

**ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ: ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΘΕΜΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΒΑΘΜΙΑΙΑΣ
ΑΥΞΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΙΕΡΑΠΕΤΡΑΣ ΚΡΗΤΗΣ!**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΗΛΙΑΣ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΦΛΟΥΡΗΣ
ΓΙΑΝΝΗΣ ΔΙΔΙΚΑΣ**

ΜΑΡΤΙΟΣ 2012

TECHNOLOGICAL INSTITUTE OF CRETE
Department of Natural Resources and environment
Laboratory of Geophysics and Seismology

DISSERTATION TOPIC:
ANALYSIS OF ELECTRIC TOMOGRAPHY
MEASUREMENT WITH GRADIENT METHOD IN THE
REGION OF IERAPETRA!

SUPERVISING PROFESSOR: PAPADOPOYLOS ILIAS

STUDENTS: PANAGIOTIS FLOURIS
GIANNIS DIDIKAS

MARCH 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ :

Ευχαριστούμε κυρίως τον κύριο Ηλία Παπαδόπουλο για την μεγάλη βοήθεια που μας προσέφερε για το πέρας της πτυχιακής μας εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η παρουσίαση της επεξεργασίας των γεωφυσικών αποτελεσμάτων από μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας με τη βαθμιαία μέθοδο μέσω του προγράμματος της γεωφυσικής Res2dinv. Οι μετρήσεις αυτές πάρθηκαν στην περιοχή της Ιεράπετρας με τη μέθοδο πόλου διπόλου όπως αναφέραμε και πιο πάνω.

CREDITS:

Many Thanks especially to Mr. ilias Papadopoulos for the great help He offer to our end of the thesis work.

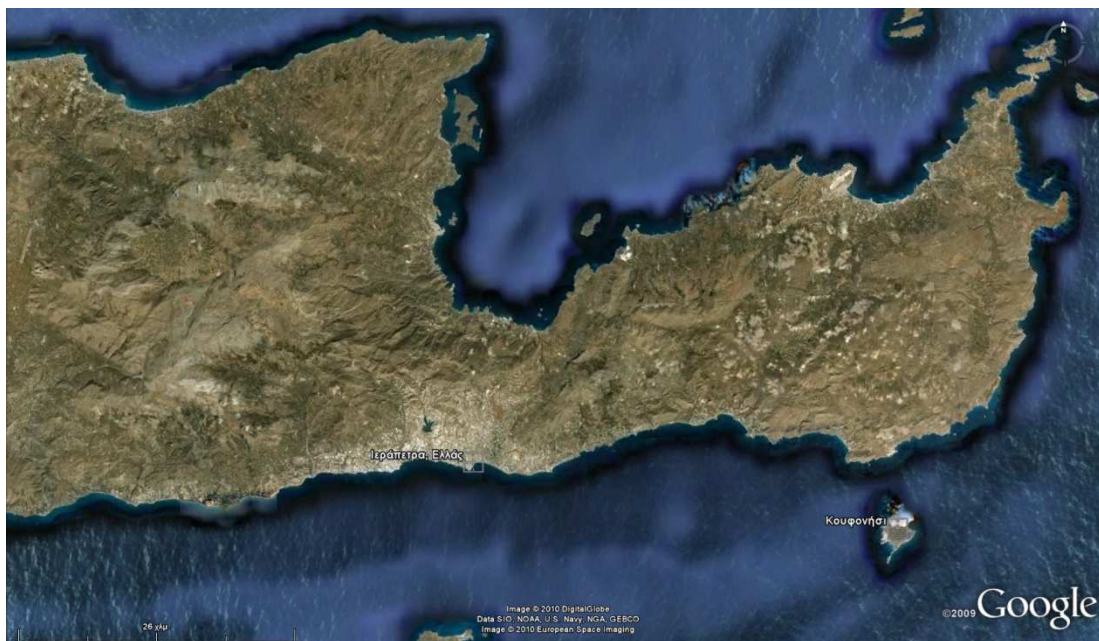
ABSTRACT:

The purpose of this paper is to present the processing results of the measurements we got the pole-dipole method via the program of geophysical Res2dinv. These measurements were taken in the area of Ierapetra, the method of pole-dipole, and as mentioned above.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωφυσική έρευνα για την χαρτογράφηση του χώρου που εικάζεται ότι βρίσκεται το αρχαίο αμφιθέατρο της Ιεράπετρας (Εικόνα 1.2.) στο Νομό Λασιθίου (Εικόνα 1.1.) πραγματοποιήθηκε μέσω της προγραμματικής σύμβασης που υπογράφηκε μεταξύ του Δήμου Ιεράπετρας και του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας. Σε σημαντικό βαθμό η μελέτη αυτή αποτελεί συνέχεια των γεωφυσικών ερευνών που είχαν πραγματοποιηθεί στο μικρό θέατρο της Ιεράπετρας τον Μάρτιο του 2010 και έρχεται να συμπληρώσει τη γνώση σχετικά με τους χώρους θέασης που υπήρχαν στην περιοχή της Ιεράπετρας κατά την αρχαιότητα.

Οι έρευνες χρηματοδοτήθηκαν από τον Δήμο Ιεράπετρας και πραγματοποιήθηκαν με την υποστήριξη του Υπουργείου Πολιτισμού (Αρχαιολογική Εφορεία Λασιθίου). Στόχος των ερευνών ήταν η διερεύνηση του υπεδάφους που υποστηρίζεται ότι βρίσκεται το αρχαίο αμφιθέατρο της Ιεράπετρας για τον εντοπισμό και την ανάδειξη των αρχιτεκτονικών λειψάνων και μελών αυτού.



Εικόνα 1.1. Η ευρύτερη περιοχή του Νομού Λασιθίου της Κρήτης στην οποία διακρίνεται η Ιεράπετρα και το Κουφονήσι (από δορυφορικές εικόνες του Google Earth).

Στην περιοχή οι γεωφυσικές έρευνες πραγματοποιήθηκαν με τις μεθόδους του γεωραντάρ, των μαγνητικών μετρήσεων και της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι τεχνικές έδωσαν έμφαση στην λεπτομερή χαρτογράφηση του χώρου (δειγματοληψία 50cm για τις μαγνητικές διασκοπήσεις, 1m και την ηλεκτρική τομογραφία (ERT) κατά μήκος τομών που απείχαν 1 m μεταξύ τους, 5cm κατά μήκος των οδεύσεων του γεωραντάρ που απείχαν 50cm μεταξύ τους).



Εικόνα 1.2. Η ευρύτερη περιοχή της πόλης της Ιεράπετρας όπου διακρίνεται η περιοχή που πραγματοποιήθηκαν οι γεωφυσικές διασκοπήσεις στα ανατολικά της πόλης (από δορυφορικές εικόνες του Google Earth).

Η γεωφυσική χαρτογράφηση της περιοχής πραγματοποιήθηκε κατά την διάρκεια 23-26 Σεπτεμβρίου 2010 από το Εργαστήριο Γεωφυσικής – Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και Αρχαιοπεριβάλλοντος του Ινστιτούτου Μεσογειακών Σπουδών (Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας) υπό την καθοδήγηση του Δρ. Α. Σαρρή και Δρ. Ν. Παπαδόπουλου και την υποστήριξη της ΚΔ' Ε.Π.Κ.Α. Λασιθίου. Ο Αντιδήμαρχος Ιεράπετρας κ. Μαρκόπουλος Μανώλης, και η Προϊσταμένη της ΚΓ' Ε.Π.Κ.Α. κα. Αποστολάκου Βίκυ προσέφεραν πολύτιμη υποστήριξη για την υλοποίηση του έργου. Στις γεωφυσικές έρευνες διερευνήθηκε συνολική έκταση 3.000 τετραγωνικών μέτρων και συμμετείχαν οι παρακάτω ερευνητές:

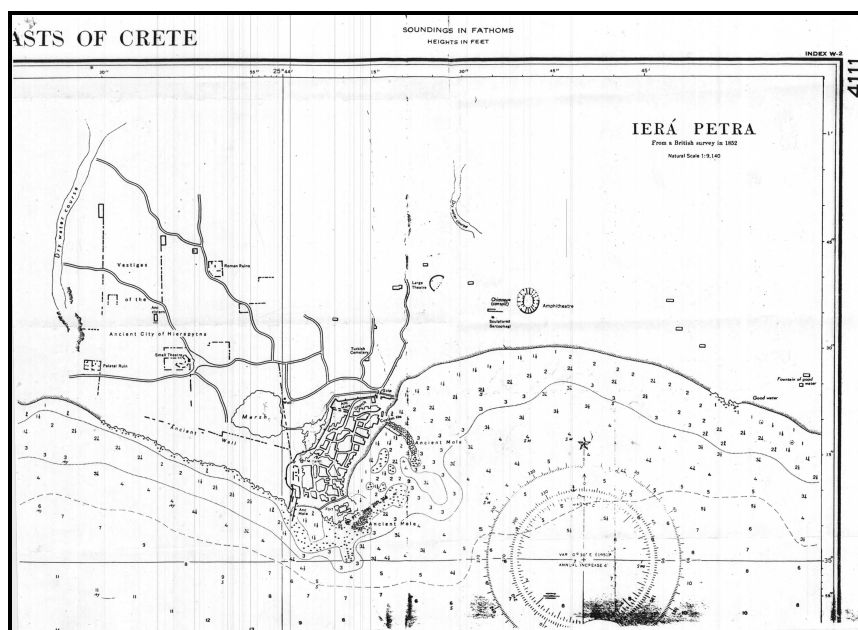
Δρ. Απόστολος Σαρρής	Διευθυντής Ερευνών, Επ. Υπ. Εργαστηρίου Γεωφυσικής-Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και Αρχαιοπεριβάλλοντος, Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών – ΙΜΣ/ΙΓΕ.
Δρ. Νίκος Παπαδόπουλος	Δόκιμος Ερευνητής Εργαστήριο Γεωφυσικής-Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και Αρχαιοπεριβάλλοντος, Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών – ΙΜΣ/ΙΓΕ.
Maria Cristina Salvi	Υποψήφια διδάκτωρ του πανεπιστημίου «University of Ferrara» της Ιταλίας
Sylviane Déderix	Υποψήφια διδάκτωρ του πανεπιστημίου «Université Catholique de Louvain» του Βελγίου

Ο Αρχαιολογικός Χώρος στην Ιεράπετρα

Η σύγχρονη πόλη της Ιεράπετρας (Εικ. 1.2) βρίσκεται στη θέση της αρχαίας Ιεράπυτνας, μιας από τις πιο σημαντικές πόλεις της Κρήτης. Η αρχαία πόλη ήταν αρχικά γνωστή ως Σύρμπα, μετά Πύτνα, μετά Καμίρο και μετά ως Ιεράπυτνα. Κατασκευάστηκε στα πρότυπα της Αλεξάνδρειας έχοντας απέναντί της ένα μικρό νησί. Η πόλη επέκτεινε την κυριαρχία της με αποτέλεσμα τον 2ο αι. π.Χ. να ελέγχει σχεδόν ολόκληρη την νότια ακτή της κεντρικής και ανατολικής Κρήτης. Το 146 π.Χ., η Ιεράπετρα υπερίσχυσε έναντι της Πραισού την οποία κατέλαβε αλλά κληρονόμησε τις διαμάχες της τελευταίας με την Ίτανο. Η Ιεράπετρα κατάφερε να αντισταθεί στη ρωμαϊκή κυριαρχία, στην οποία τελικά υπέκυψε το 66 π.Χ. Κατά τη διάρκεια της ρωμαϊκής κυριαρχίας κατασκευάστηκαν αρκετά δημόσια κτίρια (ναοί, θερμές, υδραγωγεία, ένα αμφιθέατρο και δύο μεγάλα θέατρα) των οποίων ίχνη δε σώζονται σήμερα. Η πόλη διατήρησε τη σπουδαιότητά της ως την Παλαιοχριστιανική περίοδο και καταστράφηκε το 824 μ.Χ. από Σαρακηνούς (Παπαδάκης 1982, Σπυριδάκης 1990). Η σύγχρονη πόλη καταστράφηκε από ένα καταστροφικό σεισμό το 1508.

Ο Onorio Belli, που περιηγήθηκε στην Ιεράπετρα τα τέλη του 16^{ου} αιώνα (Σπανάκης 1977), αναφέρει ότι στην Ιεράπετρα υπήρχαν δύο θέατρα, ένα μικρό και ένα μεγαλύτερο, ναυμαχία, ναοί, θερμά λουτρά και ένα αμφιθέατρο στην ανατολική πλευρά της πόλης. Η ναυμαχία συνιστούσε μία θαλάσσια λεκάνη όπου γινόταν αναπαράσταση της ναυμαχίας στην οποία χρησιμοποιούσαν καταδίκους ή δούλους.

Για την κατασκευή του αμφιθεάτρου, πλάνο του οποίου είχε σχεδιάσει ο Onorio Belli αλλά δυστυχώς έχει σήμερα καταστραφεί, πραγματοποιήθηκε εκσκαφή μεταξύ δύο μικρών λόφων. Για την ολοκλήρωση του κοίλου μέρους κατασκευάστηκαν σε κάθε άκρο έξι λίθινοι τοίχοι αντιστήριξης χωρίς διακόσμηση, μεταξύ των οποίων βρίσκονταν οι σκάλες. Ο άγγλος ναύαρχος Th. Spratt κατασκεύασε ένα χάρτη της ευρύτερης περιοχής της Ιεράπετρας στον οποίο αποτυπώνονται οι θέσεις των θεάτρων αλλά και του αμφιθεάτρου (Εικ. 1.3).



Εικόνα 1.3. Χάρτης της Ιεράπετρας κατά το έτος 1852 όπως κατασκευάστηκε από τον άγγλο ναύαρχο Th. Spratt.

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις στην Ιεράπετρα, πραγματοποιήθηκαν σε ιδιοκτησία του δήμου περίπου 1000m ανατολικά του κέντρου της πόλης στη βόρεια πλευρά της λεωφόρου Ιεράπετρας-Σητείας. Η περιοχή απέχει απόσταση 100 περίπου μέτρων σε ευθεία γραμμή από την παραλία στα νότια (Εικ. 1.4, 1.5).






Εικόνα 1.4. Δορυφορική εικόνα (Google Earth) της περιοχής ενδιαφέροντος στην Ιεράπετρα.




Εικόνα 1.5. Λεπτομέρειες την περιοχή που πραγματοποιήθηκαν οι γεωφυσικές διασκοπήσεις και από τα εμφανή στην επιφάνεια αρχιτεκτονικά μέλη στην περιοχή του αμφιθεάτρου της Ιεράπετρας

2. ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ

Τα παρακάτω όργανα και μεθοδολογίες εφαρμόστηκαν για την γεωφυσική διασκόπηση των περιοχών στο Κουφονήσι και την Ιεράπετρα:

	Μέθοδος	Όργανο	Βάθος Διασκόπησης Δειγματοληψία	
1.	Μαγνητικές μετρήσεις	Bartington Fluxgate Gradiometer G601	2-3m $\Delta x = \Delta y = 0.5 \text{ m}$	
2.	Μέθοδος Γεωραντάρ	Noggin Plus-Smart Cart με τις κεραίες συχνότητας των 250 MHz	3-4m $\Delta x = 0.5 \text{ m}$ $\Delta y = 0.05 \text{ m}$	 

	<p>3. Ηλεκτρική τομογραφία</p>	<p>Syscal Pro μαζί με τον πολυπλέκτη SWITCH Pro 96 της εταιρείας IRIS Instruments.</p> <p>Χρήση ηλεκτροδίων επαφής από μπεντονίτη</p>	<p>6-7 m</p> <p>$\Delta x = \Delta y = 1 \text{ m}$</p>	   
--	--------------------------------	---	--	--

4.	GPS	LEICA GS20	Ακρίβεια <1 m	



3. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Κατά τη διάρκεια των γεωφυσικών ερευνών στην Ιεράπετρα εφαρμόστηκαν μαγνητικές μέθοδοι, τεχνικές ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ. Οι παραπάνω γεωφυσικές τεχνικές επιλέχθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες για την επίτευξη των στόχων της έρευνας και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Ο συνδυασμός των τεχνικών βελτιστοποίησε τα αποτελέσματα της έρευνας.

Μία σύντομη ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών και δυνατοτήτων της κάθε τεχνικής δίνεται στις επόμενες παραγράφους.

3.1. Γενικά στοιχεία για την μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αποτελεί μία από τις γεωφυσικές τεχνικές που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην διασκόπηση και στον εντοπισμό “ρηχών δομών”. Η μέθοδος αυτή είναι επίσης γνωστή και ως “μέθοδος συνεχούς ρεύματος”. Σκοπός της μεθόδου αποτελεί ο καθορισμός της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, δηλαδή της γεωηλεκτρικής δομής αυτού, πραγματοποιώντας μετρήσεις είτε στην επιφάνεια της Γης είτε μέσα σε αυτή, σε γεωτρήσεις.

Βασίζεται στη μελέτη του τρόπου διάδοσης του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος με μετρήσεις που γίνονται στην επιφάνεια ή σε γεωτρήσεις και χρησιμοποιούνται με σκοπό το διαχωρισμό στόχων με διαφορετική ηλεκτρική αντίσταση (Nishimura 2001: 544). Στις ηλεκτρικές διασκοπήσεις, οι «ανωμαλίες» ορίζονται ως οι μεταβολές του ηλεκτρικού πεδίου ή της πυκνότητας του ρεύματος, οι οποίες οφείλονται σε διαταραχές εξ’ αιτίας στόχων με διαφορετική αντίσταση (ή αγωγιμότητα) από το περιβάλλον έδαφος (Σαρρής 2008, Sarris 1992: 17). Συνεπώς, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι για τις γεωηλεκτρικές αρχαιολογικές διασκοπήσεις πιθανοί στόχοι αποτελούν τόσο οι αρχιτεκτονικές δομές (π.χ. τοίχοι, τάφοι πληρωμένοι με αέρα, θεμέλια οικιών, κ.α.), όσο και τάφοι πληρωμένοι με εδαφικό υλικό, τα οποία παρουσιάζουν ισχυρό σήμα και εγγράφονται ως ισχυρές αντιστάσεις. Τάφοι, επίσης με συσσωρεύσεις οργανικού υλικού και αγωγιμα εδάφη, παρουσιάζουν συχνά ασθενές σήμα και εγγράφονται ως ασθενείς αντιστάσεις (Clark 1990: 37). Επιπλέον, δάπεδα οικιών ή άλλες συμπίεσμένες δομές είναι ανιχνεύσιμες εξ αιτίας είτε του μειωμένου πορώδους είτε της υγρασίας, που έχει συσσωρευτεί στην επιφάνειά τους.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, ρ , ενός κυλινδρικού σχήματος που έχει μήκος L , αντίσταση R και εμβαδόν διατομής S δίνεται από την σχέση:

$$\rho = R \frac{S}{L}. \quad (1)$$

Όπου R είναι σε Ohms, L σε μέτρα και S σε τετραγωνικά μέτρα. Η μονάδα μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι το Ohm-m. Μία άλλη φυσική ποσότητα που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της συμπεριφοράς του υπεδάφους κατά την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι η αγωγιμότητα, η οποία ορίζεται ως το αντίστροφο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ($\sigma = 1/\rho$). Η αγωγιμότητα δείχνει την

ευκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέεται στο έδαφος και μονάδα μέτρησης αυτής είναι το Siemens ανά μέτρο (S/m).

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται από μία σειρά παραγόντων οι οποίοι είναι εύκολα μεταβαλλόμενοι. Εξαρτάται από τις υδρολογικές – υδρογεωλογικές συνθήκες μιας περιοχής, τη χημική σύσταση του νερού, τα ιόντα που είναι διαλυμένα σε αυτό, το πορώδες των σχηματισμών, τις πιθανές διαρρήξεις και διακλάσεις, τη θερμοκρασία και την πίεση, καθώς και από τις τοπογραφικές μεταβολές.

Όπως αναφέρθηκε οι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ποικίλουν και μεταβάλλονται εύκολα. Έτσι πρέπει να σημειωθεί ότι η ειδική αντίσταση δεν αποτελεί απόλυτα χαρακτηριστικό γνώρισμα συγκεκριμένων λιθολογικών τύπων, καθώς η διακύμανση αυτής μπορεί να παρουσιάζει μεγάλο εύρος ακόμα και μέσα στον ίδιο λιθολογικό τύπο. Επίσης δύο τελείως διαφορετικοί σχηματισμοί μπορεί να έχουν παρόμοιες ειδικές αντιστάσεις.

Για τους λόγους αυτούς η ερμηνεία των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης πρέπει να γίνεται με προσοχή και σε συνδυασμό πάντα με τις υπάρχουσες πληροφορίες της υπό μελέτη περιοχής. Τέτοιες πληροφορίες είναι γεωλογικοί και τοπογραφικοί χάρτες της περιοχής, αποτελέσματα από γεωτρήσεις ή πιθανές ανασκαφές κ.λ.π. Όλες αυτές οι πληροφορίες θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μαζί με τις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης για να προκύψει το βέλτιστο αποτέλεσμα ερμηνείας.

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης έχει μία αρκετά μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Χρησιμοποιείται ευρύτατα στην Γεωλογία για γεωλογική χαρτογράφηση, στην Υδρογεωλογία για τον εντοπισμό υδροφόρων στρωμάτων, στην Τεχνική Γεωλογία για την εύρεση του μητρικού πετρώματος και εγκοίλων, στον καθορισμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους κ.λ.π., για περιβαλλοντικούς σκοπούς στον προσδιορισμό της ζώνης μόλυνσης σε υδροφόρα στρώματα και της εύρεσης περιοχών υπεδάφιας μόλυνσης, στην αναζήτηση γεωθερμικών πεδίων και μεταλλευμάτων και στην διασκόπηση αρχαιολογικών χώρων για τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων.

Για την μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους εισάγεται μέσα σε αυτό ηλεκτρικό ρεύμα μέσω δύο ηλεκτροδίων Α και Β. Το Α ηλεκτρόδιο είναι ένας θετικός ηλεκτρικός πόλος ενώ το Β ένας αρνητικός. Λόγω των αντιστάσεων επαφής που παρουσιάζονται μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και του εδάφους, η διαφορά δυναμικού που προκαλείται από το εισερχόμενο στο υπέδαφος ρεύμα μετριέται σε δύο άλλα ηλεκτρόδια (ηλεκτρόδια δυναμικού Μ, Ν). Έτσι κατά την εφαρμογή της ηλεκτρικής μεθόδου χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.1.

Θεωρώντας ότι οι μετρήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης έγιναν με την χρήση των τεσσάρων ηλεκτροδίων που φαίνονται στην εικόνα 3.1, τότε η σχέση που δίνει την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι:

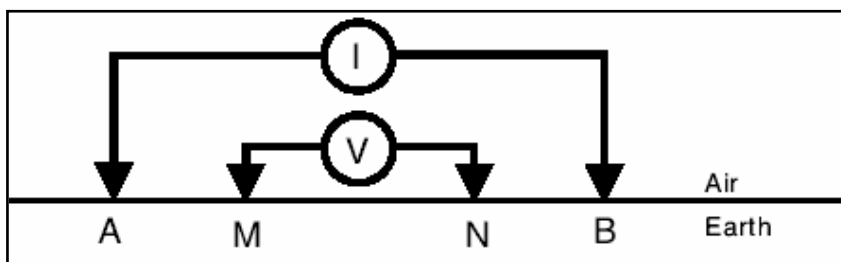
$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \frac{1}{K} = 2\pi R \frac{1}{K} \quad (2)$$

Όπου:

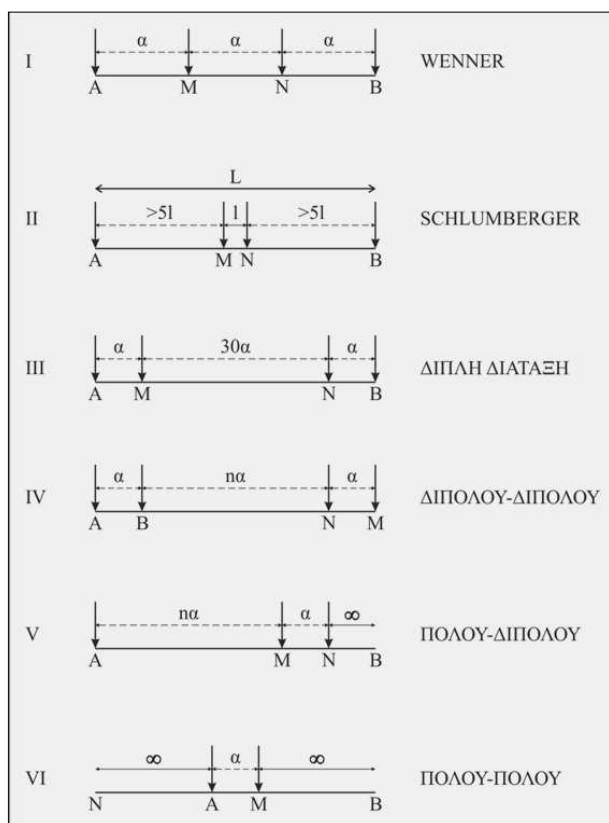
- ρ = η ειδική αντίσταση ομογενούς γης
- I = ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διοχετεύεται στην γη
- ΔV = μετρούμενη διαφορά δυναμικού
- K = γεωμετρικός παράγοντας
- R = μετρούμενη αντίσταση

Ο γεωμετρικός παράγοντας K εξαρτάται αποκλειστικά από την διάταξη των ηλεκτροδίων και τις αποστάσεις μεταξύ τους και ισούται με:

$$K = \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right). \quad (3)$$



Εικόνα 3.1.: Διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων A, B (ηλεκτρόδια ρεύματος) και M, N (ηλεκτρόδια δυναμικού).



Εικόνα 3.2.: Οι πιο συνηθισμένες διατάξεις ηλεκτροδίων. I) Wenner, II) Schlumberger, III) Διπλή Διάταξη, IV) Διπόλου-Διπόλου, V) Πόλου-Διπόλου, VI) Πόλου-Πόλου.

Στην περίπτωση που η γη είναι ομογενής, τότε για οποιαδήποτε πιθανή διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων η εφαρμογή του γεωμετρικού παράγοντα στην μετρούμενη αντίσταση (R) θα δώσει την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

Στην πραγματικότητα όμως η γη είναι ανομοιογενής. Οπότε για να περιγραφεί αυτή η ανομοιογένεια εισάγεται ένας νέος όρος για την περιγραφή της αντίστασης που λέγεται “φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση”. Η φαινόμενη

ειδική ηλεκτρική αντίσταση αντιπροσωπεύει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση που θα είχε το υπέδαφος αν ήταν πράγματι ομογενές και γενικά αποτελεί έναν σταθμισμένο μέσο όρο της πραγματικής αντίστασης του υπεδάφους.

Θεωρητικά υπάρχουν πάρα πολλοί τρόποι για να διαταχθούν τα ηλεκτρόδια στην επιφάνεια του εδάφους, αλλά μόνο λίγες από αυτές τις διατάξεις χρησιμοποιούνται ευρύτητα. Αυτό συμβαίνει διότι μπορεί κάποιες διατάξεις

θεωρητικά να υπερτερούν έναντι κάποιων άλλων αλλά δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθούν πρακτικά. Οι διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται ευρύτατα φαίνονται στην Εικόνα 3.2.

Μέθοδοι έρευνας

Βυθοσκοπήσεις: Με την εφαρμογή των βυθοσκοπήσεων γίνεται προσπάθεια να μετρηθεί η κατανομή της ειδικής αντίστασης με το βάθος. Η όλη διαδικασία στηρίζεται στο γεγονός ότι το υπέδαφος θεωρείται ότι έχει οριζόντια στρωματογραφία, δηλαδή αποτελείται από διακριτά, οριζόντια, ομογενή και ισότροπα στρώματα. Στην περίπτωση των βυθοσκοπήσεων χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά η μέθοδος Schlumberger αλλά και η μέθοδος Wenner. Κλασσικό πεδίο εφαρμογής της μεθόδου αυτής αποτελεί η έρευνα για τον εντοπισμό υδροφόρων στρωμάτων. Κατά την διάρκεια των βυθοσκοπήσεων λαμβάνονται μία σειρά μετρήσεων με συνεχώς αυξανόμενες τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος (τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά). Με την συνεχή αύξηση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης του ρεύματος. Με τον τρόπο αυτό μετρίεται η κατακόρυφη κατανομή της ειδικής αντίστασης σε μία στήλη κάτω από το κέντρο της διάταξης.

Οριζοντιογραφίες (Χαρτογράφηση): Χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό πλευρικών μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίθετα με τις βυθοσκοπήσεις, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές και οι μετρήσεις λαμβάνονται μετακινώντας πλευρικά την διάταξη των ηλεκτροδίων με σταθερό βήμα. Με τον τρόπο αυτό χαρτογραφούνται μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σταθερό βάθος. Κυρίως χρησιμοποιούνται οι διατάξεις Wenner, Διπόλου – Διπόλου και Πόλου – Διπόλου. Οι οριζοντιογραφίες αποτελούν κλασσικές μεθόδους χαρτογράφησης των αρχαιολογικών θέσεων.

Τομογραφίες (Δυσδιάστατη διασκόπηση): Η δυσδιάστατη διάταξη μέτρησης επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων τα οποία εμπεριέχουν πληροφορίες τόσο για την οριζόντια όσο και για την κατακόρυφη μεταβολή της αντίστασης. Οι τομογραφίες μπορούν να θεωρηθούν ως την συλλογή μιας σειράς τομών σε μία συγκεκριμένη περιοχή με συνεχώς αυξανόμενη απόσταση ηλεκτροδίων ή μία σειρά διαδοχικών βυθοσκοπήσεων πάνω σε μία γραμμή. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των τομογραφιών αποτελεί ο μεγαλύτερος αριθμός δεδομένων που συλλέγονται σε σχέση με τις βυθοσκοπήσεις και τις οριζοντιογραφίες. Για να είναι δυνατή η συλλογή τέτοιων δεδομένων σε σύντομο χρονικό διάστημα, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί σύγχρονα όργανα μέτρησης της αντίστασης τα οποία έχουν πλήρως αυτοματοποιήσει την διαδικασία.

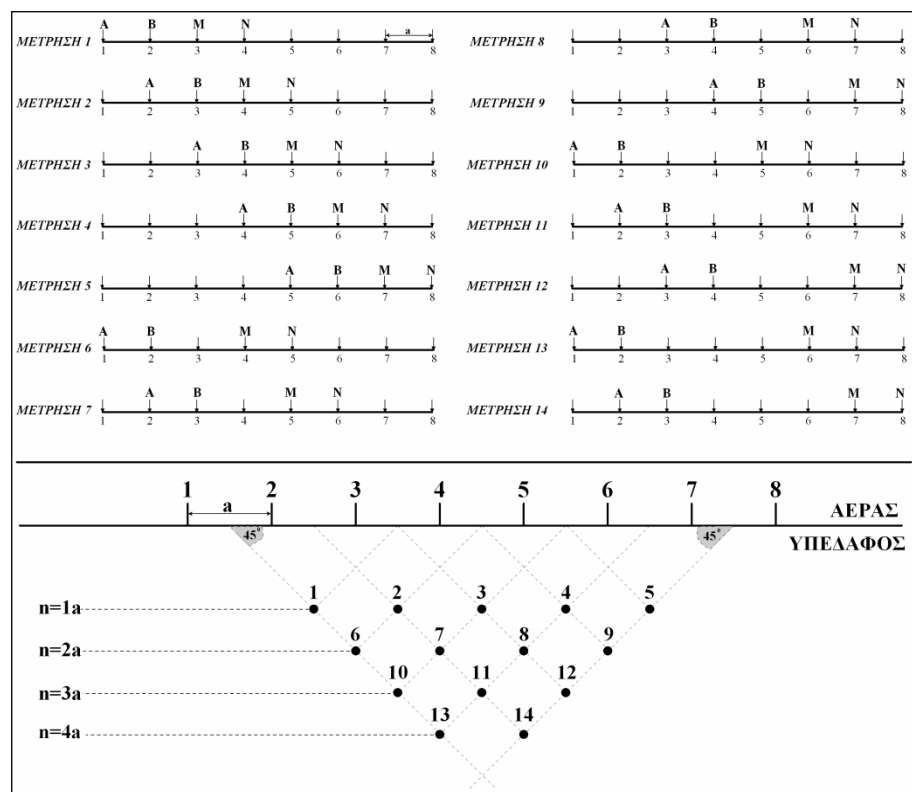
Μέθοδος Ηλεκτρικής Τομογραφίας

Οι ηλεκτρικές τομογραφίες συνήθως πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας έναν μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων (25 και πάνω) τα οποία τοποθετούνται πάνω σε μία γραμμή στο έδαφος και συνδέονται με ένα πολύκλωνο καλώδιο το οποίο συνδέεται στο όργανο μέτρησης της αντίστασης. Τα σύγχρονα όργανα μέτρησης της αντίστασης περιέχουν ηλεκτρονικά συστήματα με τα οποία είναι δυνατή η αυτόματη επιλογή των τεσσάρων ηλεκτροδίων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για κάθε μέτρηση. Αυτό

είναι πάρα πολύ σημαντικό στην γεωηλεκτρική διασκόπηση καθώς μειώνεται αισθητά ο χρόνος συλλογής των δεδομένων.

Για την αποθήκευση των μετρήσεων που θα συλλεχθούν χρησιμοποιείται ένας φορητός υπολογιστής που συνδέεται στο όργανο μέτρησης της αντίστασης. Συνήθως, τα όργανα αυτά κατασκευάζονται έτσι ώστε να έχουν αυτονομία και μπορούν να αποθηκεύσουν στην μνήμη τους αρκετά δεδομένα παρατήρησης. Αυτό αποτελεί επίσης ένα σημαντικό πλεονέκτημα, αν πρέπει να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε περιοχές με πολύ απότομο ανάγλυφο, όπου η χρήση φορητού υπολογιστή θα δυσχέραινε την λήψη των μετρήσεων. Εν συνεχεία, μέσω ειδικών καλωδίων τα δεδομένα μεταφέρονται σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή για την περαιτέρω επεξεργασία. Παράλληλα είναι δυνατός ο προγραμματισμός του οργάνου, χρησιμοποιώντας ειδικά αρχεία τα οποία και εισάγονται σε αυτό, έτσι ώστε να διεξαχθεί οποιαδήποτε γνωστή διάταξη ηλεκτροδίων αυτοματοποιημένα.

Στην Εικόνα 3.3. φαίνεται σχηματικά ο τρόπος διεξαγωγής της ηλεκτρικής τομογραφίας με την μέθοδο Διπόλου-Διπόλου για μία διάταξη 8 ηλεκτροδίων και μέγιστο αριθμό επιπέδων ίσο με 4 και πως τα δεδομένα απεικονίζονται σε δύο διαστάσεις, έτσι ώστε να σχηματιστεί η ψευδοτομή της μεταβολής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Κάθε τιμή της αντίστασης θεωρείται ότι τοποθετείται στο σημείο τομής δύο ευθειών που έχουν ως αρχή το κέντρο των διπόλων AB και MN αντίστοιχα και σχηματίζουν γωνία 45° με το οριζόντιο επίπεδο.



Εικόνα 3.3: Τρόπος πραγματοποίησης της ηλεκτρικής τομογραφίας με την μέθοδο Διπόλου-Διπόλου για διάταξη 8 ηλεκτροδίων και μέγιστο αριθμό επιπέδων ίσο με 4.

Η διαδικασία λήψης των μετρήσεων είναι η εξής: Αρχικά η απόσταση όλων των ηλεκτροδίων είναι ίση με $1a$. Για την πρώτη μέτρηση χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια με αριθμό 1, 2, 3, 4 όπου το 1 ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται ως το

ηλεκτρόδιο ρεύματος A, το 2 ως το ηλεκτρόδιο ρεύματος B, το 3 ως το ηλεκτρόδιο δυναμικού M και το 4 ως το ηλεκτρόδιο δυναμικού N. Στην συνέχεια η διάταξη μεταφέρεται κατά απόσταση a προς τα δεξιά και για την δεύτερη μέτρηση της αντίστασης χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια με αριθμούς 2, 3, 4, 5 ως A, B, M, N αντίστοιχα. Η ίδια διαδικασία συνεχίζεται έως ότου χρησιμοποιηθούν τα ηλεκτρόδια 5, 6, 7, 8 για την τελευταία μέτρηση με απόσταση $1a$ (μετρήσεις 1-5).

Στην συνέχεια, η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων B και M αυξάνεται σε $n=2a$ αλλά η απόσταση μεταξύ των διπόλων ρεύματος (AB) και δυναμικού (MN) παραμένει σταθερή και ίση με $1a$. Ο παράγοντας n είναι ο λόγος της απόστασης των ηλεκτροδίων B-M προς την απόσταση των ηλεκτροδίων A-B. Έτσι λοιπόν χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια 1, 2, 4, 5 ως A, B, M, N για την πρώτη μέτρηση με $n=2a$. Η διάταξη εν συνεχεία μεταφέρεται κατά $1a$ προς τα δεξιά μέχρι να ολοκληρωθούν όλες οι μετρήσεις (μετρήσεις 6-9). Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για μεγαλύτερα n . Συνήθως στην πράξη ο μέγιστος αριθμός n ο οποίος χρησιμοποιείται είναι 6-8, καθώς για μεγαλύτερα n το σήμα της μεθόδου ασθενεί σημαντικά. Για τον λόγο αυτό αν υπάρχει επιθυμία η διασκόπηση να κυμανθεί σε ακόμα μεγαλύτερα βάρη, αυτό το οποίο γίνεται είναι να αυξηθεί η απόσταση των διπόλων ρεύματος (AB) και δυναμικού (MN) σε $2a$ ή/και $3a$ και να πραγματοποιηθούν μετρήσεις για διάφορα πάλι n . Η συλλογή παράλληλων και πυκνών δισδιάστατων τομογραφιών δίνει πληροφορίες για την τρισδιάστατη κατανομή των φαινομένων ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων του υπεδάφους



Εικόνα 3.4: Φωτογραφία του οργάνου SYSCAL Pro και του πολυπλέκτη SYSCAL Switch Pro.

Για την συλλογή των γεωηλεκτρικών τομογραφικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το δεκακάναλο όργανο SYSCAL Pro μαζί με τον πολυπλέκτη SWITCH Pro 96 της εταιρείας IRIS Instruments. Το όργανο αυτό (Εικόνα 3.4) είναι πλήρως αυτοματοποιημένο, με αυτονομία και αρκετή εσωτερική μνήμη ώστε να είναι δυνατή η αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων. Στο όργανο μπορούν να συνδεθούν ταυτόχρονα μέχρι 96 ηλεκτρόδια. Η αυτόματη πραγματοποίηση των μετρήσεων της αντίστασης του υπεδάφους ελέγχεται από τον πολυπλέκτη, που συνδέεται στο όργανο μέτρησης της αντίστασης, μέσω ενός ειδικού αρχείου που εισάγεται στο όργανο και περιλαμβάνει την γεωμετρία της διάταξης που χρησιμοποιείται. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η συλλογή πολλών δεδομένων υψηλής ποιότητας και ευκρίνειας σε σύντομο χρονικό διάστημα. Επιπλέον το όργανο έχει την δυνατότητα να

πραγματοποιήσει και να αποθηκεύσει ταυτόχρονα μέχρι δέκα μετρήσεις, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο περίπου κατά δέκα φορές τον χρόνο συλλογής των δεδομένων.

3.2. Μαγνητικές Διασκοπήσεις

Οι μαγνητικές διασκοπήσεις αποτελούν μία τεχνική, με την οποία μπορούν να μετρηθούν μικρές μεταβολές στο μέγεθος του γήϊνου μαγνητικού πεδίου. Για το λόγο αυτό αποβλέπουν στην ανίχνευση της αλλαγής των μαγνητικών ιδιοτήτων του υπεδάφους, η οποία οφείλεται στην παρουσία συγκεκριμένων στόχων που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, μέσω της μέτρησης του τοπικού μαγνητικού πεδίου της γης σε μικρή και σταθερή απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους μιας αρχαιολογικής θέσης.

Υπεδάφειοι στόχοι με μαγνητικές ιδιότητες διαφορετικές από αυτές του περιβάλλοντος εδάφους αλλάζουν κατά μεγάλο ή μικρό βαθμό το τοπικό μαγνητικό πεδίο. Αυτή η μικρή μεταβολή του μαγνητικού πεδίου μπορεί να ανιχνευθεί με τις μαγνητικές τεχνικές και παρατηρείται σαν μία «ανωμαλία» στις μετρήσεις (Nishimura 2001: 546). Οι μαγνητικές αυτές ανωμαλίες σχετίζονται άμεσα με τη μέτρηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας του εδάφους. Περιοχές με αυξημένη μαγνητική επιδεκτικότητα (σε σύγκριση με αυτή του περιβάλλοντος εδάφους) παρουσιάζονται ως θετικές ανωμαλίες, ενώ περιοχές με μειωμένη μαγνητική επιδεκτικότητα παρουσιάζονται ως αρνητικές ανωμαλίες. Και τα δύο είδη μαγνητικών ανωμαλιών είναι ενδιαφέροντα στη διαδικασία ερμηνείας των μαγνητικών δεδομένων. (Sarris and Jones 2000: 22-3).

Οι μαγνητικές διασκοπήσεις χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για να αποκαλύψουν αρχαιολογικές κατασκευές που είχαν υποστεί καύση, όπως κεραμικοί κλίβανοι αγγείων (Aitken 1974: 214). Σύντομα όμως η τεχνική αυτή αποδείχτηκε ιδιαίτερα ευαίσθητη στην ανίχνευση και άλλων υπεδάφειων στόχων, όπως αρχιτεκτονικές δομές, τάφοι, λάκκοι απορριμμάτων, ακόμα και σπές στις οποίες στηρίζονταν ξύλινοι πάσσαλοι (Aitken 1974: 189-90, Sarris and Jones 2000: 23). Οι «ανωμαλίες» στις συγκεκριμένες περιπτώσεις προέρχονται από τις μεταβολές της μαγνητικής επιδεκτικότητας των θαμμένων αντικειμένων, οι οποίες προκαλούνται όταν υλικά πλούσια σε σιδηρούχα συστατικά σχηματίζουν πιο ισχυρές σιδηριμαγνητικές δομές, όπως ο μαγνητίτης και ο αιματίτης. Αυτή η μαγνητική ενίσχυση σχετίζεται πρωταρχικά με την όπτηση του υλικού (Σαρρής 1995). Συχνά μεταβολές οφείλονται και στην ύπαρξη βακτηρίων, τα οποία μπορούν να δημιουργηθούν κάτω από κατάλληλες συνθήκες του εδάφους. Τέτοιες συνθήκες απαντούν στα περισσότερα επιφανειακά εδάφη που περιέχουν αρχαιολογικού ενδιαφέροντος υλικά και προκαλούν σημαντικές μαγνητικές μεταβολές σε σχέση με το τοπικό μαγνητικό πεδίο της περιοχής των μετρήσεων.

Για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιούνται συνήθως μαγνητόμετρα μέτρησης της ολικής έντασης του μαγνητικού πεδίου (πρωτονιακά μαγνητόμετρα ή μαγνητόμετρα Καισίου) ή διαφορικά μαγνητόμετρα (όπως μαγνητόμετρα ροής) για τη μέτρηση της κατακόρυφης ή της οριζόντιας βαθμίδας του μαγνητικού πεδίου (Aitken 1974: 210-13, Αράμπελος 1991: 131-4, Sarris 2008, Sarris and Jones 2000: 24, Nishimura 2001: 546-7). Τα όργανα αυτά έχουν ακρίβεια της τάξεως του 1-0.1 nT. Οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου πραγματοποιούνται με την τοποθέτηση του αισθητήρα σε μία σταθερή απόσταση από την επιφάνεια της γης. Οι

μετρήσεις λαμβάνονται σε σταθερά διαστήματα (δηλ. με σταθερό βήμα δειγματοληψίας) σε ορθογώνιους καννάβους, σχετικά μικρών διαστάσεων (π.χ. 10x10m ή 20x20m).

Γενικά, η ύπαρξη αρχαιολογικών ερειπίων στο υπέδαφος, συνοδευμένη συνήθως από μία αύξηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας του υπεδάφους στο συγκεκριμένο σημείο, προκαλεί ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο το οποίο μεταβάλλει το τοπικό μαγνητικό πεδίο της γης. Τα πυρηνικά μαγνητόμετρα μετρούν τη συνισταμένη των διανυσμάτων του ασθενούς τοπικού μαγνητικού πεδίου και του πιο ισχυρού γήινου μαγνητικού πεδίου. Τα διαφορικά μαγνητόμετρα (μαγνητόμετρα ροής) μετρούν την κάθετη ή οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Τα δύο αυτά είδη μαγνητομέτρων αποτελούν τα πιο αποτελεσματικά όργανα μέτρησης του τοπικού μαγνητικού πεδίου και των μεταβολών αυτού λόγω της παρουσίας ανθρωπογενών λειψάνων. Η μεταβολή του τοπικού μαγνητικού πεδίου λόγω της ύπαρξης υπεδάφειων αρχαιολογικών υπολειμμάτων είναι σχετικά μικρή, εξ αιτίας της ασθενούς έντασης της παραμένουσας μαγνήτισης. Η μεταβολή αυτή αυξάνεται με την αύξηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας των αρχαιολογικών στόχων (φαινόμενα καύσης, πυκνότητα σε σιδηρούχα συστατικά, κ.α.). Τα όργανα, τα οποία απαιτούνται για τον εντοπισμό των αρχαιολογικών ερειπίων χαρακτηρίζονται από υψηλή ακρίβεια, μεγάλη ευαισθησία και αξιοπιστία των μετρήσεων. Τα όργανα αυτά μετρούν το μαγνητικό πεδίο με μία ακρίβεια της τάξεως των 1-0.1 nT. Μεγαλύτερη ακρίβεια, της τάξεως του pT, είναι εφικτή με τη χρήση μαγνητομέτρων Καισίου, αλλά με κίνδυνο να υπάρχουν αυξημένα επίπεδα του εξωτερικού θορύβου.



Εικόνα 3.5. Το διαφορικό μαγνητόμετρο ροής Bartington Instruments Grad601.

Είναι γνωστό ότι το μαγνητικό πεδίο της γης μεταβάλλεται με το χρόνο. Από τις χρονικές μεταβολές του γήινου μαγνητικού πεδίου, η ημερήσια μεταβολή αυτού παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Οι παροδικές αυτές μεταβολές επηρεάζουν τις μαγνητικές μετρήσεις υπαίθρου και δεν είναι προβλέψιμες. Υπό κανονικές συνθήκες, η ένταση του μαγνητικού πεδίου παρουσιάζει διακυμάνσεις της τάξεως των 50-100nT. Μερικές φορές το μαγνητικό πεδίο παρουσιάζεται πιο ενεργητικό, με χρονικές διακυμάνσεις στην έντασή του της τάξεως των 100-500 nT (περιπτώσεις

μαγνητικών καταγίδων). Η χρήση διαφορικών μαγνητομέτρων, όπως το Geoscan FM256 – Fluxgate Gradiometer και το Bartington Instruments Grad601, έχει το πλεονέκτημα της εξάλειψης των δραστικών χρονικών αλλαγών του μαγνητικού πεδίου, καθώς και της άμβλυνσης των γεωλογικών επιδράσεων (Sarris and Jones 2000: 24).

Στην συγκεκριμένη έρευνα έγινε συστηματική χρήση του διαφορικού μαγνητομέτρου ροής Bartington Instruments Grad601 (Εικόνα 3.7.). Το μαγνητόμετρο αυτό μετράει τη διαφορά της έντασης της κατακόρυφης συνιστώσας του γήινου μαγνητικού πεδίου ταυτόχρονα σε δύο διαφορετικά επίπεδα (ύψη) από την επιφάνεια του εδάφους. Το όργανο μπορεί να καταγράφει δεδομένα συνεχώς και διευκολύνεται η κάλυψη μεγάλων εκτάσεων εδάφους ημερησίως με πολλές μετρήσεις ανά μονάδα επιφανείας. Επιπλέον, γίνεται εφικτή η εξομάλυνση των γεωλογικών τάσεων, η άμβλυνση εξωτερικών παρεμβολών λόγω εγγύτητας των γεωφυσικών καννάβων σε συρματοπλέγματα και νεότερα κτίσματα και τέλος, η αποφυγή διορθώσεων της ημερήσιας μεταβολής της έντασης του ολικού μαγνητικού πεδίου.

3.4. Μετρήσεις υπαίθρου

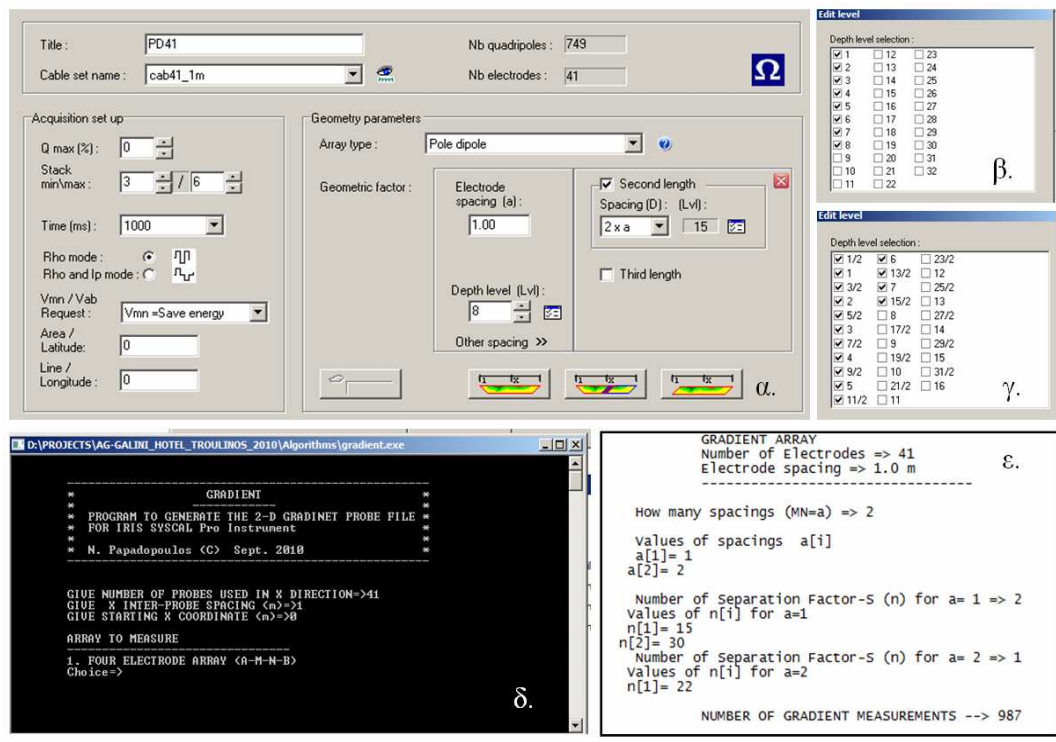
Οι μετρήσεις υπαίθρου πραγματοποιήθηκαν την περίοδο από 23 έως 26 Σεπτεμβρίου 2010 και ο χώρος που πραγματοποιήθηκε η γεωφυσική χαρτογράφηση οριοθετήθηκε και καθορίστηκε με την βοήθεια του Αντιδημάρχου Ιεράπετρας κ. Μαρκόπουλο Μανώλη. Η μεθοδολογία της διενέργειας των γεωφυσικών μετρήσεων καθορίστηκε από τις ιδιαίτερες συνθήκες της περιοχής και το αστικό περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται η περιοχή μελέτης. Ο στόχος της γεωφυσικής χαρτογράφησης ήταν εντοπιστούν τυχόν υπολείμματα του αμφιθεάτρου που εικάζεται ότι βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή. Στην περιοχή εφαρμόστηκαν η μέθοδος του γεωραντάρ, της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας και η μαγνητική μέθοδος.

Οι μαγνητικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το διαφορικό μαγνητόμετρο GRAD601 (Εικ. 3.5) κατά μήκος παράλληλων οδεύσεων που απείχαν μεταξύ τους 0.5 μέτρο και βήμα δειγματοληψίας κατά μήκος των γραμμών ίσο με 0.5 μέτρο. Με την μαγνητική μέθοδο καλύφθηκε μία περιοχή ίση με 940 τετραγωνικά μέτρα.

Οι μετρήσεις του γεωραντάρ (Εικ. 3.6) επικεντρώθηκαν σε όλη την έκταση της περιοχής του χώρου στάθμευσης καλύπτοντας συνολικά έκταση 3000 τετραγωνικών μέτρων ολοκληρώνοντας παράλληλες οδεύσεις ανά 0.5 μέτρο και βήμα δειγματοληψίας 0.05 μέτρα κατά μήκος κάθε γραμμής. Με την στρατηγική αυτή της μέτρησης κατέστη δυνατή χαρτογράφηση της στρωματογραφίας όλης της περιοχής σε τρεις διαστάσεις.

Σε μία έκταση ίση με 600 τετραγωνικά μέτρα εφαρμόστηκε επίσης η μέθοδος της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας (Εικ. 3.4). Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 16 παράλληλες τομές των οποίων η απόσταση ήταν 1 μέτρο ενώ και η βασική απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων κατά μήκος κάθε γραμμής ήταν επίσης 1 μέτρο. Με τον τρόπο αυτό εγγυάται η πραγματική τρισδιάστατη απεικόνιση των γεωηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους μέχρι το βάθος των 6-7 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους. Σε όλες τις παράλληλες δυσδιάστατες τομογραφίες εφαρμόστηκαν οι διατάξεις Πόλυ-Διπόλου και Βαθμίδας για την συλλογή των

δεδομένων. Οι δύο αυτές διατάξεις θεωρήθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες για την πραγματοποίηση της έρευνας καθώς είναι δυνατό να συλλεχθούν αξιόπιστα δεδομένα σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Το όργανο προγραμματίστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε σημείο μέτρησης της αντίστασης να δειγματοληπτείται τουλάχιστον τρεις φορές έτσι ώστε ελεγχθεί η επαναληψιμότητα αλλά και να καταγραφεί το σφάλμα της κάθε μέτρησης. Συνολικά συλλέχθηκαν 12992 και 15792 μετρήσεις της φαινόμενης αντίστασης με τις διατάξεις Πόλου-Διπόλου και Βαθμίδας αντίστοιχα. Στην εικόνα 3.8 αποτυπώνονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των πρωτοκόλλων μέτρησης που εισάχθηκαν στο όργανο για την πραγματοποίηση των μετρήσεων.



Εικόνα 3.8: α) Γενικές επιλογές που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των πρωτοκόλλων μέτρησης της ειδικής φαινόμενης αντίστασης με την διάταξη Πόλου-Διπόλου. β, γ) Διαφορετικά επίπεδα βάθους για την περίπτωση που η απόσταση των ηλεκτροδίων ήταν $a=1$ και 2 m αντίστοιχα. δ) Ειδικό πρόγραμμα που κατασκευάστηκε για την δημιουργία των πρωτοκόλλων μέτρησης με την διάταξη της βαθμίδας (Gradient). ε) Παράμετροι για την κατασκευή των πρωτοκόλλων μέτρησης με την διάταξη βαθμίδας.

Η συλλογή δεδομένων φαινόμενης αντίστασης κάνοντας χρήση διαφορετικών διατάξεων ηλεκτροδίων βοηθάει στην βελτιστοποίηση της ποιότητας της παραγόμενης εικόνας κατανομής των αντιστάσεων του υπεδάφους. Κάθε διάταξη έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και είναι δυνατό να δώσει επιπλέον πληροφορίες για την δομή του υπεδάφους. Γενικά, ο συνδυασμός δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές διατάξεις μπορεί να βοηθήσει στην παραγωγή ενός αξιόπιστου γεωηλεκτρικού μοντέλου, ειδικά στις περιπτώσεις που η γεωλογία της εκάστοτε περιοχής είναι εξαιρετικά πολύπλοκη ή δεν υπάρχει καμία εκ των προτέρων πληροφορία.



Point_ID	Easting (m)	Northing (m)	Height (m)
IERAPETRA1	659060.95	3875360.18	1.29
IERAPETRA2	659080.16	3875364.86	0.82
IERAPETRA3	659099.80	3875369.82	0.88
IERAPETRA4	659058.47	3875369.87	0.73
IERAPETRA5	659077.91	3875374.66	1.17
IERAPETRA6	659097.16	3875379.89	1.54
IERAPETRA7	659116.35	3875385.24	1.24
IERAPETRA8	659130.68	3875388.49	3.30
IERAPETRA9	659052.98	3875388.95	2.61
IERAPETRA10	659072.54	3875394.22	2.17
IERAPETRA11	659092.06	3875399.46	1.44
IERAPETRA12	659111.01	3875404.72	2.87
IERAPETRA13	659125.47	3875408.66	4.07
IERAPETRA14	659070.18	3875403.83	1.43
IERAPETRA15	659089.30	3875409.07	2.27
IERAPETRA16	659062.35	3875355.82	1.51
IERAPETRA17	659101.15	3875365.60	1.91
IERAPETRA18	659046.50	3875376.98	2.52
IERAPETRA19	659049.26	3875365.45	1.83
IERAPETRA20	659051.25	3875351.75	1.56
IERAPETRA21	659074.92	3875404.38	1.92
IERAPETRA22	659072.18	3875414.51	2.47
IERAPETRA23	659086.57	3875417.92	2.69
SAT1	659053.44	3875342.65	5.68
SAT2	659022.97	3875431.54	8.52
SAT3	659019.95	3875483.66	11.00
SAT4	659152.88	3875489.64	8.56
SAT5	659159.60	3875464.19	7.42
SAT6	659168.29	3875370.48	4.51
SAT7	659097.73	3875422.41	5.13

Εικόνα 3.9: Γεωγραφική θέση και συντεταγμένες των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση της περιοχής έρευνας στην περιοχή του αμφιθεάτρου της Ιεράπετρας

Για την τοπογραφική αποτύπωση των σημείων των γεωφυσικών καννάβων (IERAPETRA 1-23) αλλά και των σταθερών σημείων (SAT 1-7) που χρησιμοποιήθηκαν για την διόρθωση της δορυφορικής εικόνας χρησιμοποιήθηκε η μονάδα GPS LEICA GS20 (Εικ. 2.4). Η ακρίβεια των συντεταγμένων (X, Y) των σημείων μετά από την διόρθωση που υπέστησαν τα αρχικά δεδομένα ήταν μικρότερη από ένα μέτρο και τα δεδομένα καταγράφηκαν στο Ελληνικό Γεωγραφικό Σύστημα

Αναφοράς (ΕΓΣΑ 87). Στην εικόνα 3.9 φαίνονται η γεωγραφική τοποθέτηση και οι συντεταγμένες των αντίστοιχων σημείων.

3.5. Επεξεργασία Γεωφυσικών Μετρήσεων

Μαγνητικά δεδομένα

Τα πρωταρχικά δεδομένα καταχωρήθηκαν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, ενώ έγινε μία κωδικοποίηση των φακέλων που αντιστοιχούσε στην κωδικοποίηση των γεωφυσικών καννάβων και την περιοχή, όπου λαμβάνονταν οι μετρήσεις. Κατά το αρχικό στάδιο της επεξεργασίας διάφορα λογισμικά (Geoplot, Surfer) επέτρεψαν τη μετατροπή των πρωταρχικών δεδομένων με τη μορφή συντεταγμένων (x, y, z - .xyz). Η μετατροπή αυτή ήταν αναγκαία για τα επόμενα στάδια της επεξεργασίας. Η αλλαγή των συντεταγμένων ήταν επιβεβλημένη για τη σύνθεση των μεμονωμένων καννάβων σε «μωσαϊκά καννάβων» με συντεταγμένες παρόμοιες με αυτές του τοπογραφικού χάρτη της περιοχής.

Η καλύτερη σύνδεση των γεωφυσικών καννάβων επιτεύχθηκε με τη στατιστική ανάλυση των κοινών γραμμών αλληλέλληλων καννάβων ή με τον υπολογισμό του μέσου όρου των τιμών των γειτονικών καννάβων. Στη συνέχεια, ένας διορθωτικός συντελεστής εφαρμόστηκε σε όλα τα δεδομένα με σκοπό να ομαλοποιήσει το μέσο όρο των μετρήσεων και να φέρει αυτές σε ένα κοινό επίπεδο αναφοράς, έτσι ώστε να εξαλειφθούν τυχόν ασυνέχειες στις ενώσεις των γεωφυσικών καννάβων (Grid Equalization). Επιπλέον, έγινε αναγωγή όλων των μετρήσεων ανά γραμμή δειγματοληψίας σε ένα κοινό επίπεδο αναφοράς, έτσι ώστε να εξομαλυνθούν περιοχές με έντονες επιφανειακές ανωμαλίες (Line Equalization). Αρκετές φορές ήταν αναγκαία η αναγωγή των μετρήσεων ανά γραμμή δειγματοληψίας και στις δύο κατευθύνσεις (x-axis & y-axis).

Το επόμενο στάδιο της επεξεργασίας περιελάμβανε τη χαρτογράφηση των δεδομένων, η οποία έγινε με τη χρήση αλγορίθμου παρεμβολής (Kriging), που διαθέτει το λογισμικό πακέτο Surfer, το οποίο χρησιμοποιήθηκε από το πρώτο ήδη στάδιο της επεξεργασίας. Σε συγκεκριμένες μετρήσεις έγινε επιλεκτική αποβολή του θορύβου, ο οποίος οφείλεται στην παρουσία μεταλλικών αντικειμένων (για την περίπτωση των μαγνητικών μετρήσεων), με την αφαίρεση υψηλών και χαμηλών ακραίων τιμών (Selective Despiking). Το ίδιο αποτέλεσμα επιτεύχθηκε και μέσω της συμπίεσης του δυναμικού εύρους τιμών των μετρήσεων (Compression of Dynamic Range).

Ειδικά για τα δεδομένα που συλλέχθηκαν με το όργανο μέτρησης της αντίστασης RM15 και τον πολυπλέκτη MPX15, πραγματοποιήθηκε αρχικά μετατροπή των τιμών της φαινόμενης αντίστασης σε τιμές ειδικής φαινόμενης αντίστασης χρησιμοποιώντας την κατάλληλη τιμή του γεωμετρικού παράγοντα.

Δεδομένα Ηλεκτρικής Τομογραφίας

Η επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας έγινε με πιο πολύπλοκες τεχνικές βασιζόμενες στην μέθοδο της αντιστροφής. Η εφαρμογή της θεωρίας της αντιστροφής στην γεωηλεκτρική διασκόπηση προσπαθεί να βρει ένα βέλτιστο ηλεκτρικό μοντέλο της γης του οποίου η απόκριση θα είναι παρόμοια ή

σχεδόν ίδια με τις μετρούμενες (παρατηρούμενες) τιμές της ειδικής φαινόμενης αντίστασης. Το μοντέλο αυτό είναι ουσιαστικά μία ιδανική μαθηματική αναπαράσταση της γης. Αποτελείται από παραμέτρους, οι οποίες στην προκειμένη περίπτωση αντιπροσωπεύουν την κατανομή της πραγματικής ειδικής αντίστασης του υπεδάφους. Η απόκριση του μοντέλου δίνει τις υπολογιζόμενες (συνθετικές) ειδικές φαινόμενες αντιστάσεις οι οποίες υπολογίζονται με βάση πολύπλοκες μαθηματικές σχέσεις.

Βασικό στοιχείο κάθε μεθόδου αντιστροφής αποτελεί η εύρεση ενός τρόπου υπολογισμού της απόκρισης του γεωηλεκτρικού μοντέλου, δηλαδή των φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων που θα προκαλέσει μία γνωστή κατανομή αντιστάσεων του υπεδάφους. Η διαδικασία αυτή είναι και γνωστή ως επίλυση του Ευθέως Προβλήματος. Με άλλα λόγια, το Ευθύ Γεωηλεκτρικό Πρόβλημα περιλαμβάνει την λύση της διαφορικής εξίσωσης που καθορίζει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σε ένα ανομοιογενές υπέδαφος, για μία συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτροδίων, τέτοιας ώστε να μπορεί να καθοριστεί η κατανομή του δυναμικού.

Υπάρχουν δύο τρόποι για να επιλυθεί το Ευθύ Γεωηλεκτρικό Πρόβλημα: οι αναλυτικές και οι αριθμητικές μέθοδοι. Με τις αναλυτικές μεθόδους επιλύονται κατευθείαν οι εξισώσεις - πρόκειται για τις πιο ακριβείς μεθόδους που όμως μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για απλά γεωμετρικά σχήματα όπως για παράδειγμα σφαίρες.

Για να αντιμετωπιστεί η έντονη ανομοιογένεια και ετερογένεια που παρουσιάζει η γη, το πρόβλημα προσεγγίζεται με την χρήση των αριθμητικών μεθόδων. Το πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι μπορούν να ενσωματώσουν μία οποιαδήποτε τυχαία κατανομή της αντίστασης, δηλαδή μπορούν να προσεγγίσουν περισσότερο τις πραγματικές υπεδάφεις συνθήκες. Οι πιο διαδεδομένες αριθμητικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του Ευθέως Προβλήματος είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method) και η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Method). Με βάση αυτές τις μεθόδους το υπέδαφος χωρίζεται σε διακεκριμένες και πεπερασμένες περιοχές, που ονομάζονται στοιχεία οι οποίες η κάθε μία μπορεί να έχει διαφορετική τιμή της αντίστασης. Έτσι με αυτόν τον τρόπο μπορεί να παρασταθεί οποιαδήποτε κατανομή της υπεδάφιας αντίστασης, όσο πολύπλοκη και να είναι.

Ο τελικός σκοπός της γεωηλεκτρικής διασκόπησης είναι να βρεθεί ένα βέλτιστο ηλεκτρικό μοντέλο της γης στηριζόμενοι στις πραγματικές μετρήσεις της ειδικής φαινόμενης αντίστασης. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας της ανακατασκευής του υπεδάφους, αυτό θεωρείται ότι χωρίζεται σε ανεξάρτητα τμήματα (παραμέτροι) τα οποία μπορούν να μεταβάλλουν την τιμή της αντίστασής τους ανεξάρτητα το ένα με το άλλο (Εικ. 3.16.). Ο στόχος είναι να υπολογιστεί μία εκτίμηση της κατανομής της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους, για την οποία η διαφορά μεταξύ των πραγματικών (μετρούμενων) δεδομένων της φαινόμενης αντίστασης και των υπολογιζόμενων (συνθετικών) τιμών της φαινόμενης αντίστασης να είναι ελάχιστη. Τα συνθετικά δεδομένα της φαινόμενης αντίστασης θα υπολογιστούν μέσω της επίλυσης του ευθέως προβλήματος.

Επειδή όμως το γεωηλεκτρικό πρόβλημα είναι ένα μη γραμμικό πρόβλημα, η παραπάνω διαδικασία πρέπει να είναι επαναληπτική. Δηλαδή η διαδικασία της

αντιστροφής ξεκινάει με ένα αρχικό ηλεκτρικό μοντέλο γης (συνήθως ομογενή γη) και σε κάθε επανάληψη βρίσκεται μία διόρθωση του μοντέλου, η οποία διόρθωση προστίθεται στο προηγούμενο μοντέλο. Έτσι λοιπόν στο τέλος κάθε αντιστροφής λαμβάνεται ένα αναβαθμισμένο μοντέλο γης και τελικά η διαδικασία θα σταματήσει όταν θα ανακατασκευαστεί ένα τέτοιο μοντέλο του οποίου η απόκριση, δηλαδή οι υπολογιζόμενες συνθετικές φαινόμενες αντιστάσεις θα διαφέρουν ελάχιστα από τις πραγματικές φαινόμενες αντιστάσεις.

Θα πρέπει επίσης αν τονιστεί ότι η αντιστροφή γεωηλεκτρικών δεδομένων είναι ένα “νοσηρό” (ill-conditioned) πρόβλημα, δηλαδή μεγάλες αλλαγές στην πραγματική ειδική αντίσταση του υπεδάφους μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα μικρές μεταβολές στα παρατηρούμενα δεδομένα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Έτσι λοιπόν η διαδικασία της αντιστροφής μπορεί να καταστεί εξαιρετικά ασταθής και να δώσει λύσεις που δεν έχουν κανένα φυσικό νόημα. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος έχουν προταθεί διάφορες μεθοδολογίες. Αυτή που ευρύτατα χρησιμοποιείται σήμερα είναι η αντιστροφή με περιορισμούς εξομάλυνσης (smoothness constrained inversion ή Occam’s inversion). Η βασική αρχή της μεθόδου αυτής είναι να βρεθεί το πιο απλό και ομαλό ηλεκτρικό μοντέλο γης η απόκριση του οποίου να μπορεί να προσεγγίσει τα δεδομένα. Η αντιστροφή αυτή δεν ψάχνει απαραίτητα να βρει την πιο “καλή” λύση, αλλά επιδιώκεται η παραγωγή ενός απλοποιημένου μοντέλου το οποίο θα αποτελεί λογική αναπαράσταση του υπεδάφους. Δηλαδή η εξομαλυμένη εξαναγκασμένη αντιστροφή εγγυάται την σταθερότητα της λύσης και επίσης παράγεται ένα μοντέλο τα χαρακτηριστικά του οποίου έχουν επιλεγεί από τον χρήστη (ομαλότητα μοντέλου) και όχι τυχαία.

Για την επεξεργασία των γεωηλεκτρικών τομογραφιών χρησιμοποιήθηκε αρχικά το πρόγραμμα RES2DINV, το οποίο μπορεί αυτόματα να καθορίσει ένα δισδιάστατο γεωηλεκτρικό μοντέλο της γης, με βάση τα δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν κατά τις υπαίθριες εργασίες και μπορεί να αντιστρέψει ένα μεγάλο αριθμό δεδομένων. Η γη θεωρείται ότι αποτελείται από ορθογώνια τμήματα (παραμέτροι), τα οποία μπορούν να μεταβάλουν την αντίσταση τους ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Η κατανομή και το μέγεθος των τμημάτων αυτών δημιουργείται αυτόματα από το λογισμικό και το βάθος κάθε σειράς αυτών των τμημάτων θεωρείται περίπου ίσο με το “μέσο βάθος διείσδυσης” (Edwards, 1977). Η επεξεργασία κάθε γεωηλεκτρικής τομογραφίας ξεχωριστά είχε ως βασικούς σκοπούς να αξιολογηθεί η ποιότητα των δεδομένων αλλά και να ληφθεί μία πρώτη εικόνα για την κατανομή της υπεδάφιας αντίστασης.

Στην συνέχεια κάθε διαφορετικό αρχείο που αντιπροσώπευε τα δεδομένα κάθε γεωηλεκτρικής τομογραφίας διορθώθηκε με βάση το τοπικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων που ορίστηκε για την περιοχή, καθορίζοντας με αυτό τον τρόπο την σχετική του θέση στον χώρο μελέτης (Papadopoulos et al, 2007). Εν συνεχεία τα διορθωμένα αρχεία ενώθηκαν σε ένα μοναδικό αρχείο που αντιπροσώπευε την μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης του υπεδάφους σε τρεις διαστάσεις. Για την επεξεργασία του αρχείου αυτού χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RES3DINV, το οποίο μπορεί αυτόματα να καθορίσει ένα τρισδιάστατο μοντέλο του υπεδάφους με βάση τα πειραματικά δεδομένα.

Τόσο το πρόγραμμα RES2DINV όσο και το RES3DINV χρησιμοποιούν την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ή των πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση

του ευθέως ηλεκτρικού προβλήματος και τον υπολογισμό των τιμών των φαινόμενων αντιστάσεων. Η διαδικασία της αντιστροφής στηρίζεται σε μία επαναληπτική μη-γραμμική τεχνική ελαχίστων τετραγώνων ([deGroot-Heldin and Constable, 1990](#)).

Για την επεξεργασία όλων των γεωηλεκτρικών τομογραφιών χρησιμοποιήθηκε ένας ενιαίος τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων. Στο αρχικό στάδιο έγινε ένα φιλτράρισμα των δεδομένων εξαλείφοντας αυτά που παρουσίαζαν μεγάλα σφάλματα (λόγω επαφής, οργάνου, κ.α.). Εν συνεχεία πολύ υψηλές και χαμηλές ακραίες τιμές, που οφείλονται σε εξωγενείς πηγές ή θόρυβο (π.χ. κακή επαφή των ηλεκτροδίων με το έδαφος), απομακρύνθηκαν από τα δεδομένα. Οι παράμετροι του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ταυτόσημοι για όλες τις τομογραφίες. Για την επίλυση του ευθέως προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων. Για την κατασκευή του δικτύου των Πεπερασμένων Στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν 4 κόμβοι μεταξύ των ηλεκτροδίων, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την ακρίβεια υπολογισμού των φαινόμενων αντιστάσεων.

Για την ανακατασκευή της αντίστασης του υπεδάφους χρησιμοποιήθηκε ένας επαναληπτικός αλγόριθμος εξομαλυσμένης αντιστροφής. Όταν το σχετικό σφάλμα μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων κατά την διάρκεια της αντιστροφής ήταν μικρότερο του 3%, τότε η διαδικασία αυτόματα σταματούσε, το οποίο σήμαινε ότι το ηλεκτρικό μοντέλο δεν επιδεχόταν επιπλέον βελτίωση. Επίσης κατά την επεξεργασία των μετρήσεων λήφθηκε επίσης υπόψη και η τοπική τοπογραφική μεταβολή του αναγλύφου.

Το τελικό στάδιο της επεξεργασίας περιλάμβανε την ανάλυση των γεωφυσικών ανωμαλιών και την δημιουργία διαγραμματικών χαρτών απεικόνισης των σημαντικότερων χαρακτηριστικών αυτών. Το τελικό αυτό στάδιο έγινε σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ArcGIS 9.3.).

Γενικές Παρατηρήσεις

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ερμηνεία των γεωφυσικών ανωμαλιών εξαρτάται από εμπειρικές γνώσεις και θεωρητικές υποθέσεις (μοντέλα). Τα αποτελέσματα της ερμηνείας δεν μπορούν να θεωρηθούν πάντα αδιάψευστα. Οι γεωφυσικές ανωμαλίες μπορούν να σχετίζονται με γεωλογικά ή επιφανειακά φαινόμενα και άλλες εξωγενείς παραμέτρους. Επίσης θα πρέπει να είναι κατανοητός ο περιορισμός των δυνατοτήτων των γεωφυσικών μεθόδων σε σχέση με την διακριτική τους ικανότητα (εντοπισμό και διάκριση αντικειμένων συγκεκριμένων διαστάσεων, συνήθως μικρότερων της δειγματοληψίας των μετρήσεων), το βάθος διασκόπησης (το οποίο έχει μία αντιστρόφως αναλογική σχέση με την χωρική ευκρίνεια των μεθόδων: δηλαδή μείωση της ανάλυσης με αυξανόμενο βάθος έρευνας), τις εδαφικές συνθήκες (ανάγκη καλού διαχωρισμού του αντικειμένου από το περιβάλλον εδαφικό πλαίσιο στο οποίο ανήκει), κ.α.

Μία μεθοδικότερη και αποτελεσματικότερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων των γεωφυσικών διασκοπήσεων μπορεί να επιτευχθεί με τη στενότερη συνεργασία γεωφυσικών και αρχαιολόγων, καθώς επίσης και με τη δειγματοληπτική επιβεβαίωση ή απόρριψη συγκεκριμένων γεωφυσικών ανωμαλιών ([Aitken 1974](#), [Sarris and Jones 2000](#)). Για την αποδοτικότερη αξιοποίηση των αποτελεσμάτων θα πρέπει να υπάρχει

συνεχής επικοινωνία μεταξύ της ομάδας των αρχαιολόγων και της αντίστοιχης των γεωφυσικών, έτσι ώστε η εξέταση και ερμηνεία των γεωφυσικών μετρήσεων να γίνεται διαδραστικά υπό το φως των αρχαιολογικών δεδομένων.

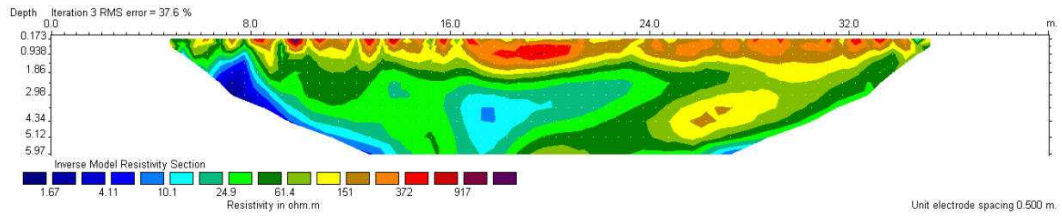


4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ

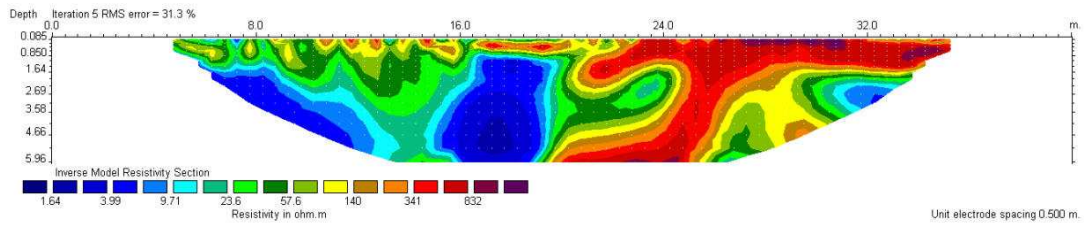
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η κάλυψη των γεωφυσικών καννάβων στην περιοχή του της Ιεράπετρας χρησιμοποιώντας τις μεθόδους της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ και της μαγνητικής τεχνικής



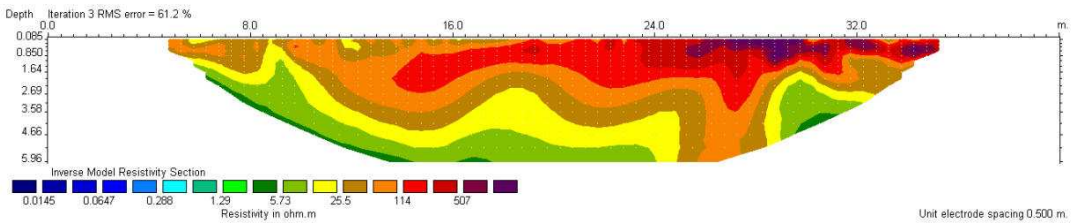
4.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΑΘΜΙΑΙΑ ΜΕΘΟΔΟ



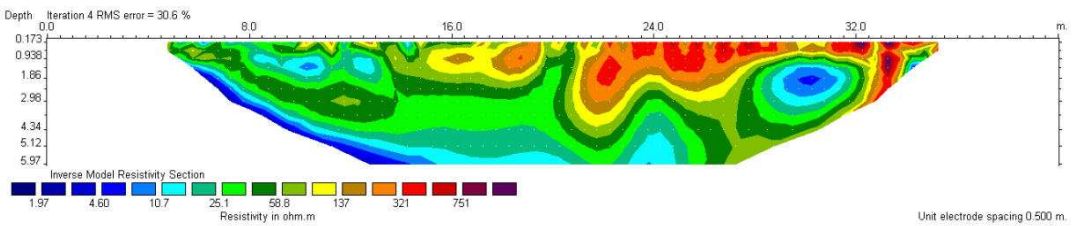
Σχήμα 4.1 , τομογραφία 1



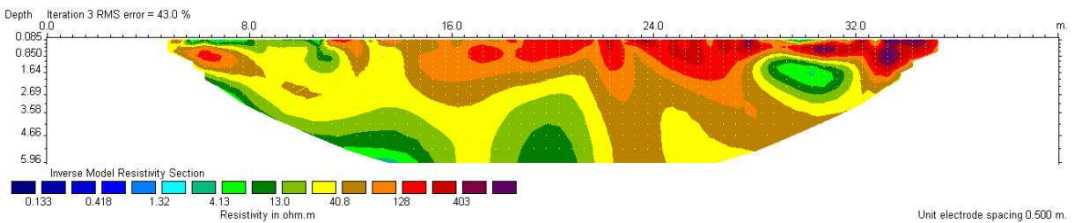
Σχήμα 4.2 , τομογραφία 2



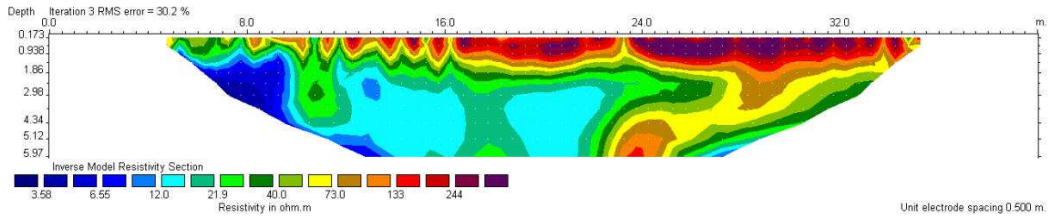
Σχήμα 4.3 , τομογραφία 3



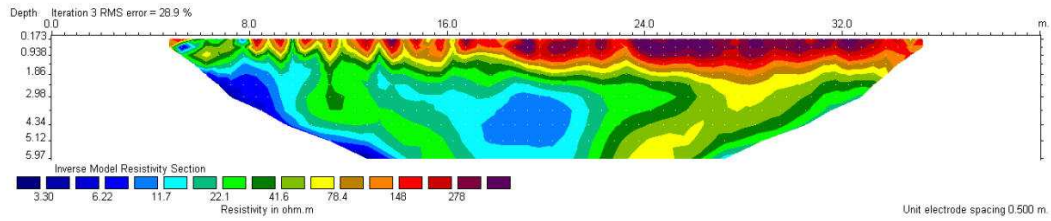
Σχήμα 4.4 , τομογραφία 4



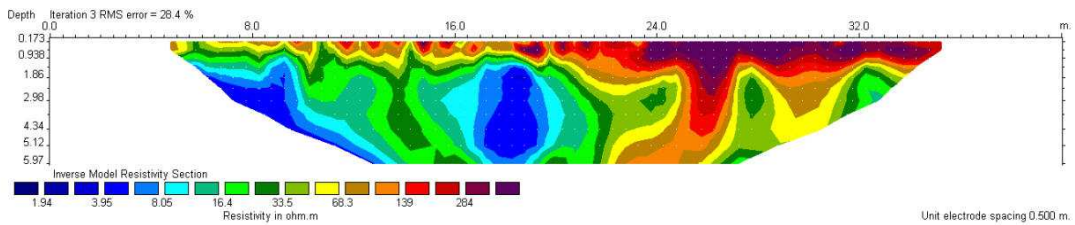
Σχήμα 4.5 , τομογραφία 5



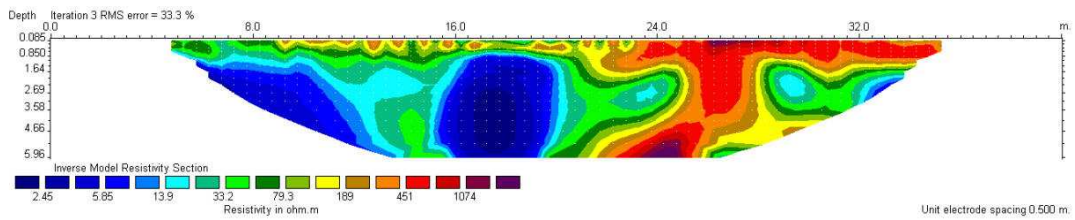
Σχήμα 4.6 , τομογραφία 6



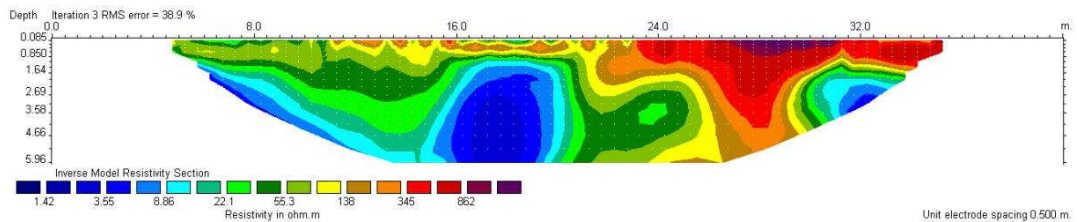
Σχήμα 4.7 , τομογραφία 7



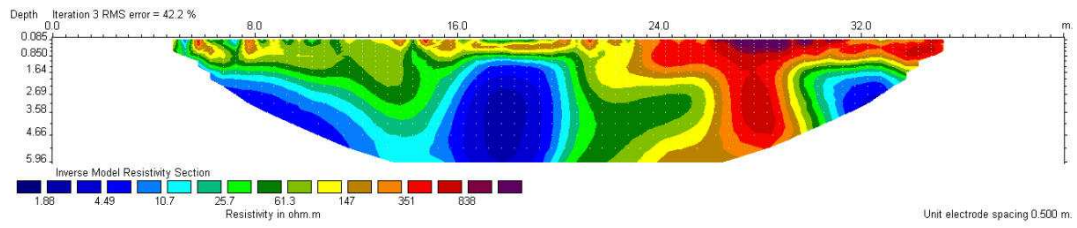
Σχήμα 4.8 , τομογραφία 8



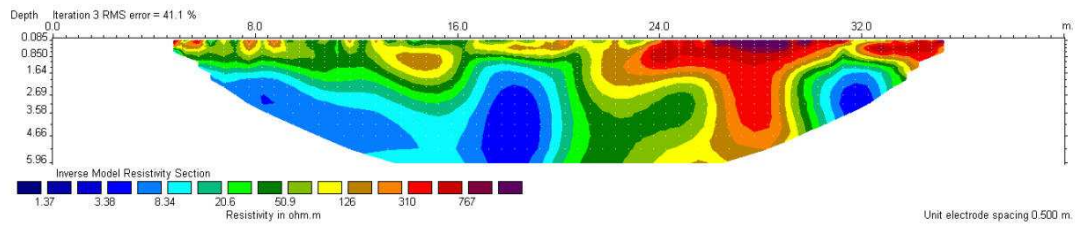
Σχήμα 4.9 , τομογραφία 9



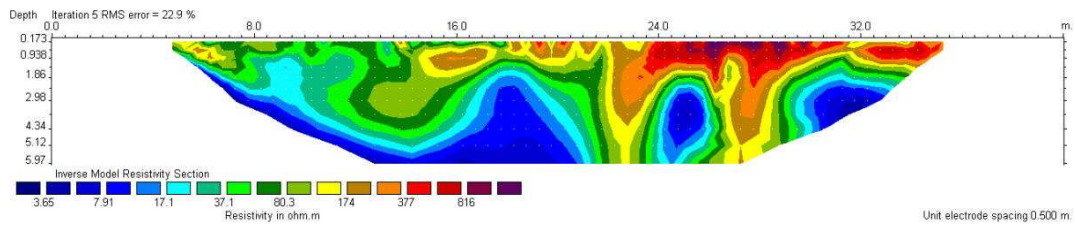
Σχήμα 4.10 , τομογραφία 10



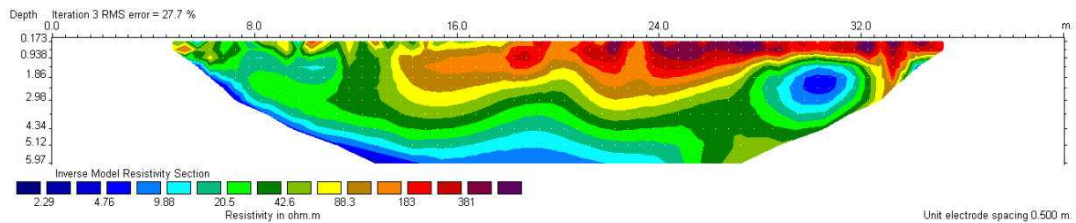
Σχήμα 4.11 , τομογραφία 11



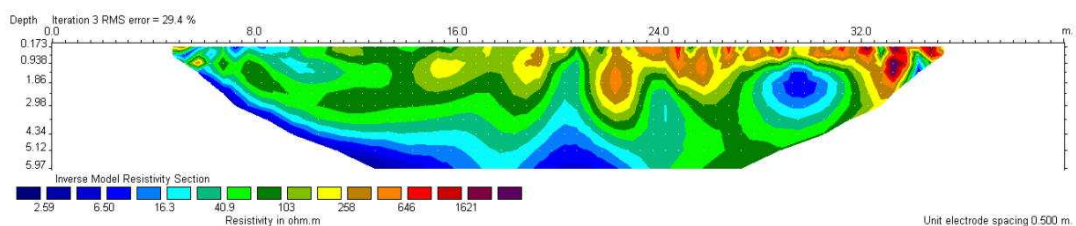
Σχήμα 4.12 , τομογραφία 12



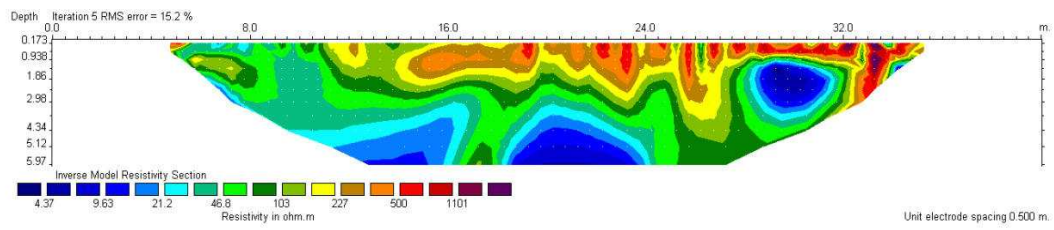
Σχήμα 4.13 , τομογραφία 13



Σχήμα 4.14 , τομογραφία 14



Σχήμα 4.15 , τομογραφία 15



Σχήμα 4.16 , τομογραφία 16