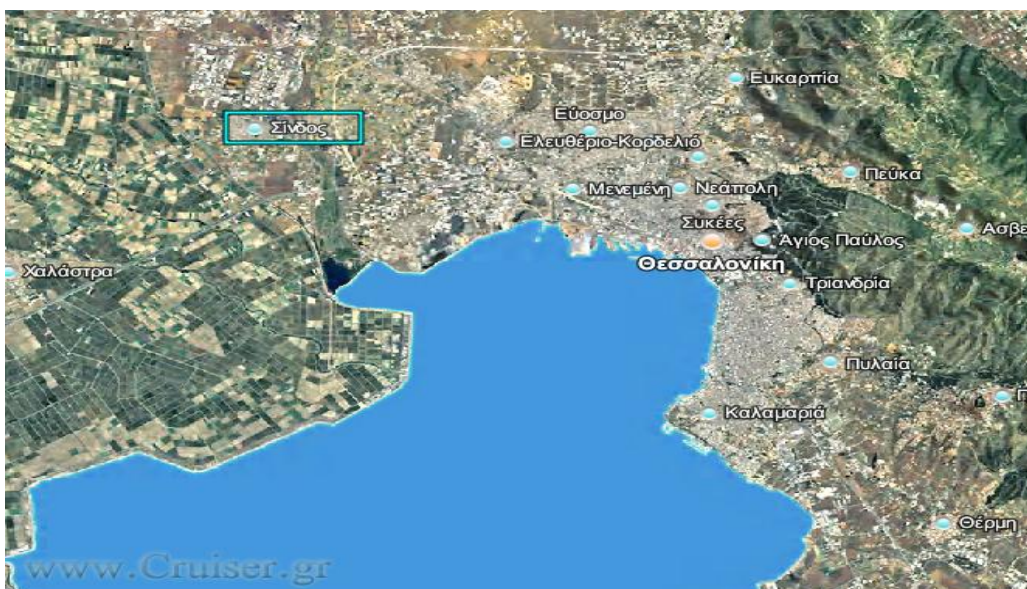




ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ
ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ
ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΣΙΝΔΟΥ (Ν. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ)**

ΚΕΣΟΓΛΟΥ ΟΛΥΜΠΙΑ
Α.Ε.Μ. 3868



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Τσούρλος Παναγιώτης
Επίκουρος Καθηγητής
Τομέα Γεωφυσικής
Τμήματος Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Θεσσαλονίκη 2008



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	ΣΕΛΙΔΑ
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	5
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ	9
1.3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ	9
1.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ	12
1.5 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	12
1.6 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ	14
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ	17
2.1 ΘΕΣΗ	19
2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ – ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	20
2.3 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ	23
3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	25
3.1 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	25
3.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	27
3.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	29
3.4 ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	32
4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	35
4.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	35
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ	38
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	43
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	44

Η παρούσα διπλωματική εργασία σκοπό έχει την περιγραφή της διαδικασίας μετρήσεων με χρήση της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας μεταξύ γεωτρήσεων και την ερμηνεία των δεδομένων, ώστε να βγουν συμπεράσματα για τη γεωλογική δομή του υπεδάφους καθώς επίσης και να γίνει αξιολόγηση της ανακυκλώμενης εισπίεσης ύδατος σε περιορισμένο υδροφόρο στρώμα. Οι μετρήσεις μεταξύ των γεωτρήσεων που παρουσιάζονται έγιναν στην περιοχή της Σίνδου.

Η αναγκαιότητα τέτοιου είδους διασκοπήσεων είναι προφανής καθώς δίνουν τη δυνατότητα λεπτομερούς λιθολογικού χαρακτηρισμού του υπεδάφους, μεταξύ γεωτρήσεων, λόγω της αυξημένης διακριτικής ικανότητας που οφείλεται στην ύπαρξη ηλεκτροδίων μέσα στις γεωτρήσεις, δηλαδή πολύ κοντά στο στόχο έρευνας. Επίσης μια τέτοιου είδους έρευνα δίνει σημαντικές πληροφορίες σε σχέση με τον υδρογεωλογικό χαρακτήρισμό των σχηματισμών του υπεδάφους.

Όπως είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία, η εφαρμογή των ηλεκτρικών τομογραφιών έχει ευρεία χρήση στον περιβαλλοντικό έλεγχο. Η απεικόνιση σε διάρκεια χρόνου, περιλαμβανομένων και των μόνιμωσ εγκατεστημένων ηλεκτροδίων, έχει αποδειχτεί ότι παρέχει σε πολλές περιπτώσεις εικόνες μεγαλύτερης ογκομετρικής κλίμακας, σε σύγκριση με τις συνήθεις δειγματοληψίες από γεωτρήσεις και εργαστηριακές χημικές αναλύσεις.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας περιγράφονται οι γενικές αρχές της ηλεκτρικής τομογραφίας και στη συνέχεια παρατίθενται οι βασικότερες διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο προσδιορίζεται η περιοχή μέτρησης, γίνεται αναφορά στα γεωλογικά και υδρογεωλογικά στοιχεία της περιοχής, καθώς επίσης περιγράφεται και η διαδικασία εγκατάστασης εισπίεσης.



Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μετρήσεις υπαίθρου, ο απαραίτητος εξοπλισμός, η επιλογή των παραμέτρων με τις οποίες πήραμε τις μετρήσεις και ο τρόπος επεξεργασίας τους.

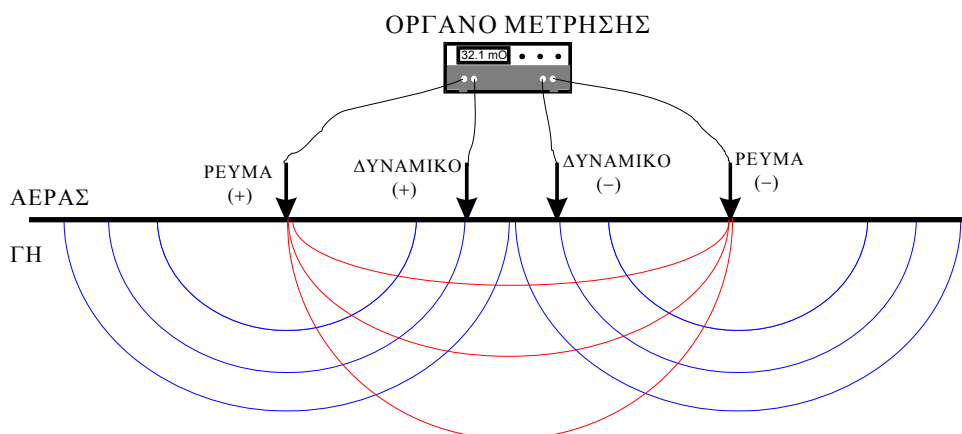
Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται η επεξεργασία των μετρήσεων, η ερμηνεία τους και παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

Την επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας είχε ο κ. Τσούρλος Παναγιώτης, Επίκουρος καθηγητής του Α.Π.Θ ,τον οποίο και ευχαριστώ για την βοήθειά του. Επίσης ευχαριστώ θερμά το μεταπτυχιακό φοιτητή Σιμιρδάνη Κλεάνθη, για την πολύτιμη βοήθεια του.

1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλεκτρική τομογραφία αποτελεί εξέλιξη της κλασικής ηλεκτρικής μεθόδου και θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα γεωφυσικά εργαλεία για την απεικόνιση του υπεδάφους. Η ηλεκτρική μέθοδος ανήκει στην κατηγορία του τεχνητά παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο διαβιβάζεται στο έδαφος δια μέσου ενός ζεύγους ηλεκτροδίων (**Σχήμα 1.1.1**). Σε ένα δεύτερο ζεύγος μετράται η πτώση τάσης (δυναμικό) που προκαλείται. Η ηλεκτρική αντίσταση που υπολογίζεται σαν πηλίκο των δύο αυτών μεγεθών χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ .

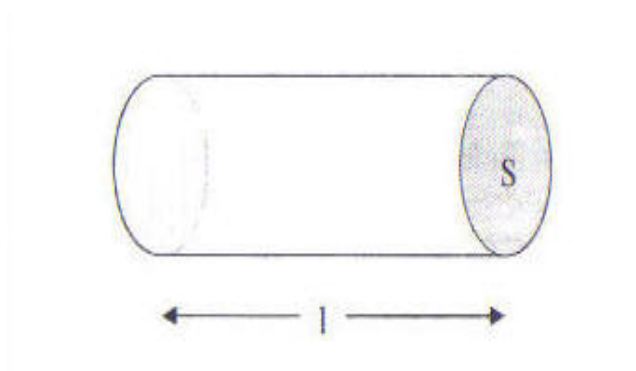


Σχήμα 1.1.1. Η βασική διάταξη γεωηλεκτρικών μετρήσεων.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ ενός στερεού σώματος κυλινδρικού σχήματος, διατομής S και μήκους l , που έχει ηλεκτρική αντίσταση R (**Σχήμα 1.1.2**), ορίζεται από τη σχέση:

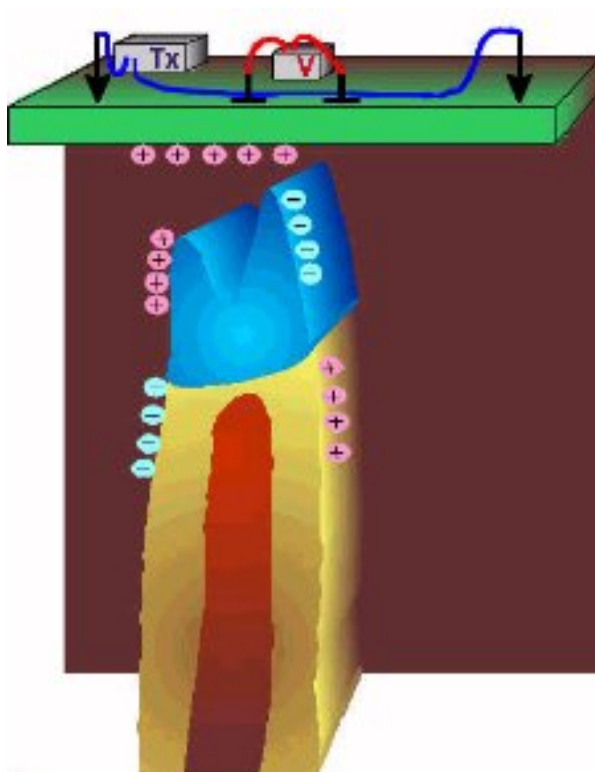
$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}$$

Οι μονάδες μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων (S.I.) είναι το 1 Ohm·m.



Σχήμα 1.1.2. Γεωμετρική απεικόνιση του ορισμού της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ



Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων και των ορυκτών είναι μια από τις περισσότερο μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητες τους.

Οι τιμές της κυμαίνονται από 10^6 Ohm·m σε ορισμένα ορυκτά, όπως είναι ο γραφίτης, μέχρι 10^{15} Ohm·m σε ορισμένα ξηρά χαλαζιακά πετρώματα. Καλοί αγωγοί θεωρούνται τα πετρώματα και τα ορυκτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^6 και 10^1 Ohm·m και κακοί, αυτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^8 και 10^{15} Ohm·m.

Εκτός από την ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ , για να εξεταστεί η συμπεριφορά της Γης στη διέλευση ρεύματος, χρησιμοποιείται και η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα σ , η οποία είναι το αντίστροφο της και δείχνει την ευκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα στο υπέδαφος.

Δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι το Siemens ανά μέτρο (S/m).

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών του υπεδάφους εξαρτάται κυρίως από την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα, δηλαδή το ρεύμα που διαρρέει τους γεωλογικούς σχηματισμούς μέσω των διαλυμένων ιόντων του νερού που υπάρχει στους πόρους.

Ειδικότερα εξαρτάται από:

- ✦ Τις υδρολογικές - υδρογεωλογικές συνθήκες
- ✦ Τη χημική σύσταση του νερού
- ✦ Το μέγεθος των πόρων (πορώδες) των σχηματισμών

- ✦ Τις πιθανές διαρρήξεις – διακλάσεις - ρήγματα των σχηματισμών
- ✦ Τη θερμοκρασία και την πίεση

Στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 1.1**) παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά πετρώματα και το εύρος τιμών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων αυτών.

ΥΛΙΚΟ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ
ΑΕΡΑΣ	0
ΣΙΔΗΡΟΠΥΡΙΤΗΣ	3×10^{-1}
ΓΑΛΗΝΙΤΗΣ	2×10^{-3}
ΧΑΛΑΖΙΑΣ	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
ΑΣΒΕΣΤΙΤΗΣ	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
ΓΡΑΝΙΤΗΣ	$100 - 1 \times 10^6$
ΓΑΒΒΡΟΣ	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	$50 - 1 \times 10^7$
ΨΑΜΜΙΤΗΣ	$1 - 1 \times 10^8$
ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΙ	$20 - 2 \times 10^3$
ΔΟΛΟΜΙΤΗΣ	$100 - 10^4$
ΑΜΜΟΣ	1 – 1000
ΑΡΓΙΛΟΣ	1 – 100
ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ	0,5 – 300
ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ	0,2

Πίνακας 1.1

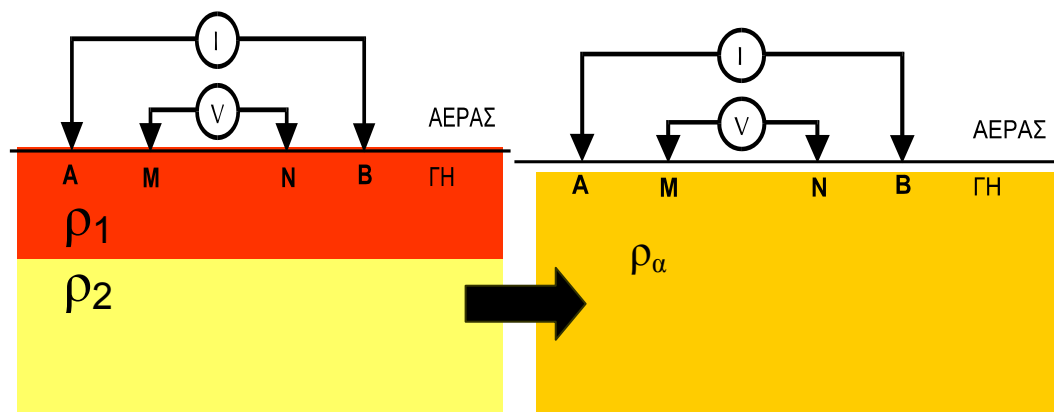
1.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Η γη είναι ένα γεωηλεκτρικά ανομοιογενές σώμα, επομένως η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση είναι συνάρτηση:

- ✦ της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους και
- ✦ της γεωμετρίας της μέτρησής μας (Θέσεις A,B,M,N)

Για να λάβουμε υπόψη την επίδραση της γεωμετρίας εισάγεται ο όρος της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης (ρ_a).

Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ_a είναι η πραγματική ειδική αντίσταση του ομογενούς εκείνου ημιχώρου, που θα μας έδινε την ίδια τιμή, ρ , αν χρησιμοποιούσαμε τη συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτροδίων.



Για να κατανοήσουμε όμως τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σ' αυτά τα στρώματα πρέπει πρώτα να μελετήσουμε τη ροή του μέσα σε ένα ομογενές υπέδαφος. (Παπαζάχος, 1986).

1.3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού. Οι πιο γνωστές διατάξεις φαίνονται στο **Σχήμα 1.3.1** και είναι η «διάταξη Wenner», η «διάταξη Schlumberger», η «διάταξη διπόλου-διπόλου», η «διάταξη πόλου-διπόλου» και η «διάταξη πόλου-

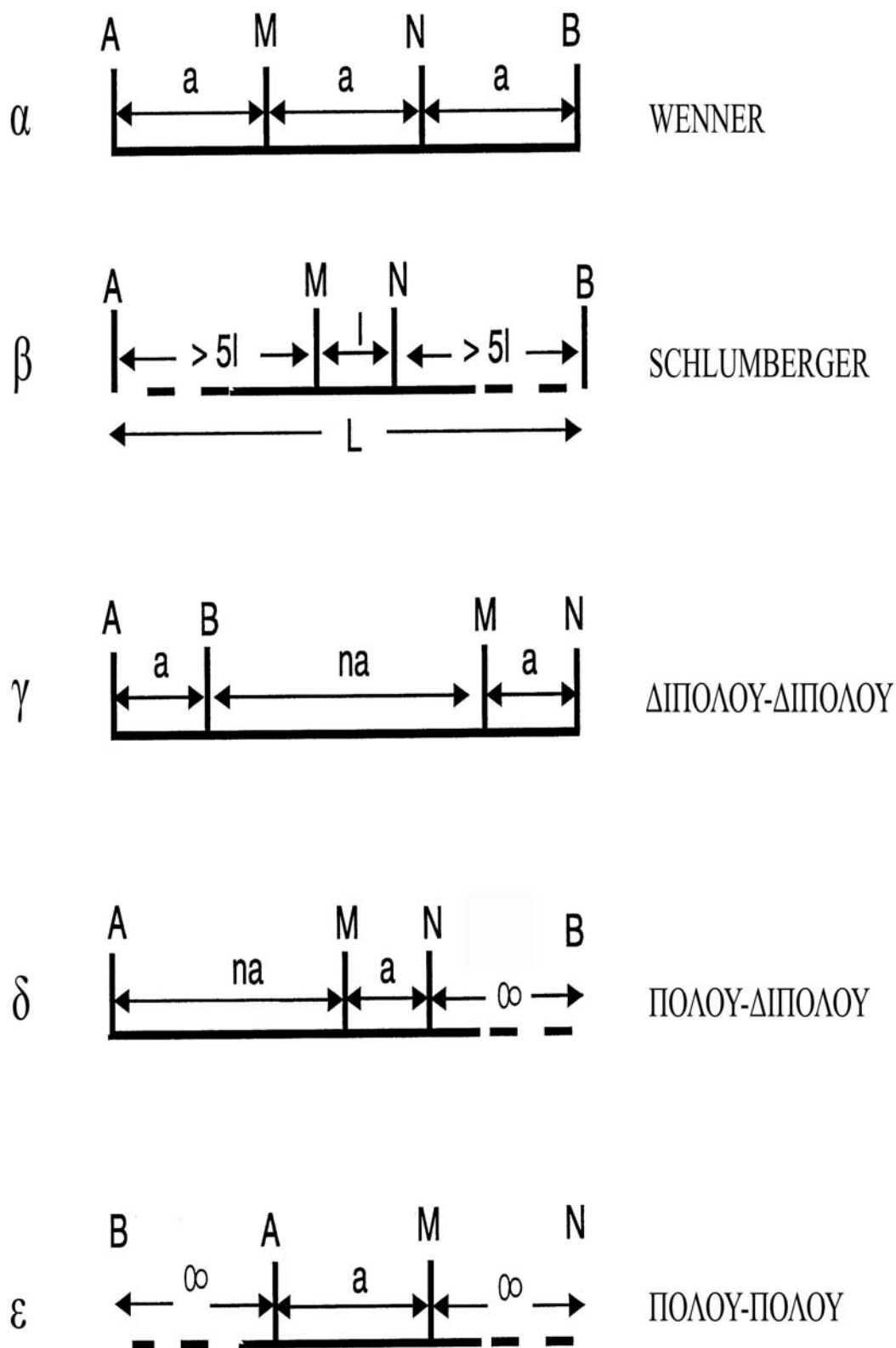
πόλου». Κύριο χαρακτηριστικό των διατάξεων είναι ο γεωμετρικός παράγοντας, ο οποίος εξαρτάται από τη θέση των ηλεκτροδίων στο χώρο και υπολογίζεται για κάθε μέτρηση ξεχωριστά. (Tsourlos, 1995).

Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους διαφέρουν ως προς τη γεωμετρία τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, κάθε μια από αυτές να έχει διαφορετικές δυνατότητες ανίχνευσης των μεταβολών της αντίστασης από τις υπόλοιπες. Για παράδειγμα, οι διατάξεις Wenner και Schlumberger έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε μεταβολές της αντίστασης με το βάθος και συνεπώς είναι πιο χρήσιμες σε προβλήματα στρωματογραφίας. Από την άλλη, οι διατάξεις διπόλου-διπόλου και πόλου-διπόλου είναι περισσότερο ευαίσθητες σε πλευρικές μεταβολές της αντίστασης.

Επιπλέον, οι διατάξεις Wenner και Schlumberger σε σύγκριση με τις διατάξεις διπόλου-διπόλου και πόλου-διπόλου έχουν μικρότερο βάθος διείσδυσης, αλλά μεγαλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο. Επίσης, η διάταξη Wenner καλύπτει μια πολύ μικρή περιοχή έρευνας σε σχέση με τις υπόλοιπες, ενώ η διάταξη πόλου-πόλου έχει το μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης και καλύπτει τη μεγαλύτερη περιοχή έρευνας αλλά έχει πολύ μικρό λόγο σήματος προς θόρυβο. Στη συνέχεια φαίνεται ένας ενδεικτικός πίνακας (**Πίνακας 1.3**) αξιολόγησης των κυριότερων διατάξεων.

ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	ΛΟΓΟΣ ΣΗΜΑΤΟΣ/ΘΟΡΥΒΟ	ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ	ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΕΙΣ ΒΑΘΟΣ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ
Wenner	1	5	1
Schlumberger	2	4	1
Dipole-Dipole	5	2	2
Pole-Dipole	4	3	2
Gradient	3	1	5

Πίνακας 1.3. Αξιολόγηση διατάξεων μέτρησης της αντίστασης (κατά Ward, 1990).



Σχήμα 1.3.1. Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες διατάξεις ηλεκτροδίων (Tsourlos, 1995).

1.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η εφαρμογή των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1990. Από τότε παρουσίασε μεγάλη πρόοδο και σήμερα πια χρησιμοποιείται σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών. (Daily & Owen)

Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές μέτρησης για τη συλλογή δεδομένων αντίστασης και την καταγραφή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους, είναι η **βυθοσκόπηση** (μελέτη κατακόρυφης μεταβολής της αντίστασης), η **οριζοντιογραφία** (μελέτη πλευρικής μεταβολής της αντίστασης) και η **ηλεκτρική τομογραφία**.

1.5 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Η ηλεκτρική μέθοδος διασκόπησης καθορίζει την κατανομή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης, πραγματοποιώντας μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων, είτε στην επιφάνεια, είτε μέσα σε γεωτρήσεις. Ταυτόχρονα γίνεται προσπάθεια απεικόνισης του υπεδάφους μεταξύ των δύο γεωτρήσεων.

Η διαχρονική απεικόνιση επιφάνειας ηλεκτρικής τομογραφίας, που περιλαμβάνει τις μόνιμες εγκαταστάσεις ηλεκτροδίων, έχει αποδείξει ότι παρέχει σε πολλές περιπτώσεις εικόνες μεγαλύτερης ογκομετρικής κλίμακας, σε σύγκριση με τις τυποποιημένες δειγματοληψίες από τις γεωτρήσεις και τις εργαστηριακές χημικές αναλύσεις, οι οποίες βοηθούν στην αναγνώριση και στη διάκριση μηχανισμών μεταφοράς μόλυνσης. Διάφοροι αλγόριθμοι για την επεξεργασία διαχρονικών δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας έχουν αναφερθεί. (LaBrecque και Yang, 2002).

Εντούτοις, όπως με όλες τις επιφανειακές γεωφυσικές μεθόδους, οι χωρικές πτυχές ανάλυσης μειώνονται με το αυξανόμενο βάθος έρευνας και έτσι μπορούν να εμποδίσουν την ανίχνευση των μικρής

κλίμακας χαρακτηριστικών γνωρισμάτων όπως αλλαγές στα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά του υδροφόρου στρώματος. Δεδομένου ότι οι σημαντικότεροι μηχανισμοί μεταφορών στα υπόγεια νερά είναι η διάχυση, η διασπορά, η απορρόφηση, οι χημικές μέθοδοι επιφάνειας αντίδρασης και βιοδιάσπασης, οι τυποποιημένες γεωφυσικές μέθοδοι και η δειγματοληψία ύδατος έχουν περιορίσει τη χωρική ανάλυση. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να αντισταθμιστεί μερικώς με την χρήση ηλεκτροδίων στις γεωτρήσεις ή χρησιμοποιώντας επιφανειακούς διαμορφωτές.

Η μέθοδος του Συνεχούς Ρεύματος ή αλλιώς μέθοδος DC, λόγω της απλότητάς της, του χαμηλού κόστους εξοπλισμού και της εύκολης χρήσης, έχει ιδιαίτερα ευρεία χρήση. Χρησιμοποιείται σε μεταλλεία, αρχαιολογικές ανασκαφές, μελέτες πολιτικών μηχανικών, περιβαλλοντικούς ελέγχους υπόγειων νερών, χαρτογραφήσεις, ελέγχους υφάλμυρων νερών που εισβάλλουν στα ευαίσθητα υδροφόρα στρώματα καθώς και σε διαδικασίες μεταφορών μολυσματικών παραγόντων.

Για να πάρουμε την **καλύτερη δυνατή εικόνα της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους** είναι απαραίτητος ο συνδυασμός διαφόρων χαρακτηριστικών όπως:

- ✦ το βάθος διείσδυσης
- ✦ ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο
- ✦ το εύρος της περιοχής

Αυτό καθίσταται εφικτό με τη χρήση των κατάλληλων διατάξεων μέτρησης, δηλαδή διατάξεις που περιέχουν τους κατάλληλους συνδυασμούς ηλεκτροδίων που πληρούν τα προαναφερθέντα κριτήρια.

Ικανή μέθοδος να δώσει λεπτομερείς πληροφορίες για τις τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας μεταξύ των δύο γεωτρήσεων, είναι η εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας μεταξύ γεωτρήσεων, όπου το

ηλεκτρόδιο ρεύματος και το ηλεκτρόδιο δυναμικού είναι τοποθετημένα μέσα σε δύο απομακρυσμένες μεταξύ τους γεωτρήσεις και βρίσκονται σε διάφορα βάθη.

Τέτοιου είδους μετρήσεις πλεονεκτούν στον εντοπισμό στόχων με μεγαλύτερη ακρίβεια, στην απεικόνιση διαφόρων γεωλογικών συνθηκών καθώς και στην ανεύρεση θαμμένων κοιλοτήτων και τούνελ. (Bing & Greenhalgh, 2000)

Για τη λήψη εικόνας μεταξύ των δυο γεωτρήσεων, τοποθετούνται ηλεκτρόδια σε κάθε μία γεώτρηση σε επαφή με το υπέδαφος. Σε δύο ηλεκτρόδια (ηλεκτρόδια ρεύματος) εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού ώστε να σταλεί προκαθορισμένο ρεύμα, και μετράται η διαφορά δυναμικού σε κάποιο άλλο ζευγάρι ηλεκτροδίων (ηλεκτρόδια δυναμικού) των γεωτρήσεων. Στη συνέχεια στέλνεται ρεύμα σε κάποιο άλλο ζευγάρι ηλεκτροδίων ρεύματος και ταυτόχρονα μετράται νέα διαφορά δυναμικού σε δύο άλλα ηλεκτρόδια δυναμικού. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε όλα τα ηλεκτρόδια με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Τέτοιου είδους μετρήσεις μοιάζουν με αυτές του διπόλου-διπόλου που γίνονται στην επιφάνεια. (Daily & Owen)

1.6 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Κάθε διάταξη που χρησιμοποιείται για κανονικές επιφανειακές διασκοπήσεις, θεωρητικά μπορεί να εφαρμοστεί για μια cross-borehole διασκοπήση. Ως εκ τούτου, μπορούμε να έχουμε διατάξεις με δύο, τρία και τέσσερα ηλεκτρόδια. (DR.M.H.Loke)

CROSS-HOLE ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ

Ο **πίνακας 1.6** παρουσιάζει μία σύνοψη όλων των cross-hole συνδυασμών. (Bing & Greenhalgh, 2000)

Διάταξη Ηλεκτροδίων	Σύνολο	Σύνολο Ανεξάρτητων Συνδυασμών	Ανεξάρτητοι Συνδυασμοί	ρ_a singularity configurations
Πόλου-Πόλου	2	1	A-M	
Πόλου- Διπόλου	12	6	AM-N, MA-N, MN-A, N-AM, N-MA, A-MN	A-MN, MN-A
Διπόλου- Πόλου	12	6	AM-B, MA-B, AB-M, B-AM, B- MA, M-AB	AB-M, M-AB
Διπόλου- Διπόλου	24	3	AM-BN, AM- NB, AB-MN	AB-MN, MN- AB
Ισοδύναμη Διάταξη: Πόλου-Διπόλου: AM-N, MA-N και MN-A= Διπόλου-Πόλου: MA-B, AM-B και AB-M				

Πίνακας 1.6 Cross-hole συνδυασμοί μετρήσεων για διάφορες διατάξεις

Ένας απλός cross-hole συνδυασμός είναι η διάταξη πόλου-πόλου, στην οποία τα δυο ηλεκτρόδια είναι απομακρυσμένα.

ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΡΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ – ΠΟΛΟΥ- ΔΙΠΟΛΟΥ

Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει έξι πιθανούς διαφορετικούς συνδυασμούς (αγνοώντας τα επιφανειακά ηλεκτρόδια). Παρέχει καλύτερη ανάλυση και είναι λιγότερο ευαίσθητη στο τελλουρικό θόρυβο σε σχέση με την διάταξη πόλου-πόλου.

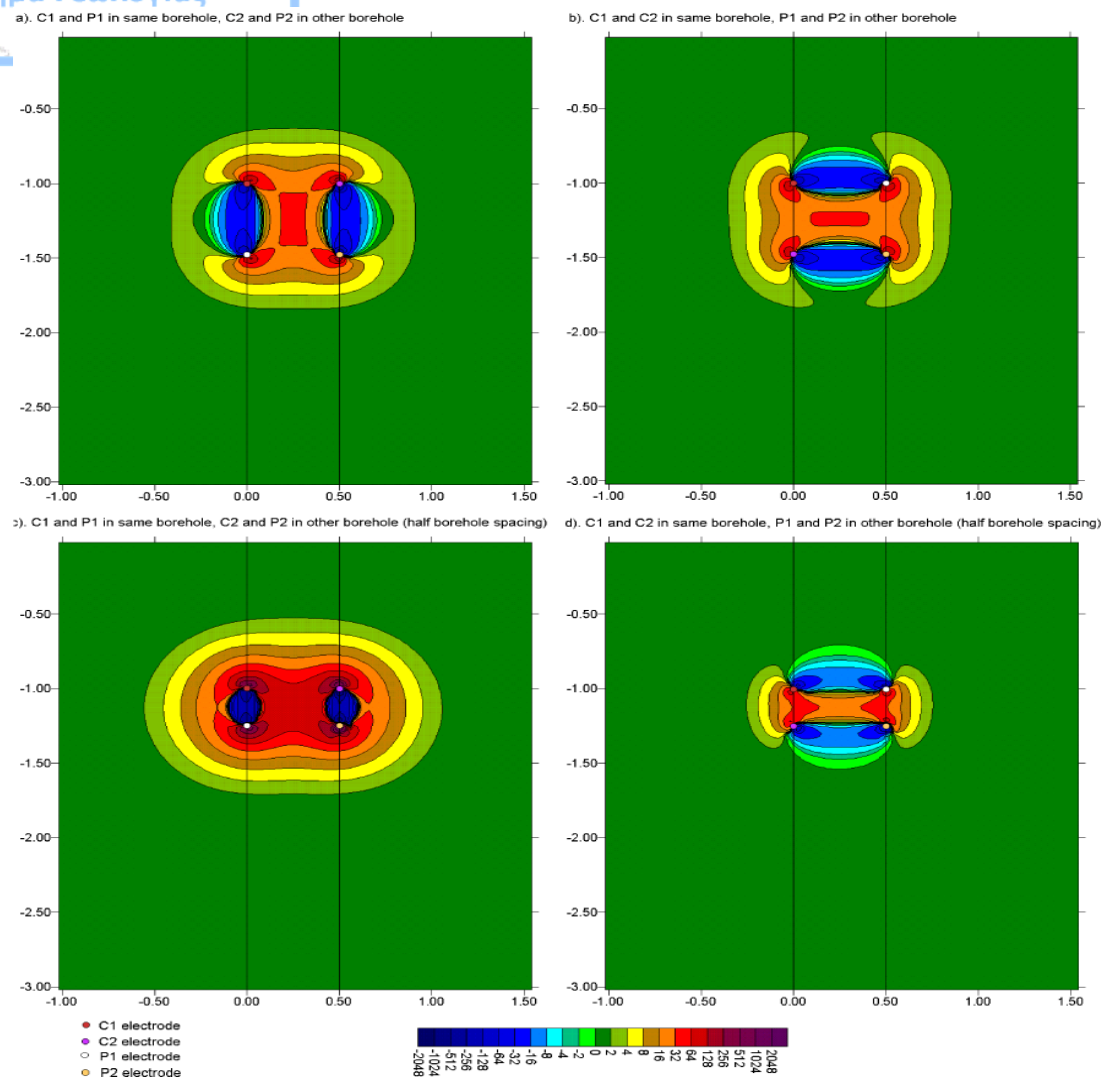
ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΙΠΟΛΟΥ-ΠΟΛΟΥ

Από τους 6 ανεξάρτητους συνδυασμούς της διπόλου-πόλου διάταξης, μόνο δύο, AM-B και AB-M, μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικοί, επειδή οι άλλοι είναι όμοιοι με αυτούς ή συμμετρικά ισοδύναμοι. (Bing & Greenhalgh, 2000)

ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ – ΔΙΠΟΛΟΥ-ΔΙΠΟΛΟΥ

Οι συνδυασμοί που έχουν προταθεί από τους Zou και Greenhalgh (1997) γι' αυτή τη διάταξη είναι τέσσερις, από τους οποίους δυο είναι οι βασικοί. Στη πρώτη διάταξη, τα θετικά ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού C1 και P1 βρίσκονται σε μία γεώτρηση, ενώ τα αρνητικά ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού C2 και P2 βρίσκονται στη δεύτερη γεώτρηση (**Σχήμα 1.6α**)

Στη διάταξη αυτή ο συνδυασμός C1P1-C2P2 (η διάταξη AM-BN των Zou και Greenhalgh (2000)), δίνει μεγάλες θετικές τιμές ευαισθησίας στην περιοχή μεταξύ των δύο γεωτρήσεων. Αυτή είναι μία ιδιότητα που είναι επιθυμητή για μία διάταξη cross-borehole αφού η επιδίωξη μας είναι να «φωτογραφηθεί» το υλικό μεταξύ των δύο γεωτρήσεων.

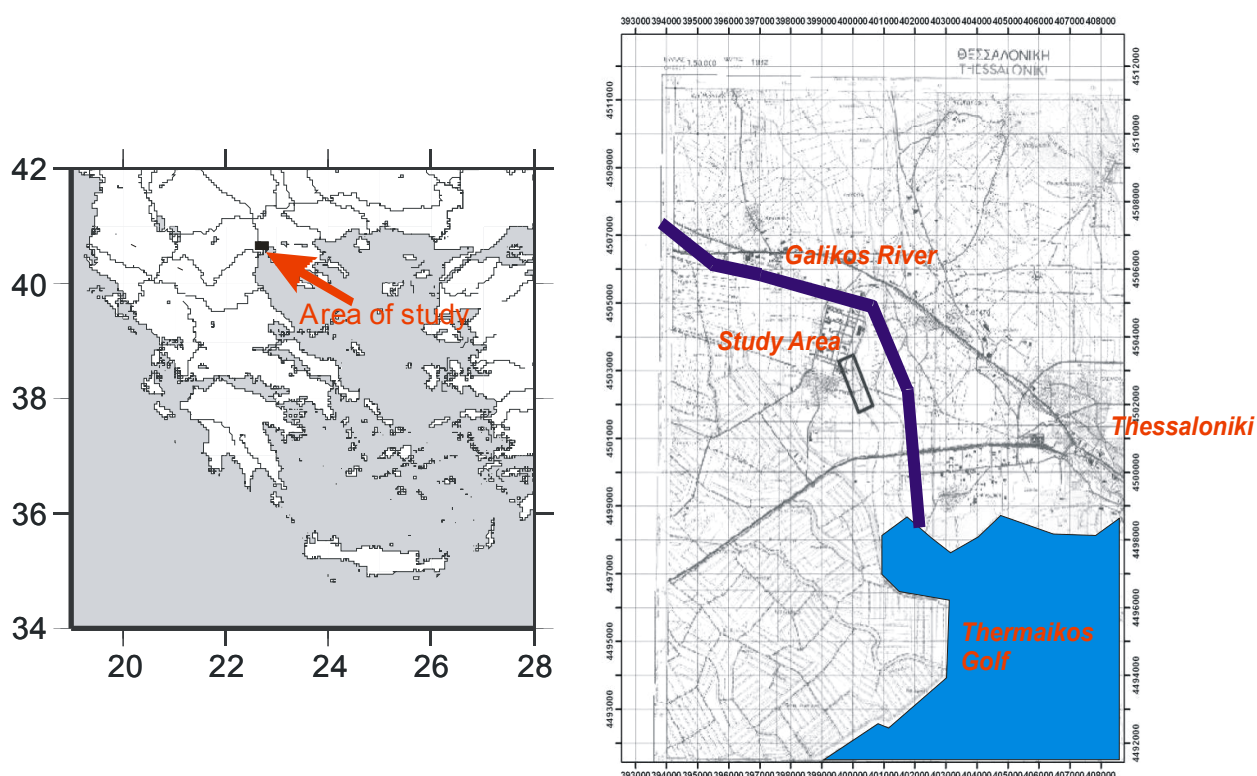


Σχήμα 1.6 Εικόνες ευαισθησίας 2D για διάφορους συνδυασμούς διπόλου-διπόλου διάταξης. (a) C1 και P1 είναι στη πρώτη γεώτρηση και C2, P2 είναι στη δεύτερη. (b) C1 και C2 είναι στη πρώτη και P1 και P2 είναι στη δεύτερη γεώτρηση. Και στις δύο περιπτώσεις, η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων στην ίδια γεώτρηση είναι ίση με την απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων. Οι συνδυασμοί στην (c) και (d) είναι όμοιοι με (a) και (b) με τη διαφορά ότι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων στην ίδια γεώτρηση είναι η μισή από την απόσταση μεταξύ των δύο γεωτρήσεων.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

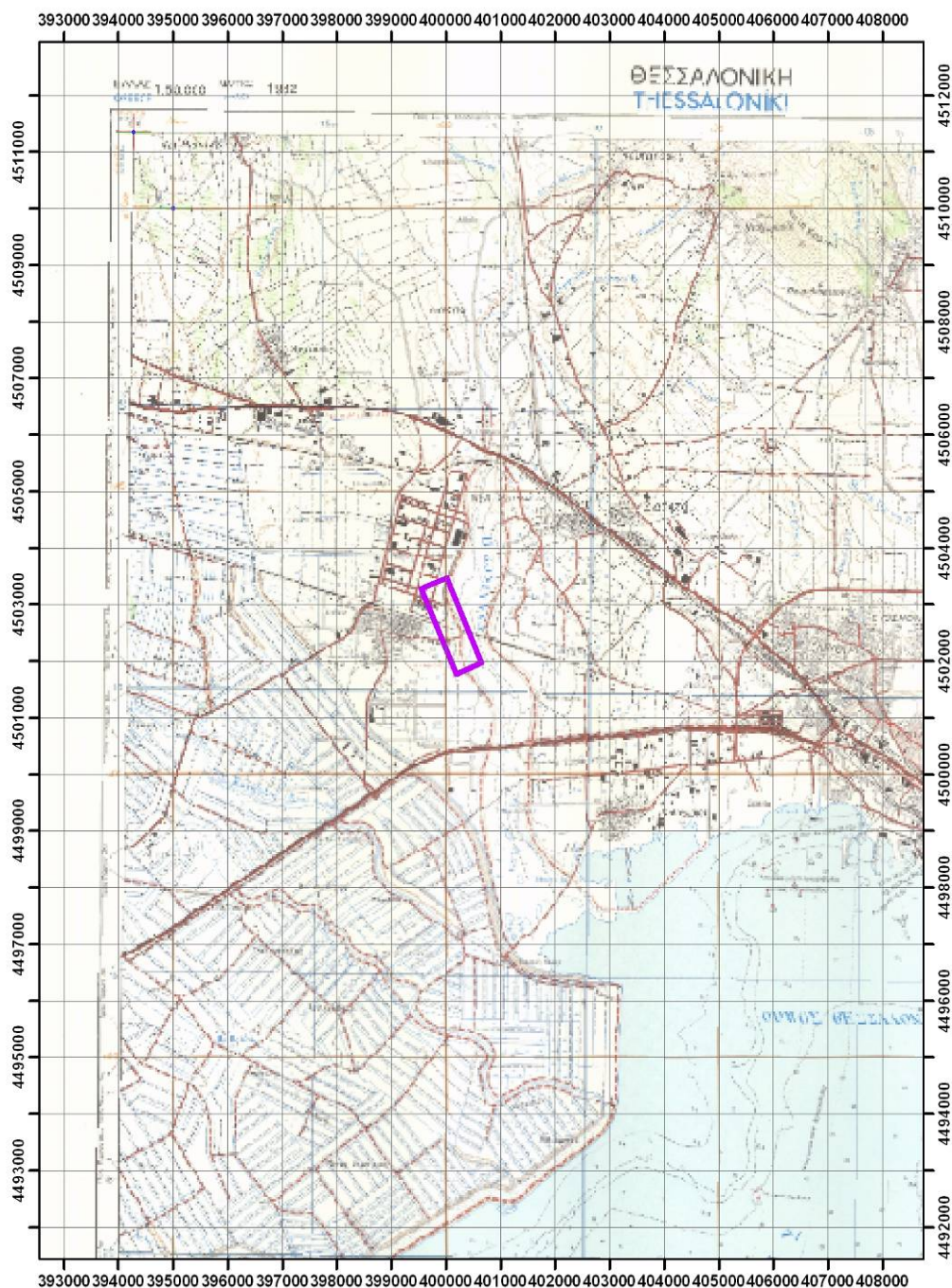
Η μελέτη εκπονείται με την υποστήριξη ενός μεγάλου προγράμματος που εποπτεύεται από την ΕΥΑΘ και χρηματοδοτείται

από το ΥΠΕΧΩΔΕ. Σκοπός αυτής είναι η αξιολόγηση της ανακυκλώμενης εισπίεσης ύδατος σε ένα υπό πίεση υδροφόρο στρώμα στην περιοχή της Σίνδου, περίπου 12 χιλ. ανατολικά από την πόλη της Θεσσαλονίκης. Γενικός στόχος αυτής της διαδικασίας εισπίεσης είναι να βελτιωθεί η ποιότητα ενός υποβαθμισμένου υδροφόρου στρώματος και να αυξηθεί η ποσότητα υπόγειων νερών. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει την εισπίεση νερού που προέρχεται από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων Θεσσαλονίκης, αφού έχει υποβληθεί σε επεξεργασία τρίτου βαθμού, για να φτάσει στις απαιτούμενες προδιαγραφές (δηλαδή πόσιμο ύδωρ) προτού να εμπλουτίσει τους υπόγειους υδροφόρους.



Σχήμα 2. Περιοχή έρευνας, ανατολικά της Θεσσαλονίκης.

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται ανατολικά της Σίνδου (Σχήμα 2.1.1)

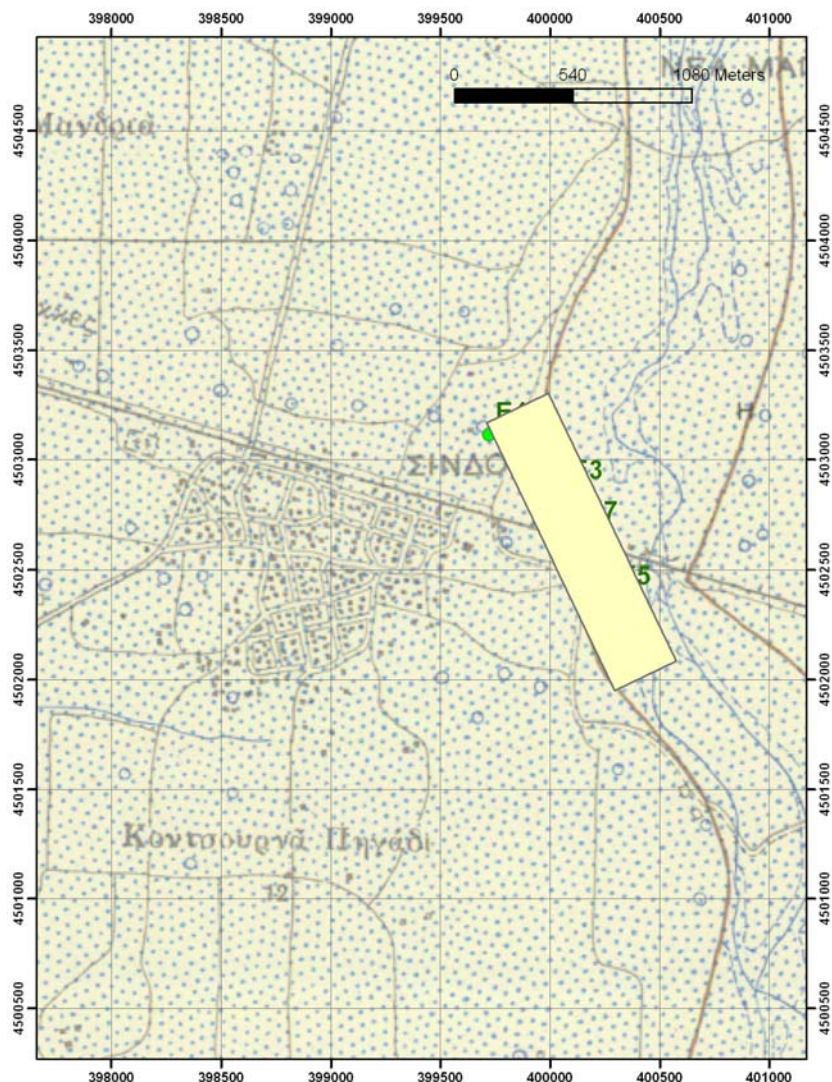


Σχήμα 2.1.1. Θέση περιοχής έρευνας (ορθογώνιο)

2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ - ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η περιοχή της Σίνδου βρίσκεται στο δυτικό μέρος του Θερμαϊκού. Η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι 449 χιλ. στο σταθμό μέτρησης βροχής της Σίνδου. Οι βροχοπτώσεις εμφανίζονται κυρίως από τα τέλη Οκτωβρίου μέχρι τον Μάιο (78% των ετήσιων βροχοπτώσεων).

Από γεωλογική άποψη, βάση του γεωλογικού χάρτη στην περιοχή έρευνας συναντάται σχηματισμός ολοκαινικών αποθέσεων.



Σχήμα 2.2.1 Γεωλογικός χάρτης της εξεταζόμενης περιοχής

Συγκεκριμένα η περιοχή σχηματίζεται από πρόσφατα υλικά που αποτελούνται από άμμους, λεπτό πηλό, λεπτή άργιλο μέχρι αποθέματα άμμου που διαμορφώνουν ένα πολλαπλό σύστημα υδροφόρων στρωμάτων, ενώ στη βάση επικρατούν κροκαλοπαγή. Τρία κύρια υδροφόρα στρώματα μπορούν να προσδιοριστούν: ένα φρεατικό και δύο βαθιά περιορισμένα στρώματα. Ως αποτέλεσμα της προέλευσής τους τα αποθέματα χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό ετερογένειας και ανισοτροπίας.

Τα γενικά υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών που συναντώνται στην περιοχή παρατίθενται στον παρακάτω **Πίνακα 2.2**

Είδος σχηματισμού	Συνολικό πορώδες %	Ενεργό πορώδες %	Τάξη μεγέθους υδροπερατότητας k (m/s)
Άργιλος	45	3	<10 ⁻⁹
Άμμος	35	25	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁶
Χαλίκια	25	22	>10 ⁻⁴
Σύναγμα (άμμος & χαλίκια)	20	16	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁷

Πίνακας 2.2 Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά μερικών χαλαρών ιζημάτων (Καλλέργης 2001).

Η ανακύκλωση των υπόγειων υδάτων στο σύστημα των στρωμάτων παρουσιάζεται μέσω των ακόλουθων μηχανισμών: άμεσο φιλτράρισμα της βροχόπτωσης και φιλτράρισμα μέσω της κοίτης του ποταμού. Η κατεύθυνση της ροής των υπόγειων υδάτων είναι γενικά από το Βορρά προς το νοτιοδυτικό σημείο. Η στάθμη ύδατος μέσα σε αυτές τις αποθέσεις είναι σε ένα μέσο βάθος περίπου 10-15m. Κάτω

από την επιφάνεια του εδάφους. Το υπόγειο νερό βρίσκεται κάτω από τη στάθμη της θάλασσας. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων τριών ετών υπάρχει μια μικρή τάση ανόδου κυρίως εξαιτίας της σημαντικής μείωσης ή της διακοπής των ποσοστών άντλησης από την επιχείρηση παροχής νερού και αποχετεύσεων Θεσσαλονίκης (ΕΥΑΘ).

Με βάση τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις των τεστ (δοκιμής άντλησης) , η μέση υδραυλική αγωγιμότητα εκτιμήθηκε να είναι $k=6.5 \times 10^{-3} \text{ m/min.} - 1.5 \times 10^{-2} \text{ m/min}$ και ο συντελεστής εναποθήκευσης (S), $S=10^{-3}$. Η παρουσία ιλύος υπονοεί την ύπαρξη αρτεσιανών συνθηκών στην περιοχή. Τις τελευταίες δεκαετίες όμως τα αρτεσιανά φαινόμενα σταμάτησαν λόγω της υπερεκμετάλλευσης.

Η αγωγιμότητα από τα φρεάτια ύδατος στην καταγεγραμμένη περιοχή είναι υψηλή και κυμαίνεται από 900 μέχρι 18000 mS/cm. ενδεικτικό του έντονου προβλήματος αλάτωσης που αντιμετωπίζουν μερικά από τα υδροφόρα στρώματα. Η προγραμματισμένη έγχυση ύδατος προορίζεται για τη βελτίωση της ποιότητας τέτοιων υδροφόρων στρωμάτων.

Κατά τόπους παρατηρούνται υψηλές περιεκτικότητες χλωριόντων στα υπόγεια νερά, οι οποίες αποδίδονται σε υπολειμματικές αλμύρες ή και στην ύπαρξη θαλασσινού νερού.

Ποιοτική υποβάθμιση εμφανίζεται κυρίως στον ανώτερο υδροφόρο, καθώς και στον βαθύτερο υπό πίεση. Αντίθετα το ενδιάμεσο υδροφόρο στρώμα δεν εμφανίζει ποιοτική υποβάθμιση και αναφέρεται σαν «γλυκός υδροφορέας». Ο υδροφορέας αυτός χρησιμοποιείται κυρίως για την κάλυψη των υδατικών αναγκών της περιοχής του δημοτικού διαμερίσματος της Σίνδου.

Συνεπώς, ένα επί πλέον πρόβλημα στο οποίο καλείται να βοηθήσει η διαδικασία του τεχνητού εμπλουτισμού των υπόγειων υδροφορέων, είναι η βελτίωση της ποιότητας των αντλούμενων νερών σε ότι αφορά την αλατότητά του.

2.3 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

Η κατασκευή για τη δυνατότητα εγχύσεων περιλαμβάνει τη διάτρηση ενός κύριου φρεατίου εγχύσεων 100m (P0), για να επιτρέψει την έγχυση $13 \text{ m}^3/\text{h}$ ανακυκλωμένου ύδατος και τεσσάρων πρόσθετων πιεσόμετρων 100m γύρω του (P1- P4), για να επιτρέψουν την καταγραφή της όλης διαδικασίας. Τυποποιημένες διαδικασίες που ακολουθήθηκαν πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τη διάτρηση περιλαμβάνουν:

- Προκαταρκτική υδρογεωλογική μελέτη και επιφανειακή γεωφυσική έρευνα για τον σχεδιασμό και την τοποθέτηση των γεωτρήσεων
- Δειγματοληψία και ανάλυση του εδάφους κατά τη διάρκεια κατασκευής της γεώτρησης, καθώς και έλεγχος της στάθμης του νερού
- Διαγραφή γεωτρήσεων
- Δειγματοληψία και ανάλυση ύδατος
- Πειράματα εισπίεσης

Οι μόνιμοι σταθμοί ελέγχου καταδύονται σε τρία από τα τέσσερα πιεσόμετρα για να ελέγξουν τη στάθμη του νερού, την αγωγιμότητα και το pH πριν από τη διαδικασία εισπίεσης και κατά τη διάρκεια αυτής.

Επιπλέον, η συστηματική χημική ανάλυση δειγμάτων νερού, η οποία ξεκίνησε πριν από την εισπίεση, θα συνεχιστεί για αρκετούς μήνες αφότου ξεκινήσει η εισπίεση.



Σχήμα 2.3.1 Γεώτρηση εισπίεσης (P0) και γεωτρήσεις ελέγχου (P1, P2, P3, P4)

Ο έλεγχος είναι πολύ σημαντικό μέρος στη διαδικασία εισπίεσης ύδατος. Ο παραδοσιακός έλεγχος υπόγειων νερών στηρίζεται κυρίως στη δειγματοληψία από τις γεωτρήσεις αλλά αυτή η προσέγγιση είναι σχετικά σπάνια και επιπλέον μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτική σε ετερογενή υδροφόρα στρώματα. Σε μία προσπάθεια να αυξηθεί η ικανότητα ελέγχου της περιοχής εγχύσεως, εγκαταστάθηκαν μόνιμοι επιτόπιοι γεωηλεκτρικοί αισθητήρες και στις πέντε γεωτρήσεις. Ο στόχος είναι να προμηθευθούμε μέσω των ηλεκτρικών μετρήσεων ειδικής αντίστασης, γεωηλεκτρικές εικόνες της αυξανόμενης ογκομετρικής δειγματοληψίας γύρω και μεταξύ των γεωτρήσεων, καθώς και να κατανοηθεί η ροή και η μεταφορά του νερού της εισπίεσης.

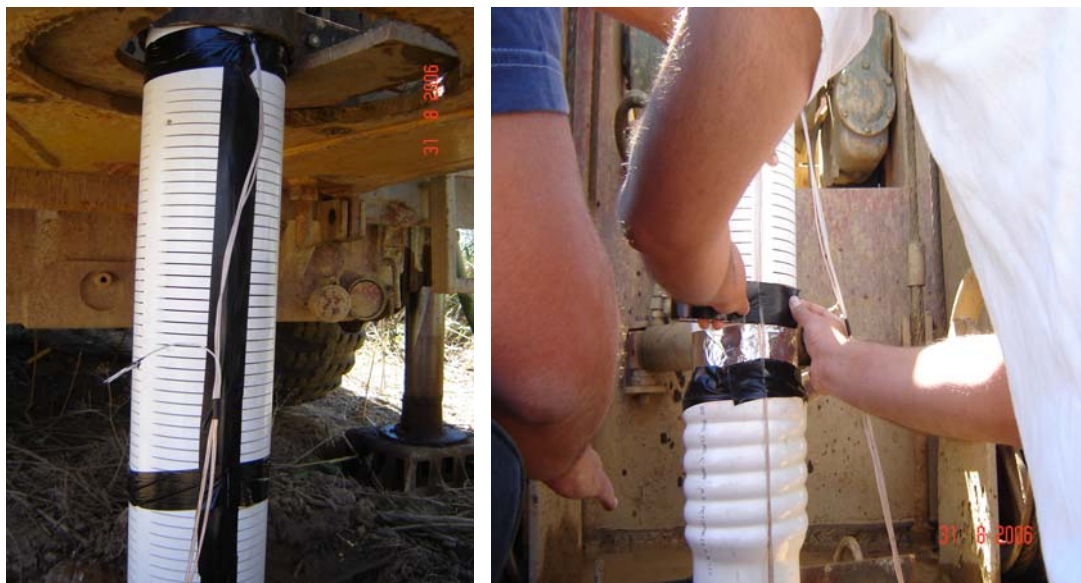
3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

3.1 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Στις γεωτρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας πρέπει να χρησιμοποιείται PVC υλικό και όχι μεταλλικό περίβλημα. Επιπλέον πρέπει να αποφεύγεται οποιοδήποτε υλικό μεταλλικού περιβλήματος στις υδρογεωτρήσεις. Καμία άλλη ειδική τεχνική προδιαγραφή ως προς την κατασκευή της γεώτρησης δεν απαιτείται. Για την οργάνωση των γεωτρήσεων και τη λήψη των μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας απαιτείται η προκατασκευή ειδικών καλωδίων (Σχήμα 3.1.1.) και ηλεκτροδίων τα οποία τοποθετούνται στα τοιχώματα των γεωτρήσεων κατά την εγκατάστασή τους (Σχήμα 3.1.2.).



Σχήμα 3.1.1. Κατασκευή καλωδίων.



Σχήμα 3.1.2. Εγκατάσταση καλωδίων ηλεκτρικής τομογραφίας.

Δεδομένου ότι στην περίπτωση μας οι γεωτρήσεις προγραμματίστηκαν να έχουν ένα βάθος κατά προσέγγιση 100m, βέλτιστο μεσοδιάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων επιλέχθηκαν τα 3m. Φυσικά με ένα πυκνότερο μεσοδιάστημα θα παίρναμε εικόνες υψηλότερης ανάλυσης, κάτι που θεωρείται μη πρακτικό λαμβάνοντας υπόψη το αυξανόμενο κόστος κατασκευής και εγκατάστασης καθώς και τον περιορισμένο αριθμό καναλιών (48) που μπορεί να υποστηρίξει το όργανο μέτρησης. Κατά συνέπεια κάθε καλώδιο που χρησιμοποιήθηκε σ' αυτήν την εργασία είχε μήκος 110m με συνολικά 36 ηλεκτρόδια με μία απόσταση 3m.



Σχήμα 3.1.3. Γεώτρηση Ρ0 στην περιοχή έρευνας.

Το καλώδιο γεωτρήσεων κατασκευάστηκε με 36 κανονικούς (εύκολα διαθέσιμους και χαμηλού κόστους) επικαλυμμένους με PVC χάλκινους αγωγούς των 0.5 mm και διαφόρων μηκών (δηλαδή 5,8,11,...110m για τον 1°, 2°, 3°,...36° αγωγό αντίστοιχα). Παράλληλα με την τοποθέτηση των στελεχών της γεώτρησης μέσα στην γη τοποθετούνται και τα καλώδια με κολλητική ταινία. Προκειμένου να αυξηθεί η περιοχή επίδρασης του ηλεκτροδίου και κατά συνέπεια να μειωθεί η αντίσταση επαφής, κάθε ηλεκτρόδιο συνδέθηκε με τη σωλήνωση και στη συνέχεια καλύφθηκε πλήρως από ένα δαχτυλίδι ταινίας αλουμινίου (πάχους 5cm) που περικύκλωσε τη σωλήνωση διαμορφώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο ένα σχετικά μεγαλύτερο ηλεκτρόδιο.

3.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Για την πραγματοποίηση μετρήσεων στο ύπαιθρο χρησιμοποιήθηκε το όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης SYSCAL (V11.4++) της εταιρίας IRIS INSTRUMENTS.



Σχήμα 3.2.1. SYSCAL , όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Πρόκειται για ένα πλήρως αυτοματοποιημένο όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σχεδιασμένο για έρευνα με μεθόδους παροχής συνεχούς ρεύματος.

Ο αυτοματοποιημένος έλεγχος της αντιστάθμισης του φυσικού δυναμικού, η ψηφιακή υπέρθεση για την ενίσχυση του σήματος και η προβολή του σφάλματος κατά τις μετρήσεις που προσφέρονται από το συγκεκριμένο όργανο, δημιουργούν συνθήκες ασφαλών μετρήσεων.



Σχήμα 3.2.2. Τμήμα εξοπλισμού

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα. (Πίνακας 3.2.3)

ΠΟΜΠΟΣ	
Maximum output voltage	400 V
Maximum output current	1200mA
Maximum output power	100W
Current waveform (Rho mode)	ON+, ON-

Current Resolution	10μA
Current Accuracy	0.3% typical 1% maximum over the whole operating temperature range
ΔΕΚΤΗΣ	
Input impedance	10Mohm
Input voltage range	-5V to +5V
Rejection filter 50Hz and 60Hz	
Voltage	
Resolution measurement	10μV
after stacking	1μV
Accuracy	0.3% Typical
	1% max

Πίνακας 3.2.3

3.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Τα μόνιμα εγκατεστημένα καλώδια στην περιοχή είναι προγραμματισμένα να λαμβάνουν τις τιμές της ηλεκτρικής τομογραφίας μεταξύ των γεωτρήσεων και μεταξύ της επιφάνειας και των γεωτρήσεων. Ο στόχος είναι να αξιολογηθεί η ποιότητα των μετρήσεων και να συσχετιστούν τα λαμβανόμενα αποτελέσματα των εικόνων ηλεκτρικής τομογραφίας με τις αντίστοιχες λιθολογικές στήλες, προκειμένου να γίνει η ερμηνεία και να σχεδιαστούν οι μελλοντικές συστηματικές μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας, που θα ενταθούν όταν αρχίσει η διαδικασία εισπίεσης.

Ο τύπος της διάταξης (πρωτόκολλο) που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των μετρήσεων ονομάζεται "Dipole- Dipole Diagonal". Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο προέκυψε από το πρόγραμμα "Electre III" το οποίο ορίζει την ακριβή θέση των ηλεκτροδίων μέσα στις γεωτρήσεις (βάθος) .

Η ρύθμιση του πρωτοκόλλου στο όργανο της "Iris Instruments", "Syscal (V11.4++)", γίνεται πριν ξεκινήσουν οι μετρήσεις στην περιοχή ώστε το όργανο να κάνει αυτόματα τη λήψη των μετρήσεων.

Αρχικά καθορίζεται ο αριθμός των ηλεκτροδίων σε κάθε γεώτρηση (17 ηλεκτρόδια) και οι αποστάσεις αυτών (6m) καθώς και οι αποστάσεις των γεωτρήσεων (30m).

Βάσει των ηλεκτροδίων που ορίζονται γίνεται η αρίθμηση τους (Σχήμα 3.3.1(β)).

The screenshot shows the 'Type of measurement' section with 'Borehole (X,Z location)' selected. The 'Electrode location' section shows 'X grid spacing' as 6, 'X grid offset' as 0.00, 'X grid size' as 6, 'Z grid spacing' as 6, 'Z grid offset' as 6, and 'Z grid size' as 17. Navigation buttons 'Previous' and 'Next' are visible.

(α)

Σχήμα 3.3.1. Χρήση προγράμματος ELECTRE III

Z	I	X	0.00	6.00	12.00	18.00	24.00	30.00
6.00	17							25
12.00	16							26
18.00	15							27
24.00	14							28
30.00	13							29
36.00	12							30
42.00	11							31
48.00	10							32
54.00	9							33
60.00	8							34
66.00	7							35
72.00	6							36
78.00	5							37
84.00	4							38
90.00	3							39
96.00	2							40
102.00	1							41

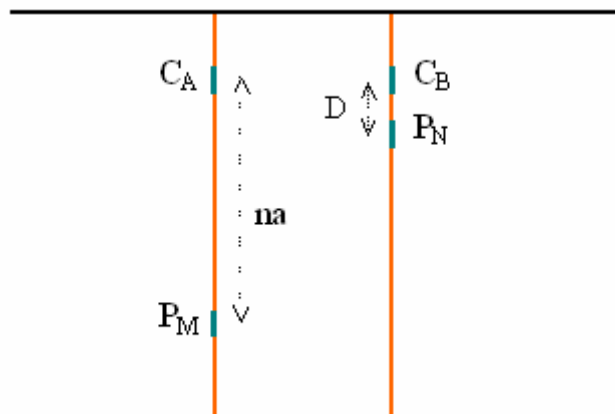
(β)

Σχήμα 3.3.1. Χρήση προγράμματος ELECTRE III

X, είναι η απόσταση των γεωτρήσεων

Z, είναι το βάθος στο οποίο βρίσκονται τα ηλεκτρόδια

Στη συνέχεια φαίνεται το πρωτόκολλο που χρησιμοποιήθηκε, dipole-dipole diagonal (Σχήμα 3.3.2)



Σχήμα 3.3.2. Dipole – dipole diagonal

Οι τετράδες ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται για κάθε μέτρηση παράγονται αυτόματα και ενδεικτικά παρουσιάζονται κάποιες στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3).

	# Ca	# Cb	# Pm	# Pn	K factor
1	17	25	16	26	23.44810784451
2	17	25	26	14	-39.0373663611791
3	17	25	14	27	79.1766223740552
4	17	25	27	15	-59.9722400575878
5	17	25	15	26	33.7144494817385
6	17	25	26	10	-45.3936323906754
7	17	25	10	27	110.582405031526
8	17	25	27	13	-92.3701402853091
9	17	25	13	26	41.9947491320498
10	17	25	26	6	-46.4256259508471
11	17	25	6	27	116.913440630008
12	17	25	27	12	-101.101627048462
13	17	25	12	26	43.7110140489004
14	17	25	26	2	-46.6974834744288
15	17	25	2	27	118.652975693839
16	17	25	27	11	-106.81617922264
17	17	25	11	26	44.7459942996489
18	17	25	26	9	-45.8133925421547
19	17	25	9	27	113.106985853879
20	17	25	27	8	-114.83576297306
21	17	25	8	26	46.0944619765513
22	17	25	26	4	-46.5990020903979
23	17	25	4	27	118.019229361881
24	17	25	27	7	-116.046553145096

Συνολικά δημιουργήθηκαν 816 συνδυασμοί (Σχήμα 3.3.3), οι οποίοι και αποτέλεσαν το αρχείο βάσει του οποίου πήραμε τις μετρήσεις.

The screenshot shows a 'Computed' dialog box with two sections: 'Original sequence statistics' and 'Optimized sequence statistics'. The 'Original' section shows Quad. number: 816, Number of injection: 816, and Number of channel(s) used: 1. The 'Optimized' section shows Quad. number: 830, Number of injection: 121, Number of channels finally used: 10, and Optimization gain: 6.7. There are 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom right.

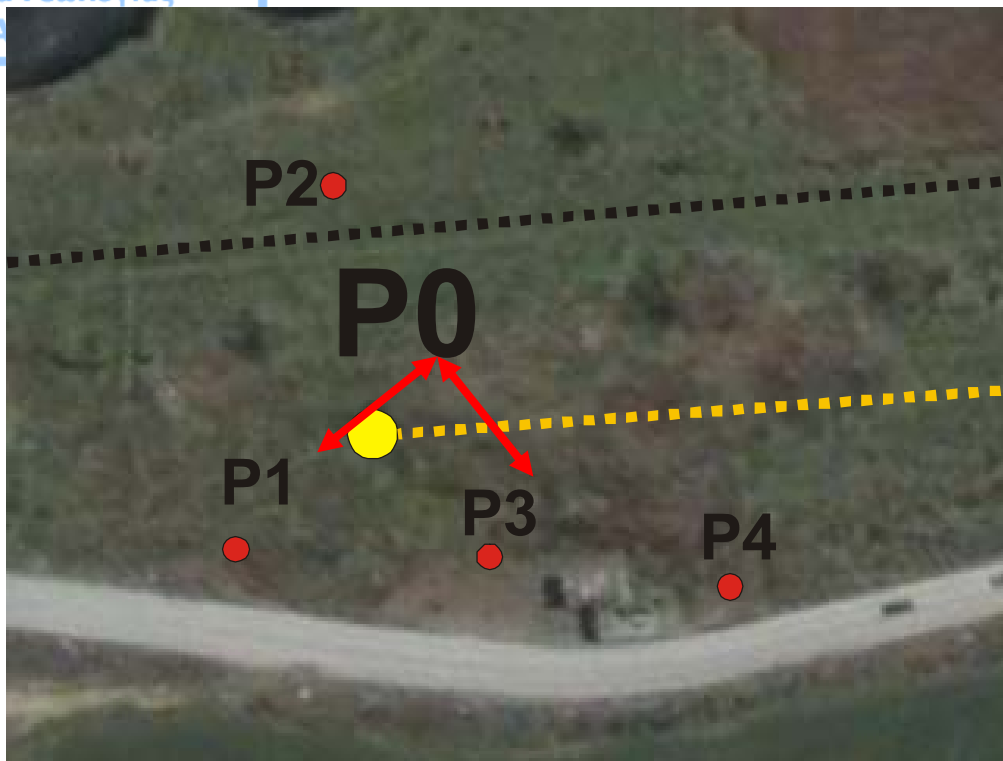
Original sequence statistics	
Quad. number :	816
Number of injection :	816
Number of channel(s) used :	1

Optimized sequence statistics	
Quad. number :	830
Number of injection :	121
Number of channels finally used :	10
Optimization gain :	6.7

Σχήμα 3.3.3 Οι συνδυασμοί με τους οποίους πήραμε τις μετρήσεις μας

3.4 ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν το Μάιο του 2007. Το όργανο βρισκόταν στη γεώτρηση εισπίεσης P0 και η σύνδεση των καλωδίων αυτής με τις γεωτρήσεις P1 και P3 έγινε με τη χρήση καλωδίου προέκτασης. (Σχήμα 3.4.1)



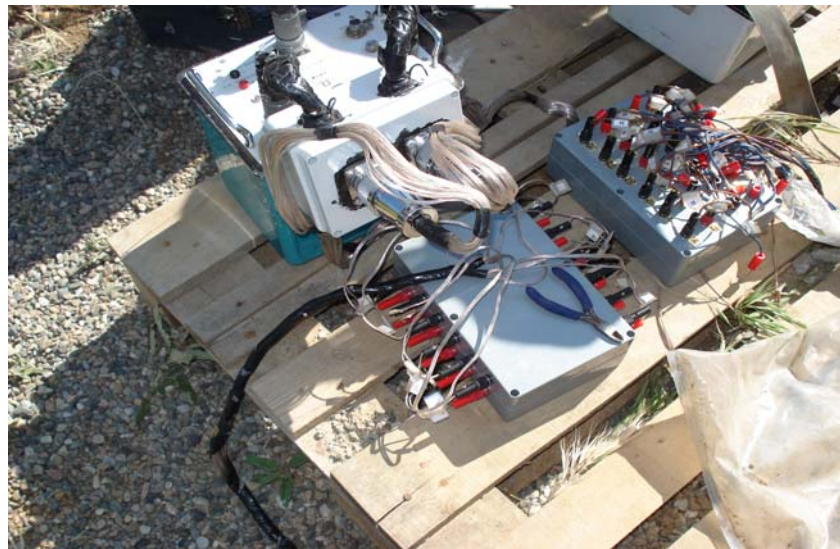
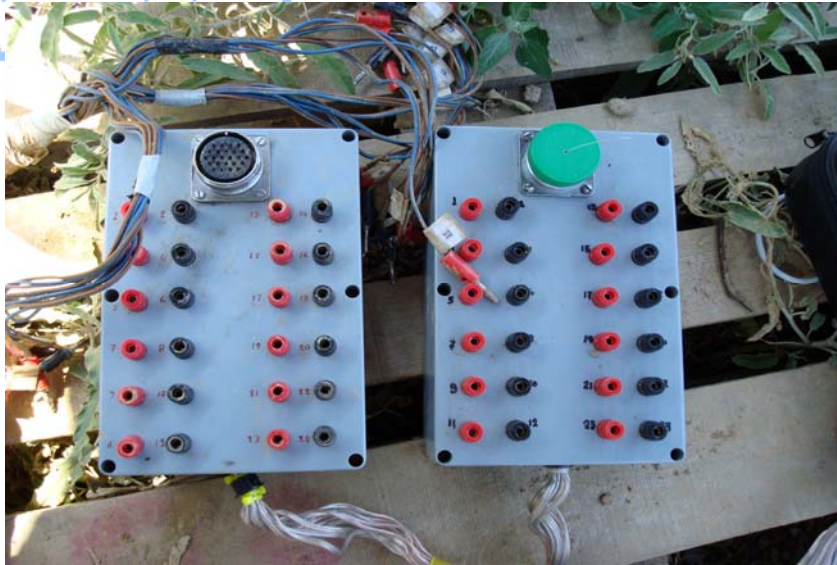
P0P1 (dist P0-P1 =30m)

P0P2 (dist P0-P2 =36m)

P0P3 (dist P0-P1 =30m)

Σχήμα 3.4.1. Θέσεις και αποστάσεις των γεωτρήσεων στην περιοχή έρευνας

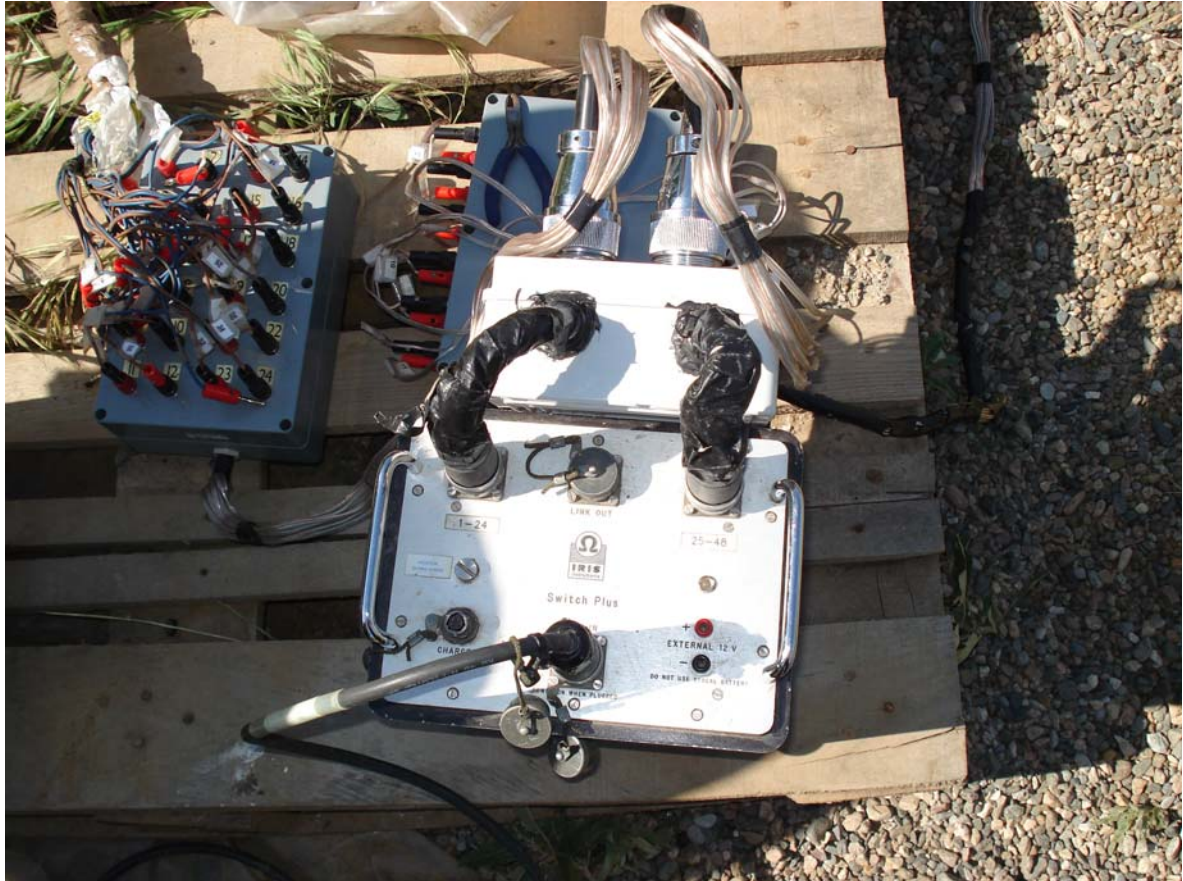
Η σύνδεση των απολήξεων της γεώτρησης με το όργανο μέτρησης γίνεται με τα ενδιάμεσα κουτιά συνδεσμολογίας (**Σχήμα 3.4.2.**).



Σχήμα 3.4.2 Κουτιά συνδεσμολογίας πριν και μετά τη σύνδεση

Πριν από τη λήψη των μετρήσεων ελέγχθηκαν οι αντιστάσεις επαφής για τα ηλεκτρόδια όλων των γεωτρήσεων και ήταν χαρακτηριστικά χαμηλές ($0.2 \text{ K}\Omega$) και μόνο τα πρώτα ένα ή δυο ηλεκτρόδια τα οποία είναι πάνω από την επιφάνεια του νερού (πάνω από το βάθος των 12m) παρουσίασαν υψηλότερες αντιστάσεις επαφής (περίπου $10 \text{ K}\Omega$). (**Σχήμα 3.4.3**) Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εισάγονται ρεύματα μεγαλύτερα από 500mA έτσι ώστε να συλλέγονται

μετρήσεις καλής ποιότητας με την άριστη επανάληψη (χαμηλά σφάλματα RMS).



Σχήμα 3.4.3 Έλεγχος ηλεκτροδίων

4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

4.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Μετά το τέλος των μετρήσεων και αφού έχουν αποθηκευτεί όλα τα δεδομένα στο μηχάνημα, μεταφέρονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή πρωτογενή δεδομένα τα οποία στη συνέχεια θα υποστούν φιλτράρισμα.

Έτσι γίνεται ο έλεγχος της ποιότητας των μετρήσεων και η απομάκρυνση των "λάθος" τιμών. Γενικά η ποιότητα τους κρίνεται ικανοποιητική καθώς μόλις το 3-5% των μετρήσεων τελικά απορρίφθηκαν.



Σχήμα 4.1.1 Σύνδεση ηλεκτρονικού υπολογιστή με το μηχάνημα

Τα δεδομένα, στη συνέχεια, εισάγονται σε πρόγραμμα αντιστροφής ώστε να αποκτήσουμε μία εικόνα του εδάφους (προφίλ). Δεδομένου ότι οι μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας αποτελούν μια «παραμορφωμένη» εικόνα των πραγματικών ηλεκτρικών αντιστάσεων του υπεδάφους είναι απαραίτητο να υποστούν μια ειδική, πολύπλοκη μαθηματικά και υπολογιστικά, διαδικασία, η οποία ονομάζεται αντιστροφή.

Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο αντίστασης που να δίνει μετρήσεις όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές. Προϋπόθεση η ύπαρξη μιας μεθόδου επίλυσης του ευθέως προβλήματος, δηλαδή, να βρεθούν οι μετρήσεις, εφόσον μας δοθεί η

κατανομή της αντίστασης. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό είναι ένας αλγόριθμος πεπερασμένων στοιχείων, ο οποίος επιλύει τις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος σε ανομοιογενή γη. Η αντιστροφή μπορεί να γίνει σε δυο (δισδιάστατη) ή τρεις (τρισδιάστατη) διαστάσεις .

Στη γεωηλεκτρική μέθοδο λόγω της μη-γραμμικής φύσης του αντιστρόφου προβλήματος, οι αλγόριθμοι αντιστροφής είναι μια αυτοματοποιημένη επαναληπτική διαδικασία. Αρχικά, η περιοχή ενδιαφέροντος διακριτοποιείται σε ένα δίκτυο από παραμέτρους στις οποίες και αποδίδεται μια αρχική τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Βάσει αυτού του μοντέλου υπολογίζονται τα αντίστοιχα συνθετικά δεδομένα, τα οποία στη συνέχεια συγκρίνονται με τα πραγματικά. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνεται μια εκτίμηση του λάθους $\Delta y =$ (πραγματικά δεδομένα – συνθετικά δεδομένα). Στη συνέχεια με μια διαδικασία αντιστροφής πινάκων γίνεται διόρθωση του αρχικού μοντέλου αντίστασης και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το λάθος Δy μεταξύ των πραγματικών και συνθετικών δεδομένων ελαχιστοποιηθεί. Το τελικό μοντέλο αντίστασης θεωρείται ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική κατανομή των γεωηλεκτρικών αντιστάσεων και με βάση τις υπάρχουσες γεωλογικές συνθήκες ερμηνεύεται, ώστε οι αντιστάσεις να μετατραπούν σε λιθολογικές και τεκτονικές τομές του υπεδάφους.

Στην περίπτωση μας το πρόγραμμα αντιστροφής που χρησιμοποιήθηκε είναι το RES2DINV του Dr. M.Loke. Πρόκειται για έναν αλγόριθμο που εκτελεί κανονικοποιημένη μη γραμμική δισδιάστατη αντιστροφή γεωηλεκτρικών δεδομένων. Ο αλγόριθμος είναι επαναληπτικός και σε κάθε επανάληψη χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να επιλύσει το ευθύ πρόβλημα.

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα αξιόπιστα καθώς το % λάθος (RMS) ήταν μόλις 2-3%, κάτι που οφείλεται και στην καλή ποιότητα των πρωτογενών δεδομένων, δηλαδή των μετρήσεων. Η διαδικασία της αντιστροφής επαναλήφθηκε αρκετές φορές με διαφορετικές παραμέτρους βάθους, ώστε να διερευνηθούν όλες οι πιθανές λύσεις. Τα τελικά αποτελέσματα και η ερμηνεία τους παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ

Στα σχήματα **4.2.1** και **4.2.3** απεικονίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αντιστροφή δεδομένων διπόλου-διπόλου μεταξύ των γεωτρήσεων P0-P1 (**Σχήμα 4.2.1**) και P0-P3 (**Σχήμα 4.2.3**) ύστερα από την εισαγωγή τους στο "Surfer". Οι εικόνες δείχνουν ξεκάθαρα τη στρωματογραφία της περιοχής καθώς και τους κύριους υδροφόρους.

Στις τομές παρουσιάζονται τα πραγματικά βάθη και οι πραγματικές υπεδάφειες αντιστάσεις οι οποίες και εμφανίζονται με χρωματική κλίμακα «ουρανίου τόξου» με τα ψυχρά χρώματα (μπλε) να αντιστοιχούν σε χαμηλές αντιστάσεις (π.χ. άργιλοι) και τα θερμά χρώματα (κόκκινα) να αντιστοιχούν σε σχετικά υψηλές αντιστάσεις (π.χ. χαλίκια).

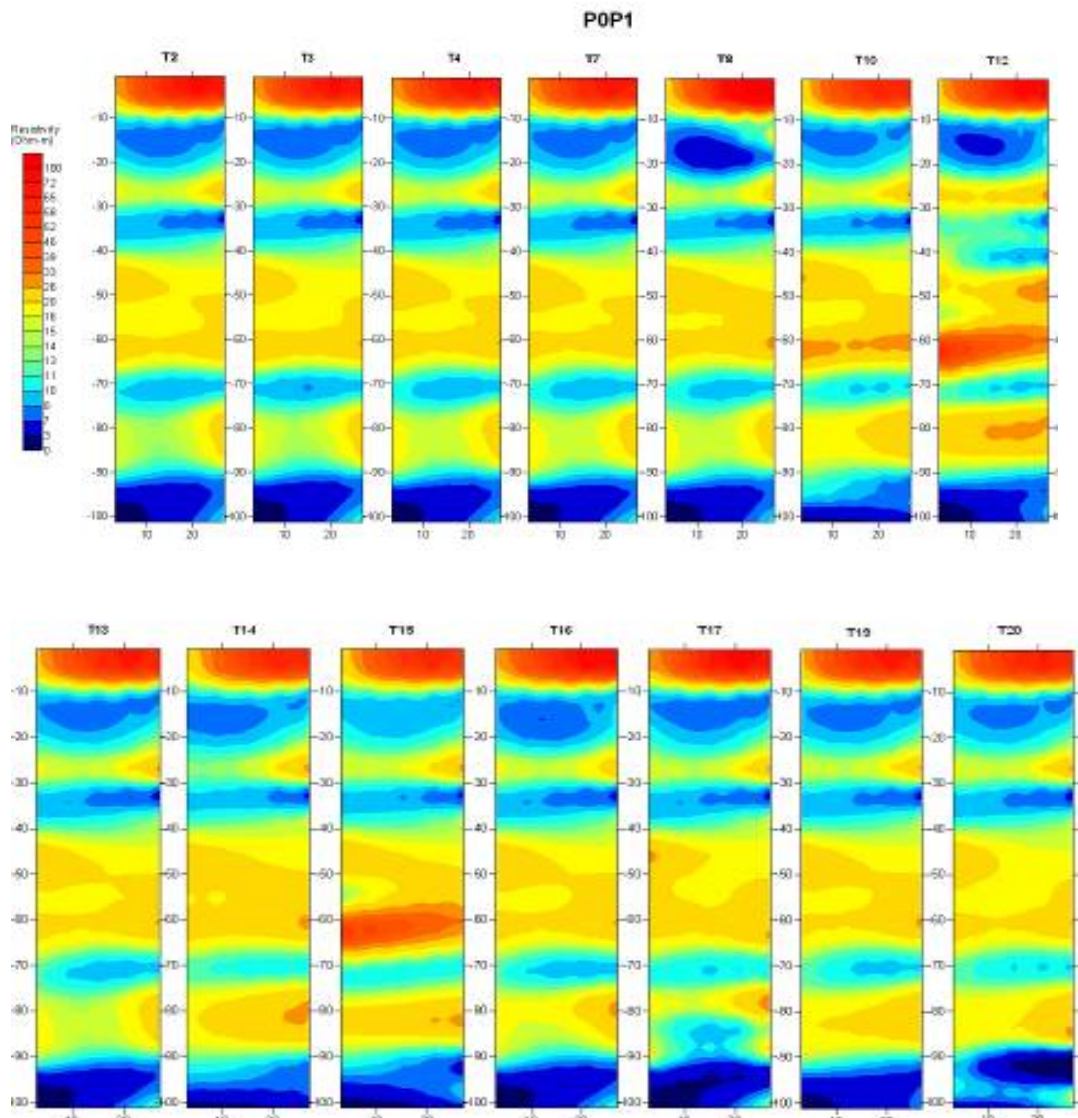
Ειδικότερα από τη βιβλιογραφία προκύπτει ότι για μικρές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης παρατηρούνται στρώματα αποτελούμενα από άργιλο (0 – 10 Ohm) και αμμοάργιλο (10 – 20 Ohm), ενώ, καθώς η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης αυξάνει (20 – 40 Ohm), παρατηρούνται υλικά όπως άμμος , χαλίκια και κροκάλες.

Βάσει της κατάταξης αυτής και σύμφωνα με τη στρωματογραφία μεταξύ των γεωτρήσεων P0 – P1 (**Σχήμα 4.2.1**) μπορούμε να πούμε ότι από 0 – 10 m παρατηρείται μια ακόρεστη ζώνη αποτελούμενη από άμμους, κροκάλες και χαλίκια. Στη συνέχεια μεταξύ 10 - 20 m και 30 – 40 m εμφανίζονται δύο στρώματα χαμηλής αντίστασης (~10 Ohm)

αποτελούμενα από άργιλο –αμμοάργιλους τα οποία θεωρούνται σχετικά αδιάπερατα. Ενδιάμεσα, στο βάθος των 20 – 30 m παρατηρείται ένα υπό πίεση υδροφόρο στρώμα με μέση αντίσταση ($\sim 20 \text{ Ohm}$) το οποίο αποτελείται από αμμοαργίλους.

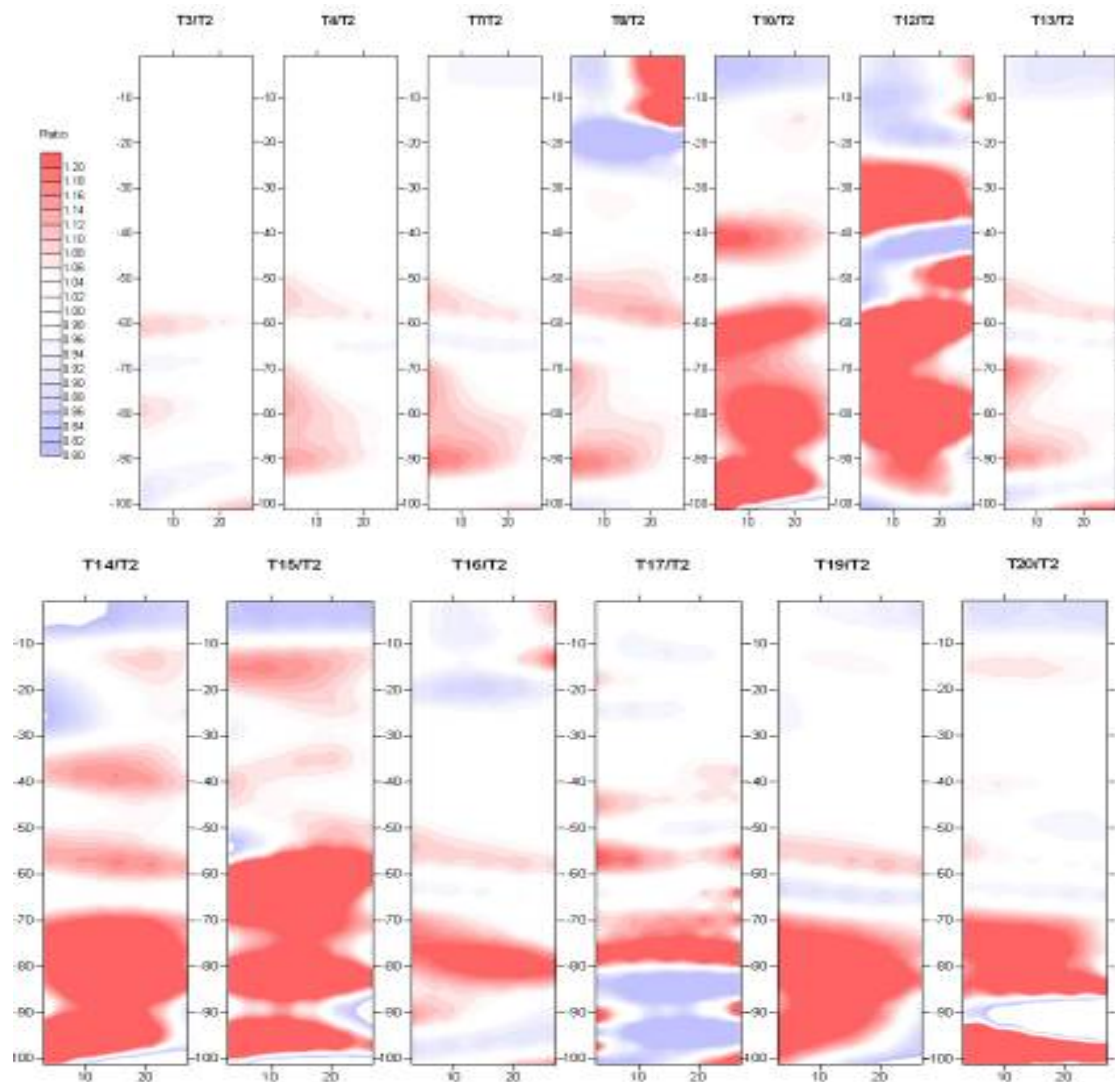
Στο βάθος των 40 - 70 m συναντάται ο κύριος υδροφορέας ο οποίος αποτελείται από άμμους , χαλίκια και κροκάλες .

Στο υποκείμενο στρώμα παρατηρείται μείωση της αντίστασης που δηλώνει την παρουσία αμμοαργίλου ενώ γύρω στα 80 – 90 m παρατηρούμε μια νέα αύξηση αυτής. Τέλος από τα 90 m και κάτω εμφανίζεται στρώμα αργίλου με αντίσταση $\sim 5 \text{ Ohm}$.



Σχήμα 4.2.1. Απεικόνιση της στρωματογραφίας μεταξύ των γεωτρήσεων
P0 – P1

Με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας παίρνουμε τις διαφορετικές εικόνες του εδάφους και στη συνέχεια έχουμε τη δυνατότητα να τις συγκρίνουμε έτσι ώστε να εντοπίσουμε τις αλλαγές που παρουσιάζονται στους υδροφόρους ορίζοντες και να δούμε αν επηρεάζονται και πόσο από την παροχή του νερού. Τα υδροφόρα στρώματα διακρίνονται σε βάθη 20-30m, 40-70m και 75-90m περίπου. Στις εικόνες των τομογραφιών φαίνεται ο λόγος των αποτελεσμάτων των τιμών των ηλεκτρικών αντιστάσεων και όχι οι ίδιες οι αντιστάσεις. Δηλαδή, για να δω τις μεταβολές των ιδιοτήτων, χρησιμοποιώ το πηλίκο δύο μετρήσεων. Συγκεκριμένα εδώ, διαιρώ κάθε εικόνα με την αρχική.



Σχήμα 4.2.2 Απεικόνιση του λόγου των ηλεκτρικών αντιστάσεων

Παρατηρούμε ότι δίπλα στις τομογραφίες υπάρχει χρωματική κλίμακα με τη βοήθεια της οποίας μπορούμε να δώσουμε την ερμηνεία για το τι μεταβολές συμβαίνουν στο έδαφος κατά την διάρκεια του πειράματος.

Στη χρωματική κλίμακα:

- Το κόκκινο δηλώνει αύξηση του λόγου της αντίστασης, δηλαδή αυξάνεται η αντίσταση των σχηματισμών, ενώ παράλληλα μειώνεται η αγωγιμότητα τους.
- Το λευκό δηλώνει πως δεν υπάρχει καμία μεταβολή στο λόγο των τιμών της αντίστασης, ενώ
- το γαλάζιο δείχνει μείωση του λόγου της αντίστασης, δηλαδή αύξηση της αγωγιμότητας και μείωση της αντίστασης των σχηματισμών.

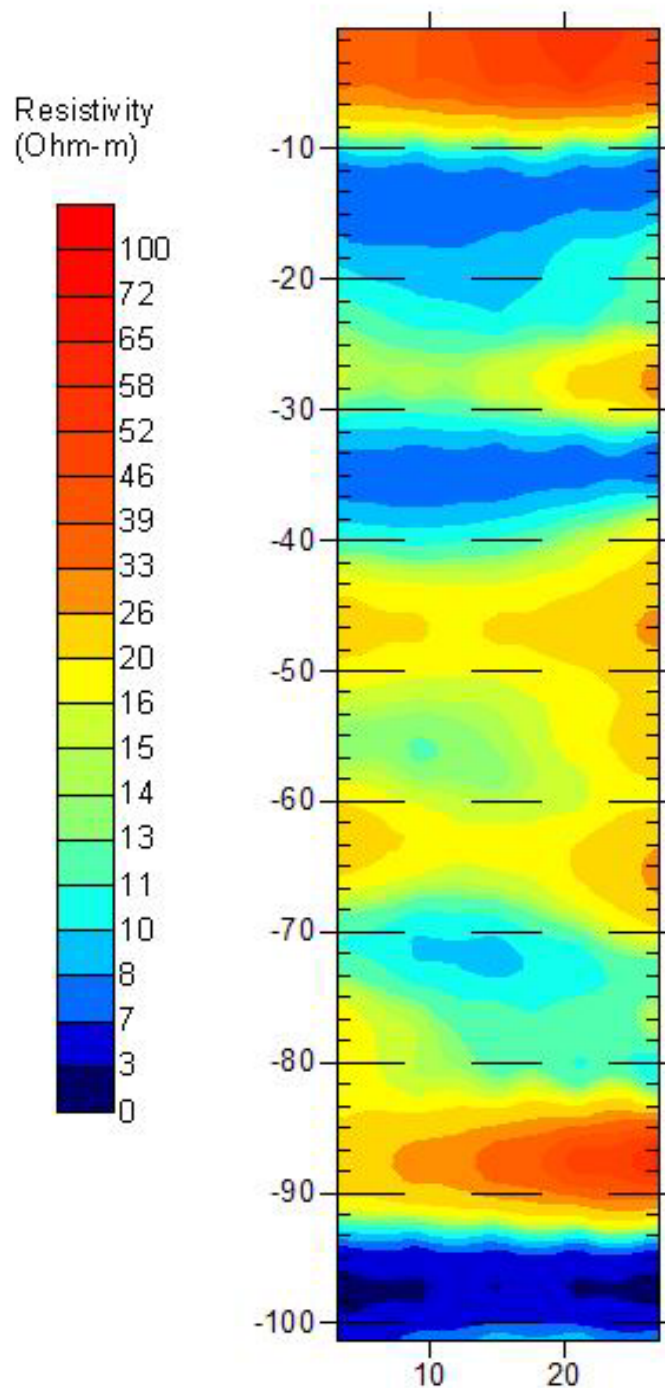
Αυτό σημαίνει ότι καθώς προστίθεται πόσιμο νερό στην κεντρική γεώτρηση μειώνεται η αγωγιμότητα και αυξάνεται η ηλεκτρική αντίσταση, ουσιαστικά προκαλείται μείωση στην ποσότητα του αλατιού του υφάλμυρου υδροφορέα (κόκκινο χρώμα).

Αντίστοιχα στο **Σχήμα 4.2.3** απεικονίζεται η στρωματογραφία μεταξύ των γεωτρήσεων P0 – P3 από το οποίο βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα.

Αρχικά στα πρώτα ~ 10 m εμφανίζεται μια ακόρεστη ζώνη με υψηλές τιμές αντίστασης ($> 40 \text{ Ohm}$). Στη συνέχεια στα 10 – 20 m και 30 – 40 m παρατηρούνται στρώματα χαμηλής αντίστασης ενδεικτικής της παρουσίας αργίλου, τα οποία θεωρούνται αδιαπέρατα. Ενδιάμεσα, στα 20 – 30 m παρατηρείται ένα υπό πίεση υδροφόρο στρώμα.

Στο βάθος των 40 - 70 m. συναντάται ο κύριος υδροφορέας αποτελούμενος από άμμους, χαλίκια και κροκάλες. Στα 70 – 80 m παρατηρείται πτώση της αντίστασης η οποία οφείλεται στην παρουσία αργίλου και αμμοαργίλου. Κάτω από τα 80 m η αντίσταση αυξάνει σημαντικά με τιμές άνω των 40 Ohm που δείχνει την ύπαρξη χαλικιών και κροκάλων.

Τέλος σε βάθος 90 – 100 m παρατηρείται απότομη μείωση της αντίστασης κάτω των 10 Ohm λόγω της μεγάλης ποσότητας αργίλου στην περιοχή.



Σχήμα 4.2.3 Απεικόνιση της στρωματογραφίας μεταξύ των γεωτρήσεων P0 – P3

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη δείχνει τις δυνατότητες της ηλεκτρικής τομογραφίας μεταξύ γεωτρήσεων. Το καλώδιο κατασκευάζεται εύκολα, είναι φτηνό και μπορεί πολύ εύκολα να εγκατασταθεί σε κάθε γεώτρηση με πλαστικές σωληνώσεις (PVC). Μετά την εγκατάσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη αξιόπιστων εικόνων της αντίστασης του υπεδάφους με υψηλή ανάλυση σε σύγκριση με τις επιφανειακές γεωφυσικές διασκοπήσεις.

Η αντιστροφή των δεδομένων της φαινόμενης αντίστασης καθιστά τη μέθοδο περισσότερο αξιόπιστη από άλλα αντίστοιχα όργανα διαγραφίας αντίστασης των γεωτρήσεων. Επιπλέον, με αυτή τη μέθοδο παράγονται εικόνες με μεγαλύτερη πληροφορία χώρου σε σύγκριση με τη σημειακή διαγραφή ή τις τεχνικές δειγματοληψίας.

Η μόνιμη εγκατάσταση καθιστά εύκολη την εφαρμογή των μετρήσεων διαχρονικής μεταβολής της αντίστασης και επιτρέπει τον έλεγχο των αλλαγών τους. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από όλη τη διαδικασία μέτρησης, δηλαδή τις εικόνες ηλεκτρικής τομογραφίας που προκύπτουν με τις εικόνες των λιθολογικών τομών, παρατηρούμε πως υπάρχει μία πολύ καλή συσχέτιση και αντιστοιχία των στρωμάτων. Αυτό αποτελεί ένδειξη αξιοπιστίας της μεθόδου και σε συνδυασμό με τυπική δειγματοληψία και ανάλυση αυξάνει την ικανότητα ελέγχου και βοηθάει στην κατανόηση και τον υπολογισμό της επίδρασης της διαδικασίας εισπίεσης νερού σε μια γεώτρηση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Παπαζάχος Β.Κ. (1986). Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Βαργεμέζης Γ. ,Τσούρλος Π. ,Βουδούρης Κ. (2006). Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων για τη μελέτη υπόγειας υδροφορίας στα πλαίσια δοκιμαστικής λειτουργίας εμπλουτισμού υδροφόρου ορίζοντα. Προκαταρκτική Έκθεση.
- LaBrecque, D. J. and Yang, X., 2001, Difference inversion of ERT data: a fast inversion method for 3-D in situ monitoring: Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 5, 83-90.
- Tsourlos, P. 1995. Modelling interpretation and inversion of multielectrode resistivity survey data. Ph.D. Thesis, University of York.
- Tsourlos P., Vargemezis G., Voudouris C., Spachos T. , Stampolidis A. (2007).Monitoring recycled water injection into a confined aquifer in Sindos (Thessaloniki) using electrical resistivity tomography (ERT): installation and preliminary results . Aristotle University of Thessaloniki, School of Geology, Department of Geophysics,, Department of Geology, Thessaloniki Water Supply and Sewerage Co. [E.Y.A.Th S.A.]
- Zhou Bing, S.A. Greenhalgh (2000) Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations Geophysical Prospecting 48 (5) , 887–912