

# Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΡΗΧΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ Ή ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΔΟΜΩΝ\*

ΤΑΣΙΑΡΧΗΣ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ<sup>1</sup>

## ΣΥΝΟΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται αναφορά στη χρησιμότητα και σπουδαιότητα χρησιμοποίησης των γεωφυσικών μεθόδων στη διερεύνηση της ρηχής υπεδάφινής δομής. Ειδικότερα, δίδεται έμφαση στους κλάδους της τεχνικής και περιβαλλοντικής γεωφυσικής, που αποτελούν επί μέρους εφαρμογές της εφαρμοσμένης γεωφυσικής έρευνας. Αρχικά αναφέρονται οι γεωφυσικές μέθοδοι που κυρίως χρησιμοποιούνται, η καταλληλότητά τους και οι δυνατότητες και περιορισμοί που διέπουντα. Στη συνέχεια ορίζονται μερικές βασικές έννοιες, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη προκειμένου να επιτευχθεί θετική έγκριση μιας γεωφυσικής έρευνας. Τέλος, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των πλέον χρησιμοποιούμενων γεωφυσικών μεθόδων και δίδονται παραδείγματα μέσα από τον ελληνικό κυρίως χώρο.

## ABSTRACT

In this review paper it is presented the usefulness and importance of using geophysical methods in shallow subsurface investigations. It is given emphasis on problems that can be handled by the engineering and environmental geophysics which are branches of applied geophysics. First, the geophysical methods that are mainly used are referred, their efficiency, as well as the potentialities and restrictions that they present. Next, some basic topics are defined that the geophysicist has to take into account in order to end up with positive results. Finally, the advantages and disadvantages of the most used geophysical methods are referred and some examples are given from the experience obtained by carrying out geophysical investigations in Greece.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Τεχνική γεωφυσική, περιβαλλοντική γεωφυσική, εφαρμοσμένη γεωφυσική, γεωφυσικές μέθοδοι, φυσικές ιδιότητες, γεωφυσικές έννοιες

**KEY WORDS:** Engineering geophysics, environmental geophysics, applied geophysics, geophysical methods, natural properties, geophysical parameters

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρησιμοποίηση γεωφυσικών μεθόδων με την εφαρμογή ειδικών τεχνικών ή διατάξεων, με στόχο τη διερεύνηση της υπεδάφινής δομής για τον εντοπισμό εμμεταλλεύσιμων κοιτασμάτων πετρελαίου, υδατικών πόρων και μεταλλευμάτων καθώς και για τον έλεγχο της στρωματογραφίας και της τεκτονικής δομής μιας περιοχής, έχει αρχίσει από τις αρχές του 20ου αιώνα. Η γεωφυσική έρευνα που ασχολείται με τη διερεύνηση του φλοιού της γης και τον εντοπισμό ρηχών δομών από ραδιενέργεια και πολλές φορές από οικονομικής πλευράς, αποτελεί το αντιζήτημο της **εφαρμοσμένης γεωφυσικής**.

Την τελευταία 10-ετία έχουν αναπτυχθεί δύο άλλοι επί μέρους κλάδοι, α) της **τεχνικής γεωφυσικής** και β) της **περιβαλλοντικής γεωφυσικής**. Σύμφωνα με τον Sheriff (1991) ο ορισμός της τεχνικής γεωφυσικής είναι η εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων στην έρευνα των υπεδάφινών υλικών και δομών που συμβάλλουν σημαντικά στην επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων. Η περιβαλλοντική γεωφυσική ορίζεται, σύμφωνα με τους Greenhouse (1991) και Steeples (1991), ως ο κλάδος που ασχολείται με την έρευνα των ρηχών φυσικο-χημικών φαινομένων, τα οποία έχουν επίδραση στη διαχείριση του άμεσου **περιβάλλοντος**. Η κύρια διαφορά μεταξύ της τεχνικής και περιβαλλοντικής γεωφυσικής είναι ότι η μεν πρώτη ασχολείται με **δομές** και τη φύση των υπεδάφινών υλικών, η δε δεύτερη μπορεί επίσης να συμπεριλάβει την **χαρτογράφηση μεταβολών της αγωγιμότητας των οριζών ιγρών** και να καταδείξει την παρουσία μολυσμένων περιοχών μέσα στον υδροφόρο ορίζοντα. Οι χημικές επιδράσεις είναι εξ' ίσου σημαντικές όσο και τα φυσικά φαινόμενα (Reynolds, 1997). Ο όρος περιβα-

\* THE IMPORTANCE OF USING GEOPHYSICAL METHODS IN SHALLOW INVESTIGATIONS FOR NATURAL OR ARTIFICIAL STRUCTURES.

<sup>1</sup> Τμήμα Γεωλογίας Εθνικού & Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, Τομέας Γεωφυσικής-Γεωχημίας, Πανεπιστημιούπολη, Ζωγράφου, 157 04.

λοντική γεωφυσική έχει ερμηνευθεί από μερικούς ερευνητές ότι εννοεί γεωφυσικές έρευνες που έχουν διεξαχθεί με περιβαλλοντική ευαισθησία, χωρίς δηλαδή τη χρήση καταστροφικών μεθόδων, όπως π.χ. η εξασφάλιση του περιβάλλοντος στις υποθαλάσσιες σεισμικές έρευνες (Bowles, 1990), κ.λ.π.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το ενδιαφέρον της διεθνούς επιστημονικής γεωφυσικής κοινότητας έχει επίσης εστιασθεί στην ανάπτυξη τεχνικών και διατάξεων καθώς και στη δημιουργία κατάλληλων πακέτων λογισμικού για την επεξεργασία των λαμβανόμενων μετρήσεων, την ερμηνεία αυτών καθώς και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, για τη διερεύνηση οριζών στόχων είτε είναι φυσικοί (π.χ. εντοπισμός εγχορών, προσδιορισμός αναγλύφου βραχώδους υποβάθρου, κ.α.) ή τεχνητοί (π.χ. εντοπισμός διαρροών και μολυσμένων περιοχών, κ.α.).

Η ανάγκη βελτίωσης και δημιουργίας νέων τεχνολογιών στο χώρο της γεωφυσικής προέρχεται κυρίως από τις αυξημένες απαιτήσεις των μεγάλων τεχνικών έργων, που συνίστανται είτε στη καλύτερη και ασφαλή θεμελίωση αυτών ή στην προστασία τους από επαγόμενες **παράγοντες**, όπως είναι η σεισμική επικινδυνότητα, ο κίνδυνος από καταπονήσεις, η επίδραση τεχνητών εσθίσεων, **κ.α. Επίσης**, η ανάγκη παρακολούθησης φαινομένων μόλυνσης (π.χ. διεύθυνση θαλασσίου ύδατος σε παράλιες περιοχές) ή διαρροών σε φράγματα και δεξαμενές, **οδηγεί** στην ανάπτυξη νέων τεχνικών για την καλύτερη αποτύπωση των υπεδαφικών ιδιοτήτων που επηρεάζονται περισσότερο από τη διέλευση των μολυσμένων υγρών ή την παρουσία αυτών.

Η χρησιμότητα των γεωφυσικών μεθόδων και η σπουδαιότητα τους από πρακτικής και οικονομικής πλευράς είναι σημαντική και γενικότερα συμβάλλουν **στην ανάπτυξη**, εφόσον χρησιμοποιούνται στη θεμελίωση μεγάλων τεχνικών έργων (π.χ. φραγμάτων, σιράγγων, γεφυρών, κ.λ.π.), στην παρακολούθηση διαρροών μεγάλων δεξαμενών υγρών (π.χ. καυσίμων, υδάτων, κ.λ.π.), **την παρακολούθηση και τον έλεγχο μολυσματικών παραγόντων**, όπως η διεύθυνση θαλασσίου ύδατος, **κ.α.**, **τον εντοπισμό** υπόγειων στοών και εγχορών, κ.α. Οι γεωφυσικές μέθοδοι συμβάλλουν επίσης στην **ανάδειξη της ιστορικής κληρονομιάς** ενός τόπου, με τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων χωρίς τη διενέργεια **ανασκαφικών εργασιών**, στον προσδιορισμό θαμμένων ερευνητικών μηχανισμών, όπως ναυκών, όλμων, κ.α., καθώς επίσης **στη διενεργηθεί έρευνα και στη μελέτη επίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών κυρίως πεδίων στον άνθρωπο.**

Στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι η εφαρμοσμένη γεωφυσική παρέχει ένα ευρύ φάσμα πολύ χρήσιμων και αποτελεσματικών μεθόδων, που αν χρησιμοποιηθούν σωστά στις κατάλληλες περιπτώσεις, μπορούν να παράγουν πολύτιμη πληροφορία. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να προσπαθήσει να εξηγήσει πως η εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων μπορεί να γίνει καλύτερα και αποδοτικότερα και να καταδείξει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων τεχνικών.

## 2. ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ - ΜΕΤΡΗΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Οι γεωφυσικές μέθοδοι ουσιαστικά αποσκοπουν στις φυσικές ιδιότητες του υπεδάφους μέσω είτε είναι τεχνικο-γεωλογικής φύσης (π.χ. πέτρωμα, ίζημα, ύδωρ, πορώδες, διαπερατότητα, οηγματώσεις, κενά, εξάλλοση, αποσάθρωση, κ.α.) ή φυσικές παράμετροι, όπως αγωγιμότητα, σεισμική ταχύτητα, πυκνότητα, μαγνητική επιδεκτικότητα, ελαστικές σταθερές, ηλεκτρική ειδική αντίσταση, διηλεκτρική σταθερά, ραδιενέργεια, θερμοκή αγωγιμότητα, κ.α.

Οι υπάρχουσες γεωφυσικές μέθοδοι και τεχνικές που χρησιμοποιούνται συνήθως στις γεωφυσικές διασκοπήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ορισμένες τροποποιήσεις στην τεχνική και περιβαλλοντική γεωφυσική. Οι μέθοδοι αυτές είναι οι εξής:

- Βαρυτική
- Μαγνητική
- Σεισμική Διάθλαση
- Σεισμική Ανάκλαση
- DC Ηλεκτρική Ειδική Αντίσταση
- Επαγόμενη Πόλωση
- Ηλεκτρομαγνητικές
- Γεωραντάρ
- Ραδιενεργός
- Γεωθερμική
- Γεωφυσικές διαγραφίες σε γεώτρηση
- Άλλες νεότερες μέθοδοι (NMR, SASW, κ.α.)

Η καταλληλότητα μιας **Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεοφράστου Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.** κυρίως από τις αντιθέ-

σεις των φυσικών ιδιοτήτων που περιλαμβάνονται μεταξύ της δομής του στόχου και του περιβάλλοντος σχηματισμού, την έκταση σε βάθος του στόχου και τη φύση/πάχος του υπερκείμενου στρώματος. Γενικά, η έρευνα περισσότερων της μιας φυσικών ιδιοτήτων με την εφαρμογή διαφόρων γεωφυσικών μεθόδων παρέχει ένα συσχετισμό των αποτελεσμάτων και αυξάνει την αξιοπιστία της ερμηνείας τοινοτοπόπως (Sharma 1997).

Μερικές αν όχι καμία από τις γεωφυσικές μεθόδους παρέχει μοναδική λύση σε ένα ιδιαίτερο γεωλογικό πρόβλημα. Είναι δυνατόν να ληφθεί ένας μεγάλος αριθμός γεωφυσικών λύσεων για διάφορα προβλήματα, πολλές εξ των οποίων να είναι γεωλογικά αστήριχτες. Είναι επομένως απαραίτητο να ελέγχεται πάντοτε η γεωφυσική λύση με γεωλογικά κριτήρια (Reynolds 1997).

Σε σχέση με τα προβλήματα περιβαλλοντικού κινδύνου μολυσματικών αποβλήτων και την ασφαλή διάθεση πυρηνικών και χημικών αποβλήτων, οι παρακάτω γεωφυσικές εφαρμογές παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον (Sharma 1997):

- Προσδιορισμός της θέσης γεωλογικών δομών (ρηγάματα, ρηγματώσεις, ασθeneίς ζώνες, απότομες λιθολογικές επαφές, κ.α.) κάτω και πέριξ υπαρχόντων χώρων υγειονομικής ταφής και χώρων ταφής τοξικών αποβλήτων.
- Προσδιορισμός της θέσης υδροφόρων οριζόντων και της υδραυλικής κλίσης ενεργών δομών για την ανίχνευση μολυσμένων χώρων και διαρροών στο υπέδαφος.
- Ανίχνευση και εντοπισμός θαμμένων χώρων απόθεσης τοξικών αποβλήτων.
- Διερεύνηση νέων χώρων απόθεσης αποβλήτων σε τεκτονικά/σεισμικά σταθερές περιοχές, με δομές που να προστατεύουν τα πετρώματα και τον υδροφόρο ορίζοντα από μόλυνση.

Επί πλέον υπάρχουν περιβαλλοντικά προβλήματα όπως, οι ραδιενεργές εξπομπές, η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας, οι κατολισθήσεις και οι εδαφικές αβιζήσεις, ο εντοπισμός θαμμένων αρχαιοτήτων, κ.α., τα οποία προσεγγίζονται με γεωφυσικές μεθόδους. Στον πίνακα I δίδεται μια ανασκόπηση των πιο σπουδαίων στόχων της περιβαλλοντικής και της τεχνικής γεωφυσικής και οι κατάλληλες μέθοδοι ή τεχνικές που πρέπει να χρησιμοποιούνται.

Η εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων έχει επίσης σταθερά αυξηθεί την τελευταία δεκαετία για την επίλυση τεχνικών προβλημάτων. Οι εφαρμογές αναφέρονται σε τρεις κατηγορίες:

- α) δοκιμές για τη θεμελίωση,
- β) τον προσδιορισμό του υδροφόρου οριζοντα και
- γ) την ανίχνευση υπόγειων εγκαταλελειμμένων μεταλλείων, θαμμένων σωλήνων και άλλων άχρηστων μεταλλικών αντικειμένων (Sharma 1997).

### 3. ΜΕΡΙΚΕΣ ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΕΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Για την επιτυχή έκβαση μιας γεωφυσικής έρευνας απαραίτητη είναι η γνώση των παρακάτω θεμελιωδών εννοιών σύμφωνα με τους Greenhouse and Gudjurgis (1997):

- Όριο ανιχνευσιμότητας στόχου
- Δειγματοληψία μετρήσεων
- Απεικόνιση στόχου
- Ανίχνευση και ευκρίνεια (διακριτική ικανότητα στόχου)
- Βάθος διεύθυνσης/έρευνας της γεωφυσικής μεθόδου
- Αξιοβία των μετρήσεων
- Επεξεργασία των δεδομένων
- Ερμηνεία των γεωφυσικών αποτελεσμάτων

Πίνακας 1

Γεωφυσική Μέθοδος	Μέτρηση Φυσικής Ιδιότητας	Εφαρμογές (βλ. αριθμούς κλειδιά παρακάτω)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Βαρυτική	Πυκνότητα	✓	✓	S	S	S	S	-	-	S	-
Μαγνητική	Επιδεκτικότητα	✓	✓	✓	S	-	?	-	✓	✓	-
Σεισμική διάθλαση	Ελαστικές σταθερές Πυκνότητα	✓	✓	?	✓	S	S	-	-	-	-
Σεισμική ανάκλαση	Ελαστικές σταθερές Πυκνότητα	✓	✓	?	S	S	?	-	-	-	-
Ηλεκτρική	Ειδική αντίσταση	?	?	✓	✓	✓	✓	✓	S	✓	?
SP	Διαφορές δυναμικού	-	-	✓	?	✓	?	?	?	-	-
IP	Ειδική αντίσταση Χωρητικότητα	?	?	✓	?	S	?	?	?	?	?
Ηλεκτρο μαγνητική EM	Αγωγιμότητα Αυτεπαγωγή	S	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	?
VLF	Αγωγιμότητα Αυτεπαγωγή	?	?	✓	?	S	S	S	?	?	-
Γεωραντάρ GPR	Διηλεκτρική σταθερά Αγωγιμότητα	-	-	?	✓	✓	✓	S	✓	✓	✓

✓, η πλέον κατάλληλη μέθοδος, S, δευτερεύουσα μέθοδος, ?, μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιφύλαξη, -, ακατάλληλη μέθοδος

#### Εφαρμογές

- 1 Έρευνα υδρογονανθράκων (λιγνίτη, αερίων, πετρελαίων, κ.α)
- 2 Μελέτη γεωλογικών μακροδομών (περιοχές μεγαλύτερες από 100 km<sup>2</sup>)
- 3 Μεταλλευτική έρευνα
- 4 Γεωτεχνική έρευνα
- 5 Υδρογεωλογικές έρευνες
- 6 Εντοπισμός υπόγειων στρώσεων και εγκοίλων
- 7 Χαρτογράφηση διαρροών και μολυσμένων υπόγειων περιοχών
- 8 Εντοπισμός και καθορισμός θαμμένων μεταλλικών αντικειμένων
- 9 Αρχαιομετρία
- 10 Διανιζή έρευνα

Η πιο βασική παράμετρος για τη διεξαγωγή μιας γεωφυσικής έρευνας είναι η **ανίχνευσιμότητα του στόχου**. Η ανίχνευση του στόχου απαιτεί μεγάλες αντιθέσεις στις φυσικές ιδιότητες και κατάλληλους συντελεστές στη κλίμακα και το σχήμα του στόχου με το περιβάλλον μέσο. Η ανίχνευση συνήθως καθορίζεται από ένα ελάχιστο αριθμό ιδιοτήτων του στόχου. Π.χ. ένας μολυσμένος χώρος πάχους 4 μέτρων και σε βάθος 10 μέτρων μπορεί να ανιχνευθεί με ένα EM όργανο μέτρησης της αγωγιμότητας, αλλά όχι σε βάθος 40 μέτρων.

Η επιλογή του διαστήματος **δειγματοληψίας** και η απόσταση μεταξύ των γεωφυσικών προφίλ, παίζει σπουδαίο ρόλο στην ανίχνευση του στόχου. Με τη λήψη αραίων μετρήσεων κατά μήκος τραπεζοσών σε μεταξύ τους απόσταση αρκετά μεγάλη, είναι δυνατόν να μη ανιχνευθεί καθόλου ο στόχος. Επίσης, η αραία δειγματοληψία μπορεί να δημιουργήσει και επιπλέον κλάσεις στόχων που να μην ανιχνεύονται. Η επαναδιάπλωση των συχνοτή-

των μιας κυματομορφής, με συνέπεια να μην αποτυπωθεί πλήρως. Π.χ. ένα σιδερένιο βαρέλι σε βάθος 2 μέτρων δημιουργεί μια μαγνητική ανωμαλία στην επιφάνεια του εδάφους, της οποίας το πλάτος είναι διπλάσιο του βάθους του βαρελιού. Μια δειγματοληψία των μαγνητικών μετρήσεων ανά 5 μέτρων θα αστοχούσε να ανιχνεύσει το θαμμένο βαρέλι.

Η **απεικόνιση** του στόχου χρησιμοποιείται για να περιγράψει το αποτέλεσμα της γεωφυσικής έρευνας. Με απλοποιημένες τεχνικές η απεικόνιση μπορεί να είναι ασαφής. Με άλλες τεχνικές όπως, στη σεισμική ανάκλιση, το γεωραντάρ, η απεικόνιση του στόχου είναι ορατή και μπορούν να παραχθούν και τρισδιάστατες απεικονίσεις του περιβάλλοντος αυτού όγκου.

Η ανίχνευση του στόχου είναι η μια βασική παράμετρος αλλά ενδιαφέρει επίσης η **ευκρίνεια** του. Η ανίχνευση π.χ. ενός θαμμένου βαρελιού είναι σχετικά μια εύκολη διαδικασία. Η αναγνώριση όμως ατομικών (ανεξάρτητων) βαρελιών ίσως είναι ένα δυσκολότερο πρόβλημα. Επίσης, η αναγνώριση του βάθους της οροφής και του πυθμένα ενός βαρελιού είναι ένα δύσκολο πρόβλημα. Η ευκρίνεια ή διακριτική ικανότητα ορίζεται ως η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο διαφορετικών στόχων ή χαρακτηριστικών του ίδιου στόχου, κατά την οποία μπορούν ανεξάρτητα να αναγνωρισθούν με βάση μια δεδομένη γεωφυσική μέθοδο, σε μονάδες μήκους.

Η ενέργεια που χρησιμοποιείται (π.χ. DC ηλεκτρική, σεισμική και ηλεκτρομαγνητική, κ.α.) στις ενεργητικές γεωφυσικές μεθόδους, έχουν θεωρητικά άπειρο βάθος διεύθυνσης. Πρακτικά όμως λόγω μετατροπής της διοχετευόμενης ενέργειας σε άλλες μορφές (θερμική, δυναμική, κ.α.), το ενεργό βάθος είναι πεπερασμένο. Ως **βάθος έρευνας** μπορεί να ορισθεί το μέγιστο βάθος ανίχνευσης ενός στόχου ενδιαφέροντος, σε ένα ορισμένο περιβάλλον και με μια δεδομένη γεωφυσική μέθοδο.

Οι γεωφυσικές μετρήσεις μπορεί να είναι πολύ **ακριβείς**, αλλά δεν μπορεί να επιτευχθεί το ίδιο για τη γεωφυσική ερμηνεία. Η αντιστροφή των γεωφυσικών δεδομένων υπό μορφή υπεδαφικής δομής, η οποία είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία τους, δεν είναι μοναδική.

Η γεωφυσική απεικόνιση είναι το αποτέλεσμα ενός ή περισσότερων σταδίων **επεξεργασίας δεδομένων** των αρχικών μετρήσεων. Η επεξεργασία μπορεί να είναι ένας απλός προγραμματισμός των δεδομένων και η παρουσίαση τους ή η εφαρμογή πολύπλοκων πράξεων που στόχο έχουν την απαλλαγή τους από ανεπιθύμητο θόρυβο ή την μεγέθυνση τάσεων/γεγονότων που ενδιαφέρουν. Έτσι, αναπόφευκτα υπεισέρχεται ο υποκειμενικός παράγοντας όχι τόσο στην επεξεργασία αυτή καθ' εαυτή, αλλά στην επιλογή της μεθόδου επεξεργασίας. Η γεωφυσική επεξεργασία των δεδομένων περιλαμβάνει τις εξής κυρίως πράξεις:

- Φιλτράρισμα των δεδομένων για εξομάλυνση ή όξυνση των ανωμαλιών.
- Αντίστροφο φίλτράρισμα ή αποσυνέλιξη των δεδομένων για επαναφορά των επιδράσεων του φίλτραρισματος που προκρίνεται από τα όργανα ή τη γη αυτή καθ' εαυτή.
- Επανατοποθέτηση δεδομένων ή διαδικασία migration, κατά την οποία διορθώνονται οι αποκλίσεις της απεικόνισης του στόχου, που παράγονται από κεκλιμένες και μη επίπεδες επιφάνειες όπως, ρήγματα και αντισλινικές μορφές.
- Η διαδικασία παρεμβολής σημείων, κατά την οποία μερικές φορές ακολουθείται αυθαίρετη τεχνική για τη σύνδεση των σημείων μέτρησης.

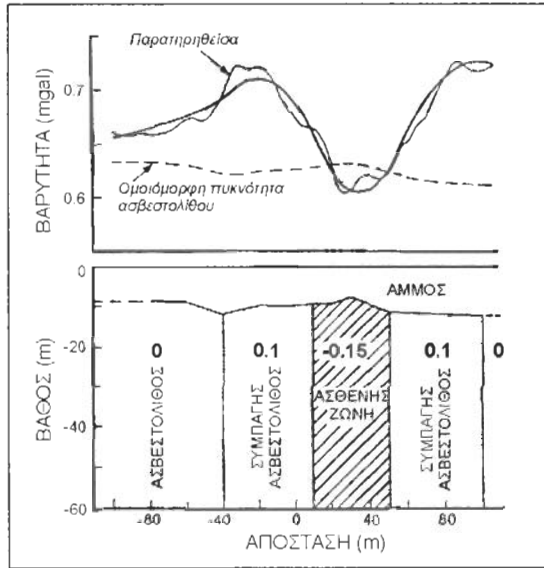
Μετά το στάδιο της επεξεργασίας ακολουθεί η **ερμηνεία** των αποτελεσμάτων. Η ερμηνεία στηρίζεται κυρίως στην εμπειρία του γεωφυσικού και ουσιαστικά επιτυγχάνεται η αντιστοίχιση των φυσικο-μαθηματικών μοντέλων που παράγονται μετά την επεξεργασία των δεδομένων, με τη γεωλογική δομή της περιοχής έρευνας. Ο υποκειμενικός παράγοντας είναι έντονος στην ερμηνεία των γεωφυσικών αποτελεσμάτων και μπορεί να διαφέρει και μεταξύ ειδικών.

#### **4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΡΗΧΩΝ ΣΤΟΧΩΝ**

Για την επιτυχή έκβαση μιας γεωφυσικής έρευνας παίζουν ρόλο πολλοί παράγοντες που ήδη έχουν αναφερθεί παραπάνω. Η επιλογή της πλέον κατάλληλης γεωφυσικής μεθόδου είναι πρωταρχικής σημασίας για την επίλυση ενός γεωτεχνικού ή περιβαλλοντικού προβλήματος. Είναι σύνθηος το φαινόμενο να υπάρχουν διαφορετικές απόψεις εφαρμογής μιας γεωφυσικής μεθόδου μεταξύ των γεωτεχνικών και των γεωφυσικών για την επίλυση ενός συγκεκριμένου γεωτεχνικού προβλήματος. Είναι απαραίτητο να διευκρινισθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα μιας εκάστης των γεωφυσικών μεθόδων, ώστε να φανερί η κατάλληλότητα τους για τη διερεύνηση του συγκεκριμένου στόχου. Στις επόμενες παραγράφους θα γίνει αναφορά για κάθε μια χωριστά γεωφυσική μέθοδο που χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση ρηχού στόχου.

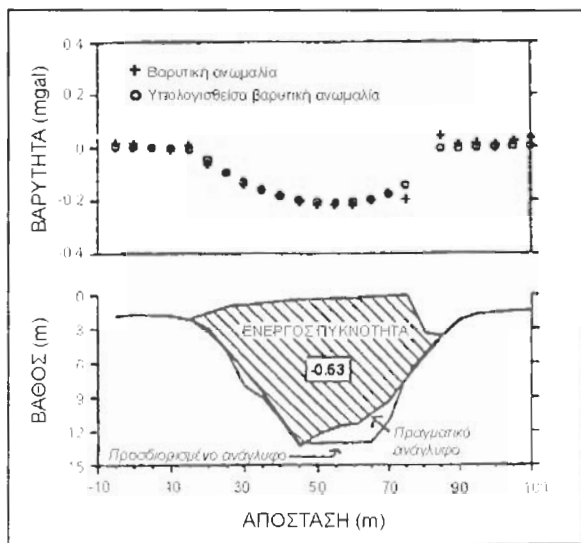
#### 4.1 ΒΑΡΥΤΙΚΗ

Οι βαρυτικές διασπορήσεις μετρούν βασικά πλευρικές ή κατακόρυφες μεταβολές της πυκνότητας στο υπέδαφος. Η πυκνότητα των υλικών δεν παρουσιάζει μεγάλες αντιθέσεις (συνήθη υλικά μεταξύ 1.7-2.7  $\text{gr/cm}^3$ ), με συνέπεια πολλές φορές να μην είναι εφικτός ο διαχωρισμός της φύσης των γεωλογικών σχηματισμών που συναντώνται στην περιοχή έρευνας. Οι μετρήσεις υπαίθρου απαιτούν διορθώσεις, οι οποίες πολλές φορές είναι προσεγγιστικές και επίπονες (π.χ. τοπογραφικές). Απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στον προσδιορισμό του υψομέτρου (μερικά mm) και στον προσδιορισμό της πυκνότητας των σχηματισμών που συνέρχονται στην περιοχή έρευνας. Όσον αφορά την ερμηνεία των βαρυτικών ανωμαλιών (ανωμαλίες Bouguer) υπάρχει το πρόβλημα της μη μοναδικής λύσης που συναντάται στα δεδομένα των δυναμικών πεδίων. Στην πράξη βέβαια βοηθούν ορισμένες γεωλογικές ή γεωφυσικές πληροφορίες άλλων μεθόδων, στην απόκτηση μιας αποδεκτής γεωλογικά λύσης. Οι βαρυτικές ανωμαλίες αντικειμένων των οποίων οι διαστάσεις είναι μικρές συγκριτικά με το βάθος που βρίσκονται, ελαττώνονται κατά  $1/r^2$ , δηλαδή πολύ λιγότερο από τις αντίστοιχες μαγνητικές ανωμαλίες ( $1/r^3$ ). Στα σχήματα 1 και 2 φαίνονται δύο εφαρμογές βαρυτικής διασκόπησης για τον εντοπισμό υδροφόρου ορίζοντα σε κατακεραματισμένο ασβεστόλιθο και την απεικόνιση του πυθμένα χώρου υγειονομικής ταφής, αντίστοιχα. Η βαρυτική μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για τον εντοπισμό εγκοίλων σε καρστικό περιβάλλον (Barrows and Fett 1985, Butler 1984). Η βαρυτική μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί σε περιβάλλον "βιομηχανικού" θορύβου, εκεί που αποκλείονται ΕΜ, ηλεκτρικές ή ακόμη σεισμικές μέθοδοι.



Σχήμα 1. Βαρυτική ανωμαλία πάνω από υδροφόρο ασβεστόλιθο σε περιοχή της Φλόριδας Αμερικής. Η χαμηλή τιμή συμπίπτει με τη θέση της κατακεραματισμένης ζώνης, όπου το έδαφος αντικαθιστά μέρος του συμπαγούς ασβεστόλιθου (από Stewart and Wood 1990).

Figure 1. Gravity data over limestone aquifer, Florida. Note gravity low coinciding with fractured zone, where water replaces some small portion of the denser rock matrix (after Stewart and Wood 1990).



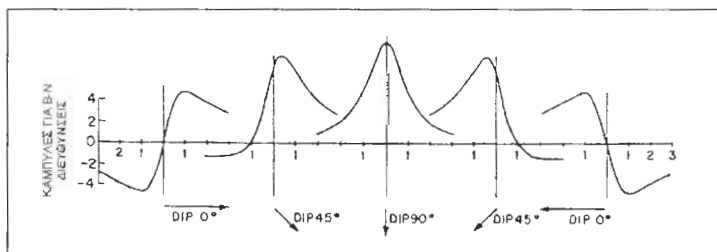
Σχήμα 2. Προσομοίωση του αναγλύφου Χ.Υ.Τ.Α. και συσχέτιση με το πραγματικό ανάγλυφο, με βάση τα δεδομένα βαρυτικής έρευνας ( από Roberts et al. 1990).

Figure 2. Forward-modelled gravity data over a landfill area (after Roberts et al. 1990).

#### 4.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ

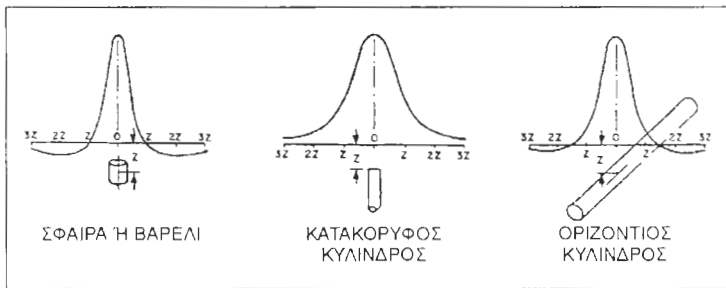
Στην περιβάλλοντιζη γεωφυσική η μαγνητική μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για τον εντοπισμό θαμμένων μεταλλικών αντικειμένων. Χρησιμοποιείται επίσης για την εκτίμηση του πάχους του αλλοβιακού καλύμματος ή ιζηματογενών σχηματισμών πάνω από μαγνητικό 'υπόβαθρο'. Συνήθως μετρείται η συνολική ένταση του γήινου μαγνητικού πεδίου με στόχο την αναγνώριση υψηλών και χαμηλών τιμών που υποδηλώνουν την ύπαρξη σιδηρο-μαγνητικών υλικών. Επί πλέον μετρείται η κατακόρυφη βαθμίδα του μαγνητικού πεδίου με τη λήψη δύο μετρήσεων σε διαφορετικά υψόμετρα ταυτοχρόνως. Τυπικές ανωμαλίες στόχων ενδιαφέροντος (π.χ. θαμμένο μεταλλικό βαρέλι) έχουν τιμές μικρότερες από 2000 gammas.

Απαιτείται η καταγραφή της ημερήσιας πορείας του γήινου μαγνητικού πεδίου σε ένα σταθμό αναφοράς, για την εφαρμογή διορθώσεων. Συνήθως, εφαρμόζεται μια μεγάλη ποικιλία φίλτρων ή τεχνικών μεγέθυνσης του σήματος, που χρησιμοποιούνται εξίσου καλά στις μαγνητικές και βαρυτικές μετρήσεις (Broome 1991). Η μαγνητική ανωμαλία που οφείλεται στην παρουσία ενός διπολικού αντικειμένου, π.χ. ενός βαρελιού, ελαττώνεται κατά  $1/r^3$ . Έτσι, το πλάτος της ανωμαλίας ελαττώνεται απότομα με το βάθος και περιορίζει την ανίχνευση ενός μόνο βαρελιού στα 2 μέτρα (Hinze 1990). Οι μαγνητικές μετρήσεις επηρεάζονται από την παρουσία κτιρίων, μεταλλικών φρακτών, ηλεκτρικών γραμμών, οχημάτων και σιδηρομετάν. Οι μαγνητικές ανωμαλίες είναι διπολικές, παρουσιάζοντας πάντοτε θετικές και αρνητικές τιμές. Στα σχήματα 3 και 4 παρουσιάζονται οι αποχρώσεις των μαγνητικών ανωμαλιών που παράγονται πάνω από ένα κεκλιμένο φύλλο (λεπτό μέταλλο), μια σφαίρα (βαρέλι), ένα κατακόρυφο και οριζόντιο κύλινδρο (μεταλλικός σωλήνας).



Σχήμα 3. Ανωμαλίες ολικής έντασης του μαγνητικού πεδίου σε Β-Ν διευθύνσεις, που προκαλούνται από κεκλιμένα φύλλα σε μαγνητική έγκλιση 75 μοιρών (από Reford 1964).

Figure 3. Total field magnetic intensity anomalies in B-N directions, caused by inclined sheets with magnetic inclination 75 degrees (after Reford 1964).



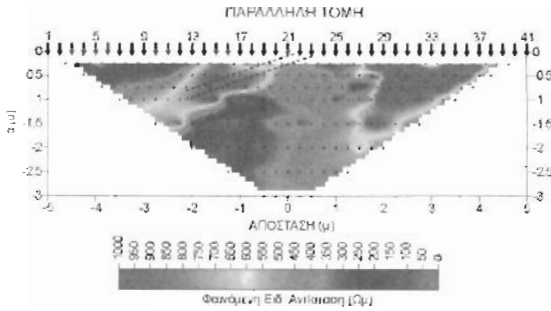
Σχήμα 4. Ανωμαλίες ολικής έντασης του μαγνητικού πεδίου που προκαλούνται από σφαίρα, κατακόρυφο και οριζόντιο κύλινδρο σε μαγνητική έγκλιση 90 μοιρών.

Figure 4. Total field magnetic profiles caused by a sphere, vertical and horizontal cylinder at magnetic inclination 90 degrees.

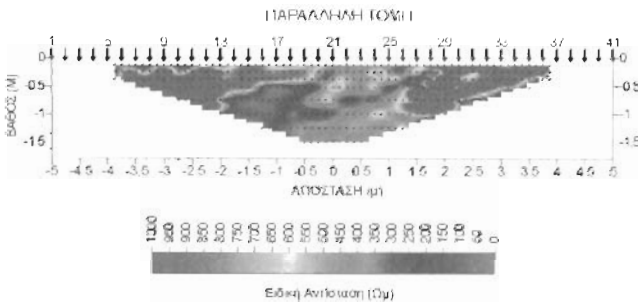
### 4.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ

Οι ηλεκτρικές διατάξεις είναι από τις πιο παλιές γεωφυσικές τεχνικές που έχουν εφαρμοστεί και παραμένουν χρήσιμες σήμερα όπως πριν από 50 χρόνια. Το χαμηλό κόστος και οι απλές απαιτήσεις οργάνων καθιστούν πλέονεκτικές τις ηλεκτρικές τεχνικές έναντι των άλλων γεωφυσικών μεθόδων. Η φυσική ιδιότητα που μετρείται είναι η αγωγιμότητα ή η ειδική αντίσταση των γεωλογικών σχηματισμών. Οι γεωηλεκτρικές διαχωρίσεις περιλαμβάνουν τεχνικές οριζόντιας χαρτογράφησης ή βαθσοζόησης, ή/και τις δύο ταυτόχρονας. Η βαθσοζόηση φρευνά τη κατακόρυφη μεταβολή της ειδικής αντίστασης και εφαρμόζεται όπου η γεωλογία παρουσιάζει οριζόντια ή ελαφρώς κεκλιμένα στρώματα και πλευρικά ομογενείς σχηματισμούς. Οι διατάξεις που έχουν κυρίως χρησιμοποιηθεί στην υδρογεωλογία είναι η Wenner, η Schlumberger και η Dipole-dipole. Στην οριζόντια χαρτογράφηση η πλευρική κατανομή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης εξετάζεται και απεικονίζεται σε διδιάστατη κυρίως μορφή ως "ψευδοτομή" και στη συνέχεια προσδιορίζεται ποσοτικά η διδιάστατη κατανομή της ειδικής αντίστασης με τη δημιουργία διαδοχικών μοντέλων, μέχρι να ληφθεί η optimum λύση μεταξύ των μετρήσεων υπαίθρου και των υπολογισθεισών τιμών φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Οι μετρήσεις υπαίθρου επηρεάζονται από το "βιομηχανικό" θόρυβο, τη κακή επαφή των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμισμού με το έδαφος, κ.α. Πολλές φορές συνδυάζεται με άλλες γεωφυσικές μεθόδους όπως, ηλεκτρομεγνητικές, σεισμικές και ελασόμενες πόλωσης. Μεγάλη έμφαση έχει δοθεί σήμερα στη διδιάστατη παρουσίαση των γεωηλεκτρικών αποτελεσμάτων για την επίλυση τόσο περιβαλλοντικών όσο και γεωτεχνικών προβλημάτων. Η ηλεκτρική μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην αρχαιομετρία, στον εντοπισμό ασθενών ή ρηξιγενών ζωνών, στον εντοπισμό εγχοίλων, κ.α. Παρακάτω αναφέρεται μια πρόσφατη εφαρμογή στους στίλους του Ολυμπίου Διός, όπου χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της γεωηλεκτρικής τομογραφίας για την ανίχνευση και εντοπισμό εγχοίλων στον αρχαιολογικό χώρο. Στο σχήμα 5α φαίνεται η "ψευδοτομή" πάνω από γνωστό έγχοιλο (σχήμα 5γ) και στο σχήμα 5β η κατανομή της ειδικής αντίστασης μετά την μονοδιάστατη αντιστροφή των μετρήσεων υπαίθρου με τη διάταξη Wenner. Στο σχήμα 6 φαίνονται δύο ανωμαλίες ( $> 1000 \Omega\mu$ ), μεταξύ των θέσεων 6-8 και 32-36 αντίστοιχα, που υποδηλώνουν είτε την ύπαρξη εγχοίλων σε μικρό βάθος ή την παρουσία σώματος υψηλής ειδικής αντίστασης, π.χ. μαρμάρου. Πράγματι εντοπίστηκε μικρή έκταση έγχοιλο στις θέσεις 32-36 μετά το πέρας των εργασιών υπαίθρου και την παράδοση της σχετικής μελέτης.

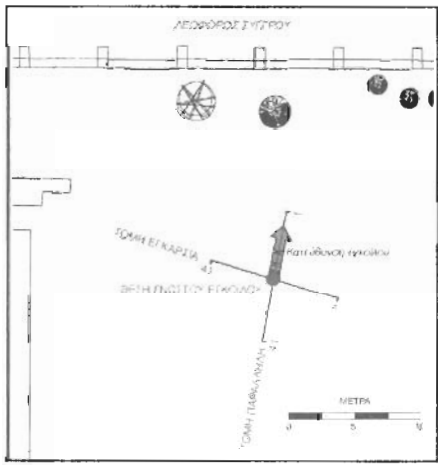




(α)



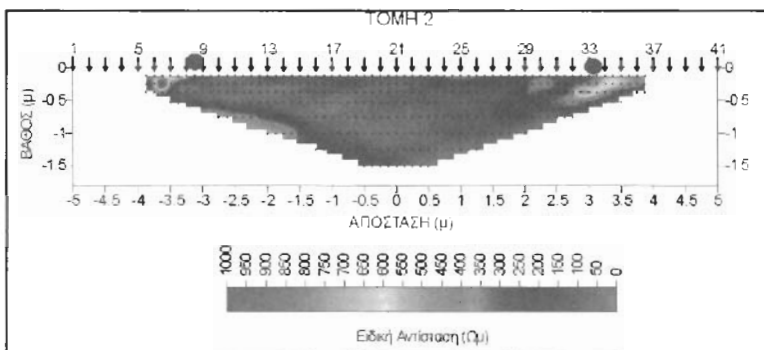
(β)



(γ)

Σχήμα 5. Απεικόνιση α) της φαινόμενης ειδικής αντίστασης (ψευδο-τομής) και β) της ψευδο-διωδιάστατης ειδικής αντίστασης (μονοδιάστατης αντιστροφής δεδομένων της διάταξης Wenner), πάνω από γνωστό κεκλιμένο ξγγκολο στον αρχαιολογικό χώρο των στύλων που Όλυμπίου Λιός (γ).

Figure 5. Representation of a) apparent resistivity (pseudo-section) and b) 2-D pseudo-section of resistivity (based on 1-D inversion of Wenner data), over a known inclined cave in the archaeological area of the Olympus Zeus Column.

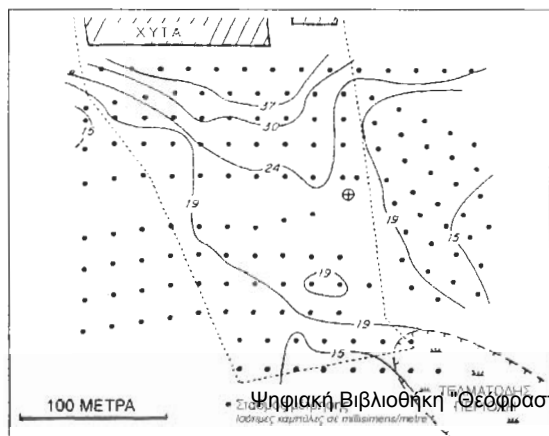


Σχήμα 6. Απεικόνιση της διδιάστατης κατανομής της ειδικής αντίστασης κατά μήκος της γεωηλεκτρικής τομής Νο 2, εντός του αρχαιολογικού χώρου των στύλων του Ολυμπίου Διός. Η ανωμαλία με ειδική αντίσταση >1000 Ωμ υποδηλώνει τη θέση ενός εγκοίλου σε μικρό βάθος ή την παρουσία σώματος υψηλής ειδικής αντίστασης, π.χ μαρμάρου. Στις θέσεις 32-36 εντοπίστηκε εγκοίλο σε μικρό βάθος.

Figure 6. Representation of 2-D resistivity pseudo-section along a profile in the archaeological area of the Olympus Zeus Columns. The resistivity anomaly of over 1000 Ohm.m indicates either the location of a cave in shallow depth or the presence of high resistivity body, i.e. a piece of marble. Indeed in the area between the stations 32-36 an inclined cave was detected at shallow depth.

#### 4.4 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ

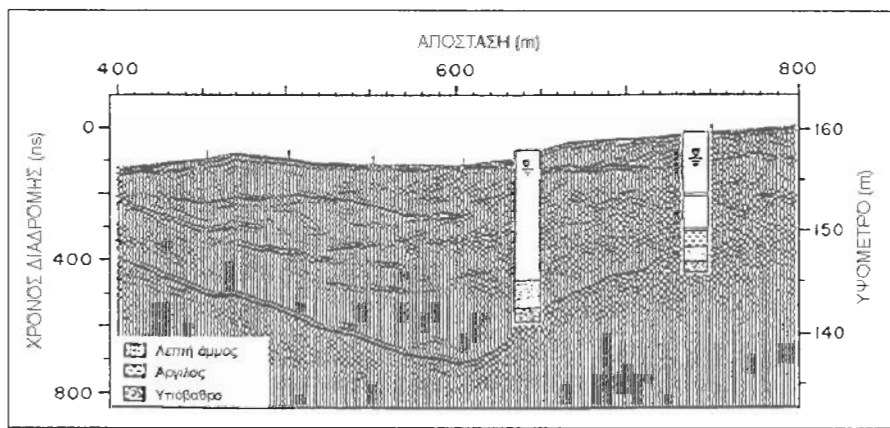
Ανάλογα με την εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου έχουν αναπτυχθεί επί μέρους τεχνικές και όργανα που χρησιμοποιούν τις αρχές της. Ο προσδιορισμός της εδαφικής αγωγιμότητας, ο εντοπισμός θαμμένων μεταλλικών αντικειμένων, η αρχαιομετρία, η μεταλλευτική έρευνα και η έρευνα υδρογεωλογικών στόχων είναι μερικές από τις εφαρμογές της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου. Είναι η λιγότερη αναπτυγμένη γεωφυσική μέθοδος στην Ελλάδα. Επηρεάζεται από την παρουσία του "βιομηχανικού" θορύβου και εφαρμόζεται σε "καθαρές" ηλεκτρικά περιοχές. Οι μετρήσεις εδαφικής αγωγιμότητας γίνονται συνήθως σε ζάνναβο διαστάσεων 0.5 ή 1.0 μέτρου και το όργανο (EM-31 ή EM-34 της Geonics) μετρά τις μέσες τιμές υπεδιαφικών όγκων που έχουν διαστάσεις περίπου ίσες με την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Η απόκριση των οργάνων μέτρησης της εδαφικής αγωγιμότητας εξαρτάται από τον προσανατολισμό των στόχων σε σχέση με τη διεύθυνση διεξαγωγής των μετρήσεων. Εάν ο στόχος είναι μικρότερος από την απόσταση πομπού-δέκτη η απόκριση θα είναι διπολική. Εάν ο στόχος είναι πιο αγωγίμος από το περιβάλλον πέτρωμα τότε το αποτέλεσμα θα είναι ένας αθητικός πόλος που θα συνορεύει με δύο θετικές περιοχές. Άλλες ενδιαφέρουσες παράμετροι είναι το μέγεθος, το βάθος και ο βαθμός χημικής διάβρωσης του στόχου. Στο σχήμα 7 παρουσιάζεται μια εφαρμογή οργάνου EM-34 σε περιοχή της Βραζιλίας, όπου σημειώνεται η διάδοση της μόλυνσης από ένα χώρο υγειονομικής ταφής προς μια βαλτώδη περιοχή. Ως ανιχνευτής μετάλλου χρησιμοποιείται κυρίως το EM-61 της Geonics, το οποίο μπορεί να ανιχνεύσει ένα δοχείο 10 lt σε ένα βάθος 3 μέτρων.



Σχήμα 7. Ένα παράδειγμα EM-34 εφαρμογής στη Βραζιλία. Εδώ παρατηρείται διάχυση των μολυσματικών παραγόντων από ένα χώρο Χ.Υ.Τ.Α. προς μια τελματώδη περιοχή, περνώντας κάτω από αγροτική κατοικία και μολύνοντας το νερό της γεώτρησης (κύκλος με σταυρό). Από Monier-Williams et.al. 1990.

Figure 7. An EM-34 survey in Brazil. Leachate from a landfill moves toward discharge in a swamp area, passing under a farmhouse and contaminating its well (crossed circle). After Monier-Williams et.al. 1990.

Σε σχέση με το μαγνητόμετρο έχει το πλεονέκτημα ότι παρουσιάζει ανωμαλία μιας πολικότητας, η οποία κεντράζεται στο στόχο. Το βάθος του στόχου υπολογίζεται ικανοποιητικά από το πλάτος της ανωμαλίας. Πλεονεξεί δε έναντι και του γεωραντάρ διότι μπορεί να ανιχνεύσει μεταλλικά αντικείμενα σε περιβάλλοντα πλούσια σε αργιλικό υλικό. Δεν αποδίδει στην παρουσία επιφανειακού καλύμματος σιδηρομετών. Η τεχνική HLEM ή Slingram (οριζόντια πηνία πομπού-δέκτη), έχει κυρίως εφαρμοσθεί στη μεταλλευτική έρευνα για τον εντοπισμό κοιτασματολογικών στόχων μέχρι βάθους 100 μέτρων. Αν και δεν έχει εφαρμοσθεί ευρέως στη τεχνική και περιβαλλοντική γεωφυσική, εν τούτοις είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική που μπορεί να καλύψει μεγαλύτερα βάθη από τις δύο προηγούμενες τεχνικές που αναφέρθηκαν. Ένα πολύ καλό παράδειγμα αυτής της τεχνικής αναφέρεται από τους Palacky and Stephens (1990). Υπάρχουν πολλές άλλες εφαρμογές ηλεκτρομαγνητικών τεχνικών όπως, VLF-R, TDEM (μετρήσεις στο πεδίο των χρόνων), και EM μετρήσεις από αέρος, κ.α., που στόχο έχουν τη διερεύνηση μεγαλο-δομών. Τέτοιες δομές είναι η παρουσία ορηγμάτων, υδρογεωλογικοί στόχοι μεγάλου βάθους για τον έλεγχο π.χ. της μόλυνσης του υδροφόρου οριζοντα και γενικότερα για τον εντοπισμό υδροφόρων οριζόντων σε μεγάλες εκτάσεις. Η εφαρμογή του γεωραντάρ (GPR) είναι μια επί πλέον EM μέθοδος διασκόπησης. Αν και στηρίζεται στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας εύρους 10 - 1000 MHz, εν τούτοις μοιάζει πολύ με τη μέθοδο της σεισμικής ανάγλυψης. Το γεωραντάρ χρησιμοποιείται κυρίως στη χατογράφηση της υπεδάφιας στρωματογραφίας, τον εντοπισμό θαμμένων μεταλλικών και μη μεταλλικών αντικειμένων, όπως δοχείων ή βαρελιών, θεμελιώσεις κτιρίων, στην ανίχνευση ορισμένων μολυσματικών συστατικών στο ύδωρ και τον εντοπισμό της στάθμης του υδροφόρου οριζοντα. Το βάθος έρευνας εξαρτάται από τη συχνότητα εκπομπής που προσαρτάται στο γεωραντάρ και στην εξασθένιση του σήματος που ελέγχεται από την αγωγιμότητα του μέσου. Π.χ. σε περιβάλλοντα με μικρή αγωγιμότητα το βάθος έρευνας ξεπερνά τα 20 μέτρα. Η κατακόρυφη ευκρίνεια είναι 1/4 του κυρίαρχου μήκους κύματος. Στο σχήμα 8 φαίνεται μια εφαρμογή γεωραντάρ για την απεικόνιση της στρωματογραφίας, του αναγλύφου του υποβάθρου και της στάθμης του υδροφόρου οριζοντα.



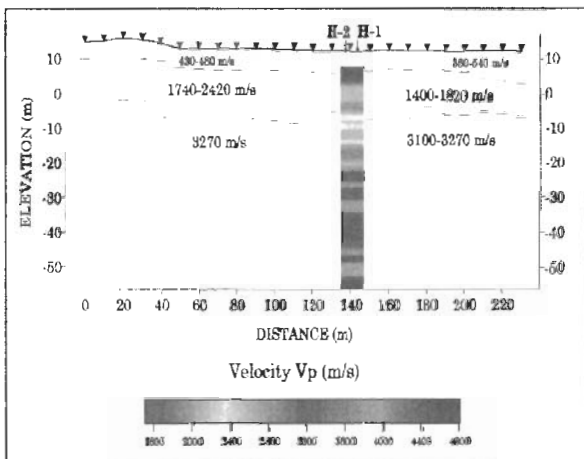
Σχήμα 8. Καταγραφή γεωραντάρ που απεικονίζει το ανάγλυφο του υποβάθρου με υπερχείμενο κάλυμμα αποτελούμενο από άργιλο και άμμο σε περιοχή του Οντάριο Καναδά (από Davis and Annan 1989).

Figure 8. Radar record showing bedrock topography and silt/sand layering in overburden, Ontario (after Davis and Annan 1989).

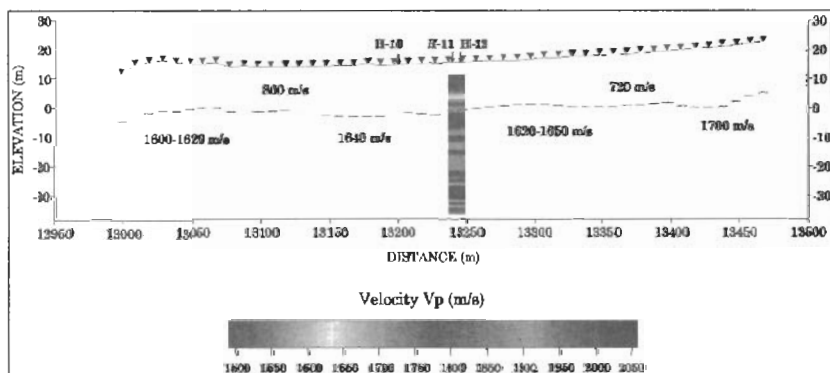
#### 4.5 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι σεισμικής διασκόπησης, η διάθλαση και η ανάγλυση. Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί η μέθοδος της σεισμικής τομογραφίας σε γεωτεχνικές εφαρμογές. Επίσης, οι σεισμικές μέθοδοι crosshole & downhole (uphole), χρησιμοποιούνται αρκετά χρόνια στη γεωτεχνική έρευνα. Στις σεισμικές μεθόδους παράγεται ενέργεια υπό μορφή P (επιμήκων) κυμάτων και S (εγκάρσιων) κυμάτων και η χρησιμοποιείται τους στηρίζεται στις αντιθέσεις των ακουστικών ιδιοτήτων μεταξύ των γεωλογικών υλικών. Αυξάνομενη χρήση παρατηρείται της μεθόδου SASW (Φασματική ανάλυση επιφανειακών κυμάτων), για επί τόπου μετρήσεις της κατακόρυφης κατανομής των εγκάρσιων κυμάτων, τα οποία παρακολουθούν παραλήψεις σεισμικές ταχύτητας με τα επιφανειακά κύματα. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου, η συχνότητα των κυμάτων που χρησιμοποιούνται από μερικά Hz έως μερικές εκατοντάδες Hz, μπορεί να ληφθεί με λεπτομέρεια η κατανομή της ταχύτητας των

εγχαρσίων κυμάτων μέχρι βάθους 60 μέτρων. Η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης «παραδοσιακά» έχει χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση του «υποβάθρου» κάτω από ένα επιφανειακό κάλυμμα. Η μέθοδος παρουσιάζει τους εξής περιορισμούς: α) η σεισμική ταχύτητα πρέπει να αυξάνει μετά του βάθους και β) παρεμβολή λεπτού ή στρώματος χαμηλής ταχύτητας (αντιστροφή ταχύτητας) μεταξύ στρωμάτων υψηλότερης ταχύτητας, δεν μπορεί να ανιχνευθεί. Το βάθος έρευνας και η ευκρίνεια της μεθόδου είναι κατώτερα εκείνων της μεθόδου σεισμικής ανάκλασης. Για ρηχές διασκοπήσεις αναδεικνύεται η πλέον χρήσιμη μέθοδος ιδιαίτερα σε γεωτεχνικές εφαρμογές. Στο σχήμα 9α παρουσιάζεται μια εφαρμογή στην περιοχή του Ηρακλείου Κρήτης, που διεξήχθη στα πλαίσια της μικροζωνικής μελέτης της περιοχής. Στο σχήμα 9β απεικονίζεται μια άλλη σεισμική τομή στην ίδια περιοχή, αλλά το επιφανειακό κάλυμμα αποτελείται από λεπτές ενδιάστρώσεις αργίλων και άμμων (μη ομογενές κάλυμμα), χωρίς την παρουσία διακριτών στρωμάτων. Στην περίπτωση αυτή προσδιορίστηκε μια μέση σεισμική ταχύτητα για το κάλυμμα και το βάθος (ανάγλυφο) του υποβάθρου με τη μέθοδο GRM, λαμβάνοντας υπόψη τη μέση αυτή ταχύτητα και τη σεισμική ταχύτητα του υποβάθρου.



(α)

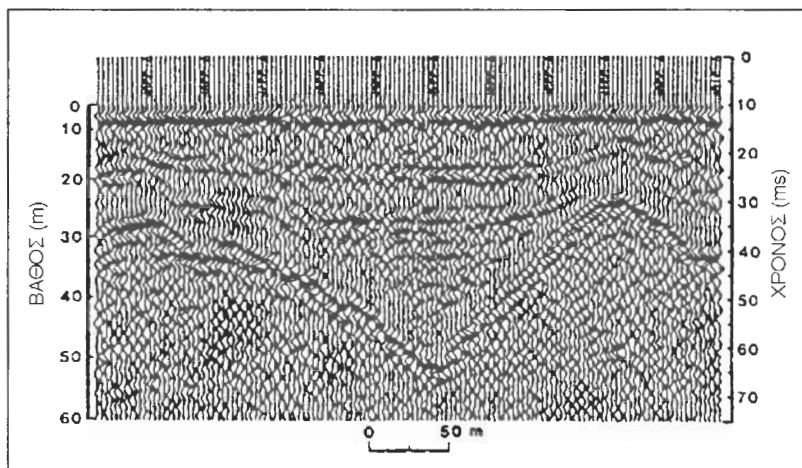


(β)

**Σχήμα 9.** Απεικόνιση δύο γεωσεισμικών τομών στην περιοχή Ηρακλείου Κρήτης, που δείχνουν, α) σαφή και διακριτά γεωσεισμικά στρώματα, με καλή συμφωνία των δεδομένων crosshole του ζεύγους γεωτρήσεων H1-H2 και β) τη μέση σεισμική ταχύτητα του υπερκείμενου καλύμματος (με εύρος ταχυτήτων 720-800 m/s), λόγω της παρουσίας πολλών λεπτών ενδιάστρώσεων αργίλων και άμμων.

**Figure 9.** Representation of two seismic lines in the area of Heraklïon Crete showing, a) discrete seismic layers of good fitting with the crosshole data of the borehole pair H1-H2 and b) the average seismic velocities of the overburden due to the presence of many thin inter-bedded layers of silts and sands.

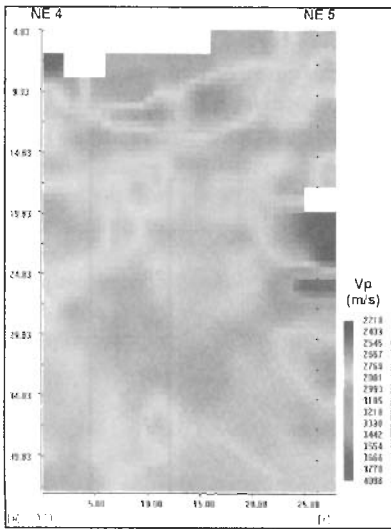
Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης χρησιμοποιείται κυρίως για βαθύτερους στόχους (>25 μ), όπως για τη μελέτη ιζηματογενών λεκανών, την απεικόνιση τεκτονικών χαρακτηριστικών, την υδρογεωλογία, κ.α. Η σεισμική ανάκλαση έχει χρησιμοποιηθεί με την παραγωγή κυρίως P κυμάτων για τη διερεύνηση βαθιών στόχων. Ένα παράδειγμα ρηχής διασκόπησης με τη μέθοδο σεισμικής ανάκλασης φαίνεται στο σχήμα 10.



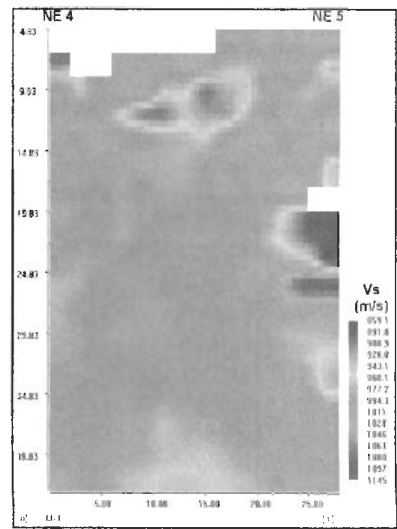
**Σχήμα 10.** Παράδειγμα ρηχής ανάκλασης με τη τεχνική 'optimum' απόσταση που απεικονίζει τη λεπτομερή δομή του υπερκείμενου καλύμματος σε περιοχή του Κεμπέκ (από Hunter et.al. 1989).

**Figure 10.** Optimum offset shallow reflection section detailing structure in the overburden at Quebec (after Hunter et.al. 1989).

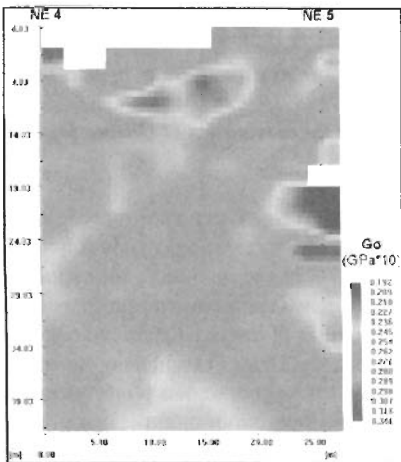
Λόγω της καλύτερης ευκρίνειας που παρουσιάζουν τα S κύματα έναντι των P κυμάτων αφενός και της μη επίδρασης αυτών από την παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα, έχει αρχίσει τα τελευταία χρόνια η παραγωγή και εφαρμογή S κυμάτων στη μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης. Η τεχνική της σεισμικής τομογραφίας έχει εφαρμοσθεί ανάμεσα σε ζεύγη γεωτρήσεων για το καθορισμό κυρίως των ελαστικών παραμέτρων (μέτρο ακαμψίας, μέτρο Young, λόγος Poisson) των μεταξύ αυτών χώρων. Στο σχήμα 11 απεικονίζονται τα αποτελέσματα μιας έρευνας που διεξήχθη στην περιοχή του Μετσόβου ανάμεσα σε ένα ζεύγος γεωτρήσεων για τον έλεγχο της κατάστασης του υλικού. Οι crosshole σεισμικές μετρήσεις απαιτούν την παρουσία δύο γεωτρήσεων, όπου η μια χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση του γεωφώνου/ων και η άλλη για την τοποθέτηση της σεισμικής πηγής (σεισμικό σφαιρί ή ελεύθερη πτώση της οβίδας του SPT μηχανισμού). Το ζεύγος γεωτρήσεων βρίσκεται συνήθως σε απόσταση 3-4 μέτρων. Είναι η πλέον χρησιμοποιηθείσα σεισμική μέθοδος στη γεωτεχνική έρευνα. Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει είναι α) τη δυσκολία εφαρμογής σε βάθη μεγαλύτερα των 40 περίπου μέτρων, β) τη δυσκολία αναγνώρισης της άφιξης των S κυμάτων, λόγω της μικρής απόστασης πηγής-δέκτη και της παρουσίας τυχαίου θορύβου που υπεισέρχεται και γ) τη ασυνεχή λήψη των μετρήσεων (κάθε 2 ή 3 μέτρα βάθος). Στο σχήμα 12 φαίνεται μια εφαρμογή στο νοσοκομείο των Αγίων Αναργύρων, όπου διεξήχθη στα πλαίσια εκτίμησης της αναμενόμενης ισχυρής εδαφικής κίνησης στον ευρύτερο χώρο του νοσοκομείου. Οι downhole (uphole) σεισμικές μετρήσεις απαιτούν τη διάνοιξη μιας μόνο γεώτρησης, όπου τοποθετείται το γεωφώνο/α και η σεισμική πηγή βρίσκεται εκτός πλάσιον (3-4 μ) της γεώτρησης. Η μέθοδος αυτή είναι πολύ χρήσιμη, αλλά χρήζει περαιτέρω ανάπτυξης. Στο σχήμα 13 απεικονίζεται μια εφαρμογή της τεχνικής downhole στην περιοχή του Μετσόβου.



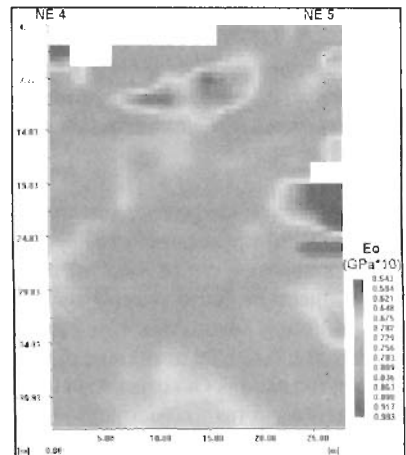
(α)



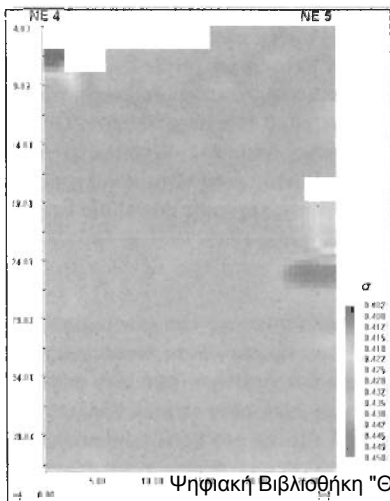
(β)



(γ)



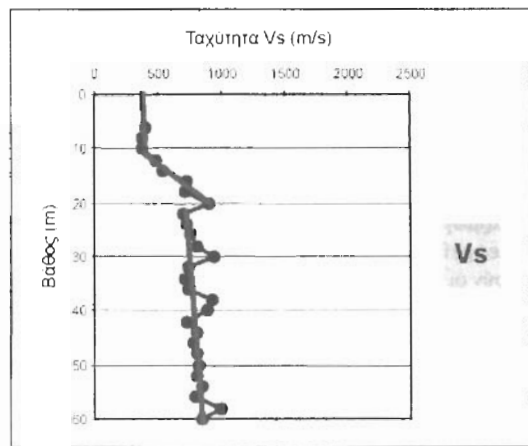
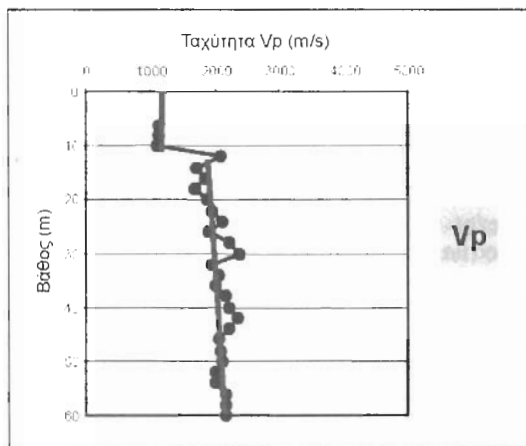
(δ)



(ε)

Σχήμα 11. Απεικόνιση των αποτελεσμάτων σεισμικής τομογραφίας στην περιοχή του Μετσόβου. Παρουσιάζονται οι διδιάστατες κατανομές α) της σεισμικής ταχύτητας  $V_p$ , β) της σεισμικής ταχύτητας  $V_s$ , γ) του μέτρου αζαμψιάς  $G_0$ , δ) του μέτρου Young  $E_0$  και ε) του λόγου Poisson  $\sigma$ . Για τον υπολογισμό των ελαστικών σταθερών χρησιμοποιήθηκε η μέση πυκνότητα  $2100 \text{ Kgr/m}^3$ .

Figure 11. Representation of seismic tomography results for the area of Metsovo. They are presented the 2-D distributions of a) seismic velocity  $V_p$ , b) seismic velocity  $V_s$ , c) the rigidity modulus  $G_0$ , d) the Young modulus  $E_0$  and e) the Poisson ratio  $\sigma$ . An average density of  $2100 \text{ Kgr/m}^3$ .

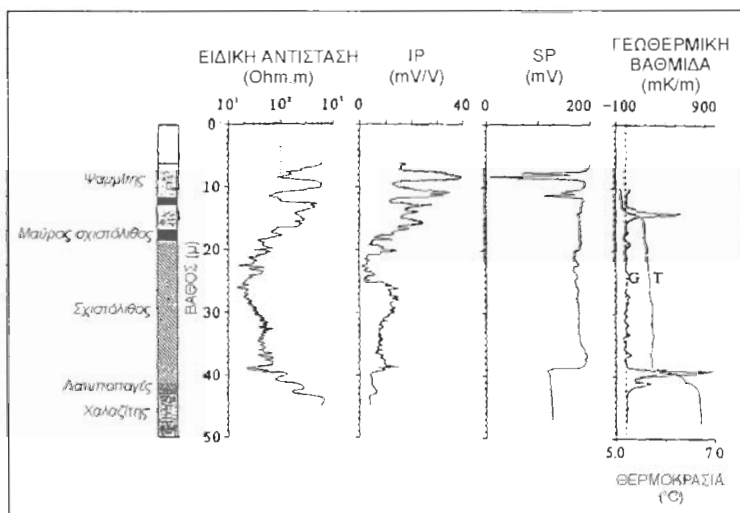


Σχήμα 12. Μια εφαρμογή δοκιμών crosshole στην περιοχή του νοσοκομείου Αγίων Αναργύρων στην Αττική.  
 Figure 12. An application of crosshole tests in the area of Agion Anargyron hospital in Attika.

Σχήμα 13. Μια εφαρμογή δοκιμών downhole στην περιοχή του Μετσόβου.  
 Figure 13. An application of downhole tests in the area of Metsovo.

#### 4.6 ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ ΣΕ ΓΕΩΤΡΗΣΗ

Η πλειονότητα των μεθόδων που αναφέρθηκαν προηγουμένα διεξάγονται επί της επιφάνειας του εδάφους. Με ορισμένες τροποποιήσεις των μεθόδων αυτών μπορούν να ληφθούν χρήσιμα στοιχεία με την εφαρμογή τους μέσα σε γεώτρηση καθ' όλο το μήκος αυτής. Δεν έχει επίσης αναπτυχθεί αυτός ο κλάδος της εφαρμοσμένης γεωφυσικής στη χώρα μας. Ελάχιστοι φορείς (Ι.Γ.Μ.Ε., ιδιωτικές εταιρείες) έχουν τη δυνατότητα διεξαγωγής τέτοιων μετρήσεων. Στο σχήμα 14 φαίνεται μια εφαρμογή γεωφυσικών διαγραφιών μέσα σε γεώτρηση, που διεξήχθη στην περιοχή Υάνα από τον Mwenifumbo (1991) για περιβαλλοντικούς λόγους.



Σχήμα 14. Απεικόνιση των καταγραφών ειδικής αντίστασης, επαγόμενης πόλωσης, SP, θερμοκρασίας και θερμοκρασιακής βαθμίδα, μέσα σε γεώτρηση στην περιοχή Υάνα. Η ανωμαλία SP και θερμοκρασίας που παρατηρείται σε βάθος περίπου 40 μέτρων, οφείλεται στη ροή ύδατος. Η επαγόμενη πόλωση διαχωρίζει τις ανωμαλίες SP που οφείλονται σε θειούχα υλικά (8-12 m), από εκείνες που οφείλονται στη ροή ύδατος και τη μεταβολή της θερμοκρασίας (από Mwenifumbo 1991).

Figure 14. Resistivity, IP, SP, temperature and temperature gradient at the Yana deposit. A temperature and SP anomaly caused by groundwater flow is observed at a depth of about 40 m. The induced polarization separates SP anomalies due to sulfides from those caused by water flow and temperature change (after Mwenifumbo 1991).

## 5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΙΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Είναι σύνηθες το φαινόμενο η γεωφυσική να χρησιμοποιείται ως η «τελευταία» λύση. Οι μελετητές μερικές φορές αφού έχουν εξαντλήσει άλλες μεθόδους, καταφεύγουν στο γεωφυσικό για να δώσει άμεση λύση στο πρόβλημα τους και αυτοί μερικές φορές αποτυγχάνουν κάτω από το βάρος της πίεσης που υφίστανται. Η επιτυχής εξέταση μιας γεωφυσικής έρευνας στηρίζεται στο καλό σχεδιασμό και στο σαφή καθορισμό του προβλήματος ή του στόχου. Πρέπει πρώτα να απαντηθούν ερωτήματα όπως, τι ακριβώς θέλουμε να μάθουμε με την εφαρμογή της γεωφυσικής, μπορεί ο στόχος που μας ενδιαφέρει να εντοπισθεί με γεωφυσικές μεθόδους (με ποιες μεθόδους;), ποιος είναι ο σκοπός (πίσημης έκτασης και πόσο θα στοιχίσει το έργο προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του;); της γεωφυσικής έρευνας, ο χρόνος και η σειρά των μετρήσεων υπαίθρου, τι όρους θα περιλαμβάνει η σύμβαση; κ.α. Εάν έχει αποφασισθεί ο στόχος και γενικά το αντικείμενο της έρευνας μεταξύ των ενδιαφερομένων πλευρών (μεταξύ μελετητή και γεωφυσικού), το επόμενο στάδιο είναι η επιλογή των κατάλληλων μεθόδων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Ένας απλός τρόπος είναι να εξετασθούν ακραίες περιπτώσεις με τη δημιουργία μοντέλων, έτσι ώστε να εξετασθεί εκ των προτέρων η δυνατότητα χρησιμοποίησης της μιας ή της άλλης μεθόδου. Για παράδειγμα, θαμμένα βωρέλια μπορούν να θεωρηθούν ως απλά δίπολα στη μαγνητική μέθοδο, τα έγκοιλα ως σφαιρές και τα τούνελ ως κύλινδροι στη βαρυτική μέθοδο.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

**Θεωρώντας** ότι με βάση τις δυνατότητες και τους περιορισμούς των γεωφυσικών μεθόδων, την επιλογή των πιο κατάλληλων από αυτές για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος και την εφαρμογή των απαραίτητων τεχνικών προδιαγραφών, καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η εφαρμοσμένη γεωφυσική με τις μεθόδους και τις τεχνικές που χρησιμοποιεί, παρέχει ένα χρήσιμο εργαλείο για τη διερεύνηση οριζών υπεδαφικών στόχων
- Συμβάλλει αποτελεσματικά στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προζαλούνται κυρίως από μολύνσεις/διαρροές τοξικών αποβλήτων καθώς και άλλων μολυσματικών παραγόντων
- Συμβάλλει στη μείωση του σεισμικού κινδύνου, του κινδύνου κατολίθησης ή άλλων υπεδαφικών αστοχιών, με τον προσδιορισμό των φυσικών παραμέτρων (ελαστικών σταθερών, πορώδες, κ.α.) αφενός και της υπεδαφικής δομής της περιοχής έρευνας, αφετέρου
- Η πολυπλοκότητα των στόχων της γεωφυσικής έρευνας απαιτεί τη συνεργασία των σχετιζών με το έργο ειδικοτήτων, όπως γεωλόγων, γεωτεχνικών, κ.α.
- Η εφαρμοσμένη γεωφυσική έχει μέλλον στη χώρα μας, ιδιαίτερα λόγω των μεγάλων τεχνικών έργων που έχουν δρομολογηθεί να γίνουν, αρκεί να γίνει αντιληπτό από τους σχετικούς φορείς και τους μελετητές η χρησιμότητα και η αποτελεσματικότητά της.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- BARROWS, L. and FETT, J.D. 1985. A high-precision gravity survey in the Delaware Basin of southern New Mexico. *Geophysics*, 50, 825-833.
- BOWLES, L.G. 1990. The seismic fleet and the marine environment: a compatible relationship. *Geophysics: The Leading Edge*, 9, 54-56.
- BROOME, J. 1991. Display and enhancement of aeromagnetic data with examples from Guysborough County, Nova Scotia, in Goodacre, A.K., Ed. Interpretation of gravity and magnetic anomalies for non-specialists. *Notes for Canadian Geophysical Union, Short Course, Geol. Surv. Canada*, 249-284.
- BUTLER, D.K. 1984. Microgravimetric and gravity gradient techniques for the detection of subsurface cavities. *Geophysics*, 49, 1084-1096.
- DAVIS, J.L. and ANMAN, A.P. 1989. Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37, 531-551.
- GREENHOUSE, J.P. 1991. Environmental geophysics: it's about time. *Geophysics: The Leading Edge*, 10, 32-34
- GREENHOUSE, J. and GUDJURGIS, P. 1997. An introduction to near-surface and environmental geophysical methods and applications. *Reference Notes, 1997 SAGEEP Short Course*.
- HINZE, W.J. 1990. The role of gravity and magnetic methods in engineering and environmental studies. *Geotechnical and Environmental Geophysics*, 1, 75-126.
- HUNTER, J.A., PULLAN, F.F., BURNS, R.M., CAGNE, R.M. and GOOD, R.J. 1989. Applications of shallow seismic reflection method to groundwater and engineering studies. *Proc. of Exploration '87, Ontario Geologi-*



*cal Survey, Special Volume 3, Ed. Garland, G.D., 704-715.*

- MONIER-WILLIAMS, M.E., GREENHOUSE, J.P., MENDES, J.M. and ELLERT, N. 1990. Terrain conductivity mapping with topographic corrections at three waste disposal sites in Brazil. In Ward, S.H. (ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 2: Environmental and Groundwater*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 41-55.
- MWENIFUMBO, C.J. 1991. Borehole geophysics in environmental applications. *Preprint, CIM Annual General Meeting, Vancouver*, April 28-May 2.
- PALACKY, G.J. and STEPHENS, L.E. 1990. Mapping of quaternary sediments in northeastern Ontario using ground electromagnetic methods. *Geophysics*, 55, 1596-1604.
- REFORD, M.S. 1964. Magnetic anomalies over thin sheets. *Geophysics*, 29, 532-536.
- REYNOLDS, J.M. 1997. *An introduction to applied and environmental geophysics*. J. Wiley & Sons, 796.
- ROBERTS, R.L., HINZE, W.J. and LEAP, D.I. 1990. Application of the gravity method to the investigation of a landfill in glaciated midcontinent, U.S.A. A case history. In Ward, S.H. (ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 2: Environmental and Groundwater. Investigations in Geophysics No 5, Society of Exploration Geophysicists*, 41-55.
- SHARMA, P.V. 1997. *Environmental and Engineering Geophysics*. Cambridge University Press, 475.
- SHERIFF, R.E. 1991. *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*, 3<sup>rd</sup> edn. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists.
- STEEPLES, D.W. 1991. Uses and techniques of environmental geophysics. *Geophysics: The Leading Edge*, 10: 30-31.
- STEWART, M. and WOOD, J. 1990. Geological and geophysical character of fracture zones in a Tertiary carbonate aquifer, Florida. In Ward, S.H. (ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 2: Investigations in Geophysics No 5. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists*, 235-243.