

Εμπειρικές σχέσεις απόσβεσης των φασματικών τιμών της εδαφικής επιτάχυνσης και ταχύτητας ενδιαμέσου βάθους σεισμικών κινήσεων του Ν. Αιγαίου

Empirical prediction relations of acceleration and velocity
spectral values from intermediate depth earthquakes in
Southern Aegean

David M. Boore–A¹ Ανδρέας Σκαρλατούδης–B² Χρυσάνθη Βεντούζη–B³ Κώστας
Παπαζάχος–B⁴ και Βασίλης Μάργαρης–Γ⁵

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στα πλαίσια της εργασίας αυτής έγινε μια προσπάθεια για τη μελέτη των φασματικών παραμέτρων της εδαφικής κίνησης του σεισμού ενδιαμέσου βάθους των Κυθήρων στις 08/01/06 με τη συνδυασμένη χρήση δεδομένων τόσο από σεισμολογικά όσο και από δίκτυα ισχυρής σεισμικής κίνησης. Το τελικό σύνολο των δεδομένων αποτελείται από 200 περίπου οριζόντιες συνιστώσες εδαφικής επιτάχυνσης που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό φασματικών εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης για 21 περιόδους από 0.01s-10s και για υποκεντρικές αποστάσεις 0-600 Km. Τα πρώτα συμπεράσματα δείχνουν την ύπαρξη ενός σύνθετου μοντέλου απόσβεσης της εδαφικής κίνησης, εμφανίζοντας αρκετά μεγαλύτερες φασματικές τιμές εδαφικής κίνησης σε περιοχές κατά μήκος του Ελληνικού τόξου απ' ό,τι στο εσωτερικό του, κυρίως λόγω της απόσβεσης των σεισμικών κυμάτων από τη ζώνη χαμηλού παράγοντα ποιότητας Q στη «σφήνα» του μανδύα κάτω από το Ελληνικό ηφαιστειακό τόξο (Νίσυρος-Σαντορίνη-Μήλος-Σουσάκι-Μέθανα). Η σύγκριση των φασμάτων απόκρισης από το σεισμό των Κυθήρων με φάσματα απόκρισης από επιφανειακούς σεισμούς για παρόμοιες αποστάσεις και μεγέθη αναδεικνύει τις διαφορετικές ιδιότητες των φασματικών παραμέτρων της εδαφικής κίνησης μεταξύ των επιφανειακών και των ενδιαμέσου βάθους σεισμών και τις πιθανές επιπτώσεις τους στην ανωδομή στην περιοχή του Ν. Αιγαίου.

ABSTRACT : In the present study an effort has been made for studying the spectral parameters of the ground motions produced by the Kythera intermediate depth earthquake 08/01/06, with the combined use of data from both seismological and strong motion networks. The final data set is comprised of about 200 horizontal components of acceleration records. This data set was used for deriving spectral empirical prediction relations for periods 0.01s-10s and for hypocentral distances 0-600 Km. Preliminary regression results show a composite attenuation pattern of ground motion, with higher predicted values of ground motion in areas along the Hellenic arc than the ones predicted for back arc areas. This prominent effect is probably due to the existence of a low V_s - low Q_s layer in the mantle wedge above the Hellenic volcanic arc (Nisiros-Santorini-Milos-Sousaki-Methana). The comparison of response spectra from shallow earthquakes with those produced in the present study for similar hypocentral distances and magnitudes verifies the different spectral properties of the two types of earthquakes and their possible impact on the Southern Aegean area infrastructures.

¹ Dr Ερευνητής, U.S. Geological Survey, Menlo Park, USA, email: boore@usgs.gov

² Msc Γεωφυσικός, Εργαστήριο Γεωφυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: askarlat@geo.auth.gr

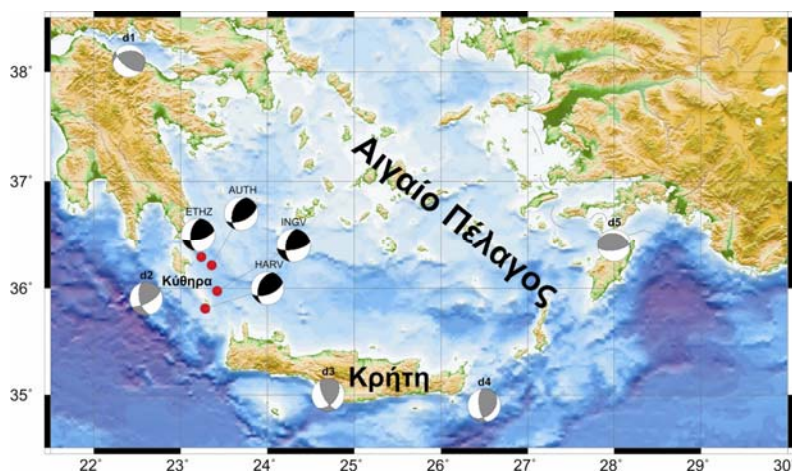
³ Msc Γεωφυσικός, Εργαστήριο Γεωφυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: xrusven@geo.auth.gr

⁴ Av. Καθηγητής, Εργαστήριο Γεωφυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: kpapaza@geo.auth.gr

⁵ Διευθυντής Ερευνών, ΙΤΣΑΚ, Θεσσαλονίκη, email: margaris@itsak.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σεισμός ενδιαμέσου βάθους των Κυθήρων (M6.7, Βάθος=67Km) συνέβη στο δυτικό τμήμα του Ελληνικού τόξου (**Σχήμα 1**). Οι περισσότερες καταστροφές παρατηρήθηκαν στο χωριό Μιτάτα στο νησί των Κυθήρων (EERI, 2006). Στο **Σχήμα 1** φαίνονται τα επίκεντρα και οι μηχανισμοί γένεσης που προτάθηκαν από διάφορα Ινστιτούτα για τον συγκεκριμένο σεισμό. Ο μηχανισμός γένεσης που προτάθηκε από το Εργαστήριο Γεωφυσικής του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ) και υπολογίστηκε με την αντιστροφή τηλεσεισμικών καταγραφών ευρέως φάσματος έδειξε ένα μηχανισμό οριζόντιας μετατόπισης με ανάστροφη συνιστώσα (παράταξη:50, κλίση:55, διάνυσμα ολίσθησης:115) (Benetatos and Kiratzi, 2006). Ο μηχανισμός αυτός είναι σε συμφωνία με το τοπικό πεδίο τάσεων για το δυτικό τμήμα του Ελληνικού τόξου σε αυτό το βάθος, όπου κυριαρχούν συμπίεστικά πεδία με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, ενώ παρατηρείται εφελκυσμός με κλίση παράλληλη προς τη διεύθυνση της βύθισης και ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση. Στο **Σχήμα 1** φαίνονται επίσης και οι μέσοι μηχανισμοί (γκρι χρώμα) που υπολογίστηκαν από τους Papazachos et al. (2000) με τη χρήση όλων των διαθέσιμων μηχανισμών γένεσης από σεισμούς ενδιαμέσου βάθους για διαφορετικές περιοχές του Ελληνικού τόξου. Από το σχήμα φαίνεται η πολύ καλή συμφωνία που υπάρχει μεταξύ του μηχανισμού που υπολογίστηκε για το σεισμό των Κυθήρων με το μέσο μηχανισμό που προτάθηκε για τη συγκεκριμένη περιοχή (μηχανισμός d2).



Σχήμα 1. Χάρτης της περιοχής του Ν. Αιγαίου. Τα επίκεντρα που προτάθηκαν από τα διάφορα Ινστιτούτα σημειώνονται με τους κόκκινους κύκλους. Στο σχήμα φαίνονται επίσης οι μηχανισμοί γένεσης που προτάθηκαν από το ΑΠΘ, το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΓΙΕΕΑ), το πανεπιστήμιο του Harvard (HARV) και το Ινστιτούτο ΕΤΗ της Ζυρίχης (ΕΤΗΖ), καθώς και οι μέσοι μηχανισμοί για διάφορες περιοχές του Ελληνικού τόξου (γκρι χρώμα) (Papazachos et al., 2000).

Η ιδιαιτερότητα της απόσβεσης των σεισμικών κυμάτων από σεισμούς ενδιαμέσου βάθους, σε σχέση με τους επιφανειακούς σεισμούς, έγκειται στο γεγονός της ύπαρξης ενός στρώματος χαμηλών ταχυτήτων-παράγοντα απόσβεσης των εγκάρσιων κυμάτων (V_s-Q_s) στο πίσω μέρος της ζώνης κατάδυσης. Αυτό το στρώμα χαμηλών ταχυτήτων-παράγοντα απόσβεσης έχει αναγνωριστεί από διάφορες τομογραφικές μελέτες (Spakman, 1988; Spakman et al., 1993; Papazachos et al., 1995; Papazachos and Nolet, 1997). Εξαιτίας της κατάδυσης της Μεσογειακής λιθοσφαιρικής πλάκας, τα ένυδρα πυριτικά ορυκτά

αφυδατώνονται στο βάθος περίπου των 80Km. Το νερό που απελευθερώνεται επιταχύνει τη μερική τήξη των ορυκτών, που ήδη βρίσκονται σε υψηλές θερμοκρασίες (>1000°C), επάνω από τη σχετικά ψυχρότερη καταδύομενη πλάκα δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο μερική τήξη στη σφήνα του μανδύα πάνω από την κατάδυση. Η επιφανειακή εκδήλωση της μερικής τήξης στη σφήνα του μανδύα είναι το ηφαιστειακό τόξο (Νίσυρος-Σαντορίνη-Μήλος-Σουσάκι-Μέθανα). Η μερική τήξη ευθύνεται για το στρώμα χαμηλών ταχυτήτων-παράγοντα απόσβεσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s και Q_s) στη σφήνα του μανδύα, εξηγώντας έτσι την ισχυρή απόσβεση των κυμάτων στην οπισθότοξη περιοχή στον ανώτερο μανδύα επάνω από την καταδύομενη πλάκα (Papazachos et al., 2000). Στο **Σχήμα 2** το στρώμα χαμηλών ταχυτήτων των επιμήκων κυμάτων ($V_p < 7.9$ Km/s) (περιοχή χαμηλού Q_s) (Papazachos et al., 1995) στη σφήνα του μανδύα (60-90 Km), φαίνεται με τη μαύρη διακεκομμένη γραμμή σε πολύ καλή συμφωνία με την προτεινόμενη κατηγοριοποίηση των σταθμών καταγραφής σε οπισθότοξη και κατά μήκος του τόξου περιοχή.

Παγκοσμίως έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες για την παραγωγή εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης για περιοχές κατάδυσης με τη χρήση δεδομένων από όργανα καταγραφής ισχυρής σεισμικής κίνησης (Theodulidis and Papazachos, 1990, Crouse, 1991, Youngs et al., 1997, Atkinson and Boore, 2003, Kanno et al., 2006, Zhao et al., 2006 κ.α.). Οι Atkinson and Boore (2003) ήταν από τους πρώτους που χρησιμοποίησαν ένα μικρό αριθμό δεδομένων από σεισμικά δίκτυα σε συνδυασμό με δεδομένα από δίκτυα καταγραφής ισχυρής σεισμικής κίνησης για την παραγωγή φασματικών εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης για την περιοχή κατάδυσης της Cascadia. Η συνδυασμένη χρήση των δύο ειδών δεδομένων έχει το πλεονέκτημα καταγραφών στο κοντινό πεδίο από όργανα καταγραφής ισχυρής κίνησης (ψαλιδισμός των καταγραφών από όργανα καταγραφής ασθενούς κίνησης) και στο μακρινό πεδίο από όργανα καταγραφής ασθενούς κίνησης (μεγαλύτερη ευαισθησία από τα όργανα ισχυρής σεισμικής κίνησης).

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια μελέτης των φασματικών χαρακτηριστικών της απόσβεσης της εδαφικής κίνησης από σεισμούς ενδιαμέσου βάθους και προτείνονται εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης των φασματικών τιμών για την ευρύτερη περιοχή του Ν. Αιγαίου για το συγκεκριμένο σεισμό. Τέλος συγκρίνονται τα φάσματα απόκρισης από το σεισμό των Κυθήρων και από επιφανειακούς σεισμούς και αναδεικνύονται οι διαφορετικές ιδιότητες των δύο τύπων σεισμών.

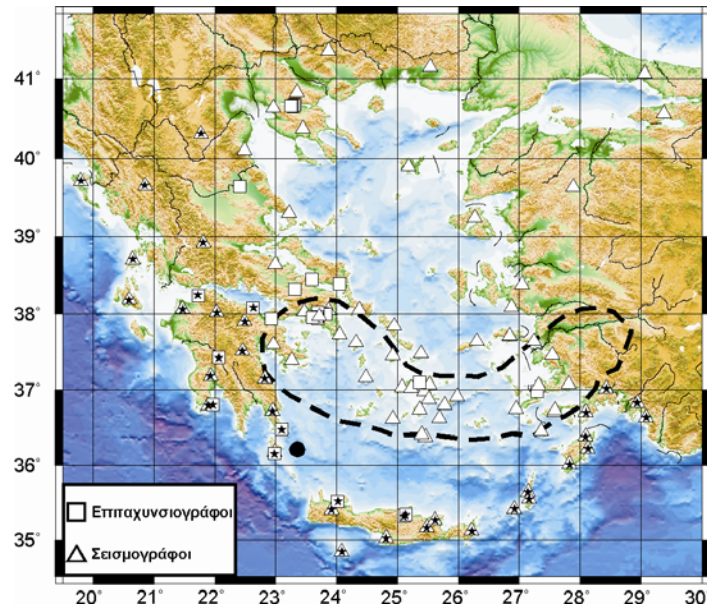
ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Ο σεισμός των Κυθήρων καταγράφηκε από τα δύο μόνιμα Ελληνικά σεισμολογικά δίκτυα που λειτουργούν υπό την επίβλεψη του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και του σεισμολογικού σταθμού της Θεσσαλονίκης. Ο κύριος όγκος των δεδομένων όμως προήρθε από το δίκτυο του Εγκέλαδου, ενός τοπικού, αμφίβιου, σεισμολογικού δικτύου στην περιοχή του Ν. Αιγαίου που συντονίζεται από το Πανεπιστήμιο Ruhr του Bochum (Γερμανία) και λειτουργεί υπό την επίβλεψη μιας μεγάλης ομάδας συνεργατών που απαρτίζεται από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο της Θεσσαλονίκης, το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, το Πολυτεχνείο Κρήτης, το Πολυτεχνείο Κωνσταντινούπολης, το Πανεπιστήμιο του Αμβούργου και του GeoForschungszentrum στο Potsdam (Γερμανία). Στην παρούσα εργασία έχουν χρησιμοποιηθεί μόνο τα δεδομένα από σταθμούς που ήταν εγκατεστημένοι στην ξηρά.

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το σεισμολογικό κέντρο του Kandilli και το Ινστιτούτο σεισμολογικών ερευνών (KOERI) (Τουρκία) και από τους μόνιμους σταθμούς του GEOFON. Το αντίστοιχο σύνολο δεδομένων από τα όργανα καταγραφής ισχυρής σεισμικής κίνησης βασίστηκε στη χρήση δεδομένων από το δίκτυο επιταχυνσιογράφων του Ινστιτούτου Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ), το δίκτυο επιταχυνσιογράφων του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (Konstantinou et al., 2006), το δίκτυο επιταχυνσιογράφων της Δ.Ε.Η. και το Παρατηρητήριο Αστρονομίας της Λάρισας. Στο **Σχήμα 2** φαίνονται με τρίγωνα οι σταθμοί που είναι εγκατεστημένοι σειсмоγράφου ευρέως φάσματος και με τετράγωνα οι σταθμοί που είναι εγκατεστημένοι επιταχυνσιογράφοι.

ΟΡΓΑΝΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

Η πλειοψηφία των οργάνων καταγραφής ασθενούς σεισμικής κίνησης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ευρέως φάσματος (60s-50Hz). Τα δεδομένα που προήρθαν από όργανα βραχείας περιόδου δεν χρησιμοποιήθηκαν, μιας και το συχνοτικό περιεχόμενο των καταγραφών από σεισμούς ενδιάμεσου βάθους είναι πλούσιο σε χαμηλές συχνότητες και τα συγκεκριμένα όργανα δεν μπορούν να αναπαραστήσουν επαρκώς τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Στους σταθμούς καταγραφής χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί τύποι σεισμομέτρων Guralp (κυρίως CMG-3ESP) και Streckeisen STS-2 ενώ οι ψηφιακοί καταγραφείς ήταν κυρίως ανάλυσης 24-bit και σε μερικές περιπτώσεις 18-bit.



Σχήμα 2. Δικτυακή κάλυψη του σεισμού των Κυθήρων του 2006. Οι σεισμογράφοι ευρέως φάσματος φαίνονται με τα τρίγωνα ενώ με τα τετράγωνα σημειώνονται οι επιταχυνσιογράφοι. Οι σταθμοί που βρίσκονται κατά μήκος του τόξου σημειώνονται με τα μαύρα αστέρια. Με τη μαύρη στικτή γραμμή φαίνεται η περιοχή που καλύπτει το στρώμα χαμηλής ταχύτητας (V_s)-χαμηλού παράγοντα (Q_s) απόσβεσης των εγκάρσιων κυμάτων (Parazachos et al., 1995).

Από το συνολικό αριθμό των επιταχυνσιογράφων, η πλειοψηφία ήταν όργανα χαμηλής ανάλυσης (11-bit, Kinematics QDR - MEMS technology) και μόνο ένας μικρός αριθμός ήταν υψηλής ανάλυσης [18-bit (Geosig GSR18 και Kinematics ETNA) και 24-bit (GURALP CMG-5T)]. Περισσότερες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά και τους τύπους των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν μπορούν να βρεθούν στις ιστοσελίδες των αντίστοιχων Ινστιτούτων.

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Οι καταγραφές που προέρχονται από τα σεισμόμετρα ευρέως φάσματος διορθώθηκαν για την απόκριση του οργάνου και φιλτραρίστηκαν με ένα υψηλοπερατό, δεύτερης τάξης, μη αιτιοκρατικό φίλτρο τύπου Butterworth, για την αφαίρεση του θορύβου. Έπειτα από διάφορες δοκιμές επιλέχθηκε η τιμή 0.05 Hz (20s) ως η γωνιακή συχνότητα αποκοπής για το υψηλοπερατό φίλτρο για όλες τις καταγραφές, που αντανακλά και την υψηλή ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν.

Οι καταγραφές που προέρχονται από τους επιταχυνσιογράφους διορθώθηκαν για την απόκριση του οργάνου, όπου αυτό ήταν δυνατόν, ενώ φιλτραρίστηκαν επίσης για την αφαίρεση του ψηφιακού θορύβου. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το φιλτράρισμα των καταγραφών ήταν αυτή που εφαρμόστηκε από τους Skarlatoudis και Margaris (2006), ακολουθώντας τα αποτελέσματα του Boore (2003, 2005). Λόγω των ιδιαίτερων φασματικών χαρακτηριστικών των καταγραφών από τους σεισμούς ενδιάμεσου βάθους (πλούσιο χαμηλόσυχο περιεχόμενο) έπειτα από την αρχική ημιαυτόματη επεξεργασία των καταγραφών τα φάσματα Fourier των οριζόντιων συνιστωσών επανελέγχθηκαν με στόχο τη βελτιστοποίηση του προσδιορισμού της γωνιακής συχνότητας αποκοπής του υψηλοπερατού φίλτρου.

Ο περισσότεροι επιταχυνσιογράφοι που κατέγραψαν τα επιταχυνσιογράμματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία ήταν εγκατεστημένοι σε εδαφικές κατηγορίες C ή D ενώ όλοι οι σεισμογράφοι θεωρήθηκε ότι ήταν εγκατεστημένοι σε εδαφική κατηγορία B/A, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του NEHRP (1994) και UBC (1997). Το τελικό σύνολο δεδομένων που προέκυψε έπειτα από την επεξεργασία των καταγραφών και από τους δύο τύπους οργάνων (σεισμογράφους, επιταχυνσιογράφους) αποτελείται από περίπου 200 οριζόντιες συνιστώσες εδαφικής επιτάχυνσης.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Η απόκριση ενός μονοβάθμιου αρμονικού ταλαντωτή που εκτελεί εξαναγκασμένη ταλάντωση με απόσβεση για μια συγκεκριμένη σεισμική κίνηση που ενεργεί σε αυτόν είναι διαφορετική για διαφορετικές τιμές της ιδιοπεριόδου και της απόσβεσης του. Συνεπώς το φάσμα απόκρισης του αρμονικού ταλαντωτή δίνεται από τη μέγιστη τιμή της απόκρισής του για κάθε ιδιοπερίοδο ταλάντωσης και για συγκεκριμένη τιμή της απόσβεσής του και για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται η συνολική καταγραφή της επιτάχυνσης. Στην παρούσα εργασία υπολογίστηκαν τα φάσματα απόκρισης για κρίσιμη απόσβεση 5% του ταλαντωτή και για 21 ιδιοπεριόδους από 0.01s ως 10s που φαίνονται στον **Πίνακα 1**, για τις οριζόντιες

συνιστώσες της εδαφικής επιτάχυνσης του συνόλου των δεδομένων μας. Στην ανάλυση για τον υπολογισμό των εμπειρικών σχέσεων, για κάθε μία από τις 21 ιδιοπεριόδους και για τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA), χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα όπου η γωνιακή συχνότητα αποκοπής του υψηλοπερατού φίλτρου που εφαρμόστηκε στο στάδιο της επεξεργασίας των καταγραφών ήταν η μισή της ελάχιστης εξεταζόμενης ιδιοπεριόδου ταλάντωσης. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίστηκε ότι τα υπολογισμένα φάσματα απόκρισης δεν έχουν επηρεαστεί από την καμπύλη απόκρισης του φίλτρου 2^{ης} τάξης που εφαρμόστηκε για την απομάκρυνση του χαμηλόσυχνου θορύβου στις καταγραφές. Για τον υπολογισμό των φασματικών εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης χρησιμοποιήθηκε η Εξίσωση 1:

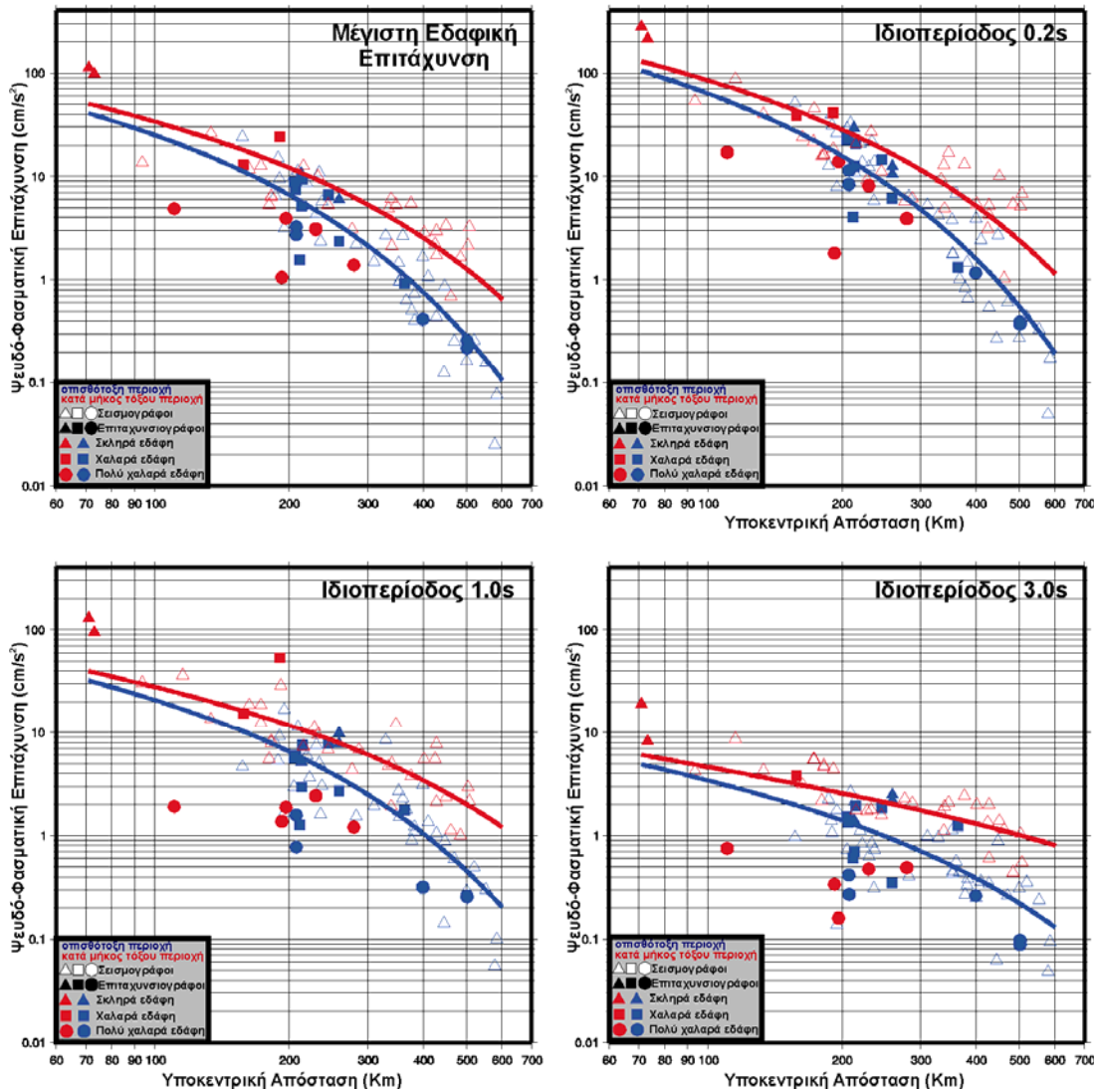
$$\log Y = c_1 + c_2 \log R + c_{31} R_{back} + c_{32} R_{along} + c_{41} S_s + c_{42} S_{ss} \quad (1)$$

όπου Y είναι η ψευδο-φασματική τιμή της επιτάχυνσης PSA (cm/s²) και R η υποκεντρική απόσταση σε χιλιόμετρα. Οι συντελεστές c₃₁ και c₃₂ υπολογίζονται αντίστοιχα μόνο στις περιπτώσεις όπου ο σταθμός καταγραφής βρίσκεται στην οπισθότοξη ή στην περιοχή του τόξου και σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του **Σχήματος 2**. Οι παράμετροι S_s και S_{ss} περιγράφουν τις εδαφικές συνθήκες και παίρνουν τιμές 0 και οι δύο για κατηγορίες εδαφών σκληρών πετρωμάτων (B/A), 1 ο S_s και 0 ο S_{ss} για χαλαρά εδάφη (κατηγορία C) και 0 ο S_s και 1 ο S_{ss} για πολύ χαλαρά εδάφη (κατηγορία D).

Πίνακας 1. Εμπειρικοί συντελεστές φασματικής απόσβεσης και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης από την Εξίσωση 1 για τις διάφορες ιδιοπεριόδους του ταλαντωτή.

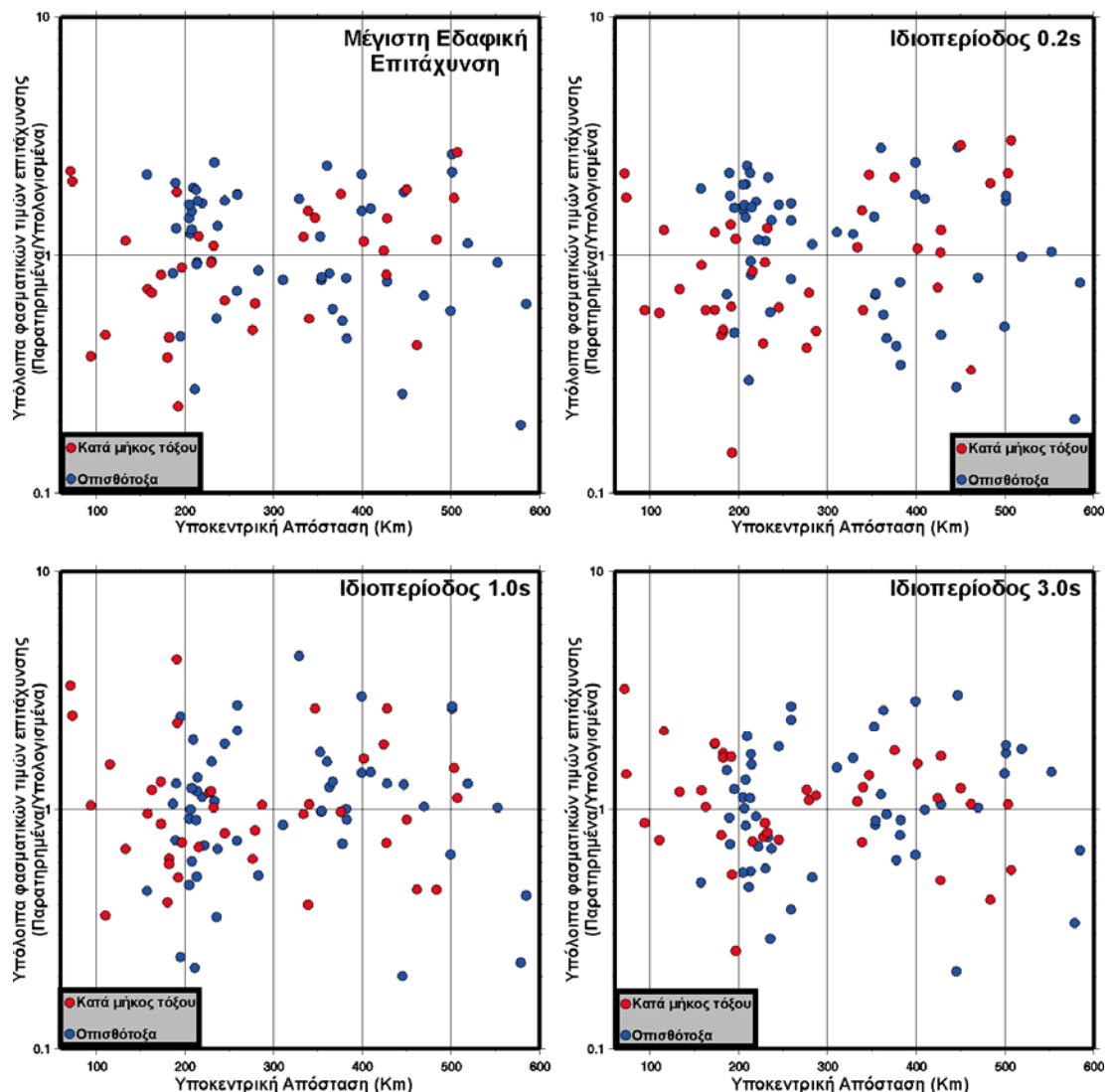
| Περίοδος (s) | c ₁ | c ₂ | c ₃₁ | c ₃₂ | c ₄₁ | c ₄₂ | RMS |
|--------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|
| PGA | 3.16 | -0.7 | -0.00365 | -0.00233 | 0.276 | 0.448 | 0.263 |
| 0.01 | 3.16 | -0.7 | -0.00365 | -0.00233 | 0.277 | 0.449 | 0.263 |
| 0.02 | 3.16 | -0.7 | -0.00364 | -0.00233 | 0.290 | 0.458 | 0.263 |
| 0.03 | 3.19 | -0.7 | -0.00370 | -0.00238 | 0.272 | 0.443 | 0.268 |
| 0.05 | 3.28 | -0.7 | -0.00387 | -0.00247 | 0.239 | 0.406 | 0.272 |
| 0.07 | 3.40 | -0.7 | -0.00399 | -0.00253 | 0.226 | 0.373 | 0.283 |
| 0.10 | 3.41 | -0.7 | -0.00390 | -0.00240 | 0.278 | 0.389 | 0.292 |
| 0.15 | 3.55 | -0.7 | -0.00399 | -0.00257 | 0.275 | 0.353 | 0.293 |
| 0.20 | 3.59 | -0.7 | -0.00392 | -0.00264 | 0.262 | 0.390 | 0.282 |
| 0.25 | 3.57 | -0.7 | -0.00381 | -0.00255 | 0.300 | 0.448 | 0.270 |
| 0.30 | 3.56 | -0.7 | -0.00375 | -0.00264 | 0.279 | 0.477 | 0.271 |
| 0.40 | 3.54 | -0.7 | -0.00381 | -0.00269 | 0.261 | 0.496 | 0.248 |
| 0.50 | 3.44 | -0.7 | -0.00364 | -0.00259 | 0.304 | 0.561 | 0.253 |
| 0.75 | 3.27 | -0.7 | -0.00331 | -0.00230 | 0.343 | 0.566 | 0.278 |
| 1.00 | 3.00 | -0.7 | -0.00292 | -0.00163 | 0.391 | 0.670 | 0.278 |
| 1.50 | 2.64 | -0.7 | -0.00245 | -0.00100 | 0.354 | 0.634 | 0.261 |
| 2.00 | 2.42 | -0.7 | -0.00218 | -0.00069 | 0.399 | 0.665 | 0.252 |
| 3.00 | 2.10 | -0.7 | -0.00174 | -0.00042 | 0.274 | 0.621 | 0.263 |
| 4.00 | 1.94 | -0.7 | -0.00151 | -0.00043 | 0.153 | 0.481 | 0.279 |
| 5.00 | 1.82 | -0.7 | -0.00130 | -0.00030 | 0.176 | 0.376 | 0.235 |
| 7.50 | 1.36 | -0.7 | -0.00101 | -0.00007 | 0.088 | 0.149 | 0.223 |
| 10.00 | 1.09 | -0.7 | -0.00118 | -0.00015 | 0.016 | 0.185 | 0.216 |

Στην Εξίσωση 1 απουσιάζει ο συντελεστής που εξαρτάται από το μέγεθος του σεισμού, μιας και τα δεδομένα προέρχονται από έναν μόνο σεισμό με μέγεθος **M6.7**. Για τον υπολογισμό των συντελεστών της Εξίσωσης 1 χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης (Draper and Smith, 1981). Έπειτα από διάφορες δοκιμές στην ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ο γεωμετρικός μέσος των δύο οριζόντιων συνιστωσών με στόχο τη μείωση της μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων ανά σταθμό καταγραφής ενώ κρατήθηκε σταθερός ο συντελεστής c_2 (συντελεστής της γεωμετρικής απόσβεσης) με τιμή -0.7.



Σχήμα 3. Σύγκριση των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της ψευδο-φασματικής επιτάχυνσης με τις παρατηρημένες τιμές ανηγμένες σε εδαφικές συνθήκες σκληρών πετρωμάτων, για διάφορες τιμές της ιδιοπεριόδου. Με μπλε χρώμα παριστάνονται τα δεδομένα από την οπισθοτόξη περιοχή ενώ με κόκκινο τα δεδομένα κατά μήκος του τόξου. Τα σχήματα με έγχρωμο περίγραμμα (τρίγωνα, τετράγωνα και κύκλοι) παριστάνουν δεδομένα που έχουν καταγραφεί από σεισμόμετρα, ενώ με τα έγχρωμα σχήματα δεδομένα που έχουν καταγραφεί από επιταχυνσιογράφους. Επίσης με τρίγωνα παριστάνονται τα δεδομένα για εδαφικές συνθήκες σκληρών πετρωμάτων, με τετράγωνα τα δεδομένα για χαλαρά εδάφη και με κύκλους τα δεδομένα για πολύ χαλαρά εδάφη.

Η τιμή αυτή του συντελεστή c_2 επιλέχθηκε γιατί έδινε την πιο σταθερή λύση γραμμικής παλινδρόμησης και το μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα για όλες τις ιδιοπεριόδους. Οι συντελεστές που υπολογίστηκαν από την ανάλυση για κάθε μια από τις ιδιοπεριόδους και τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση μαζί με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) φαίνονται στον Πίνακα 1. Στα Σχήματα 3 φαίνεται για διάφορες ιδιοπεριόδους του ταλαντωτή, η σύγκριση των υπολογισμένων σχέσεων με τα πραγματικά δεδομένα, ανηγμένα σε εδαφικές συνθήκες σκληρών πετρωμάτων (B/A), σε συνάρτηση με την υποκεντρική απόσταση. Με το μπλε χρώμα σημειώνονται τα δεδομένα που προέρχονται από την οπισθότοξη περιοχή ενώ με κόκκινο αυτά που προέρχονται από περιοχές κατά μήκος του τόξου σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που φαίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 4. Κατανομή των υπολοίπων των φασματικών τιμών της επιτάχυνσης σε συνάρτηση με την απόσταση για διάφορες τιμές της ιδιοπεριόδου. Με μπλε κύκλους παριστάνονται τα δεδομένα από την οπισθότοξη περιοχή ενώ με κόκκινους τα δεδομένα κατά μήκος του τόξου.

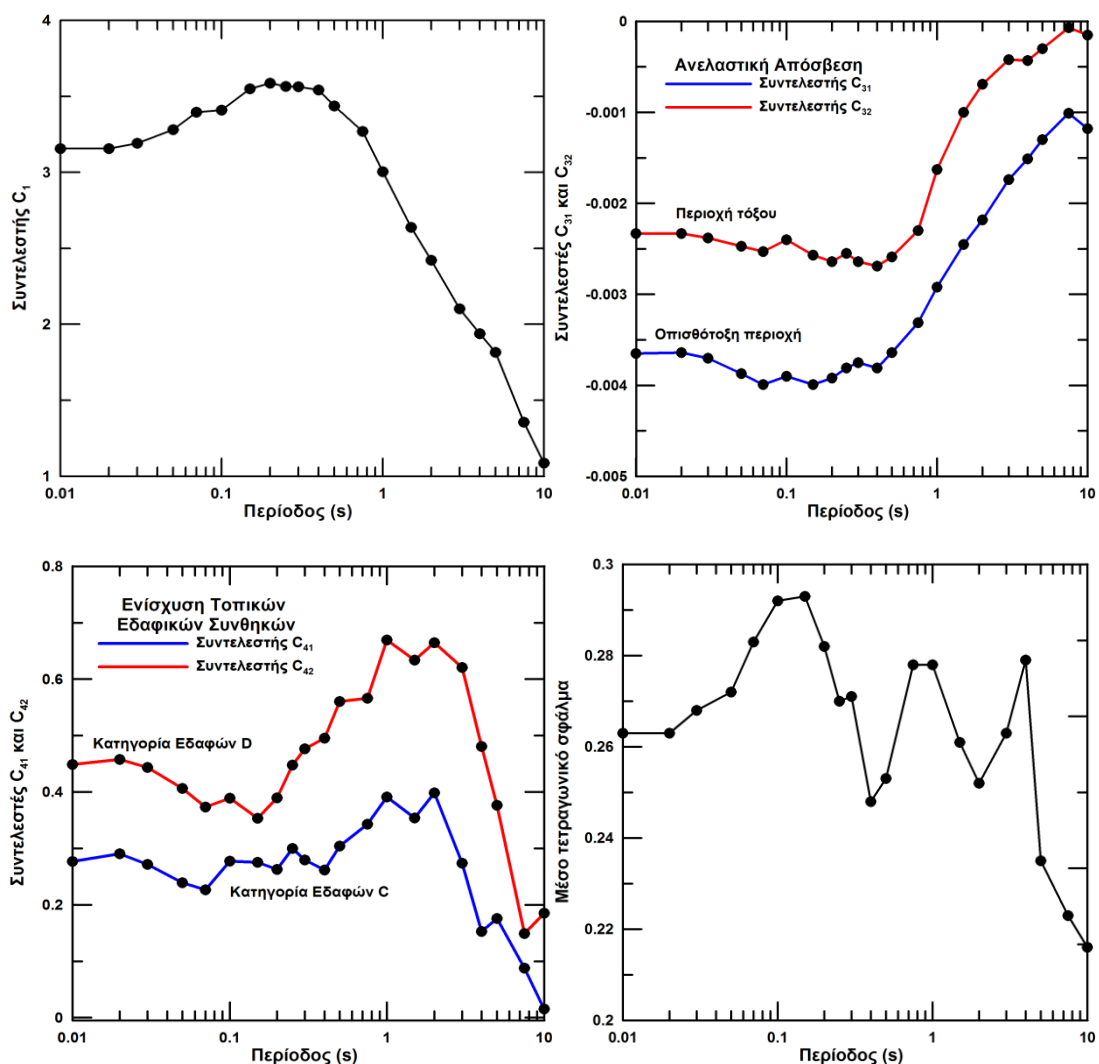
Με τα σχήματα με έγχρωμα περιγράμματα περιγράφονται τα δεδομένα που προέρχονται από σειсмоγράφους ενώ με τα έγχρωμα σχήματα τα δεδομένα που προέρχονται από επιταχυνσιογράφους. Τέλος με τρίγωνα παριστάνονται τα δεδομένα που καταγράφηκαν σε εδαφικές συνθήκες σκληρών πετρωμάτων (B/A), με τετράγωνα τα δεδομένα από χαλαρά εδάφη (C) και με κύκλους τα δεδομένα από πολύ χαλαρά εδάφη (D). Στο **Σχήμα 3** φαίνεται η ισχυρότερη απόσβεση της ενέργειας των κυμάτων στην οπισθότοξη περιοχή (μπλε καμπύλες) απ' ότι στις περιοχές κατά μήκος του τόξου (κόκκινες καμπύλες) για όλες τις ιδιοπεριόδους του ταλαντωτή. Η διαφορετική απόσβεση μεταξύ των δύο περιοχών είναι αποτέλεσμα του στρώματος χαμηλών ταχυτήτων – υψηλού παράγοντα απόσβεσης των εγκαρσίων κυμάτων που περιγράφηκε προηγουμένως στο κείμενο.

Για τον καλύτερο έλεγχο της ποιότητας της λύσης παλινδρόμησης μελετήθηκε η κατανομή των υπολοίπων των φασματικών τιμών της επιτάχυνσης (δεκαδικός λογάριθμος των παρατηρημένων προς τις υπολογισμένες τιμές) σε συνάρτηση με την υποκεντρική απόσταση για τις διάφορες τιμές ιδιοπεριόδων του ταλαντωτή. Στο **Σχήμα 4** φαίνεται η κατανομή των υπολοίπων των φασματικών τιμών της επιτάχυνσης. Με μπλε κύκλους σημειώνονται τα δεδομένα από την οπισθότοξη περιοχή ενώ με κόκκινους κύκλους τα δεδομένα από την κατά μήκος του τόξου περιοχή. Από τη μελέτη του **Σχήματος 4** δεν παρατηρείται κάποια συσχέτιση μεταξύ των υπολοίπων των φασματικών τιμών της επιτάχυνσης σε συνάρτηση με την κατηγοριοποίηση που επιλέχθηκε (οπισθότοξη-κατά μήκος του τόξου περιοχές) για όλες τις υποκεντρικές αποστάσεις και τις συγκεκριμένες ιδιοπεριόδους του ταλαντωτή. Το **Σχήμα 4** είναι αντιπροσωπευτικό όλων των αντίστοιχων σχημάτων για τις ιδιοπεριόδους που φαίνονται στον **Πίνακα 1** από τα οποία προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα για τη συσχέτιση των υπολοίπων για τις δύο κατηγορίες δεδομένων (οπισθότοξα-κατά μήκος του τόξου δεδομένα).

Η μεταβολή των φασματικών συντελεστών c_1 , c_{31} , c_{32} , c_{41} , c_{42} και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, που υπολογίστηκαν από τη γραμμική παλινδρόμηση σε συνάρτηση με την ιδιοπερίοδο παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5**. Ο συντελεστής c_1 παρουσιάζει μια ομαλή μεταβολή με την ιδιοπερίοδο, παίρνοντας τις μεγαλύτερες τιμές του για ιδιοπεριόδους 0.15s-0.3s με μέγιστο για 0.2s ενώ στη συνέχεια μειώνεται μέχρι την ιδιοπερίοδο των 10s. Η μεταβολή αυτή δείχνει ότι οι τιμές του φάσματος απόκρισης επιτάχυνσης θα εμφανίζουν αντίστοιχα υψηλότερες τιμές στο διάστημα από 0.15s-0.3s ενώ θα μειώνονται αυξανόμενης της ιδιοπεριόδου για ιδιοπεριόδους μεγαλύτερες των 0.4s. Οι συντελεστές c_{31} , c_{32} σχετίζονται με την ανελαστική απόσβεση των κυμάτων. Από το αντίστοιχο **Σχήμα 5** φαίνεται ότι η ανελαστική απόσβεση των κυμάτων παραμένει σχετικά σταθερή για ιδιοπεριόδους μικρότερες του 0.4s (2.5Hz) ενώ μειώνεται σημαντικά μέχρι την ιδιοπερίοδο των 10s. Είναι επίσης εμφανές ότι σε απόλυτες τιμές η ανελαστική απόσβεση των κυμάτων στις οπισθότοξες περιοχές είναι σημαντικά ισχυρότερη απ' ότι στις περιοχές κατά μήκος του τόξου, γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με τα γεωτεκτονικά χαρακτηριστικά της ζώνης κατάδυσης του Ν. Αιγαίου. Παρά το γεγονός ότι για τον υπολογισμό των συντελεστών c_{41} , c_{42} που περιγράφουν τις εδαφικές συνθήκες δεν υπήρχαν αρκετά διαθέσιμα δεδομένα για όλες τις ιδιοπεριόδους, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5** είναι αρκετά σταθερά. Η μεταβολή των συντελεστών με την ιδιοπερίοδο δείχνει ότι οι εδαφικές συνθήκες παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του επιπέδου των φασματικών τιμών της επιτάχυνσης

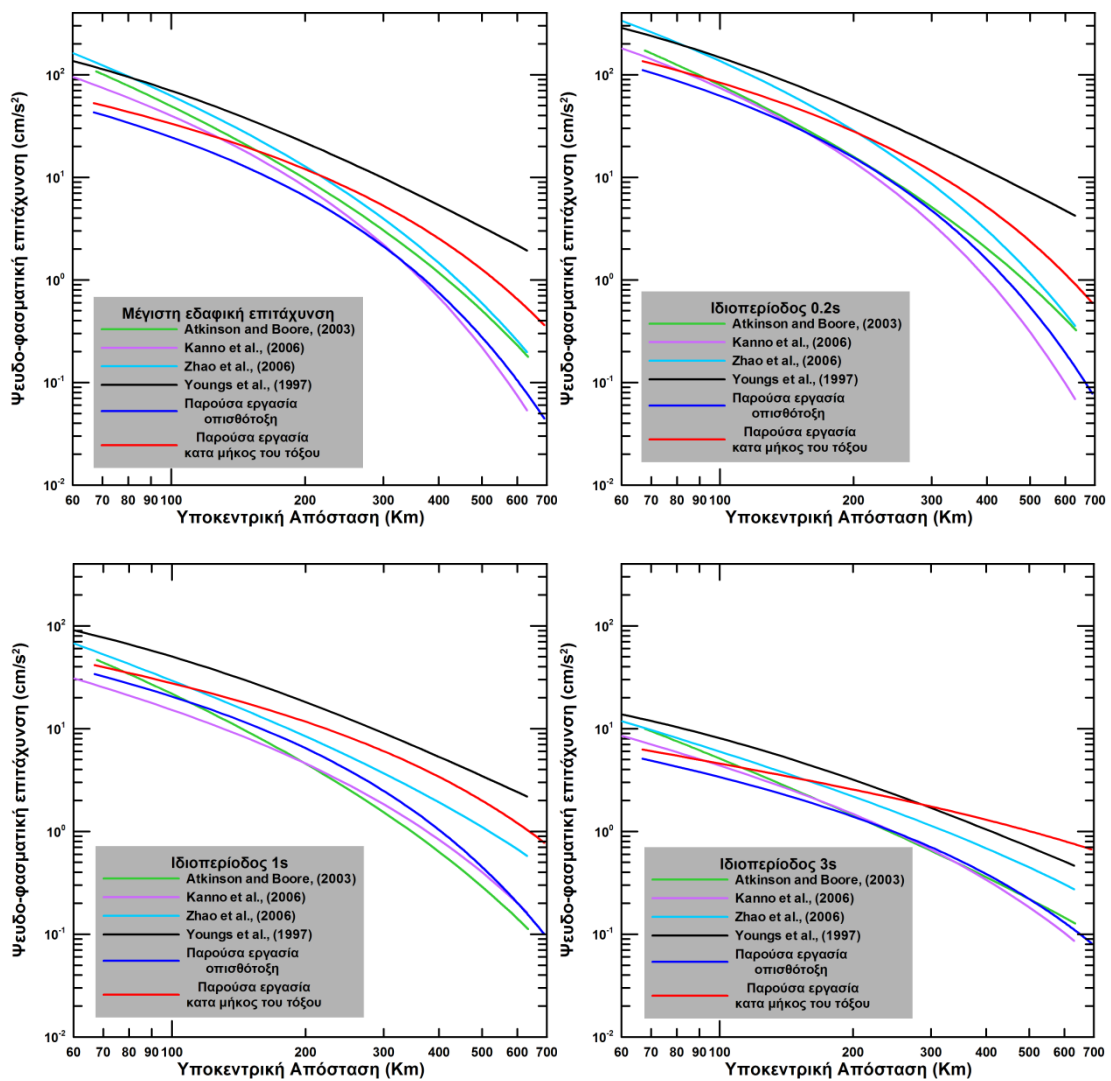
για περιόδους μικρότερες από 2-3s (0.3-0.5Hz). Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα δεν παρουσιάζει κάποια σημαντική μεταβολή σε συνάρτηση με την ιδιοπερίοδο.

Οι σχέσεις που υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία συγκρίθηκαν και με άλλες δημοσιευμένες σχέσεις για περιοχές κατάδυσης παγκοσμίως. Στο **Σχήμα 6** φαίνονται οι συγκρίσεις των σχέσεων που υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία (με μπλε χρώμα για την οπισθοτόξη περιοχή και κόκκινο χρώμα για την κατά μήκος του τόξου περιοχή) με τις σχέσεις που έχουν προταθεί από τους Atkinson and Boore, (2003) (AB03, πράσινο χρώμα), Kanno et al., (2006) (Kea06, μωβ χρώμα), Zhao et al., (2006) (Zea06, γαλάζιο χρώμα) και Youngs et al., (1997) (Yea97, μαύρο χρώμα) για τις αντίστοιχες υποκεντρικές αποστάσεις που είναι ορισμένες, για εδαφικές συνθήκες σκληρών πετρωμάτων και μέγεθος ροπής M6.7.



Σχήμα 5. Μεταβολή των φασματικών συντελεστών C_1 , C_{31} , C_{32} , C_{41} , C_{42} και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης από την Εξίσωση 1 σε συνάρτηση με την περίοδο.

Για τη σύγκριση των προτεινόμενων σχέσεων θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι από τους υπόλοιπους ερευνητές έχουν προταθεί σχέσεις που αναφέρονται στο σύνολο των δεδομένων, χωρίς κάποιο διαχωρισμό όπως αυτόν που προτείνεται στην παρούσα εργασία (οπισθότοξα-κατά μήκος του τόξου δεδομένα). Φαίνεται λοιπόν ότι οι σχέσεις που προτείνονται από την παρούσα εργασία βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τη σχέση Z_{e06} μιας και αυτή είναι που περνάει σχεδόν από το μέσο των καμπυλών της παρούσας εργασίας για υποκεντρικές αποστάσεις μεγαλύτερες των 200 Km. Καλή συμφωνία υπάρχει επίσης με τη σχέση των $AB03$ που είναι και η μόνη από τις σχέσεις που χρησιμοποίησε μικρό αριθμό δεδομένων από σειсмоγράφους σε συνδυασμό με δεδομένα από επιταχυνσιογράφους.



Σχήμα 6. Σύγκριση των φασματικών εμπειρικών σχέσεων που προτείνονται στην παρούσα εργασία (μπλε χρώμα για την οπισθότοξη περιοχή και κόκκινο χρώμα για την κατά μήκος του τόξου περιοχή) με αντίστοιχες σχέσεις για περιοχές κατάδυσης παγκοσμίως για διάφορες ιδιοπεριόδους, για μέγεθος ροπής $M6.7$ και εδαφικές συνθήκες σκληρού πετρώματος. Με την πράσινη καμπύλη φαίνεται η σχέση των Atkinson and Boore, (2003), με τη μωβ η σχέση των Kanno et al. (2006), με γαλάζιο χρώμα των Zhao et al. (2006) και με μαύρο χρώμα η σχέση των Youngs et al. (1997).

Η σύγκριση με τη σχέση Kea06 δεν είναι ικανοποιητική αφού από ότι φαίνεται και στο **Σχήμα 6** συμφωνεί περισσότερο με την καμπύλη που προτείνεται από την παρούσα εργασία για την οπισθότοξη περιοχή. Τέλος επιφύλαξη θα πρέπει να υπάρχει για τη σύγκριση με τη σχέση Yea97 αφού είναι γνωστό ότι για τον υπολογισμό της σχέσης αυτής χρησιμοποιήθηκαν πολύ λίγα δεδομένα από ενδοπλακικούς σεισμούς ενδιαμέσου βάθους (όπως ο σεισμός των Κυθήρων).

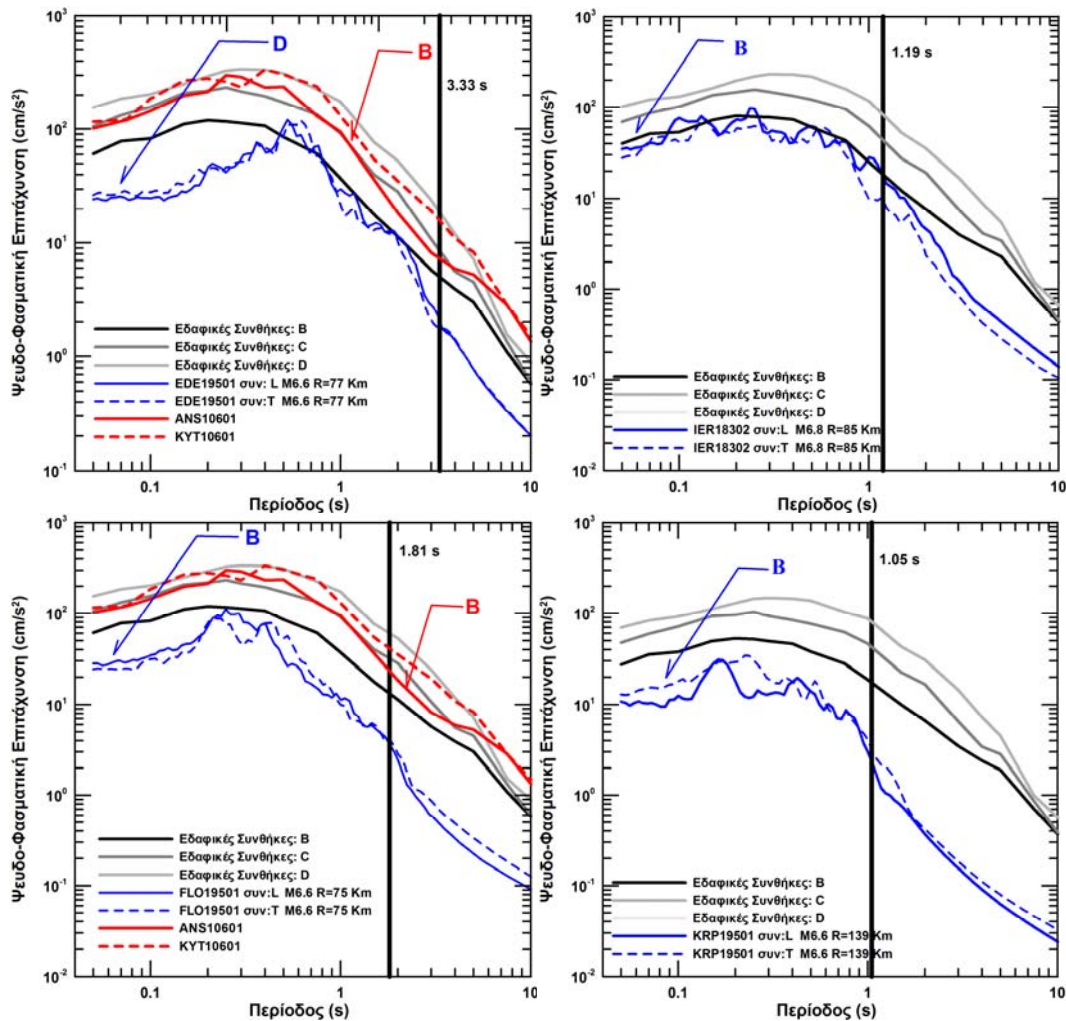
ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι φασματικές ιδιότητες της εδαφικής κίνησης από το σεισμό ενδιαμέσου βάθους που συνέβη στην περιοχή των Κυθήρων στις 08/01/06. Είναι η πρώτη φορά που σεισμός ενδιαμέσου βάθους στην περιοχή του Ν. Αιγαίου έχει παράγει έναν τόσο μεγάλο αριθμό καταγραφών (~100) υψηλής ποιότητας που προέρχονται από τα μόνιμα σεισμολογικά δίκτυα της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου, από σταθμούς καταγραφής του δικτύου του Εγκέλαδου και από τα μόνιμα δίκτυα επιταχυνσιογράφων που λειτουργούν στον Ελληνικό χώρο. Για τη μελέτη των φασματικών ιδιοτήτων της εδαφικής κίνησης έγινε συνδυασμός όλων των διαθέσιμων καταγραφών από τα δίκτυα που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Το τελικό σύνολο των δεδομένων προέκυψε έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία των καταγραφών αυτών και αποτελείται από περίπου διακόσιες οριζόντιες συνιστώσες εδαφικής επιτάχυνσης από τις οποίες υπολογίστηκαν τα φάσματα απόκρισης για μονοβάθμιο αρμονικό ταλαντωτή με 5% κρίσιμη απόσβεση και για 21 ιδιοπεριόδους ταλάντωσης. Τέλος με τη μέθοδο της παλινδρόμησης υπολογίστηκαν οι φασματικοί συντελεστές για την Εξίσωση 1.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι οι φασματικές τιμές της εδαφικής κίνησης από το σεισμό αυτό, αλλά και γενικότερα για όλους τους σεισμούς ενδιαμέσου βάθους που συμβαίνουν στην περιοχή του Ν. Αιγαίου, κυριαρχούνται από ένα σύνθετο μοντέλο απόσβεσης, παράγοντας υψηλότερες φασματικές τιμές σε περιοχές που βρίσκονται κατά μήκος του τόξου σε αντίθεση με την οπισθότοξη περιοχή. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ύπαρξη της ζώνης χαμηλών ταχυτήτων-χαμηλού παράγοντα απόσβεσης των εγκαρσίων κυμάτων στο πίσω μέρος της ζώνης κατάδυσης, στη σφήνα του μανδύα. Από τη μελέτη των **Σχημάτων 3 και 4** φαίνεται επίσης ότι η κατηγοριοποίηση των δεδομένων ανάλογα με τη σχετική τους θέση ως προς το τόξο κατάδυσης δε δημιουργεί κάποια συσχέτιση μεταξύ των υπολοίπων των φασματικών τιμών τις επιτάχυνσης ενώ επίσης δε φαίνεται να υπάρχει κάποια μεταβλητότητα ή διαφοροποίηση μεταξύ των φασματικών επιταχύνσεων που υπολογίστηκαν από καταγραφές από σεισμολογικά δίκτυα με αυτές που υπολογίστηκαν από καταγραφές από δίκτυα επιταχυνσιογράφων. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί με τον τρόπο αυτό φαίνεται ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα από διάφορα δίκτυα για τον υπολογισμό εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης των φασματικών, αλλά και των μέγιστων τιμών, της εδαφικής κίνησης.

Η μεταβολή των φασματικών συντελεστών c_{31} και c_{32} (συντελεστές ανελαστικής απόσβεσης) σε συνάρτηση με την περίοδο (**Σχήμα 5**) ενισχύει το συμπέρασμα του σύνθετου μοντέλου απόσβεσης των φασματικών τιμών, αφού οι απόλυτες τιμές του συντελεστή c_{32} είναι σημαντικά χαμηλότερες του c_{31} γεγονός που δείχνει την ισχυρότερη απόσβεση στην

οπισθότοξη περιοχή. Η σύγκριση με προτεινόμενες φασματικές εμπειρικές σχέσεις για άλλες ζώνες κατάδυσης παγκοσμίως έδειξε ότι οι σχέσεις που προτάθηκαν από τους Atkinson and Boore (2003) και από τους Zhao et al., (2006) βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις σχέσεις που προτείνονται στην παρούσα εργασία. Στις συγκρίσεις αυτές θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και το γεγονός ότι από τους υπόλοιπους ερευνητές προτείνονται σχέσεις για το σύνολο των δεδομένων και δεν ακολουθείται κάποια κατηγοριοποίηση, όπως γίνεται στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 7. Σύγκριση των φασμάτων απόκρισης καταγραφών από επιφανειακούς σεισμούς με φάσματα απόκρισης καταγραφών από το σεισμό ενδιάμεσου βάθους στην περιοχή των Κυθήρων για παρόμοιες αποστάσεις και μεγέθη, για διάφορες εδαφικές συνθήκες. Με μπλέ χρώμα φαίνονται τα φάσματα απόκρισης για τους επιφανειακούς σεισμούς, ενώ με κόκκινο τα φάσματα απόκρισης για τους σεισμούς ενδιάμεσου βάθους. Με τη μαύρη κατακόρυφη γραμμή σημειώνεται η περίοδος της γωνιακής συχνότητας αποκοπής του υψηλοπερατού φίλτρου των καταγραφών από τους επιφανειακούς σεισμούς. Στα σχήματα φαίνονται επίσης οι προτεινόμενες φασματικές εμπειρικές σχέσεις για διάφορες εδαφικές συνθήκες.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 7 η σύγκριση των φασματικών τιμών των επιφανειακών και των ενδιάμεσου βάθους καταγραφών ισχυρής κίνησης με αντίστοιχα μεγέθη και αποστάσεις παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές φασματικών πλατών ακόμη και στις περιπτώσεις που

συγκρίνονται επιταχυνσιογράμματα της ίδιας κατηγορίας εδαφικών συνθηκών. Αντίστοιχα συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν από την σύγκριση των φασματικών τιμών των παρατηρημένων καταγραφών ισχυρής κίνησης επιφανειακών σεισμών με τις αντίστοιχες τιμές των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης του ενδιαμέσου βάθους σεισμού των Κυθήρων 08/01/06. Οι διαφορές αυτές παρατηρούνται σε ολόκληρο το φάσμα των ιδιοπεριόδων της φασματικής ανάλυσης ενώ μία περαιτέρω αύξηση των διαφορών αυτών μπορεί να παρατηρηθεί κυρίως για ιδιοπεριόδους $T_0 > 2s$. Η επίδραση των εδαφικών κινήσεων που προέρχονται από σεισμούς ενδιαμέσου βάθους στις υποδομές της ευρύτερης περιοχής του Ν. Αιγαίου θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη σε μελλοντικές αναθεωρήσεις του ΕΑΚ ο οποίος μέχρι αυτή τη στιγμή κατά κύριο λόγο βασίσθηκε στις εκτιμήσεις φασματικών τιμών της ισχυρής κίνησης επιφανειακών σεισμών του Ελληνικού χώρου.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Atkinson G. M. and D. M. Boore, (2003). Empirical Ground-Motion Relations for Subduction-Zone Earthquakes and Their Application to Cascadia and Other Regions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 1703–1729.
- Benetatos C. and A.Kiratzis, (2006). “Source characteristics of the 8 January 2006 (Mw 6.7) intermediate depth Kythera earthquake”. 1st ECEES, 3-9 September 2006, Geneva, Switzerland.
- Boore D.M., (2003), “Analog-to-digital conversion as a source of drifts in displacements derived from digital recordings of ground acceleration”, *Bull. Seism. Soc. Am.* 93, pp. 2017-2024.
- Boore, D.M., (2005), “On pads and filters: processing strong-motion data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95, pp. 745–750.
- Crouse C.B., (1991). Ground-Motion Attenuation Equations for earthquakes on the Cascadia Subduction Zone, *Earthquake Spectra*, 7, 201-236.
- Draper, N.R., Smith, H., (1981). *Applied regression analysis* 2nd ed. Wiley, 709pp.
- Kanno T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, and Y. Fukushima (2006). A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96, pp. 879-897.
- Konstantinou I. K., I. S. Kalogeras, N. S. Melis, M. C. Kourouzidis, and G. N. Stavrakakis, (2006). The 8 January 2006 Earthquake (Mw 6.7) Offshore Kythira Island, Southern Greece: Seismological, Strong-motion, and Macroseismic Observations of an Intermediate-depth Event, *Seis. Res. Lett.*, 77, 544-553.
- NEHRP (1994). Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part 1: Provisions, FEMA 222A Building Seismic Safety Council, Washington D.C., 290 pp.
- Papazachos B.C., V.G., Karakostas, C.B., Papazachos, and E.M., Scordilis, (2000). The geometry of the Wadati-Benioff zone and lithospheric kinematics in the Hellenic arc, *Tectonophysics*, 319, 275-300.
- Papazachos C.B. and G., Nolet, (1997). P and S deep velocity structure of the Hellenic area obtained by robust nonlinear inversion of travel times, *J.Geoph. Res.*, 102, 8349-8367.
- Papazachos, C.B., P.M., Hatzidimitriou, D.G., Panagiotopoulos, and G.N. Tsokas, (1995). Tomography of the crust and upper mantle in southeast Europe. *J. Geophys. Res.*, 100, 12,405-12,422.

- Skarlatoudis A.A., Margaris B.N., (2006), "Kythera 2006 Earthquake: Data Processing Of Strong Motion From Various Digital Sensors", 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland.
- Spakman, W., (1988). Upper mantle delay time tomography with an application to the collision zone of the Eurasian, African and Arabian plates. Ph.D. Thesis, Univ. of Utrecht, 53, 200pp.
- Spakman, W., S., Van der Lee, and R.D., Van der Hilst, (1993). Travel-time tomography of the European-Mediterranean mantle down to 1400Km. *Phys. Earth Planet. Int.*, 79, 3-74.
- The Kythira (Greece) earthquake of January 8, 2006: Preliminary report on strong motion data, geotechnical and structural damage, ITSAK, EERI newsletter, 40(3).
- Theodulidis N. and B. Papazachos, (1990). 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.
- Uniform Building Code (UBC), (1997). *Intern. Conf. Building Officials, USA, Vol. II*, 489 pp.
- Youngs R. R., S.-J. Chiou, W. J. Silva, and J. R. Humphrey, (1997). Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes, *Seis. Res. Lett.*, 68, 58-73.
- Zhao J. X., J. Zhang, A. Asano, Y. Ohno, T. Oouchi, T. Takahashi, H. Ogawa, K. Irikura, H. K. Thio, P. G. Somerville, Ya. Fukushima, and Yo. Fukushima, (2006). Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96, pp. 898-913.