



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

Διπλωματική εργασία

Εφαρμογή ηλεκτρικής τομογραφίας με ηλεκτρόδια επαφής



Τορομανίδης Αλέξανδρος

AEM: 4205

Επιβλέπων Καθηγητής:
Τσούρλος Παναγιώτης

Θεσσαλονίκη, 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	4
2.1 Γενικά	4
2.2 Τομογραφία Ειδικής Αντίστασης	6
2.2.1 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων και των ορυκτών	7
2.2.2 Φαινόμενη ειδική αντίσταση	10
2.3 Τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων	11
2.4 Ψευδοτομή	14
2.5 Αλγόριθμοι αντιστροφής	16
2.6 Ηλεκτρόδια επαφής	18
3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	22
3.1 Γενικά	22
3.2 Γεωλογία της περιοχής	23
3.3 Συλλογή στοιχείων ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τομογραφίες στην επιφάνεια του εδάφους	24
3.4 Εξοπλισμός	29
4.ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	32
4.1 Επεξεργασία των δεδομένων των τομογραφιών	32
4.2 Αποτελέσματα και ερμηνεία των τομογραφιών	34
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	40
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	42

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφεται η διεξαγωγή και τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε στο αίθριο του Τεμένους Χάμζα Μπέη (κινηματογράφος Αλκαζάρ) στη Θεσσαλονίκη. Το μνημείο ευρίσκεται στη συμβολή της οδού Βενιζέλου και της Λεωφόρου Εγνατία και αποτελεί δείγμα της πρώιμης οθωμανικής αρχιτεκτονικής. Η έρευνα αποσκοπούσε στη διερεύνηση του υπεδάφους, με σκοπό τον καθορισμό της γεωλογικής δομής καθώς και στον εντοπισμό και την πιθανή χαρτογράφηση θαμμένων αρχαιοτήτων στο χώρο που εδράζεται το μνημείο.

Χρησιμοποιήθηκε μια γεωφυσική μέθοδος διασκόπησης, η οποία περιγράφεται στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκε η μέθοδος της τομογραφίας ειδικής αντίστασης για τη διασκόπηση που διεξήχθη επί του δαπέδου του αίθριου του Τεμένους. Η μέθοδος της γεωηλεκτρικής τομογραφίας εφαρμόστηκε από την επιφάνεια του δαπέδου του αίθριου του Τζαμιού με την χρήση ηλεκτροδίων επαφής.

Οι διαδικασίες μετρήσεων στο μνημείο πραγματοποιήθηκαν στις 18/03/09.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας περιγράφονται οι γενικές αρχές της ηλεκτρικής τομογραφίας και η χρήση ηλεκτροδίων επαφής στην ηλεκτρική διασκόπηση. Επίσης παρατίθενται οι βασικές διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης.

Στο τρίτο κεφάλαιο προσδιορίζεται η περιοχή έρευνας που διεξήχθησαν οι μετρήσεις. Γίνεται αναφορά στα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής, παρουσιάζονται οι μετρήσεις, η επιλογή των παραμέτρων με τις οποίες πάρθηκαν οι μετρήσεις, καθώς και ο απαραίτητος εξοπλισμός.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος επεξεργασίας, η επεξεργασία και η ερμηνεία των μετρήσεων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναπτύσσονται συμπεράσματα που προέκυψαν από την χρήση ηλεκτροδίων επαφής και την επεξεργασία των μετρήσεων.

Την επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας είχε ο κ. Τσούρλος Παναγιώτης, Επίκουρος καθηγητής του Α.Π.Θ, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά για την βοήθειά του.

2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

2.1 Γενικά

Ο όρος ηλεκτρική τομογραφία (ΗΤ) περιγράφει γενικά έναν τύπο μετρήσεων της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός δύο “παραδοσιακών” τεχνικών μέτρησης: της όδευσης και της βυθοσκοπησης. Ειδικότερα, η ηλεκτρική τομογραφία μπορεί να περιγραφεί ως μία σειρά από συνεχόμενες ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις κατά μήκος της γραμμής έρευνας ή ως μία σειρά από οδεύσεις πάνω από την ίδια περιοχή με διαδοχικά αυξανόμενες αποστάσεις ηλεκτροδίων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η λήψη πληροφορίας τόσο για την κατακόρυφη όσο και για την οριζόντια μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή μελέτης και έτσι λαμβάνεται μία πληρέστερη “εικόνα” του υπεδάφους.

Οι τεχνικές ειδικής αντίστασης είναι καθιερωμένες και ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές για την επίλυση πολλών γεωτεχνικών, γεωλογικών προβλημάτων και προβλημάτων ανίχνευσης του υπεδάφους (Ward, 1989) (δηλ. θεμελίωση και ακεραιότητα φραγμάτων, ανίχνευση κοιλοτήτων, σχεδιασμός υποδομής, αξιολόγηση των υδραυλικών και ανισοτροπικών ιδιοτήτων του υπεδάφους, θέση τεχνητών κατασκευών κλπ.).

Στόχος της μεθόδου τομογραφίας ειδικής αντίστασης είναι η μέτρηση της διαφοράς δυναμικού στην επιφάνεια λόγω της ροής ρεύματος εντός του εδάφους. Η μετρηθείσα πτώση του δυναμικού αντικατοπτρίζει τη δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να εξαναγκασθεί να ρέει στο έδαφος, δίδοντας έτσι μια ένδειξη της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους, η οποία εξαρτάται άμεσα από τον τρόπο με τον οποίο το ρεύμα διαρρέει το υπεδάφος. Εφόσον η ροή του ρεύματος σχετίζεται με τη δομή του υπεδάφους, η γνώση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να αποτελέσει τη βάση διάκρισης των χαρακτηριστικών του εδάφους (στρωματογραφία, ύπαρξη κενών ή τεχνητών κατασκευών κλπ.).

Δεδομένου ότι οι παράγοντες που καθορίζουν την αγωγιμότητα του ρεύματος στο υπέδαφος (παρουσία πόρων, περιεχόμενο ύδωρ, χημική σύνθεση κλπ.) είναι πολύ μεταβλητοί, παρατηρείται συχνά το φαινόμενο, παρόμοιοι σχηματισμοί σε διαφορετικές θέσεις να εμφανίζουν εντελώς διαφορετικές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Το γεγονός αυτό καθιστά την ειδική αντίσταση αρκετά ασταθή ως ιδιότητα και, ως εκ τούτου, ορισμένες φορές ανεπαρκή, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί από μόνη της για την λήψη ορθών συμπερασμάτων σχετικά με τη λιθολογία του υπεδάφους. Κατά συνέπεια, κατά την ερμηνεία στοιχείων σχετικά με την ειδική αντίσταση θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι οι τιμές που έχουν μετρηθεί σχετικά με την ειδική αντίσταση δεν είναι απόλυτες αλλά σχετικές και, ως εκ τούτου, μπορούν να εξαχθούν σωστά συμπεράσματα μόνο εφ' όσον λάβουμε υπόψη τη λιθολογία της περιοχής.

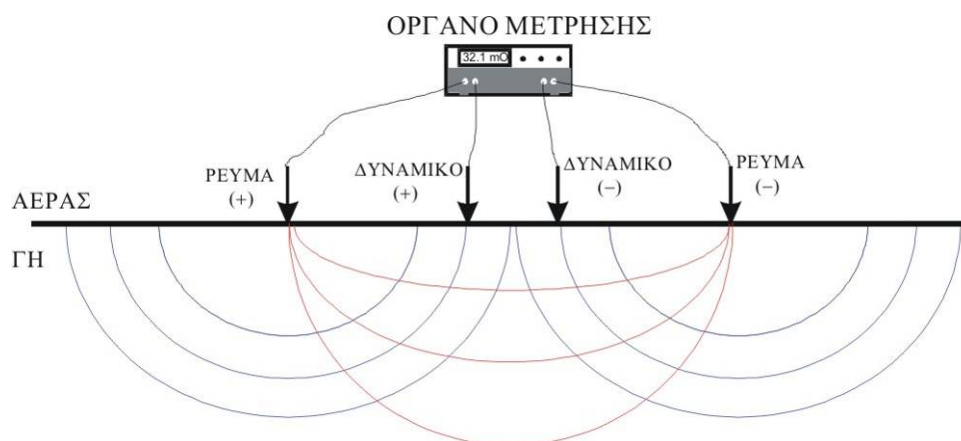
Για παράδειγμα, παρατηρώντας τα στοιχεία μπορεί να διατυπωθεί ότι υπάρχει σχηματισμός λιγότερο ανθεκτικός από τους παρακείμενους σχηματισμούς, αλλά δεν θα είναι ασφαλές να αποφασιστεί η ταυτότητά του μόνο βάσει της τιμής της ειδικής αντίστασής του. Λανθασμένες ερμηνείες μπορούν να δοθούν όταν δεν λαμβάνεται υπόψη το γεγονός αυτό. Αντίστροφα, αυτό το μειονέκτημα σχετικά με την ειδική αντίσταση (που συναντάται συχνά σε κάθε γεωφυσική τεχνική) δεν αποτρέπει επιτυχείς ερμηνείες αλλά, προκειμένου να ληφθούν ικανοποιητικά αποτελέσματα, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλα στοιχεία σχετικά με την υπό μελέτη περιοχή. Αυτά τα επί πλέον στοιχεία, μπορεί να είναι γεωλογικοί χάρτες της περιοχής ή αποτελέσματα πιθανής γεώτρησης, αποτελέσματα εκσκαφών ή γενικά οποιαδήποτε πληροφορία μπορεί να αυξήσει τις γνώσεις σχετικά με το τι είναι πιθανό να βρεθεί κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Οι επί πλέον αυτές πληροφορίες χρησιμοποιούνται προκειμένου να βαθμονομηθούν τα στοιχεία που πρέπει να ερμηνευτούν και θα πρέπει να συλλεχθούν πριν από τη διαδικασία των μετρήσεων, ώστε να είναι δυνατή η επιλογή της καλύτερης δυνατής διάταξης ηλεκτροδίων καθώς της στρατηγικής που θα ακολουθηθεί για τη συγκεκριμένη έρευνα.

2.2 Τομογραφία Ειδικής Αντίστασης

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.

Με την εφαρμογή ηλεκτρικών μεθόδων επιδιώκεται ο καθορισμός της κατανομής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται ανήκουν στην κατηγορία του τεχνητά παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος (I), το οποίο διαβιβάζεται στο έδαφος δια μέσου της ζεύγους ηλεκτροδίων. Σε ένα δεύτερο ζεύγος ηλεκτροδίων μετράται η πτώση τάσης (ΔV) που προκαλείται (Εικόνα 2.2.1) δηλαδή κάθε μέτρηση απαιτεί συνολικά τέσσερα ηλεκτρόδια. Η ωμική αντίσταση (R) που υπολογίζεται σαν το πηλίκο των δύο αυτών μεγεθών χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η οποία με τη σειρά της επιτρέπει τον υπολογισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

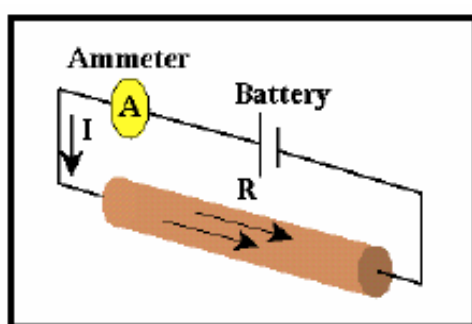


Εικόνα 2.2.1 Βασική διάταξη γεωηλεκτρικών μετρήσεων

2.2.1 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων και των ορυκτών

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ ενός στερεού σώματος κυλινδρικού σχήματος, διατομής (S) και μήκους (l), που έχει ηλεκτρική αντίσταση (R) (Σχήμα 2.2.1.1), ορίζεται από τη σχέση:

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



Εικόνα 2.2.1.1 Σχηματική απεικόνιση του ορισμού της ειδικής αντίστασης

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

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 2.2.1.1) παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά πετρώματα-υλικά και το εύρος τιμών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων αυτών.

ΜΕΣΟ	ΕΥΡΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (Ohm-m)
ΑΕΡΑΣ	∞
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 2.2.1.1 Κατανομή των αντιστάσεων
σε διάφορα μέσα.

2.2.2 Φαινόμενη ειδική αντίσταση

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

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

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

Η φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση ορίζεται ως: **“το γινόμενο του γεωμετρικού παράγοντα (K) επί τον λόγο της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού (ΔV) προς την ένταση του ρεύματος (I) που εισάγεται στο έδαφος”**

Και δίνεται από την σχέση:

$$\rho_\alpha = K \frac{\Delta V}{I}$$

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

2.3 Τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατά τους οποίους διατάσσονται τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού, (Εικόνα 2.3.1). Κύριο χαρακτηριστικό των διατάξεων είναι ο γεωμετρικός παράγοντας (**K**), ο οποίος εξαρτάται από τη θέση των ηλεκτροδίων στο χώρο και υπολογίζεται για κάθε μέτρηση ξεχωριστά. (Tsourlos, 1995).

Οι πιο γνωστές διατάξεις με τους τύπους της ειδικής αντίστασης είναι:

Διάταξη Wenner

$$\rho_{\alpha} = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

Διάταξη διπόλου –διπόλου

$$\rho_{\alpha} = [-\pi n(n+1)(n+2)a] \frac{\Delta V}{I}$$

Διάταξη Schlumberger

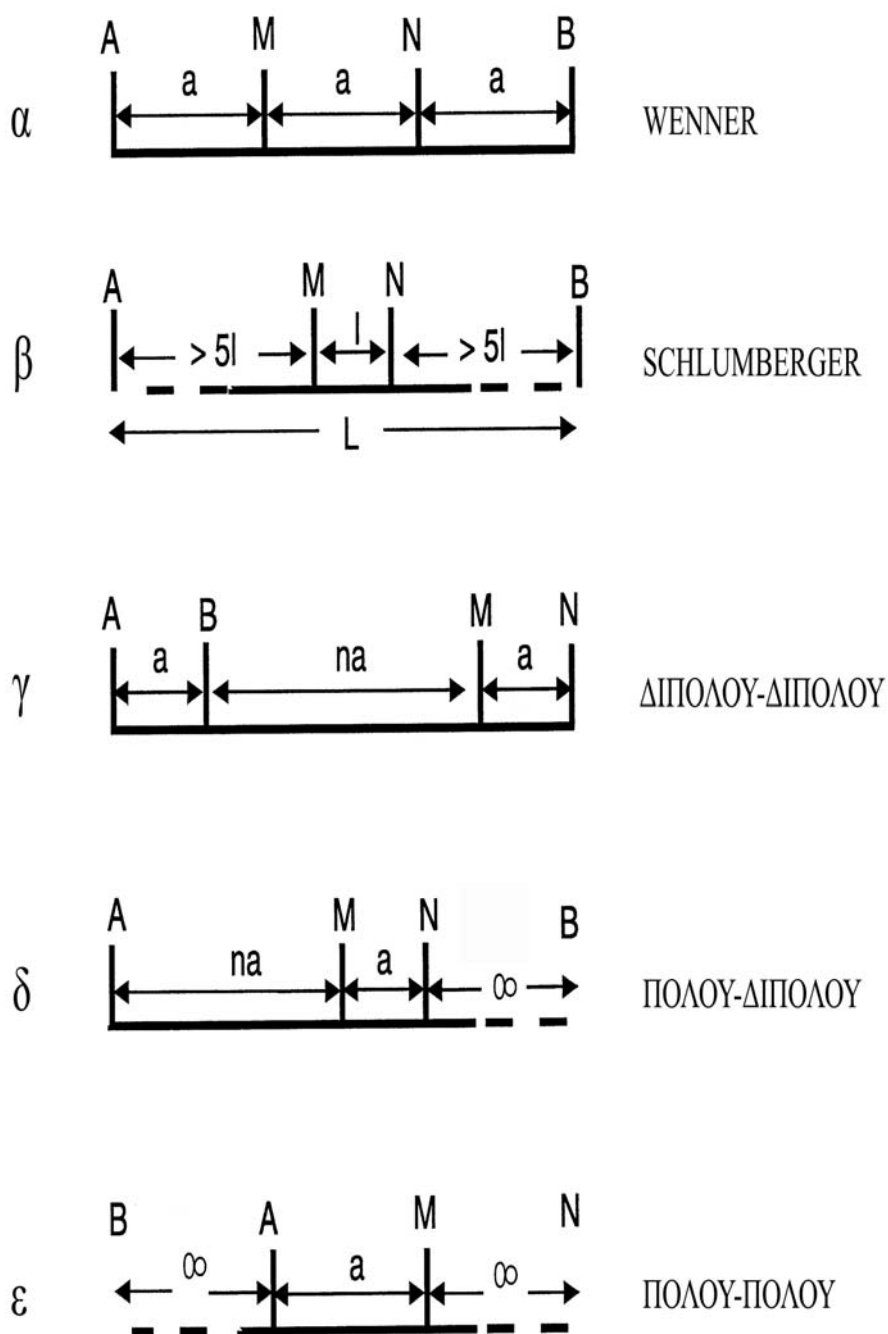
$$\rho_{\alpha} = \frac{\pi L^2}{2l} \frac{\Delta V}{I}$$

Διάταξη πόλου-διπόλου

$$\rho_{\alpha} = [2\pi n(n+1)a] \frac{\Delta V}{I}$$

Διάταξη πόλου-πόλου

$$\rho_{\alpha} = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

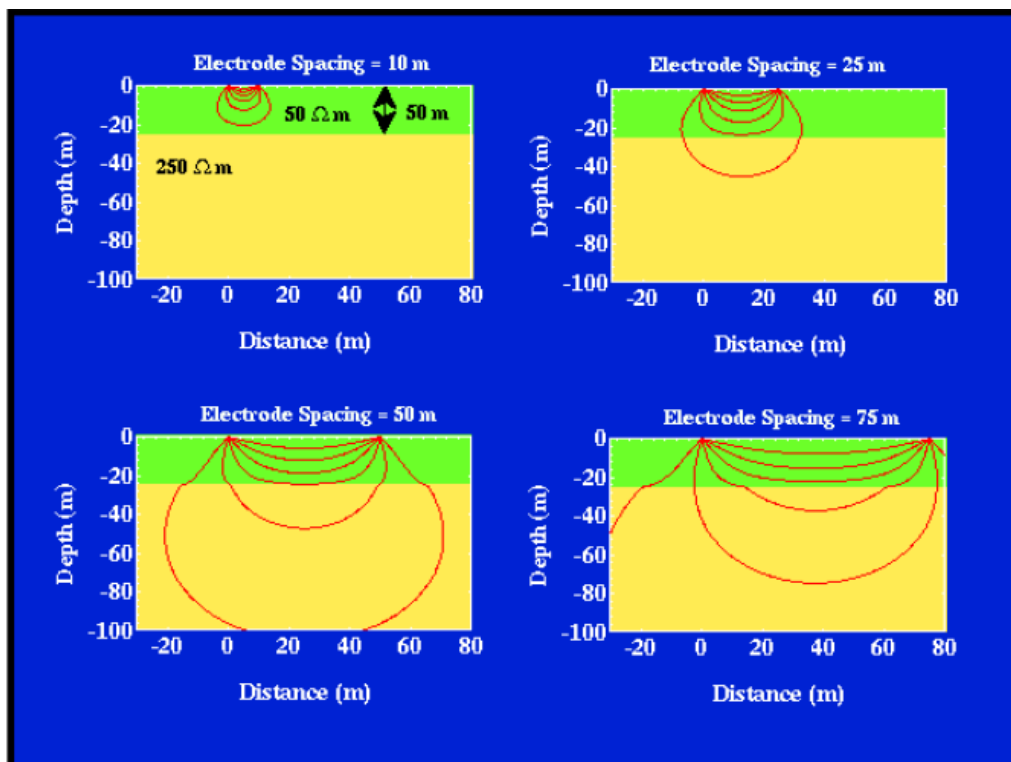


Εικόνα 1.4.1 Βασικές διατάξεις ηλεκτροδίων (Tsourlos, 1995)

Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους διαφέρουν ως προς τη γεωμετρία τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, κάθε μια από αυτές να έχει διαφορετικές δυνατότητες ανίχνευσης των μεταβολών της αντίστασης από τις υπόλοιπες.

Βάθος διείσδυσης

Το βάθος στο οποίο η κάθε μέτρηση μπορεί να «φθάσει» εντός του εδάφους μπορεί να ελέγχεται με τη ρύθμιση της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων. Γενικά το βάθος διείσδυσης αυξάνεται όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων κατ' επέκταση εξαρτάτε από και από την εκάστοτε διάταξη.

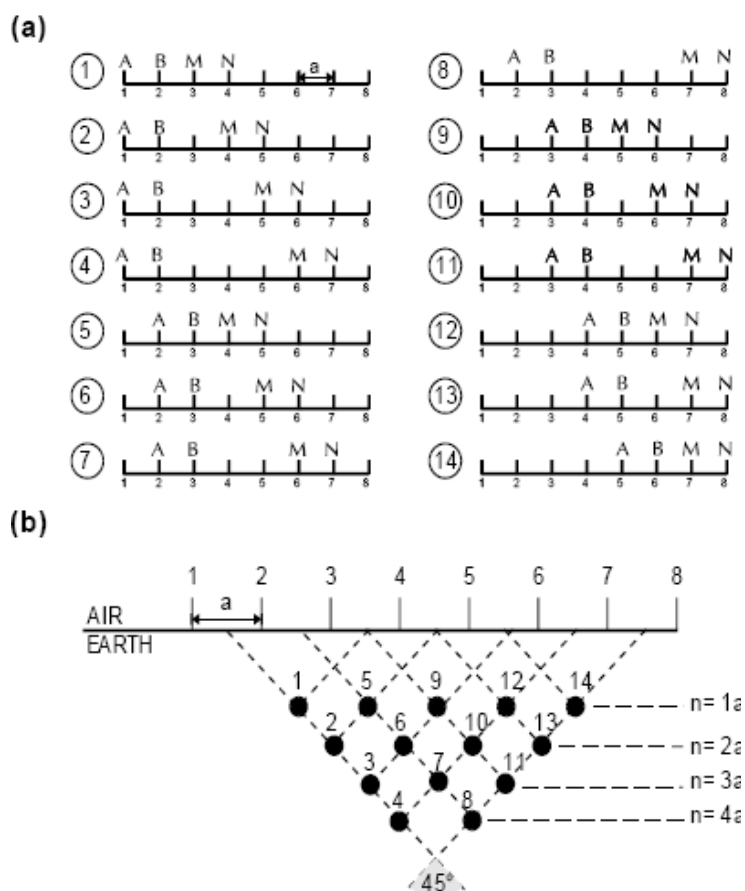


Εικόνα 2.4.2 Σχηματική παράσταση του βάθους διείσδυσης σε σχέση με την απόσταση των ηλεκτροδίων

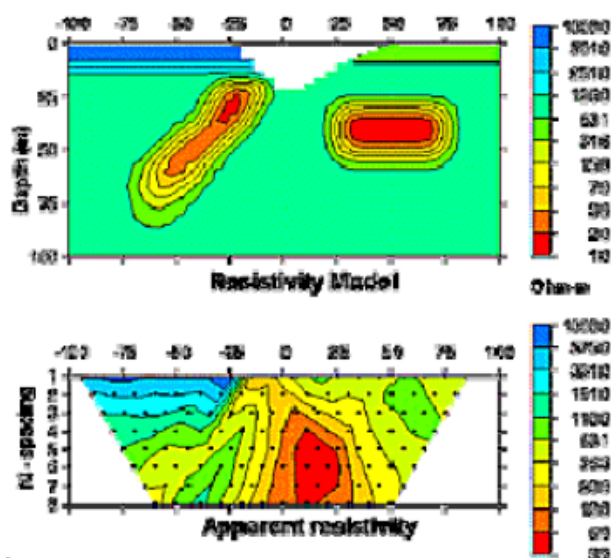
2.4 Ψευδοτομή

Βάσει των αρχών για το βάθος διείσδυσης, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μια σειρά μετρήσεων (όδευση), αυξάνοντας την απόσταση των ηλεκτροδίων, προκειμένου να ληφθεί μια ένδειξη της διακύμανσης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους της υπό μελέτη περιοχής, τόσο προς την εγκάρσια, όσο και προς την κατακόρυφη κατεύθυνση. Όπως συμβαίνει σε κάθε γεωφυσική τεχνική, οι μετρήσεις αυτές (επονομαζόμενες φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης) δεν παρέχουν μια άμεσα αναγνώσιμη «εικόνα» της υπεδάφιας κατάστασης, αλλά απλώς το ολοκληρωμένο αποτέλεσμα των ιδιοτήτων του υπεδάφους. Επομένως, η εικόνα των φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων μπορεί να απέχει πολύ από την κατανομή των πραγματικών ειδικών αντιστάσεων (σε περιπτώσεις πολυσύνθετης κατανομής ιδιοτήτων του υπεδάφους).

Παραδοσιακά, η ερμηνεία των δεδομένων των μετρήσεων αυτών γίνεται με τη χρήση της μεθόδου της «ψευδοτομής» (εικόνα 2.4.1), που είναι πρόδρομος της ηλεκτρικής τομογραφίας. Έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στην χαρτογράφηση μεταλλευμάτων (Edwards, 1977) αλλά και σε διάφορες άλλες εφαρμογές, όπως π.χ. υδρογεωλογικές (Griffiths et al., 1990). Βασίζεται δε στο γεγονός ότι όσο μεγαλύτερη η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, τόσο περισσότερο η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σχετίζεται με μεγαλύτερα βάθη. Ως εκ τούτου, κάθε μετρηθείσα τιμή φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τοποθετείται αυθαίρετα κάτω από το κέντρο της συγκεκριμένης διάταξης ηλεκτροδίων που χρησιμοποιείται, σε βάθος ανάλογο της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων. Στην ψευδοτομή χρησιμοποιούνται διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων (π.χ. διπόλου-διπόλου, Wenner, πόλου-διπόλου). Αν αυτό γίνει σε κάθε μέτρηση, τότε μπορεί να εξαχθεί μια «ψευδο-εικόνα» του υπεδάφους σε τραπεζοειδές πλαίσιο (εικόνα 2.4.2).



Εικόνα 2.4.1 α. Διαδικασία λήψης μετρήσεων β. Ψευδοτομή χάρτης φαινόμενων ηλεκτρικών αντιστάσεων



Εικόνα 2.4.2 ψευδο-εικόνα

2.5 Αλγόριθμοι αντιστροφής

Η ερμηνεία των εικόνων «ψευδοτομής» απαιτεί μεγάλο βαθμό εξειδικευμένων γνώσεων. Παρ' όλα αυτά, σε περιπτώσεις πολύπλοκης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δεν είναι δυνατόν να υπάρξει ακριβής ερμηνεία. Τη δεκαετία του 1990, η έλευση ταχύτατων υπολογιστών επέτρεψε την ανάπτυξη πλήρως αυτοματοποιημένων αλγορίθμων, γνωστοί ως **αλγόριθμοι αναστροφής**, οι οποίοι είναι σε θέση να δημιουργήσουν «ακριβείς» εικόνες της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους. Ο όρος «αντιστροφή» στη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης περιγράφει τη (συνήθως πλήρως αυτοματοποιημένη) διαδικασία δημιουργίας μιας εικόνας της «πραγματικής» κατανομής της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους με βάση τα δεδομένα των μετρήσεων.

Σκοπός δηλαδή 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 δύο (διδιάστατη) ή τρεις (τρισδιάστατη) διαστάσεις.

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 $\Delta y = (\text{πραγματικά δεδομένα} - \text{συνθετικά δεδομένα})$. Στη συνέχεια με μια διαδικασία αντιστροφής πινάκων γίνεται διόρθωση του αρχικού μοντέλου αντίστασης και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το λάθος 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.

Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι, από μαθηματικής πλευράς, πολύπλοκοι και επιτρέπουν την ανακατασκευή οποιωνδήποτε ομάδων δεδομένων που έχουν μετρηθεί, ανεξάρτητα από τη διάταξη των ηλεκτροδίων. Επιπλέον, η έλευση κατά τα τελευταία έτη οργάνων μέτρησης ειδικής αντίστασης νέας γενιάς, επέτρεψε την αυτοματοποίηση της διαδικασίας μέτρησης και, υπό την έννοια αυτή, κάθε συνδυασμός μετρήσεων μπορεί να ληφθεί εύκολα. Μπορούν να τοποθετηθούν ηλεκτρόδια ακόμη και εντός γεωτρήσεων, και η τομογραφία να αφορά το μεταξύ τους χώρο.

Ο συνδυασμός των αυτοματοποιημένων συστημάτων μέτρησης με τις νέες μεθόδους ερμηνείας (αντιστροφή) περιγράφεται με τον όρο **«τομογραφία ειδικής αντίστασης»**. Ο όρος οφείλεται στην ομοιότητα της ανωτέρω διαδικασίας προς τις ιατρικές τεχνικές δημιουργίας εικόνας (π.χ. τομογραφία με ακτίνες Χ).

2.6 Ηλεκτρόδια επαφής

Το μοναδικό μειονέκτημά της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας σε περιβάλλοντα όπου υφίσταται τσιμέντο, μάρμαρο, άσφαλτος, κτλ. είναι ότι κατά την εφαρμογή της είναι απαραίτητο να καρφωθούν μεταλλικά ηλεκτρόδια στο έδαφος της περιοχής μελέτης σε βάθος 20cm περίπου, γεγονός που καθιστά αδύνατη την εφαρμογή της. Έτσι γεννήθηκε η ανάγκη να δημιουργηθούν και να εφαρμοστούν άλλοι τύποι ηλεκτροδίων, αυτοί είναι τα ηλεκτρόδια επαφής.

Τα ηλεκτρόδια επαφής αποτελούνται από τις «γυμνές» άκρες καλωδίων τα οποία όλα μαζί κάνουν ένα σύνολο πολύκλωνων καλωδίων όπου συνδέονται με το όργανο μέτρησης (εικόνα 2.6.1).



Εικόνα 2.6.1 Πολύκλιωνα καλώδια-ηλεκτρόδια επαφής και όργανο μέτρησης

Για την μείωση της αντίστασης επαφής των ηλεκτροδίων χρησιμοποιείται ένα μίγμα μεγάλης αγωγιμότητας και πολύ υψηλού ιξώδους, το οποίο τοποθετήθηκε μεταξύ του ηλεκτροδίου και της επιφάνειας που αυτό τοποθετείται (εικόνα 2.6.2). Το μίγμα αποτελείται από H_2O (νερό), $NaCl$ (αλάτι), P541 και P452 (συντηρητικά). Οι δύο τελευταίες χημικές ουσίες χρησιμοποιούνται και στη βιομηχανία κατασκευής αλλαντικών για την συντήρηση των παρασκευασμάτων. Το μίγμα αυτό έχει αρκετά υψηλό σημείο τήξεως ώστε να διατηρείται και σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες.

Αντί του παραπάνω μίγματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ζελέ ζαχαροπλαστικής, το οποίο κατά την παρασκευή του εμπλουτίζεται με μεγάλη ποσότητα $NaCl$ (αλατιού). Το μειονέκτημα αυτού του μίγματος είναι ότι έχει χαμηλό σημείο τήξεως, με αποτέλεσμα να λιώνει πολύ γρήγορα όταν υφίστανται υψηλές θερμοκρασίες. Συνεπώς, το συγκεκριμένο μίγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε περιόδους, κατά τις οποίες οι θερμοκρασίες διατηρούνται χαμηλές.

Στις μετρήσεις που έγιναν και αποτέλεσαν αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας για την μείωση της αντίστασης επαφής χρησιμοποιήθηκε άργιλος και πιο συγκεκριμένα μίγμα μπεντονίτη μεταξύ του ηλεκτροδίου και της επιφάνειας που αυτό τοποθετείται (εικόνα 2.6.2). Το υλικό αυτό σήμερα χρησιμοποιείται ως επί τον πλείστον στις μετρήσεις με ηλεκτρόδια επαφής .

Τα ηλεκτρόδια επαφής, λόγω του γεγονότος ότι εφάπτονται στην επιφάνεια της περιοχής μελέτης αντί να καρφώνονται σε αυτή, έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δομημένες περιοχές χωρίς να καταστρέψουν τις υπάρχουσες δομές.



Εικόνα 2.6.2 Ηλεκτρόδιο επαφής και το μίγμα μπεντονίτη που τοποθετείται μεταξύ του ηλεκτροδίου και της επιφάνειας

Επίσης, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες του έτους, είναι απαραίτητος ο εμποτισμός των ηλεκτροδίων επαφής, κατά τακτά χρονικά διαστήματα, με νερό κορεσμένο σε NaCl (αλάτι) έτσι ώστε να διατηρούνται σταθερά χαμηλές οι αντιστάσεις επαφής των ηλεκτροδίων

Σε πειραματικές διαδικασίες που υλοποιήθηκαν μετρήσεις με κανονικά ηλεκτρόδια και στη συνέχεια στα ίδια ακριβώς σημεία με ηλεκτρόδια επαφής. Τα αποτελέσματα ήταν εντυπωσιακά ίδια. Όπως φαίνεται και στους πίνακες (2.6.1) και (2.6.2) τόσο για μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις ηλεκτροδίων (0.5m), όσο και για μεγάλες (10m), σε μετρήσεις που έγιναν στον περίβολο της Σχολής Θετικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης τα αποτελέσματα είναι ίδια.

Εφαρμογή ηλεκτρικής τομογραφίας με ηλεκτρόδια επαφής

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (για ενδιάμεση απόσταση 0.5m)	WENNER		ΔΙΠΟΛΟΥ-ΔΙΠΟΛΟΥ (Χωρίς Κ)	
	ΚΑΝΟΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ ΕΠΑΦΗΣ	ΚΑΝΟΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ ΕΠΑΦΗΣ
1 ^η μέτρηση	44.6	44.2	4.2	4.3
2 ^η μέτρηση	44.6	44.4	4.2	4.3
3 ^η μέτρηση	44.6	44.3	4.2	4.3

Πίνακας 2.6.1 Μετρήσεις με τις διατάξεις Wenner και διπόλου-διπόλου για ενδιάμεση απόσταση ηλεκτροδίων 0.5m.

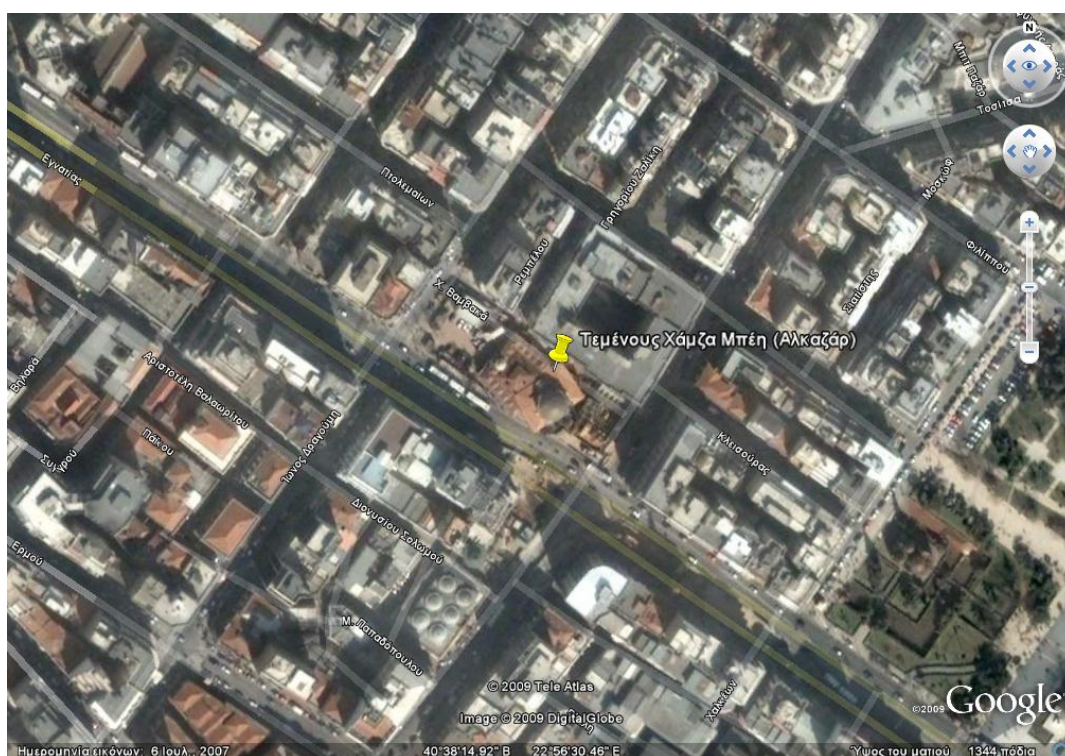
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (για ενδιάμεση απόσταση 10m)	WENNER		ΔΙΠΟΛΟΥ-ΔΙΠΟΛΟΥ (Χωρίς Κ)	
	ΚΑΝΟΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ ΕΠΑΦΗΣ	ΚΑΝΟΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ ΕΠΑΦΗΣ
1 ^η μέτρηση	43.6	43.1	0.3	0.3
2 ^η μέτρηση	43.2	43	0.3	0.4
3 ^η μέτρηση	43.2	43	0.3	0.4

Πίνακας 2.6.2 Μετρήσεις με τις διατάξεις Wenner και διπόλου-διπόλου για ενδιάμεση απόσταση ηλεκτροδίων 10m.

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

3.1 Γενικά

Οι μετρήσεις που αποτέλεσαν αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας έγιναν στο Χαμζά Μπέη τζαμί που βρίσκεται στη συμβολή των οδών Εγνατίας και Ε. Βενιζέλου στην πόλη της Θεσσαλονίκης. Το μνημείο αποτελεί δείγμα της πρώιμης οθωμανικής αρχιτεκτονικής και όπως μας πληροφορούν οι δύο εντοιχισμένες σ' αυτό κτητορικές επιγραφές, γνώρισε τουλάχιστον δύο κατασκευαστικές φάσεις



Εικόνα 3.1.1 Τέμενος Χαμζά Μπέη (Αλκαζάρ), (πηγή: <http://sobraluz.blogspot.com/2009/02/2.html>, Google)

3.2 Γεωλογία της περιοχής

Η περιοχή όπου διεξήχθησαν οι μετρήσεις είναι εντός της πόλης της Θεσσαλονίκης, η οποία ανήκει στην ζώνη της Παιονίας.

Η πόλη της Θεσσαλονίκης είναι κτισμένοι πάνω σε αδιαίρετες ολοκαινικές αποθέσεις, που αποτελούνται από παράκτιες αποθέσεις (άμμοι), προσχώσεις πεδιάδων, ερυθρές άργιλοι με ασβεστιτικά συγκρίματα. Στην βάση τους επικρατούν κροκαλοπαγή (**H**).

Κάτω από αυτές τις αποθέσεις υπάρχει μια νεογενή ιζηματογενή σειρά αποτελούμενη από τις χαρακτηριστικές αποθέσεις των ερυθρών αργίλων, ψαμμιτών, μαργών (**M₄-Pli.l** και **M₄-Pli.st.m**)

Όλες αυτές ιζηματογενείς σειρές αποτέθηκαν πάνω σε ένα υπόβαθρο από μεσοζωικούς γνευσίους, σχιστόλιθους, επιγνευσίους της Σερβομακεδονικής μάζας (**sch.gn**)



Εικόνα 3.2.1 Απόσπασμα από των γεωλογικό χάρτη, φύλλο Θεσσαλονίκη, κλίμακας 1:50000 (Ι.Γ.Μ.Ε.)
το κόκκινο σημείο υποδεικνύει το την θέση του τεμένους που έγιναν οι μετρήσεις

Το Τέμενος όπου έγιναν οι μετρήσεις όπως και όλα τα κτίσματα στο κέντρο της Θεσσαλονίκης είναι κτισμένα πάνω στις ολοκαινικές αποθέσεις που είναι αναμεμιγμένες με αδρανή υλικά κατασκευής οικιών και από τεχνικά έργα «μπάζα» που χρησίμευσαν για την οικοδόμηση της πόλης και από διάφορες επιχωματώσεις.

3.3 Συλλογή στοιχείων ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τομογραφίες στην επιφάνεια του εδάφους

Πραγματοποιήθηκαν τρεις ευθύγραμμες τομογραφίες στο δάπεδο του αιθρίου του Τζαμιού στις θέσεις που φαίνονται στην εικόνα (3.3.1), την 18η Μαρτίου 2009. Οι τομογραφίες αυτές διεξήχθησαν έτσι ώστε να τέμνουν το δάπεδο καλύπτοντας κατά το δυνατόν όλη την έκταση του αιθρίου. Η διασκόπηση σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τους παρακάτω παράγοντες:

- Αναμενόταν ότι η ειδική αντίσταση θα παρουσιάσει σχετικά μεγάλη πλευρική διαφοροποίηση, τουλάχιστον από κάποιο βάθος και κάτω, εφόσον σε όλη την περιοχή εντός της οχύρωσης της Θεσσαλονίκης αναμένεται η ύπαρξη θαμμένων αρχιτεκτονικών λειψάνων διαφόρων ιστορικών φάσεων. Από την άλλη μεριά, ο επιφανειακός γεωλογικός σχηματισμός στο χώρο έρευνας αναμενόταν σχετικά ομογενής, πράγμα που διαπιστώνεται εύκολα από τις υπάρχουσες γεωτρήσεις στο χώρο.
- Οι γεωηλεκτρικές τομογραφίες έπρεπε να διεξαχθούν χρησιμοποιώντας ειδικά ηλεκτρόδια «επαφής» γιατί δεν ήταν δυνατή η εισαγωγή μεταλλικών πασσάλων στο δάπεδο. Συνήθως, τα ηλεκτρόδια αυτά συνίστανται από μια μεταλλική πλάκα και κατάλληλη γέλη, η οποία αποκαθιστά την ηλεκτρική σύζευξη με το έδαφος. Εναλλακτικά, χρησιμοποιείται λάσπη μπεντονίτη με αλατόνερο. Αυτή η μη καταστροφική τεχνολογία είναι μια σχετικά νέα προσέγγιση στην εκπόνηση μελετών ειδικής αντίστασης (Athanassiou et al. 2007) έτσι, ώστε να αποφύγουμε την εισαγωγή μεταλλικών ηλεκτροδίων στο έδαφος. Έχει αποδειχθεί ότι η τεχνική αυτή εφαρμόζεται με επιτυχία σε επικαλυμμένους χώρους (π.χ. πλακόστρωτα), ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η ηλεκτρική σύζευξη με το έδαφος (π.χ. ασφαλτόστρωμα).

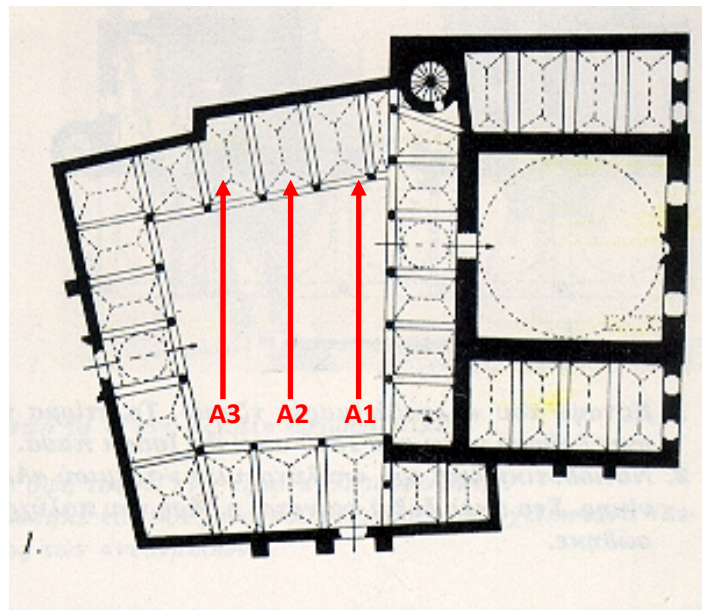
Με βάση τα παραπάνω, για να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή ποιότητα στις μετρήσεις επιλέχθηκε η διάταξη μέτρησης **διπόλου-διπόλου**, η οποία χαρακτηρίζεται από καλή σχέση σήματος προς θόρυβο και επαρκή διακριτική ικανότητα, τόσο στις πλευρικές, όσο και στις κατακόρυφες μεταβολές της υπεδάφειας αντίστασης.

Κατά την λήψη των μετρήσεων η απόσταση, **α** , μεταξύ του δίπολου ηλεκτρικού ρεύματος **AB** παραμένει σταθερή και η ίδια όδευση επαναλαμβάνεται αυξάνοντας κάθε φορά την απόσταση **$n\alpha$** μεταξύ του δίπολου δυναμικού **MN** (ο **n** είναι ακέραιος). Η μέγιστη απόσταση $n_{\max}$ $\times \alpha$ εξαρτάται από τη μέγιστη ένταση που μπορεί να δώσει η πηγή μας και από τη γεωλογία (γεωηλεκτρικές αντιστάσεις) της περιοχής σε συνάρτηση με το επιθυμητό βάθος έρευνας.

Οι παράμετροι στη συλλογή των δεδομένων που επιλέχθηκαν για τις τομογραφίες στο μνημείο είναι:

- ✓ Απόσταση των τριών γραμμών των ηλεκτροδίων είναι 4m
- ✓ Απόσταση ηλεκτροδίων $\alpha=0,5$ m.
- ✓ Άνοιγμα καλωδίου στην τομογραφία A1 είναι 11m και για τις τομογραφίες A2 και A3 είναι 11.5 m.

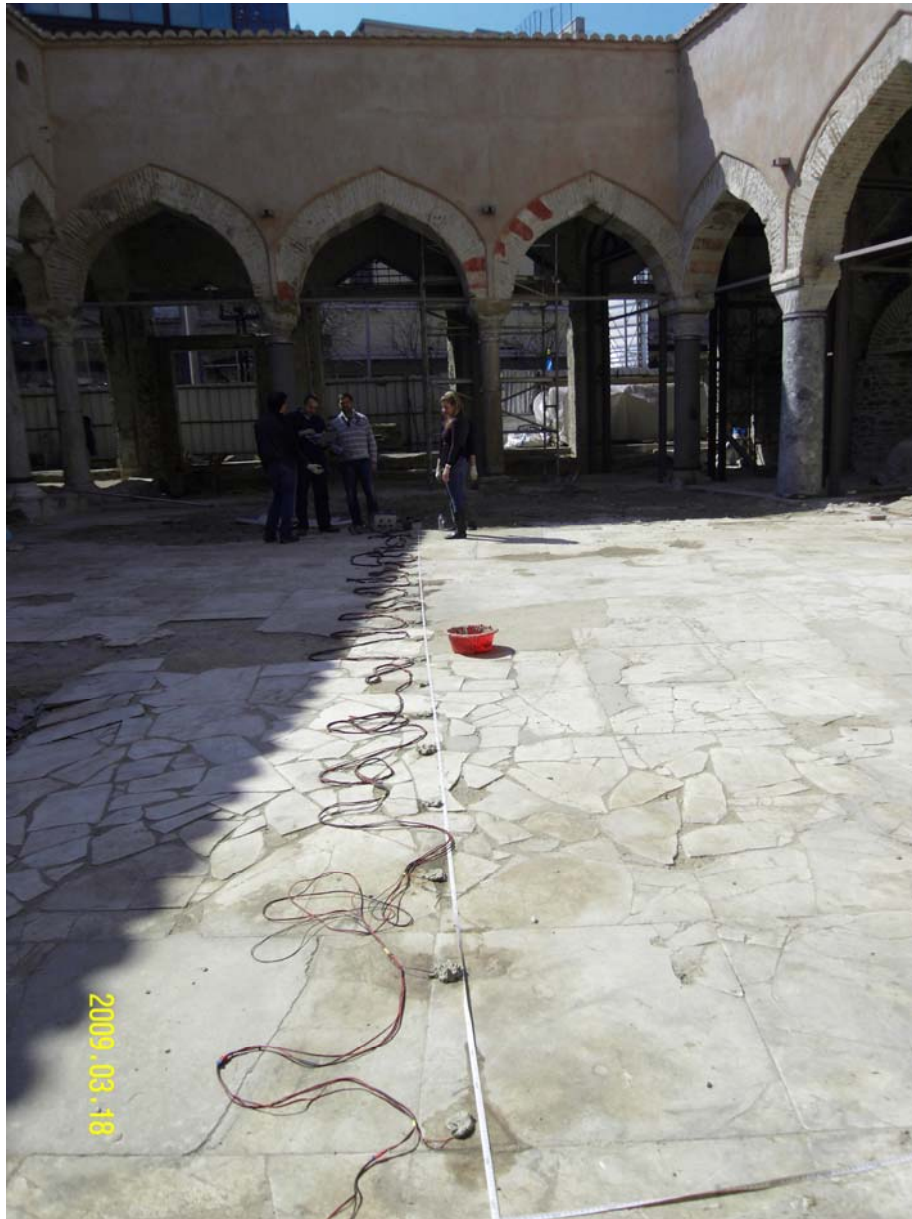
Οι εικόνες (3.3.2), (3.3.3) και (3.3.4) δείχνουν τις τρεις γραμμές των ηλεκτροδίων **A1**, **A2**, **A3** αντίστοιχα, κατά την πραγματοποίηση των τομογραφιών στο δάπεδο του αίθριου του μνημείου.



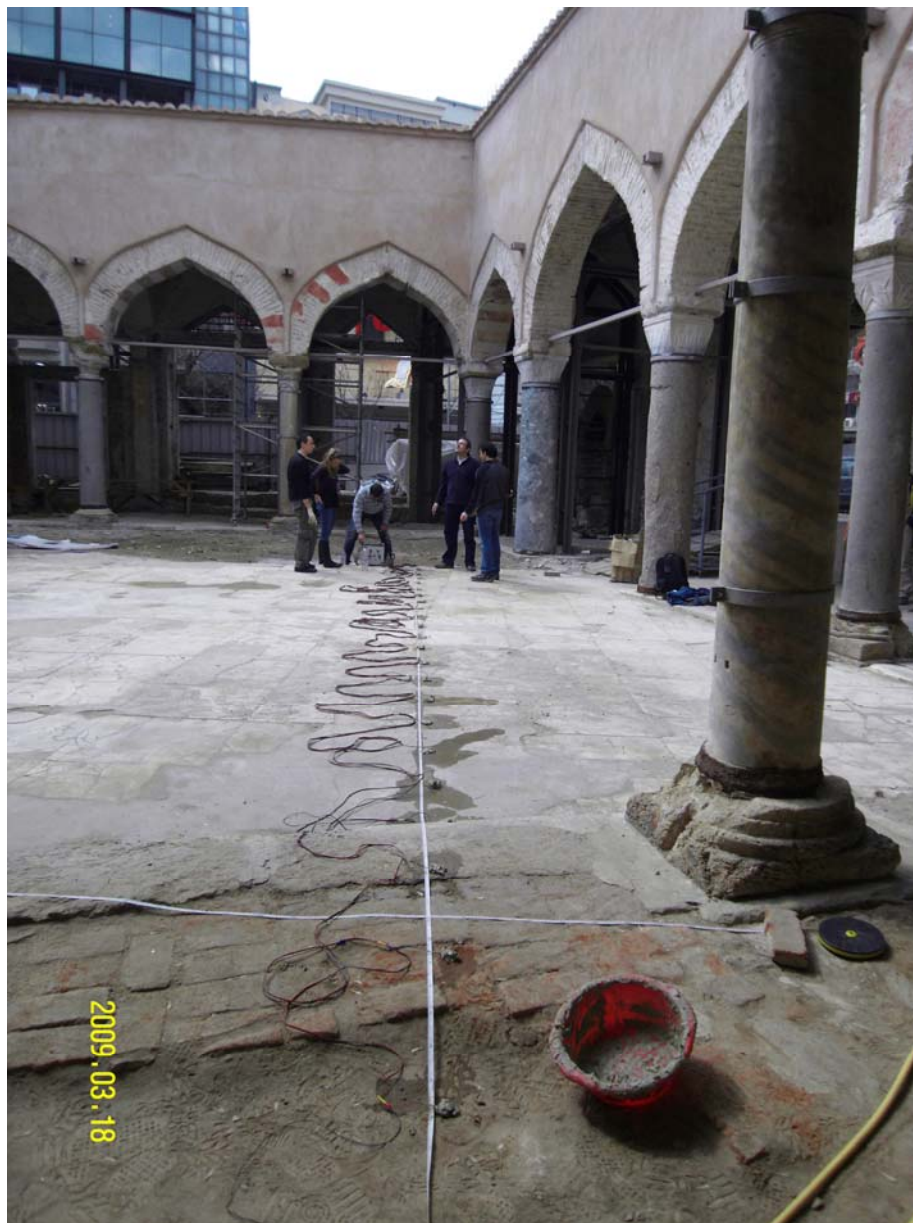
Εικόνα 3.3.1 Οι γραμμές των γεωφυσικών μετρήσεων (τομογραφιών), οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο αίθριο του Τζαμιού Χαμζα Μπέη, παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα. Το βέλος δηλώνει την κατεύθυνση κάθε τομογραφίας



Εικόνα 3.3.2 Η τομογραφία A1 που πραγματοποιήθηκε στο δάπεδο του αιθρίου Τζαμιού .



Εικόνα 3.3.3 Η τομογραφία A2 που πραγματοποιήθηκε στο δάπεδο του αιθρίου Τζαμιού .



Εικόνα 3.3.4 Η τομογραφία A3 που πραγματοποιήθηκε στο δάπεδο του αιθρίου Τζαμιού

3.4 Εξοπλισμός

Χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός ηλεκτρικής τομογραφίας του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Α.Π.Θ., ο οποίος είναι τελευταίας τεχνολογίας και παρέχει τη δυνατότητα πολυπλεξίας μεταξύ 48 ανεξάρτητων καναλιών (ηλεκτροδίων). Όμως, λόγω του περιορισμένου χώρου κάθε μια τομογραφία διεξήχθη χρησιμοποιώντας λιγότερα κανάλια (ηλεκτρόδια). Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε το όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης SYSCAL-PRO της εταιρείας IRIS Instruments και κατάλληλος ηλεκτρονικός πολυπλέκτης (εικόνα 3.4.1).

Πρόκειται για πλήρως αυτοματοποιημένο όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σχεδιασμένο για έρευνα με μεθόδους συνεχούς ρεύματος και αποτελεί την πλέον σύγχρονη τεχνολογία. Ο αυτοματοποιημένος έλεγχος της αντιστάθμισης του φυσικού δυναμικού, η ψηφιακή υπέρθεση για την ενίσχυση του σήματος και η προβολή του σφάλματος κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων που προσφέρονται από το συγκεκριμένο όργανο που εξασφαλίζουν μετρήσεις υψηλής ακρίβειας.

Έχει τη δυνατότητα σύγχρονης καταγραφής 10 διαφορών δυναμικού καθιστώντας ταχύτατη τη διαδικασία μέτρησης. Το συγκεκριμένο όργανο έχει μέγιστη τάση εξόδου 800 V και επιτυγχάνει τη δημιουργία ρεύματος με ένταση που τυπικά ξεπερνάει τα 1000 mA, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις επιτρέπει και σημαντικά μεγαλύτερες εντάσεις ηλεκτρικού ρεύματος (έως 1500mA). Για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο πολύκλωνο καλώδιο 24 παροχών, κατασκευής του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής Α.Π.Θ. καθώς και ηλεκτρόδια επαφής από λάσπη μπεντονίτη και αλατόνερο (εικόνα 3.4.2).



Εικόνα 3.4.1 Όργανο λήψης ηλεκτρικών μετρήσεων



Εικόνα 3.4.2 Το όργανο και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν, φαίνονται και τα ηλεκτρόδια επαφής με το μίγμα μπεντονίτη.



Εικόνα 3.4.3 Μέλη του συνεργείου κατά την πραγματοποίηση των ευθυγράμμων τομογραφιών.

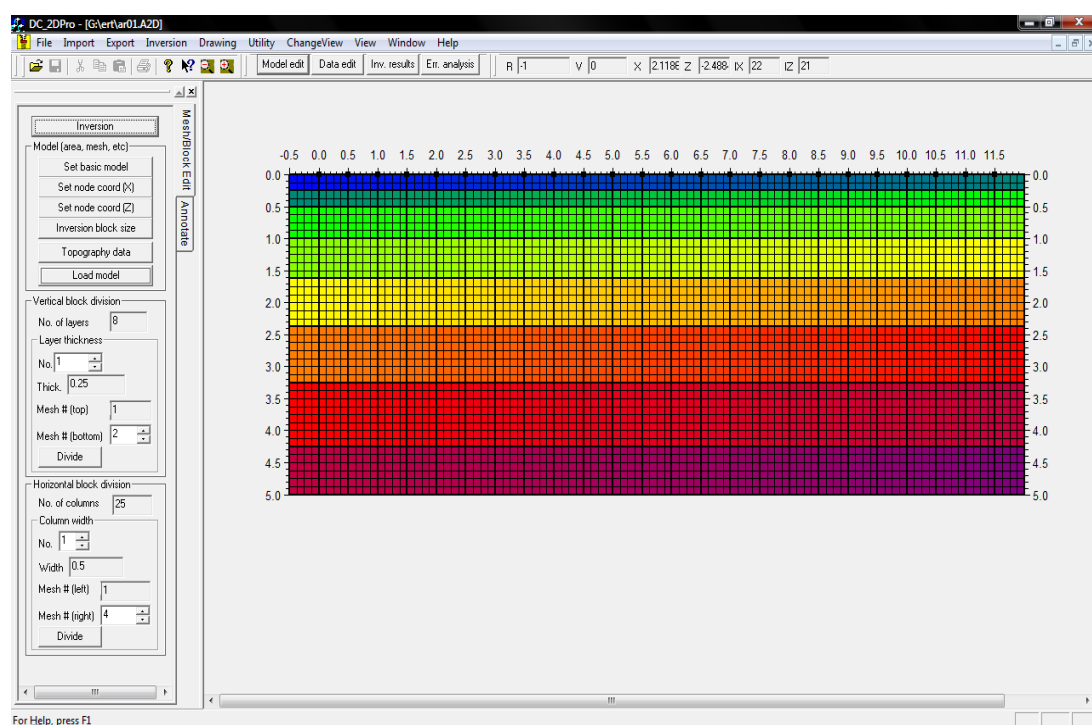
4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 Επεξεργασία των δεδομένων των τομογραφιών

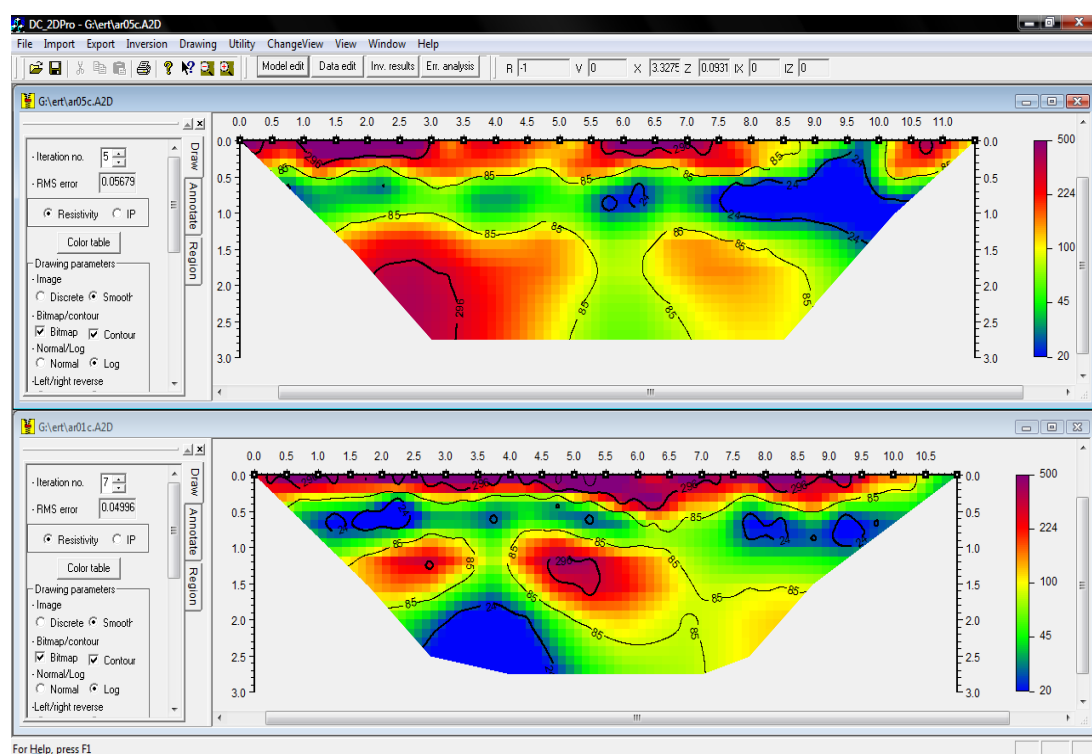
Μετά το τέλος των μετρήσεων από την περιοχή έρευνας του μνημείου όλες οι μετρηθείσες τομές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης υποβλήθηκαν σε διδιάστατη αντιστροφή. Χρησιμοποιήθηκε στο αρχικό στάδιο επεξεργασίας το πρόγραμμα RES2DINV του Dr. M. Loke αλλά κατά κύριο λόγο χρησιμοποιήθηκε στην επεξεργασία των δεδομένων το πρόγραμμα **DC-2DPRO** του Dr. Jung-Ho KIM (2008), διευθυντή Γεωφυσικής του Ινστιτούτου KIGAM της Ν. Κορέας. Αυτού του προγράμματος τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία. Πρόκειται για αλγόριθμο που εκτελεί κανονικοποιημένη μη γραμμική διδιάστατη αντιστροφή γεωηλεκτρικών δεδομένων. Ο αλγόριθμος είναι επαναληπτικός και σε κάθε επανάληψη χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να επιλύσει το ευθύ πρόβλημα. Στην εικόνα (4.1.1) παρουσιάζεται το περιβάλλον εργασίας του προγράμματος **DC-2DPRO**.

Όλες οι αντιστροφές είχαν μικρό σφάλμα RMS (περίπου από 5% έως 7%) παρά το γεγονός ότι η υπεδάφια κατάσταση της περιοχής είναι σχετικά περίπλοκη. Τα αποτελέσματα της αντιστροφής, που παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες της εργασίας αυτής, απεικονίζουν αποτελεσματικά την «πραγματική» ειδική αντίσταση του υπεδάφους. Ένα μικρό ποσοστό των μετρήσεων απορρίφθηκε στο στάδιο της αρχικής επεξεργασίας λόγω του μεγάλου θορύβου που εμφάνιζαν.

Εφαρμογή ηλεκτρικής τομογραφίας με ηλεκτρόδια επαφής



a



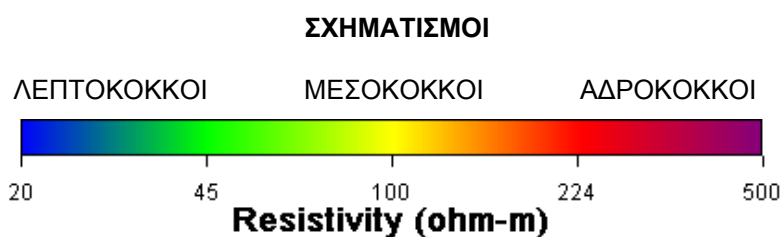
b

Εικόνα 4.1.1 Περιβάλλον εργασίας προγράμματος DC-2DPRO **a.** Κατά το αρχικό στάδιο επεξεργασίας, **b.** Κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων

4.2 Αποτελέσματα και ερμηνεία των τομογραφιών

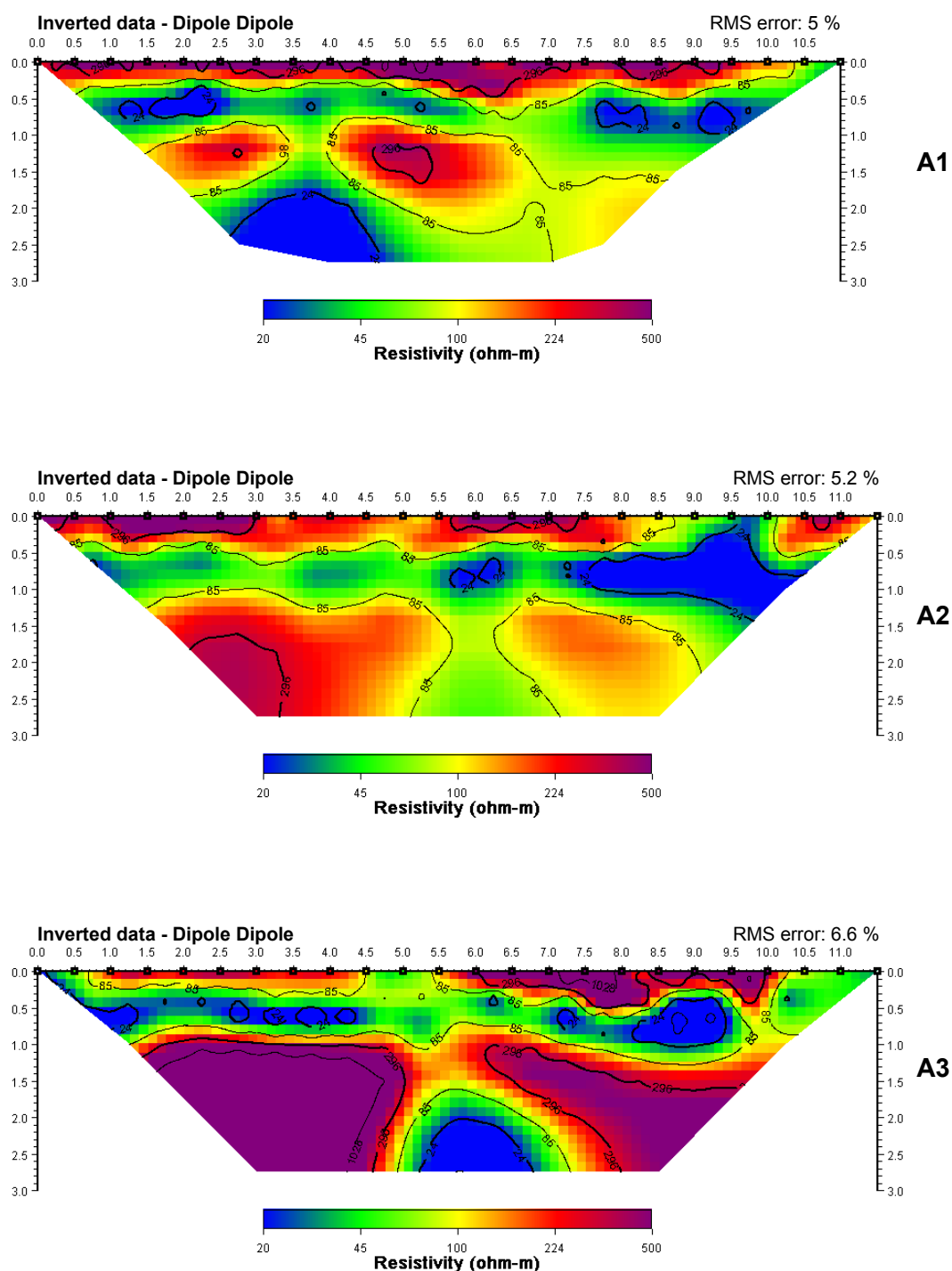
Η εξέταση των αποτελεσμάτων από όλες τις γεωφυσικές τομές δείχνει μία διαφοροποίηση στις αντιστάσεις των σχηματισμών που σχετίζονται με την στρωματογραφική ακολουθία της περιοχής έρευνας.

Στις τομές που παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα αποτυπώνονται τα πραγματικά βάθη και οι πραγματικές υπεδάφειες αντιστάσεις οι οποίες και παρουσιάζονται με χρωματική κλίμακα (εικόνα 4.2.1) με τα μπλε-πράσινα χρώματα να αντιστοιχούν σε χαμηλές αντιστάσεις (λεπτόκοκκοι σχηματισμοί π.χ. άργιλοι-ιλύες) και κόκκινα-μόβ χρώματα να αντιστοιχούν σε σχετικά υψηλές αντιστάσεις (πιο αδρόκοκκοι σχηματισμοί, επιχρωματώσεις π.χ. άμμοι, χαλίκια και διάφορα αταξινόμητα υλικά προσχώσεων).

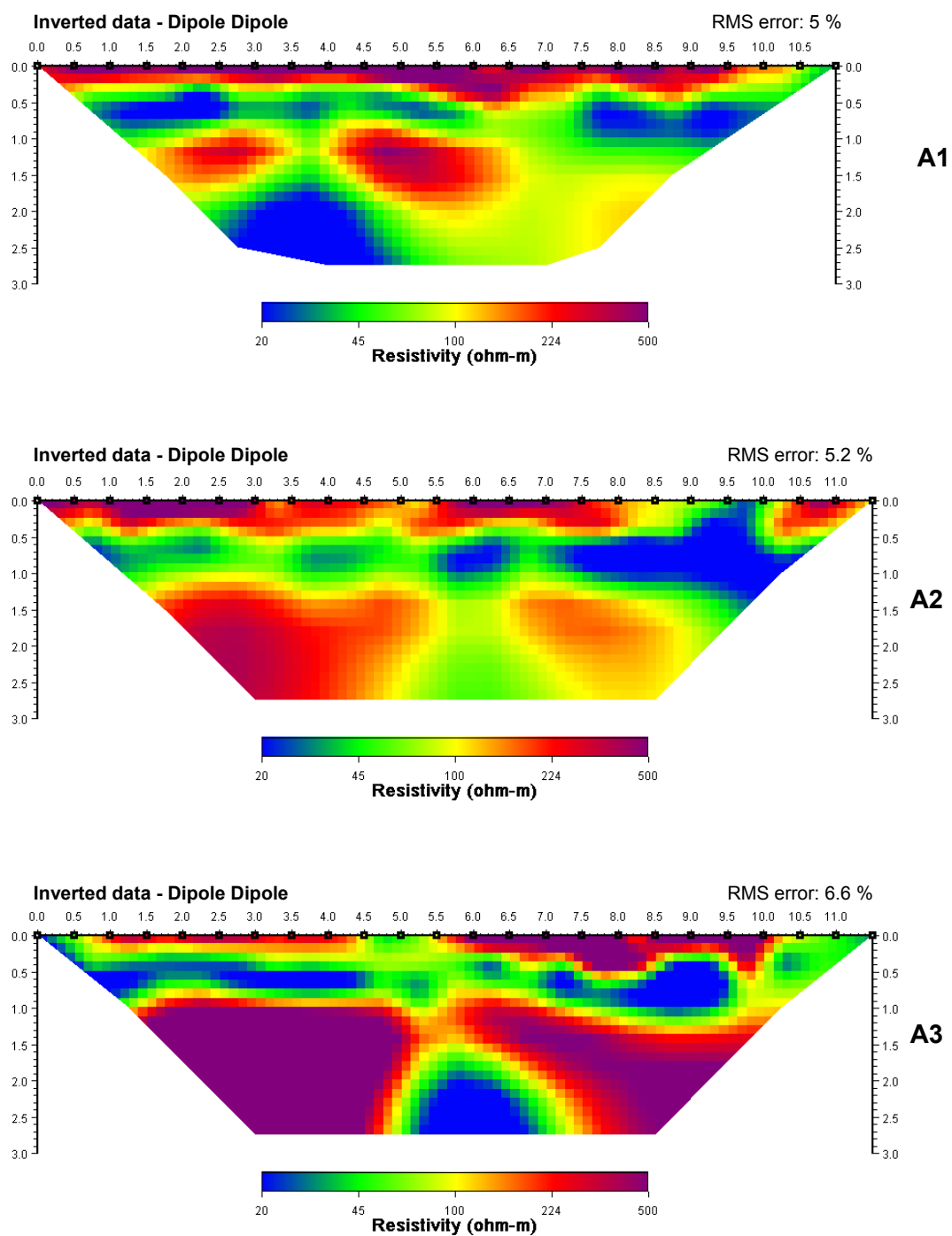


Εικόνα 4.2.1 Χρωματική κλίμακα ειδικών αντιστάσεων

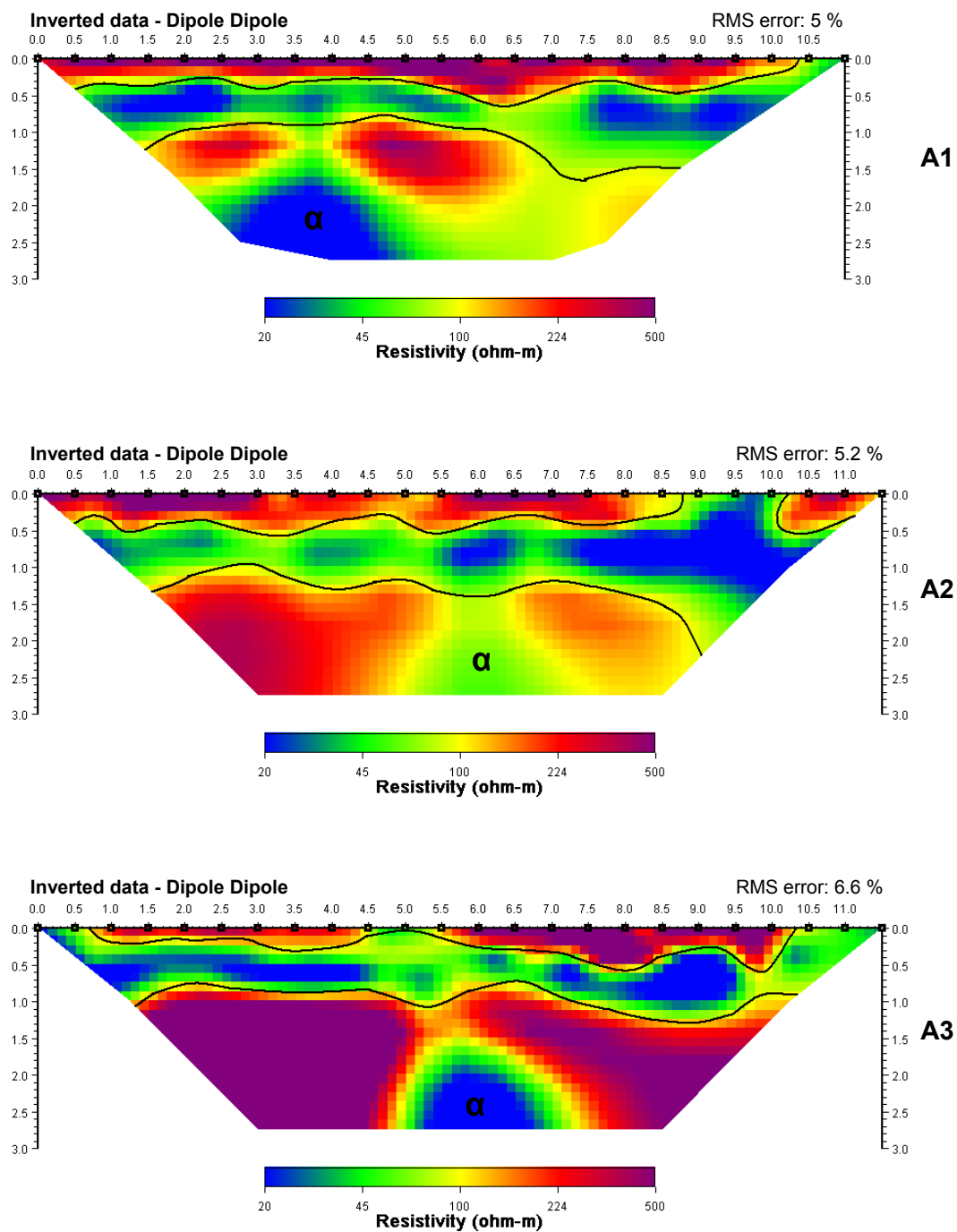
Τα αποτελέσματα της αντιστροφής των τομών **A1**, **A2**, **A3** για τα δεδομένα που ελήφθησαν με τη διάταξη διπόλου-διπόλου παρουσιάζονται αντίστοιχα στις εικόνες (4.2.2), (4.2.3) και (4.2.4). Η ακριβής θέση στο έδαφος των τομογραφιών αυτών φαίνεται στο σχήμα (3.3.1), το οποίο παρουσιάστηκε προηγούμενα.



Εικόνα 4.2.2 Το αποτέλεσμα της αντιστροφής για τα δεδομένα των τομογραφιών A1, A2 και A3. Η εικόνα δείχνει την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά μήκος των τομογραφιών και με την μορφή γραμμών ίσης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



Εικόνα 4.2.3 Το αποτέλεσμα της αντιστροφής για τα δεδομένα των τομογραφιών A1, A2 και A3. Η εικόνα δείχνει την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά μήκος των τομογραφιών.



Εικόνα 4.2.4 Το αποτέλεσμα της αντιστροφής για τα δεδομένα των τομογραφιών A1, A2 και A3. Η εικόνα δείχνει την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά μήκος των τομογραφιών. Με την βοήθεια των γραμμών που έχουν χαραχτεί διακρίνονται τα στρώματα με διαφορετική ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Επίσης το γράμμα α δείχνει την περιοχή χαμηλής αντίστασης μέσα στο αντιστατικό σχηματισμό.

Διαπιστώνεται ότι και οι τρεις τομογραφίες που διενεργήθηκαν στο αίθριο του τεμένους Χαμζά Μπέη (ΑΛΚΑΖΑΡ) παρουσιάζουν παρόμοια λιθολογική και είναι ενδεικτική οριζόντιας στρωματογραφίας.

Σε όλες τις τομές εμφανίζεται από την επιφάνεια και σε βάθος μέχρι τα 0,5 μέτρα στρώμα με υψηλές αντιστάσεις (πολύ μεγαλύτερες των 90 Ohm-m) που οφείλονται στο πλακόστρωτο του αιθρίου και σε πιθανόν κάποιες επιχωματώσεις που έγιναν κατά την κατασκευή του. Ο σχηματισμός παρουσιάζεται στις τομές A1, A2 και A3 ομογενής.

Κάτω από αυτό το πρώτο στρώμα υψηλής αντίστασης, σε βάθος από τα 0,5 μέτρα μέχρι περίπου 1-1,5 μέτρα ακολουθεί σχηματισμός χαμηλών αντιστάσεων (μικρότερες των 80 Ohm-m περίπου 10-24 Ohm-m) που οφείλετε σε λεπτόκοκκο αργιλοαμμούχο σχηματισμό. Το στρώμα αυτό παρουσιάζεται ιδιαίτερα ομογενές και στις τρεις τομές.

Αμέσως μετά από το βάθος των 1-1,5 μέτρων μέχρι και το μέγιστο βάθος διασκόπησης (περίπου 3 m) παρουσιάζεται αντιστατικός σχηματισμός, με σχετικά μεγάλες αντιστάσεις (μεγαλύτερες των 85-100 Ohm-m) ενδεικτικό περιεκτικότητας σε πιο αδρόκοκκα υλικά με την παρουσία άμμου και αργίλου. Ο σχηματισμός αυτός είναι κατά τόπο ανομοιογενής. Και στις τρεις τομές, σε βάθος περίπου 1,6-1,7m, παρουσιάζεται περιοχή με ιδιαίτερα χαμηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση (στην εικόνα 4.2.4 παρουσιάζονται με το γράμμα α) η οποία πιθανά μπορεί να οφείλεται σε πλευρικές διαφορές στην επίχωση. Στην τομή A1 η περιοχή αυτή συναντάτε στο βάθος αυτό και σε απόσταση, από την αρχή της γραμμής τομογραφίας, περίπου από 2,5-4,5 m, ενώ στις τομές A2 και A3 αντίστοιχα εμφανίζεται σε απόσταση περίπου από 5-7 m.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που εντοπίστηκε στον κατώτερο σχηματισμό είναι ότι από την πρώτη τομογραφία (**A1**) που έγινε στο 1 m μέχρι την τρίτη (**A3**) στα 9 m αυξάνει η ειδική ηλεκτρική αντίσταση και η μετάβαση είναι σταδιακή. Η τιμή της αντίστασης στην τρίτη τομογραφία είναι μεγαλύτερη, όπως φαίνετε και στις εικόνες (4.2.2), (4.2.3) και (4.2.4), από την πρώτη τομογραφία. Παρόλο αυτά το εύρος των αντιστάσεων είναι στα πλαίσια του λογικού για να καθοριστεί αυτός, σαν ένας σχηματισμός.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η γεωφυσική έρευνα έγινε στο αίθριο του Τεμένους Χαμζά Μπέη (κινηματογράφος Αλκαζάρ) με την εφαρμογή της μεθόδου Ηλεκτρικής Τομογραφίας και την χρήση ηλεκτροδίων επαφής με τα οποία:

- Οι εικόνες που λαμβάνουμε είναι παρόμοιες με αυτές που λαμβάνουμε με τη χρήση κανονικών ηλεκτροδίων. Επιπλέον, τα ηλεκτρόδια επαφής μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν σε όλες τις επιφάνειες, στις οποίες δε γίνεται να καρφωθούν τα κανονικά ηλεκτρόδια δίνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα.
- Μέχρι στιγμής, η άσφαλτος είναι η μόνη επιφάνεια στην οποία τα ηλεκτρόδια επαφής δεν μπορούν να δώσουν αξιόπιστες μετρήσεις. Αυτό συμβαίνει λόγω των πολύ μεγάλων αντιστάσεων επαφής που δημιουργεί η άσφαλτος.

Στόχος της έρευνας ήταν η μελέτη της γεωλογικής δομής κάτω από το αίθριο του μνημείου. Τα αποτελέσματα της ερμηνείας των δεδομένων αυτής της μεθόδου μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Στην περιοχή παρουσιάζεται διαφοροποίηση των αντιστάσεων πρακτικά μόνο με το βάθος, με χαρακτηριστική οριζόντια στρωματογραφία που είναι συστηματική σε όλες τις τομές που μετρήθηκαν
- Η λιθολογία κάτω από την περιοχή μελέτης σύμφωνα με τις τομογραφίες είναι παρόμοια.
- Η ρηχότερη επιφάνεια πιθανόν είναι το παλιό δάπεδο, ίσως και κάποια υλικά επιχωματώσεων και η βαθύτερη, η διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ αργιλικού στρώματος και υποκείμενου χαλαρού αδρόκοκκου σχηματισμού, πιθανόν ένα κροκαλοπαγές με υλικά προσχώσεων.

- Η ανομοιογένεια του κατώτερου αντιστατικού σχηματισμού της περιοχής, που εντοπίζεται στις τομογραφίες, οφείλεται στην παρουσία χώρων με τελείως διαφορετική ηλεκτρική αντίσταση που πιθανόν παρουσιάζονται εξαιτίας της διαφοράς στην επίχωση.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Στην Ελληνική γλώσσα

Παπαζάχος Β. Κ. (1986). Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 322 σελ.

Τσόκας Γ., Τσούρλος Π., Βαργεμέζης Γ., Σταμπολίδης Α., Αθανασίου Ε., Σιμυρδάνης Κ., Καραούλης Μ., Μπογιατζής Π., (2007). ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΤΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΜΝΗΜΕΙΟΥ ΧΑΜΖΑ ΜΠΕΗ (ΑΛΚΑΖΑΡ) ΣΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΒΕΝΙΖΕΛΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΔΑΠΕΔΟΥ ΤΟΥ. Έκθεση

Στην Αγγλική γλώσσα

Athanasίου, E.N., Tsourlos, P.I., Vargemezis, G.N., Papazachos, C.B. and Tsokas, G.N., 2007. Nondestructive DC resistivity surveying using flat base electrodes. Journal of Applied Geophysics (in press).

Tsourlos, P., 1995. Modeling, interpretation and inversion of multielectrode resistivity survey data. Thesis, University of York, U.K.