

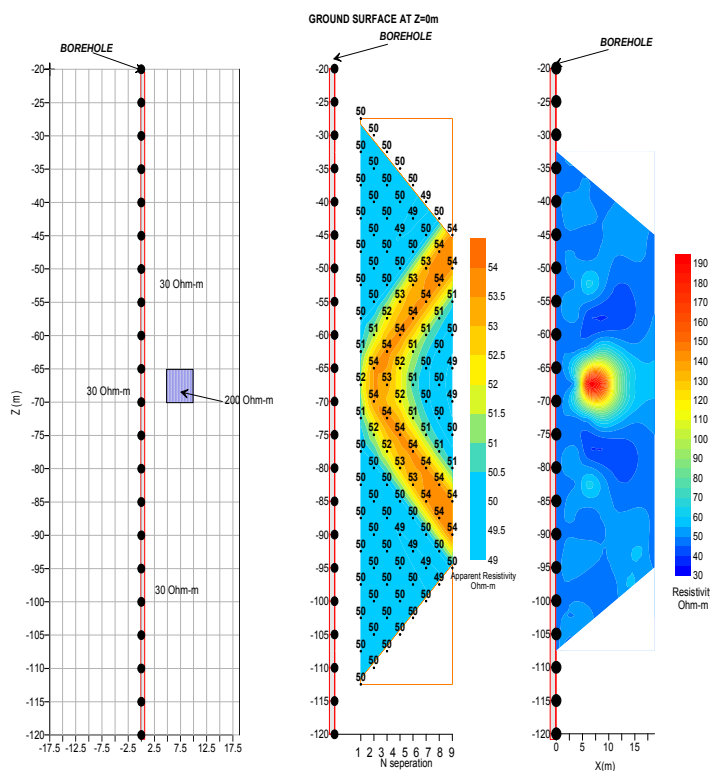


ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΣΕ ΜΟΝΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΣΙΝΔΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ονοματεπώνυμο	Λιουδάκη Στέλλα	Λαλιώτη Ελεάννα
A. Ε. Μ	3731	3727



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Τσούρλος Παναγιώτης
Επικουρος Καθηγητής, Α.Π.Θ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2008

	Εισαγωγή	3
1	Μέθοδοι Ηλεκτρικής Αντίστασης	4
1.1	Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση	4
1.2	Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση	6
1.3	Διάταξη Ηλεκτροδίων	6
1.4	Ηλεκτρική Τομογραφία Ειδικής Αντίστασης	11
2	Περιοχή Έρευνας	12
2.1	Γεωλογία και Υδρογεωλογία Περιοχής	13
2.2	Εγκατάσταση Εισπίεσης	16
2.2.1	Διαδικασίες Παρακολούθησης	17
3	Μετρήσεις Ηλεκτρικής Τομογραφίας	18
3.1	Εγκατάσταση Διάταξης Μέτρησης	18
3.2	Μετρήσεις	21
3.2.1	Αντιστροφή	21
3.3	Διαδικασία Μετρήσεων	21
3.4	Τελικά Αποτελέσματα και Σχολιασμός	22
4	Συμπεράσματα	25
4.1	Σύγκριση ERT και Υδροχημικής Δειγματοληψίας	25
4.2	Το Πρόβλημα της Μεθόδου	25
5	Επίλογος	28

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι η εφαρμογή ηλεκτρικής τομογραφίας σε μονή γεώτρηση ώστε να αξιολογηθεί το αποτέλεσμα της ανακυκλωμένης εισπίεσης νερού σε ένα περιορισμένο υδροφόρο στρώμα στην περιοχή της Σίνδου Θεσσαλονίκης.

Τέτοιου είδους μετρήσεις, παρά κάποιους εγγενείς περιορισμούς, δίνουν τη δυνατότητα λεπτομερούς λιθολογικού χαρακτηρισμού του υπεδάφους, λόγω της αυξημένης διακριτικής ικανότητας που εξασφαλίζεται από την ύπαρξη ηλεκτροδίων στις γεωτρήσεις, δηλαδή πολύ κοντά στο στόχο έρευνας. Επίσης μια τέτοιου είδους έρευνα δίνει σημαντικές πληροφορίες σε σχέση με το υδρογεωλογικό χαρακτηρισμό των σχηματισμών του υπεδάφους.

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή στις ηλεκτρικές μεθόδους έρευνας καθώς και ειδικότερα στη μέθοδο της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης. Επίσης αναλύονται οι τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων για την μέτρηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης στην επιφάνεια αλλά και σε γεωτρήσεις.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιοχή έρευνας και δίνονται γεωλογικά και υδρογεωλογικά στοιχεία της περιοχής. Ακόμα αναλύεται η εγκατάσταση της εισπίεσης του νερού.

Το τρίτο κεφάλαιο αφορά στη διεξαγωγή μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας στην περιοχή με την διαδικασία της εγκατάστασης, τις μετρήσεις, τα αποτελέσματα και σχολιασμό τους.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής.

Την επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας μας είχε ο κ. Τσούρλος Παναγιώτης, Επίκουρος καθηγητής του Α.Π.Θ ,τον οποίον και ευχαριστούμε για την βοήθειά του.

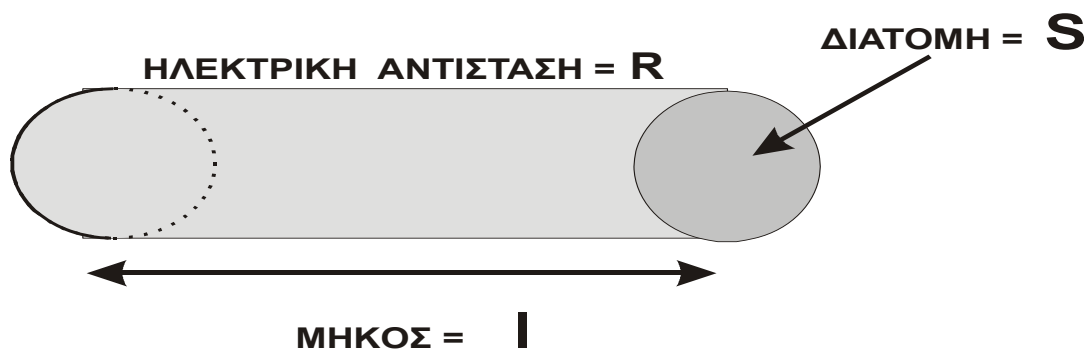
1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Άμεσος στόχος της μεθόδου μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης είναι ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους, και η γεωλογική ερμηνεία της δομής αυτής αποτελεί τον τελικό στόχο.

Από το 1828 ακόμη ο Ohm πρότεινε την εμπειρική σχέση $V=I \cdot R$ συνδέοντας το δυναμικό με την αντίσταση και την ένταση του ρεύματος.

1.1 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Έτσι αν η R είναι η ηλεκτρική αντίσταση ενός κομματιού πετρώματος σχήματος κυλίνδρου διατομής S και μήκους l , η ειδική ηλεκτρική αντίσταση και η ηλεκτρική αγωγιμότητα ορίζεται ως εξής :



ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ρ :

$$\rho = \frac{RS}{l}$$

ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ : $\frac{\text{Ohm} \cdot \text{m}^2}{\text{m}} = \text{Ohm} \cdot \text{m}$

ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ σ :

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

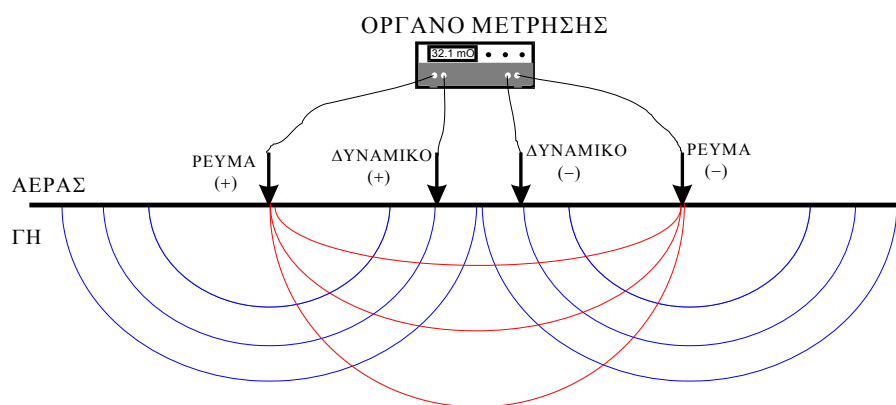
ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ : $\frac{1}{\text{Ohm} \cdot \text{m}} = \text{Siemens/ m} = \text{S/m}$

Μερικές από τις αξιοσημείωτες ηλεκτρικές αντιστάσεις ακολουθούν στον Πιν.1

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 - 1×10^6		
ΓΑΒΡΟΣ	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$		
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	50 - 1×10^7		
ΨΑΜΜΙΤΗΣ	1 - 1×10^8		
ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΙ	20 - 2×10^3		
ΔΟΛΟΜΙΤΗΣ	100 - 10^4		
ΑΜΜΟΣ	1 - 1.000		
ΑΡΓΙΛΟΣ	1 - 100		
ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ	0.5 - 300		
ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ	0.2		

Πιν.1 Αξιοσημείωτες ηλεκτρικές αντιστάσεις

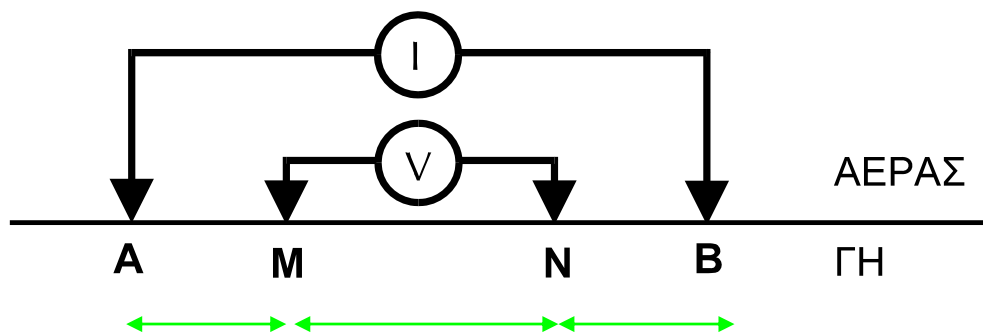
Η μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης γίνεται με τον εξής τρόπο : Διαβιβάζεται στο έδαφος ηλεκτρικό ρεύμα με δύο ηλεκτρόδια ρεύματος Α,Β και μετριοούνται σε διάφορες θέσεις του εδάφους το δυναμικό που δημιουργεί το ρεύμα αυτό με δύο ηλεκτρόδια Μ,Ν Σχ(1.1).



Σχήμα 1.1 Διάταξη 4 ηλεκτροδίων

1.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Όμως επειδή ο απευθείας υπολογισμός της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης στο υπέδαφος από επιφανειακές μετρήσεις δεν είναι εφικτός, έτσι υπολογίζεται αρχικά μία φυσικώς ανύπαρκτη ποσότητα, της φαινόμενης ειδικής αντίστασης ρ_a .



$$\rho_a = \frac{V_{MN}}{I} \left[\frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \right] = RK$$

R = ηλεκτρική αντίσταση, K = γεωμετρικός παράγοντας

1.3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατά τους οποίους διατάσσονται τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού. Οι πιο γνωστοί από αυτούς είναι:

α) Διάταξη Wenner

Κατά την διάταξη αυτή λαμβάνονται $AM=MN=NB=a$. Στην περίπτωση αυτή η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο $\rho_a = 2\pi a(\Delta V/i)$. Δηλαδή ο γεωμετρικός συντελεστής είναι $K=2\pi a$.

Με την εφαρμογή αυτής της διάταξης σε ηλεκτρική βυθοσκόπηση τα ηλεκτρόδια αναπτύσσονται σε σχέση με ορισμένο κέντρο με αύξηση της παραμέτρου a κατά ορισμένη κάθε φορά απόσταση. Κατά την ηλεκτρική χαρτογράφηση η απόσταση a παραμένει σταθερή και τα τέσσερα ηλεκτρόδια κινούνται κατά μήκος ορισμένης τομής, μετά άλλης κ.λ.π και η τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης χαρτογραφείται στο κέντρο κάθε διάταξης. (Σχ.1.2 α)

β) Διάταξη Schlumberger

Στη διάταξη αυτή η απόσταση $MN=2l$ μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση, $AB=2L$, μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από την σχέση $\rho_a = (\pi L^2 / 2l) * (\Delta V / i)$ δηλαδή ο γεωμετρικός συντελεστής $K = \pi L^2 / 2l$.

Κατά την εφαρμογή της διάταξης αυτής για μια γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση, τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά, ενώ η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται σταδιακά και συμμετρικά σχετικά με το κέντρο διάταξης. Αλλά κατά την εφαρμογή της ίδιας μεθόδου για γεωηλεκτρική χαρτογράφηση τα τέσσερα ηλεκτρόδια μετακινούνται πάνω στην τομή, ενώ η απόσταση τους παραμένει σταθερή. (Σχ.1.2β)

γ) Διάταξη διπόλου- διπόλου

Στη διάταξη αυτή τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος βρίσκονται σε μικρή απόσταση, $AB=2l$, μεταξύ τους, αλλά είναι απομακρυσμένα από τα ηλεκτρόδια δυναμικού $BM = n2l$, ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού απέχουν $MN=2l$.

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση είναι $\rho_a = [2\pi n * (n+1) * (n+2) * l] * (\Delta V / i)$

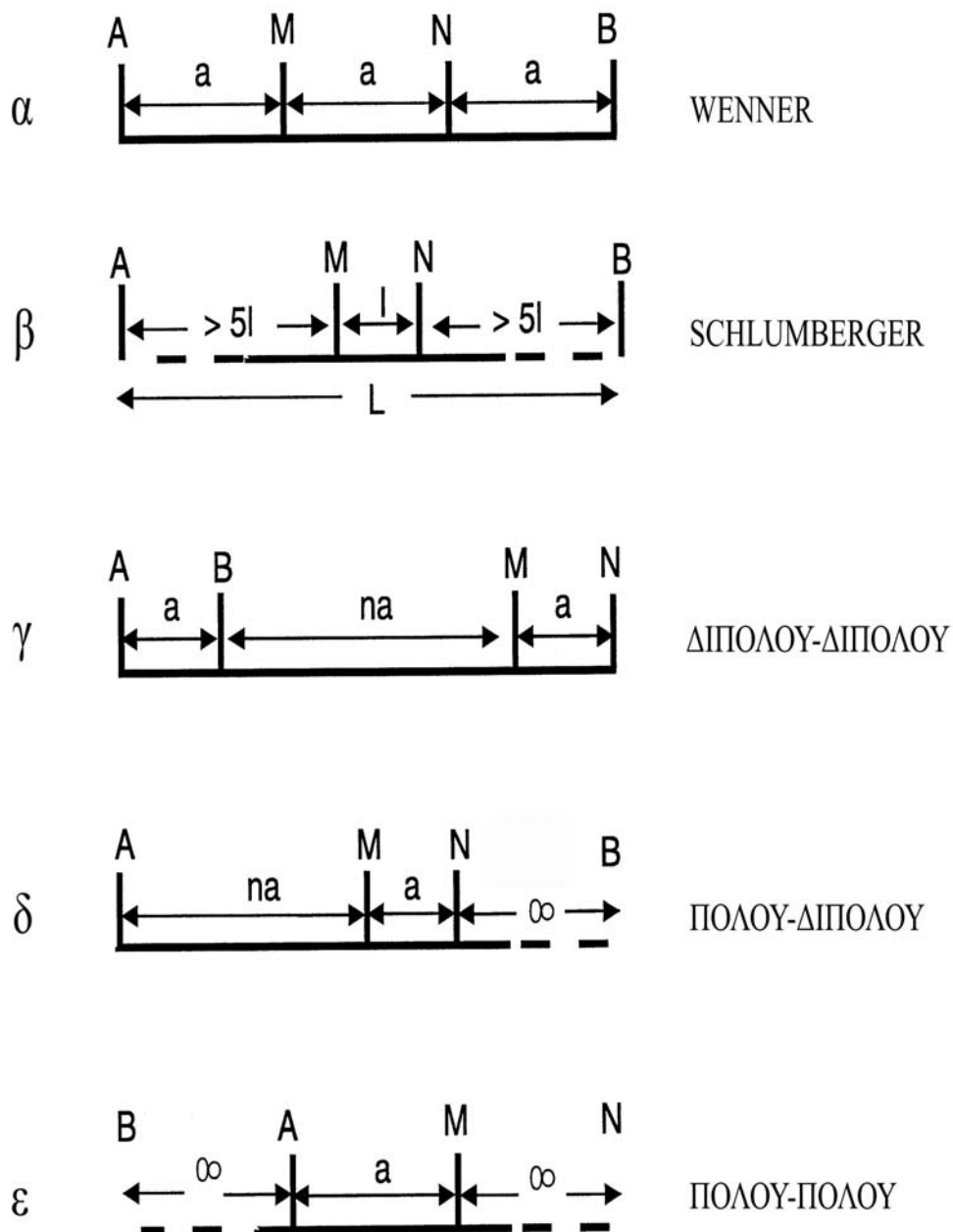
Η διάταξη αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι η απόσταση $2n_1$, μεταξύ του διπόλου ρεύματος και του διπόλου δυναμικού μπορεί να αυξηθεί σημαντικά και περιορίζεται μόνο από τον εδαφικό θόρυβο και από την δυνατότητα των οργάνων να καταγράψουν την τάση και όχι από την απαίτηση για μεγάλα μήκη καλωδίων. Η μετρήσεις κατά την εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιούνται με αύξηση του n κατά βήματα. (Σχ. 1.2γ)

Εκτος από τις παραπάνω κυριότερες διατάξεις υπάρχουν και άλλες όπως η διάταξη Lee, η πόλου- διπόλου, η τετραγωνική διάταξη, η πόλου- πόλου κ.λ.π

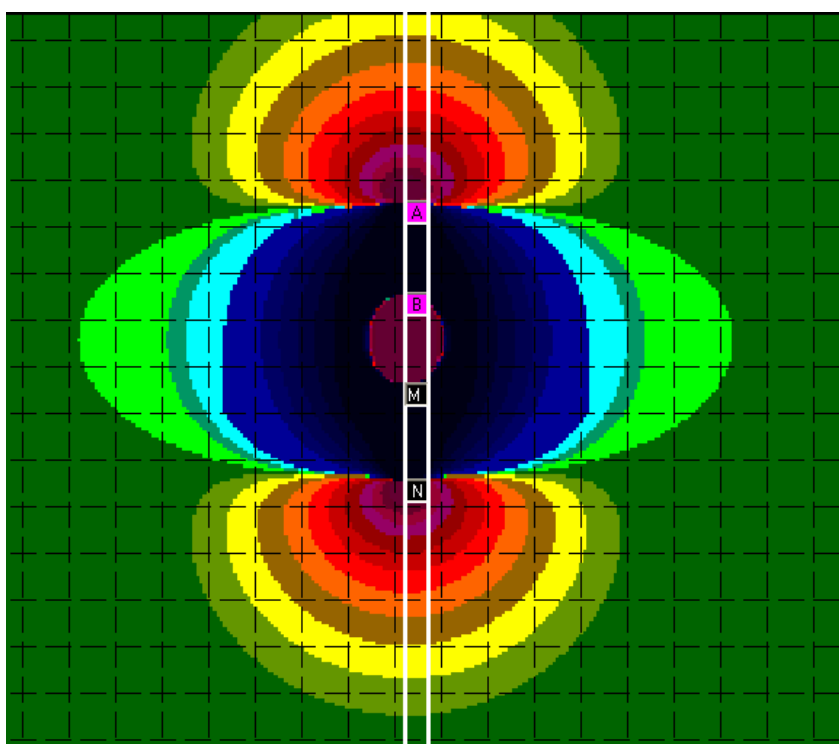
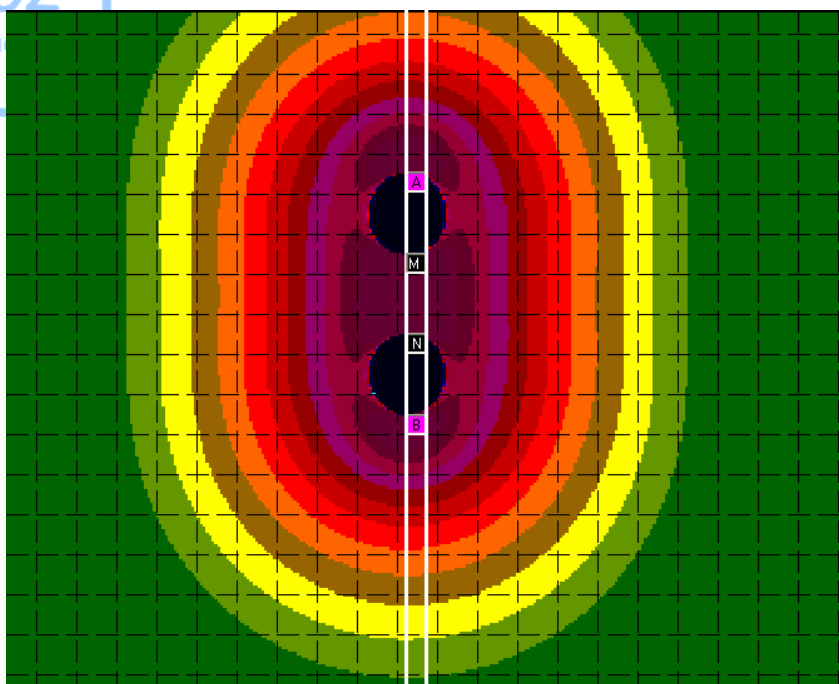
δ) Μετρήσεις σε μονή Γεώτρηση

Κατά την εφαρμογή γεωηλεκτρικών μετρήσεων σε μονή γεώτρηση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οποιεσδήποτε από τις διατάξεις μέτρησης επιφανείας που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Στο Σχ. 1.3 παρουσιάζονται διατάξεις και ευαισθησία γεωηλεκτρικών μετρήσεων σε μονή γεώτρηση για την περίπτωση της Wenner (επάνω) και, διπόλου-διπόλου. Οι εικόνες προέρχονται από το λογισμικό JACBAS (Γιαννάκης, 2008). Είναι φανερό από το Σχήμα η απόλυτα συμμετρική ευαισθησία των διατάξεων σε μονή γεώτρηση γεγονός που αποτελεί και το μειονέκτημά τους καθώς δεν μπορούν να προσφέρουν πληροφορίες σε σχέση με το αζιμούθιο τυχών σωμάτων διαφορετικής αντίστασης.



Σχ.1.2 Διατάξεις γεωηλεκτρικών μετρήσεων



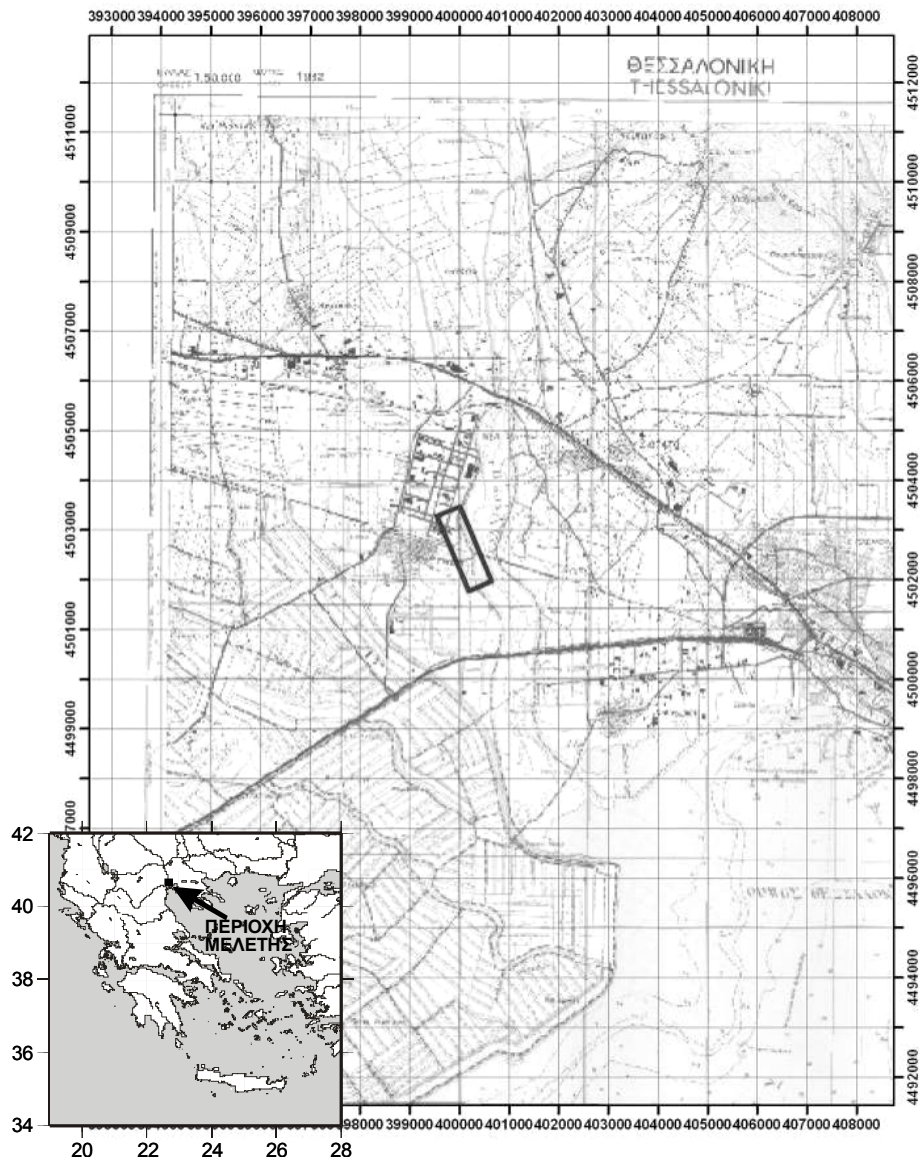
Σχ.1.3 Διατάξεις και ευαισθησία γεωηλεκτρικών μετρήσεων σε μονή γεώτρηση: Wenner (επάνω), διπόλου-διπόλου (κάτω).

1.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Σκοπός όλων των παραπάνω είναι ο προσδιορισμός των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης , με μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων στην επιφάνεια της. Η ηλεκτρική τομογραφία ειδικής αντίστασης (ERT) είναι αυτήν την περίοδο ικανή για να είναι ένα από τα σημαντικότερα γεωφυσικά εργαλεία για την απεικόνιση της υποεπιφάνειας. Η εφαρμογή ERT έχει ιδιαίτερα ευρεία χρήση για το περιβαλλοντικό έλεγχο συμπεριλαμβανομένου εξερεύνησης, χαρτογράφησης υπόγειων νερών και ελέγχου εισβολής θαλασσινού νερού στα ευαίσθητα υδροφόρα στρώματα και διαδικασίες μεταφορών των μολυσματικών παραγόντων.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

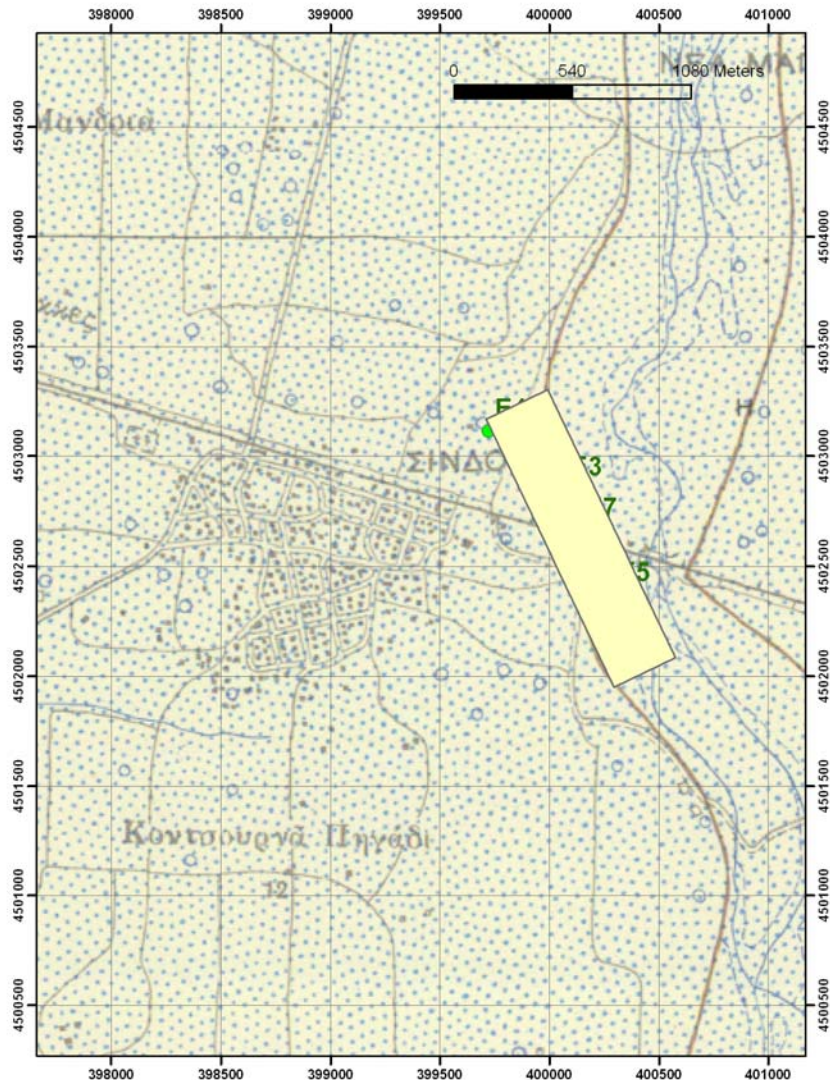
Η περιοχή της Σίνδου βρίσκεται στο δυτικό μέρος του Θερμαϊκού Κόλπου στη Βόρεια Ελλάδα (Σχ. 2.1). Ενώ η περιοχή έρευνας βρίσκεται ανατολικά της Σίνδου. Οι μέσες ετήσιες βροχοπτώσεις είναι 449 χιλιοστά στο σταθμό μετρητών βροχής της Σίνδου. Οι βροχοπτώσεις εμφανίζονται κυρίως από τα τέλη Οκτωβρίου μέχρι τον Μάιο (78% των ετήσιων βροχοπτώσεων).



Σχήμα 2.1 Χάρτης της περιοχής μελέτης

2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Βάσει των στοιχείων του γεωλογικού χάρτη στη περιοχή έρευνας (σχ. 2.2), συναντάται ο σχηματισμός των ολοκαινικών αποθέσεων.



Σχήμα 2.2. Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη περιοχής έρευνας.

Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται από παράκτιες αποθέσεις (άμμοι, άργιλοι, χαλίκια), προσχώσεις πεδιάδων και ερυθρές αργίλους με ασβεστιτικά συγκρίματα, ενώ στη βάση τους επικρατούν κροκαλοπαγή.

Λεπτομερή στοιχεία για την γεωλογική δομή της περιοχής προκύπτουν από υδρογεωτρήσεις των οποίων τα στοιχεία διατέθηκαν από την ΕΥΑΘ.

Σύμφωνα με τις γεωτρήσεις στην περιοχή τουλάχιστον μέχρι το βάθος των 170 μέτρων συναντώνται σε εναλλαγές άμμοι, ιλύες, άργιλοι, χαλίκια και κροκάλες σε σημαντική ποικιλία παχών και κοκκομετρικής σύστασης.

Η λιθολογική περιγραφή των σχηματισμών τους κατατάσσει στα χαλαρά ιζηματογενή πετρώματα που η υδροφορία τους οφείλεται σε πρωτογενές πορώδες που συνήθως κυμαίνεται από 20 έως 35% και η υδροπερατότητα κυμαίνεται από 10^{-10} έως 10^{-2} (Καλλέργης 2001). Το μεγάλο εύρος της υδροπερατότητας αναφέρεται στο ελάχιστο που αντιστοιχεί σε αργιλοϊλύες και στο μέγιστο που αντιστοιχεί σε αλουβιακά χαλίκια. Τα γενικά υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών που συναντώνται στην περιοχή παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ Α. Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά μερικών χαλαρών ιζημάτων (Καλλέργης 2001)

Είδος σχηματισμού	Συνολικό πορώδες %	Ενεργό πορώδες %	Τάξη μεγέθους υδροπερατότητας σε m/sec
Άργιλος	45	3	$<10^{-9}$
Άμμος	35	25	$10^{-4}-10^{-6}$
Χαλίκια	25	22	$>10^{-4}$
Άμμος & χαλίκια	20	16	$10^{-5}-10^{-7}$

Υδροφορίες στην περιοχή, συνεπώς, αναμένονται στα στρώματα που αποτελούνται κυρίως από άμμο και χαλίκια και λιγότερο από τον σχηματισμό των αργιλοιλύων. Τρία κύρια υδροφόρα στρώματα μπορούν να προσδιοριστούν: ένα φρεάτιο και δύο βαθιά υπό πίεση υδροφόρα στρώματα. Ως αποτέλεσμα της προέλευσής τους οι αποθέσεις χαρακτηρίζονται από τον υψηλό βαθμό ετερογένειας και ανισοτροπίας. -

Η επαναφόρτιση υπόγειων νερών στο σύστημα υδροφόρων στρωμάτων εμφανίζεται μέσω των ακόλουθων μηχανισμών: άμεση

διήθηση των βροχοπτώσεων και διήθηση μέσω των κοιτών του ποταμού. Η κατεύθυνση της ροής υπόγειων νερών είναι γενικά από το Βορρά προς τα Νοτιοδυτικά.

Η στάθμη ύδατος μέσα σε αυτές τις αποθέσεις ήταν σε ένα μέσο βάθος περίπου 10-15 m κάτω από την επιγεια επιφάνεια (b.g.s.). Η στάθμη υπόγειου νερού είναι κάτω από τη στάθμη θάλασσας. Υπάρχει μια μικρή τάση ανόδου κατά τη διάρκεια των τελευταίων τριών ετών, κυρίως λόγω της σημαντικής μείωσης ή της διακοπής των ποσοστών άντλησης από την επιχείρηση παροχής νερού και αποχετεύσεων Θεσσαλονίκης (Ε.Υ.Α.Θ).

Με βάση τα αποτελέσματα από τις διεξαγόμενες αναλύσεις δοκιμής άντλησης, η μέση υδραυλική αγωγιμότητα υπολογίστηκε να είναι $k=6.5 \times 10^{-3} \text{ m/l.} - 1.5 \times 10^{-2} \text{ m/l.}$ Η αγωγιμότητα (T) και ο συντελεστής εναποθήκευσης (S) παίρνουν τιμές που ποικίλλουν μεταξύ $T=5.5 \times 10^{-1} - 9.4 \times 10^{-1} \text{ m}^2 / \text{l.}$ και $S=10^{-3}$, αντίστοιχα.

Από τα στοιχεία των γεωτρήσεων προκύπτει ότι η περιοχή έχει υποστεί ήδη σε ένα βαθμό υφαιμύριση των υπόγειων υδροφόρων. Οι αγωγιμότητες που μετρώνται στις γεωτρήσεις κυμαίνονται από 900 $\mu\text{S/cm}$ έως ακόμα 18000 $\mu\text{S/cm}$ (σε υδροφόρο εν ηρεμία) όπως προέκυψε από αγωγιμομέτρηση βάθους.

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

Ο γενικός στόχος αυτής της διαδικασίας εισπιέσεων είναι: να βελτιωθεί η ποιότητα ενός υποβαθμισμένου υδροφόρου ορίζοντα και να αυξηθεί η ποσότητα των υπόγειων νερών. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει την εισπίεση του νερού που προέρχεται από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων Θεσσαλονίκης και έχει υποβληθεί σε επεξεργασία για να φθάσει στα πρότυπα που απαιτούνται (δηλαδή πόσιμο νερό) προτού να εισαχθεί στο έδαφος.

2.2 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

Η κατασκευή της δυνατότητας εισπίεσης, στα πλαίσια της οποίας έγινε και η συγκεκριμένη γεωφυσική μελέτη, περιλαμβάνει ανόρυξη μιας κύριας γεώτρησης εισπίεσης 100m (P0, Σχ.2.3) που επιτρέπει την εισπίεση 13 m³ /h ανακυκλωμένου νερού και τεσσάρων πρόσθετων πιεζομέτρων 100m γύρω από αυτό (P1- P4, Σχ.2.3) για να επιτρέψει τον έλεγχο της διαδικασίας εισπίεσης.

Παρά την αυξανόμενη χρήση της ηλεκτρικής τομογραφίας στην παρακολούθηση της εισπίεσης, η όλη εγκατάσταση έχει έναν ορισμένο βαθμό καινοτομίας σε διεθνές επίπεδο και είναι βεβαίως η πρώτη φορά που μια τέτοια διαδικασία ελέγχου χρησιμοποιείται στην Ελλάδα.



Σχήμα 2.3 Η εγκατάσταση εισπίεσεων ύδατος με τα φρεάτια εισπίεσεων και ελέγχου (P0, π1-4) .

2.3 Διαδικασίες Παρακολούθησης

Τυποποιημένες διαδικασίες που ακολουθήθηκαν πριν, κατά τη διάρκεια και μετά από τη διάτρηση ήταν: (i) προκαταρκτική υδρογεωλογική γεωφυσική μελέτη της επιφάνειας για να σχεδιαστούν και να τοποθετηθούν οι γεωτρήσεις (ii) δειγματοληψία και ανάλυση του εδάφους κατά τη διάρκεια της γεώτρησης (III) λιθολογική στήλη, (iv) ανάλυση των δειγματοληψιών ύδατος, (v) δοκιμές άντλησης. Αυτήν την περίοδο, οι μόνιμοι σταθμοί ελέγχου υπάρχουν σε τρία από τα πιεζόμετρα για να ελέγξουν τη στάθμη ύδατος, την αγωγιμότητα και το PH πριν από και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εισπιέσεων. Περαιτέρω, η συστηματική χημική ανάλυση των δειγματοληψιών ύδατος που άρχισε πριν από την εισπίεση συνεχίζεται για αρκετούς μήνες αφότου αρχίσει η εισπίεση. Ο παραδοσιακός έλεγχος υπόγειων νερών στηρίζεται σε μεγάλο ποσοστό στη «σημειακή» δειγματοληψία γεωτρήσεων αλλά αυτή η προσέγγιση μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτική στα ετερογενή υδροφόρα στρώματα. Σε μία προσπάθεια να αυξηθούν οι ικανότητες ελέγχου της περιοχής των εισπιέσεων, οι γεωηλεκτρικοί αισθητήρες εγκαταστάθηκαν και στις 5 γεωτρήσεις. Ο στόχος είναι να δοθούν, μέσω των ηλεκτρικών μετρήσεων και της επεξεργασίας τομογραφίας ειδικής αντίστασης (ERT), γεωηλεκτρικές εικόνες με αυξημένη δυνατότητα ογκομετρικής δειγματοληψίας γύρω από και μεταξύ των γεωτρήσεων και να κατανοηθεί καλύτερα η ροή και η μεταφορά του εισπιεσμένου ύδατος. Αυτή η προσέγγιση θεωρείται μοναδική και συμπληρωματική στις παραδοσιακές τεχνικές ελέγχου ή/και τις γεωφυσικές μετρήσεις επιφάνειας οι οποίες δε μπορούν να παρέχουν αυτό το είδος πληροφοριών.

3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

3.1 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Οι γεωτρήσεις προγραμματίστηκαν να έχουν κατά προσέγγιση ένα μήκος 100m. Έτσι ως βέλτιστη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων επιλέχθηκαν τα 3m. . Κατά συνέπεια κάθε καλώδιο γεωτρήσεων που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία είχε ένα μήκος 110m με συνολικά 36 ηλεκτρόδια χωρισμένα σε διαστήματα 3m το καθένα από το άλλο.

Η προγενέστερη εμπειρία στην εγκατάσταση των ηλεκτροδίων γεωτρήσεων περιελάμβανε τη χρήση των ειδικών επίπεδων καλωδίων, κορδελών καλωδίων και ανοξείδωτου χάλυβα ως ηλεκτρόδια. Εντούτοις, για να κρατήσει το χαμηλότερο κόστος κατασκευής το καλώδιο γεωτρήσεων κατασκευάστηκε με τη συναρμολόγηση 36 τυποποιημένων καλωδίων (διαμέτρου 0.5μm, εύκολα διαθέσιμο και χαμηλού κόστους) μεταβλητού μήκους (δηλαδή 5, 8, 11... 110m για 1ο, 2ο, 3ο... 36ο ηλεκτρόδιο αντίστοιχα). Επομένως το καλώδιο έχει ένα μέγιστο πάχος στην αρχή του (στην επιφάνεια) και ένα ελάχιστο (1 αγωγός) στο τέλος του.

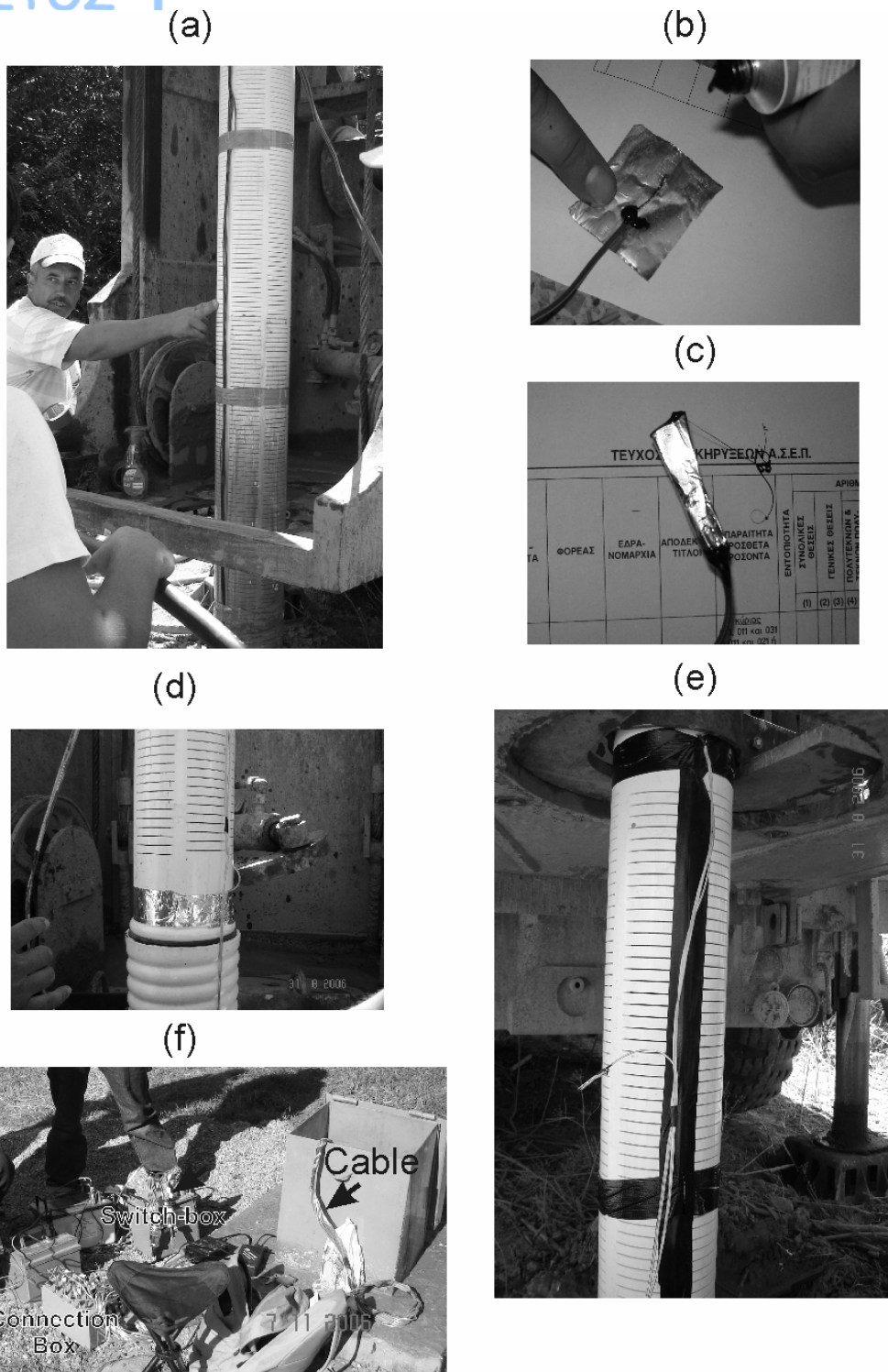
Η προκαταρκτική προετοιμασία ηλεκτροδίων περιέλαβε το γδύσιμο των τελευταίων 2cm κάθε αγωγού από το πλαστικό περίβλημα. Περαιτέρω, κάθε άκρη καλωδίων συσκευάστηκε μεταξύ δύο συγκολλητικών (4X4cm) κομματιών ταινιών αλουμινίου (που ήταν διπλωμένο και κολλημένο στις άκρες τους με την αδιάβροχη κόλλα για να διαμορφώσει το ηλεκτρόδιο (εικ.3.1 c)).

Καθώς η σωλήνωση εγκαθίσταται στην γεώτρηση το καλώδιο συνδέεται ταυτόχρονα πάνω στη σωλήνωση χρησιμοποιώντας κολλητικές ταινίες . Για τα πρώτα 10-15m της εγκατάστασης καλωδίων ολόκληρο το καλώδιο καλύφθηκε από ένα περίβλημα ταινίας για να αυξηθεί η μηχανική αντοχή δεδομένου ότι σε αυτά τα μήκη είναι ιδιαίτερα λεπτό (εικ.3.1 e).

Προκειμένου να αυξηθεί η επιφάνεια του ηλεκτροδίου, κάθε ηλεκτρόδιο συνδέθηκε με τη σωλήνωση έπειτα καλύφθηκε πλήρως από ένα «δακτυλίδι» ταινίας αλουμινίου (πλάτος 5cm) διαμορφώνοντας κατ' αυτό τον τρόπο ένα σχετικά μεγαλύτερο ηλεκτρόδιο (εικ.3.1 d).

Η περιγεγραμμένη διαδικασία αποδείχθηκε αποδοτική δεδομένου ότι καθυστέρησε ελάχιστα (περίπου 1min/ηλεκτρόδιο) τη σωλήνωση των γεωτρήσεων η οποία πρέπει να γίνει γρήγορα προκειμένου να αποφευχθεί η πιθανή μερική κατάρρευση των τοίκων των φρεατίων. Τελικά το κενό μεταξύ της γεώτρησης και του περιβλήματος γέμισε από ένα πακέτο φίλτρων αμμοχάλικου που η εισαγωγή του έγινε αργά προκειμένου να αποφευχθούν οι πιθανές ζημιές στο καλώδιο.

Στην απόληξη του καλωδίου εγκαταστάθηκε φως και μέσω ενός ειδικά κατασκευασμένου κουτιού διακοπών είναι δυνατό να συνδεθούν οποιοιδήποτε ή όλοι οι αγωγοί με το όργανο μέτρησης ειδικής αντίστασης (εικ. 3.1f).



Σχήμα 3.1 Φωτογραφίες που παρουσιάζουν την κατασκευή και την εγκατάσταση καλωδίων ERT

3.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

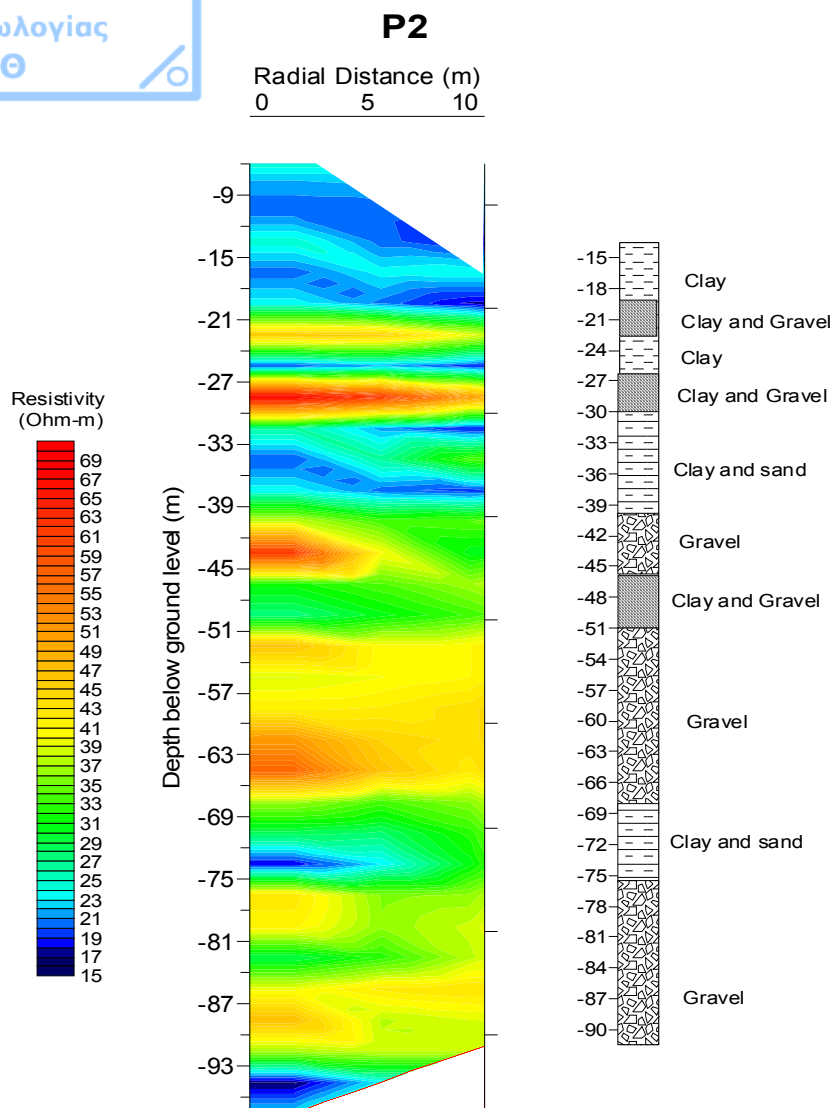
Τα μόνιμα εγκατεστημένα καλώδια χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας σε μονή γεώτρηση. Ο στόχος είναι να αξιολογηθεί η ποιότητα των μετρήσεων και περαιτέρω οι εικόνες τομογραφίας μονών γεωτρήσεων και τελικά να συσχετισθούν με τις αντίστοιχες λιθολογικές στήλες προκειμένου να βαθμονομηθούν οι αντιστάσεις και να σχεδιασθούν οι μελλοντικές συστηματικές μετρήσεις μεταξύ των γεωτρήσεων. Όπως εξηγήθηκε οι μετρήσεις σε μονή γεώτρηση μπορούν να διεξαχθούν με οποιαδήποτε τυποποιημένη επιθυμητή γεωηλεκτρική διάταξη (Wenner, Schlumberger, δίπολου-δίπολου κ.λ.π.).

3.2.1 Αντιστροφή

Μετά τις μετρήσεις σειρά έχει η επεξεργασία των δεδομένων που ονομάζεται αντιστροφή και η οποία στηρίζεται σε πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα. Με την διαδικασία αυτή καταφέρνουμε να πάρουμε μια πιστή απεικόνιση των ειδικών αντιστάσεων του υπεδάφους. Ο αλγόριθμος αντιστροφής είναι βασισμένος σε έναν μη-γραμμικό επαναληπτικό αλγόριθμο αντιστροφής με εξομάλυνση που χρησιμοποιεί πεπερασμένα στοιχεία για να επιλύσει το ευθύ γεωηλεκτρικό πρόβλημα (Tsourlos et al, 2004). Ο αλγόριθμος κάνει την υπόθεση ότι η διαταραχή ειδικής αντίστασης προέρχεται από την μια πλευρά μόνο της γεώτρησης (είτε αριστερά είτε δεξιά). Αυτή η απλοποίηση υποθέτει ότι η αντίθετη πλευρά έχει παρόμοια κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

3.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

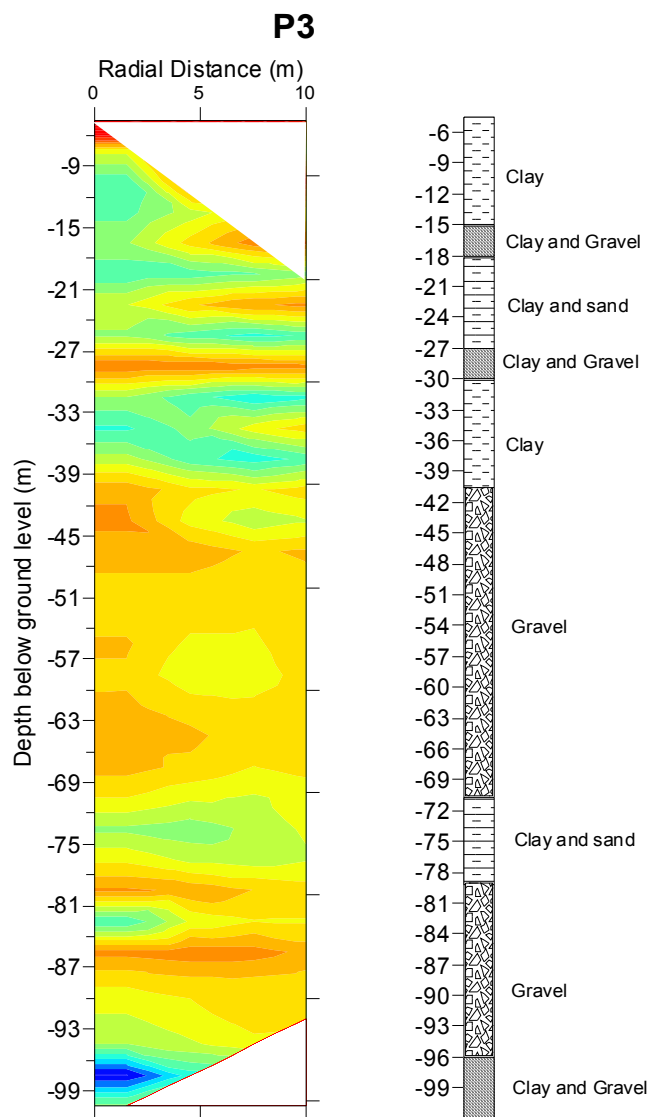
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια 2 επισκέψεων τον Μάιο του 2007. Οι καταγεγραμμένες αντιστάσεις επαφών για τα ηλεκτρόδια όλων των γεωτρήσεων ήταν πολύ χαμηλές (0,2 KOhm) και μόνο τα πρώτα ένα ή δύο ηλεκτρόδια που είναι επάνω από το επίπεδο του φρεάτιου ορίζοντα είχαν υψηλότερες τις αντιστάσεις επαφών (10KOhm).



Σχήμα 3.2 – Γεωηλεκτρική εικόνα που προέκυψε από την αντιστροφή δεδομένων της γεώτρησης P2. Δεξιά παρουσιάζεται η λιθολογική στήλη της γεώτρησης.

Στο Σχ. 3.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που παράγονται από την αντιστροφή των δεδομένων δίπολο-δίπολου από την γεώτρηση P3. Η εικόνα είναι παρόμοια με αυτή του Σχ. 3.2 και επίσης είναι πολύ καλά συσχετισμένη με την λιθολογική στήλη της γεώτρησης που παρουσιάζεται στο ίδιο σχήμα. Οι σχετικά υψηλές ειδικές αντιστάσεις στα πρώτα μέτρα οφείλονται στην υψηλή αντίσταση επαφών που παρουσίασαν τα πρώτα ηλεκτρόδια λόγω της ύπαρξης ακόρεστης ζώνης.

Μια περαιτέρω παρατήρηση συγκρίνοντας τις εικόνες αντιστροφής των Σχ. 3.2 ,3.3 είναι ότι κάτω από το βάθος των 90m παρουσιάζονται χαμηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η λιθολογία δεν φαίνεται να δικαιολογεί τη χαμηλή αντίσταση (σχηματισμοί με χαλίκια) είναι δυνατό αυτό να οφείλεται στην ύπαρξη υφάλμυρου νερού στους συγκεκριμένους σχηματισμούς.



Σχήμα 3.3 – Γεωηλεκτρική εικόνα που προέκυψε από την αντιστροφή δεδομένων της γεώτρησης P3. Δεξιά παρουσιάζεται η λιθολογική στήλη της γεώτρησης.

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε η δυνατότητα της ηλεκτρικής τομογραφίας, ακόμη και σε μια μονή γεώτρηση, να δίνει σημαντικές πληροφορίες για το υπέδαφος. Η διάταξη καλωδίων είναι εύκολο να κατασκευαστεί, είναι χαμηλού κόστους και μπορεί να εγκατασταθεί εύκολα σε οποιαδήποτε γεώτρηση με πλαστική σωλήνωση.

Εφόσον εγκαθίσταται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει αξιόπιστες εικόνες ειδικής αντίστασης του υπεδάφους.

4.1 Σύγκριση ERT με την υδροχημική δειγματοληψία

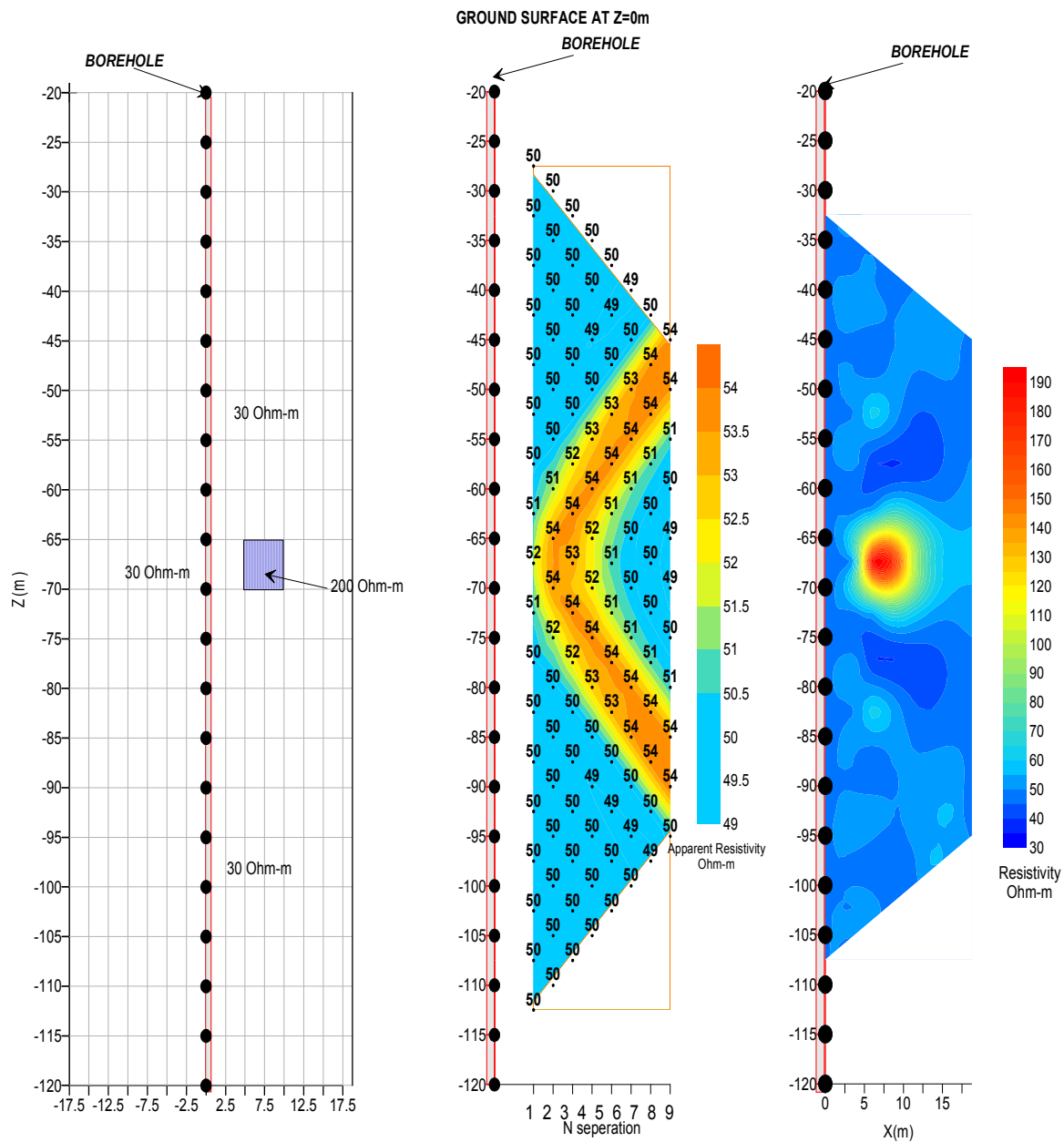
Η υδροχημική δειγματοληψία του νερού των γεωτρήσεων μπορεί να δείξει το επίπεδο μιας ιδιαίτερης συγκέντρωσης διαλυτής ουσίας, αλλά δεν μπορεί να προσφέρει πληροφορίες για την χωρική κατανομή της.

Η ηλεκτρική τομογραφία δύναται να χρησιμοποιηθεί για να ελέγξει υδροχημικές αλλαγές στον χώρο έρευνας με μεγαλύτερη συχνότητα απ' ότι η συνηθισμένη υδροχημική δειγματοληψία (π.χ., κάθε μήνα, αντί κάθε τεσσάρων μηνών) και σε χαμηλότερο κόστος. Η υδροχημική ανάλυση για μια πλήρη ακολουθία από ενώσεις είναι ακριβή και η απάντηση του εργαστηρίου μπορεί να έρθει αρκετές εβδομάδες ή ακόμα και μήνες μετά. Για την παρακολούθηση μιας γεώτρησης με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας απαιτείται μικρός χρόνος (π.χ. 20-30 λεπτά) τόσο για τη λήψη όσο και για την επεξεργασία των μετρήσεων.

4.2 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

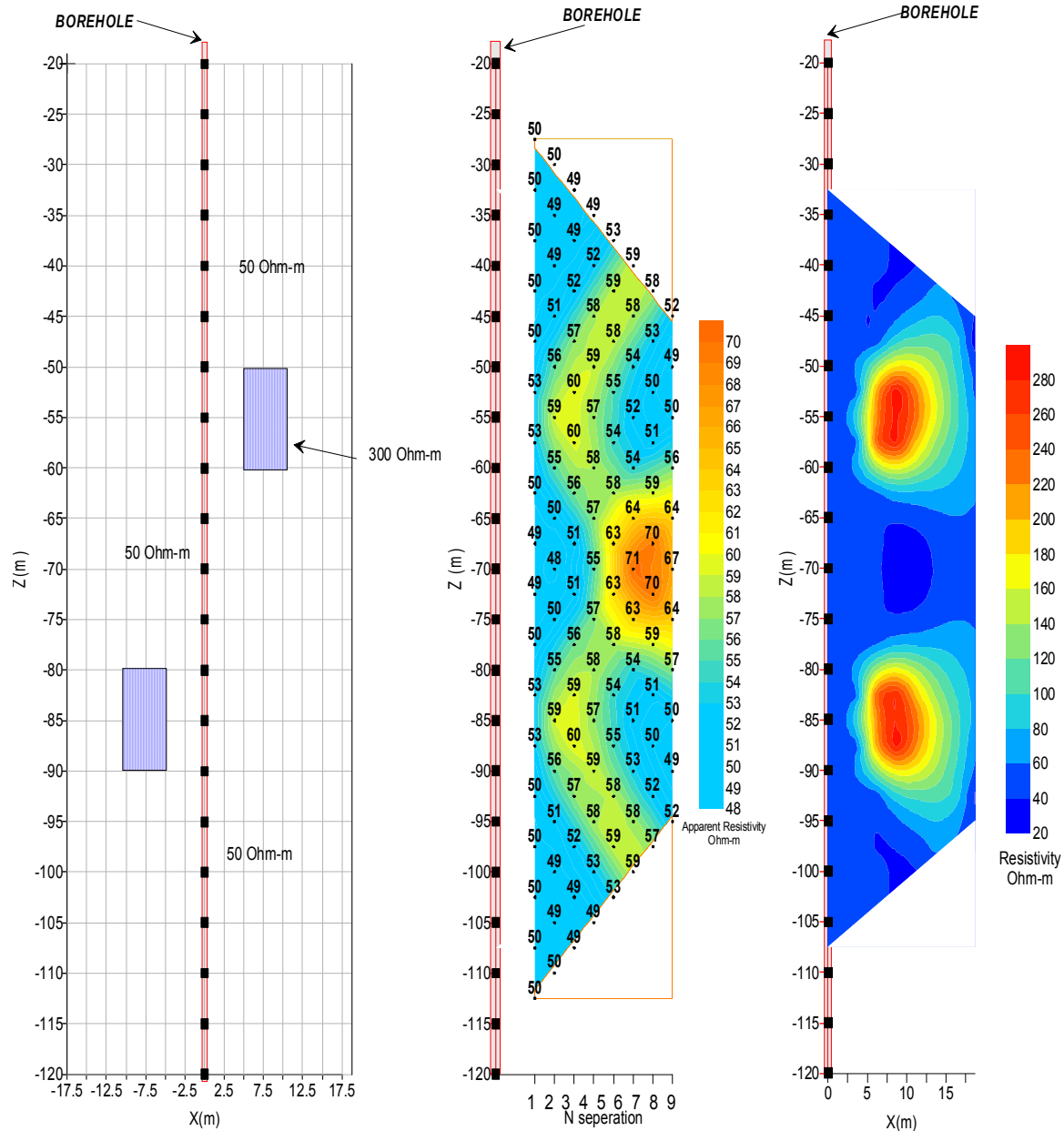
Το μόνο πρόβλημα που μπορεί να δημιουργηθεί με την ERT είναι ότι δεν μπορούν να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες ,κάποιας ανωμαλίας, στον χώρο. Δηλαδή σε περίπτωση δύο διαφορετικών ανωμαλιών εκατέρωθεν της μονής γεώτρησης, η απεικόνιση δεν εκφράζει σε ποια πλευρά της γεώτρησης είναι η κάθε ανωμαλία.(Σχ.4.1 ,4.2).

Στην περίπτωση που στόχος είναι ο εντοπισμός σχεδόν οριζόντιων στρωμάτων, όπως στην περιοχή μελέτης, ο συγκεκριμένος περιορισμός δεν αποτελεί πρόβλημα.



Σχ..4.1 Ανωμαλία που φαίνεται στην ηλεκτρική τομογραφία

GROUND SURFACE AT $Z=0m$



Σχ.4.2 Δύο ανωμαλίες, εκατέρωθεν μονής γεώτρησης, και πως φαίνονται στην ηλεκτρική τομογραφία

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην εργασία καταδεικνύουν έναν πολύ καλό συσχετισμό των εικόνων ηλεκτρικής τομογραφίας με τις λιθολογικές στήλες, γεγονός που αποτελεί ένδειξη της αξιοπιστίας της μεθόδου.

Η μόνιμη εγκατάσταση καθιστά την εφαρμογή των μετρήσεων τομογραφίας εύκολη και επιτρέπει την συστηματική καταγραφή των χρονικών αλλαγών στα υδροφόρα στρώματα λόγω της εισπίεσης νερού. Η πρόσθετη εφαρμογή διατάξεων μετρήσεων μεταξύ γεωτρήσεων μας δίνει πρόσθετες πληροφορίες.

Συμπερασματικά η διαδικασία που περιγράφηκε σε συνδυασμό με τυποποιημένες τεχνικές δειγματοληψίας/ανάλυσης αυξάνει τη δυνατότητα ελέγχου και βοηθάει στην μεγαλύτερη κατανόηση των συνθηκών του υπεδάφους.

Γιαννάκης Η. (2008). Πρόγραμμα H/Y για τον υπολογισμό του Ιακωβιανού πίνακα γεωηλεκτρικών μετρήσεων (JACBAS)., Διπλ. Εργ. ΑΠΘ.

Loke M.H , 2004 , Tutorial:2-D and 3_d electrical imaging surveys

Παπαζάχος Β. 1996 , Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη Γεωφυσική , Εκδόσεις Ζητη

Τσούρλος Π., 2005. Σημειώσεις του μαθήματος «ΗΜ μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης» <http://www.geo.auth.gr>

Tsourlos, P, Ogilvy R., Meldrum P. and Williams G. (2003). Time-lapse Monitoring in Single Boreholes Using Electrical Resistivity Tomography. Journal of Environmental and Engineering Geophysics,. 8, 1-14.

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 Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXVII, 581-592.