

Χαρακτηρισμός Εδαφικών Συνθηκών με τη Χρήση Εδαφικού Θορύβου στην Πόλη των Γρεβενών Site Characterization Using Ambient Noise in Grevena City (Greece)

Μάριος ΑΝΘΥΜΙΔΗΣ¹, Νίκος ΘΕΟΔΟΥΛΙΔΗΣ², Αλέξανδρος ΣΑΒΒΑΪΔΗΣ³,
Κωνσταντίνος ΠΑΠΑΖΑΧΟΣ⁴

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Οι βλάβες που προκαλούνται στις ανθρώπινες κατασκευές από την ισχυρή σεισμική κίνηση συσχετίζονται με τις τοπικές εδαφικές συνθήκες δηλαδή με την απόκριση του εδάφους υπό σεισμική διέγερση. Για τον υπολογισμό της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών στη σεισμική κίνηση στον ευρύτερο χώρο που καταλαμβάνει η πόλη των Γρεβενών πραγματοποιήθηκαν μέτρήσεις εδαφικού θορύβου σε σχετικά ομοιόμορφο κάναβο 60 συνολικά μετρήσεων. Πριν τη διεξαγωγή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε έλεγχος ημερήσιων μεταβολών του εδαφικού θορύβου από μόνιμο εγκατεστημένο δίκτυο οργάνων σε τέσσερις επιλεγμένες θέσεις μέσα στην πόλη των Γρεβενών. Η διαταραχή του εδαφικού θορύβου εντοπίζεται κυρίως στις εργάσιμες ώρες τις ημέρας (8:00-16:00) στις οποίες πρέπει να αποφεύγεται η μέτρηση εδαφικού θορύβου. Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με τη μέθοδο του φασματικού λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα (Horizontal to Vertical Spectral Ratio ή HVSR) και για κάθε σημείο μέτρησης προέκυψε η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα (f_0) των επιφανειακών ιζηματογενών στρωμάτων, το πλάτος ενίσχυσης της εδαφικής κίνησης (A_0) και ο δείκτης τρωτότητας εδαφικών σχηματισμών K_g ($=A_0^2/f_0$). Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα διαθέσιμα γεωλογικά και γεωτεχνικά δεδομένα καθώς και με συνθετικές καταγραφές εδαφικού θορύβου δείχνοντας καλή συσχέτιση στις περισσότερες θέσεις. Με βάση την παραπάνω ανάλυση προέκυψε ένας προκαταρκτικός χάρτης κατηγοριοποίησης των εδαφικών σχηματισμών για την πόλη των Γρεβενών.

ABSTRACT : Damage caused by seismic events to human constructions are strongly influenced by site effects (i.e. the ground response to seismic motions). For site effects evaluation in the city of Grevena and surrounding area, ambient noise measurements were performed in an almost uniform grid of 60 sites. Evaluation of diurnal variations of ambient noise in four selected sites in the Grevena town, showed that the disturbance of ambient noise mostly occurs between the working hours of the day (8:00-16:00) and thus during this time period measurements should be avoided. All data were processed using Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) method and for every measurement point the soil

¹ Γεωλόγος, Εργαστήριο Γεωφυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: manthymi@geo.auth.gr

² Διευθυντής Ερευνών, Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ), Θεσσαλονίκη, email: ntheo@itsak.gr

³ Εντεταλμένος Ερευνητής, Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ), Θεσσαλονίκη, email: alekos@itsak.gr

⁴ Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: kpapaza@geo.auth.gr

fundamental frequency (f_0), its corresponding amplification (A_0) and the vulnerability index K_g ($=A_0^2/f_0$) has been calculated for each site. The results of the HVSR method were compared with the available geological and geotechnical data as well as with synthetic ambient noise recordings and showed good correlation in most cases. Based on the abovementioned analysis, a preliminary soil classification map was proposed for the city of Grevena.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη πολλών ισχυρών σεισμών έδειξε τη σημαντική εξάρτηση που έχουν οι βλάβες κατασκευών από την απόκριση του εδάφους στη σεισμική κίνηση. Με άλλα λόγια, η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών (site effects) στη σεισμική κίνηση είναι υπεύθυνη για τις μεγάλες καταστροφές που μπορεί να προκληθούν από ισχυρούς σεισμούς σε μία περιοχή. Αν λάβουμε υπόψη ότι οι περισσότερες πόλεις είναι χτισμένες πάνω σε γεωλογικά πρόσφατους ιζηματογενείς σχηματισμούς οι οποίοι έχουν τη «δυναμική» να ενισχύσουν την εδαφική σεισμική κίνηση, η ανάγκη για τον υπολογισμό της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών γίνεται ακόμη μεγαλύτερη αν όχι επιτακτική.

Η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην εδαφική κίνηση μπορεί να υπολογιστεί τόσο από καταγραφές σεισμών ή τεχνητών εκρήξεων όσο και από θεωρητικές προσομοιώσεις απόκρισης, αν είναι γνωστές οι κατάλληλες παράμετροι της υπεδάφιας δομής από γεωτεχνικές μελέτες. Οι παραπάνω μεθοδολογίες έχουν το μειονέκτημα του μεγάλου χρόνου που καταναλώνεται για την διεξαγωγή των πειραμάτων στο ελεύθερο πεδίο, του υψηλού κόστους και της δυσκολίας εφαρμογής σε κατοικημένες περιοχές. Οι μετρήσεις εδαφικού θορύβου μπορούν να πραγματοποιηθούν εύκολα μέσα σε κατοικημένες περιοχές, είναι γρήγορες, με χαμηλό κόστος και με μικρές απαιτήσεις σε προσωπικό και εξοπλισμό.

Ο εδαφικός θόρυβος είναι ταλαντώσεις του εδάφους με πολύ μικρό πλάτος (της τάξης των 10^{-4} έως 10^{-2} mm) οι οποίες προέρχονται από φυσικές πηγές όπως τα θαλάσσια κύματα, οι παλίρροιες, ο άνεμος, οι αλλαγές στην ατμοσφαιρική πίεση, αλλά και από ανθρωπογενείς πηγές όπως είναι οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις, αυτοκινητόδρομοι, κτλ (Bonnetoy-Claudet et al., 2006). Ο φασματικός λόγος της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα (Horizontal to Vertical Spectral Ratio ή HVSR) του εδαφικού θορύβου συνήθως παρουσιάζει ένα μέγιστο που αντιστοιχεί στην θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα (f_0) των εδαφικών σχηματισμών στο σημείο μέτρησης (Nogoshi και Igarashi, 1971, Nakamura, 1989, Bard, 1999). Κατά την διάρκεια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος *SESAME* (Site EffectS assessment using *AM*bient *Exc*itations, 2004) ύστερα από πολλές συγκρίσεις φασματικών λόγων εδαφικού θορύβου με φασματικούς λόγους από σεισμικές καταγραφές καθώς και με φασματικούς λόγους οι οποίοι προήλθαν από αριθμητική προσομοίωση καταγραφών, προέκυψε το συμπέρασμα ότι η μέθοδος HVSR με δεδομένα εδαφικού θορύβου μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα για την τιμή της f_0 , αλλά και για ένα πιθανόν κατώτερο όριο για την ενίσχυση της σεισμικής εδαφικής κίνησης, A_0 .

Η μέθοδος HVSR από καταγραφές εδαφικού θορύβου στηρίζεται στην ύπαρξη ενός επιφανειακού στρώματος το οποίο επικάθεται πάνω σε σκληρότερο στρώμα ή ημιχώρο με διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες. Επομένως, όταν το σημείο μέτρησης βρίσκεται πάνω σε σκληρό πέτρωμα (βράχο) ή όταν δεν υπάρχει αντίθεση στις φυσικές και μηχανικές

ιδιότητες μεταξύ των υλικών στην επιφάνεια και σε κάποιο βάθος τότε ο φασματικός λόγος HVSR είναι σχεδόν επίπεδος χωρίς την εμφάνιση ιδιαίτερων μέγιστων (peaks).

Η περιοχή μελέτης εντοπίζεται στην πόλη των Γρεβενών στη βορειο-δυτική Ελλάδα (Σχήμα 1) και χαρακτηρίζεται από μικρή σεισμικότητα με την ιδιαιτερότητα ότι τα σεισμικά γεγονότα μπορούν να έχουν μεγάλο μέγεθος αλλά μεγάλη περίοδο επανάληψης (Parazachos, 1990). Το πιο πρόσφατο καταστρεπτικό σεισμικό γεγονός έγινε στις 13/05/1995 (M=6.6) και προκάλεσε σημαντικές ζημιές στην ευρύτερη περιοχή Κοζάνης-Γρεβενών χωρίς τραυματισμούς ή απώλειες σε ανθρώπινες ζωές. Για τον υπολογισμό της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην πόλη των Γρεβενών πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εδαφικού θορύβου με τη χρήση μονού σταθμού. Σκοπός της μεθόδου είναι ο εντοπισμός περιοχών (μικροζώνες) με κοινά χαρακτηριστικά απόκρισης στη σεισμική κίνηση, με στόχο την μείωση του σεισμικού κινδύνου από μελλοντικά σεισμικά γεγονότα.

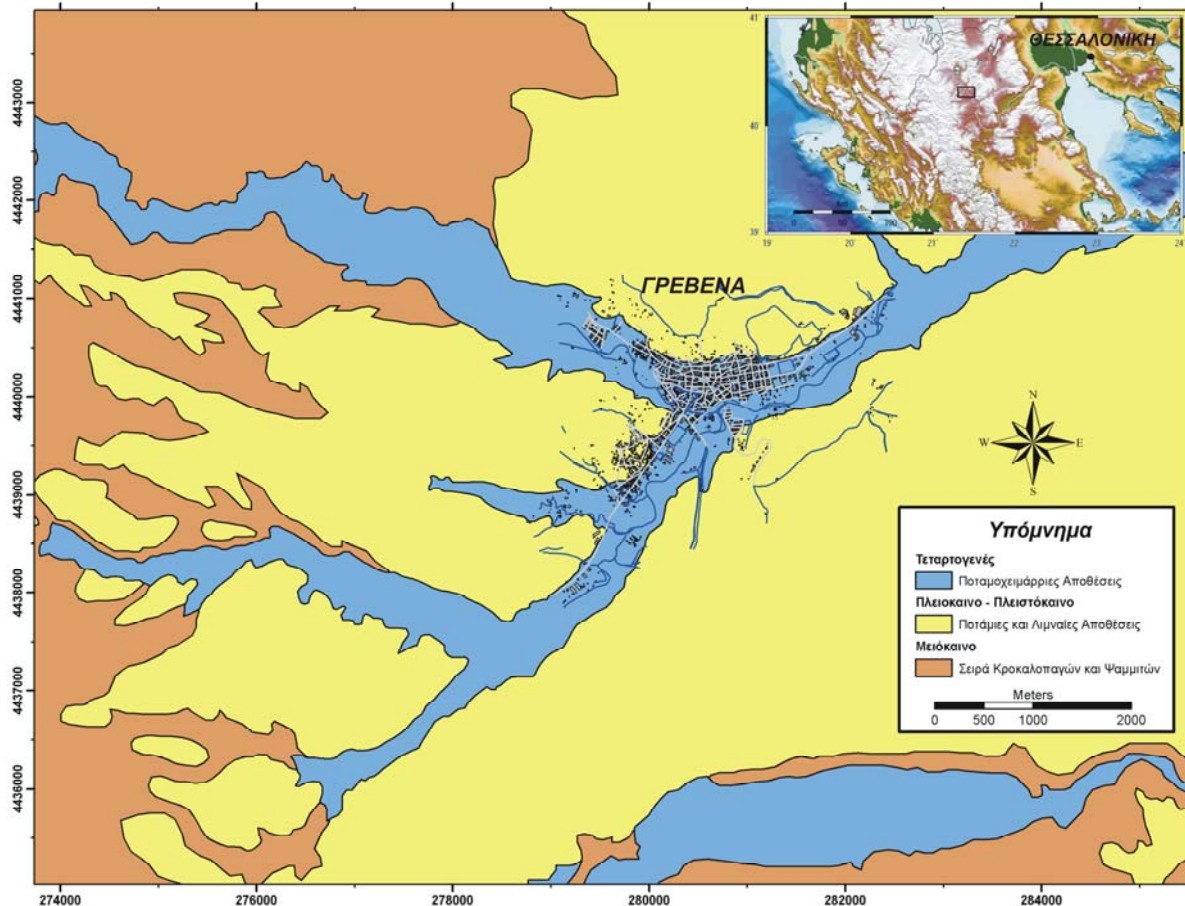
ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Γεωλογικά Δεδομένα

Η γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής μελέτης δίνεται από τον γεωλογικό χάρτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε., 1985), κλίμακας 1:50000 (Σχήμα 1). Σύμφωνα με την διαίρεση του ελληνικού χώρου σε γεωτεκτονικές ζώνες (Μουντράκης, 1985) η περιοχή μελέτης ανήκει στην Υποπελαγονική ζώνη τα πετρώματα της οποίας αποτελούν το γεωλογικό υπόβαθρο. Συγκεκριμένα η ηλικία των πετρωμάτων είναι Μεσοζωική και καλύπτονται από μεγάλο πάχους ιζήματα (σε ορισμένες θέσεις το πάχος των ιζημάτων υπολογίζεται ότι πλησιάζει τα 5.000m) της ονομαζόμενης Μεσοελληνικής αύλακας. Η ηλικία των ιζημάτων τοποθετείται στο Ολιγόκαινο-Μειόκαινο και είναι μολασσικού τύπου δηλαδή η απόθεση τους πραγματοποιήθηκε σε συνεχώς μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα ιζηματογένεσης με αποτέλεσμα η δομή τους να χαρακτηρίζεται από εναλλαγές ιζημάτων ρηχής και βαθιάς θάλασσας με παρεμβολές λιμναίων και ποτάμιων φάσεων. Δεν παρουσιάζονται πτυχομένα γιατί δεν επηρεάστηκαν από την δράση του Αλπικού ορογενετικού κύκλου αλλά κεκλιμένα από την δράση κανονικών ρηγμάτων από τις μετέπειτα εφελκυστικές τεκτονικές δυνάμεις που επικράτησαν. Τα πετρώματα της Μεσοελληνικής αύλακας καλύπτονται από Πλείο-Πλειστοκαινικά ποτάμια και λιμναία ιζήματα καθώς και από πολύ πρόσφατα Τεταρτογενή ιζήματα μικρού πάχους.

Εστιάζοντας στην υπό μελέτη περιοχή (Σχήμα 1), οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται είναι τα πρόσφατα Τεταρτογενή ιζήματα του Γρεβενίτικου ποταμού πάνω στα οποία είναι χτισμένη η πόλη των Γρεβενών και τα υποκείμενα σε αυτά Πλείο-Πλειστοκαινικά ιζήματα. Το γεωλογικό υπόβαθρο ανήκει στα πετρώματα της Μεσοελληνικής αύλακας (σχηματισμοί Πενταλόφου - 2^{ος} Κύκλος), εμφανίζεται Νότια, Δυτικά και Βορειοδυτικά της πόλης σε αποστάσεις της τάξης των 5Km ενώ στρωματογραφικά αναμένεται να εμφανίζεται σε κατώτερες ορίζοντες.

Επομένως, πρόκειται για μία τυπική ιζηματογενή λεκάνη όπου πετρώματα του γεωλογικού υποβάθρου καλύπτονται από δύο ιζηματογενή στρώματα πρόσφατης γεωλογικά ηλικίας, η επίδραση των οποίων στην απόκριση της σεισμικής κίνησης είναι αυτή που επηρεάζει το ποσοστό των βλαβών στην πόλη των Γρεβενών.

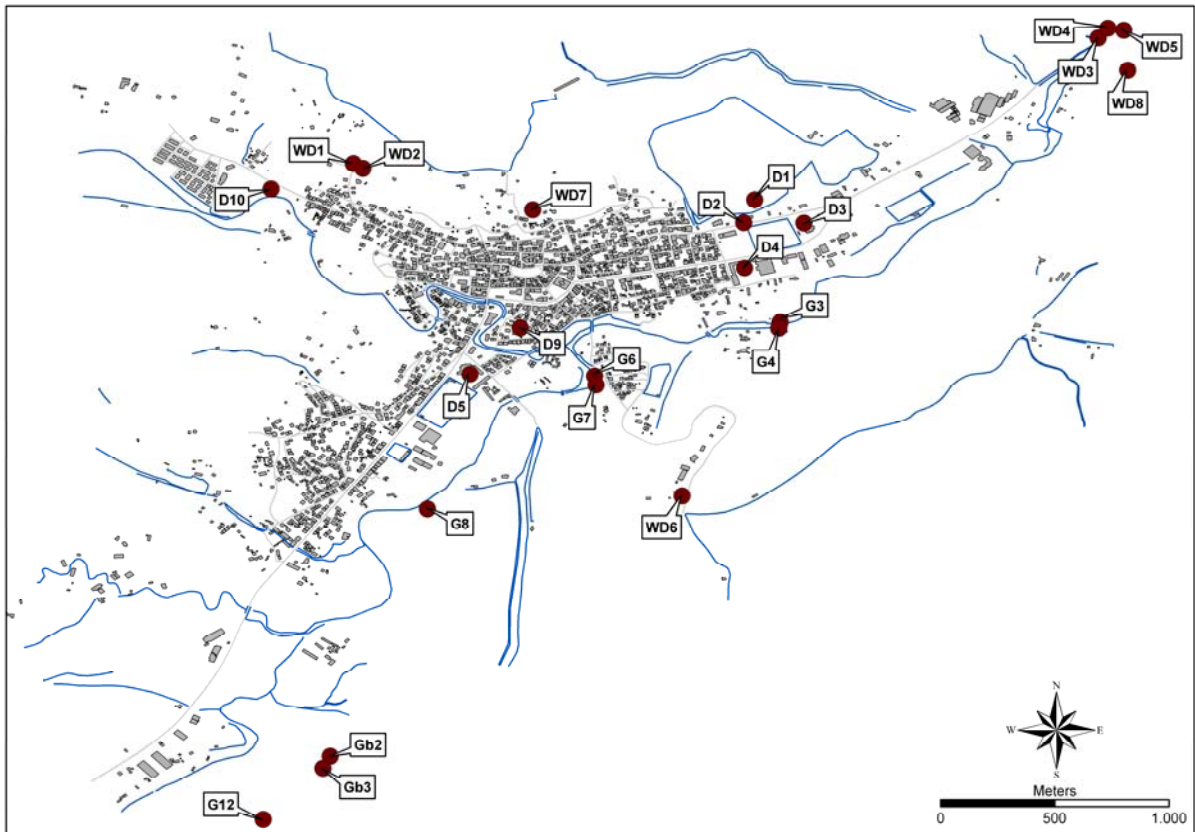


Σχήμα 1. Γεωλογικό σκαρίφημα για την ευρύτερη περιοχή μελέτης όπου διακρίνονται οι διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί.

Γεωτεχνικά Δεδομένα

Τα διαθέσιμα γεωτεχνικά δεδομένα αφορούν 23 συνολικά γεωτρήσεις οι οποίες εντοπίζονται μέσα στο πολεοδομικό συγκρότημα των Γρεβενών καθώς και στις γύρω περιοχές της πόλης (Σχήμα 2). Πρόκειται για γεωτεχνικές γεωτρήσεις κατασκευής κτηρίων και περιφερειακού οδικού δικτύου με μικρά βάθη διάτρησης (από 15m έως 30m), όπως επίσης και για γεωτρήσεις μεγάλου σχετικά βάθους (από 100m έως 160m) για παροχή νερού. Οι πληροφορίες που παρέχονται από κάθε γεώτρηση, πλην των υδρογεωτρήσεων, είναι η λιθολογία του υπεδάφους από πυρήνες (γεωλογικά καρότα) και κατάταξη των υλικών σύμφωνα με το Αμερικάνικο ενοποιημένο σύστημα κατάταξης εδαφών (American Unified Soil Classification System - AUSCS), η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και γεωτεχνικές παράμετροι όπως είναι η πρότυπη δοκιμή διεισδύσεως (Standard Penetration Test - SPT), η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (Unconfined Compression Test) και η τριαξονική δοκιμή θλίψης (Undrained Triaxial Compression Test - UU) σε δείγματα υλικού. Τα γεωτεχνικά δεδομένα των υδρογεωτρήσεων περιορίζονται στην λιθολογία του υπεδάφους όπως αναγνωρίζεται από τα τμήματα των πετρωμάτων τα οποία ανέρχονται στην επιφάνεια από την κυκλοφορία του νερού στα κοπτικά μέρη του γεωτρύπανου και τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται ένα τυπικό παραδείγματα πληροφοριών που παρέχονται από τις γεωτρήσεις και στο οποίο διακρίνεται η σύνθεση του υπεδάφους, το

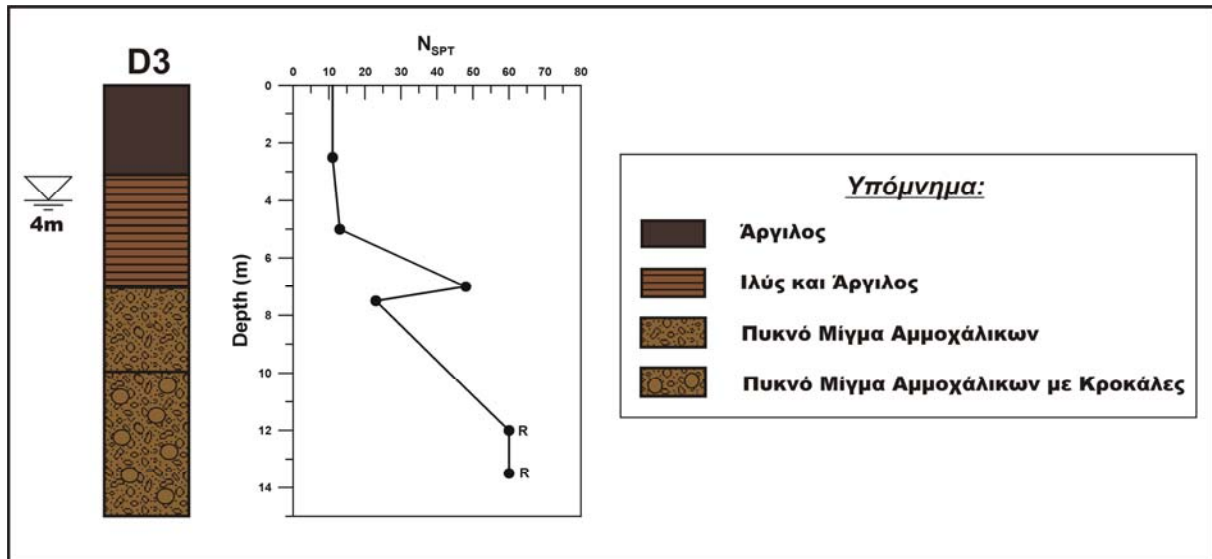
βάθος του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, καθώς και δεδομένα από την πρότυπη δοκιμή διεισδύσεως όπου φυσικά αυτά είναι διαθέσιμα.



Σχήμα 2. Θέσεις γεωτρήσεων στην ευρύτερη περιοχή μελέτης. Με πρόθεμα D, G και Gb αναφέρονται γεωτρήσεις μικρού βάθους (<30m) για κατασκευή κτιρίων και δρόμων αντίστοιχα, ενώ με WD αναφέρονται θέσεις υδρογεωτρήσεων σχετικά μεγάλου βάθους διάτρησης (>120m).

Η υπεδάφια δομή που εξάγεται από τα γεωτεχνικά δεδομένα συμφωνεί με αυτή που προκύπτει από τα γεωλογικά δεδομένα. Τα Τεταρτογενή ιζήματα αποτελούνται κυρίως από αργίλους και ιλύες σκούρου καφέ χρώματος με συμμετοχή χονδρόκοκκων υλικών όπως άμμοι, χαλίκια και κροκάλες. Τα Πλειο-Πλειστοκαινικά ιζήματα αποτελούνται από ένα πυκνό μίγμα αμμοχάλικων με λεπτόκοκκο συνδετικό υλικό και συχνή παρεμβολή κροκάλων καλού βαθμού αποστρωγγύλωσης και οφειλοθικής - ασβεστολιθικής σύστασης. Τα πετρώματα του υποβάθρου αποτελούνται από συνεκτικά κροκαλοπαγή βάσης και συμπαγείς ψαμμίτες. Όμως, αυτοί οι σχηματισμοί εμφανίζονται σε τρεις μόνο γεωτρήσεις (D5, G3 και G4 στο Σχήμα 2) σε βάθη που κυμαίνονται μεταξύ των 12.5m και 15m αλλά απουσιάζουν από την στρωματογραφική ακολουθία των υδρογεωτρήσεων η οποία αναπτύσσεται μέχρι και το βάθος των 160m. Επομένως, με βάση τα διαθέσιμα γεωτεχνικά δεδομένα ένα θέμα υπό συζήτηση είναι αν η παρουσία των συνεκτικών αυτών πετρωμάτων σε μικρά βάθη οφείλεται στην δράση ρηγμάτων ή πρόκειται απλώς για κάποιους ολισθόλιθους οι οποίοι παρεμβάλλονται τοπικά σε κάποιους ορίζοντες τις στρωματογραφικής σειράς των ιζημάτων. Η γεωλογική δομή των επιφανειακών ιζηματογενών στρωμάτων στην περιοχή μελέτης φαίνεται να παρουσιάζει μία σταδιακή διαβάθμιση των υλικών από λεπτόκοκκα στα ανώτερα στρώματα σε χονδρόκοκκα στα κατώτερα. Συνέπεια αυτής της δομής είναι ότι τα όρια των

επιφανειακών ιζηματογενών σχηματισμών δεν είναι πάντα σαφή. Από την άλλη μεριά, η διαφοροποίηση στις φυσικές ιδιότητες των ιζημάτων με τα πετρώματα του υποβάθρου αναμένεται να είναι μεγάλη και με σαφή όρια.



Σχήμα 3. Τυπικό παράδειγμα γεωτεχνικών δεδομένων από γεώτρηση. Διακρίνονται η υπεδάφια δομή, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα καθώς και δεδομένα της πρότυπης δοκιμής διεισδύσεως (SPT).

Συνοψίζοντας, μπορεί να δοθεί ένα πιθανό μοντέλο δομής για την περιοχή μελέτης με βάση τα διαθέσιμα γεωτεχνικά και γεωλογικά δεδομένα. Το επιφανειακό ιζηματογενές, αργιλικής κυρίως σύστασης, στρώμα παρουσιάζει σταθερό σχετικά πάχος σε όλη την έκταση της πόλης. Το πάχος του στρώματος εκτιμάται μεταξύ 3 και 12m. Αμέσως υποκείμενο βρίσκεται το δεύτερο ιζηματογενές στρώμα αποτελούμενο από πυκνό αμμοχαλικώδη σχηματισμό και μέτρια έως ισχυρά συγκολλημένα κροκαλοπαγή. Το πάχος του σχηματισμού φαίνεται να παρουσιάζει αξιοσημείωτη μεταβολή με τιμές που κυμαίνονται από λίγα έως πάνω από εκατό μέτρα. Τα δύο ιζηματογενή στρώματα επικάθονται σε συμπαγείς σχηματισμούς, κυρίως συνεκτικά κροκαλοπαγή και φαμμίτες, του υποβάθρου το οποίο παρουσιάζει μεγάλη ανομοιομορφία στην πάνω επιφάνεια του, πιθανότατα από την δράση ρηγμάτων.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ HVSR

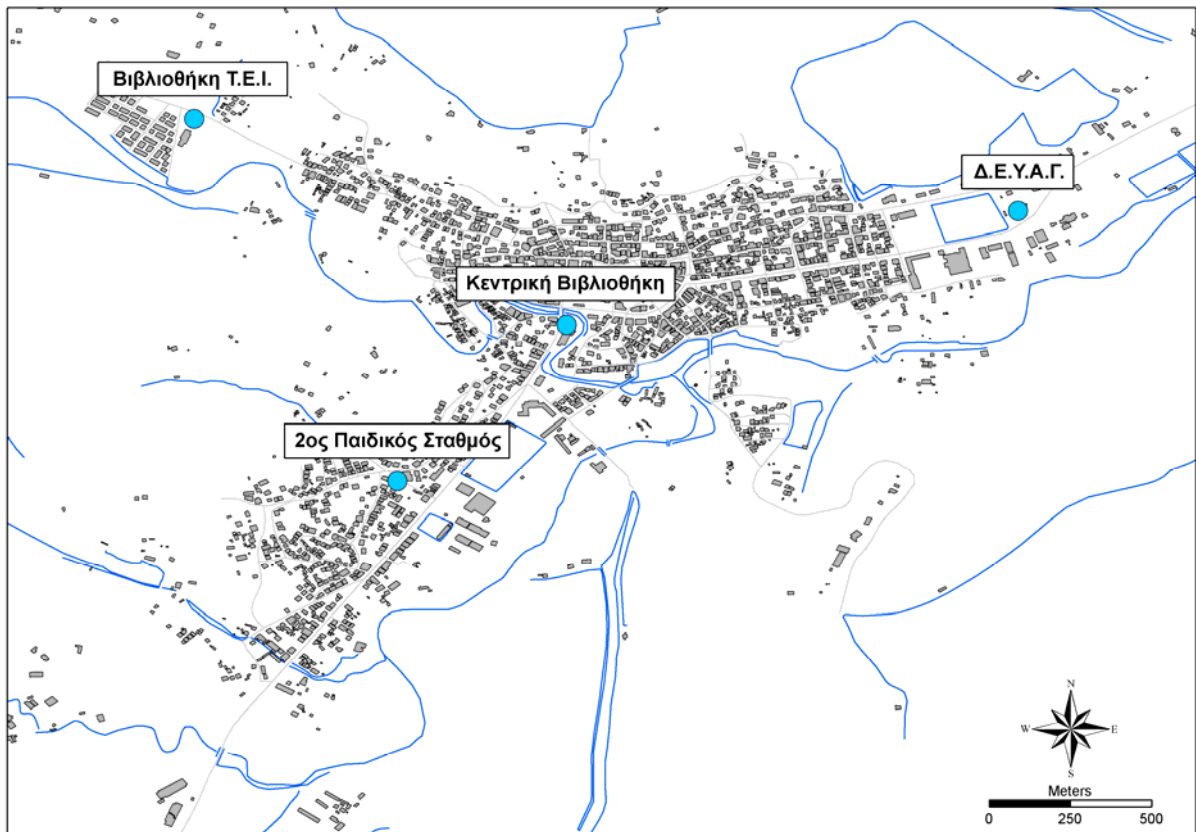
Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων Εδαφικού Θορύβου

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή του εδαφικού θορύβου ήταν ο ψηφιακός καταγραφέας CityShark I (Chatelain et al., 2000) σε σύνδεση με το σεισμόμετρο τριών συνιστωσών Lennartz 3D/5s. Η επεξεργασία των δεδομένων επικεντρώθηκε στην περιοχή συχνοτήτων από 0.2 έως 20Hz για δύο κυρίως λόγους. Πρώτον γιατί η περιοχή συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει για την εκτίμηση της απόκρισης των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών δεν υπερβαίνει τα 20Hz και δεύτερον γιατί η απόκριση του σεισμομέτρου στην εδαφική ταχύτητα είναι επίπεδη μεταξύ 0.2 και 50Hz. Η επεξεργασία των δεδομένων ακολούθησε τα παρακάτω στάδια:

- Αφαίρεση της μέσης στάθμης (DC offset removal) του σεισμομέτρου.
- Επιλογή τμημάτων (παραθύρων) του ψηφιακού σήματος διάρκειας 25 δευτερολέπτων τα οποία είναι κοινά και για τις τρεις συνιστώσες, χωρίς αλληλοεπικάλυψη μεταξύ δύο διαδοχικών παραθύρων.
- Εφαρμογή συνημιτονικού φίλτρου απόληξης (cosine tapering) σε ποσοστό 5%.
- Υπολογισμό των φασμάτων πλάτους για κάθε συνιστώσα με χρήση του μετασχηματισμού FFT (Fast Fourier Transform).
- Εξομάλυνση (smoothing) των φασμάτων πλάτους με τη μεθοδολογία που προτάθηκε από τους Konno & Ohmachi (1998) με παράγοντα εξομάλυνσης $\beta=0.40$.
- Υπολογισμό των φασματικών λόγων NS/V και EW/V κάθε οριζόντιας συνιστώσας προς την κατακόρυφη συνιστώσα ξεχωριστά, και
- Υπολογισμό του φασματικού λόγου του γεωμετρικού μέσου όρου των δύο οριζόντιων συνιστωσών προς την κατακόρυφη συνιστώσα με αποτέλεσμα την τελική μορφή της καμπύλης HVSR.

Όλη η παραπάνω επεξεργασία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού πακέτου *sesarray* (Wathelet, 2005) και συγκεκριμένα με το υποπρόγραμμα *Geopsy*. Κάθε καμπύλη HVSR καθώς και κάθε εμφανιζόμενο μέγιστο από όλες τις μετρήσεις εδαφικού θορύβου ελέχθηκαν για την σταθερότητα και την αξιοπιστία τους σύμφωνα με τις οδηγίες του Ερωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος SESAME (2004).

Έχει παρατηρηθεί ότι ο εδαφικός θόρυβος μπορεί να παρουσιάζει ημερήσια και εποχιακή μεταβολή η οποία επηρεάζει τα αποτελέσματα της ανάλυσης (Fyen, 1990). Για το λόγο αυτό πριν από την λήψη μετρήσεων εδαφικού θορύβου με τη χρήση μονού σταθμού στην περιοχή μελέτης, προηγήθηκε έλεγχος των ημερήσιων μεταβολών του σε επιλεγμένες θέσεις μέσα στην πόλη των Γρεβενών. Η επιλογή των θέσεων έγινε με βασικό κριτήριο την όσο το δυνατόν καλύτερη χωρική κάλυψη της πόλης και λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό ότι η τοποθέτηση των οργάνων καταγραφής έπρεπε να γίνει σε δημόσια κτίρια. Συγκεκριμένα, η τοποθέτηση των οργάνων έγινε στο κτίριο της Δημόσιας Επιχείρησης Ύδρευσης και Αρδρευσης Γρεβενών (Δ.Ε.Υ.Α.Γ.), στην κεντρική βιβλιοθήκη (Πνευματικό κέντρο), στην βιβλιοθήκη του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος (Τ.Ε.Ι.) και στο 2^ο παιδικό σταθμό (Σχήμα 4). Η καταγραφή εδαφικού θορύβου, για κάθε θέση, είχε διάρκεια 20 λεπτών με συχνότητα δειγματοληψίας 100Hz και περίοδο επανάληψης μία ώρα. Η όλη διαδικασία καταγραφής εδαφικού θορύβου ήταν συνεχόμενη για τρεις μέρες και πραγματοποιήθηκε στο χρονικό διάστημα μεταξύ 12 και 15 Σεπτεμβρίου 2006. Οι διαταραχές του εδαφικού θορύβου συμπίπτουν σε γενικές γραμμές με τις εργάσιμες ώρες της ημέρας (8:00πμ - 16:00μμ) και σε αυτό το διάστημα πρέπει να αποφεύγεται η μέτρηση εδαφικού θορύβου. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της θεμελιώδους συχνότητας των επιφανειακών ιζηματογενών στρωμάτων (f_0) και της αντίστοιχης ενίσχυσης (A_0) για κάθε θέση.



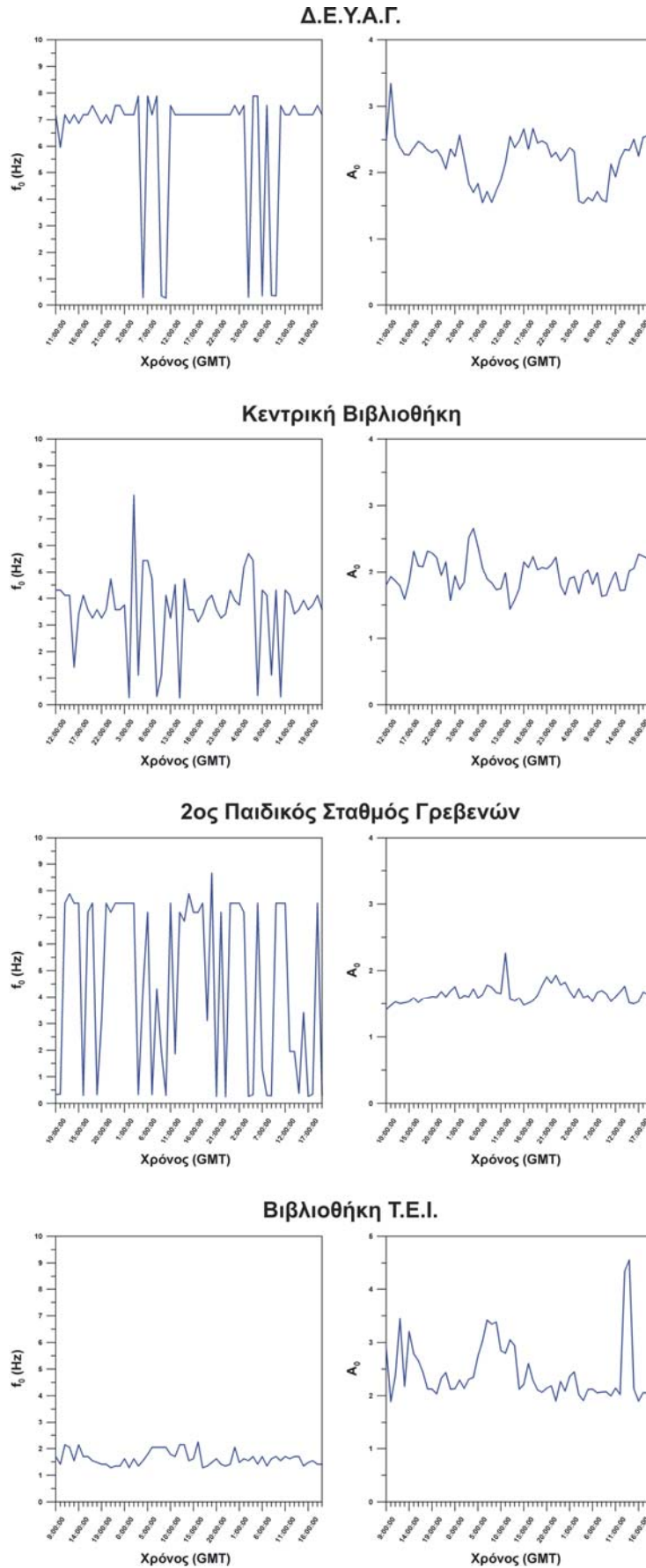
Σχήμα 4. Θέσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκε έλεγχος των ημερήσιων μεταβολών του εδαφικού θορύβου με τοποθέτηση οργάνων καταγραφής σε μόνιμη βάση, για τρεις συνεχόμενες μέρες.

Μετρήσεις εδαφικού θορύβου με τη χρήση μονού σταθμού πραγματοποιήθηκαν σε όλο το πολεοδομικό συγκρότημα των Γρεβενών καθώς και σε γύρω περιοχές που καλύπτονται από το σχέδιο επέκτασης της πόλης. Έγινε προσπάθεια να διατηρηθεί όσο το δυνατόν ομοιόμορφος κάναβος μετρήσεων με απόσταση μεταξύ των σημείων μέτρησης περίπου 200m (Σχήμα 6). Το σύνολο των μετρήσεων ήταν 60 και η λήψη τους έγινε σε ώρες μη διαταραχής του εδαφικού θορύβου σύμφωνα με τον έλεγχο των ημερήσιων μεταβολών που προηγήθηκε. Ένα σύστημα GPS παρείχε τις γεωγραφικές συντεταγμένες για κάθε σημείο μέτρησης. Η διάρκεια καταγραφής εδαφικού θορύβου για κάθε θέση ήταν 20 λεπτά με συχνότητα δειγματοληψίας 100Hz. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τον Οκτώβριο του 2006, ενώ συμπληρωματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν το Μάρτιο του 2007.

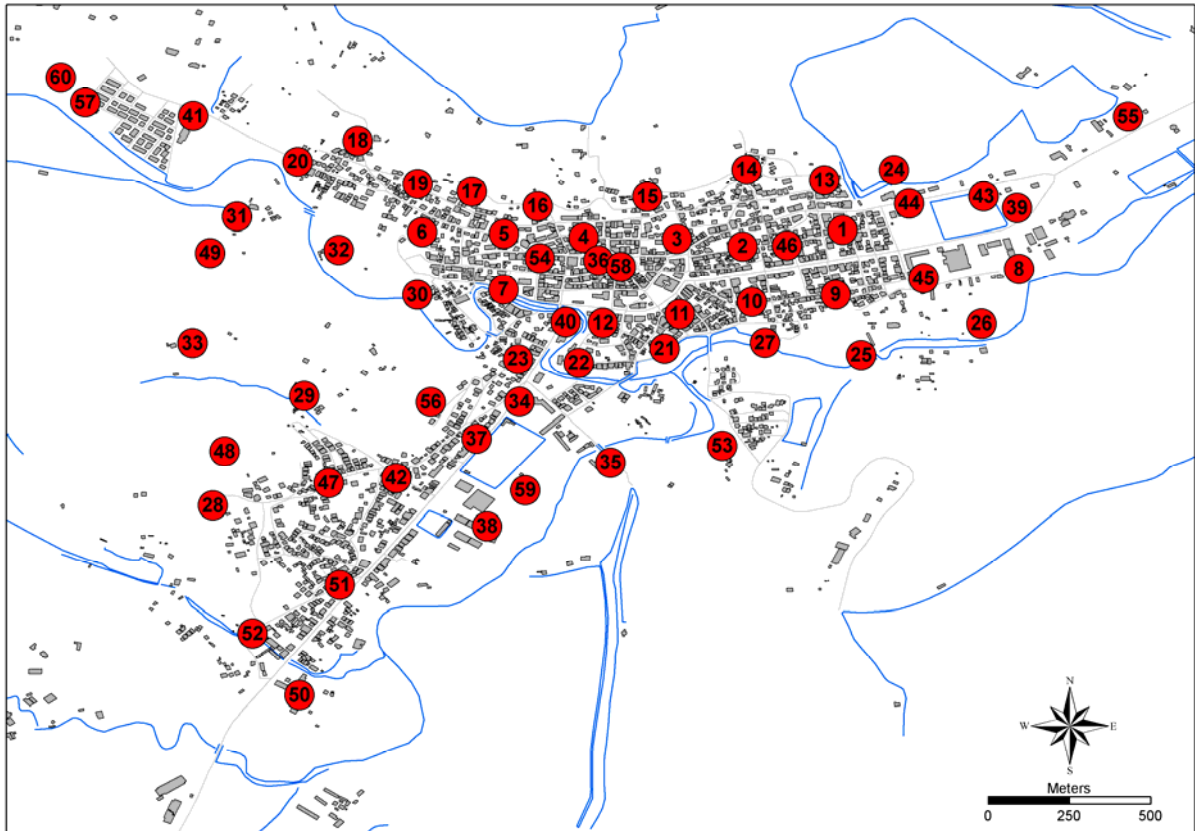
Αποτελέσματα

Από την εφαρμογή της μεθόδου HVSR προέκυψαν για κάθε σημείο μέτρησης η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα (f_0) των επιφανειακών ιζηματογενών στρωμάτων και το αντίστοιχο πλάτος ενίσχυσης της εδαφικής κίνησης (A_0). Από αυτές τις δύο τιμές μπορεί εύκολα να υπολογιστεί ο δείκτης τρωτότητας εδαφικών σχηματισμών, K_g (Nakamura, 2000) σύμφωνα με τον τύπο:

$$K_g = \frac{A_0^2}{f_0} \quad (1)$$



Σχήμα 5. Ημερήσιες μεταβολές εδαφικού θορύβου στην πόλη των Γρεβενών. Για κάθε θέση του Σχήματος 4 παρουσιάζονται οι μεταβολές με το χρόνο των παραγόντων f_0 και A_0 . Οι ώρες διαταραχής εντοπίζονται κυρίως μεταξύ του καθημερινού ωραρίου εργασίας (8:00 - 16:00).



Σχήμα 6. Θέσεις μετρήσεων εδαφικού θορύβου με τη χρήση μονού σταθμού στην περιοχή μελέτης.

Ο δείκτης τρωτότητας εδαφικών σχηματισμών, K_g , αποτελεί ένα μέτρο των αναμενόμενων βλαβών στις κατασκευές από ένα σεισμικό γεγονός. Η συσχέτιση του δείκτη K_g με τις σεισμικές βλάβες είναι εμπειρική και φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του K_g σε μία περιοχή τόσο μεγαλύτερες είναι και οι αναμενόμενες βλάβες. Συγκεκριμένα ο Nakamura κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η τιμή του δείκτη τρωτότητας K_g του εδάφους συσχετίζεται με τις τοπικές εδαφικές συνθήκες, με τη ζώνη των βλαβών καθώς και με φαινόμενα ρευστοποίησης. Για τιμές του δείκτη πάνω από 10 οι αναμενόμενες βλάβες θα είναι σημαντικές ενώ για τιμές πάνω από 20 υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστούν φαινόμενα ρευστοποίησης. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων f_0 , A_0 και K_g όπως προέκυψαν από την ανάλυση των μετρήσεων εδαφικού θορύβου για όλες τις εξεταζόμενες θέσεις στην πόλη των Γρεβενών.

Κάθε μέτρηση εδαφικού θορύβου με τη χρήση μονού σταθμού δίνει πληροφορίες για τη σεισμική απόκριση της εδαφικής στήλης στο σημείο που γίνεται η μέτρηση. Με τη συλλογή ικανοποιητικού αριθμού μετρήσεων εδαφικού θορύβου έχουμε μία εικόνα για την διαδιάστατη χωρική μεταβολή της f_0 , του A_0 και του δείκτη K_g . Όσο πιο πυκνό είναι το δίκτυο των μετρήσεων τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια πετυχαίνουμε στην απεικόνιση αυτής της χωρικής μεταβολής. Σε περιοχές που δεν υπάρχουν μετρήσεις, η ερμηνεία πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή. Στο Σχήμα 8, παρουσιάζεται η χωρική μεταβολή των παραμέτρων f_0 , A_0 και K_g στην περιοχή μελέτης όπως προέκυψε από την επεξεργασία των μετρήσεων εδαφικού θορύβου με τη χρήση μονού σταθμού.

Όπως προκύπτει από τα Σχήματα 7 και 8 οι τιμές των παραμέτρων f_0 , A_0 και K_g ομαδοποιήθηκαν σε τρεις κατηγορίες που ορίζουν περιοχές ή ζώνες με κοινά γεωτεχνικά/γεωφυσικά χαρακτηριστικά. Διακρίνεται μία ζώνη όπου η καμπύλη HVSR παρουσιάζεται επίπεδη ή σχεδόν επίπεδη (Flat Curve) χωρίς κανένα αξιοσημείωτο μέγιστο και συνεπώς χωρίς καμία ενίσχυση στην περιοχή συχνοτήτων από 0.2 έως 20Hz. Η πιο πιθανή ερμηνεία είναι ότι πρόκειται για περιοχές με μικρή αντίθεση στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των ιζηματογενών στρωμάτων που αποτελούν την υπεδάφια δομή, αφού η παρουσία βράχου σε μικρά βάθη θεωρείται λιγότερο πιθανή σύμφωνα με τα διαθέσιμα γεωλογικά και γεωτεχνικά δεδομένα. Σε αυτές τις συνθήκες η μέθοδος HVSR παρουσιάζει αδυναμία στην αναγνώριση της f_0 και κατ' επέκταση στον παράγοντα ενίσχυσης A_0 . Μία δεύτερη ζώνη που μπορεί να διακριθεί, παρουσιάζει τιμές της $f_0 > 3\text{Hz}$, ενδιάμεσες τιμές για τον παράγοντα ενίσχυσης A_0 (μεταξύ 2 και 3) και τιμές < 4 για τον δείκτη τρωτότητας K_g . Σε αυτές τις περιοχές η μέθοδος HVSR φαίνεται ότι μπορεί να αναγνωρίσει την επίδραση του πρόσφατου επιφανειακού Τεταρτογενούς ιζηματογενούς στρώματος. Τέλος, η τρίτη ζώνη που διακρίνεται παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Σύμφωνα με τις τιμές της $f_0 (< 3\text{Hz})$ φαίνεται ότι επηρεάζεται από ένα βαθύτερο ορίζοντα και όχι από την επαφή των δύο επιφανειακών ιζηματογενών στρωμάτων, ενώ οι σχετικά υψηλές τιμές του $A_0 (> 3)$ και $K_g (> 4)$ φανερώνουν περιοχές περισσότερο ευάλωτες σε περίπτωση σεισμικής διέγερσης.

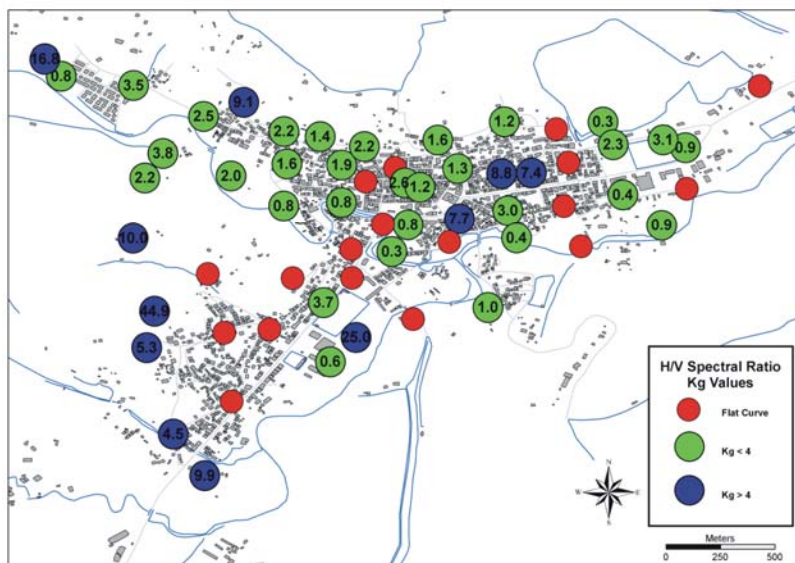
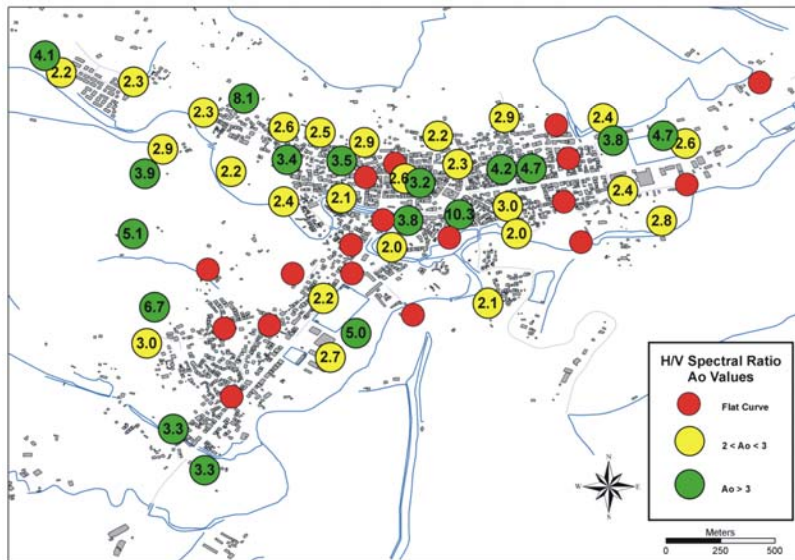
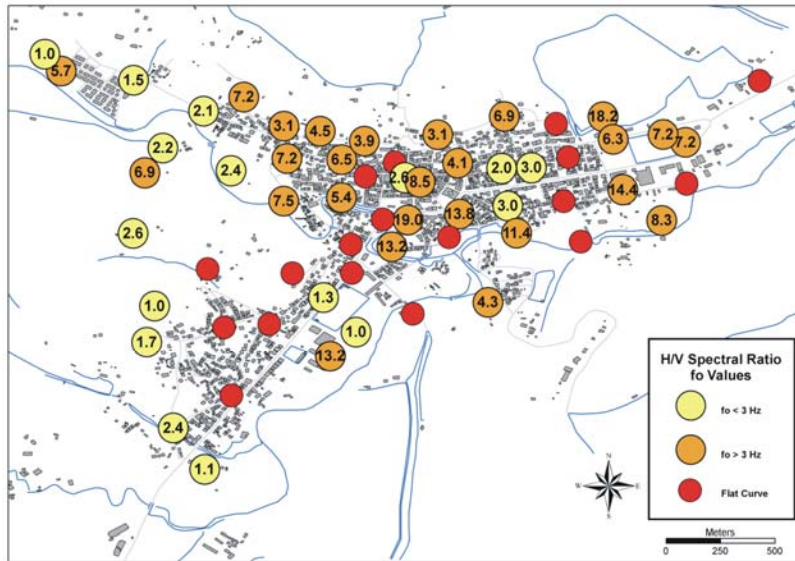
ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ (1D) ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

Η αριθμητική προσομοίωση εδαφικού θορύβου μπορεί να συμβάλει στην καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων της μεθόδου HVSR. Όταν τα γεωτεχνικά και γεωφυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών σχηματισμών είναι γνωστά, τότε είναι δυνατή η δημιουργία συνθετικών καταγραφών εδαφικού θορύβου. Επομένως, η σύγκριση μεταξύ συνθετικών και πειραματικών καμπύλων HVSR μπορεί να τεκμηριώσει το μοντέλο δομής στη θέση της μέτρησης.

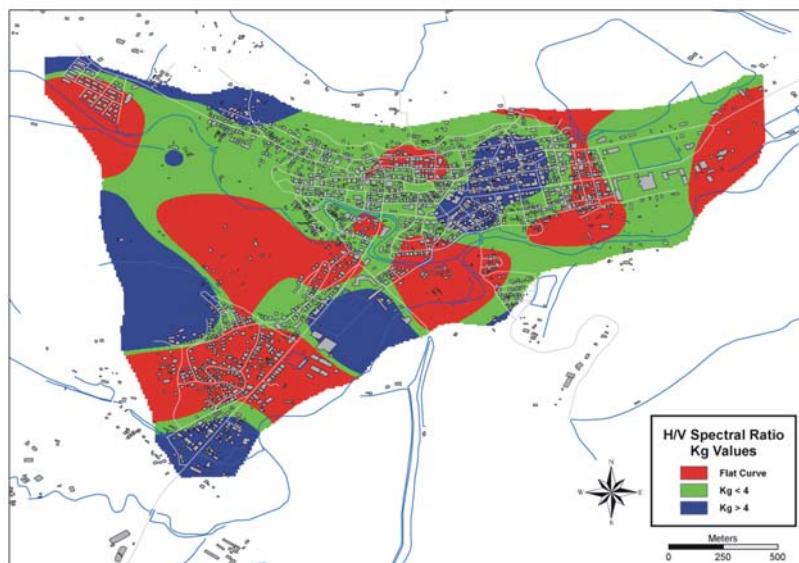
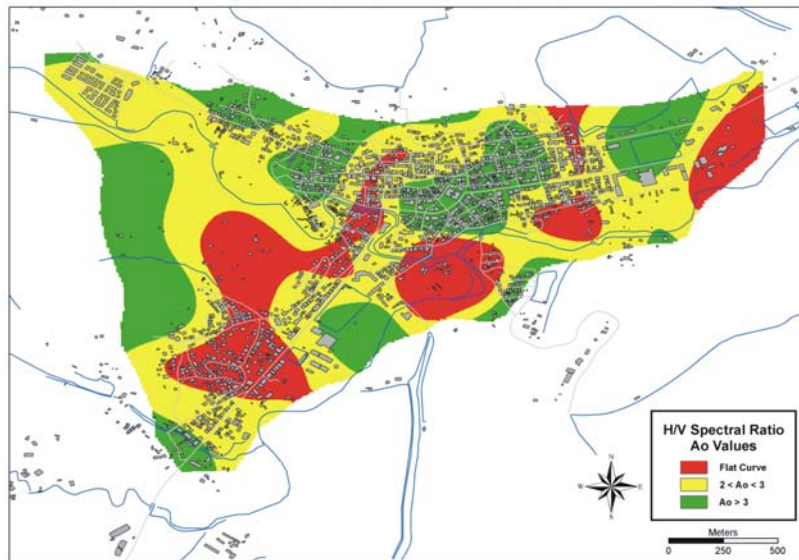
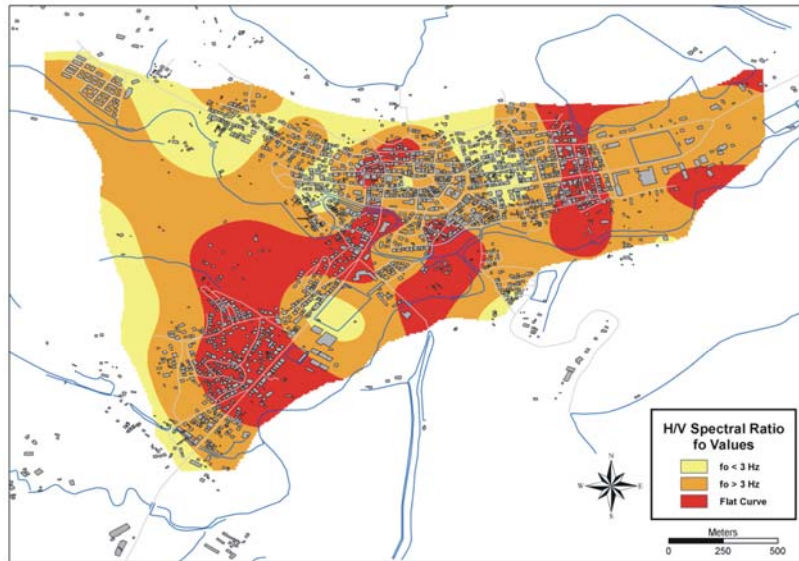
Για τη δημιουργία συνθετικών καταγραφών εδαφικού θορύβου, θεωρούμε ότι η εδαφική κίνηση είναι ένας συνδιασμός παραγόντων: της πηγής, της υπεδάφιας δομής μέσα στην οποία διαδίδονται τα κύματα και του σεισμομέτρου. Επομένως μία καταγραφή, $u_{(t)}$, μπορεί να απεικονισθεί σαν συνέλιξη των χρονοσειρών που αντιπροσωπεύει ο κάθε παράγοντας:

$$u_{(t)} = S_{(t)} * G_{(t)} * I_{(t)} \quad (2)$$

Όπου $S_{(t)}$ είναι η συνάρτηση της πηγής, $G_{(t)}$ αντιπροσωπεύει την επίδραση της υπεδάφιας δομής και $I_{(t)}$ περιγράφει την απόκριση του σεισμομέτρου. Συνήθως ο παράγοντας $G_{(t)}$ αναλύεται με τους όρους των συναρτήσεων Green. Η συνάρτηση Green περιγράφει το σήμα που θα έφτανε στη θέση ενός σεισμομέτρου αν η χρονική συνάρτηση πηγής ήταν τύπου δέλτα (delta function). Συνεπώς η διαδικασία δημιουργίας συνθετικής καταγραφής βασίζεται στην προσομοίωση αυτών των παραγόντων, ξεκινώντας από την συνάρτηση της πηγής και υπολογίζοντας την απόκριση των επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών μέσω των συναρτήσεων Green. Η απόκριση του σεισμομέτρου είναι γνωστή από τον κατασκευαστή του οργάνου.



Σχήμα 7. Αποτελέσματα της ανάλυσης μετρήσεων εδαφικού θορύβου για κάθε σημείο μέτρησης με τη μέθοδο HVSR. Στο πάνω μέρος παρουσιάζονται οι τιμές τις f_0 , στο μεσαίο μέρος οι τιμές του A_0 και στο κάτω μέρος του δείκτη τρωτότητας εδαφικών σχηματισμών K_g .



Σχήμα 8. Χάρτες χωρικής μεταβολής των παραμέτρων f_0 (πάνω μέρος), A_0 (μεσαίο μέρος) και K_g (κάτω μέρος) σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Σχήματος 7.

Η μοντελοποίηση των πηγών του εδαφικού θορύβου έγινε με τη χρήση του κώδικα RANSOURCE (Moczo & Kristek, 2002) ενώ οι συναρτήσεις Green υπολογίστηκαν από τον κώδικα που προτάθηκε από τον Hisada (1994, 1995).

Ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται στο πρόγραμμα RANSOURCE δημιουργεί τυχαίες σημειακές πηγές εδαφικού θορύβου, κανονικής χωρικής και χρονικής κατανομής μέσα σε ένα συγκεκριμένο όγκο. Η χωρική κατανομή των πηγών ελέγχεται από την καθορισμένη ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών σημειακών πηγών καθώς και από την ελάχιστη και την μέγιστη απόσταση μεταξύ μίας πηγής και ενός δέκτη. Η χρονική κατανομή των πηγών ελέγχεται από την καθορισμένη ελάχιστη και μέγιστη τιμή των σημειακών πηγών που ενεργούν την ίδια στιγμή. Κάθε πηγή που δημιουργείται από το πρόγραμμα έχει διάφορα χαρακτηριστικά όπως τη θέση της στο χώρο (x, y, z), τη διεύθυνση και το πλάτος του διανύσματος της δύναμης που δρα και τη χρονική συνάρτηση της πηγής. Η χρονική συνάρτηση της πηγής είναι είτε σήμα τύπου δέλτα είτε ψευδομονοχρωματικού τύπου με τυχαία επιλογή της διάρκειας και της δεσπόζουσας περιόδου.

Ο κώδικας του Hisada εφαρμόζεται για τον υπολογισμό των συναρτήσεων Green σε ετερογενή ιξωδοελαστική δομή αποτελούμενη από οριζόντια στρώματα με πηγές και δέκτες σε κοντινά βάθη. Οι φυσικές ιδιότητες της δομής θεωρείται ότι μεταβάλλονται μόνο με το βάθος επομένως η προσομοίωση είναι μονοδιάστατη (1D). Οι συναρτήσεις Green υπολογίζονται για κάθε ζεύγος πηγής και δέκτη. Άρα η ολική εδαφική κίνηση (συνθετική καταγραφή) στη θέση ενός δέκτη προκύπτει από την άθροιση κάθε συνθετική καταγραφής που παράγεται από όλες τις πηγές.

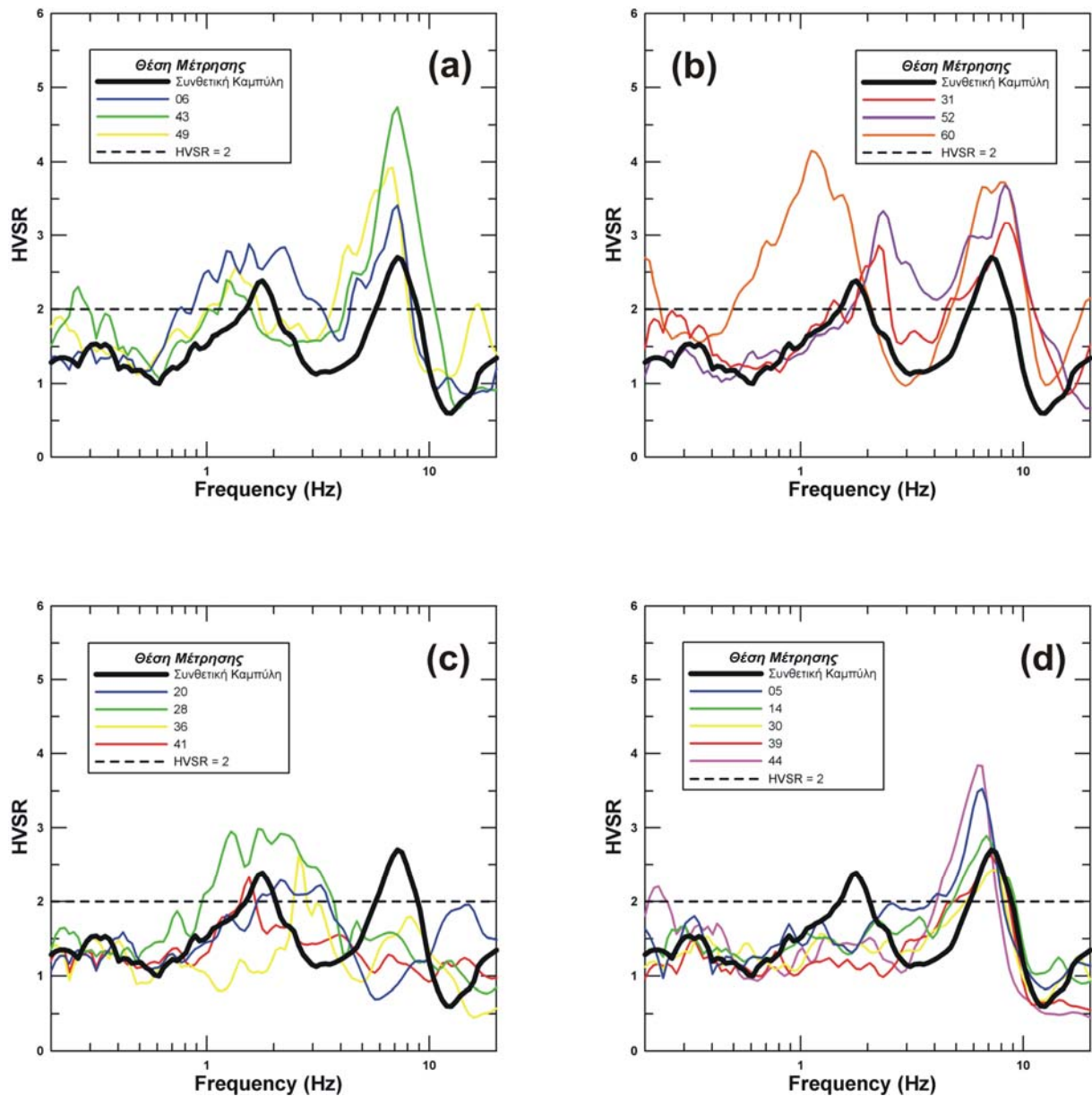
Για την περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε αριθμητική προσομοίωση εδαφικού θορύβου με τη χρήση ενός μέσου μοντέλου δομής, σύμφωνα με τα διαθέσιμα γεωλογικά και γεωτεχνικά δεδομένα, το οποίο αποτελείται από δύο στρώματα που επικάθονται πάνω σε ημιχώρο (υπόβαθρο). Οι παράμετροι του θεωρητικού μοντέλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Παράμετροι του θεωρητικού μοντέλου αριθμητικής προσομοίωσης.

Στρώματα	Πάχη (m)	ρ (gr/m³)	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)	Q_p	Q_s
H1	8 -10	1900	385	250	30	10
H2	150	2000	1845	1200	90	30
Ημιχώρος	-	2100	5385	3500	300	100

Η θεωρητική καμπύλη HVSR που προέκυψε από το μοντέλο του Πίνακα 1 παρουσιάζει δύο εμφανιζόμενα μέγιστα (Σχήμα 9a έως 9d με μαύρη καμπύλη). Το πρώτο σε συχνότητες μεταξύ 1.5 και 2Hz, σχετίζεται με τον βαθύτερο σχηματισμό H2, ενώ το δεύτερο σε συχνότητα περίπου στα 7Hz με τον επιφανειακό σχηματισμό H1. Η σύγκριση της θεωρητικής καμπύλης HVSR με πειραματικές δείχνει καλή συσχέτιση σε επιλεγμένες θέσεις και με τα δύο μέγιστα (Σχήματα 9a και 9b), ενώ υπάρχουν περιπτώσεις όπου η συσχέτιση είναι καλή μόνο στο πρώτο μέγιστο (Σχήμα 9c) ή μόνο στο δεύτερο (Σχήμα 9d). Η συσχέτιση των πειραματικών καμπύλων HVSR μόνο με το χαμηλόσυχο μέγιστο (1.5 - 2Hz) της θεωρητικής καμπύλης μπορεί να ερμηνευτεί με την μικρή διαφορά των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των δύο επιφανειακών ιζηματογενών στρωμάτων τοπικά οπότε η καμπύλη επηρεάζεται μόνο από τον βαθύτερο στρωματογραφικό ορίζοντα. Αντίθετα, οι περιπτώσεις όπου οι πειραματικές καμπύλες συμφωνούν μόνο με το υψίσυχο μέγιστο (7Hz) της θεωρητικής

καμπύλης μπορεί ενδεχομένως να οφείλονται στην μετατόπιση του υποβάθρου σε βαθύτερους ορίζοντες από την δράση ρηγμάτων.



Σχήμα 9. Σύγκριση πειραματικών καμπύλων HVSR (πολύχρωμες καμπύλες) με θεωρητική (μαύρη καμπύλη). Το μοντέλο δομής για την θεωρητική καμπύλη δίνεται στον Πίνακα 1. Κάθε πειραματική καμπύλη αντιστοιχεί σε μία θέση μέτρησης του Σχήματος 6. Στα σχήματα (a) και (b) παρουσιάζονται παραδείγματα καμπύλων με καλή συσχέτιση και στα δύο εμφανιζόμενα μέγιστα, στο (c) μόνο στο πρώτο περίπου στο 1.5 με 2Hz και στο (d) μόνο στο δεύτερο περίπου στα 7Hz.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Ο χαρακτηρισμός των τοπικών εδαφικών συνθηκών στηρίχθηκε στις διατάξεις του κώδικα *NEHRP* (*Natural Earthquake Hazards Reduction Program*, 2000). Σύμφωνα με τον κώδικα μία περιοχή μπορεί να χαρακτηριστεί σαν μία από τις κατηγορίες (κλάσεις) που αναφέρονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Χαρακτηρισμός τοπικών εδαφικών συνθηκών σύμφωνα με τις διατάξεις του κώδικα *NEHRP (2000)*.

Κατηγορίες	Περιγραφή	\bar{v}_s (m/sec)	\bar{N} or \bar{N}_{ch}	\bar{s}_u (kPa)
A	“Σκληρός Βράχος”	> 1500	-	-
B	“Βράχος”	760 < v_s ≤ 1500	-	-
C	Πολύ συνεκτικό έδαφος και “Μαλακός Βράχος”	360 < v_s ≤ 760	> 50	> 100
D	Συνεκτικό έδαφος	180 ≤ v_s ≤ 360	15 to 50	50 to 100
E	Έδαφος	< 180	< 15	< 50
F	Εδάφη που απαιτούν ειδική αξιολόγηση	-	-	-

\bar{v}_s = Μέση ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων για τα πρώτα 30m του υπεδάφους.

\bar{N} = Μέσος αριθμός κρούσεων της πρότυπης δοκιμής διεισδύσεως (SPT) για τα πρώτα 30m του υπεδάφους.

\bar{N}_{ch} = Μέσος αριθμός κρούσεων της πρότυπης δοκιμής διεισδύσεως (SPT) για τα πρώτα 30m μη συνεκτικών εδαφών.

\bar{s}_u = Μέση διατμητική αντοχή σε τριαξονική θλίψη για τα πρώτα 30m του υπεδάφους.

Σύμφωνα με τις οδηγίες του κώδικα *NEHRP (2000)* για το είδος των σχηματισμών που ανήκουν σε κάθε κατηγορία και τα διαθέσιμα γεωλογικά και γεωτεχνικά δεδομένα για την περιοχή μελέτης, μπορούν να αποκλειστούν οι κατηγορίες *E* και *F* όπως επίσης και οι κατηγορίες «βράχου» *A* και *B*. Επομένως θεωρούμε ότι οι κατηγορίες *C* και *D* είναι κυρίαρχες και πιο πιθανές να απεικονίζουν μία ρεαλιστική κατάσταση των συνθηκών του εδάφους.

Για τον χαρακτηρισμό των τοπικών εδαφικών συνθηκών κατά τις διατάξεις του κώδικα *NEHRP (2000)* μπορούν να χρησιμοποιηθούν τέσσερις μεθοδολογίες οι οποίες ονομαστικά είναι η μέθοδος v_s , η μέθοδος N , και για μη συνεκτικά εδάφη η μέθοδος N_{ch} και η μέθοδος s_u . Επαρκή δεδομένα στην περιοχή μελέτης υπήρχαν μόνο για την εφαρμογή της μεθόδου N και ήταν διαθέσιμα σε όσες θέσεις γεωτρήσεων πραγματοποιήθηκε η πρότυπη δοκιμή διεισδύσεως.

Η μέθοδος N βασίζεται στον υπολογισμό του μέσου αριθμού των κρούσεων της πρότυπης δοκιμής διεισδύσεως για τα πρώτα 30m του υπεδάφους. Αν θεωρήσουμε ότι η υπεδάφια δομή αποτελείται από n διαφορετικά στρώματα με πάχη d_i , $i=1, 2, \dots, n$ και N_i είναι ο αριθμός των κρούσεων της δοκιμής πρότυπης διεισδύσεως (ASTM D1586-84) όπως μετρήθηκε απευθείας στη θέση της γεώτρησης χωρίς διορθώσεις τότε το \bar{N} δίνεται από τον τύπο:

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \quad (3)$$

όπου $\sum_{i=1}^n d_i$ είναι ίσο με 30m.

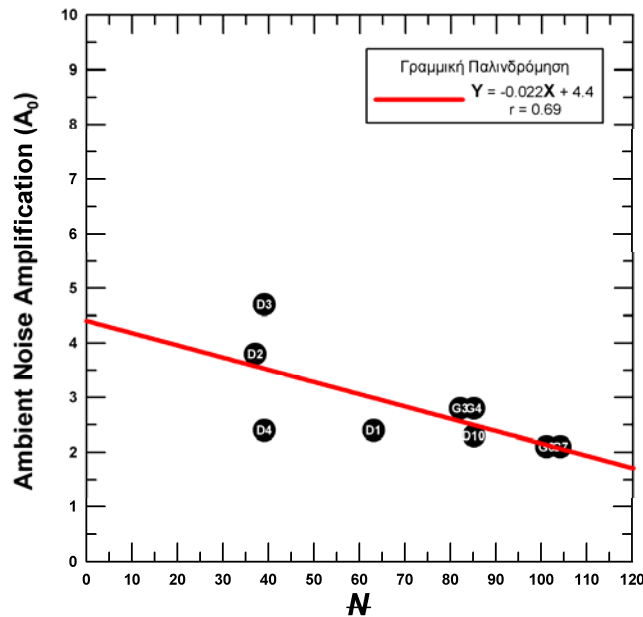
Για τη μέθοδο N ένα συζητήσιμο θέμα είναι το εύρος των τιμών N_i . Γεωτεχνικά δεδομένα από γεωτρήσεις περιλαμβάνουν μετρήσεις της πρότυπης δοκιμής διεισδύσεως στις οποίες η

διείσδυση του δειγματολήπτη Terzaghi ήταν ανολοκλήρωτη (< 45cm). Οι τιμές των N_i σε αυτές τις περιπτώσεις υπολογίζονται με γραμμική επέκταση του αριθμού των κρούσεων, λαμβάνοντας υπόψη την διείσδυση που επιτυγχάνεται από 50 κρούσεις.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της σχέσης 3 για κάθε θέση γεώτρησης παρουσιάζονται στις τρεις πρώτες στήλες του Πίνακα 3. Παρατηρούμε ότι ο αριθμός των θέσεων που μπορούν να χαρακτηριστούν άμεσα δεν είναι επαρκής για να επεκταθεί σε όλη την περιοχή μελέτης. Για αυτό το λόγο έγινε προσπάθεια συσχέτισης του \bar{N} της σχέσης 3 με τον παράγοντα ενίσχυσης της εδαφικής κίνησης A_0 που προκύπτει από την ανάλυση μετρήσεων εδαφικού θορύβου. Η επιλογή του A_0 έγινε με την υπόθεση ότι η ενίσχυση της εδαφικής κίνησης είναι τόσο μεγαλύτερη όσο πιο χαλαροί είναι οι σχηματισμοί που αποτελούν τα επιφανειακά στρώματα του υπεδάφους, γεγονός που αντικατοπτρίζεται άμεσα από τις τιμές του \bar{N} . Επομένως, αναμένεται να υπάρχει καλύτερη συσχέτιση του A_0 με το \bar{N} σε σχέση με τους άλλους δύο παράγοντες της μεθόδου HVSR. Σκοπός αυτής της συσχέτισης είναι η αξιοποίηση των μετρήσεων εδαφικού θορύβου, οι οποίες καλύπτουν σχεδόν όλη την περιοχή μελέτης, με στόχο να γίνει εφικτή η επέκταση του χαρακτηρισμού των τοπικών εδαφικών συνθηκών σε ολόκληρη την πόλη των Γρεβενών. Η τέταρτη στήλη του Πίνακα 3 παρουσιάζει τις τιμές των παραμέτρων f_0 , A_0 και K_g στις θέσεις των γεωτρήσεων, που αντιστοιχούν στην πλέον κοντινή μέτρηση εδαφικού θορύβου. Η συσχέτιση μεταξύ \bar{N} και A_0 πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της μεθόδου γραμμικής παλινδρόμησης και παρουσιάζεται στο Σχήμα 10. Ο συντελεστής συσχέτισης, r , έχει τιμή αρκετά υψηλή ($r=0.69$).

Πίνακας 3. Χαρακτηρισμός τοπικών εδαφικών συνθηκών κατά *NEHRP (2000)* στις θέσεις των γεωτρήσεων με εφαρμογή της μεθόδου *N*.

Γεωτρήσεις	\bar{N}	Χαρακτηρισμός Εδαφικών Συνθηκών	HVSR		
			f_0 (Hz)	A_0	K_g
D1	63	C	18.2	2.4	0.3
D2	37	D	6.3	3.8	2.3
D3	39	D	7.2	4.7	3.1
D4	39	D	14.4	2.4	0.4
D5	69	C	-	1	-
D9	87	C	-	1	-
D10	85	C	2.1	2.3	2.5
G3	82	C	8.3	2.8	0.9
G4	85	C	8.3	2.8	0.9
G6	101	C	4.3	2.1	1.0
G7	104	C	4.3	2.1	1.0
G8	22	D	18.2	2.4	0.3
G12	68	C	-	-	-
Gb2	86	C	-	-	-
Gb3	68	C	-	-	-

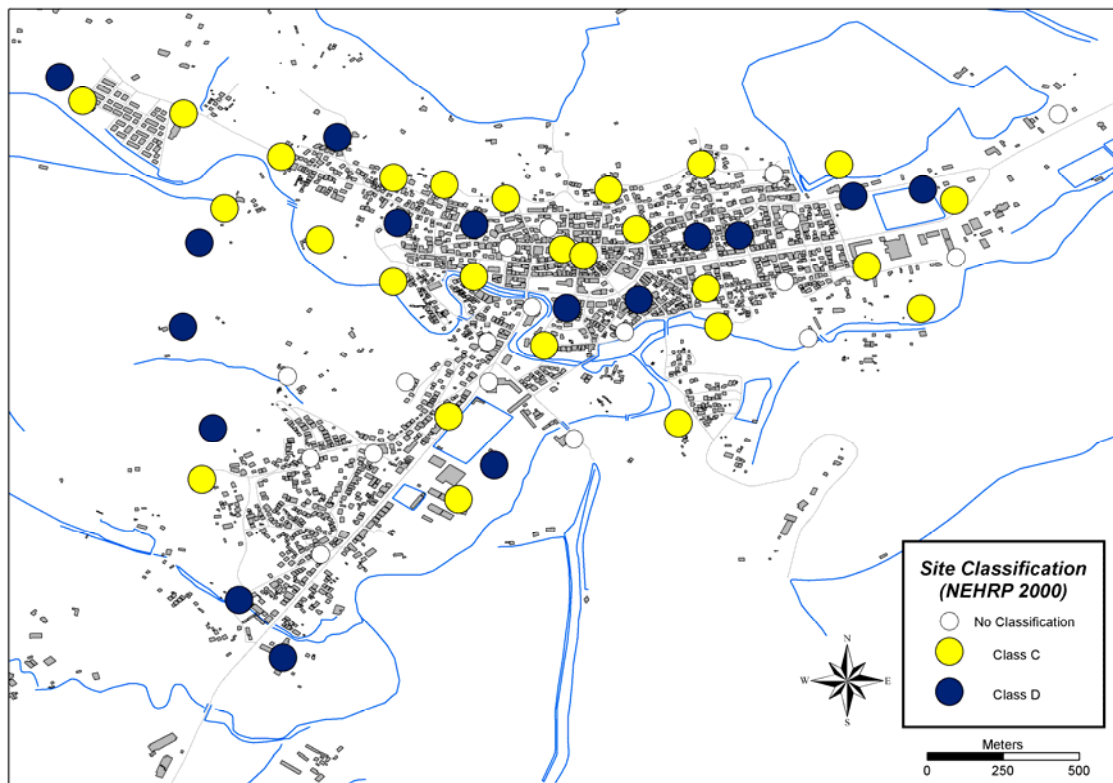


Σχήμα 10. Συσχέτιση του \bar{N} με τον παράγοντα ενίσχυσης της εδαφικής κίνησης A_0 για κάθε θέση γεώτρησης όπου υπήρχε μέτρηση εδαφικού θορύβου με τη χρήση μονού σταθμού. Η συσχέτιση πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης.

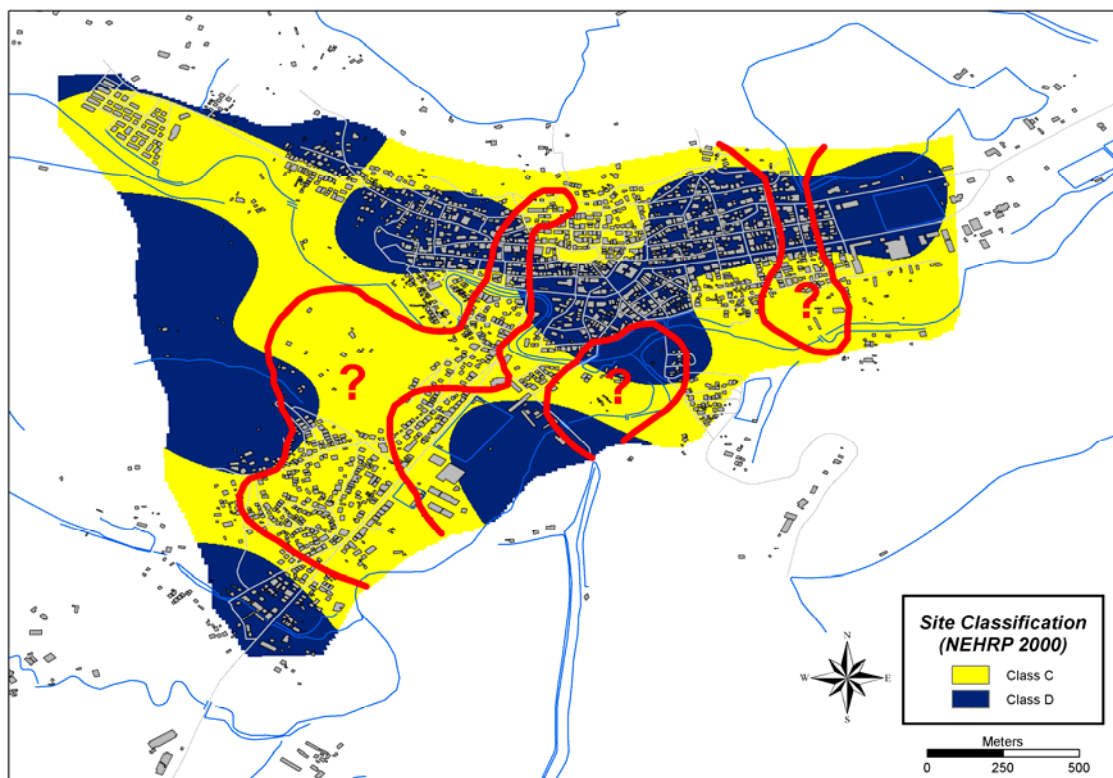
Σημειώνεται ότι σημεία στα οποία η καμπύλη HVSR είναι επίπεδη (για παράδειγμα στις θέσεις των γεωτρήσεων D5 και D9, βλέπε Πίνακα 3) δεν χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα για τη συσχέτιση \bar{N} και A_0 . Ο λόγος είναι ότι η μέθοδος HVSR δεν μπορεί να «εντοπίσει» την ενίσχυση της εδαφικής κίνησης σε αυτές τις θέσεις εξαιτίας της μικρής αντίθεσης στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των σχηματισμών του υπεδάφους με το υπόβαθρο. Σύμφωνα με την εξίσωση της γραμμικής παλινδρόμησης προκύπτει ότι περιοχές με $A_0 \geq 3.3$ (η τιμή του \bar{N} είναι περίπου 50 για αυτή την τιμή) μπορούν να ενταχθούν στην κατηγορία *D* ενώ περιοχές με $A_0 < 3.3$ στην κατηγορία *C*. Στο Σχήμα 11 παρουσιάζεται ο χαρακτηρισμός εδαφών κατά *NEHRP (2000)* για κάθε σημείο μέτρησης εδαφικού θορύβου που εμφανιζόταν κάποιο μέγιστο στην καμπύλη HVSR. Στο Σχήμα 12 δίνεται ο χάρτης με την χωρική κατανομή του χαρακτηρισμού εδαφικών συνθηκών σε όλη την πόλη των Γρεβενών. Με κόκκινες γραμμές περικλείονται περιοχές όπου οι καμπύλες HVSR είναι επίπεδες οπότε ο χαρακτηρισμός χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εδαφικού θορύβου με τη χρήση μονού σταθμού στο πολεοδομικό συγκρότημα των Γρεβενών (ΒΔ Ελλάδα) με στόχο τον υπολογισμό της επίδρασης των τοπικών εδαφικών εδαφών σε μελλοντική σεισμική δόνηση. Η ανάλυση των δεδομένων έγινε με εφαρμογή της μεθόδου HVSR και για κάθε σημείο μέτρησης προέκυψε η θεμελιώδης ιδιοδυσχρότητα των επιφανειακών ιζηματογενών σχηματισμών (f_0) και ο αντίστοιχος παράγοντας φασματικής ενίσχυσης της εδαφικής κίνησης (A_0). Επιπλέον, υπολογίστηκε ο δείκτης τρωτότητας εδαφικών σχηματισμών $K_g (=A_0^2/f_0)$ ο οποίος μπορεί να αποτελέσει ένα μέτρο των αναμενόμενων βλαβών στις κατασκευές.



Σχήμα 11. Χαρακτηρισμός εδαφικών συνθηκών σύμφωνα με τις διατάξεις του κώδικα *NEHRP (2000)* στις θέσεις μέτρησης εδαφικού θορύβου. Σε θέσεις για τις οποίες η καμπύλη HVSR έχει επίπεδη μορφή, δεν ήταν εφικτός ο χαρακτηρισμός.



Σχήμα 12. Χωρική μεταβολή του χαρακτηρισμού εδαφικών συνθηκών σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Σχήματος 11. Με κόκκινες γραμμές περικλύονται περιοχές όπου δεν μπορεί να γίνει χαρακτηρισμός εδαφικών συνθηκών με βεβαιότητα.

Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων μονού σταθμού προέκυψαν χάρτες της χωρικής μεταβολής των παραμέτρων f_0 , A_0 και K_g για την πόλη των Γρεβενών όπου διακρίνονται τρεις κυρίως ζώνες με κοινά χαρακτηριστικά στη σεισμική απόκριση. Περιοχές με επίπεδη καμπύλη HVSR και επομένως χωρίς εμφανή ενίσχυση της εδαφικής κίνησης οφείλονται στην αδυναμία της μεθόδου να εμφανίσει κάποιο μέγιστο σε περιπτώσεις που η υπεδάφια δομή αποτελείται από σχηματισμούς με μικρές διαφορές στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητές τους με το βάθος. Αντίθετα όταν αυτή η διαφορά γίνεται αξιόλογη η μεθοδολογία HVSR «αναγνωρίζει» την επίδραση του επιφανειακού ιζηματογενούς στρώματος με τιμές $f_0 > 3\text{Hz}$ και μέσες τιμές του παράγοντα ενίσχυσης ($2 < A_0 < 3$), ενώ ο δείκτης τρωτότητας εδαφικών σχηματισμών κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα ($K_g < 4$). Περιοχές με μικρές τιμές της f_0 ($< 3\text{Hz}$), σχετικά μεγάλες τιμές του A_0 (> 3) και K_g (> 4) φαίνεται ότι επηρεάζονται από βαθύτερο στρωματογραφικό ορίζοντα που αποτελεί το γεωλογικό υπόβαθρο. Οι παραπάνω ερμηνείες ενισχύονται και από τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης του εδαφικού θορύβου. Φαίνεται ότι το μέσο μοντέλο δομής που υιοθετήθηκε για την δημιουργία συνθετικών καταγραφών εδαφικού θορύβου, είναι ικανοποιητικό για την πόλη των Γρεβενών με εξαίρεση κάποιες θέσεις όπου χρειάζονται επιπλέον γεωτεχνικά ή γεωφυσικά στοιχεία.

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της πρότυπης δοκιμής διεισδύσεως στις θέσεις των γεωτρήσεων πραγματοποιήθηκε χαρακτηρισμός των εδαφικών συνθηκών σύμφωνα με τις διατάξεις του κώδικα *NEHRP (2000)*. Για να επεκταθεί ο χαρακτηρισμός των εδαφικών συνθηκών σε περισσότερες θέσεις στην περιοχή μελέτης έγινε προσπάθεια συσχέτισης του μέσου αριθμού κρούσεων της πρότυπης δοκιμής διεισδύσεως για τα πρώτα 30m της δομής (\bar{N}) με τον παράγοντα ενίσχυσης της εδαφικής κίνησης, A_0 του εδαφικού θορύβου. Η συσχέτιση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης και προέκυψε ότι οι θέσεις με τιμές $A_0 < 3.3$ μπορούν να ενταχθούν στην κατηγορία εδαφών *C*, ενώ θέσεις με τιμές $A_0 \geq 3.3$ στην κατηγορία εδαφών *D*. Θέσεις στις οποίες η ανάλυση μετρήσεων εδαφικού θορύβου είχε σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση επίπεδων καμπύλων HVSR δεν κατηγοριοποιήθηκαν. Με βάση την παραπάνω ανάλυση προέκυψε ένας προκαταρκτικός χάρτης κατηγοριοποίησης των εδαφικών σχηματισμών για την πόλη των Γρεβενών. Ένα θέμα προς συζήτηση είναι ο μικρός αριθμός διαθέσιμων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στη συσχέτιση \bar{N} και A_0 . Το ερώτημα που τίθεται είναι αν όντως μία τέτοια συσχέτιση μπορεί να δώσει ρεαλιστικά αποτελέσματα σε σχέση με τον χαρακτηρισμό των εδαφικών συνθηκών. Ασφαλώς, με τη χρήση περισσότερων γεωτεχνικών δεδομένων και μετρήσεων εδαφικού θορύβου η ποιότητα των αποτελεσμάτων μπορεί να βελτιωθεί και αυτά θα αποκτούσαν μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Παρόλους τους περιορισμούς και τις αδυναμίες της μεθόδου HVSR φαίνεται ότι είναι αρκετά χρήσιμη στην αναγνώριση περιοχών με κοινά χαρακτηριστικά στην εδαφική κίνηση και επομένως ένας παράγοντας για προκαταρκτική εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου. Η ταχύτητα των μετρήσεων και της επεξεργασίας των δεδομένων, τα αξιόπιστα αποτελέσματα, το χαμηλό κόστος, οι μικρές απαιτήσεις σε προσωπικό και εξοπλισμό σε συνδυασμό με τον περιορισμό χρήσης «ενεργητικών» γεωφυσικών μεθόδων προσδιορισμού δυναμικών χαρακτηριστικών των εδαφικών σχηματισμών την κάνουν ιδανική για μικροζωνικές μελέτες σε αστικά περιβάλλοντα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία χρηματοδοτήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος “SyNaRMa prj” (Information System for Natural Risk Management in the Mediterranean), SC_A.1.012.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bard P.-Y. (1999), “Microtremor measurement: A tool for site effect estimation?”, *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, pp. 1251-1279.
- Bonnefoy-Claudet S., Cotton F., Bard P.-Y. (2006), “The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies”, *Earth-Science Reviews*, 23p.
- Chatelain J.-L., Gueguen P., Guillier B., Frechet J., Bondoux F., Sarraut J., Sulpice P. and Neuville J.-M., (2000), “CityShark: A User – friendly Instrument dedicated to Ambient Noise (Microtremor) Recording for Site and Building Response Studies”, *Seismological Research Letters*, 76(6), pp. 698-703.
- Fyen J. (1990), “Diurnal and seasonal variations in the microseismic noise level observed at the NORESS array”, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 63, pp. 252-268.
- I.G.M.E. (1985), “Φύλλο Γρεβενά” (Γεωλογικός χάρτης Γρεβενών, κλίμακα 1:50000), *Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών*.
- Hisada Y. (1994), “An Efficient Method for Computing Green’s Functions for a Layered Half-Space with Sources and Receivers at Close Depths”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(5), pp. 1456-1472.
- Hisada Y. (1995), “An Efficient Method for Computing Green’s Functions for a Layered Half-Space with Sources and Receivers at Close Depths (Part 2)”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(4), pp. 1080-1093.
- Konno K. and Ohmachi T. (1998), “Ground motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor”, *Bulletin of Seismological Society of America*, 88(1), pp. 228-241.
- Moczo P. and Kristek J. (2002), “FD code to generate noise synthetic”, *SESAME European research program, Deliverable D02.09*, 31p.
- Μουντράκης Δ. (1985), “Γεωλογία της Ελλάδας”, University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Nakamura Y. (1989), “A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface”, *Quick Report of Railway Technical Research Institute*, 30(1), pp. 25-33.
- Nakamura Y. (2000), “Clear Identification of fundamental idea of Nakamura’s technique and its applications”, *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand*, 2656, 8p.
- NEHRP (2000), “Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures”, *FEMA 368*, 374p.
- Nogoshi M. and Igarashi T. (1971), “On the Amplitude Characteristics of Microtremor (Part 2)”, *J. Seismol. Soc. Japan*, 24, pp. 26-40.
- Papazachos B. (1990), “Seismicity of the Aegean and surrounding area”, *Tectonophysics*, 178, pp. 287-308.
- SESAME European Research Program (2004), “Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations: Measurements, Processing and Interpretation”, *Deliverable D23.12*, 62p.
- Wathelet M. (2005), “Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion”, *PhD thesis*, University of Liège, Belgium, 177p.