

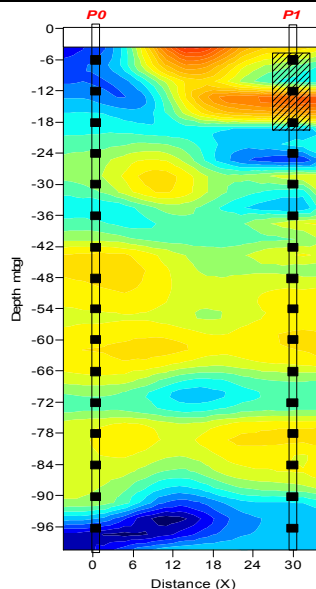


ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ
ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΣΙΝΔΟΥ (Ν. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ)**

Γκαζοτζή Παναγιώτα
Α.Ε.Μ. 3689

Τσοχατζή Δήμητρα
Α.Ε.Μ. 3790



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

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

Θεσσαλονίκη 2008

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	5
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ	9
1.3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ	10
1.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ	13
1.5 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	13
1.6 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΙΣ	
ΜΕΤΑΞΥ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ	14
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ	18
2.1 ΘΕΣΗ	19
2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ – ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ	
ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	20
2.3 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ	22
3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	24
3.1 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ	
ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	24
3.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	26
3.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	28
3.4 ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	31
4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	34
4.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	34
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ	37
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	41
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	42

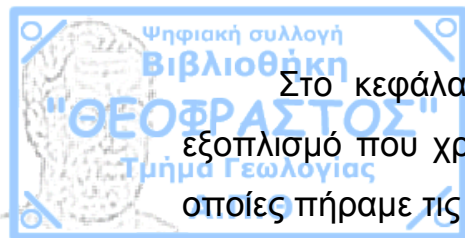
Η παρούσα διπλωματική εργασία σκοπό έχει την περιγραφή της διαδικασίας μετρήσεων με τη χρήση της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας μεταξύ γεωτρήσεων και ερμηνείας των δεδομένων ώστε να βγάλουμε συμπεράσματα για τη γεωλογική δομή του υπεδάφους. Οι μετρήσεις μεταξύ γεωτρήσεων που παρουσιάζονται έγιναν 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 εξασφαλίζεται από την ύπαρξη ηλεκτροδίων στις γεωτρήσεις, δηλαδή πολύ κοντά στο στόχο έρευνας. Επίσης μια τέτοιου είδους έρευνα μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες σε σχέση με το υδρογεωλογικό χαρακτηρισμό των σχηματισμών του υπεδάφους

Όπως είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία, η εφαρμογή των ηλεκτρικών τομογραφιών έχει ευρεία χρήση για περιβαλλοντικό έλεγχο περιλαμβανομένου της ανάλυσης του υπογείου νερού, απεικόνιση και έλεγχο διείσδυσης αλατόνερου σε υδροφόρους. Η απεικόνιση σε διάρκεια χρόνου, περιλαμβανομένου και μονίμως 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, η οποία βοηθάει στη αναγνώριση και διάκριση μηχανισμούς μεταφοράς ρύπανσης.

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

Στο δεύτερο κεφάλαιο προσδιορίζουμε την περιοχή μέτρησης, αναφέρουμε την γεωλογία και τα υδρογεωλογικά στοιχεία της περιοχής μέτρησης καθώς και τη διαδικασία εγκατάστασης εισπίεσης.



Στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζουμε τις μετρήσεις υπαίθρου, τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήσαμε την επιλογή των παραμέτρων με τις οποίες πήραμε τις μετρήσεις και τέλος τον τρόπο επεξεργασίας αυτών.

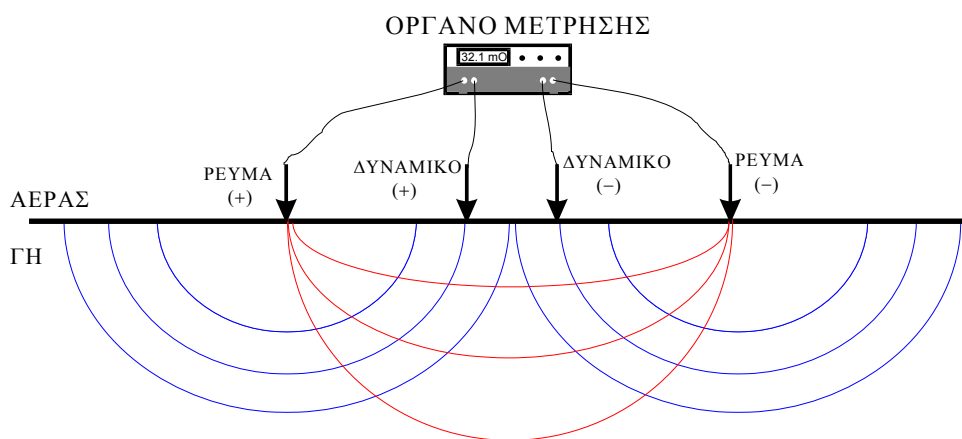
Στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας περιγράφεται η επεξεργασία των μετρήσεων καθώς και η ερμηνεία αυτών.

Την επίβλεψη κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας μας είχε ο κ. Τσούρλος Παναγιώτης, Επίκουρος καθηγητής του Α.Π.Θ ,τον οποίον και ευχαριστούμε για την βοήθειά του. Επίσης ευχαριστούμε θερμά για την πολύτιμη βοήθεια του, τον μεταπτυχιακό φοιτητή Σιμιρδάνη Κλεάνθη .

1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλεκτρική τομογραφία αποτελεί εξέλιξη της κλασικής ηλεκτρικής μεθόδου. 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 που προκαλείται. Η ηλεκτρική αντίσταση που υπολογίζεται σαν πηλίκο των δύο αυτών μεγεθών χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ .

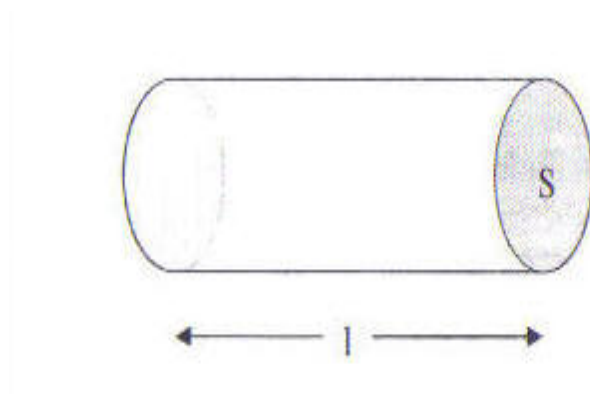


Σχήμα 1.1.1. Η βασική διάταξη γεωηλεκτρικών μετρήσεων.

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:

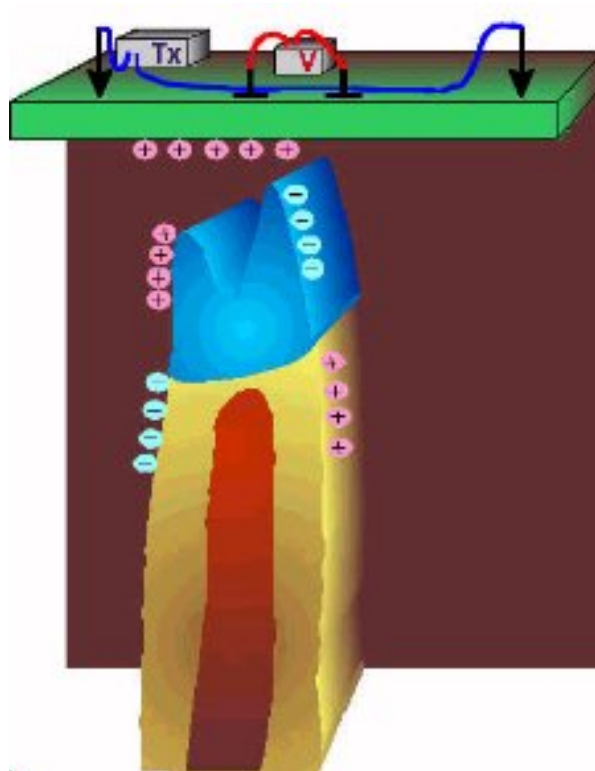
$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}$$

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 ορυκτών είναι μια από τις περισσότερο μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων και ορυκτών. Οι τιμές της κυμαίνονται από $10^{-6} \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ σε ορισμένα ορυκτά, όπως είναι ο γραφίτης, μέχρι $10^{15} \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ σε ορισμένα ξηρά χαλαζιακά πετρώματα. Καλοί αγωγοί θεωρούνται τα πετρώματα και ορυκτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^{-6} και $10^{-1} \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ και κακοί αγωγοί αυτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^8 και $10^{15} \text{ Ohm}\cdot\text{m}$.

Η συμπεριφορά της Γης στη διέλευση του ρεύματος περιγράφεται και από έναν άλλο όρο, την ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα σ , η οποία είναι το αντίστροφο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και αντικατοπτρίζει 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 κατά κύριο λόγο εξαρτάται από την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα, δηλαδή το ρεύμα διαρρέει τους γεωλογικούς σχηματισμούς μέσω των ιόντων που είναι διαλυμένα στο νερό που βρίσκεται στους πόρους τους.

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 που έχουν.

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

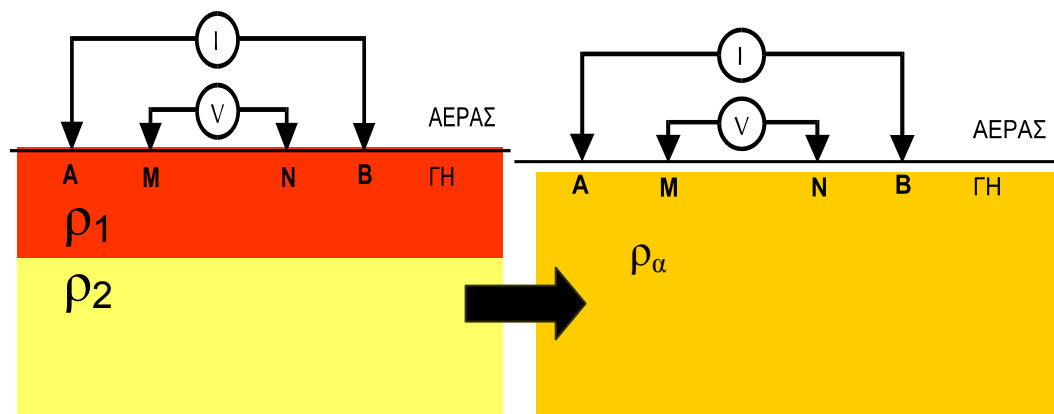
1.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Επειδή η γη είναι γεωηλεκτρικά ανομοιογενής, η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση είναι συνάρτηση:

- της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους
- της γεωμετρίας της μέτρησής μας (Θέσεις Α,Β,Μ,Ν)

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 εκείνου του ομογενούς ημιχώρου, που θα μας έδινε την ίδια τιμή, ρ , χρησιμοποιώντας την συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτροδίων.



Όμως για να κατανοήσουμε τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στα στρώματα αυτά πρέπει πρώτα να μελετήσουμε τη ροή αυτή μέσα σε ομογενές υπέδαφος. (Παπαζάχος, 1986).

1.3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατά τους οποίους διατάσσονται τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού. Οι πιο γνωστές από τις διατάξεις αυτές 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». Το κύριο χαρακτηριστικό μιας διάταξης είναι ο γεωμετρικός παράγοντας, ο οποίος σχετίζεται μονοσήμαντα με τις σχετικές αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων (Tsourlos, 1995).

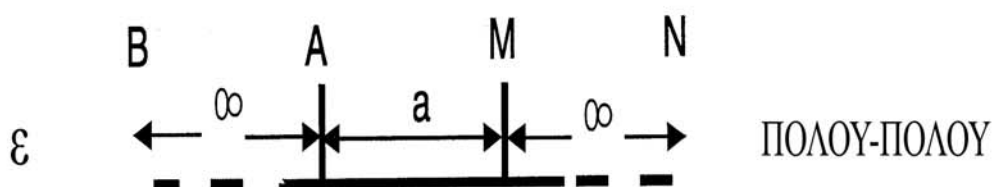
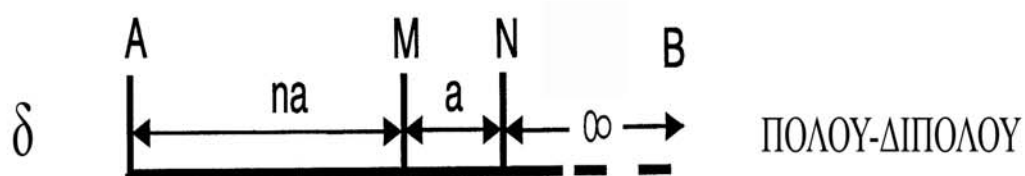
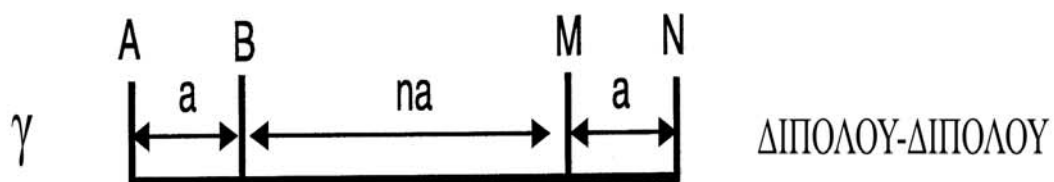
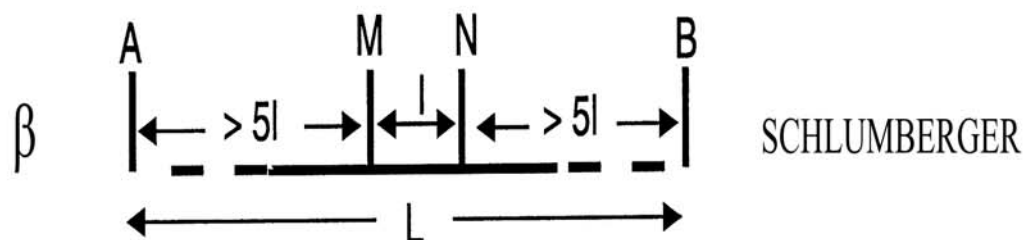
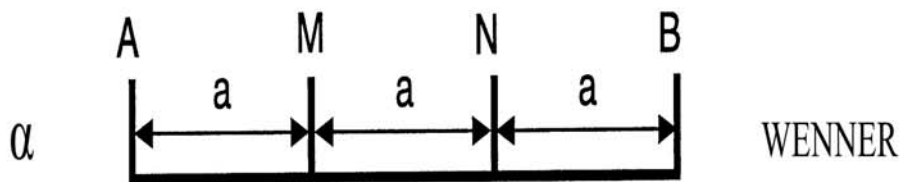
Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους διαφέρουν ως προς τη γεωμετρία τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η κάθε μια από αυτές να έχει

διαφορετικές δυνατότητες ανίχνευσης μεταβολών της αντίστασης σε σύγκριση με τις υπόλοιπες. Έτσι, λόγου χάρη, οι διατάξεις Wenner και Schlumberger είναι περισσότερο ευαίσθητες 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 έχουν μικρότερο βάθος διείσδυσης, αλλά και σαφώς μεγαλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο σε σύγκριση με τις διατάξεις διπόλου-διπόλου και πόλου-διπόλου. Επίσης, η διάταξη Wenner καλύπτει μια πολύ μικρή περιοχή έρευνας σε σχέση με τις υπόλοιπες διατάξεις. Η διάταξη πόλου-πόλου έχει το μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης και καλύπτει τη μεγαλύτερη περιοχή έρευνας σε σύγκριση με τις προηγούμενες διατάξεις, αλλά έχει πολύ μικρό λόγο σήματος προς θόρυβο. Στη συνέχεια φαίνεται ένας ενδεικτικός πίνακας (**Πίνακας 1.3**) αξιολόγησης κάποιων 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 χρησιμοποιείται σήμερα σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών. (Daily & Owen)

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

1.5 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Η ηλεκτρική μέθοδος διασκόπησης καθορίζει την κατανομή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης, πραγματοποιώντας μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων , είτε στην επιφάνεια της, είτε μέσα σε γεωτρήσεις .Ταυτόχρονα γίνεται προσπάθεια απεικόνισης της «εικόνας» του υπεδάφους μεταξύ των δύο γεωτρήσεων. (Daily & Owen)

Η μέθοδος Συνεχούς Ρεύματος ή αλλιώς μέθοδος DC, λόγω της απλότητάς της, του χαμηλού κόστους εξοπλισμού και της ευκολίας στη χρήση, χρησιμοποιείται κυρίως σε μεταλλεία, αρχαιολογικές ανασκαφές, σε μελέτες πολιτικών μηχανικών, υδρογεωλογικές και περιβαλλοντικές μελέτες .

Για να λάβουμε τη βέλτιστη απεικόνιση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους είναι απαραίτητος ο συνδυασμός διαφόρων χαρακτηριστικών όπως το βάθος διείδυσης , ο λόγος σήματος προ θόρυβο καθώς και το εύρος της περιοχής. Αυτό καθίσταται εφικτό με τη χρήση βέλτιστων διατάξεων μέτρησης, που περιέχουν εκείνους τους συνδυασμούς ηλεκτροδίων που πληρούν τα προαναφερθέντα κριτήρια .

Ικανή μέθοδος που μπορεί να δώσει λεπτομερείς πληροφορίες για τις τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας μεταξύ των δύο γεωτρήσεων , είναι η

cross-hole DC μέθοδος, στην οποία το ηλεκτρόδιο ρεύματος και το ηλεκτρόδιο δυναμικού είναι τοποθετημένα μέσα σε δύο απομακρυσμένες μεταξύ τους γεωτρήσεις και βρίσκονται σε διάφορα βάθη. (Bing & Greenhalgh)

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

Για τη λήψη μίας «εικόνας» μεταξύ 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. Έπειτα, στέλνεται ρεύμα σε άλλο ζευγάρι ηλεκτροδίων ρεύματος και ταυτόχρονα μετράται νέα διαφορά δυναμικού σε δύο άλλα ηλεκτρόδια δυναμικού. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε όλα τα ηλεκτρόδια με κάθε δυνατό συνδυασμό. Τέτοιου είδους μετρήσεις μοιάζουν με αυτές του διπόλου-διπόλου που γίνονται στην επιφάνεια. (Daily & Owen,).

1.6 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Στη θεωρία, κάθε διάταξη που χρησιμοποιείται για κανονικές επιφανειακές διασκοπήσεις μπορεί να εφαρμοστεί για cross-borehole διασκοπήσεις. 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)

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

ΔΙΑΤΑΞΗ ΠΟΛΟΥ-ΠΟΛΟΥ

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 συγκρινόμενη με την διάταξη πόλου-πόλου.

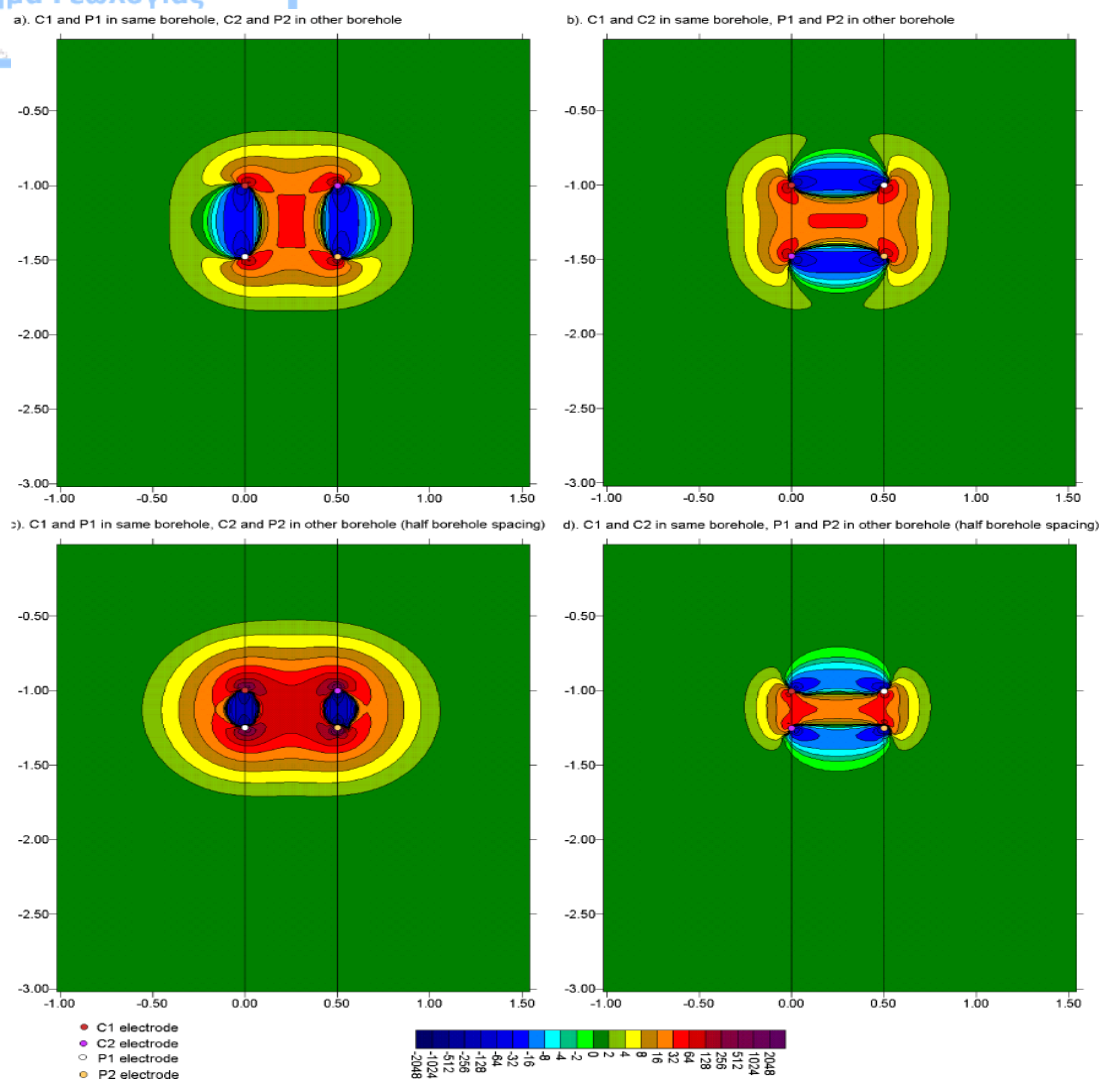
ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΙΠΟΛΟΥ-ΠΟΛΟΥ

Στους 6 ανεξάρτητους συνδυασμούς της διπόλου-πόλου διάταξης, μόνο δύο, AM-B και AB-M, μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές, επειδή οι άλλες είναι όμοιες με αυτές ή συμμετρικά ισοδύναμες. (Bing & Greenhalgh)

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**)

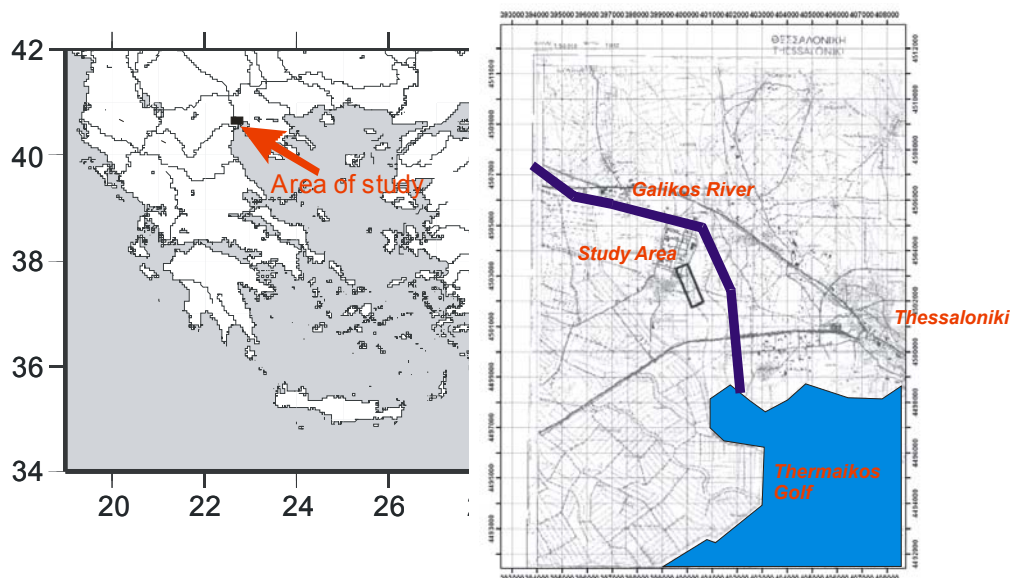
Στη διάταξη αυτή ο συνδυασμός C1P1-C2P2 (η διάταξη AM-BN των Zou και Greenhalgh (1997)), δίνει μεγάλες θετικές τιμές ευαισθησίας στη περιοχή μεταξύ των δύο γεωτρήσεων. Αυτή είναι μία ιδιότητα που είναι επιθυμητή για μία διάταξη cross-borehole αφού η επιδίωξη μας είναι να «φωτογραφηθεί» το υλικό μεταξύ 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 με την απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων. Οι συνδυασμοί στην (c) και (d) είναι όμοιοι με (a) και (b) εκτός από το γεγονός ότι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων στην ίδια γεώτρηση είναι η μισή από την απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

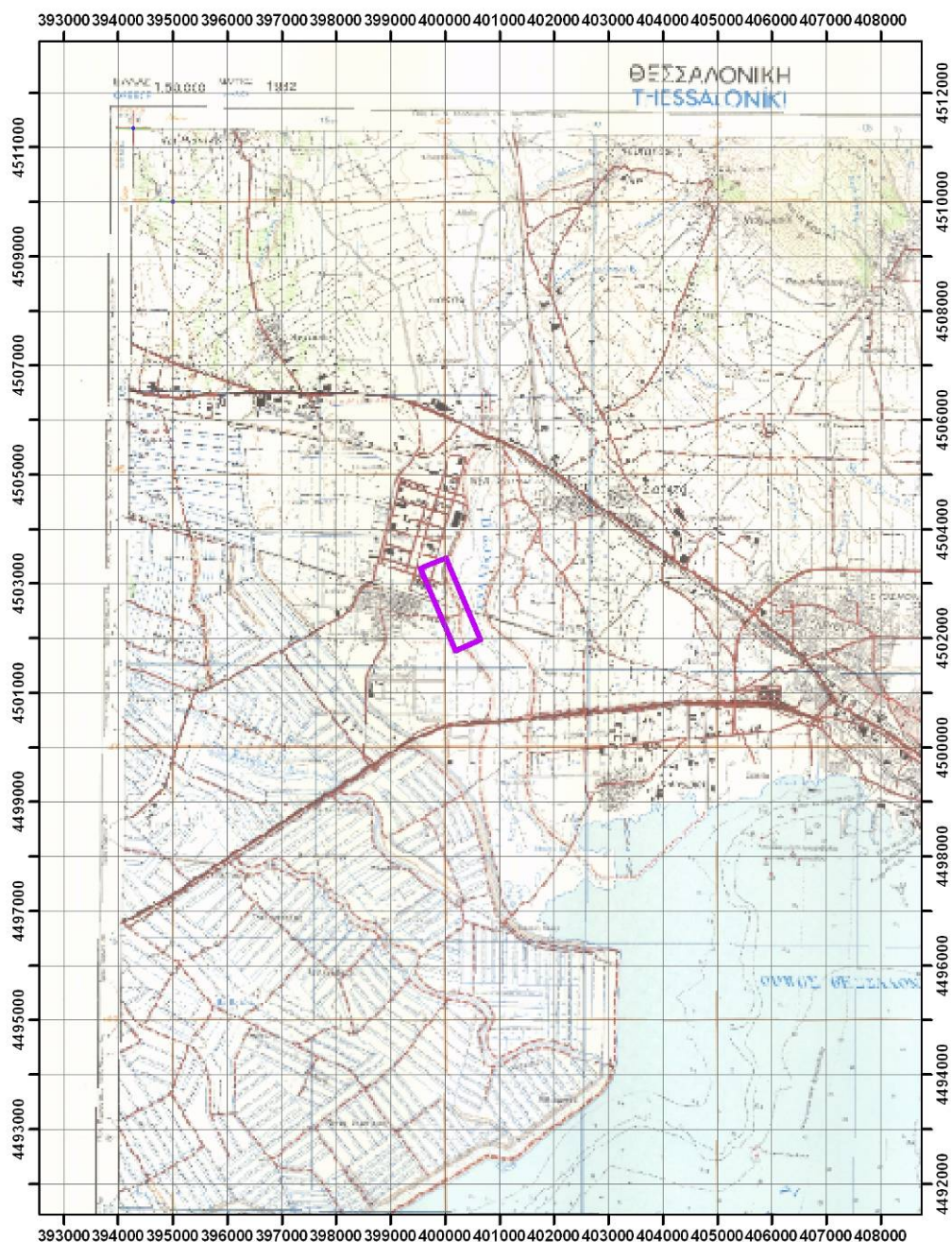
Η μελέτη υπάγεται με την υποστήριξη ενός μεγαλύτερου προγράμματος για την επίβλεψη της εισπίεσης ανακυκλώμενου νερού σε υδροφόρο ορίζοντα στην περιοχή της Σίνδου, περίπου 12 χιλιόμετρα ανατολικά της Θεσσαλονίκης (**σχήμα 2.1.1.**). Η συνολική προσπάθεια αυτής της διαδικασίας εισπίεσης είναι να βελτιωθεί η ποιότητα του υποβαθμισμένου ποιοτικά υδροφόρου και να αυξηθεί η ποιότητα του νερού. Το έργο περιλαμβάνει την εισπίεση του νερού που προέρχεται από τα βιομηχανικά απόβλητα της Θεσσαλονίκης αφού έχει υποστεί τρίτου βαθμού εκκαθάριση ώστε να καταλήξει σε καθορισμένα όριο (πόσιμο νερό) πριν διοχετευτεί μέσα στο έδαφος.



Σχήμα 2.1.1. Περιοχή έρευνας, ανατολικά της Θεσσαλονίκης .

2.1 ΘΕΣΗ

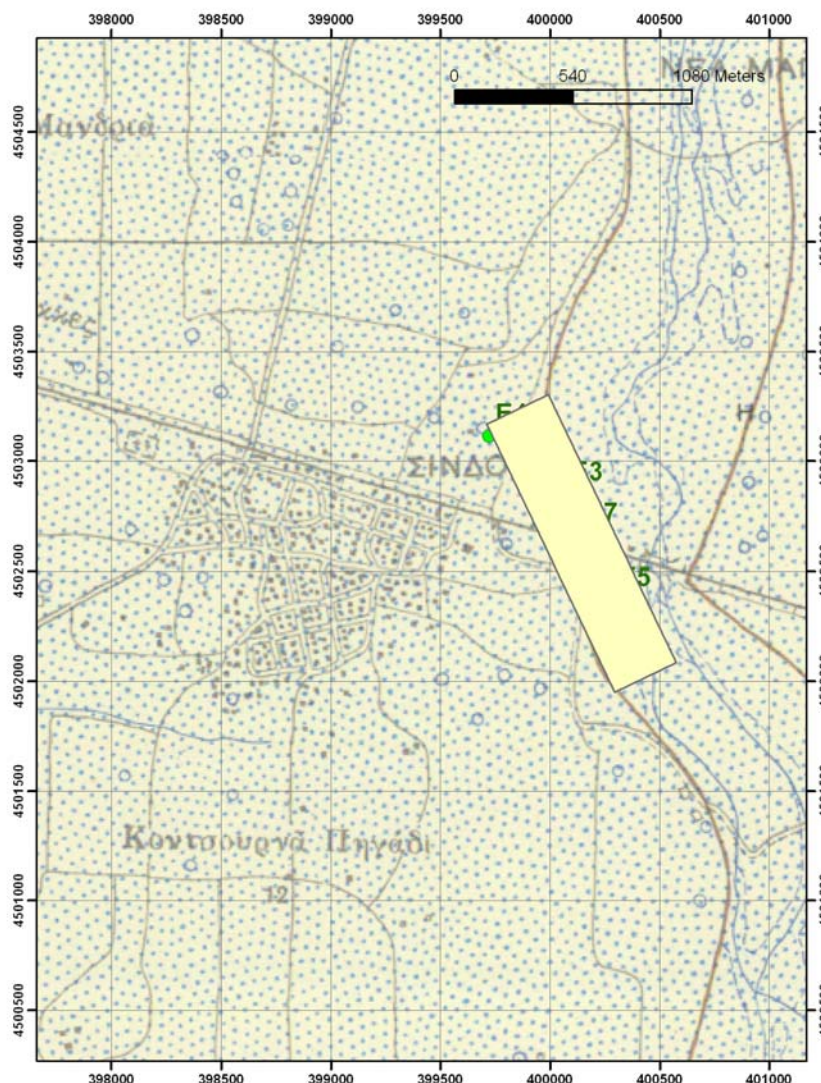
Η περιοχή έρευνας βρίσκεται ανατολικά της Σίνδου (χάρτης Σχήμα 2.1.2)



Σχήμα 2.1.2. Θέση περιοχής έρευνας (τετράγωνο).

2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ- ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Βάση των στοιχείων του γεωλογικού χάρτη (Έκδοση ΙΓΜΕ, φύλλο ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ) στη περιοχή έρευνας (**Σχήμα 2.2.1**), συναντάται ο σχηματισμός των ολοκαινικών αποθέσεων.



Σχήμα 2.2.1 Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη περιοχής έρευνας.

Σύμφωνα με έρευνες και μελέτες που έλαβαν χώρα στην περιοχή έρευνας, προέκυψε σχηματισμός αποτελούμενος από ολοκαινικές αποθέσεις. Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται από παράκτιες αποθέσεις (άμμοι, σύναγμα), προσχώσεις πεδιάδων και ερυθρές αργίλους με ασβεστιτικά συγκρίματα, ενώ στη βάση τους επικρατούν κροκαλοπαγή.

Τα γενικά υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών που συναντώνται στην περιοχή παρατίθενται στον παρακάτω **Πίνακα 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. Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά μερικών χαλαρών ιζημάτων (Καλλέργης 2001).

Εντός των ανωτέρω αποθέσεων αναπτύσσονται επάλληλοι υδροφόροι ορίζοντες οι οποίοι λόγω της λιθολογικής τους σύστασης χαρακτηρίζονται από ανομοιογένεια και ανισοτροπία .

Στην περιοχή έρευνας με βάση τα στοιχεία τα γεωτρητικής έρευνας διακρίνονται τρεις υδροφόροι:

- 1) ένας φρεάτιος με μέσο βάθος 20 m και πάχος 20 m
- 2) ένας ενδιάμεσος υπό πίεση σε βάθος 40 m και πάχος 30 m και
- 3) ένας βαθύτερος υπό πίεση σε βάθος μεγαλύτερο των 100 m

Η τροφοδοσία των υδροφόρων στρωμάτων γίνεται από απευθείας κατείσδυση του νερού της βροχόπτωσης και από πλευρικές διηθήσεις κατά μήκος των υδρορευμάτων.

Κατά τόπους στην περιοχή 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 των εγκαταστάσεων ολοκληρώθηκε πρόσφατα και περιλάμβανε μία κύρια γεώτρηση 100 m (**P0, Σχήμα 2.3.1**) για να πραγματοποιείται εισπίεση 13 m³/ώρα ανακυκλώμενου νερού και επιπλέον 4 γεωτρήσεις των 100 m γύρω από την κεντρική (**P1-P4, σχήμα 2.3.1**) για την επίβλεψη της διαδικασίας εισπίεσης.

Οι διαδικασίες που ακολούθησαν πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τις γεωτρήσεις είναι οι εξής:

- προκαταρκτική υδρογεωλογική μελέτη και επιφανειακή γεωφυσική διασκόπηση για τη θέση των γεωτρήσεων
- έλεγχος στάθμης νερού και δειγματοληψία και ανάλυση πετρωμάτων κατά τη διάρκεια ανόρυξης της γεώτρησης
- διαγραφή γεωτρήσεων
- ανάλυση δειγμάτων νερού
- πειράματα εισπίεσης.

Συγχρόνως, μόνιμοι σταθμοί ελέγχου τοποθετήθηκαν μέσα σε τρεις γεωτρήσεις για τον έλεγχο της στάθμης του νερού, αγωγιμότητα και pH πριν και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εισπίεσης. Επιπλέον, η συστηματική χημική ανάλυση δειγμάτων νερού, η οποία ξεκίνησε πριν από την εισπίεση, θα συνεχιστεί για αρκετούς μήνες αφού ξεκινήσει η εισπίεση.



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

3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

3.1 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Για να πραγματοποιηθούν μετρήσεις γεωτρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας πρέπει να χρησιμοποιηθεί υλικό PVC και όχι μεταλλικό περίβλημα στις γεωτρήσεις. Επιπλέον, πρέπει να αποφεύγεται κάθε μεταλλικό περίβλημα που συνήθως χρησιμοποιείται σε υδρογεωτρήσεις. Καμία άλλη ειδική τεχνική προδιαγραφή δε χρειάζεται για τη κατασκευή των γεωτρήσεων. Για την παρακολούθηση των γεωτρήσεων, χρειάζεται η προκατασκευή ειδικών καλωδίων και ηλεκτροδίων τα οποία τοποθετούνται στα τοιχώματα των γεωτρήσεων κατά την εγκατάστασή τους (**Σχήμα 3.1.1**).



Σχήμα 3.1.1 Εγκατάσταση καλωδίων ERT

Δεδομένου ότι στη περίπτωση μας οι γεωτρήσεις είχαν βάθος περίπου 100 m, επιλέχθηκε ως το ιδανικότερο μεσοδιάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων 3 m. Αν και ένα πιο πυκνό μεσοδιάστημα θα μας έδινε

μία πιο υψηλής ανάλυσης εικόνα, θεωρήθηκε μη πρακτικό δεδομένου του υψηλού κόστους κατασκευής και του εν γένει περιορισμού του οργάνου για 48 κανάλια διαθέσιμα. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα κάθε καλώδιο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία να έχει μήκος 110 m με σύνολο 36 ηλεκτροδίων που απείχαν 3 m.



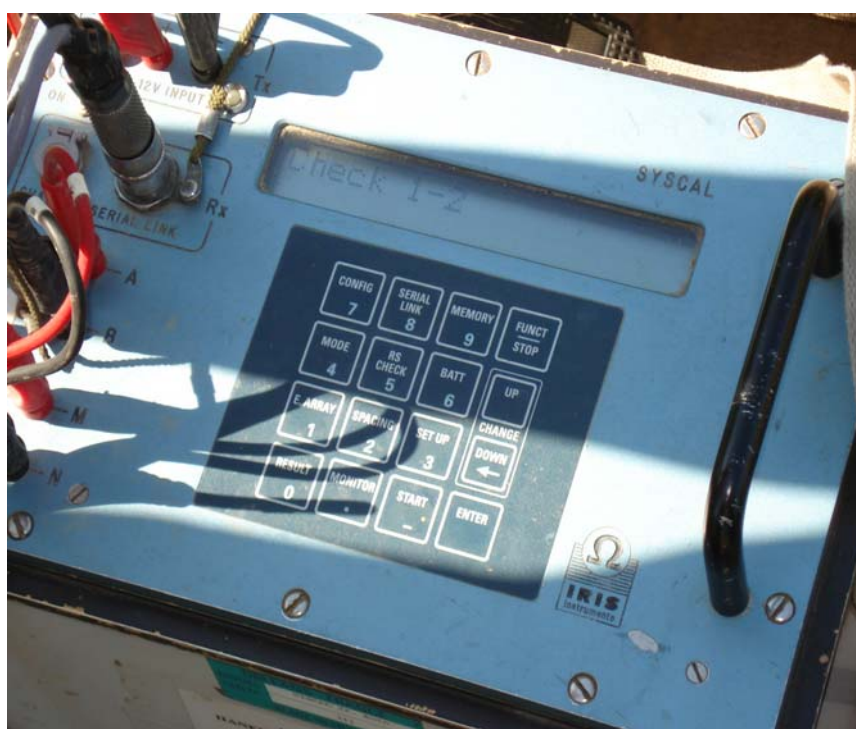
Σχήμα 3.1.2. Γεώτρηση P0 στην περιοχή έρευνας.

Το καλώδιο της γεώτρησης κατασκευάστηκε με 36 κανονικούς (εύκολα διαθέσιμα και χαμηλού κόστους) επικαλυμμένους με PVC χάλκινους των 0.5 mm χάλκινους αγωγούς διαφόρων μηκών (5,8,11,...,110m για το 1,2,3,...,36ο αγωγό αντίστοιχα). Καθώς τα στελέχη της γεώτρησης τοποθετούνταν μέσα στη γη κατά τη κατασκευή της γεώτρησης, τοποθετούνταν το καλώδιο ταυτόχρονα με κολλητική ταινία. Για να αυξηθεί η περιοχή επίδρασης του καλωδίου και κατά συνέπεια να μειωθεί η αντίσταση επαφής, σε κάθε ηλεκτρόδιο που τοποθετούνταν σε στέλεχος προστίθονταν και μία αλουμινο-ταινία

(πάχους 5cm) με την οποία σχηματιζόταν ένα δαχτυλίδι γύρω από το ηλεκτρόδιο (σχήμα 3.1.1).

3.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων υπαίθρου χρησιμοποιήθηκε το όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης SYSCAL (V11.4++) εταιρίας IRIS INSTRUMENTS. (Σχήμα 3.2.1.)



Σχήμα 3.2.1. SYSCAL , όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Πρόκειται για πλήρως αυτοματοποιημένο όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σχεδιασμένο για έρευνα με μεθόδους 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 πίνακα που ακολουθεί.

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

3.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιήσαμε για την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων μας είναι το **Electre III** της εταιρείας **Iris Instruments**. Βάσει της προαποφασισμένης γεωμετρίας το πρόγραμμα αυτό παράγει ένα αρχείο με τις μετρήσεις το οποίο και μεταφέρεται στο όργανο μέτρησης ώστε αυτόματα να γίνει η λήψη των μετρήσεων.

Αρχικά καθορίζεται ο αριθμός των ηλεκτροδίων σε κάθε γεώτρηση (17 ηλεκτρόδια σε κάθε γεώτρηση) και οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων (6m) καθώς και οι αποστάσεις των γεωτρήσεων (30m) (**Σχήμα 3.3.1α**).

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

The screenshot shows the 'Type of measurement' section with two options: 'Surface (X,Y location)' and 'Borehole (X,Z location)'. The 'Borehole' option is selected. To the right, the 'Electrode location' section contains several input fields: 'X grid spacing' (6), 'X grid offset' (0.00), 'X grid size' (6), 'Z grid spacing' (6), 'Z grid offset' (6), and 'Z grid size' (17). Navigation buttons 'Previous' and 'Next' are visible at the bottom.

(α)

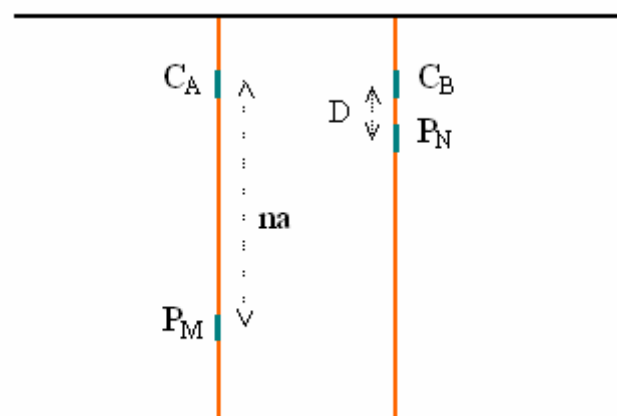
Σχήμα 3.3.1. Χρήση προγράμματος ELECTRE III

Z	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

Ακολουθώς επιλέγεται η διάταξη μέτρησης (dipole-dipole diagonal)
(Σχήμα 3.3.2)



Σχήμα 3.3.2. dipole – dipole diagonal

και παράγονται αυτόματα οι τετράδες ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται για κάθε μέτρηση όπως ενδεικτικά παρουσιάζονται στο 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

Πίνακας 3.

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

Computed

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

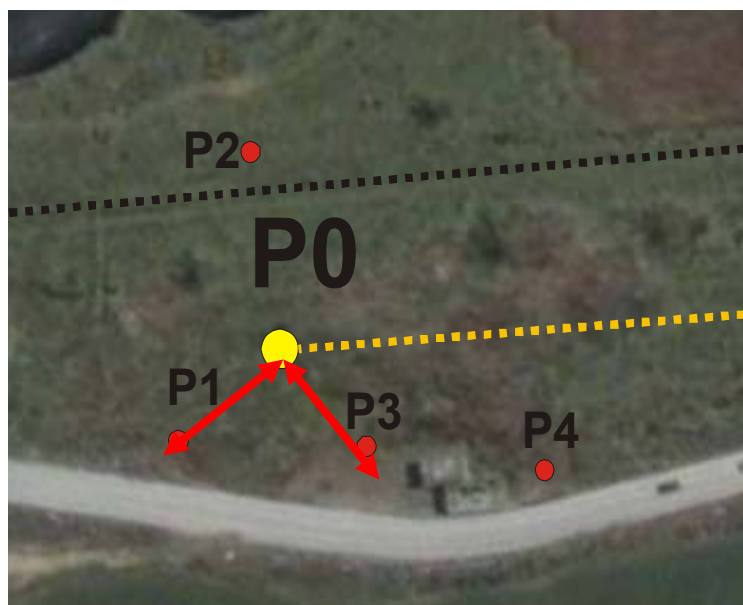
OK

Cancel

Σχήμα 3.3.3. Οι συνδυασμοί με τους οποίους πήραμε τις μετρήσεις μας

3.4 ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι μετρήσεις έγιναν τον Μάιο του 2007 σε δυο ημέρες. Το όργανο ήταν στη γεώτρηση εισπίεσης P0. Σύνδεση καλωδίων γεώτρησης P0 με γεωτρήσεις P1, P3 με τη χρήση καλωδίου προέκτασης. (**Σχήμα 3.4.1**)

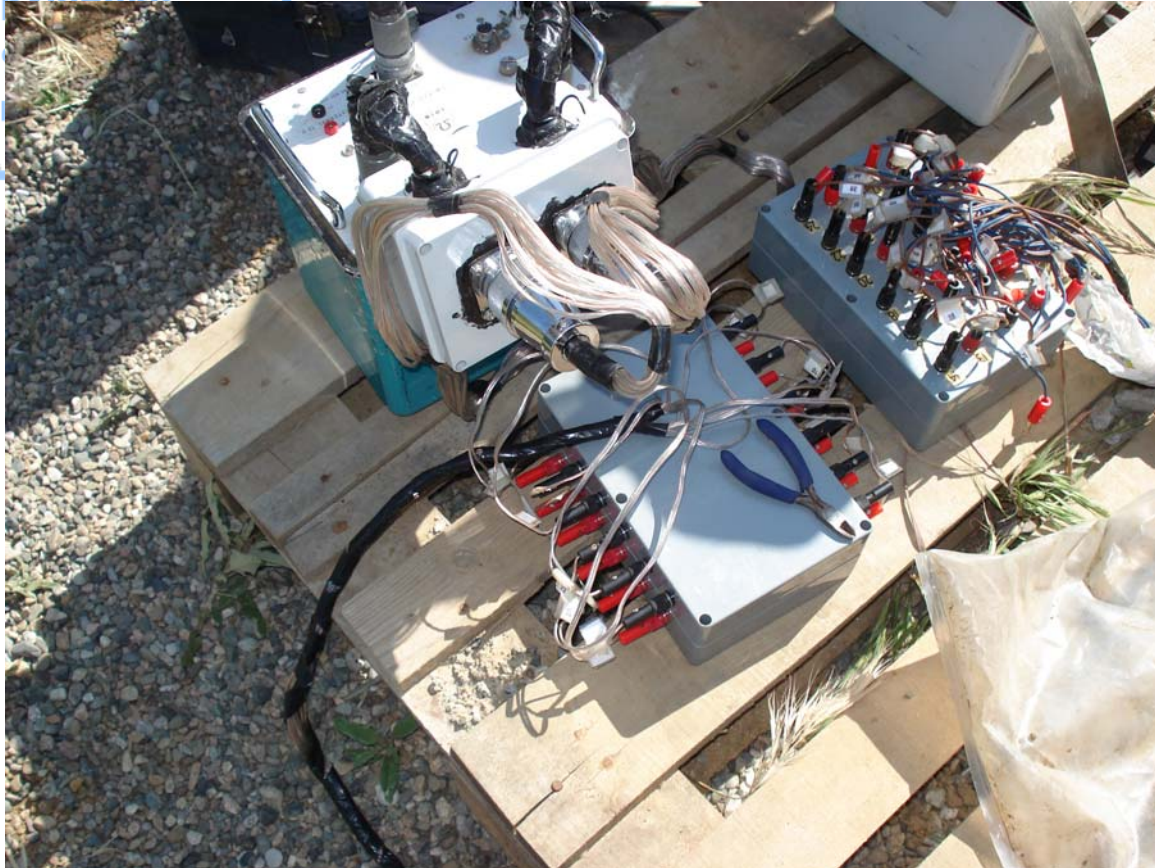


Σχήμα 3.4.1. Θέσεις γεωτρήσεων στην περιοχή έρευνας

Σύνδεση απολήξεων της γεώτρησης με ενδιάμεσα κουτιά συνδεσμολογίας (Σχήματα 3.4.2. , 3.4.3.). Τα κουτιά συνδέονται με το όργανο μέτρησης.

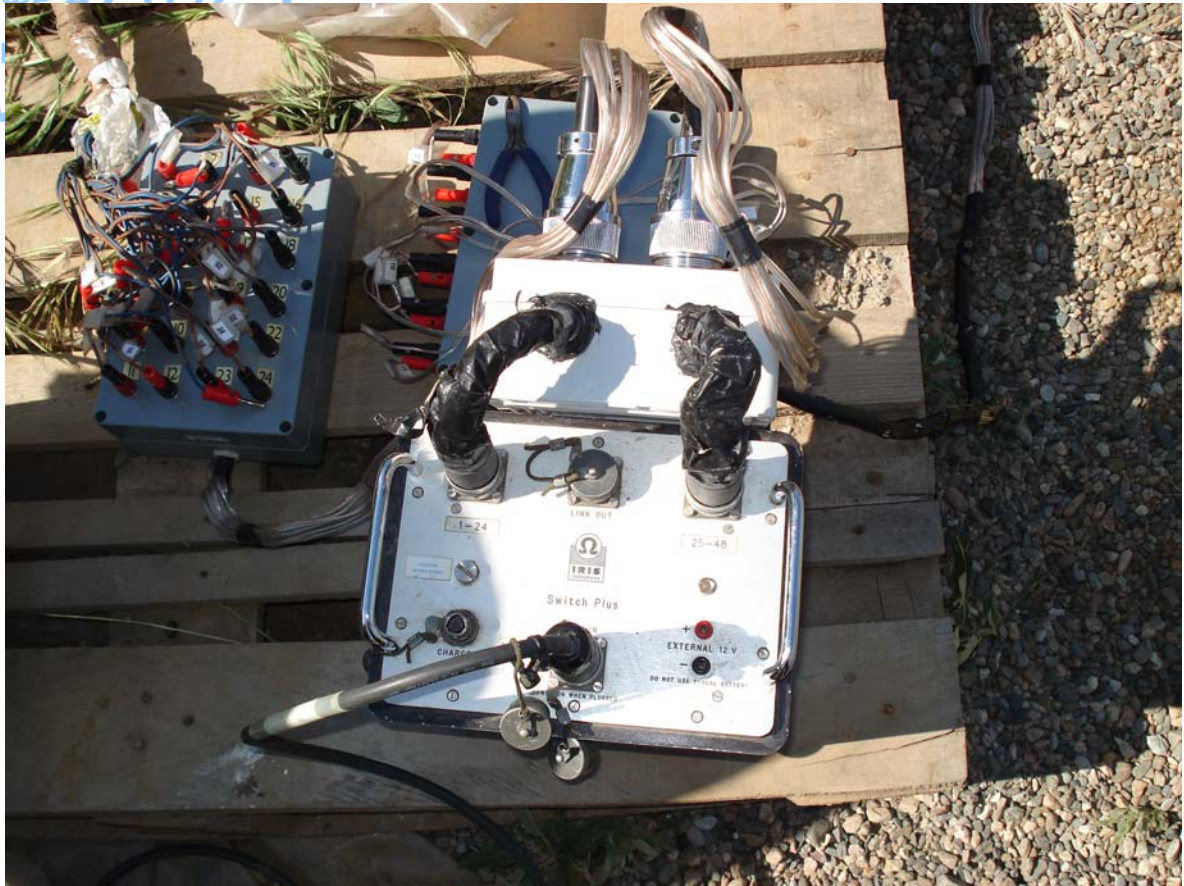


Σχήμα 3.4.2 Κουτί συνδεσμολογίας



Σχήμα 3.4.3 Κουτιά συνδεσμολογίας

Πρίν τη λήψη των μετρήσεων ελέγχθηκαν οι αντιστάσεις επαφής για τα ηλεκτρόδια όλων των γεωτρήσεων και ήταν πολύ χαμηλές ($0.2 \text{ K}\Omega\text{m}$) εκτός από ένα ή δύο πρώτα ηλεκτρόδια τα οποία είναι πάνω από την επιφάνεια του νερού (πάνω από το βάθος των 12m) και τα οποία παρουσίασαν υψηλότερες αντιστάσεις επαφής (περίπου $10\text{K}\Omega\text{m}$). (**Σχήμα 3.4.4.**) Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εισάγονται ρεύματα τυπικά μεγαλύτερα από 500mA και ως εκ τούτου να συλλέγονται μετρήσεις με πολύ καλή επαναληψιμότητα (χαμηλό RMS σφάλμα).



Σχήμα 3.4.4. Έλεγχος ηλεκτροδίων

4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

4.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Για την επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

Αρχικά έγινε η μεταφορά των μετρήσεων υπαίθρου από το όργανο μέτρησης στον υπολογιστή. Ελέγχθηκε η ποιότητα των μετρήσεων και απορρίφθηκαν μετρήσεις με μεγάλα σφάλματα. Γενικά η ποιότητα των μετρήσεων κρίνεται ικανοποιητική καθώς μόλις 3-5% των μετρήσεων τελικά απορρίφθηκαν.

Τα δεδομένα, στη συνέχεια, υποβλήθηκαν σε αντιστροφή. 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 που είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές. Προϋπόθεση η ύπαρξη μεθόδου επίλυσης του ευθέως προβλήματος, δηλαδή, να βρεθούν οι μετρήσεις δοθείσης της κατανομής της αντίστασης. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό, είναι ένας αλγόριθμος πεπερασμένων στοιχείων ο οποίος λύνει τις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος σε ανομοιογενή γη. Η αντιστροφή μπορεί να γίνει σε δυο (διδιάστατη) ή τρεις (τριδιάστατη) διαστάσεις.



Σχήμα 4.1.1 Μεταφορά των μετρήσεων στον υπολογιστή και απεγκατάσταση του εξοπλισμού.

Στην 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 και συγκρίνονται με τα πραγματικά δεδομένα. Λαμβάνεται έτσι μια εκτίμηση του λάθους $dy = (\text{πραγματικά δεδομένα} - \text{συνθετικά δεδομένα})$. Στη συνέχεια με μια διαδικασία αντιστροφής πινάκων γίνεται διόρθωση του αρχικού μοντέλου αντίστασης και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το λάθος dy 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 χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RES2DINV του Dr. M.Loke. Πρόκειται για 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) έφτασε το 2-3%, ενδεικτικό επίσης και της καλής ποιότητας των πρωτογενών δεδομένων. Η αντιστροφή επαναλήφθηκε αρκετές φορές με διαφορετικές παραμέτρους βάθους ώστε να διερευνηθούν 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 **4.2.2** απεικονίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αντιστροφή δεδομένων διπόλου-διπόλου μεταξύ των γεωτρήσεων P0-P1 (**Σχήμα 4.2.1**) και P0-P3 (**Σχήμα 4.2.2**). Η απόσταση ηλεκτροδίων είναι 6 μέτρα.

Οι εικόνες δείχνουν ξεκάθαρα τη στρωματογραφία καθώς και τους κύριους υδροφόρους.

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

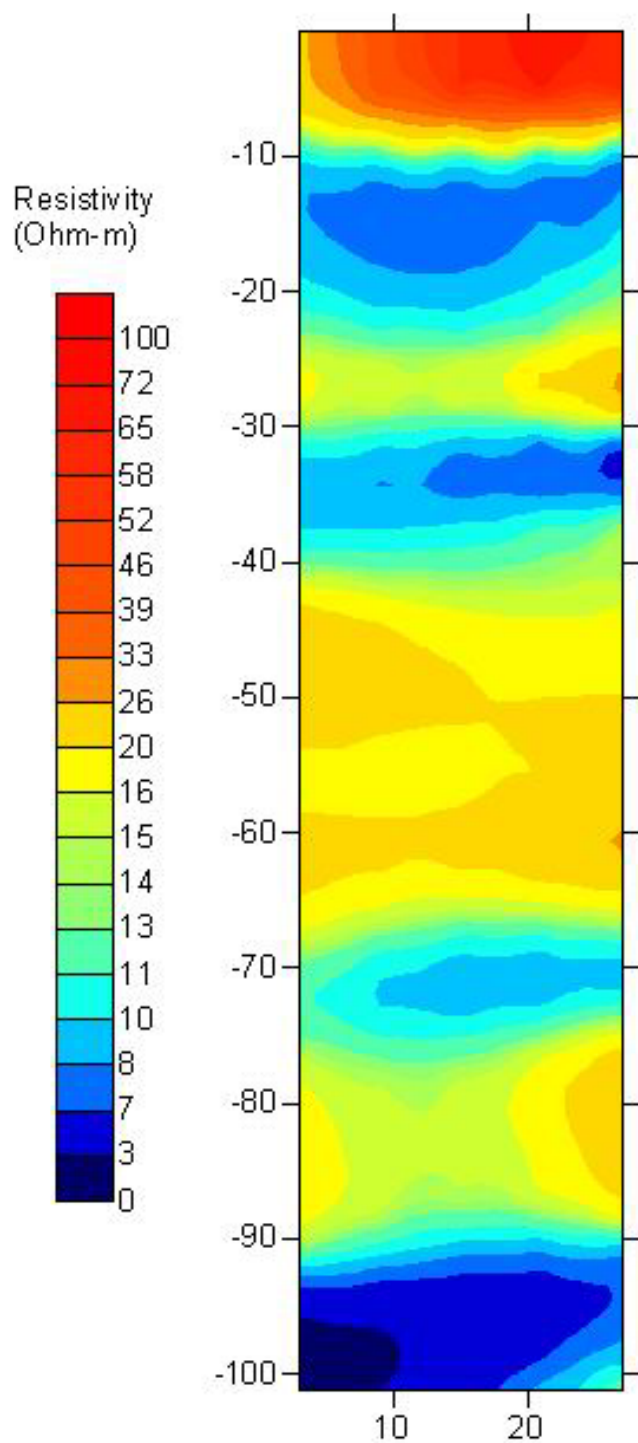
Ειδικότερα από τη βιβλιογραφία προκύπτει ότι για μικρές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης παρατηρούνται στρώματα αποτελούμενα από αργίλο (0 – 10 Ohm) και αμμοάργιλο (10 – 20 Ohm) ενώ καθώς αυξάνει η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης (20 – 40 Ohm) παρατηρούνται υλικά όπως άμμος , χαλίκια και κροκάλες.

Βάση 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 η ακόρεστη ζώνη η οποία αποτελείται 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 πρέπει να είναι σχετικά αδιαπέρατα. Ενδιάμεσα τους και σε βάθος 20 – 30 m παρατηρείται ένα υπό πίεση υδροφόρο στρώμα με μέση αντίσταση (~ 20 Ohm) το οποίο αποτελείται από αμμοαργίλους.

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

Στο υποκείμενο στρώμα παρατηρείται μείωση της αντίστασης που υποδηλώνει παρουσία αμμοαργίλου ενώ από τα 80 – 90 m

παρατηρούμε μια εκ νέου αύξηση της αντίστασης .Τέλος από τα 90 m και κάτω εμφανίζεται στρώμα αργίλου με αντίσταση ~ 5 Ohm.



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

Αντίστοιχα στο **Σχήμα 4.2.2.** απεικονίζεται η στρωματογραφία μεταξύ των γεωτρήσεων P0 – P3 από το οποίο βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα .

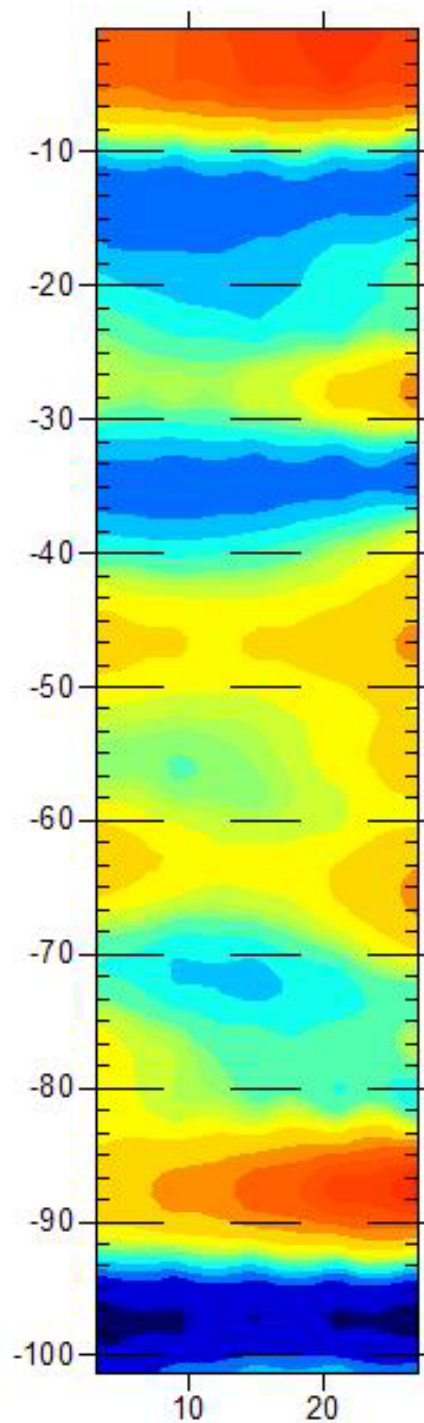
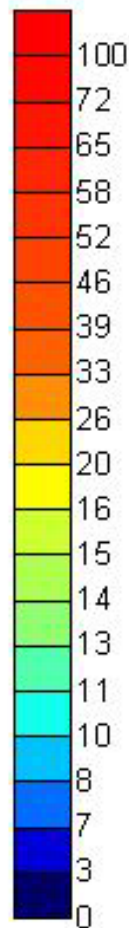
Αρχικά στα πρώτα 10 m εμφανίζεται η ακόρεστη ζώνη με υψηλές τιμές αντίστασης ($> 40 \text{ Ohm}$) .Στη συνέχεια από 10 – 20 m και 30 – 40 m παρατηρούνται στρώματα χαμηλής αντίστασης ενδεικτικής της παρουσίας αργίλου , τα οποία θεωρούνται αδιαπέρατα. Ενδιάμεσα, από 20 – 30 m παρατηρείται ένα υπό πίεση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

Στο βάθος των 40 m έως 70 m συναντάται ο κύριος υδροφορέας ο οποίος αποτελείται από άμμους , χαλίκια και κροκάλες . Από 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 υποδηλώνει την ύπαρξη χαλικιών και κροκάλων.

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

Resistivity
(Ohm-m)



Σχήμα 4.2.2. 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). Αφότου εγκατασταθεί, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγονται αξιόπιστες εικόνες αντίστασης του υπεδάφους με υψηλή ανάλυση σε σύγκριση με τις επιφανειακές γεωφυσικές διασκοπήσεις.

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

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ παρουσιάζουν μία πολύ καλή συσχέτιση τις εικόνες που προκύπτουν από τις λιθολογικές τομές των γεωτρήσεων και αποτελεί μία ακόμα ένδειξη της αξιοπιστίας της προσέγγισης. Η μόνιμη εγκατάσταση καθιστά εύκολη την εφαρμογή των μετρήσεων διαχρονικής μεταβολής της αντίστασης και επιτρέπει τον έλεγχο των αλλαγών μέσα σε αυτούς.

Γενικά, πιστεύεται ότι η διαδικασία που περιγράφηκε, συνδυαζόμενη με τυπική δειγματοληψία και ανάλυση αυξάνει την ικανότητα ελέγχου και βοηθάει στη κατανόηση και τον υπολογισμό της επίδρασης της διαδικασίας εισπίεσης νερού.

- Παπαζάχος Β.Κ. (1986). Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Tsourlos, P. 1995. Modelling interpretation and inversion of multielectrode resistivity survey data. Ph.D. Thesis, University of York.
- Βαργεμέζης Γ. ,Τσούρλος Π. ,Βουδούρης Κ. (2006). Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων για τη μελέτη υπόγειας υδροφορίας στα πλαίσια δοκιμαστικής λειτουργίας εμπλουτισμού υδροφόρου ορίζοντα. Προκαταρκτική Έκθεση.
- 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.]