

## ΣΥΜΒΟΛΗ ΜΟΝΤΕΡΝΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΕΩΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΔΟΜΗΣ. ΜΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΑΛΟΓΡΕΖΑΣ\*

Τ.Α. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ<sup>1</sup>, Ι. ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ<sup>2</sup>, Π. ΚΑΜΠΟΥΡΗΣ<sup>3</sup>, Σ. ΤΟΛΗΣ<sup>4</sup> & Σ. ΚΑΒΟΥΝΙΑΗΣ<sup>4</sup>

### ΣΥΝΟΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται εφαρμογή της μεθόδου σεισμικής τομογραφίας για τη διερεύνηση της υπόγειας δομής, με έμφαση στην ανίχνευση υπόγειων στοών σε βάθη μεταξύ 30 και 80 μέτρων. Η χρησιμοποίηση ήπιων πηγών σεισμικής ενέργειας καθώς και η χρήση σεισμικών καψυλίων, επέτρεψαν την καταγραφή σεισμικών κυμάτων με δεσποζουσα συχνότητα της τάξης των 200'Ε250 Hz. Μετά την επεξεργασία των σεισμικών καταγραφών και την αφαίρεση του σεισμικού θορύβου με κατάλληλα φίλτρα, εφαρμόστηκε η τεχνική της μη γραμμικής αντιστροφής με τη χρήση του προηγμένου αλγορίθμου των J. Zhang and N. Toksoz (1998). Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε σε τρία ζεύγη γεωτρήσεων που είχαν ανορυχθεί στην περιοχή της Καλογρέζας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας δεν ανιχνεύθηκαν «υπόπτες» ζώνες ή δομές που να υποδηλώνουν την ύπαρξη μεγάλων υπόγειων στοών. Μια μικρή διαφοροποίηση στη σεισμική ταχύτητα (της τάξης των 300 m/s) πλησίον των γεωτρήσεων B1-1 (κυρίως) και B1-3, οφείλεται είτε σε φασική αλλαγή του υλικού ή στη διαφορετική φυσική κατάσταση αυτού.

### SUMMARY

In this paper the application of the seismic tomography method for subsurface investigation, especially in the case of adit detection at depths between 30 and 80 meters is presented. The use of non destructive seismic sources as the mechanical hammer as well as seismic detonators were allowed seismic waves of dominant frequency between 200'Ε250 Hz to be recorded. After the processing of seismic records and the subtraction of seismic noise by applying appropriate filters, the technique of non linear inversion was elaborated by using the advanced algorithm of J. Zhang and N. Toksoz (1998). This technique was applied in three borehole pairs that were drilled in the Kalogreza area. According to the obtained results there were no large subsurface adits detected. A small differentiation in seismic velocity (of the order of 300 m/s) near boreholes B1-1 (mainly) and B1-3, is due either to phasies change or to different physical condition of the material.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Σεισμική τομογραφία, Μέθοδος μη γραμμικής αντιστροφής, Ανίχνευση υπόγειων στοών, γεωτεχνική έρευνα.

**KEY WORDS:** Seismic tomography method, Method of non linear inversion, Subsurface adit detection, geotechnical investigation.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη χρησιμοποίησης πιο εξελιγμένων και περισσότερο αποτελεσματικών μεθόδων διερεύνησης της υπεδιαφικής δομής είναι ιδιαίτερα επιτακτική στις περιπτώσεις κατασκευής μεγάλων τεχνικών έργων. Έχουν χρησιμοποιηθεί κατά το παρελθόν με επιτυχία γεωφυσικές μέθοδοι επιφανείας, όπως η σεισμική μέθοδος διάθλασης, η μέθοδος σεισμικής ανάκλασης καθώς και η γεωηλεκτρική μέθοδος, για τη διερεύνηση της ρηχής δομής και ιδιαίτερα για γεωτεχνικές εφαρμογές. Το κύριο χαρακτηριστικό των παραπάνω μεθοδολογιών είναι ότι συμβάλλουν κυρίως στη στρωματογραφική και τεκτονική διερεύνηση της υπό έρευνα περιοχής. Η αποτελεσματικότητα των μεθόδων αυτών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως π.χ. τα χαρακτηριστικά της πηγής

\* CONTRIBUTION OF MODERN SEISMIC METHODS FOR SUBSURFACE INVESTIGATIONS. AN APPLICATION AT KALOGREZA AREA (ATHENS)

1. Τμήμα Γεωλογίας Εθνικού & Καποδιστριακού Παν/μιο Αθηνών, Τομέας Γεωφυσικής-Γεωθερμίας, Πανεπιστημιούπολη, Ζωγράφου, 157 84.  
2. Εθνικό & Καποδιστριακό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωφυσικής-Γεωθερμίας, Πανεπιστημιούπολη, Ζωγράφου, 157 84.  
3. Εθνικό & Καποδιστριακό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωφυσικής-Γεωθερμίας, Πανεπιστημιούπολη, Ζωγράφου, 157 84.  
4. ΕΔΑΦΟΣ Ε.Π.Ε., Υπερείδου, Αθήνα, 105 38.

(π.χ. συγχυτικό περιεχόμενο), τη διάταξη και τον αριθμό των σεισμικών πηγών, τη χωρική κατανομή των δεκτών (γεωφώνων), τη διάταξη της γεωηλεκτρικής μεθόδου, αλλά και το βαθμό διαφοροποίησης από γεωφυσικής σκοπιάς των υπό έλεγχο στρωμάτων.

Στην ευρύτερη περιοχή της Καλογρέζας πραγματοποιούνταν εκμετάλλευση λιγνιτικών κοιτασμάτων, η οποία επεκτάθηκε ανεξέλεγκτα κατά το παρελθόν. Για την αποφυγή προβλημάτων κατά τη θεμελίωση μεγάλου τεχνικού έργου στην περιοχή, εφαρμόστηκαν οι τεχνικές cross-hole και σεισμικής τομογραφίας για τη διερεύνηση της υπόγειας δομής μεταξύ των βαθών 30' E80 μέτρων και ιδιαίτερα για την ανίχνευση και εντοπισμό υπόγειων στοών που ενδεχομένως να διέρχονται από την περιοχή θεμελίωσης.

## 2. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Ως σεισμική τομογραφία ορίζεται κάθε τεχνική κατασκευής υπεδαφικής «εικόνας» στο εσωτερικό ενός χώρου που ορίζεται από τη γεωμετρία των σεισμικών πηγών και των δεκτών (γεωφώνων). Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό γραμμικών ολοκληρωμάτων της σεισμικής ταχύτητας,  $V$ , ή του αντιστρόφου της,  $\rho$ , και του σεισμικού πλάτους.

Η βασική παράμετρος η οποία διακρίνει κυρίως τις διάφορες τομογραφικές τεχνικές αφορά τον τρόπο με τον οποίο διατάσσονται οι θέσεις των σεισμικών πηγών και δεκτών προκειμένου να διεξαχθούν οι απαραίτητες μετρήσεις. Στην περίπτωση της σεισμικής τομογραφίας μεταξύ γεωτρήσεων οι σεισμικές πηγές και οι δέκτες τοποθετούνται σε διαφορετικές γεωτρήσεις. Το πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι η σεισμική ενέργεια δεν διέρχεται αναγκαστικά από τους επιφανειακούς, ως επί το πλείστον «χαλαρούς» σχηματισμούς, με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται απώλεια των υψίστων κυματικών συνιστωσών και κατά συνέπεια να επιτυγχάνεται αύξηση της διακριτικής ικανότητας.

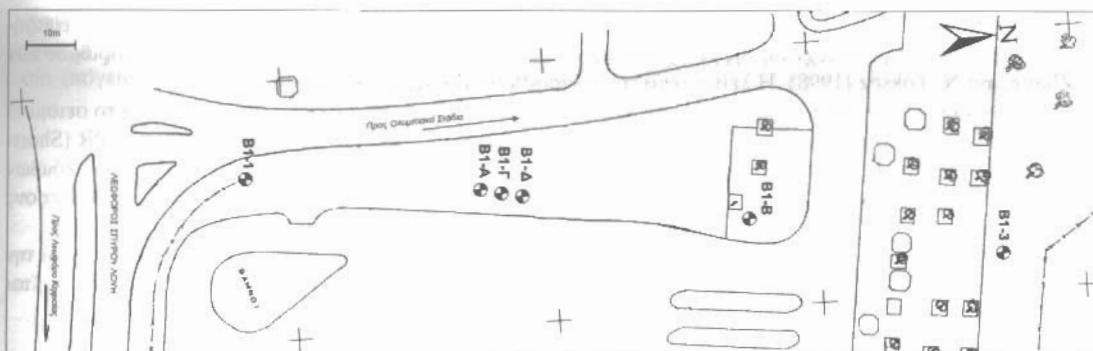
## 3. ΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Στην περιοχή ελέγχου εκτελέστηκε γεωτεχνική έρευνα με 14 δειγματοληπτικές γεωτρήσεις. Ειδικότερα στην μια πλευρά, εκτός των δυο δειγματοληπτικών γεωτρήσεων B1-1 και B1-3 που ανορύχθηκαν στα άκρα, ανορύχθηκαν επιπλέον 4 μη δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, οι B1-A και B1-B για την σεισμική τομογραφία και οι B1-Γ και B1-Δ για την δοκιμή cross-hole. Οι θέσεις των γεωτρήσεων παρουσιάζονται στην Εικόνα 1, ενώ στην Εικόνα 2 δίνεται η εδαφική τομή του επιπέδου που ορίζεται από τις B1-1 και B1-3, όπως προέκυψε από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της γεωτεχνικής έρευνας. Το υπέδαφος της περιοχής αποτελείται από τεχνητές ειλιώσεις στα πρώτα 6 μ., από σιφική αμμώδη κατά τόπους άργιλο με καλά γεωμηχανικά χαρακτηριστικά μέχρι τα 46 μ. και από αργιλώδη αμμοχάλικα σε ημιβραχώδη μορφή (ψηφιδοπαγές) μέχρι το βάθος που διερευνήθηκε (περίπου 70 μ.). Ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας στην θέση της τομής B1-1'EB1-3 προσδιορίστηκε στα 6 μ. περίπου από την επιφάνεια.

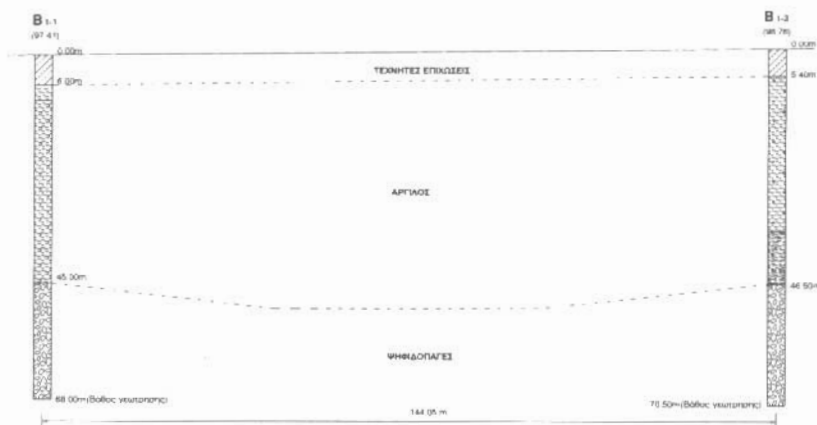
## 4. ΤΕΧΝΙΚΗ ΛΗΨΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Για την πλήρη κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος μεταξύ των γεωτρήσεων απαιτήθηκε η τοποθέτηση της διάταξης των σεισμικών δεκτών αρχικά σε βάθη από 39' E80 μ., στην πρώτη εκ των γεωτρήσεων του ζεύγους και η διαδοχική τοποθέτηση της σεισμικής πηγής από 40' E80 μ., με βήμα λήψης μετρήσεων 2 μ., στη δεύτερη γεώτρηση (βλ. Εικόνες 4.γ,δ). Η γεωμετρία λήψης των μετρήσεων ικανοποιεί την ανάγκη ενός ομογενούς πλέγματος σεισμικών ακτίνων, η πυκνότητα των οποίων ανά σεισμικό κελί, εξασφαλίζει την ανίχνευση του στόχου της έρευνας. Σε δεύτερο στάδιο καλύφθηκε η περιοχή από 30' E40 μ. με στόχο τη διερεύνηση της δομής μεταξύ 30 και 40 μέτρων. Έτσι, συνολικά διερευνήθηκε ο χώρος μεταξύ των πηγών και δεκτών από βάθη 30 έως 80 μέτρων. Οι μετρήσεις ελήφθησαν με τη χρήση μηχανικής σεισμικής πηγής, αυτόματης, με δυνατότητα εφαρμογής της μέσα σε γεώτρηση. Η μηχανική πηγή παράγει επιμήκη, εγκάρσια ή ψευδο-Rayleigh κύματα τα οποία διαδίδονται ακτινωτά. Η παραγόμενη ενέργεια κατ' αυτό τον τρόπο είναι περίπου 5' E8 J/κρούση και οι κρούσεις μπορούν να επαναληφθούν κάθε 2' E3 δευτερόλεπτα, επιτυγχάνοντας υπέρθεση των σεισμικών κυμάτων και κατά συνέπεια ευκρινείς αφίξεις των φάσεων. Το εύρος των συχνοτήτων που παράγονται είναι μεταξύ 200' E1500 Hz. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης και σεισμικά καψύλια με χρόνο πυροδότησης μικρότερου του 1 ms, για τον έλεγχο και την αποφυγή πιθανών σφαλμάτων που υπεισέρχονται λόγω κακού προσδιορισμού του χρόνου μηδέν με τη χρήση της μηχανικής σεισμικής πηγής. Για τη λήψη και την εν συνεχεία καταγραφή των σεισμικών κυμάτων χρησιμοποιήθηκε αλυσίδα γεωφώνων αποτελούμενη από 8 τριαξονικά γεώφωνα, με συχνότητα καταγραφής που κυμαίνεται μεταξύ 60' E6000 Hz.

Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.



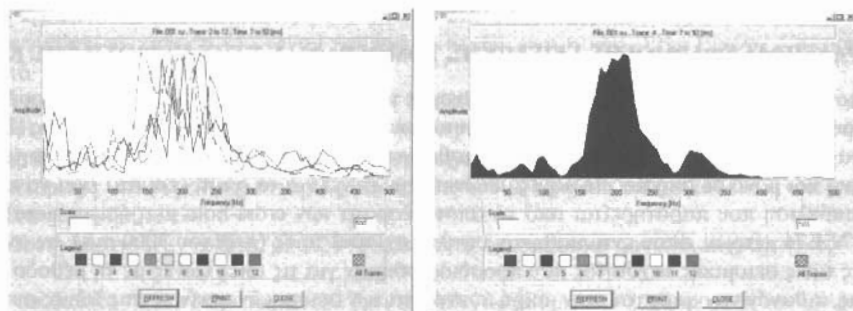
Εικόνα 1. Τοπογραφικό διάγραμμα περιοχής έρευνας.  
Figure 1. Survey area.



Εικόνα 2. Εδαφική τομή B1-1'EB1-3.  
Figure 2. Section B1-1'EB1-3.

## 5. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στο πρώτο στάδιο της επεξεργασίας μετρήθηκαν οι χρόνοι άφιξης των απ' ευθείας διαμήκων κυμάτων (P-waves), με ακρίβεια μεγαλύτερη του 1 ms, για κάθε σεισμικό ίχνος, αφού ενισχύθηκαν τα σεισμικά πλάτη με τεχνικές AGC (Automatic Gain Control) και αφαιρέθηκαν, με τη χρήση ψηφιακών φίλτρων, οι συνιστώσες του τυχαίου θορύβου (Random Noise) που υπεισιέλθαν λόγω του παρακείμενου αυτοκινητοδρόμου. Στην Εικόνα 3 φαίνεται η φασματική ανάλυση μιας τυπικής σεισμικής καταγραφής και η παρουσία χαμηλόσυχων κυμάτων που οφείλονται στον τυχαίο θόρυβο και προκαλείται κυρίως από την κίνηση των οχημάτων.



Εικόνα 3. Φασματική ανάλυση μιας καταγραφής 24 καναλιών (αριστερά) και ενός χαρακτηριστικού φάσματος (δεξιά).  
Figure 3. Spectral analysis of one record of 24 channels (left) and a typical spectrum (right).

Για τον προσδιορισμό της κατανομής της σεισμικής ταχύτητας με το βάθος, στο χώρο μεταξύ των γεωτρήσεων, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της μη γραμμικής αντιστροφής με τη χρήση του προηγμένου αλγορίθμου των J. Zhang and N. Toksoz (1998). Η λειτουργία του αλγορίθμου χωρίζεται σε δύο στάδια:

1. Στον προσδιορισμό του χρόνου διαδρομής των σεισμικών ακτίνων από τη σεισμική πηγή μέχρι το σεισμικό δέκτη (ray-tracing). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος της οικογένειας των SPR (Shortest Path Ray-tracing), ο οποίος υπολογίζει την τροχιά των σεισμικών ακτίνων μεταξύ διαδοχικών κόμβων (nodes). Βασίζεται στο νόμο του Snell και θεωρείται από τους ακριβέστερους και ταυτόχρονα ταχύτερους αλγορίθμους.
2. Στη σύγκριση των υπολογισθέντων από το πρώτο στάδιο χρόνων διαδρομής με τους πραγματικούς και την ελαχιστοποίηση των μεταξύ τους διαφορών. Η ελαχιστοποίηση των εν λόγω διαφορών πραγματοποιείται με τη χρήση της ακόλουθης αναλυτικής σχέσης:

$$F(m) = (1-w) |C_1(d-G(m))|^2 + w \kappa D_x(d-G(m)) \kappa^2 + t \kappa R m \kappa^2$$

όπου:

d οι πραγματικοί χρόνοι άφιξης

G(m) οι υπολογισθέντες χρόνοι άφιξης

m το μοντέλο

C<sub>1</sub> συντελεστής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέσης σεισμικής ταχύτητας

l η απόσταση μεταξύ πηγής και δέκτη

D<sub>x</sub> διαφορικός τελεστής

R συντελεστής κανονικοποίησης

t παράγοντας ομαλοποίησης

w συντελεστής μεταξύ μέσης και φαινόμενης ταχύτητας

Το βασικό πλεονέκτημα του ανωτέρω αλγορίθμου είναι ότι η αντιστροφή επιτυγχάνεται όχι μόνο μέσω της ελαχιστοποίησης των διαφορών μεταξύ των πραγματικών και υπολογισθέντων χρόνων άφιξης, αλλά και μέσω της ταυτόχρονης ελαχιστοποίησης των διαφορών μεταξύ:

- α. των «μέσων των αντιστροφών των ταχυτήτων» (average slowness) και,
- β. των «φαινόμενων των αντιστροφών των ταχυτήτων» (apparent slowness).

Ταυτόχρονα με τη χρήση του αλγορίθμου «κανονικοποίησης» (regularization) των Tikhonov and Arsenin (1977) πραγματοποιείται η μετατροπή ενός μη «επαρκώς προσδιορισμένου» προβλήματος, όπως συνήθως είναι το πρόβλημα της αντιστροφής στη σεισμική τομογραφία, σε «επαρκώς προσδιορισμένο», με αποτέλεσμα τη δυνατότητα μείωσης των διαστάσεων του κελιού του καννάβου ώστε να επιτυγχάνεται υψηλότερη ευκρίνεια.

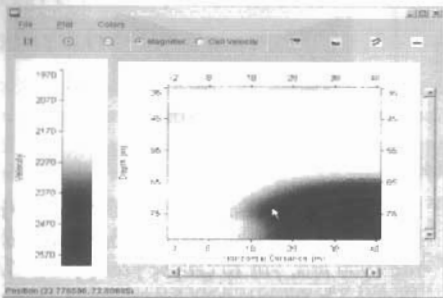
Η αποτελεσματική εφαρμογή της τομογραφικής έρευνας εξαρτάται επίσης από τη σχετική γεωμετρική θέση των πηγών και δεκτών, που επηρεάζουν και τον τελικό βαθμό ευκρίνειας που επιτυγχάνεται. Η ευκρίνεια της μεθόδου αυξάνεται με την αύξηση του «ανοίγματος» της γωνίας των σεισμικών ακτίνων (aperture) μεταξύ των πηγών και των δεκτών.

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε άνοιγμα γωνίας 180°. Η χωρική ευκρίνεια που επιτεύχθηκε είναι γενικά ικανοποιητική και η ικανότητα απόκρισης μιας ισόχρονης καμπύλης σε μια αλλαγή της ταχύτητας περιορίζεται σε μια στενή περιοχή στη κατεύθυνση κάθετα προς το μετωπικό κύμα. Αντίθετα, η περιοχή διευρύνεται σε κατεύθυνση παράλληλα προς το μετωπικό κύμα (Oristaglio et.al., 1987). Ο McMechan (1983) δείχνει επίσης πως αποκλίσεις που παρατηρούνται σε τομογράμματα περιορίζονται σε μικρότερη περιοχή, καθώς το άνοιγμα της γωνίας των σεισμικών κυμάτων αυξάνει.

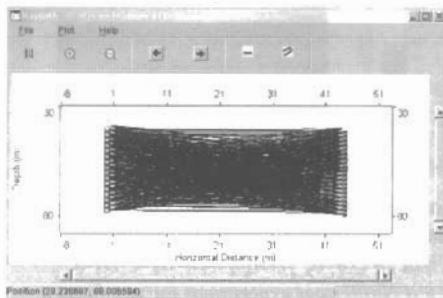
## 6. ΕΝΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΑΛΟΓΡΕΖΑΣ

Στις Εικόνες 4.α,β,γ,δ παρουσιάζονται οι κατανομές των σεισμικών κυμάτων V<sub>p</sub>, όπως προέκυψαν από τη σεισμική τομογραφία (Εικόνες 4.α,β) και η πυκνότητα των σεισμικών ακτίνων για κάθε ζεύγος (Εικόνες 4.γ,δ). Η πυκνότητα των σεισμικών ακτίνων έχει υπολογισθεί για κελί διαστάσεων 1'1 μ<sup>2</sup>. Η πυκνότητα γενικά είναι ικανοποιητική και μόνο σε ακραίες περιοχές μειώνεται με συνέπεια τα αποτελέσματα εκεί να είναι αμφισβητήσιμα. Η απόκλιση που παρατηρείται από τα αποτελέσματα των cross-hole μετρήσεων μεταξύ των βαθών 48' E52 και 72' E74 μέτρων, όπου εντοπίστηκαν υψηλές σχετικά τιμές (περίπου 3000 m/s), εν αντιθέσει με τις χαμηλότερες τιμές σεισμικής ταχύτητας που προσδιορίστηκαν για τις ίδιες ζώνες με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας, πιθανόν να οφείλεται στην μικρή πυκνότητα των σεισμικών ακτίνων στις ζώνες αυτές (< 10 ακτίνων/κελί). Η μικρή πυκνότητα των σεισμικών ακτίνων σε συνδυασμό με το μικρό άνοιγμα της γωνίας (aperture) μεταξύ των σεισμικών πηγών και δεκτών, που επηρεάζουν και τον τελικό βαθμό ευκρίνειας και διακριτικής ικανότητας της μεθόδου. Λαμβάνοντας τους παραπάνω παράγοντες υπόψη και δεδομένης της δεσπόζουσας

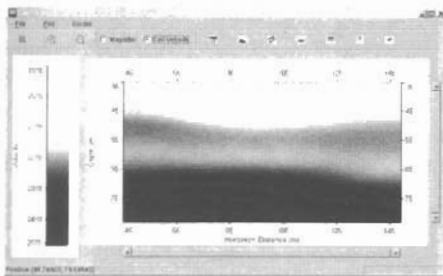
συχρότητας καταγραφής στην περιοχή 200 Hz, εκτιμάται μια χωρική ευκρίνεια της τάξης των 2'Ε4 μέτρων. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά αυτά δεν εντοπίστηκαν ζώνες ή δομές που να αποδίδονται στην παρουσία υπόγειων στοάς.



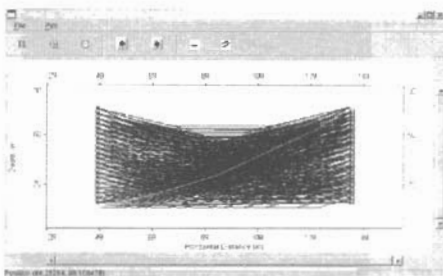
**Εικόνα 4.α Κατανομή σεισμικής ταχύτητας για το ζεύγος γεωτρήσεων B1-1/B1-A.**  
**Figure 4.a Tomogram between B1-1/B1-A boreholes.**



**Εικόνα 4.γ Κατανομή σεισμικών ακτίνων για το ζεύγος γεωτρήσεων B1-1/B1-A.**  
**Figure 4.c Seismic rays between B1-1/B1-A boreholes.**



**Εικόνα 4.β Κατανομή σεισμικής ταχύτητας για το ζεύγος γεωτρήσεων B1-Γ/B1-3.**  
**Figure 4.b Tomogram between B1-Γ/B1-3 boreholes.**



**Εικόνα 4.δ Κατανομή σεισμικών ακτίνων για το ζεύγος γεωτρήσεων B1-Γ/B1-3.**  
**Figure 4.d Seismic rays between B1-Γ/B1-3 boreholes.**

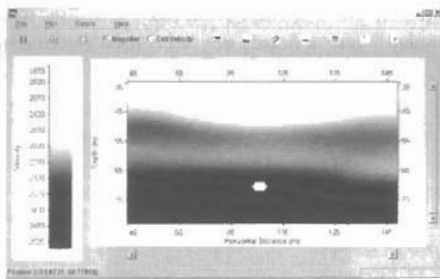
### 6.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΣΤΟΑΣ

Κατά τη διαδικασία της επεξεργασίας και ερμηνείας θεωρήθηκε απαραίτητο να δειχθεί, με τη μέθοδο της αριθμητικής προσομοίωσης (numeric modelling), η επάρκεια της χωρικής δειγματοληψίας (διάστημα μεταξύ των σεισμικών πηγών και διάστημα μεταξύ των σεισμικών δεκτών) και κατ' ελάχιστο η δυνατότητα της μεθόδου που εφαρμόστηκε, να ανιχνεύσει και να εντοπίσει πιθανές υλόγειες στοές. Έτσι, μετά τον υπολογισμό της κατανομής της σεισμικής ταχύτητας με το βάθος, με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας, κατασκευάστηκε νέο μοντέλο ταχυτήτων με την προσθήκη σώματος κυκλικής διατομής με διάμετρο 3 m σε βάθος 65'Ε70 m. Το σώμα αυτό θεωρήθηκε αντιπροσωπευτικό της παρουσίας στοάς με διεύθυνση ανάπτυξης κάθετη στο επίπεδο έρευνας. Πραγματοποιήθηκαν ελιύσεις για ταχύτητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων εντός του σώματος 340 και 1000 m/s για την περίπτωση του κενού και του μη κενού, αντίστοιχα. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση του μη κενού.

Κατόπιν, προσδιορίστηκε εκ νέου η κατανομή των σεισμικών ακτίνων χρησιμοποιώντας το νέο μοντέλο ταχυτήτων, για όλες τις υπάρχουσες θέσεις σεισμικών πηγών και δεκτών. Διακρίνεται και στα δύο διαγράμματα κατανομής των σεισμικών ακτίνων η πιθανή θέση παρουσίας της «στοάς», ως η περιοχή από την οποία δεν διέρχονται σεισμικές ακτίνες. Μετρώντας τις διαστάσεις του θεωρητικά υπολογισθέντος «κενού χώρου» (βλ. Εικόνα 5 β), παρατηρήθηκε ότι:

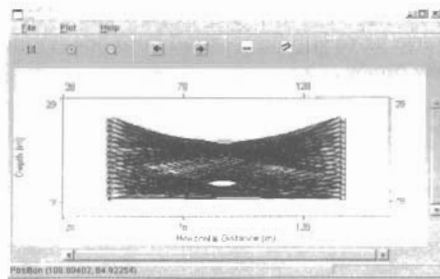
1. Οι διαστάσεις παρέμειναν οι ίδιες μεταξύ τους παρά τα διαφορετικά μοντέλα ταχυτήτων που χρησιμοποιήθηκαν
2. Η οριζόντια διάσταση του σώματος αυτού έχει αυξηθεί κατά 6 m σε σχέση με αυτή του αρχικού σώματος
3. Η κατακόρυφη διάσταση αντίθετα είναι η ίδια με αυτή του αρχικού σώματος

Η απόκλιση αυτή μπορεί να οφείλεται στην παρουσία της στοάς, η οποία είναι οριζόντια και βρίσκεται μεταξύ των γεωτρήσεων μόνο. Η



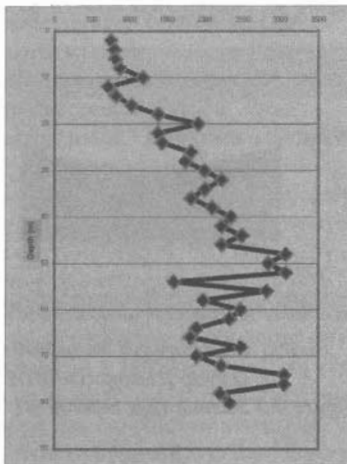
Εικόνα 5.α Αριθμητική προσομοίωση για τον προσδιορισμό σώματος κυκλικής διατομής και ταχύτητας 1000 m/s, για το ζεύγος γεωτρήσεων B1-C/B1-3.

Figure 5.a Numerical experiment for resolving a circular body with velocity 1000 m/s, between B1-G/B1-3 boreholes.



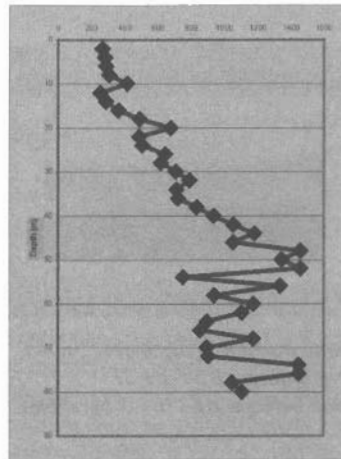
Εικόνα 5.β Κατανομή σεισμικών ακτίνων μετά την παρεμβολή σώματος κυκλικής διατομής και ταχύτητας 1000 m/s, για το ζεύγος γεωτρήσεων B1-C/B1-3.

Figure 5.b Seismic rays for resolving a circular body with velocity 1000 m/s, between B1-G/B1-3 boreholes.



Εικόνα 6.α Κατανομή της σεισμικής ταχύτητας των επιμήκων κυμάτων με το βάθος.

Figure 6.a P-wave velocity versus depth.



Εικόνα 6.β Κατανομή της σεισμικής ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων με το βάθος.

Figure 6.b S-wave velocity versus depth.

ύπαρξη σεισμικών πηγών και δεκτών στην επιφάνεια του εδάφους θα βελτιώνει τη διακριτική ικανότητα της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε.

## 6.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ CROSS-HOLE

Στα πλαίσια του προσδιορισμού των ελαστικών παραμέτρων και του χαρακτηρισμού των σχηματισμών από γεωτεχνικής πλευράς, διεξήχθησαν cross-hole μετρήσεις σε τρεις συνευθειακές γεωτρήσεις σε αποστάσεις περίπου 4 και 8 μέτρων αντίστοιχα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανά δύο μέτρα, αρχίζοντας από την επιφάνεια του εδάφους έως τον πυθμένα της γεώτρησης (80 μέτρα). Η επαναληψιμότητα των κρούσεων που παρέχεται από την μηχανική σεισμική πηγή, αλλά και οι μεγάλες δυνατότητες ενίσχυσης του σήματος με τη διαδικασία της υπέρθεσης των σεισμικών σημάτων, καθιστούν τη διαδικασία λήψης των μετρήσεων υπαίθρου εξαιρετικά σύντομη και αξιόπιστη. Συνολικά λήφθηκαν 40 σεισμικές καταγραφές για κάθε ζεύγος γεωτρήσεων (B1-Γ/B1-A και B1-Γ/B1-Δ). Οι μετρήσεις αυτές αξιολογήθηκαν και προέκυψε η κατανομή της σεισμικής ταχύτητας  $V_p$  και  $V_s$  που παρουσιάζονται στις Εικόνες 6.α,β.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά παρατηρείται μια γραμμική αύξηση των σεισμικών ταχυτήτων  $V_p$  και  $V_s$  μέχρι βάθους 46 μέτρων με μέγιστες ταχύτητες περίπου 2500 m/s και 1200 m/s, αντίστοιχα. Στη συνέχεια παρατηρείται μια αύξηση των σεισμικών ταχυτήτων, αλλά παραμένουν σχετικά υψηλές 2000-3000 m/s. Οι υψηλές τιμές των σεισμικών ταχυτήτων (περίπου 3000 m/s), που παρατηρούνται μεταξύ των βαθών 48-52

μέτρων και 74 Ε76 μέτρων δεν εντοπίστηκαν με την εφαρμογή της σεισμικής τομογραφίας στο ζεύγος γεωτρήσεων Β1-1/Β1-Α. Ο μη εντοπισμός των ζωνών αυτών οφείλεται στην μικρή πυκνότητα των σεισμικών ακτίνων πλησίον των γεωτρήσεων, την μικρή έκταση των ζωνών υψηλής ταχύτητας και την αύξηση του μήκους κύματος λόγω απορρόφησης των υψίσυχων κυμάτων.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η θεμελίωση μεγάλων τεχνικών έργων απαιτεί τη διερεύνηση της υπόγειας δομής με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, ιδιαίτερα σε περιοχές από όπου πιθανόν να διέρχονται υπόγειες στοές. Στην εργασία αυτή εφαρμόστηκε η μέθοδος της σεισμικής τομογραφίας σε ζεύγη γεωτρήσεων που ανορύχθηκαν στην περιοχή της Καλογρέζας, όπου θα κατασκευασθεί ένα από τα έργα για τους Ολυμπιακούς αγώνες του 2004.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της σεισμικής τομογραφίας δεν ανιχνεύθηκαν «ύποπτες» ζώνες ή δομές που να αποδίδονται στην παρουσία υπόγειων στοών. Από την αριθμητική προσομοίωση που χρησιμοποιήθηκε, τη σχετική γεωμετρία των πηγών και δεκτών, τη δεσπόζουσα συχνότητα καταγραφής και τη βαθμονόμηση με τα στοιχεία των μετρήσεων cross-hole, εκτιμάται ότι έχει επιτευχθεί διακριτική ικανότητα της υπόγειας στοάς της τάξης των 2 Ε4 μέτρων, ανάλογα με τη θέση της στο χώρο μεταξύ των ζευγών των γεωτρήσεων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- KUTRUBES, D. L., ZHANG, J. and HAGER, J. 1996. Comparison of conventional processing techniques and nonlinear travelttime tomography for surveys at Eastern Massachusetts coastal site: *Proc. SAGEEP Environ. Eng. Geophys. Soc.*, 135-138
- MATARESE, J. R. 1993. *Nonlinear travelttime tomography*. Ph.D. thesis, Mass.Inst.Tech.
- McMECHAN, G. A. 1983. Seismic tomography in boreholes: *Geophy. Jour. Royal Astr. Soc.*, 74, 601-612.
- MOSER T. J. 1991. Shortest path calculation of seismic rays. *Geophysics*, 56, 59-67.
- MOSER, T. J. 1990. Efficient seismic ray tracing using graph theory. Paper presented at 59<sup>th</sup> Annual International Meeting, *Soc. Of Explor. Geophys.* Dallas.
- ORISTAGLIO, M., BEYLKIN, G., AND MILLER, D. 1987. The generalized Radon transform – a breakthrough in seismic migration. *The Technical Review*, 35, no. 3, 20-27.
- SCALES, J. A. 1987. Tomographic inversion via the conjugate gradient method: *Geophysics*, 52, 179-185.
- SCALES, J. A., DOCHERTY, P. and GERSZTENKORN, A. 1990. *Regularization of nonlinear inverse problems: imaging the near-surface weathering layer*. *Inverse Problems*, 6, 115-131.
- TIKHONOV, A. N. and ARSENIN, V. Y. 1977. *Solutions of ill-posed problems*. W.H Winston and Sons.
- ZHANG, J., and TOKSOZ M. N. 1998. Nonlinear refraction travelttime tomography, *Geophysics*, vol. 63, No 5, p. 1726-1737.