

Μετρήσεις Μικροθρόβου για την Εκτίμηση Εδαφικών Προσομοιωμάτων με Εφαρμογή της Εναλλακτικής SPAC Microtremor Measurements for the Estimation of Soil Models with Application of the Alternative SPAC

Δημήτριος ΡΑΠΤΑΚΗΣ¹, Κωνσταντία ΜΑΚΡΑ²

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στο παρόν άρθρο παρουσιάζονται τα εδαφικά προσομοιώματα, σε δύο διαφορετικές θέσεις, με όρους ταχύτητας Vs διατμητικών κυμάτων όπως προέκυψαν από την ανάλυση μικροθρόβου με τη γενικευμένη μέθοδο SPAC. Επισημαίνονται οι θεωρητικές διαφορές της γενικευμένης από τη συμβατική SPAC, και δείχνεται με τα αποτελέσματα η αξιοπιστία της πρώτης. Τα αποτελέσματα τόσο των μετρήσεων μικροθρόβου όσο και των συμβατικών σεισμικών διασκοπήσεων cross-hole, down-hole και αντιστροφής των επιφανειακών κυμάτων, συσχετίζονται με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σε ότι αφορά τους γεωλογικούς σχηματισμούς αυτής της περιοχής του ΠΣ της Θεσσαλονίκης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται και αποτελέσματα από βιβλιογραφικές αναφορές που προέκυψαν από την εφαρμογή της συμβατικής SPAC. Η σύνθεση των παραπάνω δείχνει την ύπαρξη δύο ζωνών που εκτείνονται περιμετρικά της ακτογραμμής του κόλπου της Θεσσαλονίκης. Στην παράκτια ζώνη εμφανίζεται εύκαμπτος σχηματισμός πάχους 10-50 m που δεν υπάρχει στη βορειότερη ζώνη. Ο δύσκαμπτος επιφανειακός σχηματισμός στη βόρεια ζώνη βυθίζεται κάτω από τον εύκαμπτο σχηματισμό της παράκτιας ζώνης.

ABSTRACT : The paper presents the soil profiles at two different sites, in terms of Vs velocities, as they resulted from the analysis of microtremors by the generalized SPAC method. The theoretical differences between generalized and conventional SPAC are stressed together with the reliability of the first through the results herein presented. The results provided by microtremors and conventional seismic prospecting are correlated in order to deduce conclusions about the geological formations in that region. Also, results from the conventional SPAC are used from recent references. The synthesis all of them showed the existence of two peripheral zones extended from the offshore to the North. In the shoreside zone, an inflectbile soil formation of 10 – 50 m thickness exists, while does not in the northern zone. The stiff surficial formation, founded in the northern zone, is deepening under the inflectbile formation of the offshore zone.

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

¹ Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ, email: raptakis@civil.auth.gr

² Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Εντεταλμένη Ερευνήτρια, ΙΤΣΑΚ, email: makra@itsak.gr

σεισμικής δράσης. Ο πλέον σημαντικός παράγοντας τόσο για την ερμηνεία της σεισμικής απόκρισης όσο και για την προσομοίωσή της είναι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες (site effects). Η διερεύνηση του ρόλου των τοπικών εδαφικών συνθηκών και της επίδρασής τους στην ισχυρή εδαφική κίνηση προϋποθέτει τη γνώση της γεωμετρίας και των ιδιοτήτων και ιδιαίτερα της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων, Vs, των γεωλογικών σχηματισμών. Για τον προσδιορισμό της Vs χρησιμοποιούνται συνήθως οι κλασσικές ενεργητικές γεωφυσικές μέθοδοι (διάθλαση, ανάκλαση, CrossHole, DownHole, SurfaceWaveInversion, κα) παρά τους πολλαπλούς περιορισμούς που εμφανίζονται κατά τη χρήση τους (Ραπτάκης, 2001), σε σχέση με το βάθος γεωτρήσεων, τον διαθέσιμο χώρο στα πυκνοδομημένα συγκροτήματα, τις προαπαιτούμενες εργασίες πεδίου και μετρήσεις, την ισχύ των σεισμικών πηγών διέγερσης, κ.λ.π.

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση παθητικών μεθόδων διεθνώς, που βασίζονται σε μετρήσεις του γεώδη θορύβου (μικροθόρυβος) κατακτά συνεχώς έδαφος. Μια από τις πλέον διαδεδομένες είναι η μέθοδος SPAC (Χωρικός Συντελεστής Αυτοσυσχέτισης) η οποία εισήχθη από τον Aki (1957, 1965). Πρόσφατα χρησιμοποιείται ευρέως στην Ιαπωνία (Okada 1990, 1997, Kanno et al. 2000, Kudo et al. 2002, Satoh et al. 2004) και στον Ευρωπαϊκό χώρο (Hough et al. 1992, Malagnini et al. 1993, Chouet et al. 1998). Στον Ελληνικό χώρο οι σχετικές δημοσιεύσεις αφορούν κατά κύριο λόγο τη Μυγδονία λεκάνη (Αποστολίδης 2002, Μανάκου 2007) και την πόλη της Θεσσαλονίκης (Apostolidis et al 2004, Μανάκου και συν. 2008), καθώς και το Αίγιο (Apostolidis et al 2006).

Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι ότι η επεξεργασία του μόνιμου εδαφικού θορύβου βασίζεται στη παραδοχή σύμφωνα με την οποία, ο μικροθόρυβος αποτελείται κυρίως από επιφανειακά κύματα τα οποία μεταβάλλονται σταθερά στο χρόνο και στο χώρο και μπορεί να περιγραφεί με τυχηματικές στάσιμες συναρτήσεις. Η μέθοδος ανάλυσης SPAC «εκμεταλλεύεται» τη χωρική διακύμανση των συντελεστών συσχέτισης και αυτοσυσχέτισης του θορύβου, σε σταθμούς καταγραφής σε κυκλική διάταξη, ώστε να εξασφαλίζεται η μέση αξιμουθιακή πληροφορία. Η τεχνική αυτή ανάλυσης του μικροθορύβου αποτελεί τη συμβατική εκδοχή της μεθόδου SPAC, ενώ πρόσφατα αναπτύχθηκε τεχνική που δεν λαμβάνει υπόψη την αξιμουθιακή κατανομή των σταθμών καταγραφής αλλά την χρονική μεταβολή σε ζεύγος μόνο σταθμών. Το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει από την ανάλυση τους είναι η καμπύλη σκέδασης της ταχύτητας φάσης των επιφανειακών κυμάτων. Στο τελικό στάδιο, από την καμπύλη σκέδασης με μέθοδο αντιστροφής των επιφανειακών κυμάτων υπολογίζεται η κατανομή της ταχύτητας Vs με το βάθος.

Στο παρόν άρθρο, λοιπόν, παρουσιάζεται για πρώτη φορά στον Ελληνικό χώρο πρόσφατη εναλλακτική τεχνική ανάλυσης SPAC του μικροθορύβου (Chavez-Garcia et al., 2005), για δίκτυα με ακανόνιστη γεωμετρία, μαζί με τα αποτελέσματα των ταχυτήτων Vs για εδαφικά προσομοιώματα σε ευρεία περιοχή του κεντροδυτικού Π.Σ. Θεσσαλονίκης. Η κατανομή Vs προσδιορίσθηκε από την ταχύτητα φάσης των Rayleigh κυμάτων που εμπεριέχονται στο μικροθόρυβο, με τη διαδικασία της αντιστροφής. Τα αποτελέσματα του μικροθορύβου συγκρίνονται και συσχετίζονται με άλλα προερχόμενα από συμβατικές μετρήσεις CH, DH και διάθλασης στην ίδια ευρύτερη περιοχή. Η σύνθεση των παραπάνω δείχνει την ύπαρξη δύο ζωνών που εκτείνονται περιμετρικά της ακτογραμμής του κόλπου της Θεσσαλονίκης. Στην παράκτια ζώνη εμφανίζεται εύκαμπτος επιφανειακός σχηματισμός πάχους 10 – 50 m που

δεν υπάρχει στη βορειότερη ζώνη. Ο δύσκαμπτος επιφανειακός σχηματισμός μεγάλου πάχους στη βόρεια ζώνη βυθίζεται κάτω από τον εύκαμπτο σχηματισμό της παράκτιας ζώνης.

ΜΕΘΟΔΟΣ MEM – SPAC

Η μέθοδος SPAC για την ανάλυση του μικροθορύβου εισήχθη πριν από 50 χρόνια περίπου από τον Aki (1957) για τον προσδιορισμό της ταχύτητας φάσης των επιφανειακών κυμάτων που περιέχονται στις καταγραφές του γαιώδη θορύβου. Στη συνέχεια δόθηκαν πρόσθετες θεωρητικές και πρακτικές θεωρήσεις (Aki 1965, Cox 1973, Henstridge 1979, Asten 1976, 1978). Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται συνοπτικά η διατυπωθείσα θεωρία όπως δημοσιεύθηκε στη σχετική βιβλιογραφία από τους παραπάνω ερευνητές καθώς και πολλούς άλλους (για λεπτομερή σπουδή ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στη σχετική αρθρογραφία). Στο παρόν παρουσιάζεται τόσο η συμβατική θεώρησή της όσο και η γενίκευση της (Chavez-Garcia et al., 2005), που διαφοροποιείται από τη συμβατική ως προς το προαπαιτούμενο γεωμετρικό σχήμα του δικτύου καθώς και τον αντίστοιχο φορμαλισμό υπολογισμού των μέσων συντελεστών συσχέτισης, από τους οποίους προκύπτει τελικά η ζητούμενη πληροφορία για την υπό μελέτη γεωλογική δομή. Ο λόγος για τον οποίο παρουσιάζεται, συνοπτικά, η γενίκευση της συμβατικής SPAC είναι διότι αυτή χρησιμοποιείται για πρώτη φορά σε ελληνικά δεδομένα.

Η βασική ιδέα της μεθόδου, γενικά, αφορά την καταγραφή του μικροθορύβου στην επιφάνεια του ημίχωρου, που μπορεί να είναι ετερογενής όμως μόνο σε κατακόρυφη διεύθυνση, και η οποία (καταγραφή) αποτελείται από επίπεδα κύματα που διαδίδονται σε διαφορετικές διευθύνσεις με μια μόνη ταχύτητα φάσης σε κάθε συχνότητα. Η συμβατική μέθοδος SPAC, όπως αναπτύχθηκε από τους προηγούμενους ερευνητές, προϋποθέτει καταγραφή του θορύβου σε κυκλική διάταξη στην περιφέρεια και στο κέντρο της, από τη συσχέτιση και αυτοσυσχέτισή του προκύπτουν οι αντίστοιχοι συντελεστές, των οποίων ο μέσος όρος υπολογίζεται με βάση τη μέση αξιμουθιακή μεταβολή και με ανεξάρτητη μεταβλητή τη σταθερή απόσταση ακτίνας r . Στη συνέχεια, με τη χρήση των συναρτήσεων Bessel υπολογίζεται για κάθε συχνότητα μία ταχύτητα φάσης, το σύνολο των οποίων ορίζει την πειραματική καμπύλη σκέδασης της ταχύτητας φάσης των επιφανειακών κυμάτων και η οποία χαρακτηρίζει τη δομή του υπεδάφους στα όρια της κυκλικής διάταξης. Αυτή η καμπύλη σκέδασης μπορεί να αντιστραφεί επιτυχάνοντας το προσομοίωμα της ταχύτητας V_s των διατμητικών κυμάτων.

Πρόσφατα, οι Chavez-Garcia et al. (2005) εισήγαγαν την ιδέα ότι είναι δυνατόν να αντικατασταθεί η μέση αξιμουθιακή συνάρτηση συσχέτισης με αυτή στο χρόνο ενός μόνο ζεύγους σταθμών. Η υπόθεση για αυτή την ιδέα είναι ότι μέση συνάρτηση συσχέτισης για ένα ζεύγος σταθμών με μεγάλη διάρκεια καταγραφής περιλαμβάνει όλες τις διαφορετικές διευθύνσεις των κυμάτων που αποτελούν τον μικροθόρυβο. Με αυτή την έννοια, εφόσον ο μικροθόρυβος είναι ισότροπος (δηλ. κύματα που διαδίδονται με ίδια ισχύ προς όλες τις κατευθύνσεις), μπορεί ένα μόνο ζεύγος σταθμών να δίνει αποτέλεσμα ισοδύναμο με αυτό της αξιμουθιακής κατανομής πολλών ζευγών σταθμών με την ίδια μεταξύ τους απόσταση. Οπότε στην προκειμένη περίπτωση δεν απαιτείται η αυστηρά καθορισμένη κυκλική διάταξη.

Πράγματι, στις δημοσιεύσεις των Chavez-Garcia et al.. (2005 a,b), Chavez-Garcia et al. (2006), Chavez-Garcia et al. (2007), η υπόθεση αυτή αποδείχθηκε και τα αποτελέσματα εφαρμογής της εναλλακτικής μεθόδου SPAC, όπως γενικεύθηκε, ήταν ακριβή και αξιόπιστα. Στην παρούσα εργασία δεδομένα τα οποία ελήφθησαν σε κυκλική διάταξη και αναλύθηκαν με τη συμβατική μέθοδο SPAC από τους Μανάκου και συν. (2008), χρησιμοποιούνται εκ νέου για να αναλυθούν με τη γενικευμένη ως προς τον χρόνο εναλλακτική προσέγγιση της, έχοντας το πλεονέκτημα της προόδου των τεχνικών ανάλυσης.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

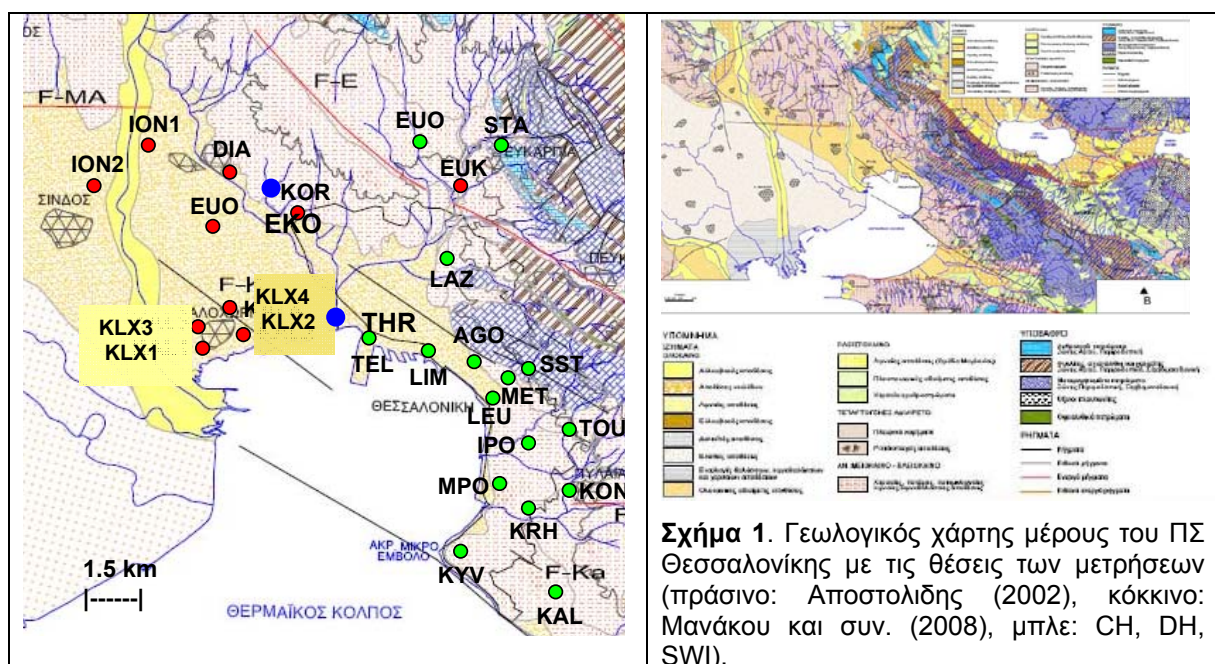
Όλα τα δεδομένα που συλλέχθηκαν είτε με τις συμβατικές ενεργητικές γεωφυσικές μεθόδους (CrossHole, διάθλασης και DownHole) στην περίοδο 1990-1998, είτε με την παθητική μέθοδο του μικροθορύβου στην περίοδο 2000-2007, είχαν ως απώτερο σκοπό τη διερεύνηση των γεωμετρικών και δυναμικών χαρακτηριστικών των γεωλογικών σχηματισμών στο ευρύτερο Πολεοδομικό Συγκρότημα Θεσσαλονίκης, για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς τους κατά τη διάρκεια της ισχυρής σεισμικής διέγερσης. Ως εκ τούτου, οι μετρήσεις αυτές καθώς και άλλες που πρόκειται να ακολουθήσουν στο μέλλον εστιάζονται κυρίως στην κατασκευή του τρισδιάστατου προσομοιώματος της γεωλογικής δομής της περιοχής με όρους μελέτης της σεισμικής απόκρισης. Οι μετρήσεις αυτές έλαβαν χώρα σε δυο υπο-περιοχές στο ΒΔ τμήμα του ΠΣ, την παράκτια ζώνη μεταξύ του λιμένα και του Καλοχωριού, και τη βορειότερη ζώνη των Διαβατών – ΕΚΟ – Κορδελιού (DIA – ΕΚΟ – KOR) που μεσολαβεί μεταξύ της παράκτιας και αυτής του γεωλογικού ορίου αποθέσεων – βράχου. Η χαρακτηριστική διαφορά στις δυο ζώνες αφορά το είδος και το πάχος των επιφανειακών αποθέσεων. Παρά την εμφάνιση εδαφικών στρώσεων μικρού πάχους και με μικρές διαφορές ταχυτήτων Vs μπορεί κανείς να διακρίνει δυο βασικούς σχηματισμούς που τα όριά τους είναι σαφώς ευδιάκριτα. Στην παράκτια ζώνη βρέθηκε σχηματισμός με αποθέσεις των οποίων η ταχύτητα Vs (δυσκαμψία) κυμαίνεται από 85 m/s έως 230 m/s και πάχος από 10 m έως 55 m, και οποίος απουσιάζει στη βορειότερη ζώνη. Ενώ ο επιφανειακός σχηματισμός στην τελευταία, με μέσες ταχύτητες Vs που κυμαίνεται από 450 m/s έως 650 m/s, εκτείνεται βυθιζόμενος προς την ακτογραμμή.

Μετρήσεις μικροθορύβου (θέση KLX)

Οι μετρήσεις μικροθορύβου ελήφθησαν στο πλαίσιο προγράμματος για την επέκταση της γνώσης της εδαφικής δομής του ευρύτερου Πολεοδομικού Συγκροτήματος (ΠΣ) της Θεσσαλονίκης (SRM-LIFE ΔΠ19-ΓΓΕΤ/2003-2007). Για κάθε θέση χρησιμοποιήθηκαν 4 καταγραφικά REFTEK DAS-130 με σεισμόμετρα GURALP CMG40T ευρέως φάσματος περιόδων (20s) και ανεξάρτητο δέκτη GPS. Σε κάθε περίπτωση η διάταξη των οργάνων (στο κέντρο και στις κορυφές ισόπλευρου εγγεγραμμένου τριγώνου) ήταν κυκλική καθώς τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της συμβατικής μεθόδου SPAC (Μανάκου και συν., 2008). Οι ίδιες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν εκ νέου, στο παρόν άρθρο, μη λαμβάνοντας υπόψη ότι προήλθαν από δίκτυο με κανονική γεωμετρία, καθώς αναλύθηκε η συσχέτιση των καταγραφών μικροθορύβου από ανεξάρτητα ζεύγη των καταγραφικών που αποτελούσαν το κυκλικό δίκτυο.

Οι αναλύσεις με την εναλλακτική τεχνική εφαρμόστηκαν σε δεδομένα από μετρήσεις που

πραγματοποιήθηκαν σε δύο θέσεις, KLX2 και KLX4, σε απόσταση περίπου 900 m μεταξύ τους, στην παράκτια ζώνη ΒΔ του λιμένα Θεσσαλονίκης (Σχ. 1). Για τις ανάγκες εφαρμογής της συμβατικής μεθόδου SPAC τα δεδομένα των καταγραφών μικροθορύβου για κάθε θέση αφορούσαν 2 ομάδες σε αντίστοιχους κύκλους με ακτίνες 10 m και 50 m (KLX2), και 10 m και 33 m (KLX4), αντίστοιχα. Η ανάγκη για τις μετρήσεις με τις μεγαλύτερες ακτίνες προκύπτει από την αναλογική σχέση διαστάσεων του δικτύου με τη δυνατότητα απόκτησης της ζητούμενης πληροφορίας σε μεγάλα βάθη, δεδομένου ότι οι χαλαρές αποθέσεις στην περιοχή εκτιμώνται με σχετικά μεγάλο πάχος. Ο συνεχής χρόνος ταυτόχρονης καταγραφής μικροθορύβου σε όλα τα όργανα ήταν 1300 s και 1360 s. Σε αυτή τη φάση των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε μόνο η κατακόρυφη συνιστώσα, καθώς θεωρείται βέβαιη η ύπαρξη της σκέδασης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh.



Από το σύνολο των καταγραφών χρησιμοποιήθηκαν τελικά για την περίπτωση του KLX4 δεδομένα από τη διάταξη με τη μικρή ακτίνα, ενώ για την περίπτωση του KLX2 με τη μεγάλη ακτίνα (διάταξη). Στην περίπτωση του KLX4 αναλύθηκαν τα δεδομένα και της μεγάλης διάταξης, όμως εξαιτίας της οριακής συνάφειας του μικροθορύβου δεν απέδωσαν καλύτερους συντελεστές συσχέτισης από αυτούς στη μικρή διάταξη, η οποία τελικά χρησιμοποιήθηκε. Στην περίπτωση του KLX2 τα δεδομένα της μικρής διάταξης απέδωσαν συντελεστές συσχέτισης των οποίων τα μέγιστα (> 0.99) παρατηρήθηκαν σε συχνότητες μεγαλύτερες από αυτές που προέκυψαν από τη μεγάλη διάταξη, γεγονός που αφενός δεν ικανοποιούσε τη συνθήκη για τη διερεύνηση βαθύτερων γεωλογικών σχηματισμών και αφετέρου δεν προσέθετε τίποτε περισσότερο στην ανάλυση των επιφανειακότερων.

Μετρήσεις διάθλασης και CrossHole (Θέση THR)

Οι παρακάτω μετρήσεις με συμβατικές σεισμικές διασκοπήσεις πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της Μικροζωνικής Μελέτης Θεσσαλονίκης, στις αρχές της δεκαετίας το 1990, Δυτικά

και πλησίον του λιμένα Θεσσαλονίκης στη θέση THR. Τα αποτελέσματα τους παρατίθενται με σκοπό τη συσχέτιση τους με τα αντίστοιχα του μικροθορύβου όπως αναλύθηκαν στο παρόν καθώς και με αυτά από προηγούμενες μελέτες με εφαρμογή της συμβατικής μεθόδου SPAC (Αποστολίδης 2002 και Apostolidis et al. 2004). Οι συμβατικές διασκοπήσεις περιέλαβαν δύο ομάδες δεδομένων που αναλύθηκαν με διαφορετικές μεθόδους. Η μια αφορούσε μετρήσεις CH σε ζεύγος γεωτρήσεων βάθους 40 m και η άλλη μια σεισμική τομή μήκους 55 m με δεδομένα σεισμικής P-διάθλασης, τα οποία όμως επεξεργάστηκαν στη συνέχεια με τη μέθοδο αντιστροφής SWI. Αμφότερες απέδωσαν τα αντίστοιχα Vs προσομοιώματα. Οι θέσεις εφαρμογής των δύο τεχνικών απείχαν περίπου 200 m (Σχ. 1).

Μετρήσεις DownHole (Θέση ΕΚΟ)

Οι μετρήσεις DH πραγματοποιήθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1990 στην περιοχή της ΕΚΟ σε δύο γειτονικές γεωτρήσεις βάθους 20 m (Raptakis and Makra 1998, Technical Report). Οι μετρήσεις με το βάθος έγιναν ανά 1 m. Η επεξεργασία των δεδομένων απέδωσε τα αντίστοιχα Vs προσομοιώματα τα οποία συγκρίνονται με αποτελέσματα από μετρήσεις μικροθορύβου (Μανάκου και συν., 2008) σε δύο εκατέρωθεν θέσεις DIA και KOR, που απέχουν αποστάσεις 1.2 km και 1.7 km αντίστοιχα (Σχ. 1).

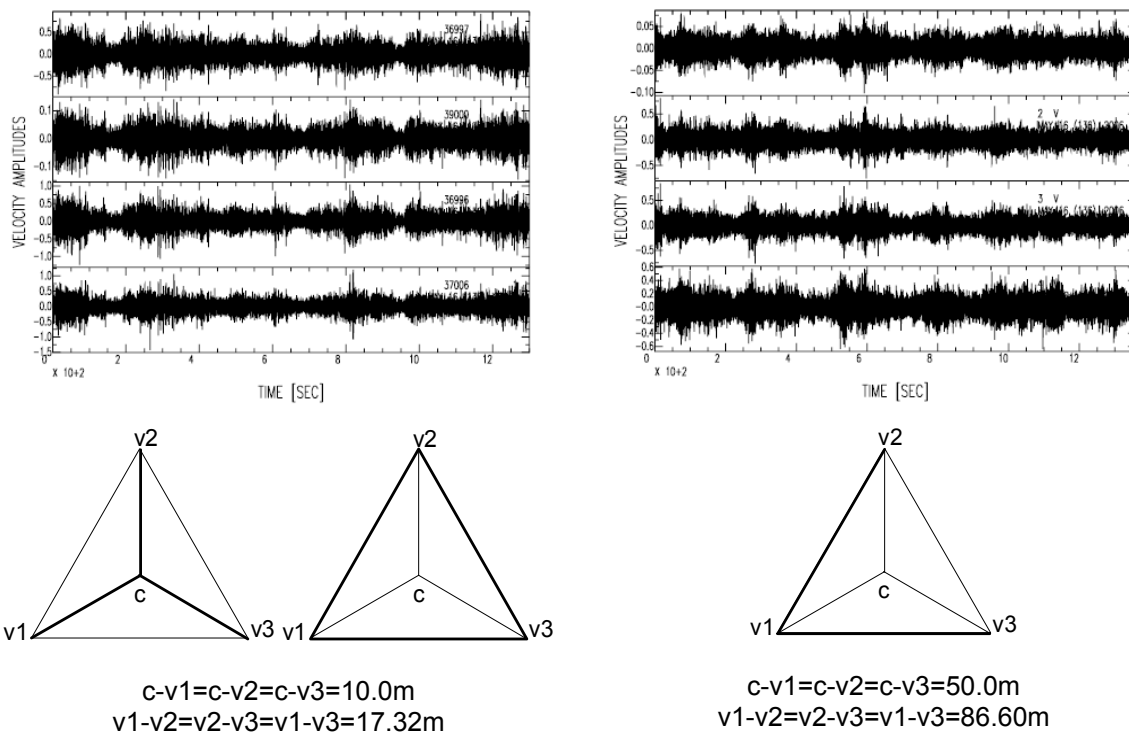
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ MEM-SPAC

Τα αποτελέσματα αφορούν την εφαρμογή της γενικευμένης SPAC. Υπολογίσθηκαν οι συντελεστές συσχέτισης για όλα τα ζεύγη σταθμών και για τις δύο θέσεις, όμως δεν χρησιμοποιήθηκαν όλοι διότι παροδικές διαταραχές σε μεμονωμένο σταθμό παραβίασαν τις προϋποθέσεις υπολογισμού τους και το αποτέλεσμα τους απέιχε από το αναμενόμενο. Για τον υπολογισμό των συντελεστών συσχέτισης χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 9 και 12 χρονικά παράθυρα των 272 sec και 200 sec, αντίστοιχα για τις θέσεις KLX2 και KLX4 (Σχ. 2). Το βήμα της χρονικής μεταβολής των παραθύρων επιλέχθηκε ώστε να υπάρχει επικάλυψη κατά 50% μεταξύ των διαδοχικών παραθύρων. Για λόγους ελέγχου και βελτίωσης των συντελεστών υπολογίσθηκαν και για μικρότερης διάρκειας παράθυρα κατά 2, 4 και 10 φορές, όμως δεν παρατηρήθηκαν αξιοσημείωτες διαφορές στη περιοχή των συχνοτήτων του πρώτου όρου μηδενικής τάξης της συνάρτησης Bessel, και για αυτό το λόγο δεν χρησιμοποιήθηκαν τελικά.

Κατά τον υπολογισμό των συντελεστών χρησιμοποιήθηκε σειρά 60 ζωνο-περατών φίλτρων για κάθε χρονικό παράθυρο με κεντρική συχνότητα 0.1 Hz, μεταξύ 0.08 και 0.12 Hz, και αυξανόμενο βήμα συχνότητας κατά παράγοντα 1.1 κάθε φορά. Τα φίλτρα αυτά επιλέχθηκαν από πλήθος δοκιμών που απέδωσαν παρόμοια αποτελέσματα εκτός από μικρό αριθμό συχνοτήτων μεγαλύτερων της συχνότητας αναφοράς (η μικρότερη), η τιμή της οποίας ενδιέφερε να είναι η μικρότερη δυνατή. Η επιλογή των φίλτρων αυτών βοήθησε στον αξιόπιστο προσδιορισμό της ταχύτητας φάσης στις συχνότητες αναφοράς και κατ' επέκταση στην απολαβή πληροφορίας σε μεγαλύτερα κατά το δυνατό βάθη.

Υπολογίσθηκαν οι συντελεστές συσχέτισης για κάθε παράθυρο και στη συνέχεια ο μέσος συντελεστής συσχέτισης ως συνάρτηση της συχνότητας (για όλα τα χρονικά παράθυρα) για κάθε ζεύγος. Η μέση χρονική συνάρτηση συσχέτισης (εναλλακτική SPAC) συγκρίνεται με τη

μέση αζιμουθιακή (συμβατική SPAC, χάριν του κυκλικού δικτύου) για την επιβεβαίωση της βασικής υπόθεσης της πρώτης. Ακολούθως, με βάση τον μαθηματικό φορμαλισμό της μεθόδου, από τη σύνθεση των μέσων συντελεστών συσχέτισης για τα διάφορα ζεύγη σταθμών λαμβάνοντας υπόψη τις μεταξύ τους αποστάσεις (οι διαφορές των οποίων είναι μικρές), υπολογίζεται η καμπύλη σκέδασης της ταχύτητας φάσης. Από τη σύνθεση αυτή εξαιρέθηκαν οι μέσοι συντελεστές συσχέτισης των οποίων οι μέγιστες τιμές ήταν μικρές (< 0.7) στη συχνότητα αναφοράς. Με αυτή την έννοια, χρησιμοποιήθηκαν τελικά 2 ζεύγη για τη θέση του KLX2 και 6 ζεύγη συνολικά (3 και 3 για κάθε απόσταση, 10 m και 17.32 m, αντίστοιχα) για τη θέση KLX4 (Σχ. 2).



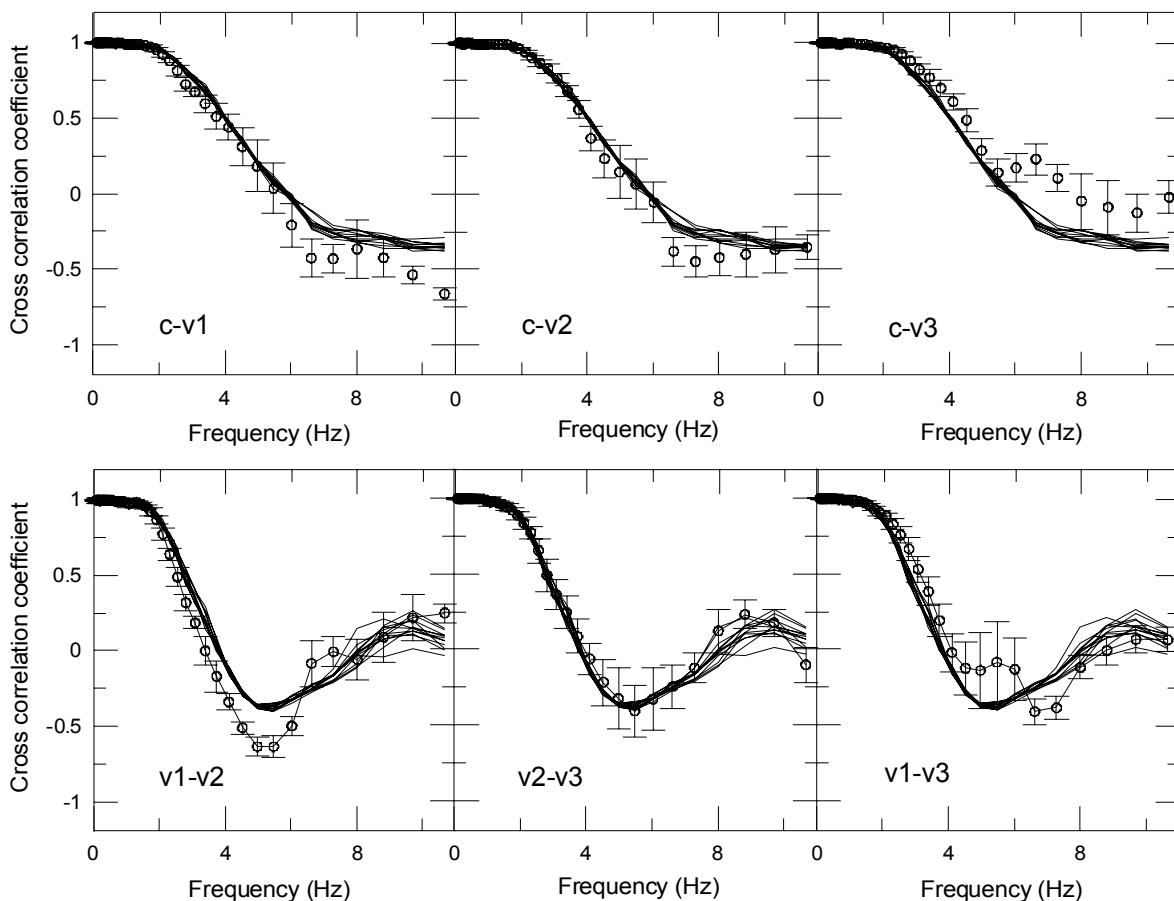
Σχήμα 2. Σήματα μικροθορύβου (πάνω) και γεωμετρία του δικτύου με τα ζεύγη σταθμών που τελικά χρησιμοποιήθηκαν (κάτω) για τις θέσεις KLX2 (δεξιά) και KLX4 (αριστερά).

Ακολούθως σχολιάζονται οι συντελεστές συσχέτισης, προσδιορίζονται οι καμπύλες σκέδασης της ταχύτητας φάσης με μέθοδο (Tarantola and Valette, 1982) επαναληπτικής διαδικασίας (καθώς το πρόβλημα δεν είναι γραμμικό), και τα Vs προσομοιώματα για κάθε θέση μελέτης με μέθοδο αντιστροφής (Herrmann, 1985, 1996). Με βάση τη διαδικασία αντιστροφής τα πειραματικά δεδομένα της σκέδασης συνδυάζονται με ένα αρχικά εισαγόμενο εδαφικό προσομοίωμα (πάχος και ταχύτητες V_p , V_s για αριθμό στρωμάτων), το οποίο χρησιμοποιείται για την αναστροφή των S κυμάτων. Εξαιτίας της μη γραμμικότητας του προβλήματος, μια επαναληπτική γραμμική διαδικασία πραγματοποιείται, σύμφωνα με την οποία το αρχικό προσομοίωμα με την αντίστοιχη θεωρητική καμπύλη σκέδασης, διαφοροποιείται μετά από κάθε επανάληψη. Η ικανοποιητική σύγκλιση της θεωρητικής καμπύλης σκέδασης και της πειραματικής, αποτελεί βασική προϋπόθεση αποδοχής του τελικού Vs προσομοιώματος. Ταυτόχρονα υπολογίζονται οι επιλυόμενοι πυρήνες για κάθε στρώμα,

που αποτελούν ένα ακόμη σημαντικό κριτήριο αξιοπιστίας της μεθόδου. Όσο οξύτερη είναι η συνάρτηση δ σε κάθε βάθος τόσο ακριβέστερη είναι η ανάλυση της Vs για το δεδομένο πάχος και βάθος του στρώματος.

Περίπτωση KLX4

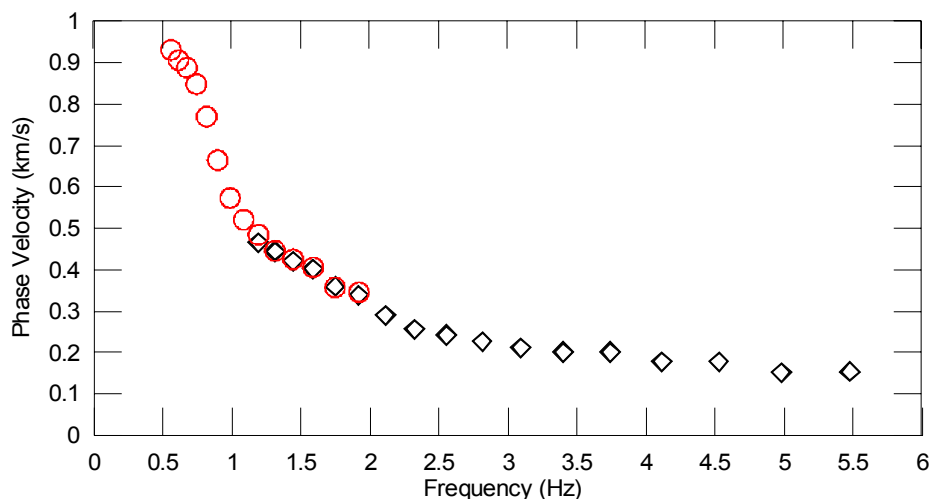
Το γεγονός ότι οι μετρήσεις έγιναν σε κυκλική διάταξη (Σχ.2) έδωσε τη δυνατότητα επαλήθευσης της βασικής υπόθεσης για την εφαρμογή της εναλλακτικής SPAC. Υπολογίσθηκαν οι μέσοι συντελεστές συσχέτισης με αζιμουθιακή κατανομή για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ζευγών σταθμών c-v1, c-v2, c-v3 και v1-v2, v2-v3, v1-v3, και συγκρίθηκαν με τους αντίστοιχους που προέκυψαν από τη χρονική μεταβολή για ένα μόνο ζεύγος κάθε φορά (Σχ.3). Οι μέσοι συντελεστές με την τυπική απόκλιση τους για κάθε ζεύγος, για αμφότερες τις αποστάσεις (10 m και 17.34 m) και για το σύνολο των 12 παραθύρων, συμφωνούν εξαιρετικά με τους αντίστοιχους μέσους αζιμουθιακούς (οι οποίοι είναι ίδιοι για κάθε απόσταση στα αντίστοιχα διαγράμματα του Σχ. 3) για το εύρος των συχνοτήτων, μεταξύ της συχνότητας αναφοράς και της συχνότητας του πρώτου μηδενικού όρου (Σχ.3).



Σχήμα 3. Σύγκριση των συντελεστών με την τυπική απόκλιση τους για κάθε ζεύγος, για αμφότερες τις αποστάσεις (10 μ. πάνω και 17.34 μ. κάτω) και για το σύνολο των 12 παραθύρων, και των αντίστοιχων μέσων αζιμουθιακών οι οποίοι είναι ίδιοι για κάθε απόσταση. Στο εύρος των συχνοτήτων μεταξύ της συχνότητας αναφοράς και της συχνότητας του πρώτου μηδενικού όρου, η συμφωνία είναι πολύ καλή λαμβάνοντας υπόψη τα όρια εμπιστοσύνης, αντίστοιχα μέχρι 5.5 Hz και 3.5 Hz, για αποστάσεις 10 μ. (πάνω) και 17.34 μ. (κάτω).

Η συχνότητα του πρώτου μηδενικού όρου διαφοροποιείται ανάλογα με την απόσταση των σταθμών, όσο αυξάνει η απόσταση τόσο μειώνεται η συχνότητα, γεγονός που οφείλεται στη σταδιακή απώλεια της συνάφειας του μικροθορύβου σε σχέση με τη χωρικά μεταβαλλόμενη καταγραφή του και την ενδεχόμενη επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην ισότροπη ισχύ του. Πράγματι, για τα ζεύγη μεταξύ κεντρικού και περιφερειακών σταθμών (απόσταση 10 m) η συχνότητα είναι 5.5 Hz, ενώ για τα ζεύγη μεταξύ των περιφερειακών σταθμών (απόσταση 17.34 m) η συχνότητα είναι 3.5 Hz.

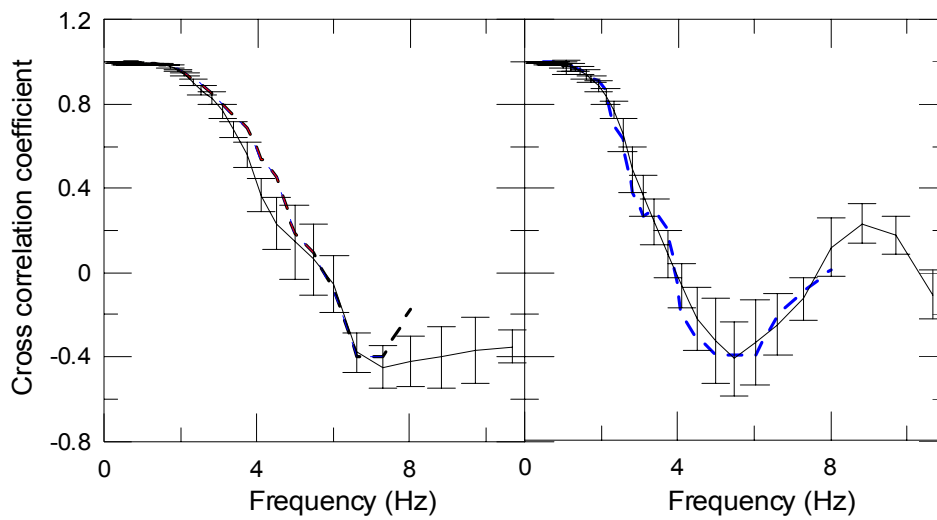
Έχοντας επιβεβαιώσει την αξιοπιστία των χρονικά υπολογισμένων μέσων συντελεστών συσχέτισης, από την αντιστροφή τους προκύπτει η καμπύλη σκέδασης της ταχύτητας φάσης των Rayleigh κυμάτων (Σχ. 4). Η καμπύλη της ταχύτητας φάσης προέκυψε από τη σύνθεση των δύο επιμέρους που προέκυψαν ως αποτέλεσμα της αντιστροφής των μέσων συντελεστών, χωριστά, για κάθε ομάδα σταθμών με ίδιες αποστάσεις. Η μία καμπύλη σε χαμηλές συχνότητες (κύκλοι), από 0.5 Hz έως 2 Hz, προέκυψε από τη ομάδα με αποστάσεις 17.34 m και η άλλη (ρόμβοι), από 1 Hz έως 5.5 Hz, από τη ομάδα με αποστάσεις 10 m. Οι παρόμοιες ταχύτητες φάσης στο κοινό διάστημα μεταξύ 1 Hz και 2 Hz δείχνουν την ομαλή μετάβαση των ταχυτήτων φάσης για όλες τις συχνότητες που ενδιαφέρουν. Επιβεβαίωση της αξιοπιστίας της αντιστροφής των συντελεστών συσχέτισης (σε καμπύλη σκέδασης) αποτελεί η καλή συμφωνία μεταξύ των πειραματικών συντελεστών και των αντίστοιχων συναρτήσεων Bessel όπως προέκυψαν από την καμπύλη σκέδασης της ταχύτητας φάσης (Σχ. 5). Στο σχήμα δίνεται παράδειγμα της συμφωνίας αυτής για τις συναρτήσεις Bessel για αμφότερες τις αποστάσεις. Το σημαντικό είναι ότι θεωρητικές και πειραματικές συναρτήσεις Bessel συμφωνούν ως προς το μηδενικό όρο και τα σημεία καμπής τους.



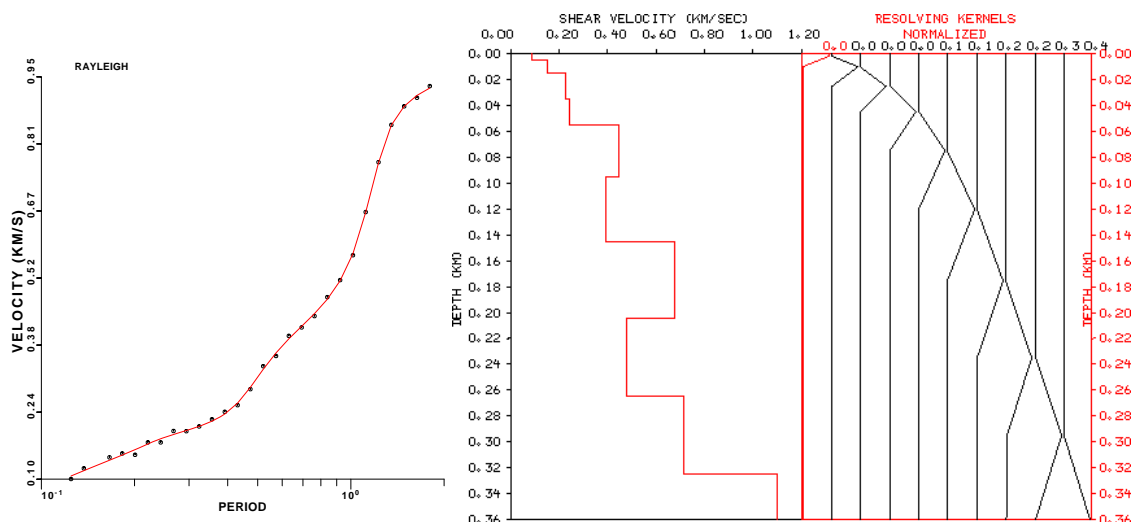
Σχήμα 4. Η πειραματική καμπύλη της ταχύτητας φάσης όπως προέκυψε από τη σύνθεση των δύο διαφορετικών ως αποτέλεσμα της αντιστροφής χωριστά των μέσων συντελεστών για κάθε ομάδα σταθμών με ίδιες αποστάσεις (10 μ., από 1 Hz έως 5.5 Hz, και 17,34 μ., από 0.5 Hz έως 2 Hz.).

Στη συνέχεια η πειραματική καμπύλη σκέδασης της ταχύτητας φάσης των Rayleigh κυμάτων αντιστράφηκε (Σχ. 6) με μέθοδο αντιστροφής (Herrmann, 1985, 1996) και προέκυψε το V_s προσομοίωμα του σχήματος 6. Η σύμπτωση της πειραματικής και θεωρητικής καμπύλης

σκέδασης της ταχύτητας φάσης των Rayleigh κυμάτων καθώς και οι επιλυόμενοι πυρήνες για κάθε στρώμα, αποτελούν κριτήρια αξιοπιστίας του τελικού αποτελέσματος. Η επιτυχής αντιστροφή των πειραματικών δεδομένων σκέδασης έδωσε την κατανομή των ταχυτήτων Vs μέχρι βάθους 340 m Από το τελικό προσομοίωμα προκύπτει μία αλληλουχία επιφανειακών στρωμάτων πάχους 55 m χαμηλής δυσκαμψίας (80 m/s – 240 m/s), ενώ στη συνέχεια εμφανίζονται δύσκαμπτοι σχηματισμοί με μέση σταθμισμένη ταχύτητα Vs 550 m/s. Οι ταχύτητες Vs των στρωμάτων αυτών κυμαίνονται από 400 m/s έως 700 m/s, μέχρι τον γεωφυσικό ημίχωρο (με ταχύτητα Vs 1100 m/s).



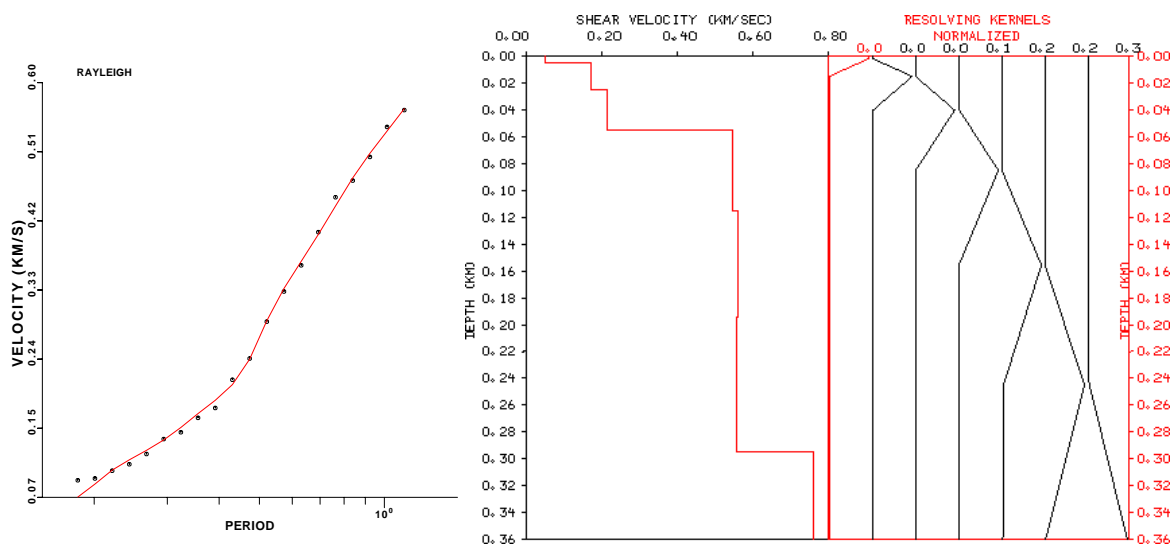
Σχήμα 5. Παράδειγμα αντιστροφής δύο συντελεστών συσχέτισης (συνεχής γραμμή με την τυπική απόκλιση) και των αντίστοιχων συναρτήσεων Bessel (διακεκομμένη γραμμή) όπως προέκυψαν από την αντιστροφή των πρώτων, και για τις δύο αποστάσεις των 10 μ. (αριστερά) και των 17.34 μ (δεξιά). Η συμφωνία δείχνει της αξιοπιστία της υπολογισμένης ταχύτητας φάσης.



Σχήμα 6. Σύγκριση πειραματικής (σύμβολα) και θεωρητικής (γραμμή) καμπύλης σκέδασης της ταχύτητας φάσης των Rayleigh κυμάτων (αριστερά) και το τελικό Vs προσομοίωμα (αριστερά του σχήματος δεξιά) με τους αντίστοιχους επιλυόμενους πυρήνες (δεξιά του σχήματος δεξιά) στη θέση KLX4.

Περίπτωση KLX2

Στην περίπτωση του KLX2, η θέση του οποίου απέχει από το KLX4 περίπου 1 km, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία όπως για το KLX4, με τη διαφορά ότι λήφθηκαν υπόψη τελικά τα ζεύγη του σχήματος 2 (v1-v2 και v1-v3). Υπολογίσθηκαν οι μέσοι συντελεστές συσχέτισης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τα υπόλοιπα ζεύγη δεν έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα από αυτά από τα οποία επιλέχθηκαν τελικά. Η αντιστροφή τους έδωσε την καμπύλη σκέδασης της ταχύτητας φάσης των Rayleigh κυμάτων όπως φαίνεται (αριστερά) στο σχήμα 7 (με σύμβολα).



Σχήμα 7. Σύγκριση πειραματικής (σύμβολα) και θεωρητικής (γραμμή) καμπύλης σκέδασης της ταχύτητας φάσης των Rayleigh κυμάτων (αριστερά) και το τελικό Vs προσομοίωμα (αριστερά του σχήματος δεξιά) με τους αντίστοιχους επιλυόμενους πυρήνες (δεξιά του σχήματος δεξιά) στη θέση KLX2.

Η καμπύλη αυτή είναι παρόμοια με την αντίστοιχη για τη θέση KLX4, όμως είναι μικρότερη ως προς το εύρος των συχνοτήτων που καλύπτει. Η μέγιστη ταχύτητα φάσης δεν υπερβαίνει 580 m/s, συνεπώς δεν αναμένονται μεγαλύτερες ταχύτητες Vs στο τελικό εδαφικό προσομοίωμα (Σχ. 7), όπως στην περίπτωση του KLX4. Πράγματι, στο προσομοίωμα που προέκυψε μετά την αντιστροφή της πειραματικής καμπύλης, οι δύσκαμπτοι σχηματισμοί εμφανίζουν μέση σταθμισμένη ταχύτητα Vs 550 m/s, χωρίς σημαντική διακύμανση μέχρι τον γεωφυσικό ημίχωρο (Vs 760 m/s).

Το γεγονός ότι η καμπύλη σκέδασης στο διάστημα των περιόδων μεταξύ 0.4 s και 1 s είναι μονότονα αύξουσα χωρίς σημεία καμπής σε αντίθεση με αυτή για το KLX4 για το ίδιο διάστημα, δικαιολογεί τη διαφορά στις Vs για τα αντίστοιχα στρώματα. Τέλος, από το τελικό προσομοίωμα προκύπτει σαφώς και η αλληλουχία των επιφανειακών στρωμάτων πάχους 55 m χαμηλής δυσκαμψίας (70 m/s – 240 m/s), που παρατηρήθηκε στη θέση KLX4. Συνολικά, η κατανομή των ταχυτήτων Vs φτάνει μέχρι βάθους 290 m.

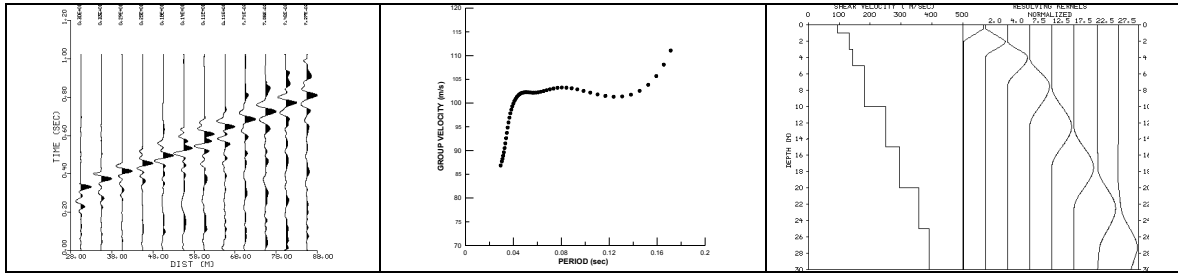
ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

Παράκτια ζώνη

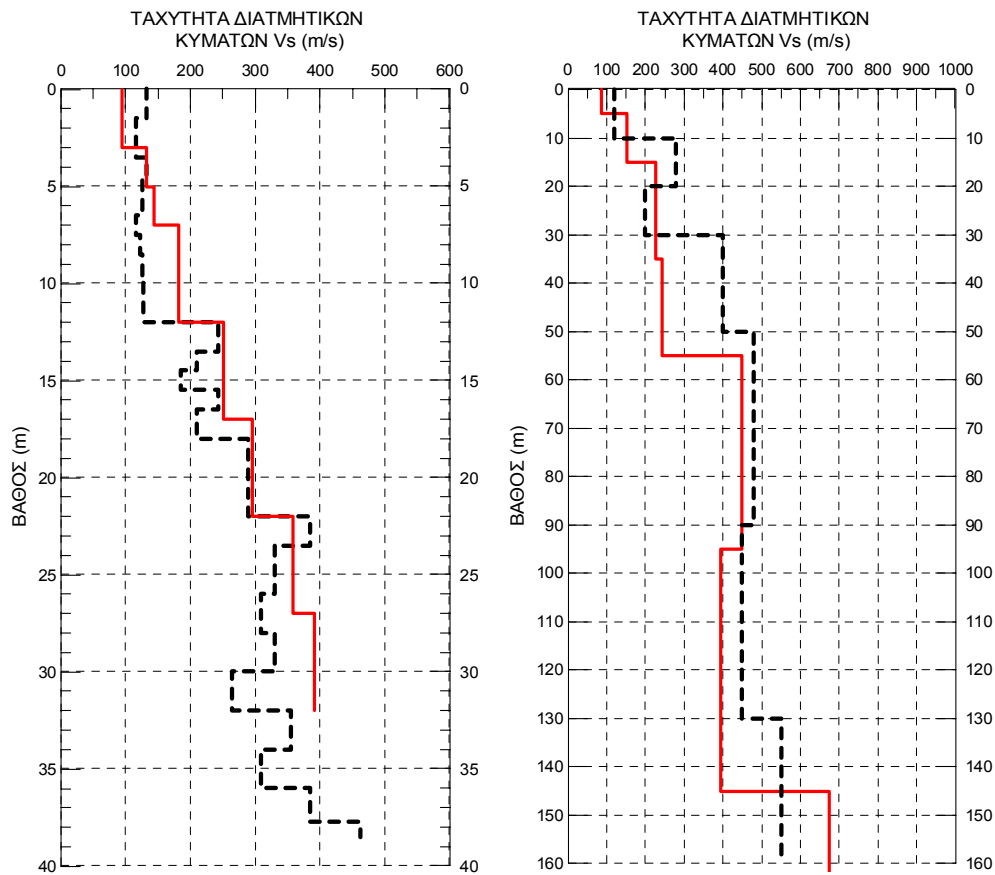
Στη παράκτια ζώνη, τα αποτελέσματα που συσχετίζονται κατά μήκος της, παρά το γεγονός ότι οι αποστάσεις των θέσεων διασκόπησης είναι σχετικά μεγάλες, δείχνουν ικανοποιητική και εύλογη συνάφεια, καθώς ερμηνεύονται επαρκώς από γεωλογική άποψη. Οι θέσεις των μετρήσεων είναι οι KLX (Καλοχώρι), THR (6^{ος} Προβλήτας) και TEL (Λιμάνι) και κατανέμονται σε τομή μήκους 4.2 km με μεταξύ τους αποστάσεις αντίστοιχα KLX – THR 3.3-3.4 km και THR – TEL 1.2-1.4 km. Αρχικά συγκρίνονται τα αποτελέσματα κατά θέση, στις θέσεις KLX και THR, εφόσον υπάρχουν πάνω από μία μέτρηση, και στη συνέχεια συσχετίζονται σε επίπεδο ζώνης.

Στη θέση KLX συγκρίνονται οι βαθιές διασκοπήσεις που παρουσιάσθηκαν προηγουμένως, οι θέσεις των οποίων απέχουν περίπου 1 km. Το βάθος αξιόπιστης ανάλυσης υπερβαίνει τα 300 m. Σε αμφότερες τις θέσεις τα πρώτα 5 m του επιφανειακού μανδύα εμφανίζουν τη μικρότερη ταχύτητα Vs που βρέθηκε σε όλο το ΠΣ (Pitilakis et al. 1992, Ραπτάκης 1995, Raptakis et al. 1994a,b, 1996, 1998, Anastasiadis et al., 2001) και είναι περίπου 80-85 m/s. Τα υποκείμενα στρώματα, πάχους 50 m, έχουν στις δύο θέσεις όμοιες ταχύτητες Vs (150-230 m/s). Τα παραπάνω στρώματα με βάση τη μικρή διακύμανση των ταχυτήτων Vs αποτελούν ένα βασικό σχηματισμό χαλαρών και εύκαμπτων γεωυλικών αμμο-ιλύος με αργιλο-αμμώδη κλάσματα (σε βάθος κάτω των 30 m). Ο βαθύτερος βασικός σχηματισμός που εκτείνεται σε βάθος από 55 m μέχρι τα 300-320 m, σε αμφότερες τις θέσεις, έχει μέση (σταθμισμένη με το πάχος των στρώσεων) ταχύτητα Vs 550 m/s περίπου. Τα δεδομένα ανάλυσης της αντιστροφής στη περίπτωση του KLX2 (Σχ. 7) δεν έδωσαν τη δυνατότητα αναλυτικότερου προσομοιώματος, όπως στη περίπτωση του KLX4 (Σχ. 6), όπου εμφανίζονται στρώματα με ταχύτητες Vs που κυμαίνονται από 400 m/s έως 500 m/s με ενστρώσεις υψηλής δυσκαμψίας (670-710 m/s).

Στη θέση THR, η σύγκριση των αποτελεσμάτων CH (μέχρι βάθους 40 m) και SWI (μέχρι βάθους 30 m, από δεδομένα σεισμικής διάθλασης Σχ. 8) δείχνει ότι βρίσκονται σε καλή συμφωνία, καθώς τα πρώτα 10-12 m παρουσιάζουν ταχύτητες Vs από 90 m/s έως 170 m/s (SWI) και 125 m/s (CH), ενώ για τα βαθύτερα στρώματα (για βάθη μεγαλύτερα των 25 m) οι αντίστοιχες Vs είναι από 250 m/s έως 350 m/s κατά μέσο όρο για τις δύο θέσεις που απέχουν περίπου 200 m (Σχ. 9). Γεωυλικά με ταχύτητες Vs 400-450 m/s συναντώνται σε βάθη άνω των 27-37 m. Οι διαφορές των δύο διαφορετικών τεχνικών οφείλονται σε λόγους, πέρα από την απόσταση των μετρήσεων και τη φύση των ετερογενών τεχνητών αποθέσεων (κατασκευή – επέκταση προβλήτα λιμένα), που αφορούν τις ίδιες τις τεχνικές λήψης και ανάλυσης των δεδομένων (Raptakis et al. 1996 και Ραπτάκης 2001). Στη θέση αυτή οι μετρήσεις με τις συμβατικές σεισμικές διασκοπήσεις δεν έδωσαν τη δυνατότητα απολαβής πληροφορίας για βάθη μεγαλύτερα των 39 m και 32 m, αντίστοιχα για τις μεθόδους CH και SWI. Παρόλα αυτά αξίζει να σημειωθεί ότι οι ταχύτητες Vs μέχρι τα 20 m βάθους βρίσκονται σε καλή συμφωνία με αυτές στη θέση KLX, καθώς διαγράφουν σαφώς τα ίδια χαμηλής δυσκαμψίας επιφανειακά εδαφικά στρώματα. Σε ότι αφορά τα βαθύτερα των 20 m στρώματα η απόκλιση είναι ερμηνεύσιμη και δικαιολογημένη δεδομένης της μεταξύ τους απόστασης (περίπου 3.4 km) και της τοπικής γεωλογίας.



Σχήμα 8. Σειсмоγράμματα από μέτρηση σεισμικής διάθλασης (αριστερά), πειραματικής καμπύλη σκέδασης της ταχύτητας ομάδας των Rayleigh κυμάτων (κέντρο) και το τελικό Vs προσομοίωμα με τους αντίστοιχους επιλυόμενους πυρήνες (δεξιά) στη θέση THR.



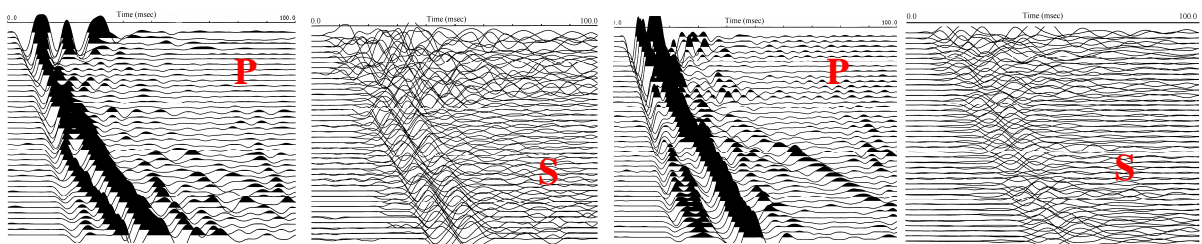
Σχήμα 9. Σύγκριση των αποτελεσμάτων CH (διακεκομμένη γραμμή) και SWI (συνεχής) στη θέση THR (αριστερά), και των KLX4 (συνεχής) και TEL (διακεκομμένη) στις αντίστοιχες (δεξιά).

Στη θέση TEL, όπου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και αναλύσεις του μικροθορύβου με τη συμβατική SPAC από τον Αποστολιδής (2002), τα αποτελέσματα μέχρι τα πρώτα 40 m περίπου, συσχετίζονται ικανοποιητικά με αυτά στη θέση THR (ιδίως της μεθόδου CH, Σχ. 9). Αποκλίσεις του βάθους που συναντώνται χαρακτηριστικές αποθέσεις ερμηνεύονται επαρκώς από γεωλογική άποψη. Για παράδειγμα τα στρώματα με ταχύτητες Vs από 300 ($\pm 10\%$) m/s έως 400 ($\pm 10\%$) m/s συναντώνται στις τρεις διαδοχικές θέσεις από TEL, THR προς KLX4, σε βάθη 30, 22 και 55 m, γεγονός που δείχνει ότι οι αποθέσεις αυτές βαθαίνουν στη διαδρομή από το λιμάνι προς το Καλοχώρι. Σε ότι αφορά τα μεγαλύτερα βάθη, στη θέση TEL (έως και

τα 160 m ανάλυσης) η συσχέτιση των ταχυτήτων Vs με αυτές του προσομοιώματος στη θέση KLX4 (με τη λεπτομερή διακριτοποίηση των εδαφικών σχηματισμών) είναι πολύ ικανοποιητική, καθώς τόσο αυτές καθαυτές (400-500 m/s) όσο και το πάχος (90-100 m, περίπου) του στρώματος αυτού συμπίπτουν (Σχ. 9), παρά τη σχετικά μεγάλη απόσταση μεταξύ KLX και TEL (4.5 km), γεγονός το οποίο δείχνει τη μεγάλη έκταση του σχηματισμού αυτού στην κεντρο-δυτική περιοχή του ΠΣ.

Βόρεια ζώνη

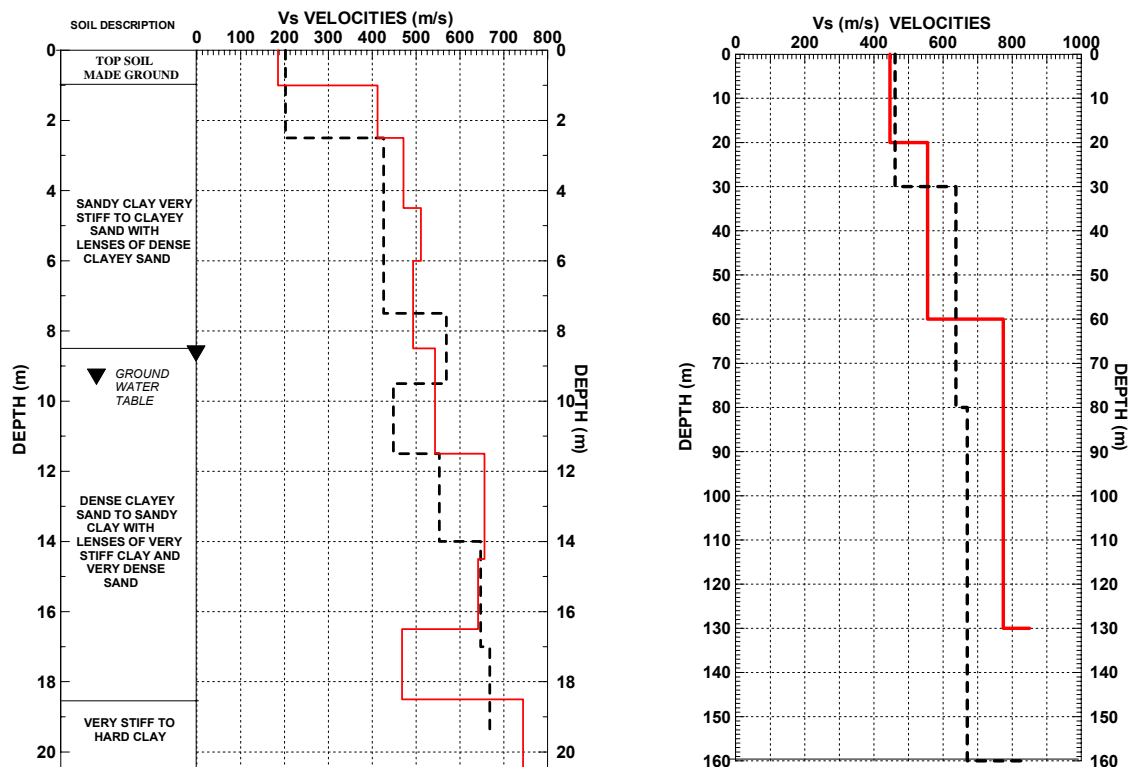
Η βόρεια ζώνη βρίσκεται βορειότερα της παράκτιας κοντά στο γεωλογικό όριο μεταξύ του Τερτατογενούς και του Νεογενούς σχηματισμού του ΠΣ και νοτιότερα του ορίου αποθέσεων – βράχου. Στη ζώνη αυτή στη θέση ΕΚΟ πραγματοποιήθηκαν για πρώτη φορά μετρήσεις (DH με συνολικά 400 σειсмоγράμματα σε δύο χωριστές θέσεις, Σχ. 10), πριν από μια δεκαετία περίπου. Τα πρωτογενή αποτελέσματα στις δύο θέσεις όπου έγιναν οι μετρήσεις DH διαγράφουν γενικά δύσκαμπτα στρώματα με μέσες ταχύτητες Vs που αυξάνουν γρήγορα από 420 σε 650 m/s μέχρι το μέγιστο βάθος των γεωτρήσεων (20 m, περίπου), ενώ ο επιφανειακός μανδύας πάχους 1-2 m εμφανίζει ταχύτητες Vs από 180 έως 200 m/s λόγω αποσάθρωσης (Σχ. 11). Το μικρό σχετικά εύρος διακύμανσης της ταχύτητας Vs σε αμφότερες τις θέσεις (με μονές γεωτρήσεις) επέτρεψε την εκτίμηση της μέσης σταθμισμένης ταχύτητας Vs η οποία βρέθηκε περίπου 550 m/s. Η ταχύτητα Vs συνιστά γενικά ένα βασικό σχηματισμό με υψηλή δυσκαμψία. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ενώ οι δύο θέσεις απέχουν μόλις μερικές δεκάδες μέτρα υπάρχουν διαφορές στα δυο Vs προσομοιώματα οι οποίες δεν μπορούν να δικαιολογηθούν από τη μικρή υψομετρική διαφορά παρά μόνο από την ετερογένεια (ενστρώσεις, «φακοί», κ.ά) των γεωυλικών ως αποτέλεσμα της επαφής διαφορετικού είδους γεωλογικών αποθέσεων (γεωλογικό όριο αποθέσεων διαφορετικής ηλικίας). Εκτός από την υψηλή δυσκαμψία του σχηματισμού, αναλύσεις του παράγοντα ποιότητας Q (με τη μέθοδο του φασματικού λόγου, για λεπτομέρειες της μεθόδου βλ. Ραπτάκης και Μάκρας, 2001) έδειξαν τη σχετικά μεγάλη απόσβεση D ($D[\%]=1/2Q$), καθώς ο Q βρέθηκε με τιμή 6.



Σχήμα 10. P και S-ανάστροφα πολωμένα σειсмоγράμματα, από τις πρώτες αφίξεις των οποίων προέκυψαν τα αντίστοιχα δρομοχρονικά διαγράμματα με βάση τα οποία υπολογίστηκαν τελικά οι αντίστοιχες ταχύτητες, για τις δυο γεωτρήσεις, με τη μέθοδο DH.

Η ύπαρξη πρόσφατων μετρήσεων και αναλύσεων μικροθορύβου με τη συμβατική SPAC (από τους Μανάκου και συν., 2008), σε δύο θέσεις DIA και KOR εκατέρωθεν της ΕΚΟ, έδωσαν τη δυνατότητα συσχέτισεων των αποτελεσμάτων, καθώς αυτές ανήκουν στην ίδια ζώνη. Σε όλες τις θέσεις παρά τις μεγάλες μεταξύ τους αποστάσεις (1.2 km για DIA – ΕΚΟ και 1.7 km για ΕΚΟ – KOR βλ. χάρτη Σχ. 1), τα αποτελέσματα συσχετίζονται ικανοποιητικά,

δεδομένου ότι οι ταχύτητες V_s κυμαίνονται από 450 m/s στα επιφανειακά στρώματα έως 650-750 m/s στα βαθύτερα στρώματα. Η μόνη ελεύθερη παράμετρος που διαφοροποιείται είναι το πάχος των στρωμάτων, τα οποία όμως εμφανίζουν παρόμοια δυσκαμψία. Στην περίπτωση των DH αποτελεσμάτων το πάχος του στρώματος με μέση ταχύτητα V_s 450 m/s είναι 8-10 m ενώ στις εκατέρωθεν θέσεις DIA και KOR είναι 20-30 m (Σχ. 11). Οι μεταβολές αυτές θα μπορούσαν να ερμηνευθούν με την απόσταση των μετρήσεων από το γεωλογικό όριο. Στα αμέσως βαθύτερα στρώματα οι μέσες ταχύτητες V_s (550-650 m/s) συναντώνται και στις τρεις θέσεις για πολλές δεκάδες μέτρα βάθους (DIA και KOR).



Σχήμα 11. V_s προσομοιώματα στις θέσεις των DH μετρήσεων στη θέση ΕΚΟ (αριστερά) και τα αντίστοιχα (δεξιά) στις θέσεις KOR (συνεχής γραμμή) και DIA (διακεκομμένη) από τους Μανάκου και συν. (2008).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν άρθρο έγινε χρήση εναλλακτικής μεθόδου SPAC για την ανάλυση μετρήσεων μικροθορύβου σε δύο περιοχές στο ΒΔ ΠΣ Θεσσαλονίκης. Τα αποτελέσματα της γενικευμένης μεθόδου σε σύγκριση με αυτά της συμβατικής έδειξαν την αξιοπιστία της πρώτης, γεγονός που ανοίγει νέες δυνατότητες για τις μετρήσεις και την ανάλυση του μικροθορύβου που δεν προέρχονται από τα «αυστηρής» γεωμετρίας κυκλικά δίκτυα. Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα με ταυτόχρονη καταγραφή μεγάλης διάρκειας θορύβου να αξιοποιούνται τα υπάρχοντα δίκτυα καταγραφικών (μη «κανονικής» γεωμετρίας) για την εύρεση της γεωλογικής δομής σε μεγάλα βάθη, καθώς είναι ευρέως γνωστό ότι αυτή επηρεάζει τις καταγραφές των σεισμών και επομένως τη σεισμική απόκρισή της. Στο άρθρο αυτό δείχθηκε ότι ο θόρυβος είναι σταθερός στο χώρο και στο χρόνο καθώς παρουσιάζει

ισότροπη συμπεριφορά. Η συνθήκη αυτή ικανοποιείται μόνον όταν απουσιάζουν οι πλευρικές μεταβολές της δυσκαμψίας της τοπικής γεωλογίας. Από την αξιοποίηση του μικροθορύβου εκτιμήθηκε η ταχύτητα φάσης των επιφανειακών (Rayleigh) κυμάτων που εμπεριέχονται στην κατακόρυφη συνιστώσα του. Η ιδιότητα της σκέδασής τους επέτρεψε την αντιστροφή τους σε ταχύτητες διατμητικών κυμάτων με το βάθος. Η αντιστροφή απέδωσε τα εδαφικά Vs προσομοιώματα σε μεγάλα βάθη, γεγονός το οποίο δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί με τις συμβατικές σεισμικές διασκοπήσεις (cross-hole, down-hole και αντιστροφής των επιφανειακών κυμάτων), καθώς το κόστος των γεωτρήσεων, η διαθεσιμότητα μεγάλης έκτασης σε πυκνοδομημένες περιοχές, και η χρήση ισχυρών σεισμικών πηγών είναι περιοριστικοί όροι για τη χρήση τους. Παρόλα αυτά η ύπαρξη παλαιότερων μετρήσεων με τις συμβατικές σεισμικές διασκοπήσεις σε συνδυασμό με τα βαθιά προσομοιώματα από τον θόρυβο, έδωσαν τη δυνατότητα επαλήθευσης των Vs ταχυτήτων των χαρακτηριστικών αποθέσεων και της εκτίμησης σε μεγάλα βάθη των ιδιοτήτων των βασικών γεωλογικών σχηματισμών στην περιοχή μελέτης, που μέχρι σήμερα αγνοούνταν παντελώς. Τα αποτελέσματα έδειξαν την ύπαρξη δύο ζωνών που εκτείνονται περιμετρικά της ακτογραμμής του κόλπου της Θεσσαλονίκης. Στην παράκτια ζώνη εμφανίζεται εύκαμπτος σχηματισμός πάχους 10-50 m με ταχύτητες Vs μεταξύ 80 και 240 m/s, που δεν υπάρχει στη βορειότερη ζώνη, ενώ στη βόρεια ζώνη ο δύσκαμπτος επιφανειακός σχηματισμός με ταχύτητες Vs μεταξύ 450 και 650 m/s βυθίζεται κάτω από τον εύκαμπτο σχηματισμό της παράκτιας ζώνης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τους Δρ. Π. Αποστολίδη και Μ. Μανάκου για τη διάθεση των δεδομένων και αποτελεσμάτων, τους φοιτητές του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ. Ι. Δημητρίου και Α. Μπρόκο για τη συμμετοχή τους στις μετρήσεις μικροθορύβου υπό την εποπτεία των πρώτων, τον Δρ. Chavez-Garcia του Instituto de Ingeniería - UNAM για την κωδικοποίηση του φορμαλισμού της μεθόδου, καθώς και τον επιστημονικώς υπεύθυνο καθ. Κ. Πιτιλάκη του ερευνητικού προγράμματος SRM-LIFE (ΔΠ19, ΓΓΕΤ, 2003-2007), στο πλαίσιο του οποίου χρηματοδοτήθηκε μέρος των μετρήσεων μικροθορύβου. Οι αναλύσεις σήματος πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό SAC (Goldstein et al. 1998).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aki, K. (1957). "Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors", *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.* 25, 415-457.
- Aki, K. (1965). "A note on the use of microseismic in determining the shallow structure of the earth's crust", *Geophysics* 30, 665-666.
- Anastasiadis, A., Raptakis, D. and Pitilakis, K. (2001). "Thessaloniki's Detailed Microzoning: Subsurface Structure as Basis of Site Response Analysis", *Pure and Applied Geophysics*, 158(11), 2597-2533.
- Αποστολίδης Π., (2002), "Προσδιορισμός της εδαφικής δομής με τη χρήση μικροθορύβου. Εφαρμογή στην εκτίμηση των δυναμικών ιδιοτήτων και της γεωμετρίας των εδαφικών σχηματισμών της Θεσσαλονίκης". Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Α.Π.Θ.
- Apostolidis, P., Raptakis, D., Roumelioti, Z. and Pitilakis, K. (2004). "Determination of S-

- Wave Velocity Structure Using Microtremors and SPAC Method Applied in Thessaloniki (Greece)." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(1), 49-67.
- Apostolidis P., D. Raptakis, K. Pandi, M Manakou and K. Pitilakis (2006). "Definition of subsoil structure and preliminary ground response in Aigion city (Greece) using microtremors and earthquakes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 922-940.
- Asten, M W. (1976). "The use of microseisms in geophysical exploration", *Ph.D. Thesis, Macquarie University*.
- Asten, M W. (1978). "Geological control on the three-component spectra of Rayleigh wave microseisms", *Bull. Seism Soc. Am* 68,1623 –1635.
- Chávez-García, F.J., Rodríguez, M, and Stephenson, W.R. (2005a). "An alternative approach to the SPAC analysis of microtremors: exploiting the stationarity of noise", *Bull. Seism Soc. Am*, 95, 277-293.
- Chávez-García, F.J. and F. Luzón (2005b). "On the correlation of the seismic microtremors", *J. Geophys. Res.* 110
- Chavez-Garcia, Fr., M Rodríguez and W. R. Stephenson (2006). "Subsoil Structure Using SPAC Measurements along a Line". *Bulletin of the Seismological Society of America*; April 2006; v. 96; no. 2; p. 729-736
- Chavez-Garcia Fr., F. Luzón, D. Raptakis and J. Fernandez (2007). "Shear-wave Velocity Structure around Teide Volcano: Results Using Microtremors with the SPAC Method and Implications for Interpretation of Geodetic Results", *Pure appl. geophys.* 164 (2007) 697–720
- Chouet, B. G. Luca, G. Milana, P. Dawson, M Martini and R. Scarpa (1998). "Shallow Velocity Structure of Stromboli Volcano, Italy, Derived from Small-Aperture Array Measurements of Strombolian Tremor", *Bull. Seism Soc. Am* Vol. 88, No 3, pp. 653-666.
- Cox, H. (1973). "Spatial correlation In arbitrary noise fields with application to ambient sea noise". *J. Acoust. Soc. Am*, 54, 1289-1301.
- Kanno, T., Kudo K, M Takahashi, T. Sasatani, S. Ling and H. Okada (2000). "Spatial evaluation of site effects in Ashigara valley based on S-wave velocity structure determined by array observations of microtremors". *Proc. of 12WCEE 2000*, pp. 572-580.
- Kudo, K., T. Kanno, H. Okada, O. Ozel, M Erdil, T. Sasatani, S. Higashi, M Takahashi and K. Yoshida (2002). "Site specific issues for strong ground motions during the Kocaeli, Turkey Earthquake of August 17, 1999, as inferred from array observations of microtremors and aftershocks", *Bull. Seis. Soc. Am*, Vol. 92, pp. 448-465.
- Malagnini L., A. Rovelli, E. Hough, L. Seeber (1993). "Site amplification estimates in the Gariliano valley, central Italy, based on dense array measurements of ambient noise, 1993. *B.S.S.A.* vol 83, No 6, 1744-1755
- Μανάκου Μ., (2007), "Συμβολή στον προσδιορισμό τρισδιάστατου εδαφικού προσομοιώματος για τη μελέτη σεισμικής απόκρισης: Εφαρμογή στην ιζηματογενή Μυγδονία λεκάνη". *Διδακτορική Διατριβή*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Α.Π.Θ.
- Μανάκου Μ, Π. Αποστολίδης, Δ. Ραπτάκης, Κ. Πιτιλάκης (2008). "Προσδιορισμός της εδαφικής δομής σε περιοχές του ευρύτερου Πολεοδομικού Συγκροτήματος Θεσσαλονίκης". *3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας*, 5–7 Νοεμβρίου, 2008, Άρθρο 1978.
- Henstridge, J. D. (1979). A signal processing method for circular arrays, *Geophysics* 44, 179-184.
- Goldstein, P., D. Dodge, M Firpo, and R. Stan (1998). "Electronic Seismologist: What's new in SAC2000? Enhanced processing and database access", *Seismol. Res. Lett.*, 69, 202-205.
- Herrmann, R. (1985). "Computer programs in seismology", vol. III., Saint Louis University.
- Herrmann, R. (1996). "Computer programs in seismology", version 3, Saint Louis University.
- Hough S., L. Seeber, A. Rovelli, L. Malagnini, A. DeCesare, G. Selveggi and A. Lerner-Lam (1992). "Ambient noise and weak motion excitation of sediments resonances: results

- from tiber valley, Italy”, *B.S.S.A. vol 82, No 3, 1186-1205*
- Okada, H., T. Matsushima, T. Moriya, and T. Sasasatani (1990). “An exploration technique using long-period microtremors for determination of deep geological structures under urbanized areas (in Japanese)”, *Butsuri-Tansa* 43, 402-417.
- Okada, H. (1997). “A new method of underground structure estimation Using Microtremors”, Division of Earth Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, Japan, Lecture notes.
- Pitilakis, K., Anastasiadis, A., and Raptakis D. (1992). “Field and Laboratory Determination of Dynamic Properties of Natural Soil Deposits”, Proc. of the 10th WCEE, Madrid, Vol.5, pp.1275-1280.
- Raptakis D., Anastasiadis A., Pitilakis K. and Lontzetidis, K. (1994a). “Shear wave velocities and damping of Greek natural soils”. *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna, Austria, Vol. 1, 477-482.
- Raptakis D., Karaolani E., Pitilakis K. and Theodulidis, N. (1994b). “Horizontal to vertical spectral ratio and site effects: The case of a downhole array in Thessaloniki (Greece)”, *Proc. of XXIV Gen. Ass, ESC, Athens, III*, 1570-1578.
- Ραππάκης Δ., (1995), “Συμβολή στον προσδιορισμό της γεωμετρίας και των δυναμικών ιδιοτήτων των εδαφικών σχηματισμών και στη σεισμική απόκρισή τους“. *Διδακτορική Διατριβή*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ.
- Raptakis, D., Lontzetidis, K. and Pitilakis, K. (1996). "Surface Waves Inversion Method: A Reliable Method for the In Situ Measurements of Shear Wave Velocity". *Proc. 4eme Colloque Nationale de Genie Parasismique et Aspects Vibratoires dans le Genie Civil*, A.F.P.S, Paris, France, Avril 1996, Vol. I, 160-169,
- Raptakis, D., Anastasiadis, A., and Pitilakis, K. (1998). “Preliminary Instrumental and Theoretical Approach of Site Effects in Thessaloniki”, *XI ECEE*, Paris, 11p.
- Raptakis and Makra (1998). "P.P. Plant - Hel. Pe. Thessaloniki - Greece. Soil Investigation and Topographic Survey. Downhole Geophysical Measurements". (*E.K.O - GEOGNOSIS S.A*), *Νοέμβριος 1998*, Technical Report
- Ραππάκης, Δ. (2001). "Η Ταχύτητα Vs και η Επιρροή της στη Σεισμική Απόκριση." *Πρακτικά 2^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας*, σελ. 75-86, *Θεσσαλονίκη, 28-30 Νοέμβριος 2001*.
- Ραππάκης, Δ. & Μάκρα, Κ. (2001). "Η Εξασθένηση των S Κυμάτων και η Επιρροή της στη Σεισμική Απόκριση." *Πρακτικά 2^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας*, σελ. 87-96, *Θεσσαλονίκη, 28-30 Νοέμβριος 2001*.
- Satoh T., Kawase H., Iwata T., Higashi S., Sato T., Huang H-C. (2004). “S-wave velocity structures of sediments estimated from array microtremor records and site responses in the near-fault region of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake“. *Journal of Seismology*, 8, pp. 545–558.
- Tarantola, A., and B. Valette (1982). “Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion”, *Rev. Geophys. Space Phys.* 20, 219 –232.