

Προσομοιώματα Ταχύτητας Εγκαρσίων Κυμάτων και Εκτίμηση της Σεισμικής Απόκρισης στο ΠΣ Βόλου – Ν. Ιωνίας

Shear Wave Velocity Profiles and Estimation of Site Response in Volos – N. Ionia Urban Area

ΡΑΠΤΑΚΗΣ, Δ.Γ. Επίκ. Καθηγητής, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ
ΜΑΚΡΑ, Κ.Α. Εντεταλμένη Ερευνήτρια ΙΤΣΑΚ
ΧΑΤΖΗΝΙΚΟΛΑΟΥ, Ν. Πολιτικός Μηχανικός, υποψ. Δρ. ΑΠΘ
ΠΙΤΙΛΑΚΗΣ, Κ.Δ. Καθηγητής, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στο άρθρο αυτό παρουσιάζονται αποτελέσματα της γεωφυσικής – γεωτεχνικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της Μικροζωνικής Μελέτης για την πόλη του Βόλου. Τα αποτελέσματα αυτά περιλαμβάνουν εδαφικά προσομοιώματα με βάση την ταχύτητα V_s , την πλέον σημαντική παράμετρο για τη μελέτη της σεισμικής απόκρισης, σε επιλεγμένες περιοχές στο πολεοδομικό συγκρότημα. Παράλληλα, αξιοποιούνται διαθέσιμα παλαιά και νεώτερα δεδομένα σεισμών και θορύβου, που προέρχονται από επιταχυνσιογράφους που εγκαταστάθηκαν στην πόλη, για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών της απόκρισης (συχνότητα συντονισμού και πλάτος ενίσχυσης) με ενόργανες μεθόδους και σε συνάρτηση με τις τοπικές εδαφικές συνθήκες.

ABSTRACT : In this paper, we present results from the geophysical – geotechnical research conducted in the framework of the microzonation study of the city of Volos. These results comprise soil profiles in terms of shear wave velocity V_s , the most important parameter for site response studies, in selected places of the urban area. In parallel, we exploit all available, old and new, earthquake and noise recordings from accelerographs installed in the city for the empirical evaluation of site response characteristics (fundamental frequency and amplification factor) with respect to local soil conditions.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σεισμική απόκριση των εδαφικών σχηματισμών είναι από τα πλέον σημαντικά ζητούμενα τόσο για την εκτίμηση του σεισμού σχεδιασμού όσο και για την πρόβλεψη των συνεπειών της σεισμικής δράσης. Ο πλέον σημαντικός παράγοντας τόσο για την ερμηνεία της σεισμικής απόκρισης όσο και για την προσομοίωσή της, είναι η γνώση των τοπικών εδαφικών συνθηκών. Η διερεύνηση του ρόλου των τοπικών εδαφικών συνθηκών και της επίδρασής τους στην ισχυρή εδαφική κίνηση (site effects) προϋποθέτει τη γνώση της γεωμετρίας και των ιδιοτήτων των γεωλογικών σχηματισμών στην ευρύτερη δυνατή κλίμακα. Οι προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό αυτών των παραμέτρων είναι ποικίλες. Οι πλέον κατάλληλες μέθοδοι είναι αυτές που οδηγούν στη γνώση της δυστημίας δηλ. της ταχύτητας διάδοσης των διαμη-

τικών κυμάτων, V_s . Για τον προσδιορισμό της, ιδίως σε δομημένο περιβάλλον όπως πυκνοδομημένα πολεοδομικά συγκροτήματα, χρησιμοποιούνται κυρίως σημειακές γεωφυσικές μέθοδοι (CH, DH, κ.α.).

Στο παρόν παρουσιάζονται αποτελέσματα της έρευνας που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της Μικροζωνικής Μελέτης του ΠΣ Βόλου – Ν. Ιωνίας (2000). Αυτά περιλαμβάνουν εδαφικά προσομοιώματα με βάση την ταχύτητα V_s , σε επιλεγμένες περιοχές στο πολεοδομικό συγκρότημα. Παράλληλα, αξιοποιούνται διαθέσιμα παλαιά και νεώτερα δεδομένα σεισμών και θορύβου, που προέρχονται από επιταχυνσιογράφους που εγκαταστάθηκαν στην πόλη, για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών της απόκρισης (συχνότητα συντονισμού και πλάτος ενίσχυσης) με ενόργανες μεθόδους. Τα αποτελέσματα επικεντρώνονται στην ενόργανη απόκριση μόνο και συσχετίζονται με τα V_s προσο-

μοιώματα διαμέσου θεωρητικών συναρτήσεων μεταφοράς.

2. ΕΔΑΦΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ – ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

2.1 Μετρήσεις πεδίου

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα της συντονισμένης και ολοκληρωμένης γεωφυσικής – γεωτεχνικής έρευνας. Το πρόγραμμα μετρήσεων για την πολύπλευρη γνώση του υπεδάφους στην ευρεία περιοχή μελέτης, περιέλαβε πλήθος μετρήσεων με διάφορες μεθόδους πεδίου και τεχνικές ανάλυσης. Οι μετρήσεις αυτές βοήθησαν στην κατάταξη των βασικών γεωυλικών, που προσδιορίστηκαν και με προϋπάρχουσες πληροφορίες (Πίν. 1), σε εδαφικές κατηγορίες με σαφέστερη και αναλυτικότερη διακριτοποίηση από αυτή των κανονισμών.

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις περιέλαβαν τις σεισμικές μεθόδους CH (με δύο διαφορετικές τεχνικές λήψης και ανάλυσης των δεδομένων, ASTM D4428VD4428M-84), DH, και Σεισμοκώνου, καθώς και ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις Sloumberger (Τεχνική Εκθεση 1999, Γ. Βαργεμέζης). Οι φορείς που συμμετείχαν στη δράση αυτή ήταν το Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων & Σεισμικής Μηχανικής ΑΠΘ, το ΚΕΔΕ και το Εργαστήριο Γεωφυσικής ΑΠΘ. Την οργάνωση και πλήρη εποπτεία των παραπάνω είχε ο πρώτος φορέας.

Οι σεισμικές διασκοπήσεις διαμέσου σωληνωμένων γεωτρήσεων (CH, DH), επιτρέπουν τον άμεσο προσδιορισμό των ταχυτήτων των διαμήκων και διατμητικών κυμάτων V_p και V_s με το βάθος, με την τοποθέτηση δέκτη ή/και πηγής στο εσωτερικό των γεωτρήσεων. Ο υπολογισμός των ταχυτήτων διάδοσης των σεισμικών κυμάτων χώρου γίνεται απ' ευθείας με τη μέθοδο CH ανάμεσα στις δύο (ή περισσότερες) γεωτρήσεις και έμμεσα από την κατασκευή των δρομοχρονικών διαγραμμάτων με τη μέθοδο DH.

Πίνακας 1. Είδος και πλήθος παλαιών και νέων γεωτεχνικών δεδομένων

Table 1. Kind and quantity of old and new geotechnical data.

Είδος	Πλήθος
Νέες γεωτρήσεις	10
Παλαιές γεωτρήσεις	171
Νέες πενετρομετρήσεις, CPT	9
Παλαιές πενετρομετρήσεις, CPT	6
Υδρογεωτρήσεις	24

Στις συνθήκες του ΠΣ κρίθηκε σκόπιμο να εφαρμοσθούν αυτές οι σεισμικές μέθοδοι, οι οποίες άλλωστε χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία σε μεγάλο αριθμό μικροζωνικών μελετών (Θεσσαλονίκη Λάρισα, Κοζάνη, Λεμεσός, Πάφος κ.ά), αντισεισμικών μελετών έργων κοινής ωφελείας (ΔΕΗ, ΟΑΣΠ, ΙΓΜΕ), και ιδιαίτερα του πολυδύναμου διεθνούς εμβέλειας Ευρωπαϊκού πειράματος Euroseistest (Raptakis et al., 2000).

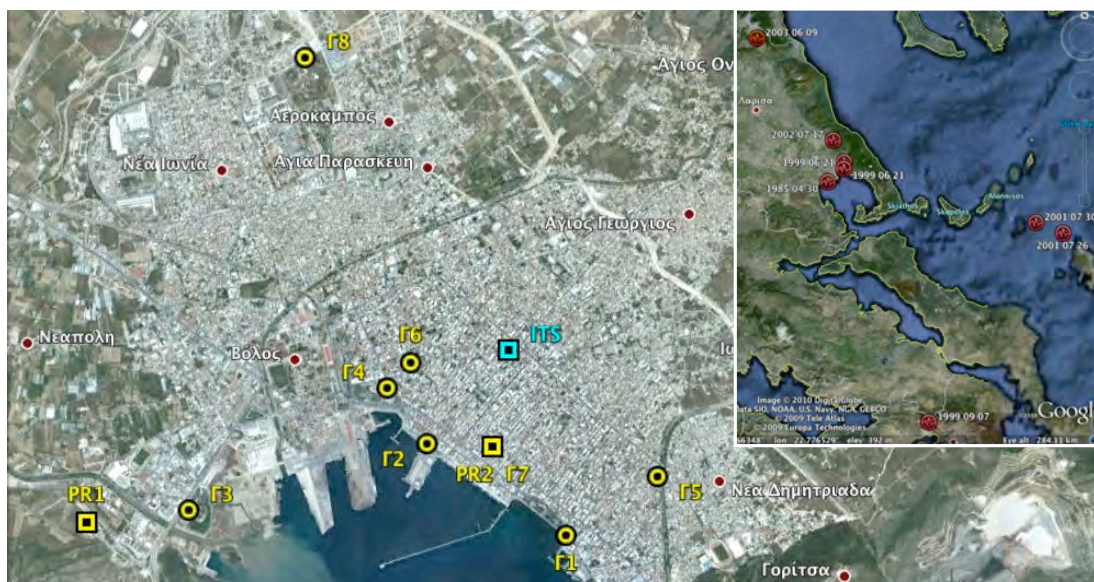
2.2 Προσομοιώματα ταχύτητας Vs

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 6 δοκιμές CH και 2 DH σε ισάριθμες θέσεις (από το ΕΕΘΣΜ-ΑΠΘ), 2 CH συμπληρωματικές ως προς το βάθος διασκόπησης και μετρήσεις Σεισμοκώνου σε 3 θέσεις στην παραλιακή ζώνη (από το ΚΕΔΕ). Το σύνολο των σεισμικών μετρήσεων πραγματοποιήθηκε μέσα στα όρια του ΠΣ (Σχ. 1) σε θέσεις που επιλέχθηκαν με κριτήρια, την ποικιλομορφία των εδαφικών σχηματισμών (κυρίως στους εύκαμπτους σχηματισμούς), τη γεωγραφική κατανομή τους, την καταλληλότητα των συνθηκών εκτέλεσης των δοκιμών και άλλα που απέρρεαν από τους σκοπούς της μικροζωνικής μελέτης. Γεωτρήσεις και δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν από το ΚΕΔΕ και οι εντός γεωτρήσεων μετρήσεις ήταν πυκνές (σε βάθη 1-3 m, μέχρι τον πυθμένα τους).

Στο σχήμα 1 και στους πίνακες 2 και 3 δίδονται οι θέσεις όπου πραγματοποιήθηκαν οι σεισμικές μετρήσεις, το είδος, τα βάθη, και οι φορείς. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε συνδυασμό με τη λιθολογική περιγραφή. Η κοινή παράθεση τιμών Vs σε 3 θέσεις γίνεται για λόγους σύγκρισης και ελέγχου της αξιοπιστίας των διαφορετικών τεχνικών και μετρήσεων CH και Σεισμοκώνου, δεδομένου ότι όλες καταλήγουν στον προσδιορισμό των ταχυτήτων Vs. Ενδεικτικό παράδειγμα δίνεται στο Σχ. 2 με το Vs προσομοίωμα στη θέση Γ1 (πλατεία Αγίου Κωνσταντίνου).

2.3 Κατάταξη εδαφών με βάση τη ταχύτητα Vs

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της γεωφυσικής έρευνας περιέλαβε καταρχήν τον έλεγχο της ορθότητας των ταχυτήτων V_p και V_s , όπως προέκυψαν από τις δυο τεχνικές CH, τη μέθοδο του σεισμοκώνου, τη μέθοδο DH, σε συνάρτηση με τη μεταξύ τους συσχέτιση, όπως και με τη λιθολογική περιγραφή της στρωματογραφίας από τις γεωτρήσεις, την παλαιότερη διαθέσιμη πληροφορία και τις ηλεκτρικές μετρήσεις κυρίως για την εκτίμηση του βάθους



Σχήμα 1. Χάρτης του ΠΣ Βόλου - Ν. Ιωνίας με τις θέσεις των μετρήσεων CH και DH (κύκλοι) και των επιταχυνσιογράφων (τετράγωνα). Ενθετος χάρτης με τα επίκεντρα και τις ημερομηνίες των καταγραφών των σεισμών στο δίκτυο του ΠΣ.

Figure 1. Map of Volos – N. Ionia urban area with the sites of CH and DH measurements (circles) and accelerographs (squares). Inset map with the epicenters and dates of the earthquakes recorded at the array.

Πίνακας 2. Θέσεις σεισμικών διασκοπήσεων
Table 2. Sites of seismic measurements

Θέση	M/ος	Θέση	Βάθος (m)	Φορέας
G1	CH	Πλ. Αγ. Κων/νου	0-44	ΑΠΘ
G1	CH	Πλ. Αγ. Κων/νου	45-85	ΚΕΔΕ
G2	CH	Λιμεναρχείο	0-16	ΑΠΘ
G3	CH	Πεδίο Άρεως	0-52	ΑΠΘ
G3	CH	Πεδίο Άρεως	30.4-61.2	ΚΕΔΕ
G4	CH	Πλ. Ρήγα Φεραίου	0-44	ΑΠΘ
G5	CH	Ιωά/ου & Γεω/δου	0-42.25	ΑΠΘ
G6	DH	Κ/λη-28ης Οκτ/ου	0-48	ΑΠΘ
G7	CH	Αγ. Νικόλαος	0-42	ΑΠΘ
G8	DH	Δωρίδος	0-39	ΑΠΘ
Σύν.	2	8	377.45	-

Πίνακας 3. Θέσεις δοκιμών σεισμοκώνου
Table 3. Sites of SCPT tests

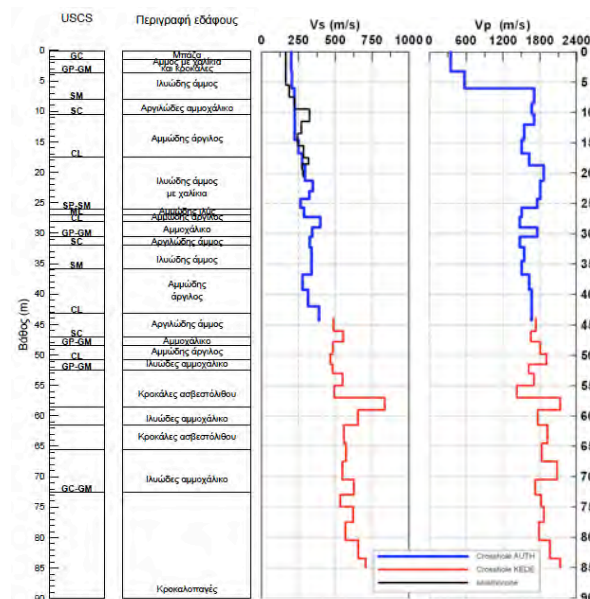
Δοκιμή	Κωδικός	Θέση	Βάθος (m)
1	Π6-003/Γ1	Πλ. Αγ. Κωνσταντίνου	20.50
2	Π2-001/Γ3	Πεδίο Άρεως	33.60
3	Π4-003/Γ4	Πλ. Ρήγα Φεραίου	19.30
Σύνολο	-	3	73.4

του βραχώδους υποβάθρου.

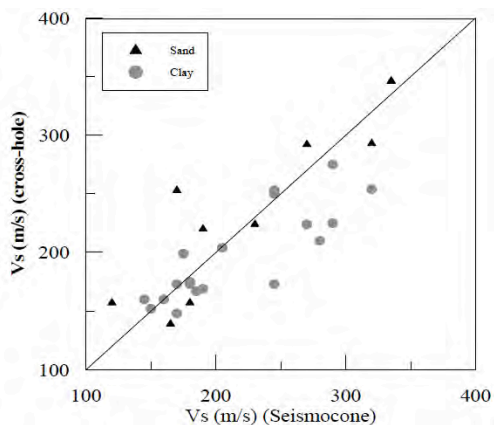
Σε ό,τι αφορά την αξιοπιστία των σεισμικών μετρήσεων, η αξιολόγηση έδειξε ότι τα ζεύγη τιμών των ταχυτήτων V_p και V_s στο σύνολο των γεωτρήσεων παρουσιάζουν ικανοποιητική σύζευξη και περιγράφουν ικανοποιητικά τους εδαφικούς σχηματισμούς και σε συμφωνία με τη λιθολογική περιγραφή τους. Η σύγκριση των ταχυτήτων V_s (όπου αυτή είναι δυνατή) έδειξε ότι πλην ελαχίστων εξαιρέσεων είναι πολύ κα-

λή παρά τη διαφορετικότητα των μεθόδων. Στο σχήμα 3 παρουσιάζονται ενδεικτικά σε σύγκριση τα αποτελέσματα των μεθόδων CH και σεισμοκώνου για 2 κατηγορίες εδαφών, άμμων και αργίλων. Σε περιπτώσεις που υπήρξαν διαφορετικές τιμές, ελήφθησαν αυτές του ΕΕΘΣΜ-ΑΠΘ.

Η χρήση των μεθόδων σεισμικής διασκόπησης έδωσε τη δυνατότητα της επαρκούς και ταυτόχρονης γνώσης του πάχους και της ταχύ-



Σχήμα 2. Περιγραφή και ταχύτητες V_p V_s των σχηματισμών στη θέση Αγ. Κωνσταντίνου (Γ1)
Figure 2. Soil description and V_s V_p profiles at site Ag. Konstantinou (G1)



Σχήμα 3. Σύγκριση τιμών ταχύτητας Vs μεταξύ του σεισμोकώνου και CH

Figure 3. Comparison of Vs velocities between SCPT and CH

τητας Vs των σχηματισμών που απαντώνται στις διάφορες περιοχές του ΠΣ. Με βάση τη λιθολογική περιγραφή των γεωτρήσεων αποδελτιώθηκαν συνολικά 26 διαφορετικοί τύποι εδαφών οι οποίοι διαφοροποιούνται ανάλογα με τη σύσταση και την ποσοστιαία σύνθεση εδαφών όπως άμμος, άργιλος, ιλύς, χαλίκια, κροκάλες οργανικά κ.α. Οι τύποι των εδαφών ομαδοποιήθηκαν σε 7 βασικές κατηγορίες, στις οποίες προεξάρχει ορισμένος τύπος εδάφους. Η ομαδοποίηση έδωσε τη δυνατότητα καθορισμού μέσης τιμής της ταχύτητας Vs με μικρή τυπική απόκλιση και κυρίως με διακριτά όρια, που χαρακτηρίζουν κάθε κατηγορία εδάφους (Πίν. 4).

2.4 Χαρτογράφηση αποθέσεων - υποβάθρου

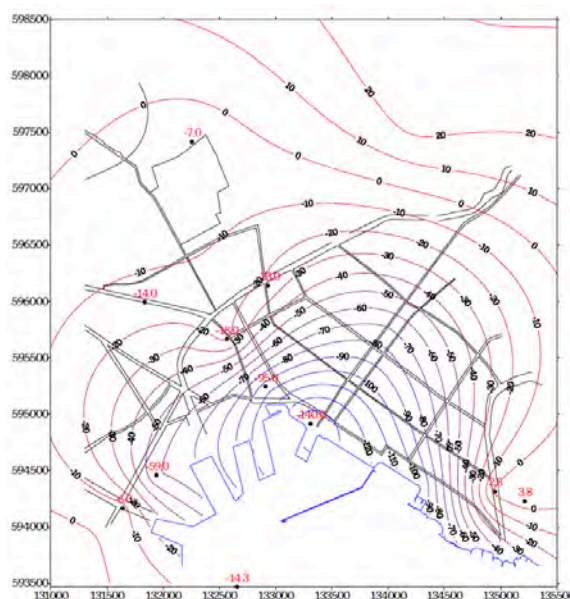
Αποθέσεις. Η συνολική εικόνα του όγκου των αποθέσεων στο ΠΣ δείχνει καταρχήν εύκαμπτους με Vs μεταξύ 160 και 250m/s, επιφανειακούς σχηματισμούς (στις περισσότερες και

Πίνακας 4. Κατάταξη εδαφών με βάση τις μέσες τιμές της ταχύτητας Vs
Table 4. Soil categorization based on averaged Vs velocity

Εδαφικός σχηματισμός	Vs (m/s)
Κροκαλοπαγή, λατυποπαγή και κροκάλες	750
Αμμοχάλικα με ή χωρίς αργιλικό κλάσμα (κατηγορίες Α, Β, Γ)	490
Στιφρή αμμώδης άργιλος με ή χωρίς χαλίκια (κατηγορίες Ζ, Γ)	470
Αμμώδεις σχηματισμοί με κυμαινόμενο ποσοστό ιλύος, αργίλων και χαλίκων (κατηγορία δ)	350
Μαλακή άργιλος, κατά θέσεις με ιλύ και λεπτή άμμο (κατηγορίες Η, Θ)	240
Αμμώδης ιλύς – αμμοίλες με ή χωρίς οργανικά και μικρή περιεκτικότητα σε άργιλο (κατηγορίες Ε, Θ)	165
Τεχνητές επιφανειακές επιχωματώσεις	215

πλησιέστερες θέσεις στην ακτογραμμή) με πάχη μεταξύ 15 και 25m. Ενώ οι δύστημοι σχηματισμοί με Vs μεγαλύτερη των 500m/s κυριαρχούν στον συνολικό όγκο των αποθέσεων σε όλο το ΠΣ, μέχρι το θεωρούμενο σεισμικό υπόβαθρο (~750m/s). Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι σε γειτονικές θέσεις (π.χ. Γ1, Γ7) υπάρχει μικρού πάχους Η (περίπου < 5m) ενδιάμεση στρώση υψηλής δυσστημσίας (> 750m/s) και σε βάθος λίγων δεκάδων μέτρων. Το πάχος των αποθέσεων ποικίλει από 15m (στα όρια του ΠΣ, θέση Γ8) μέχρι τα 140m (στο κέντρο της παραλιακής ζώνης, θέση Γ2).

Υπόβαθρο. Η γνώση του βραχώδους υποβάθρου (γεωμετρία και ταχύτητα Vs) στη μελέτη της σεισμικής απόκρισης των εδαφικών σχηματισμών έχει μεγάλη σημασία, καθώς καθορίζει τα χαρακτηριστικά του συντονισμού και της διάρκειας, και σε τελική ανάλυση του σεισμού σχεδιασμού για κάθε θέση μελέτης στο ΠΣ. Για τη χαρτογράφηση του υποβάθρου (Σχ. 4) χρησιμοποιήθηκαν οι διαθέσιμες γεωτεχνικές πληροφορίες περιλαμβανομένων των σεισμικών διασκοπήσεων σε συνδυασμό με τα πορίσματα της γεωλογικής αναγνώρισης, των ηλεκτρικών διασκοπήσεων, καθώς και τα στοιχεία των διαθέσιμων υδρογεωτρήσεων.



Σχήμα 4. Ισοβαθείς βραχώδους υποβάθρου
Figure 4. Contours of the bedrock depth

Περιφερειακά, λοιπόν, στα όρια του ΠΣ βρέθηκε το ασβεστολιθικό υπόβαθρο, μόνο σε μία θέση (Γ3) σε βάθος περίπου 60m και με ταχύτητα Vs περίπου 1250m/s, ενώ με την ίδια Vs στις παραφές του ΠΣ (Ν. Ιωνία, θέση Γ8) σε βάθος 30m, περίπου. Σε δυο άλλες θέσεις (Γ1, Γ10), οι γεωτρήσεις σε βάθη από 50 ως 70m

έδειξαν πιθανόν, τον αποσαθρωμένο μανδύα του βραχώδους υποβάθρου. Οι σεισμικές μετρήσεις σχεδόν σε όλες τις θέσεις έδειξαν ταχύτητες Vs (στα βάθη τερματισμού των γεωτρήσεων) με τιμές περίπου 750m/s. Από τη σύνθεση όλων των διαθέσιμων δεδομένων προέκυψε ο χάρτης του Σχ. 4, με τις ισοβαθείς του «σεισμικού υποβάθρου» σε όλη την έκταση του ΠΣ, το οποίο σε ορισμένες θέσεις (δυτικά) συμπίπτει με το ασβεστολιθικό.

3. ΠΡΩΙΜΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Η γνώση της εδαφικής δομής αφενός και αφετέρου ο μικρός αριθμός καταγραφών κυρίως σε επιταχυνσιογράφους της Νομαρχίας Μαγνησίας ΝΜ (με διαχειριστή το ΕΕΘΣΜ/ΑΠΘ) αποτέλεσαν τη βάση για μια προκαταρκτική μελέτη των χαρακτηριστικών της εδαφικής απόκρισης κυρίως με ενόργανη προσέγγιση όπου χρησιμοποιήθηκε κατά βάση η τεχνική του φασματικού λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφη συνιστώσα (HVSr). Επικουρικά στην ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν καταγραφές μικροθορύβου (MHVSr) και μονοδιάστατες θεωρητικές συναρτήσεις μεταφοράς (1DTF) για την επιβεβαίωση τόσο της στρωματογραφίας όσο και των εμπειρικών φασματικών λόγων.

3.1 Δεδομένα ενόργανης προσέγγισης

Τα όργανα καταγραφής των λίγων δεδομένων είναι 2 επιταχυνσιογράφοι ETNA (16Bits) της Ν. Μαγνησίας, ο ένας στις εγκαταστάσεις του βιολογικού καθαρισμού (PR1) σε ασβεστολιθικό πέτρωμα, και χρησιμεύει ως σταθμός αναφοράς ενώ ο δεύτερος στις αποθέσεις στο κέντρο του Βόλου (PR2) στην εκκλησία του Αγ. Νικολάου (Σχ. 1). Οι σταθμοί αυτοί τοποθετήθηκαν με υπόδειξη του ΕΕΘΣΜ-ΑΠΘ. Επίσης, στο κτίριο Νομαρχία ήταν εγκατεστημένος ένας επιταχυνσιογράφος SMA (ITS) και κατέγραψε έναν σεισμό του 1985 (Σχ. 1, Theodulidis et al, 2004). Οι σεισμοί, με τα χαρακτηριστικά τους, που καταγράφηκαν στις 3 θέσεις δίνονται στον Πίν. 5. Οι σεισμοί χωρίζονται σε 2 ομάδες. Η μια περιλαμβάνει σεισμούς κοντινού πεδίου με μικρά μεγέθη ενώ η άλλη μακρινούς σεισμούς με μεγέθη μεταξύ 5 και 6. Στην πρώτη ομάδα υπάρχει μια μόνο κοινή καταγραφή στους PR1 και PR2. Στην άλλη περιλαμβάνονται ισχυροί σεισμοί που συζητήθηκαν (ο καθένας για τους λόγους του), όπως αυτός των Αθηνών (1999) και της Σκύρου (2001). Τα δεδομένα αυτά ανα-

Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά σεισμών και θέσεων καταγραφής

Table 5. Earthquake information and recording sites

DATE	LAT°	LONG°	M _L	H (km)	ΘΕΣΕΙΣ	ΦΟΡΕΑΣ
19850430	39.239	22.883	5.6	6	ITS	ΙΤΣΑΚ
19990621	39.306	22.983	3.3	5	PR2	NM/ΑΠΘ
19990621	39.338	22.985	2.6	10	PR2	NM/ΑΠΘ
19990907	38.062	23.537	5.4	10	PR2	NM/ΑΠΘ
20010726	38.995	24.382	5.8	14	PR2	NM/ΑΠΘ
20010730	39.047	24.209	5.2	21	PR2	NM/ΑΠΘ
20020717	39.444	22.914	2.8	5	PR1/PR2	NM/ΑΠΘ
20030609	39.941	22.416	5.2	16	PR2	NM/ΑΠΘ

λύθηκαν με κάθε δυνατό τρόπο προκειμένου να διερευνηθούν τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά της ισχυρής κίνησης, τα οποία είναι εξαρτώμενα από την ενόργανη θέση (Aki, 1988).

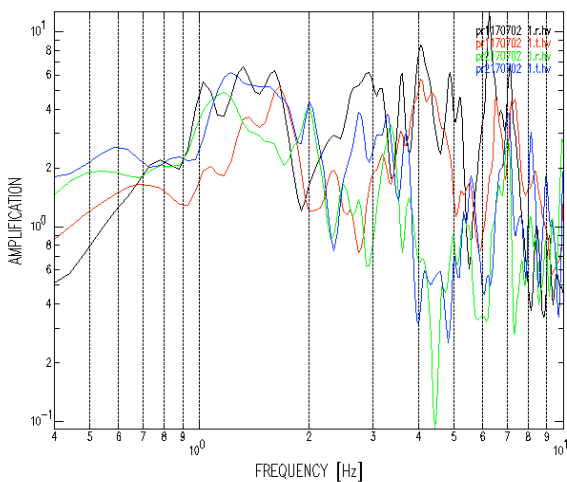
3.2 Αποτελέσματα εμπειρικών και θεωρητικών αναλύσεων

Οι καταγραφές των σεισμών στους σταθμούς αναλύθηκαν ως προς τις 2 οριζόντιες συνιστώσες αφού πρώτα στράφηκαν κατά γωνία 125°N, ούτως ώστε η ακτινική R συνιστώσα να συμπίπτει με τον μικρό άξονα του ελλειψοειδούς σχήματος της ιζηματογενούς λεκάνης στη στενή περιοχή του ΠΣ. Ο λόγος για την στροφή είναι η ανάδειξη της επίδρασης της τοπικής γεωλογίας στην ισχυρή κίνηση. Ακολουθώντας, υπολογίστηκαν τα φάσματα Fourier και από το λόγο των οριζοντίων συνιστωσών προς την κατακόρυφη οι φασματικοί λόγοι HVSr.

Σταθμός αναφοράς PR1

Οι φασματικοί λόγοι HVSr για κάθε οριζόντια συνιστώσα (πεδίο τιμών συχνοτήτων) του κοινού σεισμού (17-7-2002) δεν δείχνουν σημαντικές διαφορές (~0.1Hz) ως προς τη συχνότητα του θεμελιώδη συντονισμού στις θέσεις PR1 και PR2 (Σχ. 5), όπως θα ανέμενε κανείς για δυο σταθμούς σε διαφορετικές εδαφικές συνθήκες (επιφανειακός ασβεστόλιθος και αποθέσεις μεγάλου πάχους, αντίστοιχα).

Ο λόγος είναι ότι αν και μικρού μεγέθους (M_L=2.8) σεισμός είναι κοντινού πεδίου (με επικεντρική απόσταση R~9km και εστιακό βάθος H~5km), οπότε οι συχνότητες της πηγής φαίνεται να κυριαρχούν σε αυτές του συντονισμού και ιδίως του θεμελιώδη. Με αποτέλεσμα ο σεισμός να εμφανίζει κοινά χαρακτηριστικά ανεξάρτητα από τη θέση καταγραφής του. Συνεπώς αυτός ο μοναδικός σεισμός δεν βοηθάει στην εξαγωγή συμπεράσματος, σε σχέση με το ερώτημα αν ο σταθμός PR1 μπορεί να είναι σταθμός αναφοράς, αφενός, και αφετέρου αν



Σχήμα 5. HVSR των συνιστωσών R και T στους PR1 και PR2, χωρίς σημαντικές διαφορές, με προεξάρχουσες συχνότητες συντονισμού μεταξύ 1 και 2 Hz.

Figure 5. HVSR of the R and T components of the stations PR1 και PR2, without significant differences, with predominant resonant frequencies between 1 and 2 Hz.

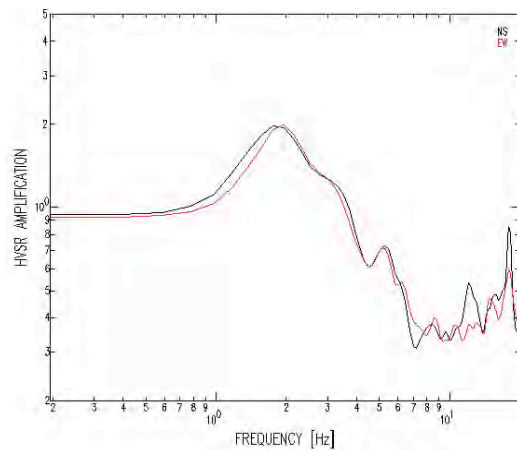
θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί με την τεχνική του κλασικού φασματικού λόγου (SSR), καθώς στην περίπτωση αυτή ο θεμελιώδης συντονισμός θα ήταν αφανής σε σχέση με ανώτερους (δευτερεύοντες).

Για την απάντηση του παραπάνω ερωτήματος αναλύθηκε με την ίδια τεχνική (HVSR) καταγραφή μικροθορύβου διάρκειας 1min στο σταθμό αναφοράς εξ' αιτίας υψίσυχων (>1/0.1 sec) διεγέρσεων από εκρήξεις (φουρνέλα) σε παρακείμενο λατομείο (νταμάρι). Ο λογαριθμικός μέσος όρος των φασματικών λόγων MHVSR με την τεχνική «moving average» σε χρονικά παράθυρα 5sec και με επικάλυψη 50% (δηλ. 23 διαστήματα των 5sec), έδειξε ότι δεν υπάρχουν ενισχύσεις (>2) για συχνότητες τουλάχιστον έως 4Hz που ενδιαφέρουν (Σχ. 6).

Η ένδειξη αυτή σε συνδυασμό με την τοπική γεωλογία (γεωτεχνική μελέτη κατασκευής του βιολογικού καθαρισμού) είναι ισχυρή για την καταλληλότητα του PR1 ως σταθμού αναφοράς. Συνεπώς, η αντίφαση των αποτελεσμάτων σεισμού και μικροθορύβου ισχυροποιεί την υπόθεση της έντονης επιρροής της πηγής του σεισμού (17-7-2002).

Σταθμοί PR2 και ITS

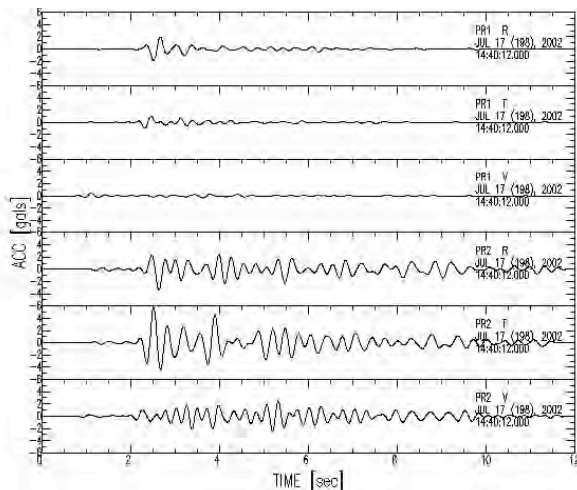
Κατά τα άλλα, η παρατήρηση των καταγραφών (πεδίο τιμών του χρόνου για τις 3 συνιστώσες) του σεισμού στις θέσεις PR1 και PR2 δείχνει όλες τις εύλογες διαφορές (ως προς τη θεωρία) στα χαρακτηριστικά τους (ως προς το πλά-



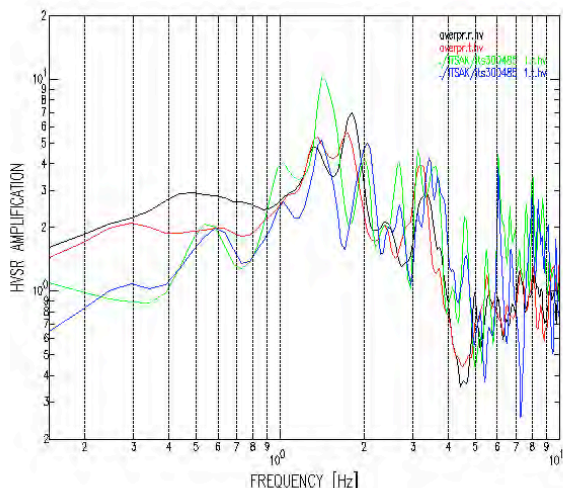
Σχήμα 6. Μέσος HVSR μικροθορύβου για τις δυο οριζόντιες συνιστώσες (θέση PR1)
Figure 6. Average HVSR of microtremor for both horizontal components (site PR1)

τος και τη διάρκεια διέγερσης) που θα αναμένονταν εξ' αιτίας των τοπικών εδαφικών συνθηκών (site effects). Τόσο το πλάτος όσο και η διάρκεια στον PR2 (αποθέσεις) είναι υπερδιπλάσια των καταγραφών στον PR1 (Σχ. 7). Η παραπάνω διαπίστωση ενισχύεται περισσότερο με την εφαρμογή φίλτρου ζώνης 0.1-4Hz (συχνότητες όπου προεξάρχουν οι φασματικοί λόγοι). Σε ό,τι αφορά τη διαφορά του πλάτους μπορεί να αποδοθεί στην ενίσχυση της ισχυρής κίνησης (κατακόρυφη διάδοση των οριζόντια πολωμένων SH κυμάτων) σε συνάρτηση με το συνολικό πάχος των αποθέσεων. Σε ό,τι αφορά τη διαφορά στη διάρκεια, δεδομένου ότι παρουσιάζεται και στις 3 συνιστώσες (P, S, R και L κύματα) και ότι δεν μπορεί να δικαιολογηθεί από τη διαφορά της επικεντρικής απόστασης (επιφανειακά κύματα πηγής), μπορεί να αποδοθεί στα τοπικά επιφανειακά κύματα (λόγω φαινομένων περίθλασης στο όριο αποθέσεων-υποβάθρου (Aki 1988, Raptakis et al. 2004ab).

Πλέον της κοινής καταγραφής, η καταγραφή 7 σεισμών στο σταθμό PR2 έδωσε τη δυνατότητα να υπολογισθεί ο περισσότερο αντιπροσωπευτικός (του ενός σεισμού) μέσος όρος των HVSR (Σχ. 8) για διάρκεια 12sec (περιλαμβανομένων των P, S, και SW). Πράγματι, ο λογαριθμικός μέσος για κάθε συνιστώσα παρουσιάζει ενίσχυση μεγαλύτερη από 5, στις συχνότητες 1.4 και 1.8Hz περίπου, επιβεβαιώνοντας τις παρατηρήσεις για τον κοινό σεισμό και παρά την ανομοιογένεια των σεισμών. Η ομοιότητα των 2 συνιστωσών είναι μια ένδειξη ότι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες προσομοιάζουν σε αμφότερες τις διευθύνσεις, ακτινική και εγκάρσια. Η παραπάνω ένδειξη επιβεβαιώνεται και στη θέση ITS, καθώς η μοναδική καταγραφή παρουσιάζει όμοια χαρακτηριστικά με



Σχήμα 7. Κοινές καταγραφές 3 συνιστωσών στους PR1 (πάνω) και PR2 (κάτω)
Figure 7. Common recordings of 3 components at PR1 (top) and PR2 (bottom)



Σχήμα 8. Σύγκριση λογαριθμικού μέσου όρου HVSR στο PR2 και ενός σεισμού στο ITS
Figure 8. Comparison of logarithmic average HVSR at PR2 and one event at ITS

αυτά του PR2 (δίδυμη αιχμή στις συχνότητες 1.4 και 2.0Hz, περίπου), παρά τη μεταξύ τους απόσταση και τη σχετική θέση τους στη γεωλογική δομή.

Το γεγονός ότι στη θέση PR2 σε συχνότητες μικρότερες του 1Hz, ο παράγοντας ενίσχυσης μπορεί να υπερβαίνει το 2 οφείλεται στο ότι για ορισμένους σεισμούς (ισχυρούς και ανεξαρτήτως αν είναι κοντινού ή μακρινού πεδίου) οι αντίστοιχοι φασματικοί λόγοι παρουσιάζουν αιχμές με ενίσχυση μεταξύ 3 και 4. Οι περιπτώσεις αυτές είναι ενδεικτικές της διέγερσης – συντονισμού της εδαφικής στήλης συμπεριλαμβανομένου και αυτού του σεισμικού υποβάθρου ($V_s > 750\text{m/s}$). Από την άλλη πλευρά, το γεγονός ότι η αιχμή αυτή δεν προεξάρχει στους φασματικούς λόγους είναι ένδειξη ότι είτε η αντίθεση V_s μεταξύ αποθέσεων – σεισμι-

κού και κρυσταλλικού υποβάθρου δεν είναι σημαντική είτε η κρίσιμη απόσβεση των παραπάνω είναι μεγάλη.

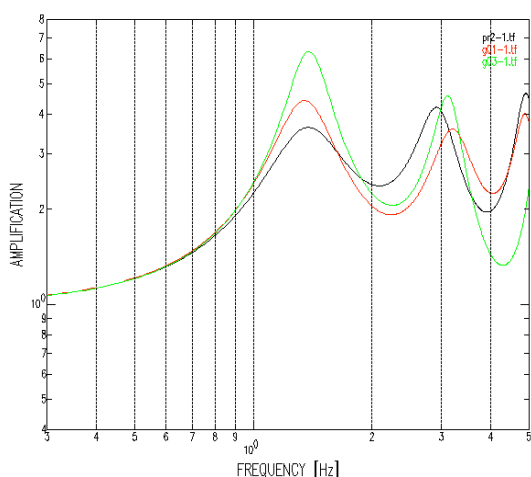
1DTF στις αποθέσεις (Γ3, PR2/Γ7, Γ1)

Δοθέντος ότι η γεωλογική δομή στο ΠΣ είναι επαρκώς γνωστή και μάλιστα με όρους ταχύτητας V_s , υπολογίσθηκαν οι μονοδιάστατες συναρτήσεις μεταφοράς 1DTF με τη μέθοδο ανακλαστικότητας (reflectivity method, Kennett 1983) προκειμένου να συσχετισθεί η τοπική γεωλογία με τα χαρακτηριστικά της σεισμικής απόκρισης. Αρχικά, υπολογίσθηκε η 1DTF στη θέση PR2.

Δεδομένου ότι από τις μετρήσεις προσδιορίσθηκαν οι ταχύτητες V_s μέχρι τα 45m, ενώ το υπόβαθρο εκτιμήθηκε στα 120m, το εδαφικό προσομοίωμα επεκτάθηκε με τις αντίστοιχες ταχύτητες λαμβάνοντας υπόψη γειτονικές μετρήσεις από τις εκατέρωθεν θέσεις Γ1 και Γ3. Η 1DTF (Σχ. 9) δείχνει ως προς τον θεμελιώδη συντονισμό όμοια χαρακτηριστικά ($f_0 \sim 1.4\text{Hz}$) με αυτά του μέσου HVSR από τις καταγραφές. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει το προτεινόμενο V_s προσομοίωμα. Παρόλα αυτά, η ενίσχυση και η μορφή της θεωρητικής 1DTF είναι διαφορετική από τον HVSR, καθώς η δίδυμη κορυφή στη συχνότητα 1.8Hz απουσιάζει.

Γίνεται φανερό ότι η απλότητα και η υποεκτίμηση της 1DTF δεν μπορεί να αναπαραστήσει την περίπλοκη επίδραση των γεωλογικών συνθηκών (λόγω των περιθλωμένων επιφανειακών κυμάτων στο γεωλογικό όριο (αποθέσεων-υποβάθρου). Ως γνωστόν η διάδοση αυτών των κυμάτων στο εσωτερικό της ιζηματογενούς λεκάνης προκαλεί πρόσθετες ενισχύσεις του 1D συντονισμού στη θεμελιώδη συχνότητα.

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίσθηκαν οι αντίστοιχες 1DTF στις θέσεις Γ1 και Γ3 (Σχ. 9). Αξιοσημείωτο είναι ότι παρά το γεγονός ότι τα εδαφικά προσομοιώματα δείχνουν να διαφέρουν ως προς τις ταχύτητες V_s και τα πάχη των βασικών σχηματισμών, καθώς και το βάθος του υποβάθρου, η συχνότητα του θεμελιώδη συντονισμού είναι περίπου ίδια. Ενώ ο παράγοντας ενίσχυσης διαφοροποιείται ανάλογα με την αντίθεση της μέσης ταχύτητας V_s των αποθέσεων και αυτής του υποβάθρου. Όσο μεγαλύτερη η αντίθεση τόσο μεγαλύτερη η ενίσχυση. Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι παρά τις διαφοροποιήσεις των γεωλογικών χαρακτηριστικά της απόκρισης είναι παρόμοια. Το γεγονός αυτό επισημαίνεται εξάλλου και από τη ζωνοποίηση με όρους φασμάτων α-



Σχήμα 9. Θεωρητικές συναρτήσεις μεταφοράς 1DTF στις θέσεις PR2, Γ1 και Γ3

Figure 9. Theoretical transfer functions 1DTF at the sites PR2, Γ1, and Γ3

πόκρισης που έγινε στα πλαίσια της μικροζωνικής μελέτης (Πιπιλάκης και συν., 2010).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εκτεταμένη γεωτεχνική και γεωφυσική έρευνα έδειξε ότι το υπέδαφος στο ΠΣ αποτελείται γενικά από δύστηνους σχηματισμούς οι οποίοι καταλαμβάνουν τον μεγαλύτερο όγκο των αποθέσεων. Ωστόσο, οι επιφανειακοί σχηματισμοί ιδίως στη δυτική πλευρά είναι αρκετά εύκαμπτοι. Το ανάγλυφο του υποβάθρου έχει ημι-κωνικό σχήμα γεγονός που επιφυλάσσει μια μάλλον περίπλοκη επίδραση στην ισχυρή κίνηση με ανάλογα αποτελέσματα στη σεισμική απόκριση.

Σε ό,τι αφορά την ενόργανη προσέγγιση της, τα περιορισμένα δεδομένα από χαρακτηριστικούς σεισμούς δείχνουν ότι τα χαρακτηριστικά της απόκρισης, με όρους ενίσχυσης στη θεμελιώδη συχνότητα συντονισμού και διάρκειας της ισχυρής κίνησης, αντιστοιχούν σε αυτά των αποθέσεων με τα δεδομένα δυναμικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ιζημάτων του ΠΣ. Οι σχετικά μικροί παράγοντες ενίσχυσης και οι όμοιες συχνότητες του θεμελιώδη συντονισμού (τουλάχιστον σε 2 θ έσεις, PR2 και ITS), οι οποίοι είναι αποτέλεσμα αφενός της κατακόρυφης διάδοσης των οριζοντίως πολωμένων διατμητικών κυμάτων και αφετέρου της πλευρικής διάδοσης των τοπικά περιθλωμένων επιφανειακών κυμάτων, ερμηνεύονται επαρκώς από την τοπική γεωλογία καθώς μπορούν να συγκριθούν ευθέως με τα θεωρητικά αποτελέσματα.

Μελλοντικές καταγραφές σεισμών και πέραν της μονοδιάστατης, αναλύσεις μπορούν να

φωτίσουν καλύτερα την κατανόηση της διάδοσης του κυματικού πεδίου στα ιζήματα του ΠΣ και των επιδράσεων τους, καθώς και να οδηγήσουν στην ορθολογική εκτίμηση του σεισμού – φάσματος σχεδιασμού της ισχυρής κίνησης σε θέσεις ενδιαφέροντος στο ΠΣ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστίες οφείλονται σε όλους τους συντελεστές που βοήθησαν στη Μικροζωνική Μελέτη του ΠΣ Βόλου-Ν. Ιωνίας, στη Νομαρχία Βόλου για τη διάθεση των δεδομένων, στο Εργ. Γεωφυσικής Τμ. Γεωλ. ΑΠΘ για την τεκμηρίωση των σεισμών, στην υπηρεσία Google-Earth, στους φορείς που διέθεσαν πληροφορίες.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aki, K. (1988). "Local site effects on strong ground motion" In J.L. VonThun (ed.), *Earthquake Engineering & Soil Dynamics II - Recent Advances in Ground Motion Evaluation*, Park City, Utah, June 27-30, 103-155.
- Kennett, B.L.N. (1983). *Seismic Wave Propagation in Stratified Media*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1983.
- Πιπιλάκης Κ., Δ. Ραπτάκης, Κ. Μάκρα, Φ. Βελδεμίρη, Θ. Τίκα, Α. Αναστασιάδης, Ν. Χατζηνικολάου (2010). "Γεωτεχνικός Χάρτης και Μικροζωνική Μελέτη Πολεοδομικού Συγκροτήματος Βόλου-Ν. Ιωνίας", 6^ο Παν. Συν. Γεωτ. & Γεωπερ. Μηχ., Βόλος, 2010.
- Raptakis D., K. Makra, A. Anastasiadis & K. Pitilakis (2004a). "Complex site effects in Thessaloniki (Greece): I. Soil structure and confrontation of observations with 1D analysis." *Bull. of Earthq. Eng.*, 2, 271-300
- Raptakis D., K. Makra, A. Anastasiadis & K. Pitilakis (2004b). "Complex site effects in Thessaloniki (Greece): II. 2D SH modeling and engineering insights." *Bull. of Earthq. Eng.*, 2, 301-327
- Τεχνική έκθεση (2000). "Μικροζωνική Μελέτη του ΠΣ Βόλου-Ν.Ιωνίας" Εργ. Εδαφ. και Θεμελ. Τμ. Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ (Ε.Υ. Κ. Πιπιλάκης, κωδ. εργ. 8870 ΕΕ ΑΠΘ)
- Τεχνική Έκθεση (1999). "Ηλεκτρικές Βυθοσκοπήσεις στο ΠΣ Βόλου – Ν. Ιωνίας" (Υπ. Γ. Βαργεμέζης) Εργ. Γεωφυσικής ΑΠΘ.
- Τεχνική Έκθεση (1997). "Γεωτρήσεις και εργαστηριακές – γεωτεχνικές έρευνες" (Υπ. Γ. Τσιαμπάος, Ν. Σαμπατακάκης, Χ. Γιάνναρος, Χ. Κωνσταντινίδης και Ι. Βασιλείου. ΚΕΔΕ – ΥΠΕΧΩΔΕ.
- Theodulidis, N., Kalogeras I., Papazachos C., Karastathis V., Margaris B., Papaioannou Ch., Skarlatoudis A. (2004). HEAD v1.0: A unified Hellenic Accelerogram Database. *Seismological Res. Lett.*, 75(1), 36-45.