

Συγκριτική Αξιολόγηση Μετρήσεων Ταχύτητας Σεισμικών Κυμάτων με Δοκιμές Cross-Hole και Down-Hole

Comparative Evaluation of Cross-Hole and Down-Hole Measurements of Seismic Wave Velocity

ΕΓΓΛΕΖΟΣ, Δ. Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.
ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ, Α. Πολιτικός Μηχανικός, M.Sc., Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.
ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ, Γ. Πολιτικός Μηχανικός, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
ΣΑΜΠΑΤΑΚΑΚΗΣ, Ν. Τεχνικός Γεωλόγος, Δρ., Κ.Ε.Δ.Ε./Υ.Π.Ε.ΧΩ.Δ.Ε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Παρουσιάζεται μια συγκριτική αξιολόγηση μετρήσεων της ταχύτητας διάδοσης σεισμικών κυμάτων από επί τόπου γεωφυσικές δοκιμές Cross-Hole και Down-Hole σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις εδαφικής απόθεσης. Από τη σύγκριση των μετρήσεων συμπεραίνεται ότι η δοκιμή Down-Hole, σε σχέση με τη πλέον αξιόπιστη δοκιμή Cross-Hole, προβλέπει αρκετά ικανοποιητικά την ταχύτητα των κυμάτων S, ενώ παρουσιάζει μεγαλύτερη απόκλιση στην εκτίμηση της ταχύτητας των κυμάτων P.

ABSTRACT: A comparative evaluation of in situ geophysical Cross-Hole and Down-Hole measurements of seismic wave velocities at three different sites is presented. From this comparison of the measurements it is deduced that the Down-Hole test, relative to the reliable Cross-Hole test, predicts well the S wave velocity. On the other hand, the prediction of the P wave velocity exhibits significant scatter.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ακριβής γνώση της επί τόπου ταχύτητας V_S διάδοσης των διαμηκικών κυμάτων S είναι αναγκαία για τη ρεαλιστική εκτίμηση της δυναμικής απόκρισης του εδάφους κατά τη διάρκεια φόρτισης από σεισμό, θαλάσσιους κυματισμούς, θεμελίωση μηχανής και άλλα είδη δυναμικής φόρτισης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων S, συσχετίζεται άμεσα με την επί τόπου τιμή του επαπτομενικού μέτρου διάτμησης G_0 του εδάφους σε μικρές διαμηκικές παραμορφώσεις ($\gamma < 10^{-3}$). Περαιτέρω, μέσω της ταχύτητας V_P διάδοσης των διαμηκικών κυμάτων P μπορεί να εκτιμηθεί και η τιμή του λόγου Poisson ν , ή η τιμή του μέτρου ελαστικότητας (Young) E.

Τα κύματα P και S, καθώς και τα επιφανειακά κύματα Rayleigh και Love, παράγονται και κατά τη διάρκεια σεισμών και συχνά ονομάζονται σεισμικά κύματα. Ο Mooney (1974) δίνει μια συνοπτική εικόνα της μορφής των σεισμικών κυμάτων, του τρόπου

αναγνώρισής τους και των μεθόδων μέτρησης της ταχύτητάς τους επί τόπου. Σήμερα, για την επί τόπου μέτρηση των τιμών των ταχυτήτων των κυμάτων P και S σε μικρές διαμηκικές παραμορφώσεις ($\gamma < 10^{-3}$), υιοθετούνται κυρίως γεωφυσικές μέθοδοι, όπως οι επί τόπου δοκιμές Cross-Hole, Down-Hole, Up-Hole, ή η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης (Seismic Wave Refraction method). Οι Wilson et al. (1978) συνοψίζουν διάφορες γεωφυσικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό.

Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στις δύο πλέον διαδεδομένες γεωφυσικές μεθόδους για τη μέτρηση των ταχυτήτων V_S και V_P : τις δοκιμές Cross-Hole (C-H) και Down-Hole (D-H). Σχετικά, από τη βιβλιογραφία αναφέρονται επιλεκτικά οι δουλειές των Hoag and Stokoe (1978), οι οποίοι παρουσιάζουν αναλυτικά τις δύο αυτές δοκιμές, των Stratton et al. (1978) που προτείνουν μια βελτιωμένη μέθοδο παραγωγής κυμάτων για τη δοκιμή D-H, και των McLamore et al. (1978) που

παρουσιάζουν μια σύγκριση αποτελεσμάτων από δοκιμές C-H οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί εναλλακτικά με κύματα που έχουν παραχθεί από μηχανική κρούση ή από έκρηξη.

Όπως περιγράφεται και πιο λεπτομερώς παρακάτω, η δοκιμή D-H είναι πολύ λιγότερο χρονοβόρος και δαπανηρή από τη δοκιμή C-H, και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά για τη μείωση του κόστους των γεωτεχνικών ερευνών. Αυτό προϋποθέτει βέβαια, ότι δε θα γίνουν σοβαρές παραχωρήσεις στην ακρίβεια των μετρήσεων, σε σχέση πάντα με την πλέον αξιόπιστη δοκιμή C-H. Για να διερευνηθεί αυτό το ανδεχόμενο, παρουσιάζεται μια συγκριτική αξιολόγηση μετρήσεων ταχύτητας σεισμικών κυμάτων από τις δύο αυτές επί τόπου δοκιμές.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΩΝ

2.1 Δοκιμή C-H

Η δοκιμή C-H στηρίζεται στη μέτρηση του χρόνου που απαιτείται για τα κύματα P ή τα κύματα S να διανύσουν μια καθορισμένη απόσταση ανάμεσα σε δύο ή περισσότερα σημεία μιας εδαφικής απόθεσης τα οποία όμως βρίσκονται στο ίδιο βάθος από την οριζόντια επιφάνεια του εδάφους. Τα αποτελέσματα των δοκιμών C-H που χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή προέρχονται από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με την απλουστευμένη μέθοδο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.

Συγκεκριμένα, διανοίγεται αρχικά η γεώτρηση λήψης, η οποία επενδύεται με πλαστικό σωλήνα PVC 6ατμ, και το κενό μεταξύ σωλήνα και εδάφους πληρούται με κατάλληλο ένεμα μπετονίτη. Κατά την εκτέλεση της δοκιμής, διανοίγεται μια δεύτερη γεώτρηση, σε μικρή σχετικά απόσταση, 3-6m αναλόγως του τύπου εδάφους, στην οποία εισάγεται η διάταξη της δοκιμής πρότυπης διεύθυνσης (SPT). Η ενεργοποίηση της διάταξης SPT παράγει σεισμικά κύματα P και S, η άφιξη των οποίων καταγράφεται στη δεύτερη γεώτρηση.

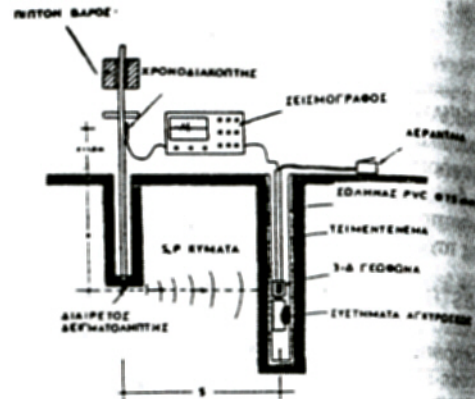
Γενικότερα, τα βασικά στοιχεία που συγκροτούν τον απαραίτητο εξοπλισμό για μια δοκιμή C-H είναι τα ακόλουθα (Σχήμα 1):

- α) μια πηγή παραγωγής σεισμικών κυμάτων, P και S,
- β) δέκτες των κυμάτων P, S με απόκριση στο κατάλληλο πεδίο συχνοτήτων,

γ) ένας παλμογράφος για την καταγραφή της εδαφικής κίνησης στο χρόνο, και τέλος,

δ) ένα σύστημα ενεργοποίησης της καταγραφής (trigger mechanism).

Η χρήση, για λόγους ταχύτητας και οικονομίας, της διάταξης του δειγματοληπτή SPT ως πηγής στη δοκιμή C-H έχει ως μειονέκτημα ότι δεν υπάρχει δυνατότητα παραγωγής κυμάτων με αντίθετη πολικότητα, γεγονός που μειώνει σχετικά την ακρίβεια μέτρησης των χρόνων άφιξης των σεισμικών κυμάτων. Λεπτομερείς οδηγίες για την τυπική εκτέλεση της δοκιμής C-H παρέχονται από Stokoe and Woods (1972), και ASTM (1988).



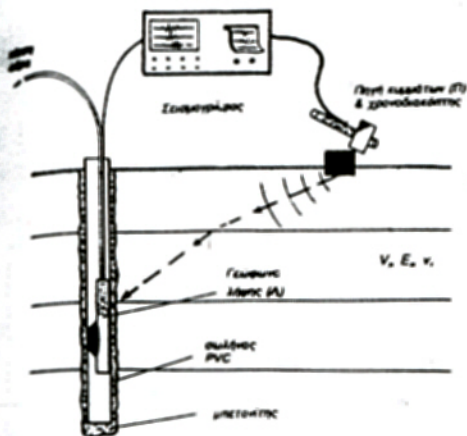
Σχήμα 1: Δοκιμή Cross-Hole
Figure 1: Cross-Hole test

2.2 Δοκιμή D-H

Για τη δοκιμή D-H απαιτείται η διάνοιξη μίας μόνο γεώτρησης, ενώ η παραγωγή των σεισμικών κυμάτων P και S γίνεται από πηγή κατάλληλα εγκατεστημένη στην επιφάνεια του εδάφους (Σχήμα 2).

Για την εκτέλεση της δοκιμής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ίδια μέθοδος καθώς και ο ίδιος εξοπλισμός με τα οποία εκτελείται η δοκιμή C-H, εκτός από την πηγή σεισμικών κυμάτων. Στις δοκιμές που εξετάζουμε, χρησιμοποιήθηκε ως πηγή μια ορθογωνική σιδερένια ράβδος διαστάσεων 100x10x10cm και βάρους περίπου 80Kg, η οποία πακτώθηκε στην επιφάνεια του εδάφους, σε απόσταση 2-5m από τη γεώτρηση και εγκάρσια προς αυτήν. Για διέγερση πλούσια σε S κύματα, η ράβδος κρούεται οριζόντια επί της κατακόρυφης εγκάρσιας διατομής της. Αντίθετα, για διέγερση πλούσια σε P κύματα, η

ράβδος κρούεται κατακόρυφα στο μέσο του μήκους της και επί της άνω οριζόντιας επιφάνειάς της.



Σχήμα 2: Δοκιμή Down-Hole
Figure 2: Down-Hole test

Για την εκτίμηση της τιμής των ταχυτήτων V_p και V_s στο εκάστοτε βάθος, απαιτείται η γνώση της συγκεκριμένης διαδρομής που ακολουθούν τα αντίστοιχα κύματα και οι χρόνοι άφιξής τους. Η διαδρομή αυτή μπορεί να θεωρηθεί ευθεία μόνο στην περίπτωση ομοιογενούς εδαφικής στρώσης. Αντίθετα, σε πολύστρωτες εδαφικές αποθέσεις, η διαδρομή των σεισμικών κυμάτων είναι τεθλασμένη και υπακούει στο νόμο διάθλασης του Snell.

Για τον προσδιορισμό της πραγματικής διαδρομής των σεισμικών κυμάτων, απαιτείται η χρήση κατάλληλου λογισμικού. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος DOWNH που επεξηγείται συνοπτικά στο Σχήμα 3. Ο αλγόριθμος δέχεται ως δεδομένα το πλήθος των σημείων μέτρησης N και τα αντίστοιχα βάθη τους $Z(i, i=1, \dots, N)$, τους χρόνους άφιξης των κυμάτων $T(i)$ και την απόσταση A της πηγής από τον άξονα της γεώτρησης. Η ταχύτητα σεισμικών κυμάτων εκτιμάται ξεκινώντας από την επιφάνεια και προχωρώντας διαδοχικά σε μεγαλύτερα βάθη. Θεωρείται προσεγγιστικά ότι οι διεπιφάνειες μεταξύ των παράλληλων επιφανειακών στρωμάτων διέρχονται από τις θέσεις μέτρησης. Η διαδρομή των κυμάτων από την πηγή μέχρι την πρώτη θέση μέτρησης ($K=1$, στον αλγόριθμο) θεωρείται ευθεία. Σε

μεγαλύτερα βάθη όμως, τα κύματα διαθλώνται στις διεπιφάνειες των στρωμάτων σύμφωνα με το νόμο του Snell. Καθώς η εξίσωση κίνησης των κυμάτων είναι μη γραμμική, η επίλυσή της γίνεται επαναληπτικά με στόχο να συγκλίνει η τεθλασμένη διαδρομή του κύματος από την πηγή στην εκάστοτε θέση μέτρησης ($K=2, \dots, N$).

3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ CROSS-HOLE ΚΑΙ DOWN-HOLE

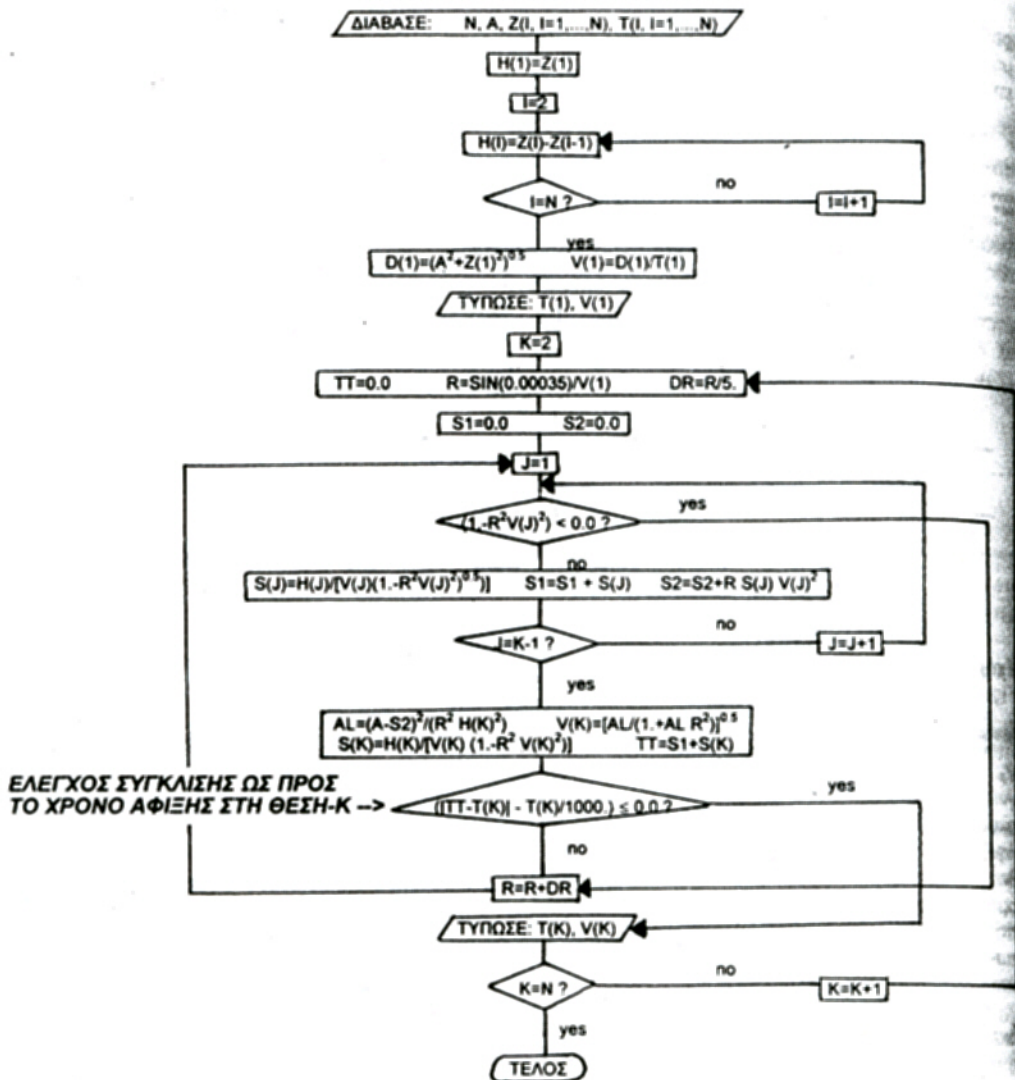
Όπως προαναφέρθηκε, για τη σύγκριση των δύο δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν αποτελέσματα από παράλληλες δοκιμές C-H και D-H σε τρεις διαφορετικές γεωτρήσεις. Οι δοκιμές αυτές εκτελέστηκαν από το Κ.Ε.Δ.Ε. για τις ανάγκες των Μικροζωνικών μελετών Πύργου και Πάτρας στις γεωτρήσεις: Γ3 (Πύργος - Αγ. Σπυρίδων), Γ9 (Πύργος - 1ο Δημοτικό Σχολείο), και Γ17 (Πάτρα - Αγ. Διονύσιος).

Στην περίπτωση της γεωτρήσεως Γ17, εκτελέστηκαν δοκιμές D-H με την πηγή των σεισμικών κυμάτων σε απόσταση 4.0m από τη γεώτρηση καταγραφής. Η καταγραφή των χρόνων άφιξης των P και S κυμάτων έγινε ανά 5m. Στις γεωτρήσεις Γ3 και Γ9 η πηγή των σεισμικών κυμάτων για τη δοκιμή D-H τοποθετήθηκε σε απόσταση 2.5m από τις γεωτρήσεις καταγραφής. Επιπλέον, στις γεωτρήσεις Γ3 και Γ9 οι καταγραφές των χρόνων άφιξης των κυμάτων P και S έγιναν στα ίδια βάθη στα οποία πραγματοποιήθηκαν και οι δοκιμές C-H. Ο εξοπλισμός για την πραγματοποίηση των δοκιμών C-H και D-H ήταν ο ίδιος και στις τρεις γεωτρήσεις.

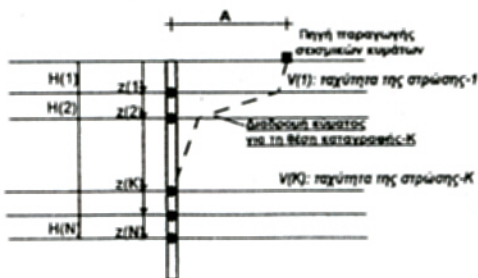
Στα Σχήματα 4, 5 και 6 παρουσιάζονται τα προφίλ ταχυτήτων V_s και V_p που εκτιμήθηκαν από δοκιμές C-H και D-H στις τρεις θέσεις μέτρησης. Επιπλέον, στα ίδια Σχήματα συμπεριλαμβάνονται και οι αντίστοιχες γεωτεχνικές τομές των εδαφικών αποθέσεων με χαρακτηρισμό κατά AUSCS.

Από τα σχήματα αυτά διαφαίνεται, ότι η δοκιμή D-H εκτιμά με ικανοποιητική ακρίβεια τις ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων με το βάθος. Οι μετρήσεις από D-H όμως, αποκλίνουν σε όλα τα βάθη ως προς αντίστοιχες από C-H και προς τις δύο κατευθύνσεις. Σε όλες τις θέσεις πάντως, η εκτίμηση της ταχύτητας V_s φαίνεται να είναι πιο επιτυχής από την εκτίμηση της ταχύτητας V_p .

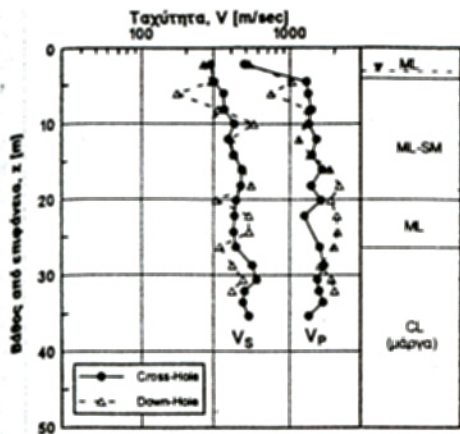
Εννοείται σύγκριση όλων των μετρήσεων και στις τρεις θέσεις γίνεται στα Σχήματα 7 και 8.



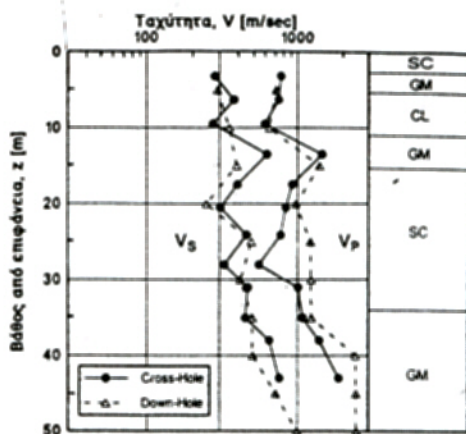
ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΧΡΟΝΟ ΑΦΙΞΗΣ ΣΤΗ ΘΕΣΗ-K →



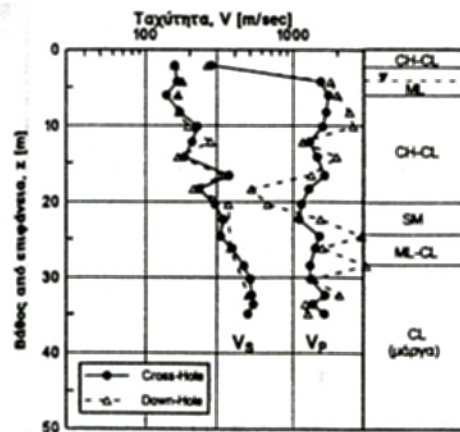
Σχήμα 3: Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου Η/Υ DOWNH
 Figure 3: Flow chart of DOWNH computer algorithm



Σχήμα 4: Σύγκριση μετρήσεων V_S και V_P από C-H και D-H στη θέση Πύργος Γ3
 Figure 4: Comparison of V_S and V_P measurements from C-H and D-H at Pyrgos G3 site



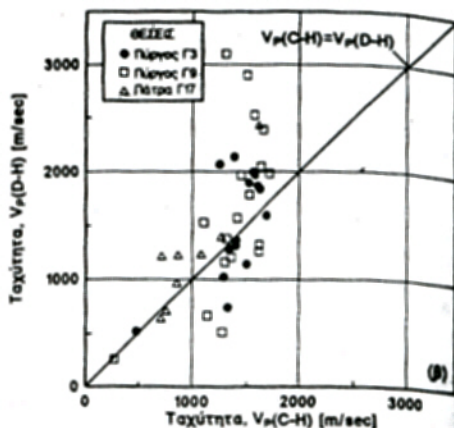
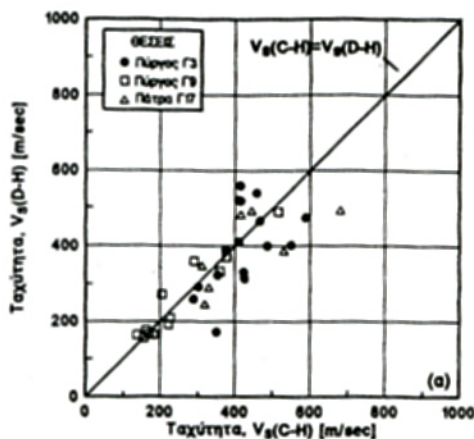
Σχήμα 6: Σύγκριση μετρήσεων V_S από C-H και D-H στη θέση Πάτρα Γ17
 Figure 6: Comparison of V_S and V_P measurements from C-H and D-H at Patra P17 site



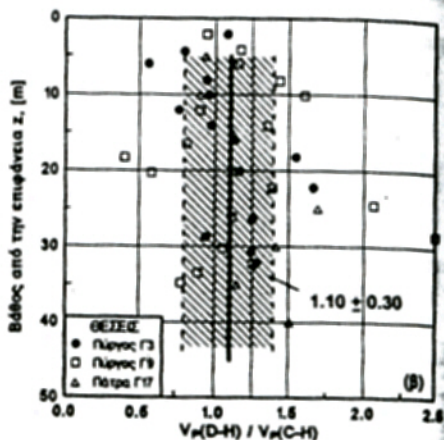
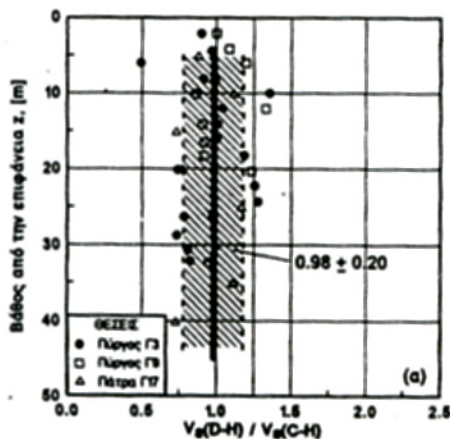
Σχήμα 5: Σύγκριση μετρήσεων V_S από C-H και D-H στη θέση Πύργος Γ9
 Figure 5: Comparison of V_S and V_P measurements from C-H and D-H at Pyrgos G9 site

Στο Σχήμα 7α παρουσιάζεται η συνολική σύγκριση των μετρηθέντων ταχυτήτων V_S από δοκιμές C-H και D-H. Από το σχήμα αυτό διαφαίνεται ότι, η δοκιμή D-H εκτιμά την τάξη μεγέθους της V_S με ικανοποιητική ακρίβεια. Συγκεκριμένα, ο λόγος $V_S(D-H) / V_S(C-H)$ παίρνει τιμές 0.98 ± 0.20 (μέση τιμή \pm τυπική απόκλιση). Το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί αριθμητικά με την τιμή 0.95 ± 0.15 που εκτιμούν οι Wilson et al. (1978) για το ίδιο μέγεθος. Τονίζεται όμως ότι, οι ερευνητές αυτοί δεν αναφέρουν τίποτα σχετικά με τις μεθόδους που χρησιμοποίησαν για την εκτέλεση και την ερμηνεία των δοκιμών, και ιδιαίτερα της δοκιμής D-H.

Η αντίστοιχη σύγκριση για την ταχύτητα V_P παρουσιάζεται στο Σχήμα 7β. Εδώ, η δοκιμή D-H παρουσιάζει μεγαλύτερη απόκλιση, αφού η αντίστοιχη τιμή του λόγου $V_P(D-H) / V_P(C-H)$ εκτιμάται ως 1.10 ± 0.30 , ενώ υπάρχουν διακριτά σημεία, όπου η τιμή της $V_P(D-H)$ δείχνει να αποκλίνει κατά πολύ από την τιμή της $V_P(C-H)$.



Σχήμα 7: Συγκεντρωτική σύγκριση μετρήσεων από C-H και D-H της V_S (α) και V_P (β).
Figure 7: Summary comparison of C-H and D-H measurements of V_S (a) V_P (β)



Σχήμα 8: Συγκεντρωτική σύγκριση μετρήσεων από C-H και D-H της V_S (α) και V_P (β), με το βάθος.
Figure 8: Summary comparison of C-H and D-H measurements of V_S (α) V_P (β), with depth

Στο Σχήμα 7 έγινε απ' ευθείας σύγκριση των μετρηθέντων V_S και V_P από δοκιμές C-H και D-H, δίχως να λαμβάνεται υπόψη το βάθος στο οποίο αυτές εκτιμήθηκαν. Ετσι, προκειμένου να διερευνηθεί η πιθανή επίδραση του βάθους, η σύγκριση των μετρήσεων επαναλαμβάνεται στα Σχήματα 8α και 8β, ως μεταβολή του λόγου $V(D-H)/V(C-H)$, συναρτήσει του βάθους.

Από το Σχήμα 8, δε διαφαίνεται κάποια συστηματική επίδραση του βάθους στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων της δοκιμής D-H, ως προς τις μετρήσεις από C-H. Το ποιοτικό αποτέλεσμα αυτό, συμφωνεί με τους Wilson et al (1978) οι οποίοι κατέληξαν στο ίδιο συμπέρασμα διερευνώντας όμως μόνο την ταχύτητα V_S .

Οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων της δοκιμής D-H σε σχέση με την πλέον αξιόπιστη

Η C-H μπορούν να αποδοθούν σε φυσικά ανθρώπινα αίμα. Πιο συγκεκριμένα, φυσικά αίμα είναι, για παράδειγμα, η μορφή της ελαστικής απόκρισης (ανισοτροπία), η διαφορά σε κυματική μορφή (κυρίως κύματα SV στη δοκιμή C-H, έναντι κυρίως κυμάτων SH στη δοκιμή D-H), οι πιθανώς σημαντικές αλλαγές στη διαστρωμάτωση (άλλα στα προφίλ επιπέδων τα οποία δεν ανιχνεύονται). Από την άλλη μεριά, ανθρώπινο αίμα είναι λάθη από την ερμηνεία των μετρήσεων και κυρίως την εκτίμηση των πολύ μικρών χρόνων διάρκειας (τάξη μεγέθους λίγων msec). Πρέπει να σημειωθεί εδώ, ότι η μειωμένη ακρίβεια της δοκιμής D-H οφείλεται και στο ότι η μέθοδος ερμηνείας των μετρήσεων της δοκιμής D-H αποδίδει ένα πιθανό λάθος σε κάποια θέση μέτρησης και σε μεγαλύτερα βόθρη, ενώ, αντίθετα, η εκτίμηση των ταχυτήτων σεισμικών κυμάτων στη δοκιμή C-H στην εκάστοτε θέση είναι ανεξάρτητη των μετρήσεων σε άλλες θέσεις. Στα ανθρώπινα λάθη πρέπει να συμπεριληφθεί και η πιθανώς μειωμένη ακρίβεια που προσδίδει η αδυναμία του σηματολόγητη SPT να παράγει κύματα με επιθυμητή πολικότητα ως πηγή στη δοκιμή C-H.

Ειδικά για τη εκτίμηση της ταχύτητας V_p σε σχέση με την ταχύτητα V_s , η σχετικά μεγαλύτερη διασπορά των αποτελεσμάτων αποδίδεται κυρίως στην αυξημένη πιθανότητα λάθους ανάγνωσης του χρόνου άφιξης των P σε σχέση με τα S κύματα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Από τη σύγκριση που προηγήθηκε, προκύπτουν τα ακόλουθα κύρια συμπεράσματα:

α) Η δοκιμή D-H εκπαύει την ταχύτητα V_s με ενισχυτική ακρίβεια σε σχέση με τη δοκιμή C-H. Πιο συγκεκριμένα, ο λόγος $V_s(D-H) / V_s(C-H)$ στα δεδομένα μας παίρνει τιμές 0.98 ± 0.20 μιση τιμή ± τυπική απόκλιση). Οι τιμές αυτές περιλαμβάνουν γενικώς με τη βιβλιογραφία.

β) Η δοκιμή D-H δεν είναι το ίδιο επιτυχής για τη μέτρηση της ταχύτητας V_p , αφού η απόσταση τιμή του λόγου $V_p(D-H) / V_p(C-H)$ απλά από τα δεδομένα μας ως 1.10 ± 0.30 . Γπάχουν διακριτά σημεία όπου οι μετρήσεις της V_p στη δοκιμή D-H αποκλίνουν κατά πολύ από τις αντίστοιχες τιμές στη δοκιμή C-H.

γ) Δεν διαφαίνεται κάποια επίδραση του λάθους από την επιφάνεια στην ακρίβεια της εκτίμησης των V_s και V_p στη δοκιμή D-H.

δ) Η σχετικά αυξημένη διασπορά στην εκτίμηση της ταχύτητας V_p σε σχέση με την ταχύτητα V_s , από δοκιμές D-H αποδίδεται κυρίως στη μειωμένη ακρίβεια ανάγνωσης του, ούτως ή άλλως, ιδιαίτερα μικρού χρόνου άφιξης των κυμάτων P.

Με βάση τα ανωτέρω προκύπτει, ότι καθ' αρχή είναι δυνατή η εναλλακτική χρήση δοκιμών D-H για μείωση του κόστους μιας γεωτεχνικής έρευνας, ιδιαίτερα όταν η εκτέλεση δοκιμών D-H γίνεται σε συνδυασμό με επιλεκτική εκτέλεση δοκιμών C-H και όταν η έμφαση δίνεται στη μέτρηση της ταχύτητας V_s . Για την αύξηση γενικά της αξιοπιστίας της δοκιμής D-H, θα πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω οι βέλτιστες συνθήκες εκτέλεσης της δοκιμής (π.χ. απόσταση μεταξύ μετρήσεων, απόσταση πηγής, τρόπος διέγερσης) ανάλογα με τις επικρατούσες εδαφικές συνθήκες.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ASTM, (1988), "Standard Test Methods for Cross-Hole Seismic Testing", Annual Book of ASTM Standards D4428/D4428M-84, pp. 655-664.
- Hoar R. J., Stokoe K. H. II, (1978), "Generation and Measurement of Shear Waves In Situ", Dynamic Geotechnical Testing ASTM STP 654, pp. 3-29.
- McLamore V. R., Anderson D. G., Espana C., (1978), "Crosshole Testing Using Explosive and Mechanical Energy Sources", Dynamic Geotechnical Testing ASTM STP 654, pp. 30-55.
- Mooney H. M., (1974), "Seismic Shear Waves in Engineering", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 100(8), pp. 905-923.
- Stallton C. T., Auld B., Fritz A., (1978), "In Situ Seismic Shear-Wave Velocity Measurements and Proposed Procedures", Dynamic Geotechnical Testing ASTM STP 654, pp. 56-65.
- Stokoe K. H. II, Woods R. D., (1972), "In Situ Shear Wave Velocity by Cross-Hole Method", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 98(5), pp. 443-460.
- Wilson S. D., Brown F. R. Jr., Schwarz S. D., (1978), "In Situ Determination of Dynamic Soil Properties", Dynamic Geotechnical Testing ASTM STP 654, pp. 295-317.