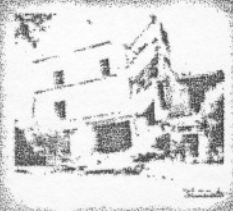




ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ



2^ο

ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ
ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
& ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΟΣ Α΄

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ ΠΑΛΛΑΣ
28 - 30, Νοεμβρίου, 2001

ΜΕ ΤΗ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ

Ο.Α.Σ.Π. - Ι.Τ.Σ.Α.Κ. - Σ.Π.Μ.Ε.

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.
ΠΑΠΑΖΑΧΟΣ, Κ.
ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ, Χ.
ΘΕΟΔΟΥΛΙΔΗΣ, Ν.
ΚΑΛΟΓΕΡΑΣ, Ι.
ΣΚΑΡΛΑΤΟΥΔΗΣ, Α.

Δρ Σεισμολόγος, Εντετ. Ερευνητής ΙΤΣΑΚ.
Επικ. Καθηγητής, ΑΠΘ.
Δρ Σεισμολόγος, Εντετ. Ερευνητής ΙΤΣΑΚ.
Δρ Σεισμολόγος, Κύριος. Ερευνητής ΙΤΣΑΚ.
Δρ Σεισμολόγος, Εντετ. Ερευνητής Γ.Ι. ΕΑΑ
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, pgv και μετάθεση, pgd) 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 πημών των παραμέτρων της ισχυρής σεισμικής κίνησης (μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, rga , ταχύτητα, pgv και μετάθεση, pgd) 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 απόσταση (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), Niazi and Bozorgnia (1991) για την Ταϊβάν.

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 Θεοδοουλίδης (1991) με βάση ένα εμπλουτισμένο δείγμα από 53 καταγραφές έκανε μία εκτενή ανάλυση και πρότεινε σχέσεις απόσβεσης των μέγιστων οριζόντιων και κατακόρυφων πμών της εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετάθεσης, για δύο εδαφικές κατηγορίες.

Οι προηγούμενες προσπάθειες υπολογισμού των παραμέτρων της ισχυρής κίνησης, βασίστηκαν σε ένα περιορισμένο αριθμό καταγραφών ισχυρής κίνησης. Επίσης

έχουν περιληφθεί στις σχέσεις αυτές αβεβαιότητες και αποκλίσεις, λόγω των περιορισμών στην εφαρμοζόμενη 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

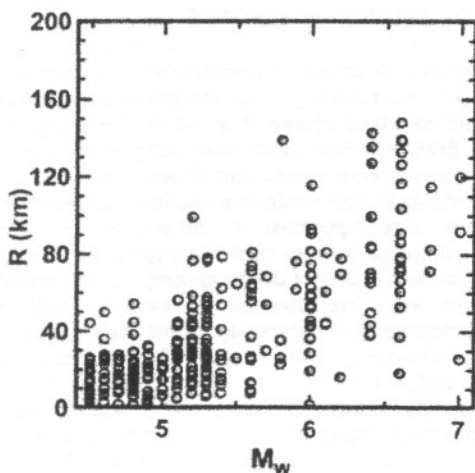
Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εργασία αυτή αποτελούνται από καταγραφές που προέρχονται από το εθνικό δίκτυο επιταχυνσιογράφων του Ι.Τ.Σ.Α.Κ. και από το δίκτυο επιταχυνσιογράφων του Εθνικού Αστεροσκοπείου των Αθηνών για το χρονικό

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.

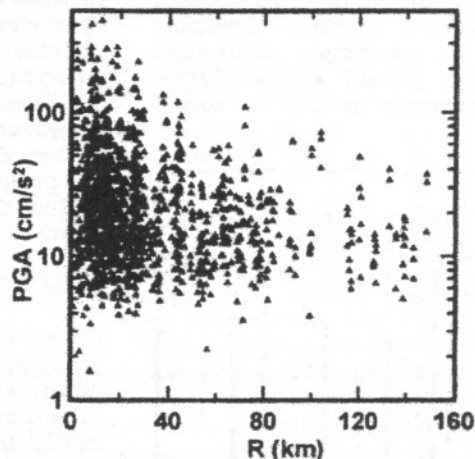


Σχήμα 1. Κατανομή των επικεντρικών αποστάσεων (R) σε συνάρτηση με το μέγεθος ροπής (M_w) των καταγραφών ισχυρής σεισμικής κίνησης οι οποίες χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.

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 αποτελείται από 744 καταγραφές οριζόντιων συνιστωσών.



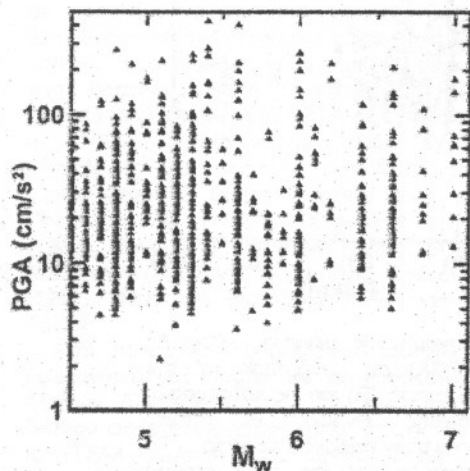
Σχήμα 2. Κατανομή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) σε συνάρτηση με την επικεντρική απόσταση (R) για τις καταγραφές ισχυρής σεισμικής κίνησης οι οποίες χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.

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 αποστάσεις (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 πινών (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 σχολιασθεί 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 $B \rightarrow S=0$, $C \rightarrow S=1$ και $D \rightarrow S=2$ 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 αντιστοιχίας 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 δείξει και με κατάλληλες προσομοιώσεις Monte-Carlo (Papazachos and Papaiοannου, 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 (Papazachos and Papaiοannου, 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:

$$\ln \text{PGA} = 4.16 + 0.89M_w - 1.24 \ln(R+6) + 0.12S \pm 0.70 \quad (3)$$

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

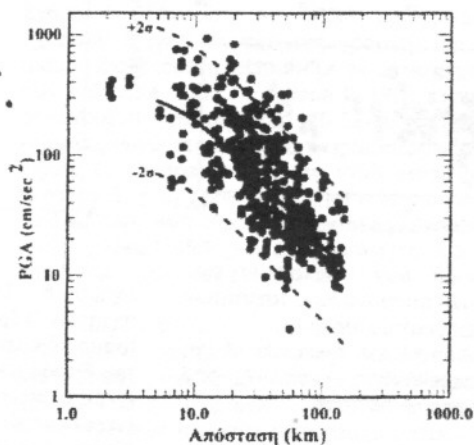
$$\ln \text{PGV} = -1.51 + 1.11M_w - 1.20 \ln(R+5) + 0.29S \pm 0.80 \quad (5)$$

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

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

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

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.

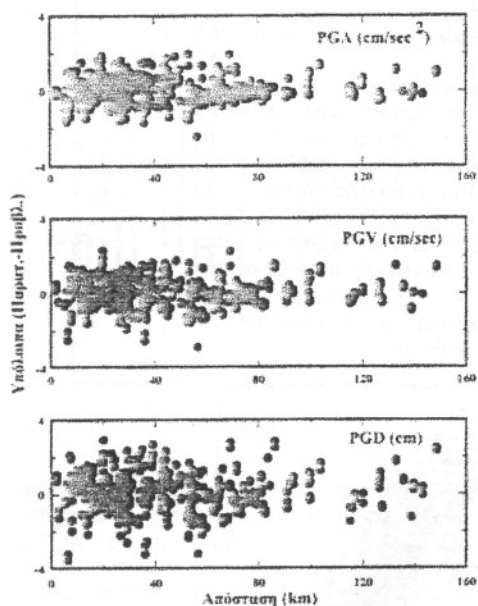


Σχήμα 4. Σύγκριση της εμπειρικής σχέσης πρόβλεψης μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης $\pm 2\sigma$ (τυπικές αποκλίσεις) με τις παρατηρημένες τιμές ανηγμένες σε $M6.5$.

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 υπολοίπα (παρατηρημένες - προβλεπόμενες) τιμές των μεγίστων εδαφικών επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μεταθέσεων με την απόσταση. Η κατανομή των υπολοίπων 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).



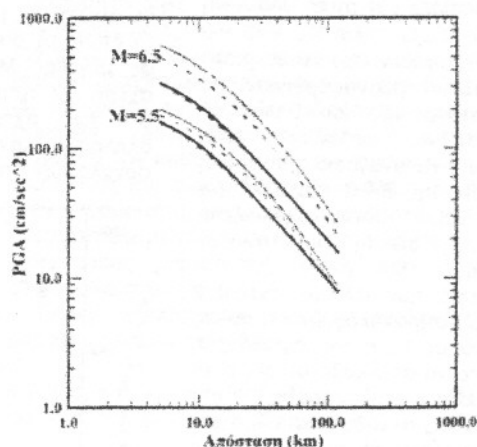
Σχήμα 5. Κατανομή των υπολοίπων των μεγίστων τιμών των επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μεταθέσεων με την απόσταση.
Figure 5. Distribution of the residuals of the peak ground acceleration, velocity and displacement in terms of distance.

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 $7.0 \leq M_w \leq 7.5$.



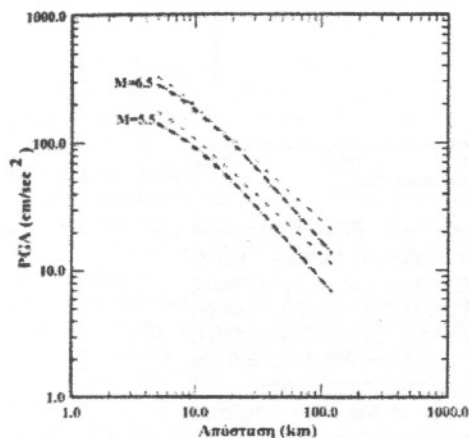
Σχήμα 6. Σύγκριση των PGA εμπειρικών σχέσεων 3 (μαύρη συνεχόμενη γραμμή) και 4 (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με τις αντίστοιχες του Θεοδουλίδη (1991) για Ελληνικά δεδομένα (γκρί διακεκομμένη γραμμή) και ενισχυμένων (γκρί συνεχόμενη γραμμή).

Figure 6. Comparison of the PGA empirical relations 3 (black continuous line) and 4 (black dashed line) with those proposed by Theodulidis (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 M6.5 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.



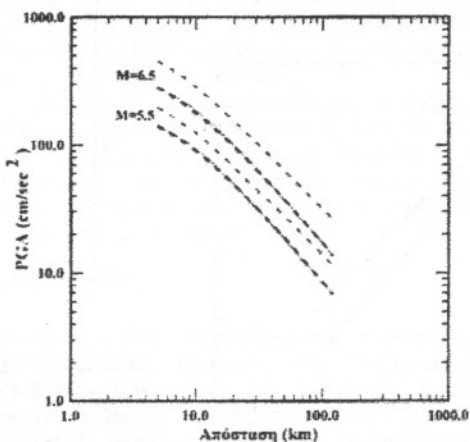
Σχήμα 7. Σύγκριση των PGA εμπειρικών σχέσεων 3 (γκρί συνεχόμενη γραμμή) και 4 (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με τις αντίστοιχες των Ambraseys et al. (1996; γγκρί διακεκομμένη γραμμή) για M5.5 και 6.5 και εδαφικές συνθήκες σκληρού πετρώματος.

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>50km) 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.



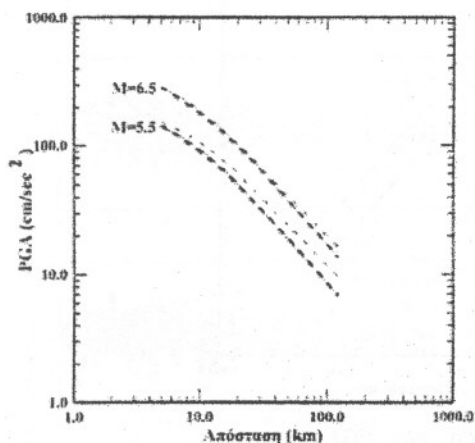
Σχήμα 8. Σύγκριση των PGA εμπειρικών σχέσεων 3 (γκρί συνεχόμενη γραμμή) και 4 (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με τις αντίστοιχες των Sabetta and Pugliese (1996; γγκρί διακεκομμένη γραμμή) για M5.5 και 6.5 και εδαφικές συνθήκες σκληρού πετρώματος.

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

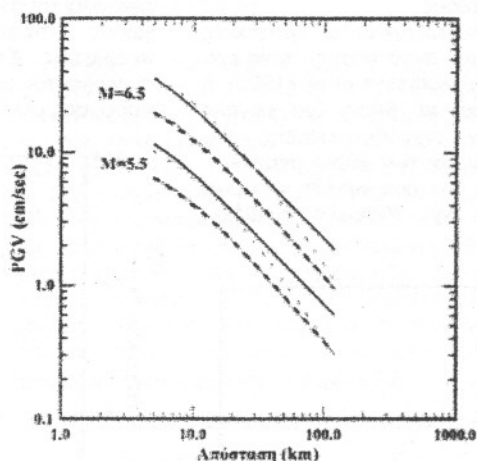


Σχήμα 9. Σύγκριση των PGA εμπειρικών σχέσεων 3 (γκρί συνεχόμενη γραμμή) και 4 (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) με τις αντίστοιχες των Spudich et al. (1999; γκρι διακεκομμένη γραμμή) για M5.5 και 6.5 και εδαφικές συνθήκες σκληρού πετρώματος.

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 Θεοδοουλίδη (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 αναστρόφων ρηγμάτων έχει σαν αποτέλεσμα την συστηματική απόκλιση των Ελληνικών

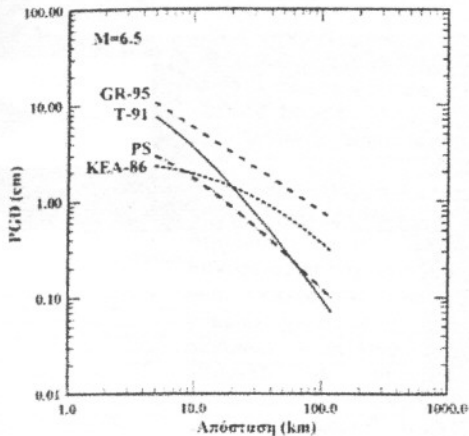
εμπειρικών σχέσεων σε ένα ευρύ φάσμα αποστάσεων.



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 Θεοδοουλίδη (1991; γκρι 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 Theodulidis (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 (Θεοδοουλίδης, 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 PGV εμπειρικών σχέσεων 7-γκρί συνεχόμενη γραμμή και 8-μαύρη διακεκομμένη γραμμή (PS) με τις αντιστοιχίες του Θεοδοουλίδη (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 Theodoulidis (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 οριζόντιων 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 εμπειρικές 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 Sruđich et al. (1999) με βάση παγκόσμια δεδομένα ισχυρής κίνησης και σεισμών που προέρχονται από κανονικά ρήγματα. Οι Ελληνικές καταγραφές ισχυρής κίνησης που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται κατά κύριο λόγο από σεισμούς κανονικών και δεξιιστρόφων 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 νέου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας συμβατό με τον ισχύοντα ΕΑΚ και του ECB» με χρηματοδότηση από τον ΟΑΣΠ. Επίσης μέρος 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.*
- Θεοδοουλιδης, 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/EEERC-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".