

# Εκτίμηση των ταχυτήτων $V_s$ και της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών από καταγραφές σε κατακόρυφο δίκτυο επιταχυνσιογράφων

Estimation of the  $V_s$  profile and site effects using records from a downhole accelerometer array

ΚΤΕΝΙΔΟΥ, Ο.-Τ.  
CHÁVEZ-GARCÍA, F.J.  
ΡΑΠΤΑΚΗΣ, Δ.  
ΔΙΑΓΟΥΡΤΑΣ, Δ.  
ΠΙΤΙΛΑΚΗΣ, Κ.

Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφια Δρ, Α.Π.Θ.  
Γεωφυσικός Μηχανικός, Καθηγητής, U.N.A.M., Μεξικό  
Φυσικός, Επίκουρος Καθηγητής Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.  
Γεωλόγος, Υποψήφιος Δρ, Ε.Κ.Π.Α.  
Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Α.Π.Θ.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Συσχετίσθηκαν καταγραφές σεισμών σε διάφορα βάθη κατακορύφου δικτύου επιταχυνσιογράφων σε συνάρτηση με το χρόνο. Συγκρίνοντας τη χρονική υστέρηση μεταξύ των σταθμών με το χρόνο άφιξης βάσει γνωστού προσμοιώματος, συμπεραίνεται το είδος των κυμάτων που επικρατεί στο κυματικό πεδίο. Κοντά στη συχνότητα συντονισμού παρατηρούνται στα σήματα επιφανειακά κύματα που δεν εμφανίζονται στο σταθμό στο βράχο και που μπορεί να γεννώνται στις πλευρικές ασυνέχειες και να ενισχύουν το μονοδιάστατο συντονισμό. Η διαδικασία έγινε και για συνεχή καταγραφή υπόγειου θορύβου με διάφορες χρονικές διάρκειες. Τέλος, τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των ταχυτήτων  $V_s$  με το βάθος και για σύγκριση με τις γνωστές τιμές από προηγούμενες μελέτες.

**ABSTRACT:** We cross-correlate earthquake records from various depths of a vertical accelerometric array in the time domain. We compare the time lag between stations with the S-wave arrival time calculated based on the known soil model and conclude as to the type of waves dominating the wave field. Near the resonant frequency we observe surface waves throughout the records, which are not present at depth. These may be locally generated at the lateral discontinuities and further amplify the one-dimensional resonance. The process is repeated for a continuous recording of noise with varying durations. Finally, the results of the cross-correlations are used to make a new estimate of the site's  $V_s$  profile and compare it to the known one from previous surveys.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό πως οι τοπικές εδαφικές συνθήκες επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της ισχυρής εδαφικής κίνησης και η επιρροή τους σχετίζεται με το πάχος και την εμπέδηση των αποθέσεων με το υπόβαθρο, με την επιφανειακή τοπογραφία και με την ύπαρξη πλευρικών ασυνεχειών. Ένας συνήθης τρόπος εμπειρικής μελέτης της επιρροής τους είναι η χρήση καταγραφών από την περιοχή μελέτης.

Στο παρόν άρθρο μελετάται η περιοχή του Αιγίου μέσω της συσχέτισης στο πεδίο του χρόνου καταγραφών σεισμών και θορύβου σε διάφορα βάθη. Αρχικά προσδιορίζεται το κυματικό πεδίο, κάτι που μπορεί να συνεισφέρει στην κατανόηση της επίδρασης

των τοπικών εδαφικών συνθηκών (Ktenidou, 2010). Κατόπιν τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται, μαζί με τη γνώση της στρωματογραφίας, για την επανεκτίμηση της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων  $V_s$  και για σύγκριση με προηγούμενες μελέτες.

## 2. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή του Αιγίου, νότια του Κορινθιακού Κόλπου, έχει υποστεί ισχυρούς σεισμούς, με πιο πρόσφατο αυτόν του 1995 ( $M_w$  6.2). Η περιοχή χαρακτηρίζεται από εφελκυστικά ρήγματα, ένα από τα οποία διαπερνά το Αίγιο και χωρίζει την πόλη σε δύο επίπεδα, το βόρειο στη στάθμη της θάλασσας και το νότιο με υψόμετρο περίπου 70-100 m. Στην περιοχή

έχουν πραγματοποιηθεί γεωτρήσεις, επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές, καθώς και γεωφυσικές διασκοπήσεις με μετρήσεις μικροθορύβου προκειμένου να εξακριβωθεί ικανοποιητικά η γεωλογική δομή και οι εδαφικές ιδιότητες. Το πιο πρόσφατο γεωτεχνικό προσομοίωμα για την περιοχή (Σχ. 1) δόθηκε από τους Apostolidis et. al. (2006).

Το πειραματικό πεδίο CORSSA (Corinth Soft Soil Array - <http://geo.civil.auth.gr/Staff/dep/pitilakis/CORSSA/>) αποτελεί ένα πεδίο δοκίμων που λειτουργεί από το 2002 στο βόρειο τμήμα της πόλης, κατάντη του ρήγματος. Στο σημείο αυτό η γεωλογία και οι εδαφικές ιδιότητες είναι γνωστές σε ικανοποιητικό βαθμό. Το εδαφικό προσομοίωμα αποτελείται από 155 m αποθέσεων επί στρώσης σκληρού κροκαλοπαγούς. Το κατακόρυφο δίκτυο αποτελείται από 5 επιταχυνσιογράφους σε βάθη 0, 14, 31, 57 και 178 m, όπως φαίνεται στο Σχ. 1. Ο τελευταίος βρίσκεται μέσα στο σχηματισμό του κροκαλοπαγούς.

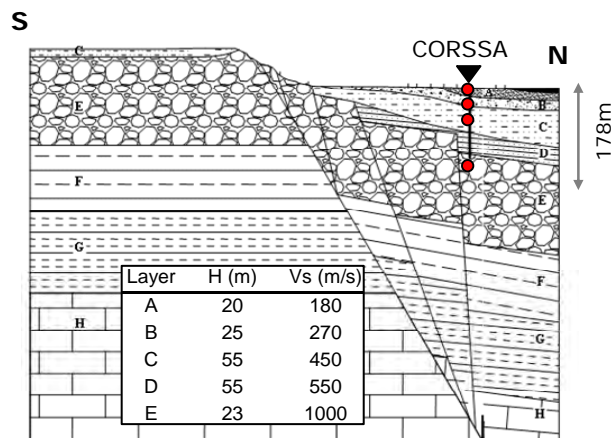
### 3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Για το σκοπό του παρόντος επιλέχθηκαν από σύνολο πολλών καταγραφών τέσσερις που καταγράφηκαν σε όλα τα όργανα του κατακόρυφου δικτύου, με διαφορετικά μεταξύ τους χαρακτηριστικά ως προς το συχνοτικό περιεχόμενο, την επικεντρική απόσταση και τη διάρκεια (Σχ. 2, Πίν. 1). Χρησιμοποιήθηκε επίσης συνεχής καταγραφή μικροθορύβου διάρκειας μισής ώρας. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε και το διάρκειας 10 s μέρος των δύο σεισμικών καταγραφών που αντιστοιχεί σε προσεισμικό θόρυβο πριν την πρώτη άφιξη των σεισμικών κυμάτων.

Όλες οι καταγραφές διορθώθηκαν ως προς τη γραμμή αναφοράς. Οι οριζόντιες συνιστώσες στράφηκαν σε σχέση με τη γεωμετρία της περιοχής, κάθετα και παράλληλα προς το πρανές (ακτινική και εγκάρσια συνιστώσα), η διεύθυνση του οποίου είναι η ίδια με αυτήν του άκρου της λεκάνης ιζημάτων που σχηματίζεται στα κατάντη του πρανούς (Σχ. 1). Οι καταγραφές εκφράζουν πολύ ασθενή εδαφική κίνηση (<0.01g) στην περιοχή της ελαστικότητας.

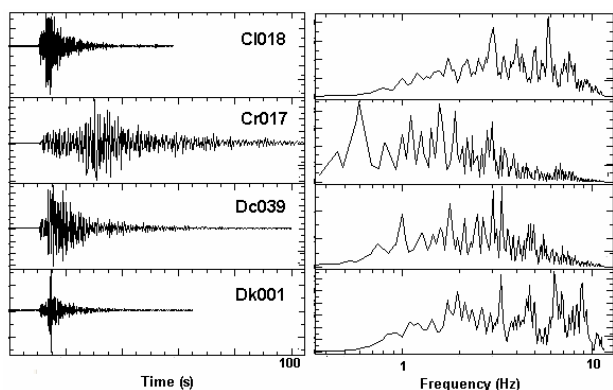
Πίνακας 1. Παράμετροι σεισμών (NOA, 2008)  
Table 1. Earthquake parameters

Code	Date	Time	N (°)	E (°)	ML	Re (km)
Cl018	18/6/02	22:21	38.37	22.10	3.1	15
Cr017	2/12/02	04:58	37.80	21.15	5.3	110
Dc039	18/11/03	18:32	38.41	22.00	4.1	21
Dk001	24/5/04	00:03	38.35	22.24	3.5	20



Σχήμα 1. Εδαφική τομή στο Αίγιο που τέμνει το πρανές (Apostolidis et al., 2006).

Figure 1. Geotechnical cross-section of Aegion that crosses the fault (Apostolidis et al., 2006).



Σχήμα 2. Χρονοϊστορίες και φάσματα Fourier για τους 4 σεισμούς στον επιφανειακό σταθμό.

Figure 2. Time-histories and Fourier spectra at the surface station for the 4 events studied (0.1-10 Hz).

### 4. ΜΕΘΟΔΟΣ

#### 4.1 Θεωρητική βάση

Η ανάλυση βασίζεται στην ιδέα πως όταν το προσπίπτον κυματικό πεδίο αποτελείται κυρίως από κύματα χώρου (S), τότε η διάδοση των σεισμικών κυμάτων γίνεται περίπου κατακόρυφα. Στην περίπτωση ενός κατακόρυφου δικτύου υπάρχει χρονική υστέρηση στην άφιξη των κυμάτων από τον βαθύτερο στον ανώτερο σταθμό, η οποία εξαρτάται από τη μεταξύ τους απόσταση και ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων. Αντίθετα, εάν το κυματικό πεδίο αποτελείται κυρίως από επιφανειακά κύματα, τότε η διάδοσή τους γίνεται κατά την οριζόντια διεύθυνση και επομένως η άφιξη των κυμάτων στους σταθμούς του κατακόρυφου δικτύου γίνεται ταυτόχρονα. Έτσι, εάν συσχετισθεί η επιφανειακότερη καταγραφή ως προς τη βαθύτερη στο πεδίο του χρόνου, στην πρώτη περίπτωση η

μέγιστη συσχέτιση θα παρατηρηθεί για τιμή της χρονικής υστέρησης ίση με  $t=H/V_s$  (όπου  $H$  η κατακόρυφη απόσταση και  $V_s$  η ταχύτητα των κυμάτων  $S$ ), ενώ στη δεύτερη περίπτωση θα παρατηρηθεί για μηδενική χρονική υστέρηση.

#### 4.2 Εφαρμογή

Εν προκειμένω, η συσχέτιση γίνεται για όλους τους σταθμούς ως προς τον επιφανειακό και ως προς το βαθύτερο σταθμό. Θεωρώντας γνωστά τα πάχη των επιμέρους στρώσεων και τις ταχύτητες  $V_s$  αυτών (Σχ. 1), μπορούμε να υπολογίσουμε τη «θεωρητική» χρονική υστέρηση μεταξύ των σταθμών βάσει του προσομοιώματος. Συγκρίνουμε την τιμή της υστέρησης με την τιμή για την οποία παρατηρείται η μέγιστη συσχέτιση, δηλαδή η αιχμή στο διάγραμμα, και συμπεραίνουμε ποιο είδος κυμάτων επικρατεί στο κυματικό πεδίο. Γνωρίζοντας το εδαφικό προσομοίωμα, ελέγχουμε όχι μόνο την υστέρηση που αντιστοιχεί στην πρώτη άφιξη των κυμάτων  $S$ , αλλά και αυτή που αντιστοιχεί σε ενδεχόμενες ανακλάσεις τους από την παγίδευσή τους στις αποθέσεις.

Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται για κάθε μία από τις 4 καταγραφές σε όλη τη διάρκεια της για χρονικά παράθυρα διάρκειας 5 s με επικάλυψη 1 s, μέσω του κώδικα SAC2008 (<http://www.iris.edu/software/sac>). Η διάρκεια των παραθύρων επιλέχθηκε κατόπιν δοκιμών για ευκρινέστερα αποτελέσματα. Παράγονται έτσι «κινούμενα» γραφήματα συσχέτισης καθ' όλο το μήκος της καταγραφής. Στην περίπτωση της καταγραφής μικροθορύβου και προσεισμικού θορύβου, η διαίρεση σε παράθυρα δεν έχει φυσική σημασία, εφ' όσον δεν αναμένονται διαφορετικά είδη κυμάτων σε κάθε μέρος της (τυχαίας ως προς το χρόνο και το χώρο) καταγραφής, και γίνεται μόνο για στατιστικούς λόγους υπολογισμού του μέσου όρου.

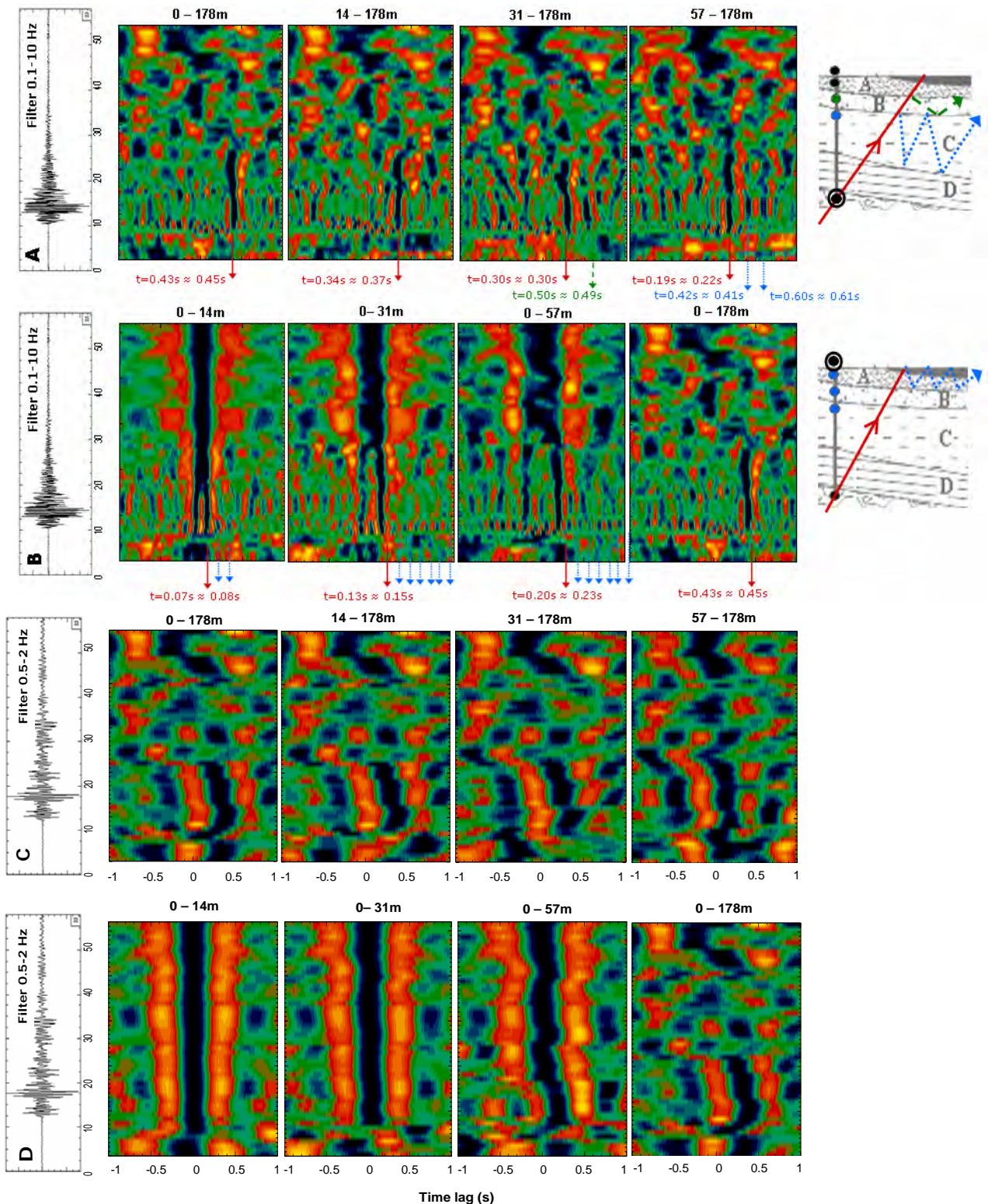
Προκειμένου να μελετηθεί η σχέση της συχνότητας με το είδος του επικρατούντος κυματικού πεδίου, η συσχέτιση εφαρμόζεται δύο φορές σε κάθε ζεύγος καταγραφών. Στις καταγραφές επιβάλλεται πρώτα «ευρύ» φίλτρο που καλύπτει το συχνοτικό φάσμα που ενδιαφέρει σε εφαρμογές τεχνικής σεισμολογίας (0.1-10 Hz), και έπειτα «στενό» φίλτρο στην περιοχή της θεμελιώδους συχνότητας συντονισμού της εδαφικής στήλης (0.5-2 Hz), η οποία έχει υπολογισθεί ήδη μέσω φασματικών λόγων στα 0.9 Hz (Ktenidou et al., 2009).

#### 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ

Στο παρόν παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα για την καταγραφή CI018 μόνο, η οπτικοποίηση των οποίων έγινε με τον κώδικα PV-WAVE (Visual Numerics). Στο Σχ. 3a φαίνεται η συσχέτιση των καταγραφών όλων των σταθμών ως προς τον βαθύτερο στο κροκαλοπαγές στα 178 m, για την ακτινική συνιστώσα (φίλτρο 0.1-10 Hz). Για το μέρος των σημάτων που αντιστοιχεί στην ισχυρή κίνηση, (περίπου 10-23 s), βρέθηκε για όλους τους σταθμούς συμφωνία μεταξύ των χρόνων όπου παρατηρούνται τα μέγιστα και των χρόνων άφιξης των κυμάτων, όπως υπολογίζονται βάσει του προσομοιώματος  $V_s$ . Επιπλέον, στους σταθμούς σε βάθη 31 και 57 m διακρίνονται στην αρχή των σημάτων αφίξεις που αντιστοιχούν στις πρώτες ανακλάσεις παγιδευμένων κυμάτων στις αντίστοιχες στρώσεις (B και C αντίστοιχα). Μετά τα 25 s, δεν εμφανίζονται συστηματικά μέγιστα για υστέρηση μηδενική, που να αντιστοιχούν δηλαδή σε επιφανειακά κύματα. Αυτό δείχνει πως στο βράχο δεν παρατηρούνται έντονα επιφανειακά κύματα.

Στο Σχ. 3b παρουσιάζονται αντίστοιχα οι συσχέτισεις για όλα τα βάθη ως προς την επιφάνεια. Για το αρχικό μέρος των σημάτων, (περίπου 10-14 s), παρουσιάζονται σε όλα τα βάθη, μέγιστα στους χρόνους άφιξης των κυμάτων  $S$ . Επιπλέον, σε όλα τα βάθη πλην των 178 m, παρατηρούνται ανακλάσεις κυμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια (παγίδευση στη στρώση A). Μετά τις πρώτες αφίξεις, εμφανίζονται μέγιστα με μηδενική υστέρηση, που σημαίνει πως από αυτό το μέρος των σημάτων και έπειτα επικρατούν τα επιφανειακά κύματα. Αυτό δείχνει πως στις επιφανειακές στρώσεις τα κύματα επιφανείας είναι εντονότερα από ότι σε μεγαλύτερα βάθη. Η παρουσία κυμάτων επιφανείας στα επιφανειακά στρώματα που δεν εμφανίζονται στο βράχο σημαίνει πως αυτά γεννώνται τοπικά στις πλευρικές ασυνέχειες και στα όρια της λεκάνης και διαδίδονται πλευρικά προς το εσωτερικό της λεκάνης του Κορινθιακού.

Τα Σχ. 3c και 3d είναι ανάλογα με τα Σχ. 3a και 3b, με μόνη διαφορά την επιβολή φίλτρου περί τη θεμελιώδη συχνότητα (0.5-2 Hz). Στις συσχέτισεις ως προς τα 178 m (Σχ. 3c) παρατηρούνται και πάλι στα πρώτα δευτερόλεπτα των σημάτων για όλους τους σταθμούς οι πρώτες αφίξεις των κυμάτων χώρου ( $S$ ) κοντά στους αναμενόμενους χρόνους. Στις συσχέτισεις με την επιφάνεια (Σχ. 3d) δεν διακρίνονται τα κύματα  $S$ , και τα επιφανειακά κύματα κυριαρχούν σχεδόν σε όλη τη διάρκεια



Σχήμα 3. α. Συσχέτιση για τα βάθη 0, 14, 31 και 57m ως προς τα 178m (φίλτρο 0.1-10Hz). β. Συσχέτιση για τα βάθη 14, 31, 57 και 178m ως προς τα 0m (φίλτρο 0.1-10Hz). γ. Συσχέτιση για τα βάθη 0, 14, 31 και 57m ως προς τα 178m (φίλτρο 0.5-2Hz). δ. Συσχέτιση για τα βάθη 14, 31, 57 και 178m ως προς τα 0m (φίλτρο 0.5-2Hz). Η συσχέτιση παρουσιάζεται για χρονική υστέρηση -1 έως 1s (οριζόντιος άξονας) κατά μήκος της καταγραφής (κατακόρυφος άξονας, όπου ενδεικτικά παρουσιάζεται ιστορία στην επιφάνεια).  
 Figure 3. a. Cross-correlations for depths 0, 14, 31 and 57m with respect to 178m (filter 0.1-10Hz). b. Cross-correlations for depths 14, 31, 57 and 178m with respect to 0m (filter 0.1-10Hz). c. Cross-correlations for depths 0, 14, 31 and 57m with respect to 178m (filter 0.5-2Hz). d. Cross-correlations for depths 14, 31, 57 and 178m with respect to 0m (filter 0.5-2Hz). The correlation is plotted for time lags from -1 to 1 s (horizontal axis) along the duration of the record (vertical axis, where an indicative surface time-history is shown).

των σημάτων σε όλους τους σταθμούς πλην του βαθύτερου. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί ως έντονη παρουσία τοπικά παραγόμενων επιφανειακών κυμάτων κοντά στη θεμελιώδη συχνότητα. Άρα τα κύματα αυτά ενισχύουν ακόμη περισσότερο την εδαφική ενίσχυση στη συχνότητα του μονοδιάστατου συντονισμού. Ωστόσο στο πεδίο του χρόνου δεν είναι διακριτά διότι υπάρχουν σχεδόν σε όλη τη διάρκεια των σημάτων και όχι μόνον στην ουρά. Παρόμοιες παρατηρήσεις σχετικά με δισδιάστατα φαινόμενα που ενισχύουν περαιτέρω το μονοδιάστατο συντονισμό έχουν γίνει μεταξύ άλλων από τους Raptakis et al. (2000).

Σχετικά με την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της ανάλυσης θα πρέπει να τονισθεί πως η επιβολή φίλτρου επηρεάζει την ακρίβεια των δεδομένων. Η αρχική χρονοσειρά έχει βήμα 0.005 s, το οποίο αντιστοιχεί σε συχνότητα Nyquist 100 Hz. Όταν επιβάλλεται φίλτρο 0.1-10 Hz, τότε η ακρίβεια μειώνεται ως προς την αρχική και το νέο βήμα είναι ίσο με  $\Delta t = 1/2f = 0.05$  s. Επομένως για τα αποτελέσματα με ευρύ φίλτρο, οποιαδήποτε διαφορά μεταξύ τιμών χρόνου υστέρησης μικρότερη από 0.05 s δεν είναι υποχρεωτικά πραγματική, αφού εμπίπτει στο εύρος αυτό της ακρίβειας. Όταν δε επιβάλλεται το στενότερο φίλτρο 0.5-2 Hz, από τα σήματα αφαιρούνται όλες οι υψηλές συχνότητες και η ακρίβεια μειώνεται ακόμη περισσότερο, με το νέο βήμα να γίνεται ίσο με  $\Delta t = 0.25$  s. Αυτό εξηγεί το αντίστοιχο μεγάλο πλάτος των αιχμών στα Σχ. 3c και 3d σε σχέση με τις στενότερες και πιο ευδιάκριτες αιχμές στα Σχ. 3a και 3b.

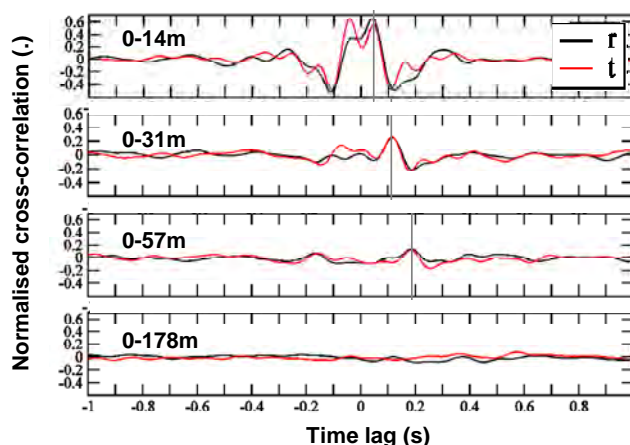
Για τις καταγραφές Dc039 και Dk001 τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με τα παραπάνω. Για την μεγαλύτερης επικεντρικής απόστασης χαμηλόσυχη καταγραφή (Cr017), τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν είναι παρόμοια με αυτά που προέκυψαν από την ανάλυση της κοντινής και υψίσυχνης καταγραφής (Cl018), με τη διαφορά πως τα πρώτα 10-15 s όπου κυριαρχούν τα κύματα S αποτελούν ένα πολύ μικρό παράθυρο της συνολικής διάρκειας του σήματος σε σχέση με τα υπόλοιπα 160 s όπου κυριαρχούν τα επιφανειακά. Επίσης στη μακρινή καταγραφή δεν είναι τόσο ευδιάκριτες οι ανακλάσεις των κυμάτων χώρου, κάτι που μπορεί να οφείλεται στο ότι τα προσπίπτοντα κύματα συναντούν στη μεγαλύτερη διαδρομή τους περισσότερες διεπιφάνειες όπου γεννώνται νέα κύματα χώρου και επιφανείας, τα οποία δε διακρίνονται εύκολα μεταξύ τους, αλλά και στην

αναντιστοιχία μήκους κύματος και πάχους των αποθέσεων.

## 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΘΟΡΥΒΟΥ

### 6.1 Συνεχής καταγραφή θορύβου

Η ίδια μέθοδος εφαρμόστηκε σε καταγραφή μικροθορύβου για να διερευνηθεί εάν μπορούν να εξαχθούν παρόμοια αποτελέσματα. Σε αυτήν την περίπτωση, ένα κατακόρυφο δίκτυο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον ίδιο σκοπό σε συνδυασμό με σεισμικές καταγραφές ή, εν ανάγκη, και απουσία αυτών.



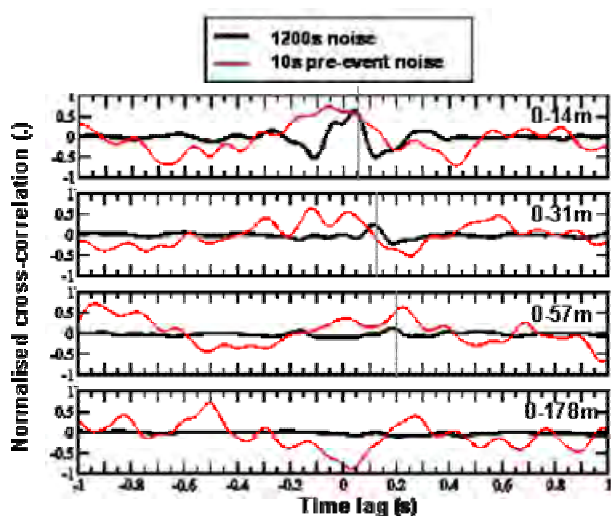
Σχήμα 4. Κανονικοποιημένες συσχετίσεις συνεχούς καταγραφής μικροθορύβου ως προς την επιφάνεια. Figure 4. Normalised cross-correlations with respect to the surface for the continuous noise recording.

Από τη συνεχή καταγραφή μικροθορύβου διάρκειας 1500 s που λήφθηκε αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν 1200 s κατάλληλου σήματος. Η συσχέτιση έγινε για παράθυρα διάρκειας 5 s με επικάλυψη 4 s. Τα αποτελέσματα κανονικοποιήθηκαν ώστε η μέγιστη συσχέτιση ανά παράθυρο να ισούται με 1 και έπειτα υπολογίστηκε ο μέσος όρος όλων των παραθύρων. Σε σχέση με το βράχο δε βρέθηκε ουσιαστική συσχέτιση σε κανένα βάθος. Στο Σχ. 4 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες ως προς τη μονάδα συσχετίσεις σε σχέση με την επιφάνεια για τις οριζόντιες συνιστώσες r και t (ακτινική και εγκάρσια). Για τα βάθη 14, 31 και 57 m σημειώνονται οι χρόνοι της πρώτης άφιξης όπως υπολογίσθηκαν από το προσομοίωμα (0.08, 0.15 και 0.23 s όπως φαίνονται και στο Σχ. 3b) και παρατηρείται πως κοντά στους χρόνους αυτούς η συσχέτιση μεγιστοποιείται, ενώ δεν παρατηρείται

συσχέτιση μεταξύ επιφάνειας και βράχου για τον αναμενόμενο χρόνο 0.45 s.

## 6.2 Προσεισμικός θόρυβος

Δεδομένων των αποτελεσμάτων της προηγούμενης παραγράφου, η διαδικασία της συσχέτισης εφαρμόστηκε επίσης στο διάστημα 10 s μέρος των σεισμικών καταγραφών που προηγείται της άφιξης των πρώτων P κυμάτων. Αυτό έγινε για να διερευνηθεί εάν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ο προσεισμικός θόρυβος από καταγραφές σεισμών στο δίκτυο αντί για τη συνεχή καταγραφή θορύβου που έγινε επί τούτου και απαιτήσε επίσκεψη στο πεδίο για τη συλλογή των δεδομένων. Στο Σχ. 5 συγκρίνεται για την ακτινική συνιστώσα της κίνησης η συσχέτιση ως προς την επιφάνεια για τη συνεχή καταγραφή θορύβου και για τον προσεισμικό θόρυβο. Είναι εμφανές πως η μορφή του γραφήματος της συσχέτισης για τα 10 s είναι μάλλον τυχαία και άρα ο προσεισμικός θόρυβος δεν αρκεί για την αναγνώριση των χρόνων της πρώτης άφιξης των S κυμάτων.



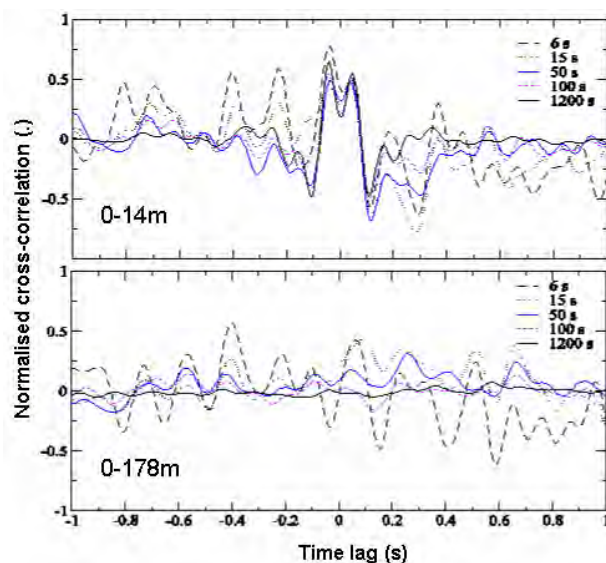
Σχήμα 5. Κανονικοποιημένες συσχετίσεις ως προς την επιφάνεια συνεχούς καταγραφής θορύβου και προσεισμικού θορύβου.

Figure 5. Normalised cross-correlations with respect to the surface for continuous noise recording and for pre-event noise.

## 6.3 Έλεγχος αξιοπιστίας συσχέτισης

Δεδομένων των σημαντικών διαφορών που παρατηρήθηκαν στις συσχετίσεις από συνεχή καταγραφή και προσεισμικό θόρυβο (Σχ. 5), διερευνάται παραμετρικά η ελάχιστη διάρκεια συνεχούς μέτρησης που απαιτείται ώστε να επιτευχθεί το αποτέλεσμα του Σχ. 4. Αντί για την αρχική συνεχή καταγραφή (διάρκειας 1200 s) χρησιμοποιούνται παράθυρα με μικρότερες

διάρκειες (200, 100, 50, 25, 15 και 6 s). Η συσχέτιση ως προς την επιφάνεια γίνεται όπως και προηγουμένως για παράθυρα διάρκειας 5 s με επικάλυψη 4 s. Τα επιμέρους αποτελέσματα κανονικοποιούνται με μέγιστο πλάτος τη μονάδα και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους. Η διαδικασία είναι ίδια για τις δύο οριζόντιες συνιστώσες. Στο Σχ. 6 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα για τα βάθη 14 και 178 m, για την εγκάρσια συνιστώσα. Η επιζητούμενη μορφή της συσχέτισης είναι μια σαφής αιχμή με σημαντικό πλάτος για τον αναμενόμενο χρόνο άφιξης και σχεδόν μηδενικό για τους υπόλοιπους χρόνους.



Σχήμα 6. Κανονικοποιημένες συσχετίσεις ως προς την επιφάνεια για συνεχή καταγραφή μικροθορύβου διάρκειας 6, 15, 25, 50, 100, 200 και 1200 s.

Figure 6. Normalised cross-correlations with respect to the surface for continuous noise recording with duration of 6, 15, 25, 50, 100, 200, and 1200 s.

Στο Σχ. 4 η αιχμή συσχέτισης στο χρόνο άφιξης είναι πιο ευδιάκριτη στα 14 m σε σχέση με μεγαλύτερα βάθη. Στο Σχ. 6 καθώς μειώνεται η διάρκεια του σήματος, έως τα 50-100 s περίπου η αιχμή αυτή παραμένει ευδιάκριτη, ενώ για μικρότερες διάρκειες οι αιχμές πληθαίνουν χωρίς να αντιστοιχούν πλέον σε απευθείας αφίξεις ή ανακλάσεις που να εξηγούνται με το γνωστό προσομοίωμα και να συμφωνούν με τις τιμές του Σχ. 3b. Από την άλλη πλευρά, στα 178 m, όπου δεν αναμένεται συσχέτιση με την επιφάνεια, καθώς η διάρκεια του αναλυόμενου σήματος μικραίνει εμφανίζονται αιχμές που δεν αντιστοιχούν σε κάποια άφιξη ή ανάκλαση κύματος. Για διάρκειες καταγραφής θορύβου μικρότερες από 50 s, η

μορφή και οι συσχετίσεις δεν είναι αξιόπιστες. Συμπεραίνεται πως η μικρότερη διάρκεια καταγραφής θορύβου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα είναι τουλάχιστον 100 s.

## 7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ $V_s$

Στις προηγούμενες παραγράφους οι συσχετίσεις χρησιμοποιήθηκαν για την κατανόηση του κυματικού πεδίου, η οποία μπορεί να συνεισφέρει στη μελέτη της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών, καθώς και για την εκτίμηση του χρόνου άφιξης των κυμάτων S μεταξύ σταθμών. Αυτή η τελευταία μπορεί να συνεισφέρει στον υπολογισμό των φαινόμενων ταχυτήτων  $V_s$  μεταξύ σταθμών, με σκοπό τη σύγκριση με τις ήδη γνωστές τιμές από προηγούμενες μελέτες. Αντιστρέφοντας τη διαδικασία που ακολουθήθηκε ως τώρα, διερευνούμε κατά πόσον οι συσχετίσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της ταχύτητας.

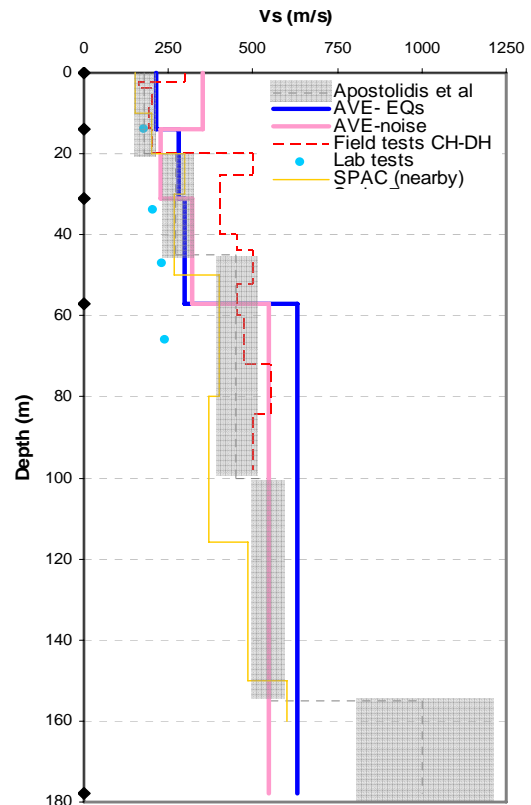
Από τις χρονικές υστερήσεις που υπολογίστηκαν για τις σεισμικές καταγραφές στους διάφορους σταθμούς σε σχέση με την επιφάνεια (0-14, 0-31, 0-57, 0-178), εξάγονται οι αντίστοιχοι μέσοι όροι για τους 4 σεισμούς και για τις 2 οριζόντιες συνιστώσες. Στον Πίν. 2 συγκρίνονται οι μέσοι χρόνοι αυτοί ( $t_{EQ}$ ) με τους αντίστοιχους υπολογισμένους χρόνους άφιξης βάσει του προσομοιώματος ( $t_{MODEL}$ ) καθώς και με τους υπολογισθέντες βάσει του θορύβου ( $t_{NOISE}$ ). Παρατηρείται πως οι μεταξύ τους διαφορές εμπίπτουν στο εύρος της ακρίβειας των 0.05 s που επιφέρει το φίλτρο 0.1-10 Hz, όπως προαναφέρθηκε.

Πίνακας 2. Χρόνοι πρώτων αφίξεων  
Table 2. Estimated first-arrival times

Stations	$t_{EQ}$	$t_{NOISE}$	$t_{MODEL}$
0-14	0.07	0.04	0.08
0-31	0.13	0.11	0.15
0-57	0.21	0.19	0.23
0-178	0.41	0.38	0.45

Με βάση τους υπολογισθέντες χρόνους άφιξης από σταθμό σε σταθμό σε συνδυασμό με τη γνωστή απόσταση μεταξύ σταθμών, υπολογίζεται η φαινόμενη ταχύτητα  $V_{sm}$  μεταξύ των σταθμών (π.χ.  $V_{sm(0-14)}=H/t_{EQ}=14/0.07=200$  m/s). Στον υπολογισμό δε λαμβάνονται μόνον υπ' όψιν οι συσχετίσεις με τα 0 μ αλλά και συσχετίσεις που έγιναν μεταξύ γειτονικών σταθμών (14-31, 31-57, 57-178), ώστε να

βελτιωθεί η τελική εκτίμηση κάνοντας χρήση όλων των διαθέσιμων στοιχείων. Οι φαινόμενες ταχύτητες που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους απεικονίζονται στο Σχ. 7.



Σχήμα 7. Υπολογισθείσες και γνωστές ταχύτητες  $V_s$  από προηγούμενες μελέτες.

Figure 7. Calculated and known  $V_s$  velocities.

Στο ίδιο σχήμα απεικονίζονται επίσης οι θέσεις των οργάνων, καθώς κι οι ταχύτητες  $V_s$  που υπολογίστηκαν από πρότερες εργασίες:

- μέσος όρος και εύρος τιμών του προσομοιώματος (Apostolidis et al., 2006)
- γεωφυσικές διασκοπήσεις πεδίου Cross-hole και Down-hole (Pitilakis et al., 2004)
- εργαστηριακές δοκιμές στήλης συντονισμού (Pitilakis et al., 2004)
- μετρήσεις θορύβου με τη μέθοδο SPAC (Apostolidis et al., 2006).

Οι ταχύτητες που υπολογίζονται από τους σεισμούς είναι πλησιέστερες στις γνωστές κοντά στην επιφάνεια παρά σε βάθος, ενώ το αντίστροφο συμβαίνει για αυτές που υπολογίζονται από το θόρυβο. Ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τους σεισμούς και το θόρυβο περικλείει περίπου τις γνωστές τιμές ως τα 150 m. Η διασπορά των τιμών  $V_s$  από τις διάφορες μεθόδους δεν είναι αμελητέα. Είναι ενδιαφέρον πως η ύπαρξη πλήθους μεθόδων δε μειώνει τελικά την

αβεβαιότητα, όπως διατύπωσε και ο Ραπτάκης (2001).

Τέλος, από τις φαινόμενες ταχύτητες μεταξύ σταθμών είναι δυνατόν -θεωρώντας γνωστά τα πάχη των εδαφικών στρώσεων όπως καθορίστηκαν από τη γεώτρηση και ταξινόμηση κατά USGS- να υπολογισθούν οι ταχύτητες  $V_s$  των εδαφικών στρώσεων (Ktenidou, 2010). Σημειώνεται πως επειδή δεν υπάρχει σταθμός εντός της στρώσης D, για να επιλυθεί μονοσήμαντα το πρόβλημα πρέπει να γίνει κάποια υπόθεση, π.χ. να θεωρηθεί η εμπέδηση μεταξύ των στρώσεων D και E γνωστή από το προσομοίωμα.

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συσχετίζοντας τις σεισμικές καταγραφές ως προς το βαθύτερο σταθμό, και με γνωστό το εδαφικό προσομοίωμα, προκύπτει ανεξαρτήτως φίλτρου πως στο αρχικό μέρος των σημάτων επικτατούν τα κύματα S, ενώ στις καταγραφές δε διακρίνονται επιφανειακά κύματα. Από τη συσχέτιση των καταγραφών ως προς την επιφάνεια (ευρύ φίλτρο 0.1-10 Hz) προκύπτει πως μετά τις πρώτες αφίξεις κυμάτων S, σε όλα τα βάθη πλην των 178 m, επικρατούν τα επιφανειακά κύματα. Η παρουσία στα επιφανειακά εδαφικά στρώματα κυμάτων επιφανείας, που δεν εμφανίζονται στο βράχο, μπορεί να σημαίνει πως αυτά γεννώνται τοπικά στις πλευρικές ασυνέχειες και στα όρια της λεκάνης και διαδίδονται πλευρικά προς τον Κορινθιακό. Από τη συσχέτιση των καταγραφών ως προς την επιφάνεια (στενό φίλτρο 0.5-2 Hz) προκύπτει πως κοντά στη συχνότητα συντονισμού τα επιφανειακά κύματα κυριαρχούν σχεδόν σε όλη τη διάρκεια των σημάτων σε όλα τα βάθη πλην των 178 m. Επομένως τα κύματα αυτά ενισχύουν ακόμη περισσότερο την εδαφική ενίσχυση στη συχνότητα του μονοδιάστατου συντονισμού, ενώ στο πεδίο του χρόνου δεν είναι διακριτά διότι υπάρχουν σχεδόν σε όλη τη διάρκεια των σημάτων και όχι μόνο στην ουρά.

Για το ευρύ φίλτρο εξετάστηκαν επίσης οι συσχετίσεις καταγραφών θορύβου ως προς την επιφάνεια. Τα αποτελέσματα ως προς τους χρόνους άφιξης των κυμάτων S είναι σε όλα τα βάθη πλην των 178 m παρόμοια για τη συνεχή καταγραφή θορύβου και για τις σεισμικές καταγραφές και οι διαφορές τους εμπίπτουν στο εύρος της ακρίβειας που επιφέρει το φίλτρο. Η μικρότερη διάρκεια καταγραφής θορύβου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δώσει τα ίδια αποτελέσματα είναι 100 s.

Οι συσχετίσεις χρησιμοποιούνται και για την εκτίμηση της ταχύτητας  $V_s$  της εδαφικής στήλης, θεωρώντας γνωστά τα πάχη των εδαφικών στρώσεων όπως καθορίστηκαν από την υπάρχουσα γεώτρηση. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις επιστημικές αβεβαιότητες που σχετίζονται με την εφαρμογή της κάθε μεθόδου, η σύγκριση με τις γνωστές τιμές από τις προηγούμενες μελέτες είναι αρκετά ικανοποιητική.

## 9. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εγκατάσταση του πεδίου CORSSA χρηματοδοτήθηκε από το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα CORSEIS (EVG1-1999-00002) και η συντήρηση και λειτουργία του συνεχίζονται μέσω της συμφωνίας CORSSA μεταξύ του ΑΠΘ, του ΕΚΠΑ και του IRSN, France.

## 10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Apostolidis P., Raptakis D., Pandi K., Manakou M., Pitilakis K. (2006), "Definition of subsoil structure and preliminary ground response in Aigion city (Greece) using microtremor and earthquakes", *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 26, pp. 922 - 940.
- Ktenidou, O.-J. (2010), "Theoretical and instrumental study of site and topographic effects on strong ground motion in Aegion", Ph.D. Aristotle University Thessaloniki, Greece.
- Ktenidou O.-J., F.J. Chávez-García, D. Raptakis, K. Pitilakis (2009). "Engineering aspects of site and topography effects at Aegion, Greece". 3<sup>rd</sup> Greece-Japan Workshop on Seismic Design, Observation and Retrofit of Foundations, Santorini, Sept. 22-23. National Observatory of Athens, Institute of Geodynamics (NOA). [http://www.gein.noa.gr/services/Noa\\_cat/CAT2003.TXT](http://www.gein.noa.gr/services/Noa_cat/CAT2003.TXT).
- Pitilakis K., Makropoulos K., Bernard P., Lemeille F., Lyon-Caen H., Berge-Thierry C., Tika Th., Manakou M., Diagourtas D., Raptakis D., Kallioglou P., Makra K., Pitilakis D., Bonilla F. (2004). "The Corinth Gulf Soft Soil Array (CORSSA) to study site effects", *C.R. Geoscience* 336, pp. 353-365.
- Raptakis, D., Chávez-García, F.J., Makra, K., Pitilakis, K. (2000) "Site effects at Euroseis-test-I: determination of the valley structure and confrontation of observations with 1D analysis". *Soil Dyn. Earth. Eng.* 19, pp 1-22.
- Ραπτάκης, Δ. (2001) "Η Ταχύτητα  $V_s$  και η Επιρροή της στη Σεισμική Απόκριση". 2<sup>ο</sup> Πανελ. Συν. Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, 28-30 Νοεμ.