation relations of the present study and those of Theodulidis [26] and Sabetta [14], shows that the latter gives up to 60% higher values for the whole distance range. That of Theodulidis although gives higher values for $R < 50$ km, at longer distances is in quite good agreement with the PGV attenuation relation of this study.

Empirical PGD attenuation relations to date have been rarely defined. This was mainly due to limited reliable data set since in low frequency strong ground motion a lot of errors (instrumental, processing, etc.) were incorporated. However, some PGD attenuation relations have been published among which those of Kawashima [6] for Japan, Theodulidis [26] for Greece and Gregor [27] for USA. Their divergence is shown in Figure 10 that reaches to about one order of magnitude at distances $R > 100$ km. Horizontal PGD values predicted by the relation of this study are in good agreement with those predicted by that of Theodulidis [26], for distances $R > 30$ km. However, in shorter distances the latter gives up to 2.5 times higher PGD values.

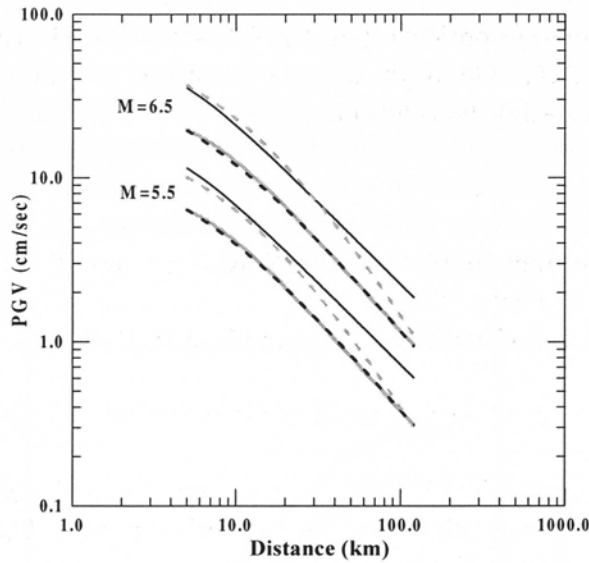


Figure 9: Comparison of the PGV empirical relations, Eqs. (5) (grey continuous line) and (6) (black dashed line) with those proposed by Sabetta [14] (black solid line) and Theodulidis [26] (grey dashed line) for $M=5.5$ and 6.5 and rock soil conditions.

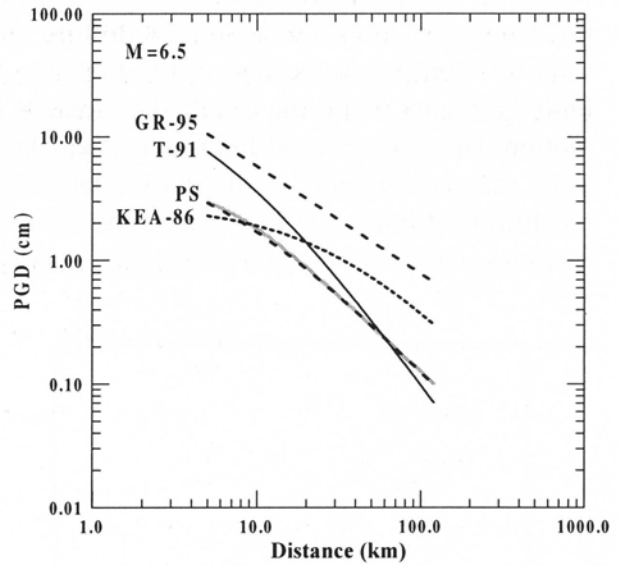


Figure 10: Comparison of the PGD empirical relations, Eqs. (7) (grey continuous line) and (8) (black dashed line), PS, with those proposed by Theodulidis [26], (black continuous line, T-91), Gregor [27], (grey dashed line, GR-95) and Kawashima [6] (black dashed line, KEA-86), for $M=6.5$ and rock soil conditions.

CONCLUSIONS

Predictive empirical relations of horizontal and vertical PGA, PGV, PGD proposed in this study were based on an extended data set of strong motion recordings. From the data distribution (see Figures 1,2,3) it can be concluded that the range of validity of the attenuation relations for the epicentral distance is $5\text{km} \leq R \leq 120\text{km}$ and for moment magnitude is $4.5 \leq M_w \leq 7.0$.

Predictive relations [Eq(3) to Eq(14)] have been compared with similar ones from other seismotectonic environments. Good agreement of horizontal PGA attenuation was found with those predicted by the relation of Spudich that was based on worldwide data from normal faulting earthquakes [23]. The data set of the present study comes mainly from normal and some strike-slip faulting type earthquakes. Quite good agreement of the attenuation relation of this study was also observed for horizontal PGV and PGD - especially in intermediate and large epicentral distances, with those proposed by Theodulidis [26].

Predictive relations of horizontal PGA, PGV, PGD defined in this study were based on a satisfactory data set of strong motion recordings in Greece and may be considered as representative of the strong motion attenuation in this area. However, deployment of a denser strong motion network in regions of Greece where thrust faulting dominates could significantly increase in the future the data set used in the present study.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was partly supported by the research projects (i)ITSAK:IT-15 & IT-17,(ii) Aristotle Univ. Thessaloniki/Res. Com.:20321, Geophysical Lab. Contrib. Number #581/2001 and (iii) European Commission EVR1-CT-1999-40008.

REFERENCES

1. NEHRP, Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings, FEMA 222A/223A, May, 1, (Provisions) and 2 (Commentary), 1994.
2. Milne, W.G. and Davenport, A.G. Distribution of earthquake risk in Canada. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1969; 59: 729-754.
3. Campbell, R.W. "Strong motion attenuation relations: A ten Year Perspective", *Earthq. Spectra*, 1985; 1: 759-804.
4. Boore D.M., Joyner, W.B. and Fumal, T.E. Estimation of response spectra and peak accelerations from Western North American earthquakes: An Interim report, U.S. Geological Survey, Open-File report 93-509, 1993; 72pp.
5. Ohsaki, Y, Watabe M. and Tohdo Analyses on seismic ground motion parameters including vertical components, *Proc. 7WCEE*, 1980; 2: 97-104.
6. Kawashima, K., Aizawa, K., Takahashi, K. Attenuation of peak ground acceleration, velocity and displacement based on multiple regression analysis of Japanese strong motion data, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*,1986;14: 199-215.
7. Molas, G.L. and Yamazaki, F. Attenuation of earthquake ground motion in Japan including deep focus events, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1995; 85:1343-1358.
8. Si, H. and Midorikawa, S. New attenuation relations for peak ground acceleration and velocity considering effects of fault type and site conditions", *Proc. 10WCEE* (cd-rom), 2000; Paper No 1964.
9. Loh, C-H., Yeh, Y.T. Jean, W.Y. and Yeh, Y.H. Seismic hazard analysis in Taiwan area using bounded fault rupture model, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1991; 81: 265-272.
10. Niazi, M. and Bozorgnia, Y. Behaviour of near-source peak horizontal and vertical ground motions over SMART-1 array, Taiwan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1991; 81: 715-732.
11. Ambraseys, N.N. and Bommer, J.J. "The attenuation of ground accelerations in Europe", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 1991; 20: 1179-1202.
12. Theodulidis N. and Papazachos B. Dependence of strong ground motion on magnitude-distance, site geology and macroseismic intensity for shallow earthquakes in Greece: I, Peak horizontal acceleration, velocity and displacement. *Soil Dyn. and Earth. Eng.*, 1992; 11: 387-402.
13. Ambraseys, N.N. "The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 1995 ; 24: 467-490.
14. Sabetta, F. and Pugliese, A. Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1996; 86: 337-352.
15. Ambraseys, N.N., Simpson, K.A. and Bommer, J.J. "Prediction of horizontal response spectra in Europe", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 1996; 25: 371-400.
16. Rinaldis, D., Berardi, R., Theodulidis, N. and Margaris B. Empirical predictive models based on a joint Italian & Greek strong motion database: I peak ground acceleration and velocity, *Proc. 11 ECEE* (cd-rom),1998.
17. Skarlatoudis A., Papazachos B. and Margaris V. Spectral noise determination from strong motion recordings in Greece (in Greek), *Proc. 2nd Hellenic Conf. on Earthq. Engin. and Eng. Seismology*, 2001 (in press).
18. Papazachos, B. C., Comninakis, P. E., Karakaisis, G. F., Karacostas, B. G., Papaioannou,

- Ch. A., Papazachos, C. B. and Scordilis, E. M. A catalog of earthquakes in Greece and surrounding area for the period 550BC-1999. Publ. Geophys. Lab. University of Thessaloniki, 2000; 1: 338pp.
19. Papazachos B., Karakostas B., Kiratzi A., Margaris B., Papazachos C., Scordilis E. Applicability of magnitude scales for defining strong motion parameters relations in Greece (in Greek), Proc. 2nd Hellenic Conf. on Earthq. Engin. and Eng. Seismology, 2001 (in press).
 20. UBC, "Uniform Building Code", 1997.
 21. Esteva, L. Seismic risk and seismic design. "Seismic Design for Nuclear Power Plants, Hansen R.J. (:editor)", MIT Press, Boston, MA, 1970; 142-182.
 22. Boore, D.M., Joyner, W.B. and Fumal T.E. Equations for estimating horizontal response spectra and peak accelerations from Western North American earthquakes: A summary of recent work, Seism. Res. Letter, 1997; 68:128-153.
 23. Spudich, P., Joyner, W.B., Lindh, A.G., Boore, D.M., Margaris, B.N. and Fletcher, J.B. SEA99: A revised ground motion prediction for use in extensional tectonic regimes, Bull. Seism. Soc. Am., 1999; 89: 1156-1170.
 24. Papazachos C.B. and Papaioannou, Ch. Further information on the macroseismic field in the Balkan area (Reply on the comment of M. D. Trifunac on the paper "The macroseismic field of the Balkan area"), J. Seismology, 1998; 2: 363-375.
 25. Papazachos C.B. and Papaioannou, Ch. The macroseismic field of the Balkan area, J. Seismology, 1997; 1: 181-201.
 26. Theodulidis, N.P. Contribution to strong ground motion study in Greece, PhD Thesis (in Greek), 1991; 500pp.
 27. Gregor, N. J. The attenuation of strong ground motion displacements, Earthquake Eng. Res. Cent., Univ. Cal. Berkeley, Rep No., UCB/EERC-95/02, 1995; 219pp.

STRONG MOTION SIMULATION OF LARGE INTERMEDIATE DEPTH EARTHQUAKES IN SE EUROPE

N. P. Theodulidis

Institute of Engineering Seismology and Earthquake Engineering (ITSAK),
 Thessaloniki, 55102 Finikas, GR

ABSTRACT

Large intermediate depth subduction zone earthquakes occurred in southern Aegean (Hellenic arc) in the past, causing extended damage not only to neighbouring countries but also to northern Africa and Middle East. The biggest known one occurred in October 12, 1856 ($M \approx 7.8$) close to Crete island whereas another one with slightly smaller magnitude occurred in June 26, 1926 close to Rhodes island. There are no strong motion recordings from such large events in southern Aegean due to the fact that only during the last 20 years a few accelerographs have been installed mainly in SW Peloponnese and in the islands of Crete and Rhodes. However, strong motion recordings from a moderate magnitude intermediate depth earthquake ($M \approx 6.0$), have been obtained allowing for strong motion simulation of large events using the empirical Green's function technique (EGF). In this paper the EGF technique is used and forward modelling results are compared with observed macroseismic data. Simulated strong ground motion is compared with elastic design spectra of the Greek seismic code as well as with strong motion values from empirical predictive models.

Keywords: Intermediate depth earthquakes; Strong motion; Empirical Greens' function (EGF)

INTRODUCTION

During the last 20 years many research efforts have been made in strong motion simulation of large events. For this purpose, theoretical and empirical methods were developed. Among the most promising methods is that of the empirical Green's function (EGF) originally proposed by Hartzell (1978). Due to its very clear idea of using recordings of small events - that incorporate propagation path and site effect properties - in order to simulate larger ones using certain source scaling laws, development of the EGF method was fast during the last two decades (Irikura, 1983, 1986, Irikura and Kamae 1994, Kamae et al. 1998). In Greece some efforts were made using the EGF method for simulation of crustal events "*a posteriori*" (Theodulidis and Bard 1994, Diagourtas et al. 1994, Roumelioti et al. 2000, Pavic et al. 2000, Zahradnik and Tselentis 2000). However, no effort has been attempted for simulation of large ($M \geq 7.5$) intermediate depth subduction zone earthquakes that occur in southern Aegean area and caused in the past very large destruction in a widely spread area of the southeastern Mediterranean (Fig. 1a) (Sieberg 1932, Papazachos and Papazachou 1997). In

this paper, using as empirical Green's function an accelerogram recorded at the city of Iraklio, Crete island (Greece), from a moderate magnitude event (M6.1) of an intermediate depth subduction zone fault, forward modeling is attempted. Such a simulation may exhibit gross characteristics of strong motion in the near field of an expected large intermediate depth event. Simulated strong motion is compared and discussed with macroseismic observations of the largest known historical event from the same seismic source as well as with results from empirical predictive models and code provisions in force.

METHOD AND DATA USED

Empirical Green's Function(EGF) Method

In order to simulate the observed strong ground motions from a target event the methodology proposed by Irikura (1983, 1986) was used. Irikura (1983) combined EGF technique with similarity laws of earthquakes and dislocation model of Haskell (1964). Under the similarity assumption, when two events with different magnitude occur within the region of the same seismic source, the following similarity relations was derived,

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

where L is the length and W the width of the rectangular seismic source, respectively, D is the final offset of the dislocation, τ is the rise time and M_0 is the seismic moment. The parameters without subscript are for the target event and those with subscript, e , are for the element event that is going to be used as an EGF. N is the scaling parameter (equal to the closest integer), necessary for the discretization of the target fault and C is the ratio of the stress drop of the target event to the stress drop of the element event. Kamae *et al.* (1998) underlined the importance of the parameter C in the correct estimation of the simulated spectrum level.

Taking into account the aforementioned relations, the seismogram $A(t)$ of the target event is calculated from the relation:

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

where,

$$F(t) = \delta(t) + \frac{1}{n'} \sum_{j=1}^{(N-1)n'} \delta\left[t - \frac{(j-1)T}{(N-1)n'}\right] \quad \text{and} \quad t_i = \frac{r_i}{V_c} + \frac{\xi_i}{V_r} + e_i \quad (3)$$

In the above relations $a(t)$ is the seismogram of the element event, r is the hypocentral distance of the element event, r_i is the distance of the observation point to the center of the subfault i , ξ_i is the distance of the rupture initiation point to the center of the i th subfault, V_r is rupture velocity, V_c is the velocity of the seismic waves studied, T is the rise time of the target event and n' an integer to eliminate spurious periodicity (Irikura, 1983). The function $F(t)$ is introduced to account for a difference in the slip time function of the target event and that of the element event. The first term of the right hand part of equation (3) represents a delta function, $\delta(t)$, and the second term represents a square pulse of duration T . e_i is a random number used to give a random character to the rupture

propagation process. Due to the slope of the fault of the target event with an angle of about 30°(Fig. 1b), a slight modification of the EGF code input parameters was introduced as “geometric” correction.

Data Used

Source parameters used as input data (seismic moment, M_0 , fault area, S and fault width, W) are estimated from the following empirical scaling relations with moment magnitude, M , proposed for Greece and the surrounding area (Papazachos and Papazachou 1997),

$$\log S = 0.70M - 1.98 \quad (4)$$

$$\log W = 0.19M - 0.13 \quad (5)$$

$$\log M_0 = 1.5M + 16.01 \quad (6)$$

It was assumed that these relations proposed for shallow crustal events in the Aegean and the surrounding area also hold for intermediate depth subduction zone earthquakes.

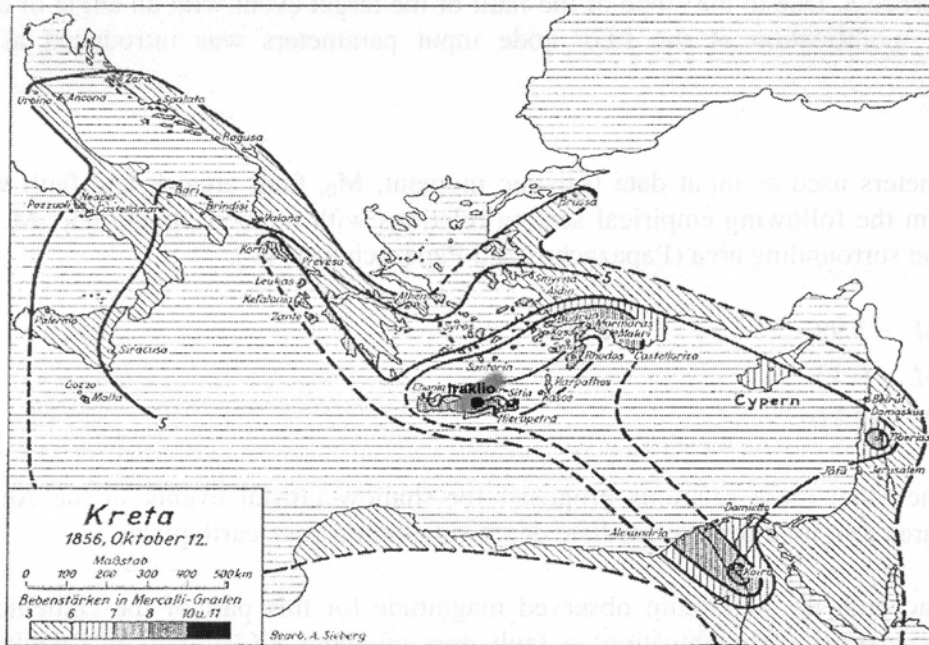
Taking into account the maximum observed magnitude for this part of the Hellenic arc, $M \approx 7.8$, (Papazachos, personal communication) a fault area of about $3 \times 10^3 \text{ km}^2$ is calculated based on relation (4). In addition, the largest fault length of the maximum credible event - following the geometry of the subducted slab (Papazachos et al. 2000) - could be around 110km, starting from a depth of about 40km down to 90km (Fig. 1b). Such a length and area of a fault may result to a fault width, W , of about 27km, following the relation (5). Using the relation (6) between moment M_0 and moment magnitude M , the target event corresponds to a moment of $M_0 = 5.13 \times 10^{27} \text{ dyn.cm}$ while the element event of $M_{0e} = 1.45 \times 10^{25} \text{ dyn.cm}$. The rise time, τ , may be estimated from the empirical relation (Geller, 1976),

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

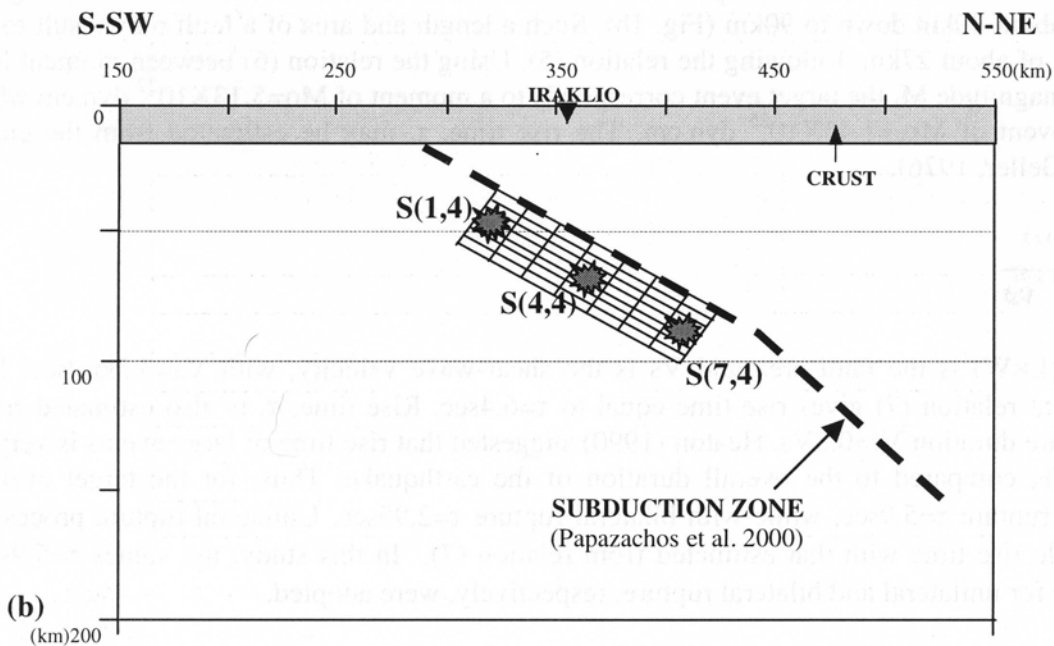
where S ($L \times W$) is the fault area and V_s is the shear-wave velocity, with $V_s = 3.5 \text{ km/sec}$. For the target event relation (7) gives rise time equal to $\tau = 6.4 \text{ sec}$. Rise time, τ , is also estimated from the total rupture duration $V_r = 0.8V_s$. Heaton (1990) suggested that rise time of large events is very short, about 15%, compared to the overall duration of the earthquake. Thus, for the target event with unilateral rupture $\tau = 5.9 \text{ sec}$, while with bilateral rupture $\tau = 2.95 \text{ sec}$. Unilateral rupture process gives comparable rise time with that estimated from relation (7). In this study, the values $\tau = 5.9 \text{ sec}$ and $\tau = 2.95 \text{ sec}$ for unilateral and bilateral rupture, respectively, were adopted.

Only a few strong motion recordings were acquired during the last 20 years – operation time of ITSAK's strong motion network – from intermediate depth subduction events in southern Aegean. The most important of them come from the May 23, 1994 earthquake ($M 6.1$) and was recorded at the city of Iraklio and Chania both on Crete island. Source parameters of this earthquake, used as element event, have been published by various seismological centers (Table 1).

As the most reliable hypocentral location was considered that of ISC because its solution was based on the largest number of stations (>700). For depth determination the ISC used also the pP phase.



(a)



(b)

Figure 1: (a) Macroseismic field due to large(M7.8) target event (Sieberg 1932) and (b) Fault plane of the target event divided by 7X7 element faults; starting rupture point for three examined scenarios S(1,4), S(4,4) and S(7,4) are shown by exploding stars.

The earthquake moment magnitude was taken M6.1 and as focal mechanism that proposed by the NEIC. According to NEIC the focal mechanism is moderately well controlled and corresponds to strike-slip faulting with a large reverse component. Although the preferred fault plane is not

determined, the one with strike=70°, dip=70°, rake=137° was considered as the most probable since it is in good agreement with the typical fault plane solution of the examined area (Papazachos, 1996).

TABLE 1.
SOURCE PARAMETERS OF THE ELEMENT (SMALL) EVENT

Origin time	Coordinates		Magnitude	Moment (dyn.cm)	Depth (km)	Focal Mechanism			Ref.
	Lat.	Long.				strike	dip	rake	
1994/05/23 06:46:15.16	35.54	24.70	5.9(m _b)		73.5	-	-	-	(1)
1994/05/23 06:46:16.29	35.57	24.74	5.8(Mw)		79	-	-	-	(2)
1994/05/23 06:46:16.30	35.40	24.73	6.1(Mw)		81	-	-	-	(3)
1994/05/23 06:46:16.10	35.56	24.73	6.1(Mw)		76	70	70	137	(4)
1994/05/23 06:46:19.90	35.02	24.89	6.1(Mw)	1.49X10 ²⁵	81	76	70	151	(5)

(1) ISC (International Seismological Center), (2) GLAB (Geophysical Laboratory University of Thessaloniki), (3) GEIN(Geodynamic Institute National Observatory Athens), (4) NEIC (National Earthq. Information Center) (5) HRVD (Harvard University)

TABLE 2
INPUT PARAMETERS FOR THE EGF METHOD APPLICATION

Source Parameters	Target Event	Element Event
M _w	7.8	6.1
M ₀ (dyn.cm)	5.13 × 10 ²⁷	1.45 × 10 ²⁵
Epicenter (φ°N - λ°E)	35.40 24.75 [S(1,4)] 35.70 25.10 [S(4,4)] 35.90 25.40 [S(7,4)]	35.54 24.70
Strike (°)	48	70
Dip (°)	51	70
Rake (°)	150	137
Hypocentral Depth (Km)	45 or 70 or 90	73.5
Fault Length (Km)	110	15.7
Fault Width (Km)	27	3.9
Rise Time (sec)	5.6 or 2.95	0.8

There are no information for stress drop of large intermediate depth events in southern Aegean. Assuming that the stress drop of the element event is equal to that of the target event and taking into account relation (1) the factor N is calculated to be of about 7. Consequently, fault plane of the target event may be divided to 7X7 subfaults that have dimensions 15.7km in length and 3.9km in width. Typical focal mechanism of the target event is taken to be strike=48°, dip=51°, rake=150° (Papazachos 1996). Using relation (6) and the moment published by Harvard, moment magnitude, M, is equal to 6.1 as it was published by the majority of seismological centers. A summary of all modelling parameters used for the two simulations is listed in Table 2. Three rupture scenarios were examined and in all of them radial rupture was considered. Namely, two unilateral rupture scenarios

with the starting point at the two ends of the fault (S[7,4], S[1,4]) and one bilateral at the center of the fault (S[4,4]) were examined (see Figure 1b and Table 2).

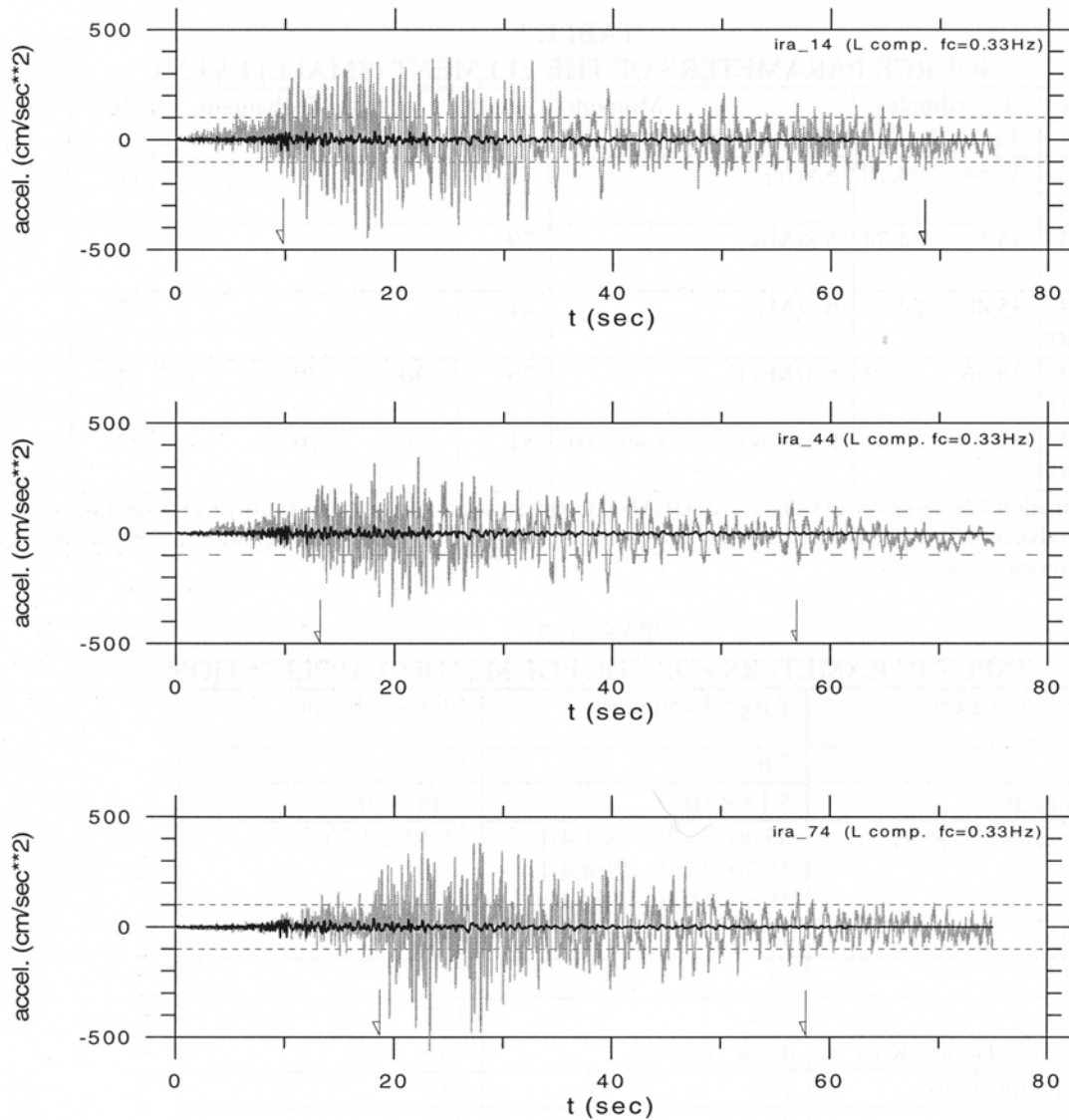


Figure 2: Recording of the 23/5/1994 (M6.1) EGF element event (black line); simulated acceleration time history of the target event (M7.8) for three rupture scenarios for the city of Iraklio (grey line).

RESULTS

In this study EGF simulation results using only one horizontal component, the one with the highest peak ground acceleration recorded at Iraklio, are shown. In Figure 2 acceleration time history of the element event (M6.1) together with simulated strong motion of the target event (M7.8) for three rupture scenarios are given. Strong motion duration - time span between the first and last peak with acceleration $\geq 0.10g$ - varies from about 40sec to 60sec, depending on the rupture scenario. The shortest strong motion duration, 40sec, comes from the S(7,4) scenario of unilateral rupture while

the longest one, 60sec, from the S(1,4). The highest PGA, 0.50g, appears at the case of S(7,4) and the lowest PGA, 0.30g, at the S(4,4) for bilateral rupture.

Pseudoacceleration response spectra -5% damped- for the three aforementioned rupture scenarios are shown in Figure 3. In the same Figure elastic design spectra for the seismic zone category III of the Greek seismic code – where the site of Iraklio falls – are given for soil categories A & B (Greek Seismic Code, 2000). Spectral values of the target event exceed those imposed by code provisions for almost all periods, especially in the range $0.15\text{sec} \leq T \leq 0.7\text{sec}$ and $1.0\text{sec} \leq T \leq 1.8\text{sec}$. The highest spectral acceleration, around 2g, is observed at 0.3sec.

Empirical predictive models for pseudoacceleration based on subduction zone strong motion data have been published for various regions of the world. In this study two of them were used in order to compare their results with those of the simulated target event. One model was proposed by Theodulidis and Papazachos (1990) [TP90] and was based mainly on thrust fault intermediate depth events ($40\text{km} \leq h \leq 160\text{km}$) of several subduction zones worldwide, while the other (Molas and Yamazaki, 1996) [MY96] was based on Japanese data from interplate events ($0.1\text{km} \leq h \leq 200\text{km}$). As shown in Figure 4, average plus one standard deviation spectral accelerations predicted by the [TP90] model are in very good agreement with simulated ones for periods up to 1.5sec. For longer periods simulated values are up to 2 times higher. On the other hand, average plus one standard deviation spectral accelerations predicted by the [MY96] model are in good agreement with simulated ones for periods greater than 0.7sec, while for shorter periods they are up to 2 times lower. However, an envelope of both empirical predictive models gives spectral acceleration values which are in agreement with the simulated ones.

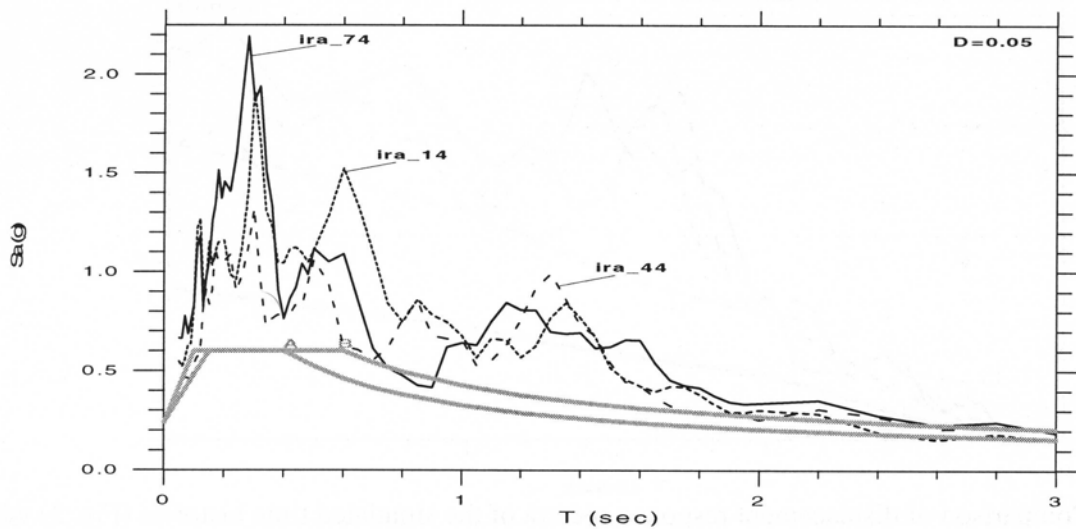


Figure 3: Pseudoacceleration response spectra of the simulated time histories (Fig. 2) in comparison with elastic design spectra of Greek Seismic Code(2000) [Zone III, Soil Categories A, B].

The new trend of seismic code provisions towards displacement-based design led to definition of displacement response spectra attenuation relations in Europe (Bommer and Elnashai, 1999) [BE99]. For the target event, $M=7.8$ & $R=40\text{km}$, average plus one standard deviation spectral displacement values predicted by the [BE99] model, are shown in Figure 5. In the same Figure, spectral

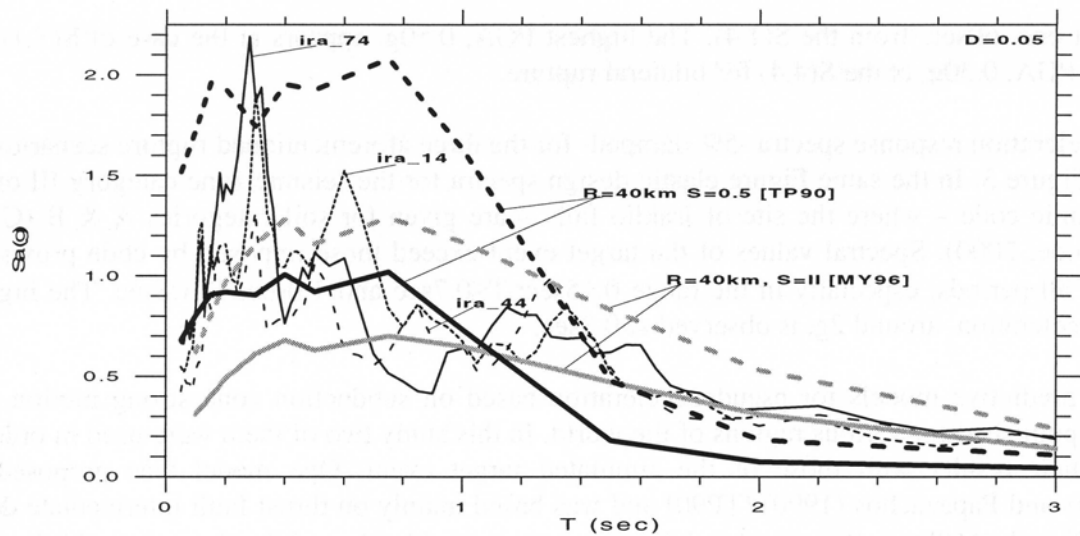


Figure 4: Comparison of pseudoacceleration response spectra of the simulated time histories (Fig. 2) with average $+1\sigma$ spectra proposed by the [TP90] and [MY96] empirical models.

displacements of the simulated target event for the examined three rupture scenarios, are given. For short to intermediate periods, $T < 1\text{sec}$, the latter fall between the average and plus one standard deviation of those predicted by the [BE99] model. However, for longer periods simulated spectral displacements are much higher than the empirical ones especially in periods around 1.5sec where they reach up to 2.5 times higher values.

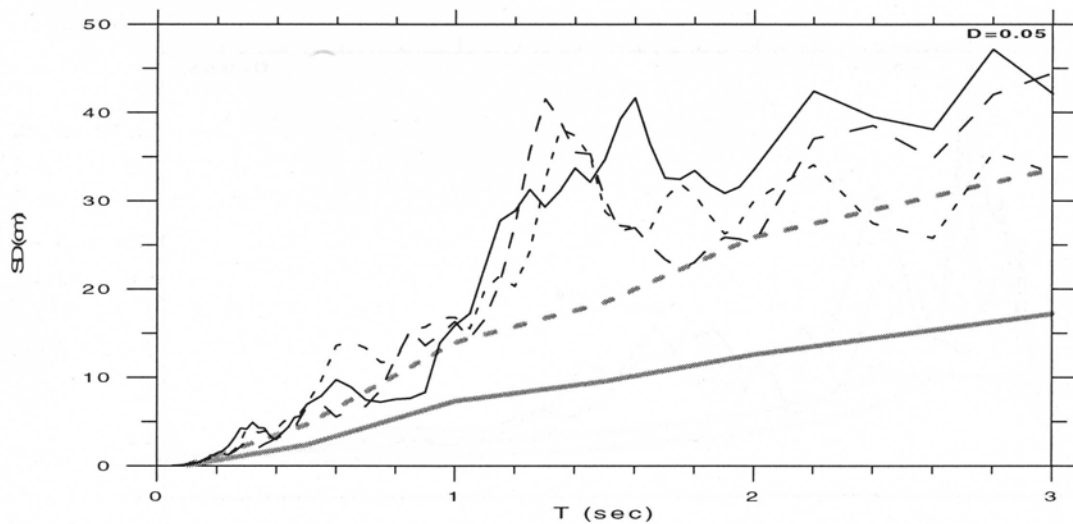


Figure 5: Comparison of displacement response spectra of the simulated time histories (Fig. 2) with average $+1\sigma$ spectra proposed by the [BE99] empirical model.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

In this study strong ground motion in the near field of a large intermediate depth subduction zone earthquake (M7.8) at the southern Aegean area is estimated, using the empirical Green's function

method. For this purpose, as element event strong ground motion of a moderate magnitude event (M6.1) recorded at the city of Iraklio-Crete island (Greece) is used.

Simulated strong ground motion for three rupture scenarios, two unilateral and one bilateral, gave PGAs ranging between 0.5g and 0.3g. Strong motion duration - time span between the first and last peak with acceleration $\geq 0.10g$ - for the unilateral rupture scenario S[7,4] has the shortest value, ~40sec, that is in agreement with the rupture directivity towards the city of Iraklio while the longest strong motion duration, ~60sec, corresponds to the scenario S[1,4]. According to Papazachos and Papazachou (1997) from the earthquake of October 1856 (M7.8), "...the city of Iraklio and the surrounding area suffered the largest destructions. From the 3620 houses, which the city had at that time, only 18 were standing up and were inhabitable". Estimated values of PGA and strong motion duration of the target event seem to be reasonable and in agreement with the damage caused in the past. Furthermore, according to the same authors, "...in Rhodos, the earthquake lasted from 40sec up to 90sec and caused destructions in 8 villages where 2000 houses became uninhabitable...". Although Rhodos island is at a distance of about 200km from the target event fault, strong motion duration seems to be consistent with the estimated one.

Comparison of spectral accelerations of the target event for all three rupture scenarios with empirically predicted ones (average $+1\sigma$) based on two predictive models showed good agreement. Extrapolating empirical predictions at the far field, ~650km, and using the [TP90] model, expected PGA for a target event (M7.8) on stiff soil conditions, may take values of about 0.05g. Such small PGA values hardly can justify macroseismic intensities observed, ~VII+ of Mercalli scale, for instance at the northern Egypt (Alexandria). However, the long duration, ~90sec, that the October 1856 (M7.8) event lasted at this area (Papazachos and Papazachos 1997), as well as site effects due to Nile delta deposits, might have strongly amplify weak ground motion leading to a "mini" Mexico City (event of 1985) phenomenon.

It was found that at short and intermediate periods, $0.15\text{sec} \leq T \leq 0.7\text{sec}$, simulated target event give much higher, up to 3 times, spectral values than the elastic design spectra proposed by the Greek seismic code. In this case ductility demands that may be imposed by the target event are about 3. It is interesting to note that apart from the short and intermediate periods, also at long periods, $T \approx 1.5\text{sec}$, target event gives up to 3 times higher spectral values than those of the seismic code. This discrepancy is also obvious in the comparison of simulated spectral displacements with empirically predicted ones by the [BE99] model (Figure 5). Such spectral values could have strong implication to multi-storey buildings (say >10 stories) as well as to flexible long period structures.

Results of the present study show the reliability - although qualitatively - of the EGF approach and are encouraging in simulating strong ground motion of large intermediate depth subduction zone earthquakes in SE Europe. However, small to moderate magnitude intermediate depth events should be recorded at selected sites where strong motion of the target events are going to be simulated. For this purpose, high resolution accelerographs must be deployed at selected sites of southern Greece as well as of eastern Mediterranean cities.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was financially supported by the EPPO projects Contr. No.4121-17/2000 (*Seismic Hazard Map of Greece*) & 20246/2000. K. Irikura and H. Miyake made valuable suggestions on EGF code. B. Papazachos and V. Karakostas contributed with fruitful discussions on the Hellenic arc seismotectonic properties.

REFERENCES

1. Bommer J. and Elnashai A. Displacement spectra for seismic design. *J. Earth. Engin.* 1999; 3:1-32.
2. Diagourtas, D., Makropoulos, K. C., Gariel, J. – C., Wajeman, N., Hatzfeld, D. and P. – Y. Bard. Simulation of strong ground motion of the 14 July 1993 Patras earthquake and its contribution to the assessment of seismic hazard, Patras region, W. Greece, *Proc. XXIV Gen. Ass. E.S.C.* 1994; **III**, 1446 – 1454.
3. Geller, R. J. Scaling Relations for Earthquake Source Parameters and Magnitudes, *Bull. Seism. Soc. Am.* 1976; 66:1501 – 1523.
4. Greek Seismic Code , editor EPPO, 2000.
5. Hartzell, S. Earthquake Aftershocks as Green's Functions, *Geophys. Res. Let.* 1978; 5: 1 – 4.
6. Haskell, N. A. Radiation Pattern of Surface Waves from Point Source in a Multi – Layered Medium, *Bull. Seism. Soc. Am.* 1964; 54:377 – 393.
7. Heaton T. Evidence for and implications of self-healing pulses of slip in earthquake rupture. *Physics Earth & Planet. Interior* 1990; 64:1-20.
8. Irikura, K. Semi – Empirical Estimation of Strong Ground Motions during Large Earthquakes, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst.* 1983; 33 *Kyoto Univ.*: 63 – 104.
9. Irikura, K. Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp.* 1986; 151-156.
10. Irikura K. and Kamae, K. Estimation of strong ground motion in broad-frequency band based on a seismic source scaling model and an empirical Green's function technique, *Annali di Geofisica* 1994;37:1721 – 1743.
11. Kamae, K., P-Y. Bard, and K. Irikura. Prediction of strong ground motion at EUROSEISTEST site using the empirical Green's function method, *J. Seismology* 1998; 2: 193-207.
12. Molas G. and Yamazaki F. Attenuation of response spectra in Japan using new JMA records. *Bull. ERS* 1996; 29:115-128.
13. Papazachos B., Large seismic faults in the Hellenic arc, *Annali di Geof.* 1996; XXXIX(5), 891-903.
14. Papazachos B. and C. Papazachou. The earthquakes of Greece, 1997; *Ziti Publ. Co.*, 356 pp.
15. Papazachos B., Karakostas V., Papazachos C. and Scordilis E. The geometry of the Wadati-Benioff zone and lithospheric kinematics in the Hellenic arc. *Tectonophysics* 2000; 319: 275-300.
16. Pavic R., Koller M., P-Y. Bard, Lacave-Lachet C.. Ground motion prediction with the empirical Green's function technique: an assessment of uncertainties and confidence level. *J. Seismology* 2000; 4:59-77.
17. Roumelioti Z., Kiratzi A., Theodulidis N. and Papaioannou Ch. A comparative study of a stochastic and deterministic simulation of strong ground motion applied to the Kozani-Grevena (NW Greece) 1995 sequence. 2000; 43:951-966.
18. Sieberg A. Die Erdbeben, In:Gutenberg,B., Handbuch der Geophysik. 1932; 4: 93-94.
19. Theodulidis, N. and P-Y. Bard. Strong ground motion simulation of large earthquakes, *Proc. 10th ECEE.*1994, ;1:269-274.
20. Theodulidis N. and Papazachos B. Strong motion from intermediate depth subduction earthquakes and its comparison with that of shallow earthquakes in Greece. *Proc. XXII Gen. Assembly ESC*, Barcelona 1990: II, 857-864.
21. Tselentis G-A. and Zahradnik J. The Athens earthquake of 7 September 1999. *Bull. Seism. Soc. Am.* 2000; 90:1143-1160.