

2009

Γεωφυσική Έρευνα στη περιοχή του Σπηλαίου του Κιλκίς

Εμμανουήλ Λεμπιδάκης
Καραπαναγιώτου Ηρώ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ
ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ – ΤΟΜΕΑΣ

8/6/2010

Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της ευρύτερης αναγνωριστικής μελέτης στην περιοχή Αγίου Γεωργίου, όπου και βρίσκεται το σπήλαιο του Κιλκίς και ανατέθηκε στο τομέα Γεωφυσικής του τμήματος Γεωλογίας, από το Δήμο του Κιλκίς.

Η όλη μελέτη έγγειται στην προσπάθεια εύρεσης τυχόν υπογείων εγκοίλων, στοών και θαλάμων, πιθανές άγνωστες επεκτάσεις του ήδη υπάρχοντος σπηλαίου, με απότερο σκοπό την αξιοποίηση τους. Οι εργασίες υπαίθρου πραγματοποιήθηκαν σε δύο φάσεις, 16 Οκτωβρίου 2007 και 23 Μαΐου 2008.

Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους καθ. Γ.Ν. Τσόκα και Δρ. Α.Σταμπολίδη για την για την ανάθεση του θέματος, την καθοδήγηση, την υπομονή που έδειξαν ως επιβλέποντες της παρούσας διατριβής, καθώς και όλους όσους συμμετείχαν στις υπαίθριες εργασίες, για τη βοήθεια και τις γνώσεις που εκλάβαμε εξ'αυτών κατά τη διάρκεια των εργασιών στο ύπαιθρο.

Περιεχόμενα

Σελίδα

Πρόλογος

Εισαγωγή

1. Γεωλογικά και τεκτονικά στοιχεία της περιοχής του σπηλαίου

1.1. Γεωτεκτονική τοποθέτηση της περιοχής.....4

1.2. Δημιουργία σπηλαίων – Karst.....7

1.3. Η προστασία των σπηλαίων.....9

2. Θεμελιώδεις αρχές των ηλεκτρικών μεθόδων ηλεκτρικής διασκόπησης.

Εισαγωγή

2.1. Ηλεκτρικές ιδιότητες των πετρωμάτων.....10

2.1.1. Ειδική ηλεκτρική αντίσταση.....10

2.1.2. Φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση.....12

2.1.3. Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα.....14

2.2. Διατάξεις ηλεκτροδίων στις εργασίες υπαίθρου.....15

Γενικά

2.2.1. Διάταξη Wenner.....16

2.2.2. Διάταξη Shlumberger.....17

2.2.3. Διάταξη διπόλου – διπόλου.....18

2.2.4. Διάταξη πόλου – διπόλου.....19

2.2.5. Διάταξη πόλου – πόλου.....	19
2.3. Μέθοδοι καθορισμού ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.....	20
Εισαγωγή	
2.3.1. Βυθοσκόπηση (Vertical Electrical Sounding).....	21
2.3.2. Μέθοδος οριζοντιογραφίας (Profiling).....	22
2.3.3. Τομογραφία (Electrical Resistance Tomography).....	23
Α. Γενικά	
Β. Ψευδοτομές (Pseudosections)	
Γ. Ερμηνεία δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας	
3. Μετρήσεις Υπαίθρου	
Εισαγωγή	
3.1. Εξοπλισμός.....	29
3.2. Επεξεργασία – ανάλυση δεδομένων.....	31
3.3. Τομές και ερμηνεία τους.....	34
3.3.1. Τομή Κ1.....	35
3.3.2. Τομή Κ2.....	37
3.3.3. Τομή Κ3.....	38
3.3.4. Τομή Κ4.....	39
3.3.5. Τομή Κ5.....	41
4. Γενική θεώρηση – Συμπεράσματα	
5. Παράρτημα	
5.1. Μέθοδος υπεδαφίου ραντάρ (Ground Penetrating Radar).....	46
6. Βιβλιογραφία	

Εισαγωγή

Το περιεχόμενο της εργασίας περιλαμβάνει την παρουσίαση και ανάλυση των ηλεκτρικών γεωφυσικών διασκοπήσεων, συγκεκριμένα της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας και την εφαρμογή της, στη περιοχή του σπηλαίου του Κιλκίς, στην οποία και λαβαμε μέρος. Οι εργασίες μας στο ύπαιθρο περιέλαβαν την πραγματοποίηση μετρήσεων με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας, εφαρμόζοντας τις διατάξεις πόλου – διπόλου, πόλου – πολου, Wenner – Schlumberger.

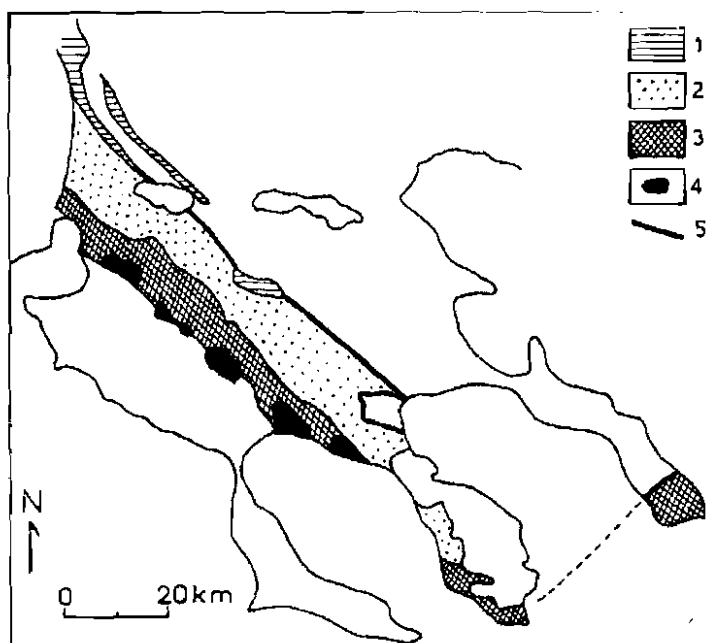
Ο τελικός σκοπός είναι να αποφανθούμε αν στη περιοχή κάτω απο τις οδεύσεις που πραγματοποιήσαμε, υπάρχουν τυχόντα έγκοιλα, στοές ή θάλαμοι, επεκτάσεις του υπάρχοντος σπηλαίου που βρίσκεται στη περιοχή μελέτης.

Κρίθηκε αναγκαίο στην εργασία αυτή, να συμπεριληφθεί η γεωλογία της περιοχής, το ειδικό γεωλογικό περιβάλλον των σπηλαίων (Karsts), καθώς επίσης και το στοιχειώδες θεωρητικό υπόβαθρο των γεωφυσικών μεθόδων, που χρησιμοποιήθηκαν στη διάρκεια των υπαίθριων εργασιών μας, για την αρτιότερη και σαφέστερη παρουσίαση και ανάλυση του παρόντος κειμένου.

εναλλασσόμενα ηφαιστειακά και ιζηματογενή υλικά ημιμεταμορφωμένα, δηλαδή χαλαζιακά πορφυροειδή, χαλαζιακούς σχιστολίθους, χαλαζίτες, ασβεστιτικούς σχιστόλιθους, πυροκλαστικά υλικά και σχιστοποιημένους ρυόλιθους. Η ανώτερη στάθμη της σειράς περιέχει μετακλαστικά ιζήματα, δηλαδή μεταψαμμίτες, μετακροκαλολατυποπαγή, μετααρκόζες και φυλλίτες.

Τέλος, συναντάμε ασβεστόλιθους ανακρυσταλλωμένους, ψαμμιτικούς και μαργαικούς με φύκη και κοράλλια, ανθρακικής νηριτικής φάσης απόθεσης, ηλικίας Μέσου Τριαδικού – Μέσου Ιουρασικού.

Στη περιοχή του σπηλαίου, συναντούμε τεφρούς, λευκούς, ημίλευκους έως κιτρινοπούς πλακώδεις ασβεστολίθους, καθώς και κοκκινωπούς – ροδόχρωμους πλατυκονδυλώδεις ασβεστολίθους (flaser).



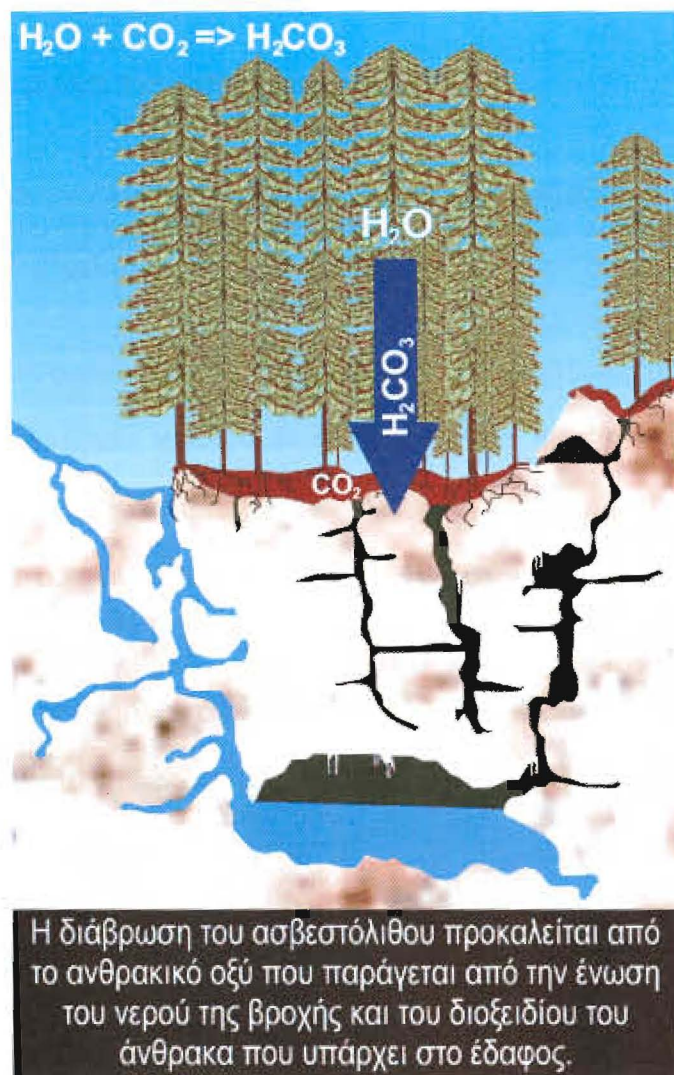
Εικ.2 – Η Περιοδοπική ζώνη στην οποία και ανήκει το σπήλαιο του Κιλκίς. 1.Ενότητα Ντεβέ Κοράν – Δουμπιά, 2. Ενότητα Μελισσχωρίου – Χολομώντα, 3. Ενότητα Άσπρης Βρύσης – Χορτιάτη, 4. Οφειόλιθοι. Γεωλογικά το σπήλαιο βρίσκεται στην ενότητα Ντεβέ Κοράν – Δουμπιά ή αλλιώς σχηματισμός Εξαμιλίου.

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από ρηξιγενή τεκτονική, καθώς απαντούν 3 ρήματα, με διεύθυνση Α – Δ, Β – Ν και ΔΒΔ – ΑΝΑ. Τα ρήματα αυτά αποτελούσαν ανοιχτό σύστημα διακλάσεων, διαπερνούμενο από το νερό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, με αποτέλεσμα τη συγκέντρωση υπογείων υδάτων, τα οποία επέδρεσαν σημαντικά στη δημιουργία του σπηλαίου.

1.2. Δημιουργία σπηλαίων - Karst

Η δημιουργία των σπηλαίων είναι εφικτή μόνον σε ασβεστολιθικά και δολομιτικά πετρώματα (πετρώματα που σαν κύριο συστατικό περιέχουν CaCO_3) και ονομάζεται Karst, από την ομώνυμη περιοχή της Γιουγκοσλαβίας. Μπορεί να οφείλεται είτε στην απευθείας επαφή του νερού επιφανειακά με τον ασβεστόλιθο, είτε σε υπόγεια νερά άλλων ιζηματογενών πετρωμάτων που οδηγούν σε αυτόν.

Έτσι το νερό με τη διαλυτική του ικανότητα, διαβρώνει τον ασβεστόλιθο και δημιουργεί τα σπήλαια. Ο ασβεστόλιθος επιτρέπει στο νερό να ακολουθεί μία διαδρομή εντός αυτού, στο χαμηλότερο επίπεδό του και να μη διεισδύει στο πέτρωμα. Αυτό οφείλεται στο ότι ο ασβεστόλιθος είναι πιο ευπαθής στη διάβρωση – διάλυση στις επαφές με γειτονικά πετρώματα (ασυνέχειες). Καθώς το νερό διαλύει το ανθρακικό ασβέστιο, μέσω της κυκλοφορίας του, το εναποθέτει σε άλλα σημεία των εγκοίλων, όπως στην οροφή ή στο δάπεδο και έτσι δημιουργούνται οι σταλακτίτες και οι σταλαγμίτες.



Εικ.3 – Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού γεννέσεως ενός σπηλαίου

Χαρακτηριστικές μορφές που μπορεί να λάβει η καρστικοποίηση είναι οι δολίνες, κωνικές μορφές διαφόρων διαστάσεων που οφείλονται στη πίεση που ασκείται στον ασβεστόλιθο. Οι όροι νέο, ώριμο, γηρασμένο karst, δίνονται αναλόγως με το στάδιο στο οποίο βρίσκεται και χαρακτηρίζονται από επιφανειακή ροή του νερού, στη μέγιστη ανάπτυξη του και ροή του νερού υπογείως, την σταδιακή εξαφάνιση των χαρακτηριστικών του, με εμφάνιση επιφανειακών πηγών και τέλος οριστική αδρανοποίηση.

Η διαδικασία αυτή είναι πάρα πολύ αργή και χρειάστηκαν πολλές χιλιάδες χρόνια για να δημιουργηθεί το θαύμα που αντικρίζουμε σήμερα.

1.3. Η προστασία των σπηλαίων

Τα σπήλαια αποτελούν μοναδικά φυσικά μνημεία με τεράστια και πολύπλευρη σημασία για τον άνθρωπο:

- Σαν καρστικοί αγωγοί επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα του πόσιμου νερού καθώς διοχετεύουν τα επιφανειακά νερά στον υδροφόρο ορίζοντα.
- Σαν φυσικά οικοσυστήματα αποτελούν κατοικία για πολλά και σπάνια είδη ζώων και φυτών.
- Αποτελούν χρονοκάψουλες που μας δίνουν τεράστιο αριθμό πληροφοριών, τόσο για την ιστορία του ανθρώπου, όσο και για τη γεωλογική ιστορία της γής.
- Έχουν σημαντικό ρόλο στην οικονομία της χώρας και αποτελούν σημαντικό κομμάτι της τουριστικής βιομηχανίας.

Το περιβάλλον των σπηλαίων είναι εξαιρετικά εύθραυστο και ευαίσθητο και κάθε ανθρώπινη επέμβαση σε αυτό μπορεί να είναι καταστροφική. Είναι χρέος όλων μας να σεβαστούμε και να προστατεύσουμε αυτά τα υπέροχα και ευάλωτα μνημεία της φυσικής κληρονομιάς, για να τα παραδώσουμε αναλλοίωτα στις μελλοντικές γενιές.

2. Θεμελιώδεις αρχές των ηλεκτρικών μεθόδων ηλεκτρικής διασκόπησης

Εισαγωγή

Οι μέθοδοι της ηλεκτρικής διασκόπησης έχουν ως βάση, τη μελέτη του τρόπου διάδοσης ηλεκτρικών ρευμάτων στο υπέδαφος, με μετρήσεις που γίνονται στην επιφάνεια. Οι περισσότερες εκ των μεθόδων βασίζονται στη διαφορετική ηλεκτρική αγωγιμότητα που παρουσιάζουν οι διάφοροι σχηματισμοί του υπεδάφους. Έτσι έχουμε υλικά που παρουσιάζουν μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως μεταλλικά κοιτάσματα, άργιλλοι, αλλούβια υλικά και άμμοι πληρωμένοι με νερό, ενώ χαμηλή αγωγιμότητα εμφανίζουν τα συμπαγή πετρώματα, όπως οι ασβεστόλιθοι του σπηλαίου Κιλκίς.

Έτσι στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι βασικοί όροι των μεθόδων, όπως η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, η φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση, ο τρόπος διάταξης των ηλεκτροδίων στις εργασίες υπαίθρου και η παρουσίαση της ηλεκτρικής τομογραφίας, συμπεριλαμβανομένων των εννοιών του ευθέως και αντιστρόφου προβλήματος, στο οποίο και βασίζεται η μέθοδος.

2.1. Ηλεκτρικές ιδιότητες των πετρωμάτων

2.1.1. Ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Το αντίστροφο φυσικό μέγεθος, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, είναι η ηλεκτρική αντίσταση, δηλαδή το μέτρο κατά το οποίο ένα σώμα αντιστέκεται στη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, στην οποία και βασίζεται η μέθοδος που εφαρμόστηκε είναι η ανηγμένη στο μήκος ηλεκτρική αντίσταση και ορίζεται ως:



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

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων και ορυκτών είναι μια από τις περισσότερο μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων και ορυκτών. Οι τιμές της κυμαίνονται από 10^{-6} 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 ορυκτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^{-6} και 10^{-1} Ohm·m και κακοί αγωγοί αυτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^8 και 10^{15} Ohm·m.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών του υπεδάφους κατά κύριο λόγο εξαρτάται από την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα, δηλαδή το ρεύμα διαρρέει τους γεωλογικούς σχηματισμούς μέσω των ιόντων που είναι διαλυμένα στο νερό που βρίσκεται στους πόρους τους. Ειδικότερα εξαρτάται από:

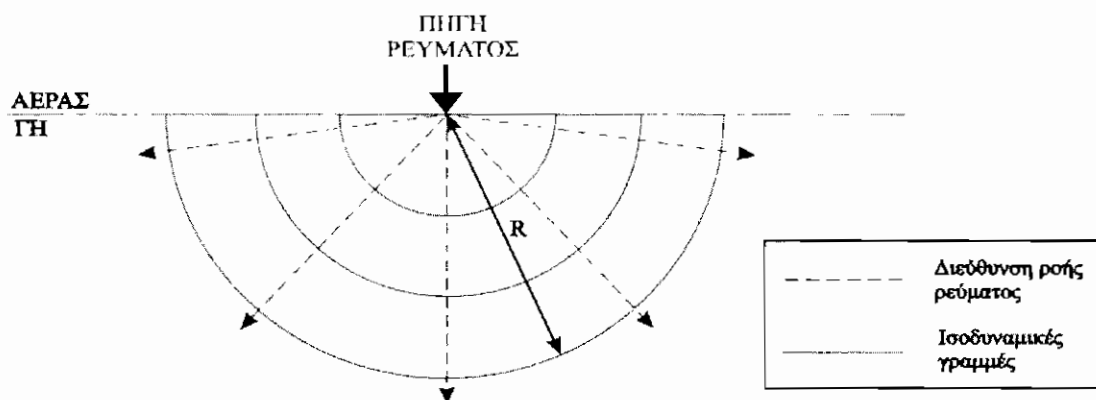
- Τις υδρολογικές-υδρογεωλογικές συνθήκες
- Τη χημική σύσταση του νερού
- Το μέγεθος των πόρων(πορώδες) των σχηματισμών

- Τις πιθανές διαρρήξεις-διακλάσεις-ρήγματα των συμπαγών σχηματισμών
- Την θερμοκρασία και την πίεση

2.1.2. Φαινόμενη ειδική αντίσταση

Η Γη και ιδιαίτερα τα ανώτερα στρώματα του φλοιού της είναι ανομοιογενή. Όμως για να κατανοήσουμε τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στα στρώματα αυτά πρέπει πρώτα να μελετήσουμε τη ροή αυτή μέσα σε ομογενές υπέδαφος.

Ας υποθέσουμε λοιπόν ότι εισάγουμε θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο (σημειακή πηγή) μέσα στο έδαφος, όπου είναι ομογενές και ισότροπο, τότε θα έχουμε ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη Γη.



Το ρεύμα αυτό ρέει ακτινικά διερχόμενο από ένα ημισφαίριο εμβαδού $S=2\pi r^2$, όπου r είναι η απόσταση της περιφέρειας του ημισφαιρίου από το σημείο εισαγωγής του ρεύματος. Οι ισοδυναμικές επιφάνειες έχουν σχήμα ημισφαιρίου και οι γραμμές του ρεύματος είναι κάθετες στις ισοδυναμικές επιφάνειες (Σχήμα 1.3.1). Επειδή μάλιστα ο αέρας έχει πολύ υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση (πρακτικά άπειρη σε σχέση με το έδαφος), μπορούμε να θεωρήσουμε

χωρίς κίνδυνο σφάλματος, ότι το ρεύμα διαδίδεται μόνο στο έδαφος κάτω από το ηλεκτρόδιο σχηματίζοντας ένα συνεχώς διογκούμενο ημισφαίριο με κέντρο το ηλεκτρόδιο. Η αντίσταση του ημιχώρου μπορεί να βρεθεί από τη σχέση:

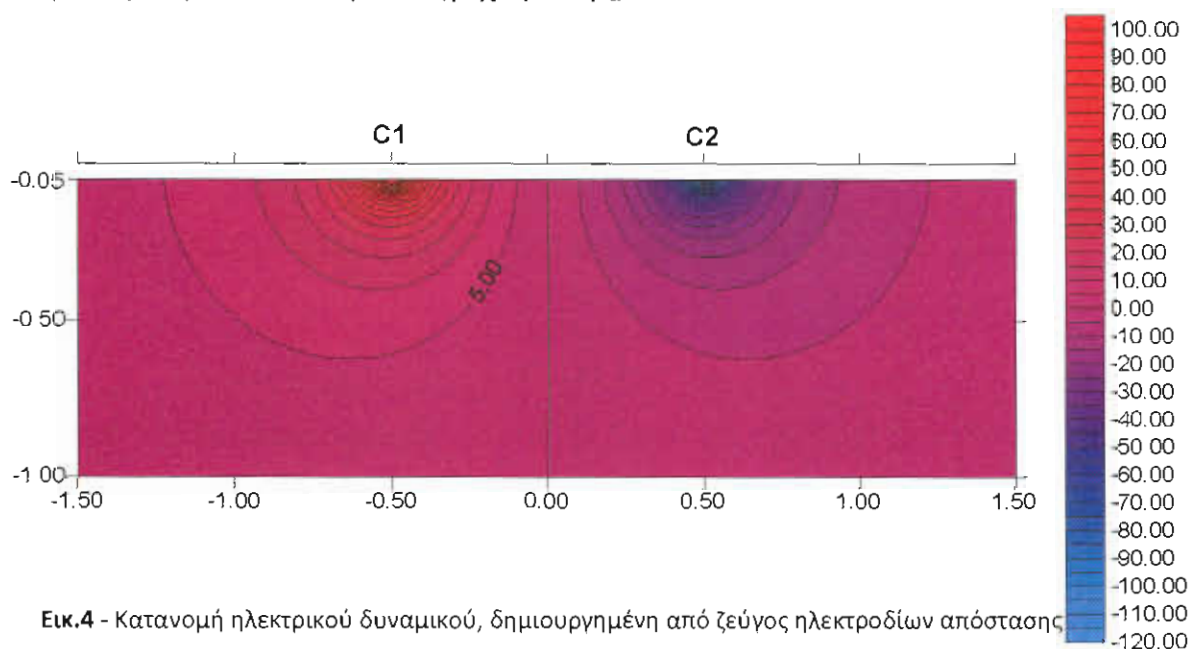
$$\rho = \frac{2\pi}{K} \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

όπου ΔV η διαφορά δυναμικού, I η ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, K ένας παράγοντας ο οποίος λέγεται γεωμετρικός παράγοντας και εξαρτάται από τη διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων.

Στην περίπτωση ομογενούς και ισότροπου εδάφους και για οποιαδήποτε διάταξη ηλεκτροδίου, όταν ο γεωμετρικός παράγοντας πολλαπλασιάζεται με τη μετρούμενη αντίσταση, το αποτέλεσμα είναι η πραγματική αντίσταση του εδάφους.

Στην περίπτωση μη ομογενούς και ισότροπου χώρου η σχέση

$\rho = \frac{2\pi}{K} \cdot \frac{\Delta V}{I}$, ορίζει μια παράμετρο που ονομάζεται φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση του ημιχώρου ρ_a .



Εικ.4 - Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού, δημιουργημένη από ζεύγος ηλεκτροδίων απόστασης 1 m, εντάσεως 1 Ampere και ομογενή ημιχώρου ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 1 Ω.m.

Η παράμετρος αυτή εισάγεται για να ληφθεί υπόψη η γεωμετρία της μέτρησης, οι θέσεις δηλαδή των ηλεκτροδίων. Η φαινόμενη αντίσταση δεν είναι η πραγματική αντίσταση του υπεδάφους, αλλά μια φαινόμενη τιμή η οποία είναι η αντίσταση που θα είχε το έδαφος αν ήταν γεωηλεκτρικά ομογενές. Η τιμή αυτή ταυτίζεται με την πραγματική αντίσταση όταν πρόκειται για ομογενή Γη.

2.1.3. Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η συμπεριφορά της Γης στη διέλευση του ρεύματος περιγράφεται και από έναν άλλο όρο, την ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα σ , η οποία είναι το αντίστροφο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και αντικατοπτρίζει την ευκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα στο υπέδαφος. Δίνεται από τον τύπο:

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

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

Η αγωγιμότητα, εκτός από το είδος του υλικού, εξαρτάται και από τη θερμοκρασία. Για να ανάγουμε τις μετρούμενες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας/αντίστασης διαφορετικών θερμοκρασιών, στην ίδια θερμοκρασία, χρησιμοποιούμε το τύπο:

$$\sigma_{T'} = \frac{\sigma_T}{1 + \alpha(T - T')}$$

Όπου, T η θερμοκρασία μέτρησης σε Kelvin, α σταθερά του υλικού, T' η τιμή της θερμοκρασίας στην οποία θέλουμε να ανάγουμε τα δεδομένα μας, σ_T η αγωγιμότητα στη μετρούμενη θερμοκρασία, $\sigma_{T'}$ η αγωγιμότητα στη νέα θερμοκρασία.

2.2. Διατάξεις ηλεκτροδίων στις εργασίες πεδίου

Γενικά

Στη πράξη χρησιμοποιούνται διάφορες διατάξεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στην ίδια ευθεία γραμμή. Τα ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετούνται συνήθως εξωτερικά των ηλεκτροδίων δυναμικού.

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

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

Τύπος διάταξης	Λόγος Σήματος / Θόρυβο	Ανίχνευση πλευρικών μεταβολών	Ανίχνευση εις βάθος μεταβολών
Wenner	1	5	1
Schlumberger	2	4	1
Dipole-Dipole	5	2	2
Pole-Dipole	4	3	2
Gradient	3	1	5
Κωδικός: 1=βέλτιστη 5=χειρίστη			

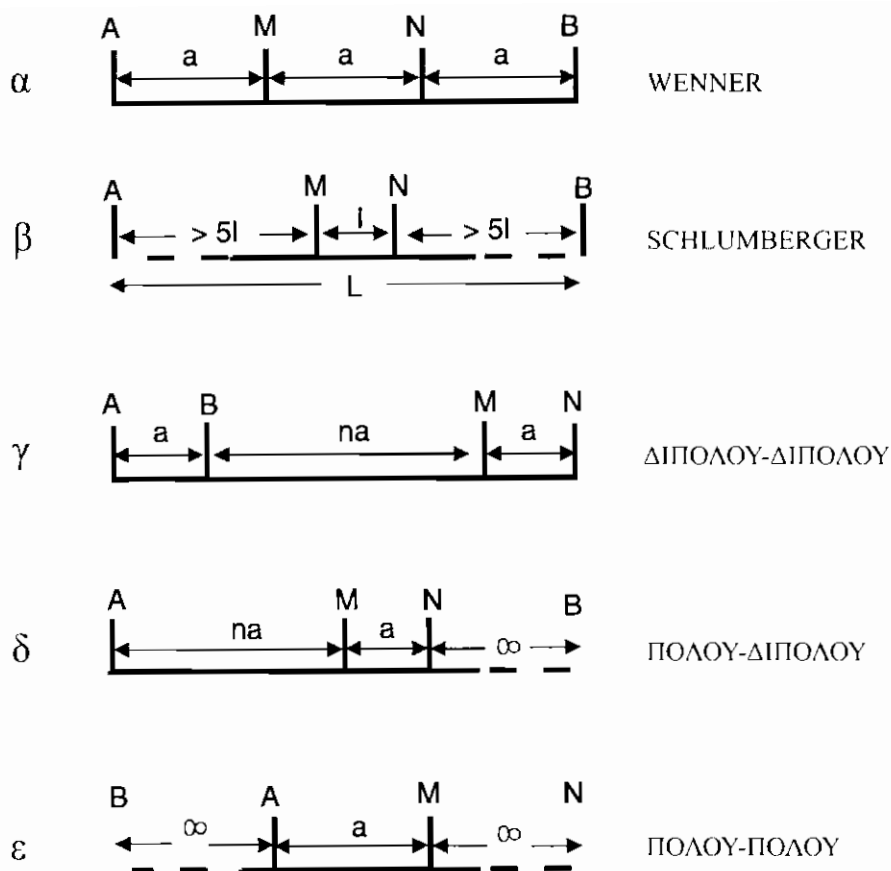
Πίνακας 1 – Σύγκριση των διαφόρων τύπων διάταξης ηλεκτροδίων στις εργασίες υπαίθρου.

2.2.1. Διάταξη Wenner

Κατά τη διάταξη αυτή λαμβάνονται $AM=MN=BN=a$, δηλαδή, τα ηλεκτρόδια δυναμικού M,N διατάσσονται συμμετρικά σε ορισμένη γραμμή (Σχήμα 5.α.). Από τον παράγοντα $K = \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$, προκύπτει ότι $K = \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right) = \frac{1}{a}$ και επομένως η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από την σχέση:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{i}$$

Η διάταξη Wenner, παρά τη γεωμετρική της απλότητα, παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων κυρίως γιατί πρέπει να μετακινούμε όλα τα ηλεκτρόδια κατά την πραγματοποίηση νέας μέτρησης και έχει επίσης η διάταξη αυτή και ορισμένα μειονεκτήματα κατά την ερμηνεία των παρατηρήσεων για θεωρητικούς λόγους.



Εικ.5 - Σχηματική απεικόνιση των διαφόρων διατάξεων ηλεκτροδίων στις εργασίες υπαίθρου.

2.2.2. Διάταξη Schlumberger

Η διάταξη αυτή είναι παρόμοια με την διάταξη Wenner, αλλά τα ηλεκτρόδια ρεύματος είναι τοποθετημένα σε απόσταση πολύ μεγαλύτερη από την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού (Σχήμα 5.β.). Αν η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος είναι $2L$, η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι $2l$ και ισχύει $L \geq 10l$, τότε η φαινόμενη αντίσταση είναι:

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

Η διάταξη Schlumberger εφαρμόζεται περισσότερο από όλες τις άλλες διατάξεις, επειδή παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως είναι το ότι απαιτείται η μεταβολή της απόστασης μόνο των δύο ηλεκτροδίων κατά την γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση, το ότι η χρησιμοποίηση σταθερού διπόλου τάσης περιορίζει ανεπιθύμητες επιδράσεις στις μετρήσεις που προκαλούνται από γεωλογικές πλευρικές ασυνέχειες και ότι το μεγαλύτερο μέρος του διαθέσιμου σήμερα βοηθητικού υλικού (καμπύλες, προγράμματα Η/Υ) για την ερμηνεία των παρατηρήσεων έγινε για την εφαρμογή σε διάταξη Schlumberger.

2.2.3. Διάταξη διπόλου - διπόλου

Στη διάταξη αυτή τα ηλεκτρόδια ρεύματος βρίσκονται σε μικρή απόσταση, $AB=a$, μεταξύ τους, αλλά είναι απομακρυσμένα από τα ηλεκτρόδια δυναμικού, δηλαδή, απέχουν από αυτά σημαντική απόσταση, $BN=na$, ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού απέχουν, συνήθως, την ίδια μικρή απόσταση, $MN=a$. (Σχήμα 5.γ.). Η φαινόμενη αντίσταση για αυτή την διάταξη είναι:

$$\rho_a = -\pi \cdot n \cdot (n+1) \cdot (n+2)a \cdot \frac{\Delta V}{i}$$

Η διάταξη αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι η απόσταση na , 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, όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις των διατάξεων Wenner και Schlumberger. Οι μετρήσεις κατά την

εφαρμογή της μεθόδου αυτής πραγματοποιούνται με αύξηση του n κατά βήματα.

2.2.4. Διάταξη πόλου - διπόλου

Τα ηλεκτρόδια δυναμικού βρίσκονται μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος, αλλά ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος, λόγω χάρη το Β, είναι τοποθετημένο σε απόσταση πολύ μεγαλύτερη από τα υπόλοιπα τρία ηλεκτρόδια (Σχήμα 5.δ.). Με τον τρόπο αυτό, οι αποστάσεις ΒΜ και ΒΝ θεωρούνται άπειρες και συνεπώς οι όροι $1/ΒΜ$ και $1/ΒΝ$ είναι πρακτικά μηδέν. Αν η απόσταση ΜΝ είναι ίση με a και η απόσταση ΑΜ ίση με $n a$, τότε η φαινόμενη αντίσταση είναι:

$$\rho_{\alpha} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot (n + 1) \cdot a \cdot \frac{\Delta V}{i}$$

2.2.5. Διάταξη πόλου - πόλου

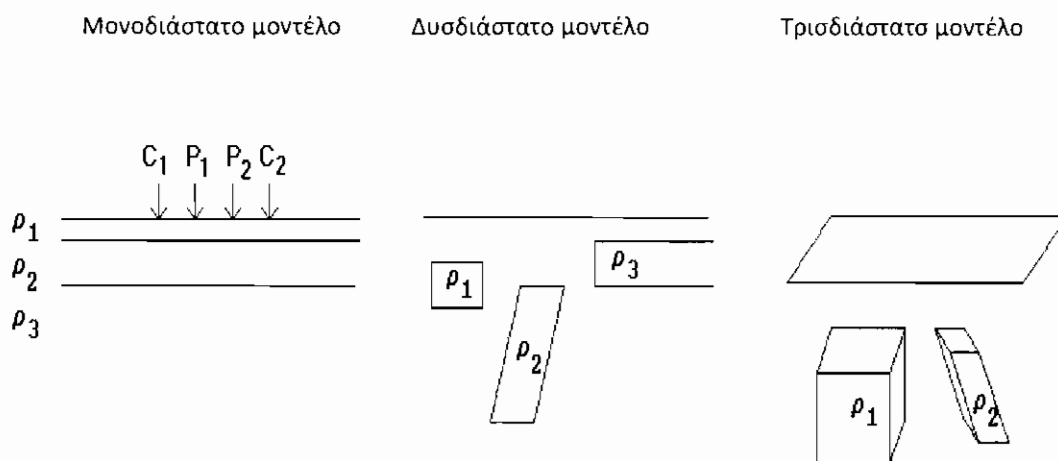
Η διάταξη αυτή αποτελεί μια επιυπλήον διαφοροποίηση της διάταξης πόλου-διπόλου και λαμβάνεται με μετακίνηση και ενός εκ των ηλεκτροδίων δυναμικού, λόγω χάρη του Ν, σε άπειρη απόσταση από τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια Α,Μ (Σχήμα 5.ε.). Επομένως, οι αποστάσεις που θεωρούνται άπειρες είναι οι ΒΜ, ΒΝ και ΑΝ. Αν ΑΜ= a , ο γεωμετρικός παράγοντας γίνεται $K=1/a$, που είναι ίδιος με τον γεωμετρικό παράγοντα της διάταξης Wenner και η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{\alpha} = 2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta V}{i}$$

2.3. Μέθοδοι καθορισμού ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Εισαγωγή

Το πρόβλημα του προσδιορισμού της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τις μετρούμενες μεταβολές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης, έχει μονοσήμαντη λύση μόνο στη περίπτωση που η ειδική αντίσταση παραμένει σταθερή κατά την οριζόντια έννοια και μεταβάλλεται μόνο με το βάθος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πιθανά λάθη στο μοντέλο των στρωμάτων ή/και λάθος στο πάχος. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται προσδιορίζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση στη μία διάσταση, στο επίπεδο ή στο χώρο.



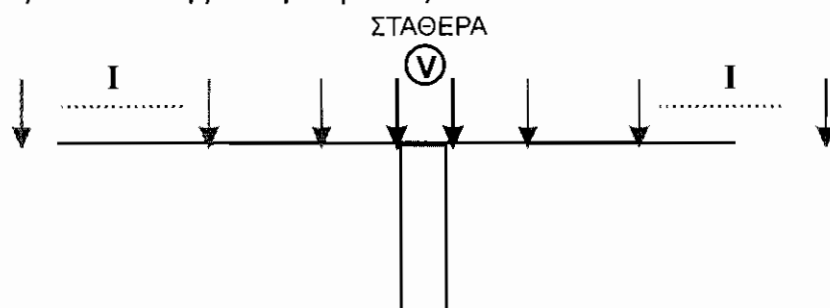
Σχ.2 – Αναπαράσταση 1D, 2D, 3D μοντελοποίησης υπεδάφινων ηλεκτρικών ανωμαλιών

Έτσι για το προσδιορισμό οριζόντιων μεταβολών χρησιμοποιείται η μέθοδος της οριζοντιογραφίας (profiling) και για τις μεταβολές βάθους η βυθοσκόπηση. Η ηλεκτρική τομογραφία είναι μια σχετικά νέα μέθοδος, που συνδυάζει τις δύο παραπάνω μεθόδους, η οποία χρησιμοποιεί τις γνωστές διατάξεις ηλεκτροδίων και αποδίδει γραφικά (ψευδοτομές) τις μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης,

βασισμένη στη λύση του αντιστρόφου προβλήματος γεωφυσικών δεδομένων.

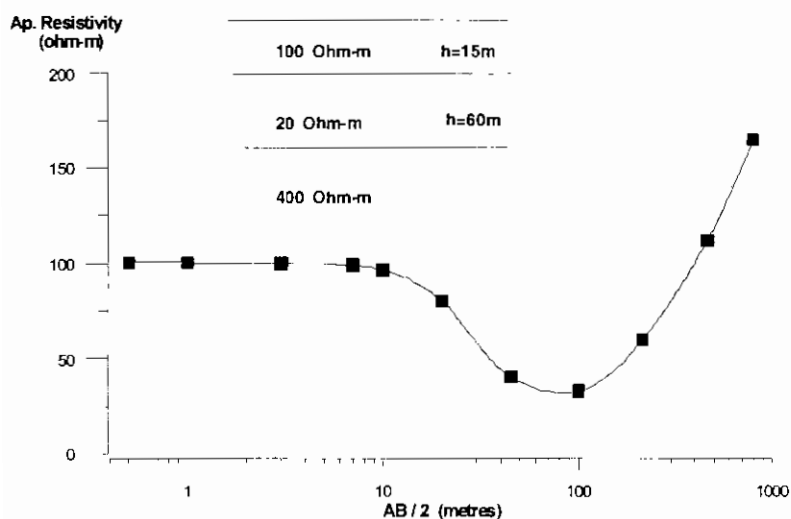
2.3.1. Βυθοσκόπηση (Vertical Electrical Sounding)

Με τη μέθοδο της βυθοσκόπησης (sounding) λαμβάνεται μια σειρά μετρήσεων με συνεχώς αυξανόμενες τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος, ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού είναι σταθερά. Με τη συνεχή αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης του ρεύματος.



Σχ.3 – Αρχή της μεθόδου βυθοσκόπησης.

Επίσης με την αύξηση του βάθους μειώνεται η διακριτική ικανότητα. Στην περίπτωση των βυθοσκοπήσεων χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά η διάταξη μέτρησης Schlumberger. Κλασσικό πεδίο εφαρμογής της μεθόδου αυτής αποτελεί η έρευνα για τον εντοπισμό των υδροφόρων σχηματισμών



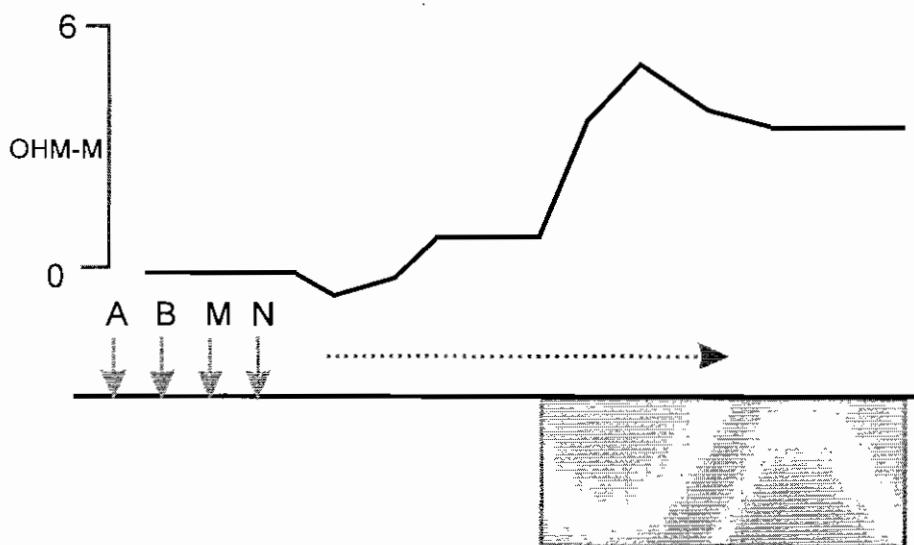
Σχ.4 – Με τη βοήθεια

προγραμμάτων, όπως το IP2WIN, προσπαθούμε να ταυτίσουμε μία θεωρητική καμπύλη με αυτή των δεδομένων που πάρθηκαν από τη διασκόπηση. Το αποτέλεσμα της βέλτιστης ταύτισης είναι

και το τείκτο μοντέλο και με βάση αυτό γίνεται η ερμηνεία.

2.3.2. Μέθοδος οριζοντιογραφίας (Profiling)

Η μέθοδος της όδευσης-οριζοντιογραφίας (profiling) χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό πλευρικών μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίθετα με τη βυθοσκόπηση, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές και λαμβάνεται μια σειρά μετρήσεων με πλευρική μετακίνηση της διάταξης των ηλεκτροδίων με σταθερό βήμα.



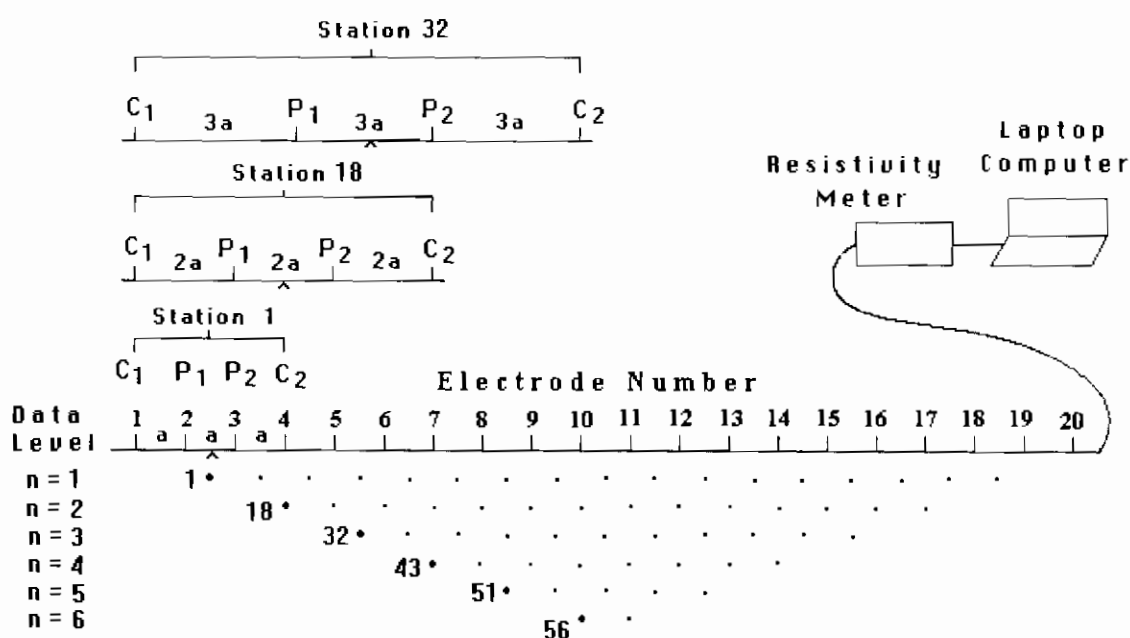
Σχ.4 - Μέθοδος όδευσης-οριζοντιογραφίας.

Έτσι χαρτογραφούνται οι μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σταθερό βάθος σε μια έκταση ή ευθεία και εντοπίζονται οι δομές που παρουσιάζουν διαφορετική αντίσταση με το περιβάλλον τους. Χρησιμοποιούνται κυρίως οι διατάξεις Wenner, διπόλου-διπόλου και πόλου-διπόλου. Στη Γεωλογία χρησιμοποιείται στον εντοπισμό ρηγμάτων και αποτελεί κλασσική μέθοδο στην Αρχαιομετρία.

2.3.3. Τομογραφία (Electrical Resistance Tomography)

A. Γενικά

Η μέθοδος της διδιάστατης διασκόπησης-ηλεκτρικής τομογραφίας είναι ένας συνδυασμός των μεθόδων της βυθοσκόπησης και της όδευσης και είναι δυνατόν να πάρουμε πληροφορίες τόσο για την πλευρική όσο και για την εις βάθος μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτό γίνεται με διαδοχικές οριζοντιογραφίες ή συνεχόμενες ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις επάνω από την ίδια περιοχή με συνεχή αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων. Με τον τρόπο αυτό παίρνουμε μια διδιάστατη εικόνα της ερευνηθείσας περιοχής.



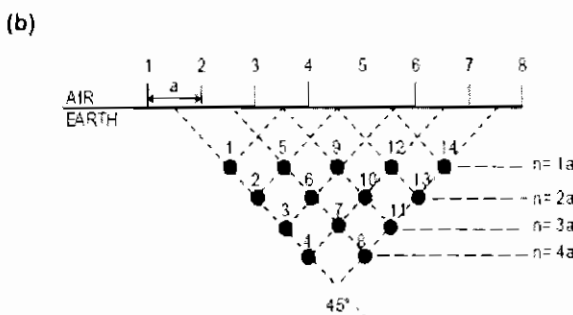
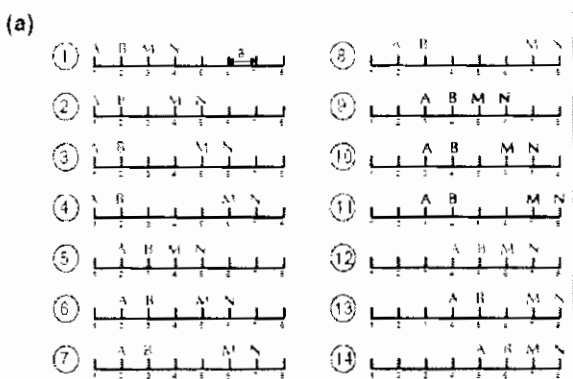
Sequence of measurements to build up a pseudosection

Σχ.5 - Μέθοδος διδιάστατης διασκόπησης.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι ότι σε σύγκριση με άλλες τεχνικές λαμβάνεται ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και ανάλυση της γεωηλεκτρικής μεθόδου. Όμως λόγω του μεγάλου αριθμού μετρήσεων είναι δύσκολο να ληφθούν με χειροκίνητη αλλαγή των ηλεκτροδίων και γι' αυτό χρησιμοποιούνται συστήματα αυτοματοποιημένων πολυπλεκτών.

B. Ψευδοτομές (Pseudosections)

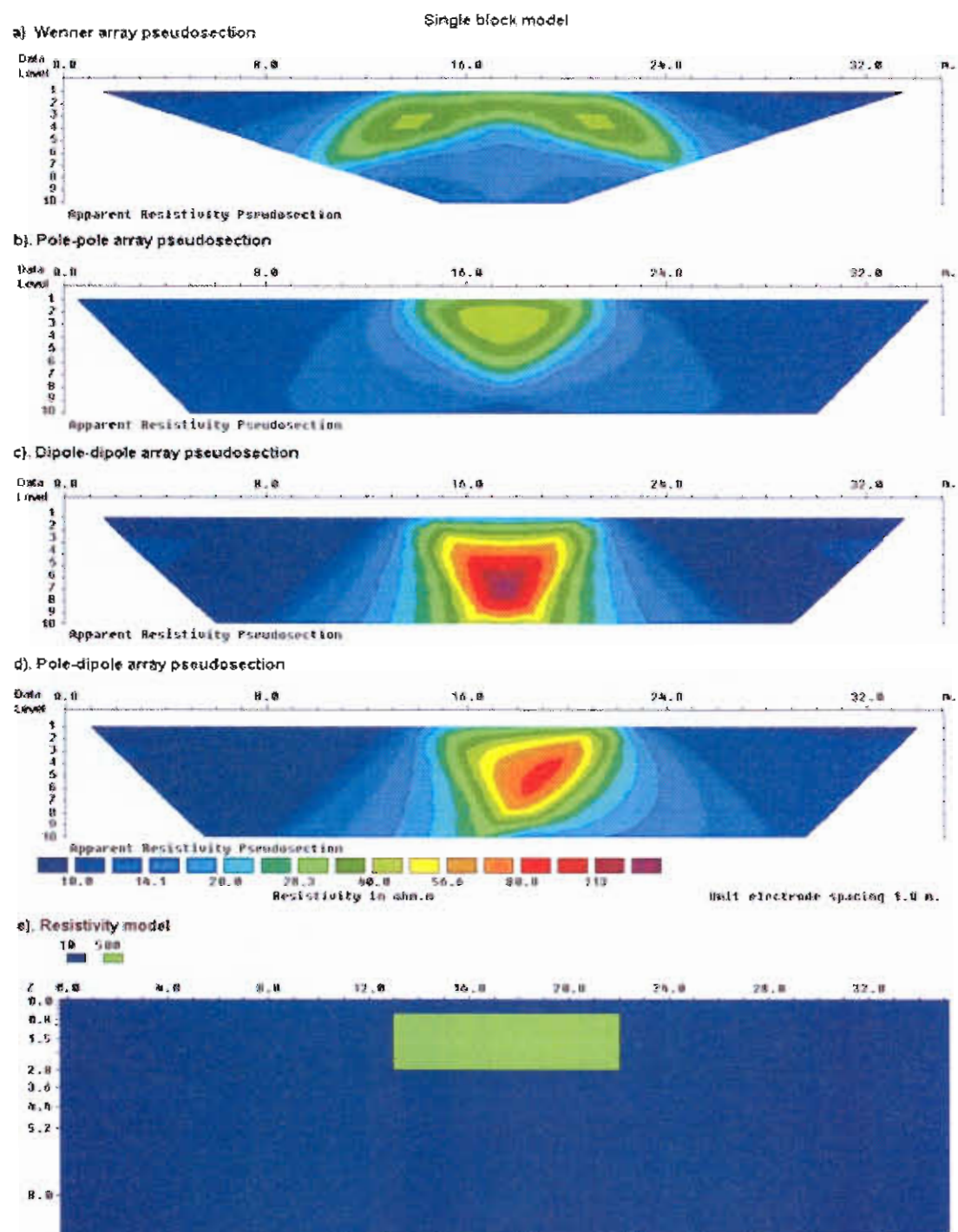
Πρόδρομος της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι η μέθοδος της 'ψευδοτομής'. Στην διαδικασία της 'ψευδοτομής' μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων όπως διπόλου-διπόλου, Wenner, πόλου-διπόλου.



Η εκτέλεση μιας γεωηλεκτρικής έρευνας δύο διαστάσεων περιλαμβάνει μια σειρά αρκετών και επίπονων μετρήσεων. Στο σχήμα φαίνονται τα στάδια μετακίνησης κάθε φορά των ηλεκτροδίων. Στην αρχή κρατούνται σταθερά τα ηλεκτρόδια ρεύματος και μετακινούνται αυτά του δυναμικού. Στη συνέχεια μετακινούνται και τα ηλεκτρόδια

ρεύματος. Η διαδικασία απλοποιείται, διότι χρησιμοποιούνται όργανα μέτρησις που αυτοματοποιούν τη διαδικασία αυτή.

Παρακάτω φαίνονται οι ψευδοτομές που σχεδιάστηκαν με το πρόγραμμα RES2DINV και δείχνουν τις παρατηρηθείσες μετρήσεις με τις διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων που προαναφέρθηκαν καθώς και το μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που προκύπτει, για ορθογώνιο πρίσμα.



Εικ.6 – Διαφορές στην εικόνα των ψευδοτομών που δίδουν οι διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων για την ίδια υπεδάφια δομή. a) Wenner, b) Pole – pole, c) Dipole – dipole, d) Pole –dipole, e) Μοντέλο

Γ. Ερμηνεία δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας.

I) Γενικά

Η ερμηνεία των μετρήσεων πραγματοποιείται με την επίλυση του αντίστροφου γεωηλεκτρικού προβλήματος είτε με χρήση προσεγγιστικών μεθόδων, π.χ. μέθοδος Bristow μέθοδος Zhody-Barker, μέθοδος οπισθοπροβολής (Tsourlos et al. 1993), είτε με τη χρήση υπαρχόντων μη γραμμικών τεχνικών αντιστροφής (Tripp et al. 1984) που προσαρμόζονται στο πρόβλημα της ηλεκτρικής τομογραφίας (Shima 1990, Tsourlos et al. 1995).

I)



II)



Σχ.6 - Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας ερμηνείας των ηλεκτρικών δεδομένων

I) Επίλυση του ευθέως προβλήματος, II) Επίλυση αντιστρόφου προβλήματος

Η πλέον δημοφιλής τεχνική για την αποκατάσταση της πραγματικής εικόνας της γεωηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους είναι αυτή της αντιστροφής, η οποία χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα διπλωματική εργασία. Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο αντίστασης που να δίνει μετρήσεις που είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές. Προϋπόθεση η ύπαρξη μεθόδου επίλυσης του ευθέως προβλήματος, δηλαδή, να βρεθούν οι μετρήσεις, δοθείσης της κατανομής της αντίστασης.

II) Το αντίστροφο πρόβλημα στην ηλεκτρική τομογραφία

Η αναζήτηση των παραμέτρων που περιγράφουν μια υπεδάφια πηγή ανωμαλιών πεδίων, κατευθείαν από τις μετρήσεις των πεδίων αυτών, συνιστά το αντίστροφο πρόβλημα. Δηλαδή η εξαγωγή ενός μοντέλου ηλεκτρικής αντίστασης, απευθείας από τις μετρήσεις της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης, είναι το αντίστροφο πρόβλημα της ηλεκτρικής τομογραφίας. Σχηματικά το πρόβλημα περιγράφεται ως εξής:



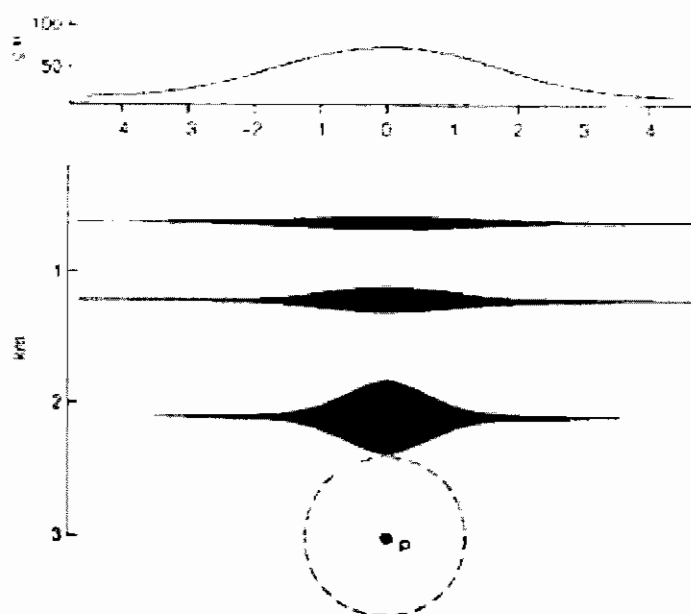
Μία γενική σχέση που περιγράφει τη σχέση του παραγόμενου πεδίου, σε σχέση με τη πηγή που το δημιουργεί είναι η:

$$f(P) = \int_V S(Q) \Psi(P, Q) dV$$

Όπου $f(P)$ είναι το πεδίο στο σημείο P , το οποίο προκαλεί κατανομή $S(Q)$, μέσα σε όγκο V . Εδώ θα μπορούσαμε να ταυτίσουμε το $f(P)$ με το ηλεκτρικό πεδίο και το $S(Q)$ με τη κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού

στο χώρο V . Η επίλυση της σχέσης ως προς τη κατανομή $S(Q)$, ονομάζεται ως γραμμικό αντίστροφο πρόβλημα, ενώ ο υπολογισμός του όγκου V , ως μή γραμμικό αντίστροφο πρόβλημα.

Η επίλυση του προβλήματος αυτού παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες όσον αφορά τις μετρήσεις δυναμικών πεδίων. Οι δυσκολίες οφείλονται στο γεγονός ότι άπειρες κατανομές της ηλεκτρικής αντίστασης μπορούν να προκαλέσουν την ίδια εικόνα στις μετρήσεις της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης, μετρούμενες στην επιφάνεια.



Σχ.7 – Το πρόβλημα Gauss. Για δοθέντα δεδομένα, αντιστοιχούν άπειρες υπεδάφινες δομές, διαφορετικού σχήματος, διαστάσεων, βάθους ταφής, τιμών πεδίου.

Στο σχήμα παρατηρούμε το πρόβλημα Gauss, δηλαδή το πρόβλημα κατά το οποίο μία παρατηρηθείσα (μετρούμενη) κατανομή ενός πεδίου, έχει ως αποτέλεσμα άπειρες ερμηνείες. Για την συγκεκριμενοποίηση του μοντέλου, βασιζόμαστε και σε πρόσθετες πληροφορίες, όπως άλλες γεωφυσικές μέθοδοι και γεωλογικά δεδομένα.

3. Μετρήσεις υπαίθρου

Εισαγωγή

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο φάσεις, οκτώβριος 2007 και Μάιος 2008. Συνολικά έγιναν 5 τομές, δύο διεύθυνσης Α-Δ (Κ1, Κ2), δύο με διεύθυνση Β-Ν (Κ4, Κ5) και μία ΒΔ-ΝΑ (Κ3).

3.1. Εξοπλισμός

Για την εκτέλεση των γεωφυσικών μετρήσεων υπαίθρου χρησιμοποιήθηκε το όργανο SYSCAL (V11.4++) της εταιρείας IRIS INSTRUMENTS. Πρόκειται για πλήρως αυτοματοποιημένο όργανο μέτρησης αντίστασης σχεδιασμένο για έρευνα με μεθόδους συνεχούς ρεύματος.



Εικ.7 - Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στο ύπαιθρο με όργανο λήψης ηλεκτρικών μετρήσεων SYSCAL (V11.4++) της εταιρείας IRIS INSTRUMENTS.

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.

Το συγκεκριμένο όργανο έχει μέγιστη ισχύ εξόδου 100VA και επιτυγχάνει τη δημιουργία ρεύματος με ένταση που φτάνει τα 500 mA, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις επιτρέπει και σημαντικά μεγαλύτερες εντάσεις ηλεκτρικού ρεύματος, έως και 1200 mA. Το όργανο μέτρησης χρησιμοποιεί τόσο εσωτερικές όσο και εξωτερικές μπαταρίες.

Για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν σε θέσεις κατάλληλα πολύκλινα καλώδια 24 θέσεων τα οποία κατασκευάστηκαν από χαλκό. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν ειδικά χάλκινα ηλεκτρόδια, υψηλής μηχανικής αντοχής και υψηλής αγωγιμότητας.



Εικ.8 - Τοποθέτηση χάλκινων ηλεκτροδίων.

3.2. Επεξεργασία – ανάλυση δεδομένων

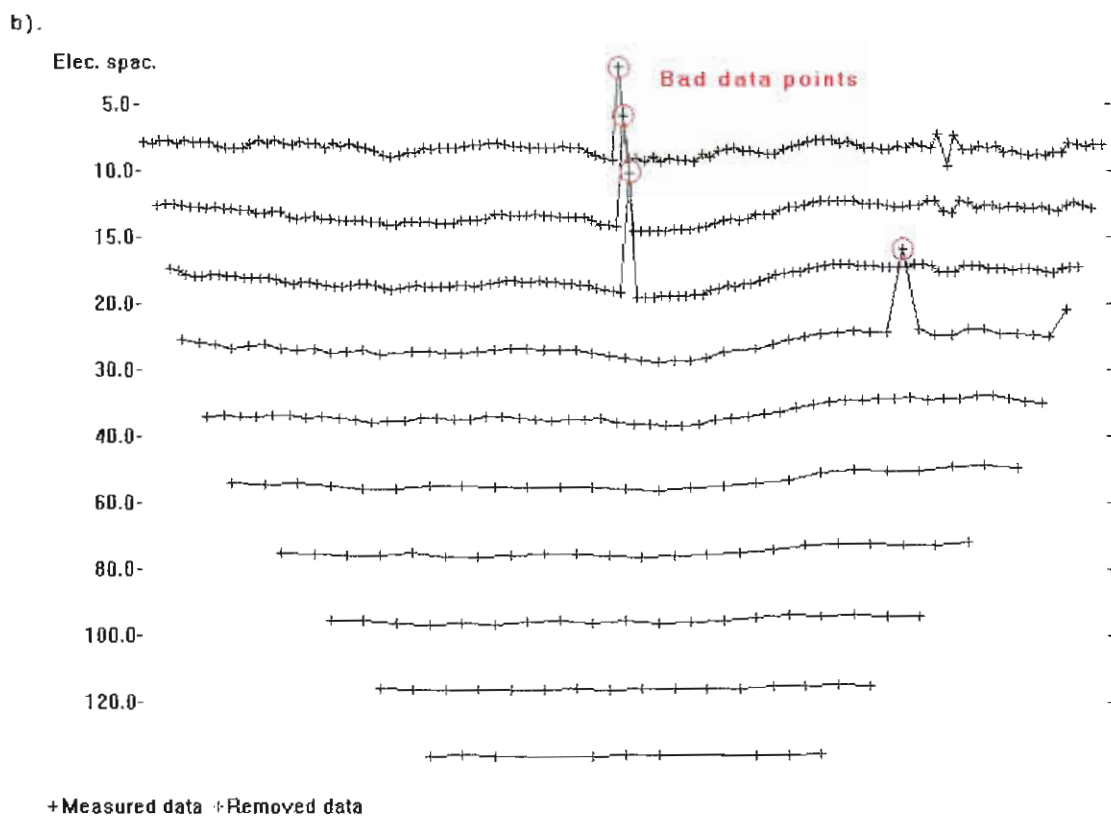
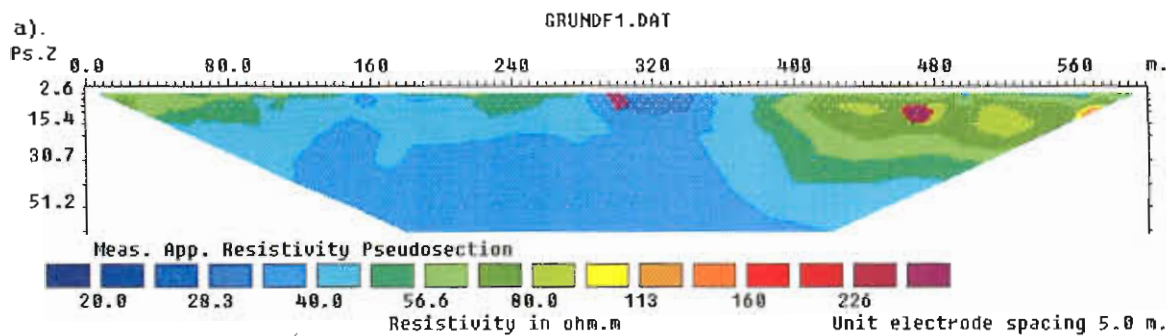
Για την επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

Η ανάλυση των δεδομένων γίνεται με το πρόγραμμα RES2DINV. Το πρόγραμμα διαβάζει τα αρχεία εξόδου του μηχανήματος της διασκόπησης, τα οποία είναι σε μορφή *.DAT. Αρχικά γίνεται η μεταφορά των μετρήσεων υπαίθρου από το όργανο μέτρησης στον υπολογιστή. Πρωτού ξεκινήσουμε κάθε διαδικασία, ελέγχουμε τα αρχεία DAT, για τυχόν λάθη, ανοίγοντάς τα με Notepad. Στη τέταρτη γραμμή, ελέγχουμε τη τιμή και θέτουμε τη σωστή, που αντιστοιχεί στο σωστό array, δηλαδή στη σωστή διάταξη ηλεκτροδίων, σύμφωνα με το παρακάτω πίνακα.

<u>LANDFILL.DAT file</u>	<u>Comments</u>
LANDFILL SURVEY	Line 1- Name of survey line
3.0	Line 2 - Smallest electrode spacing
1	Line 3 - Array type (Wenner = 1, Pole-pole = 2, Dipole-dipole = 3, Pole-dipole = 6, Schlumberger = 7 Equatorial dipole- dipole - 8)
334	Line 4 - Total number of data points
1	Line 5 - Type of x-location for data points. Enter 0 if location of first electrode in array used to indicate the x-location. Enter 1 if mid-point of the array (i.e. location of data point in pseudosection) is used.
0	Line 6 - Flag for IP data (enter 0 for resistivity data only)
4.50 3.0 84.9	Line 7 - The x-location, electrode spacing and measured apparent resistivity value for the first data point.
7.50 3.0 62.8	Line 8 - The x-location, electrode spacing and measured apparent resistivity value for the second data point.

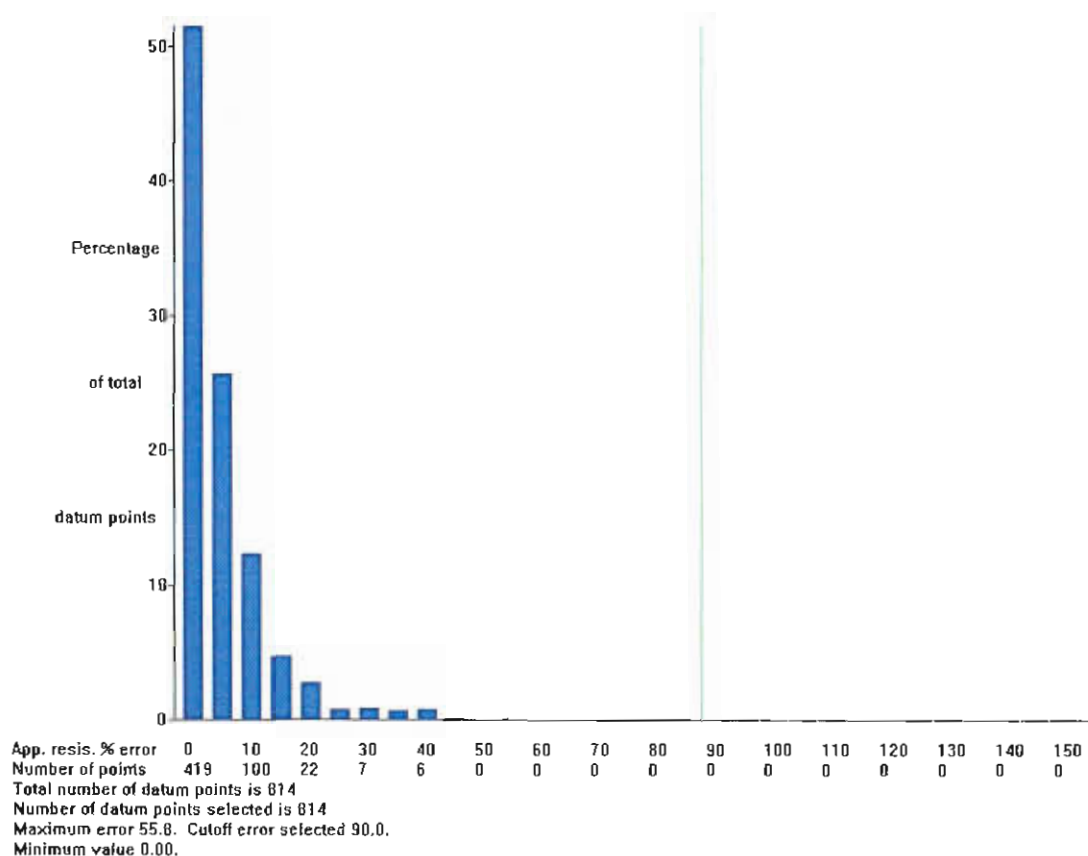
Πίνακας 2. Η κάθε γραμμή στα αρχεία που δημιουργεί το όργανο, αντιστοιχεί και σε κάποια συγκεκριμένη παράμετρο.

Πρωτού εφαρμόσουμε την διαδικασία της αντιστροφής των δεδομένων, εισερχόμαστε στη διαδικασία εκσφαλμάτωσης των δεδομένων μας.



Εικ.9 – Κατά τη διαδικασία εκσφαλμάτωσης των δεδομένων, αφαιρούμε αυτά τα οποία καθιστούν λανθασμένες θέσεις ηλεκτροδίων και τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Με αυτό το τρόπο ελαχιστοποιούμε τα τυχόντα σφάλματα στην ερμηνεία.

Αφού διαβάσουμε το αρχείο DAT, το οποίο και διορθώσαμε, δίνουμε στο πρόγραμμα την εντολή, «exterminate bad datum points», με την οποία μπορούμε να αφαιρέσουμε σημεία τα οποία περιέχουν σφάλματα στις μετρήσεις. Η διαδικασία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Συνεχίζουμε αποθηκεύοντας το διορθωμένο αρχείο.



Σχ.8 – Απομόνωση των δεδομένων αυτών που περιέχουν μεγάλο ποσοστό σφάλματος.

Συχνότερα χρησιμοποιούμε την αντιστροφή με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (least mean square), αλλά μερικές φορές χρησιμοποιείται και ο αλγόριθμος *robust* για την αντιστροφή. Αφού επιτευχθεί η διαδικασία της αντιστροφής, στην οθόνη έχουμε το μοντέλο της τομογραφίας. Η περαιτέρω εκσφαλμάτωση έγγειται στην αποκοπή των μετρήσεων, οι οποίες προσδίδουν μεγάλα ποσοστά λάθους στο μοντέλο.

Εφόσον κάνουμε την αντιστροφή, δίνουμε την εντολή «display inversion data» και εν συνεχεία, την εντολή «RMS error statistics» και προσπαθούμε να αποκόψουμε τα δεδομένα που προκαλούν σφάλματα, χωρίς φυσικά να καταστρέψουμε την εικόνα του μοντέλου, λόγω έλλειψης δεδομένων. Εφόσον πραγματοποιήσουμε κάθε απαιτούμενη διόρθωση συνεχίζουμε στην προβολή του μοντέλου και στην ερμηνεία.

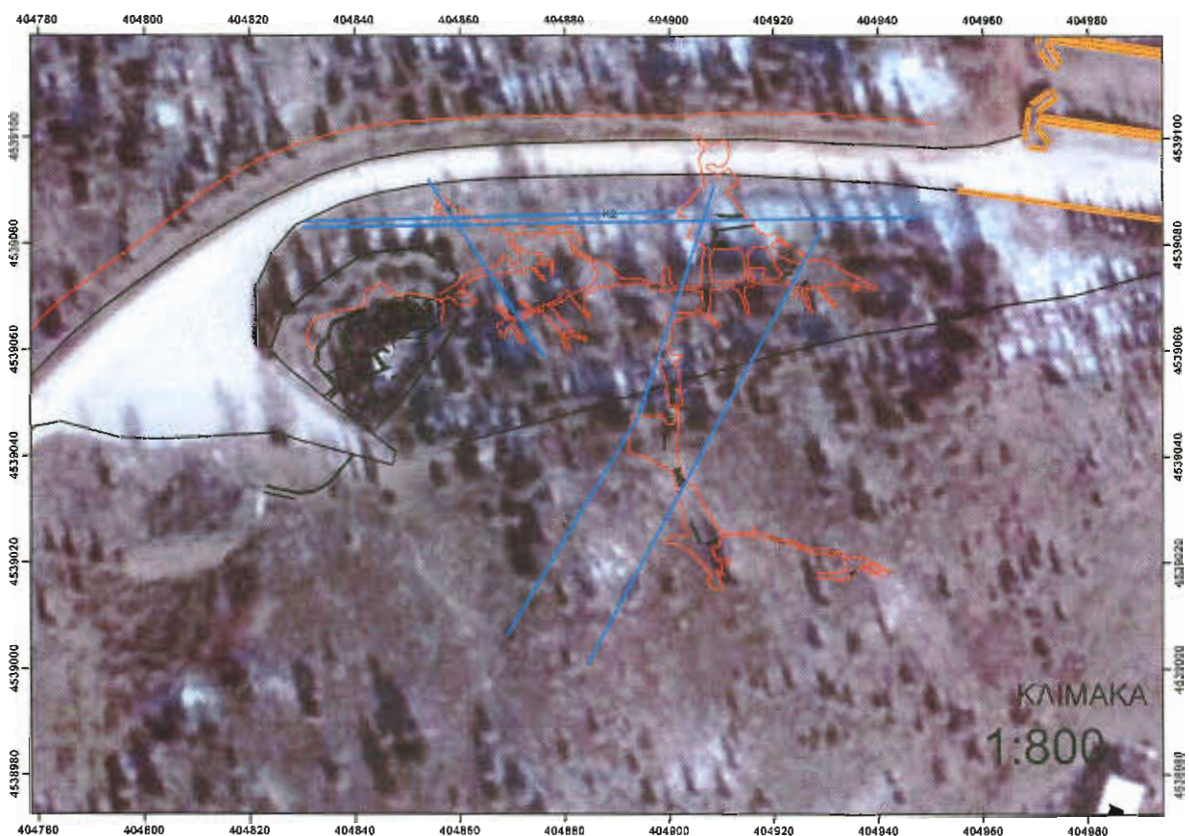
3.3. Τομές και ερμηνεία τους

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν, 5 τομογραφίες κατά μήκος 5 τομών K1, K2 με διεύθυνση Α-Δ, K3 με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και K4, K5 με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Οι τομές είναι οι κυανές γραμμές στο παρακάτω τοπογραφικό χάρτη.



Εικ.10– Αεροφωτογραφία της περιοχής του σπηλαίου (Google Earth).

Το στοιχείο που μας ενδιαφέρει για την ερμηνεία των ψευδοτομών είναι οι μεγάλες διαφορές στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση και συγκεκριμένα οι περιοχές με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πολύ μεγαλύτερες από το περιβάλλοντα χώρο. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι ένα σπήλαιο δεν είναι τίποτε άλλο από κενό (πληρωμένο με αέρα) ημιχώρο, ο οποίος θεωρητικά θα είχε άπειρη τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτό βέβαια δε συμβαίνει στη πράξη, αφού οι ηλεκτρικές ακτίνες διαπερνούν σημεία με διαφορετικές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η τελική τιμή, δεν είναι η απόλυτη τιμή, αλλά ένα είδους μέσος όρος των τιμών αντίστασης που βρήκε η ακτίνα στο δρόμο της.



Εικ.11– Λεπτομέρεια της προηγούμενης αεροφωτογραφίας. Οι κυανές γραμμές αντιστοιχούν στις τομές και οι πορτοκαλί αντιστοιχούν στους διαδρόμους και θαλάμους του σπηλαίου, που βρίσκεται από κάτω. Η μελανή γραμμή, είναι ένα μονοπάτι.

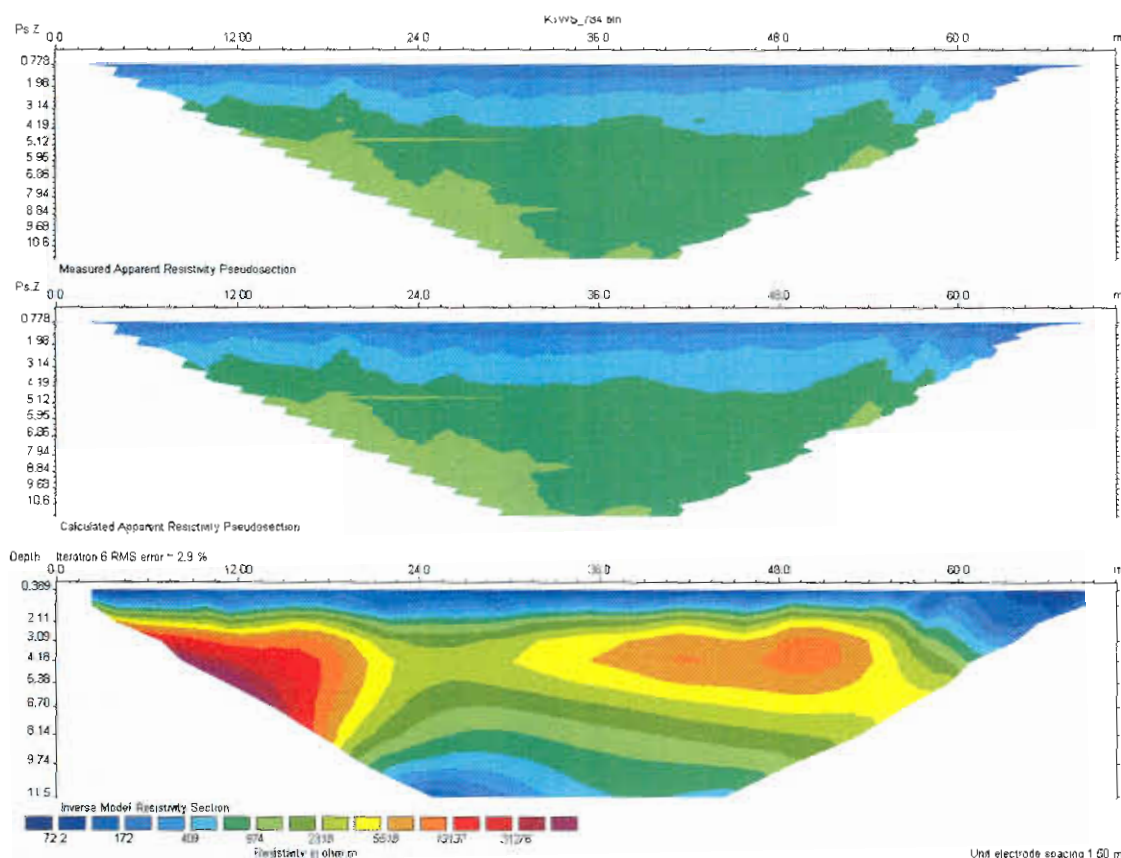
3.3.1. Τομή K1 και ερμηνεία

Η πρώτη τομή αντιστοιχεί στην K1, όπως φαίνεται στο χάρτη (Εικ.7), έχει διεύθυνση Α – Δ και έγινε παράλληλα με το δρόμο βόρεια του σπηλαίου. Τα χαρακτηριστικά της τομής είναι:

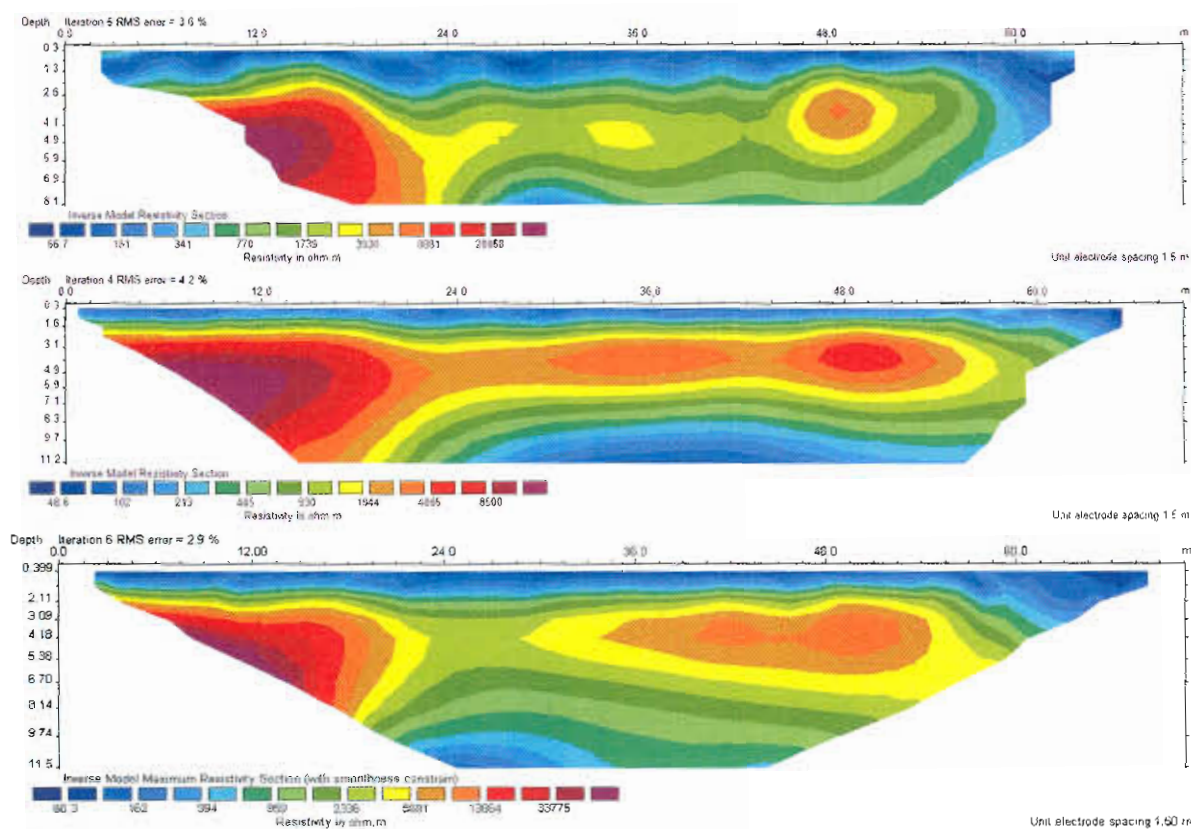
- ❖ Άνοιγμα ηλεκτροδίων: 1,5 m
- ❖ Μήκος τομής: 70,5 m
- ❖ Συντεταγμένες: (Σύστημα EGSA 87, μονάδες μέτρα)

(ΑΡΧΗ) $x_1=404830.3$ $y_1=4539084.3$

(ΤΕΛΟΣ) $x_2=404901.0$ $y_2=4539086.0$



Εικ.12 – Γεωηλεκτρική δομή για τη τομή K1. Στη πρώτη εικόνα φαίνονται τα μετρούμενα δεδομένα (ψευδοτομή), στη δεύτερη τα υπολογισμένα δεδομένα μετά την αντιστροφή και στη τρίτη το μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που προκύπτει μετά από την αντιστροφή.



Εικ.13 – Γεωηλεκτρική δομή για τη τομή K1, όπως προκύπτει μετά την αντιστροφή των δεδομένων, με διατάξεις α) Pole – pole, β) Pole – dipole, γ) Schlumberger.

Με βάση το μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Εικ.8), από τα δεδομένα της πρώτης τομής (K1), προκύπτει ότι από την αρχή της τομής και μέχρι τα 20 m και σε βάθος από 4 – 8 m, εντοπίζεται μια περιοχή μεγάλης ηλεκτρικής αντίστασης, σε σχέση με τις γειτονικές περιοχές. Το γεγονός αυτό καθιστά το κέντρο της περιοχής αυτής (περίπου στα 10 m από την αρχή της τομής και σε βάθος 5m), πιθανό κενό κοίλωμα ή διαφοροποίηση του ασβεστόλιθου, πιθανώς από κατακερματισμό. Στα 48 m, φαίνεται επίσης περιοχή με μεγάλη αντίσταση. Δεν πρόκειται για τη στοά του σπηλαίου που τέμνει η τομή, διότι η συγκεκριμένη στοά βρίσκεται στα 17 m βάθος, ενώ η τομογραφία διεισδύει μέχρι τα 12 m και η ανώμαλη ζώνη είναι στα 3m βάθος.

3.3.2. Τομή K2 και ερμηνεία

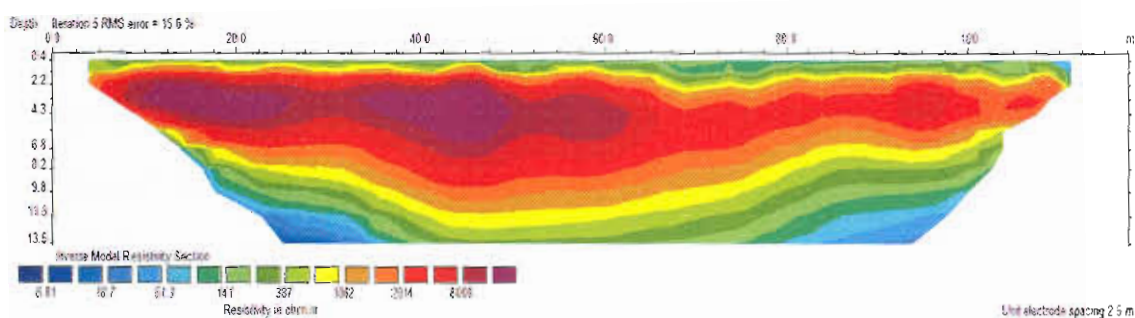
Η δεύτερη τομή αντιστοιχεί στην K2, όπως φαίνεται στο χάρτη (Εικ.7), έχει και αυτή διεύθυνση Α – Δ και έγινε παράλληλα με το δρόμο βόρεια του σπηλαίου. Τα χαρακτηριστικά της τομής είναι:

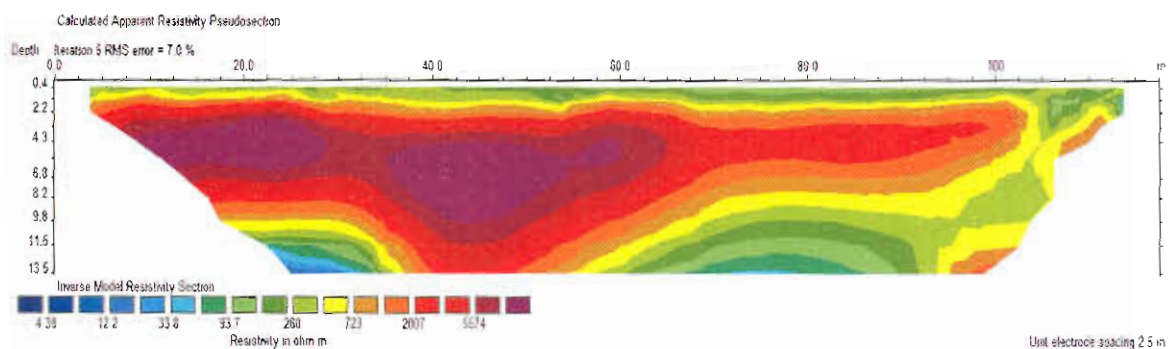
- ❖ Άνοιγμα ηλεκτροδίων: 2,5 m
- ❖ Μήκος τομής: 117,5 m
- ❖ Συντεταγμένες: (Σύστημα EGSA 87, μονάδες μέτρα)

(ΑΡΧΗ) $x_1=404830.0$ $y_1=4539083.0$

(ΤΕΛΟΣ) $x_2=404947.3$ $y_2=4539085.1$

Από το μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για τη τομή K2, προκύπτουν εκτεταμένες περιοχές μεγάλης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με το περιβάλλοντα χώρο, με κέντρα στα 18 m και 42 m και σε βάθος μεταξύ 3 - 9 m. Η τομή K2 τέμνει τη γραμμή του σπηλαίου περίπου στα 40 m, όμως αυτό και πάλι δε διακρίνεται, διότι βρίσκεται βαθύτερα των 13 m, βάθος το οποίο μπορεί να διεισδύσει η συγκεκριμένη τομογραφία. Οι ανωμαλίες των υψηλών αντιστάσεων οφείλονται μάλλον σε εναλλαγές στη ποιότητα του ασβεστολίθου.





Εικ.14 – Γεωηλεκτρική δομή για τη τομή K2, όπως προκύπτει μετά την αντιστροφή των δεδομένων, με διατάξεις a) Dipole - dipole, b) Pole – dipole.

3.3.3. Τομή K3 και ερμηνεία

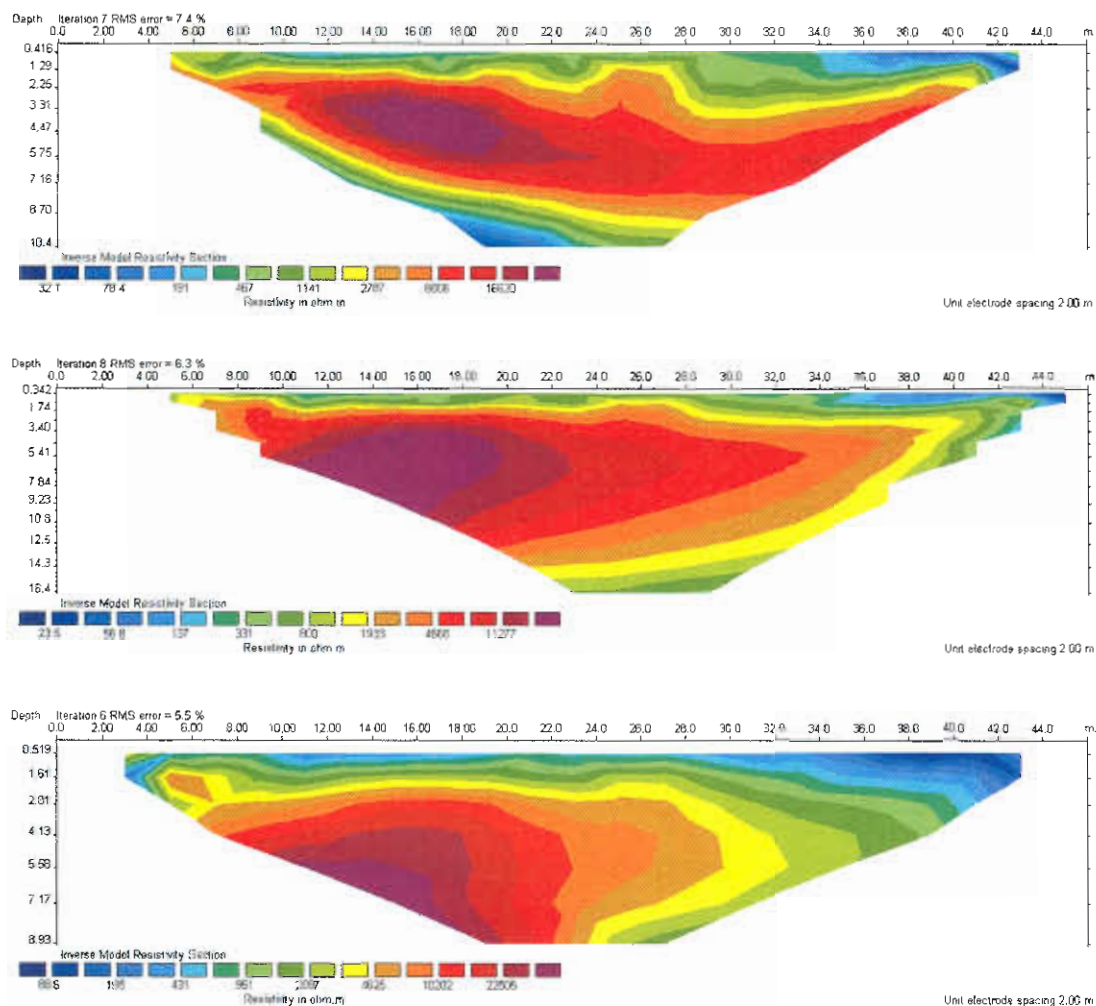
Η τρίτη τομή αντιστοιχεί στην K3, όπως φαίνεται στο χάρτη (Εικ.7), έχει διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και είναι υπό γωνία με το δρόμο. Τα χαρακτηριστικά της τομής είναι:

- ❖ Άνοιγμα ηλεκτροδίων: 2 m
- ❖ Μήκος τομής: 46 m
- ❖ Συντεταγμένες: (Σύστημα EGSA 87, μονάδες μέτρα)

(ΑΡΧΗ) $x_1=404853.8$ $y_1=4539092.2$

(ΤΕΛΟΣ) $x_2=404876.1$ $y_2=4539058.5$

Η τομή K3, τέμνει δύο στοές του σπηλαίου. Αυτές κανονικά έπρεπε να φαίνονται στο μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ως περιοχές μεγάλης ειδ. ηλ. αντίστασης. Όμως το σπήλαιο είναι πολύ βαθύτερα (17m) και έτσι η τομογραφία δε μπορεί να διεισδύσει ως εκεί. Οι παρατηρούμενη ανωμαλία στα 10-20 m και σε βάθος μεταξύ 3-7m, πιθανόν δηλώνει εναλλαγές στη ποιότητα του ασβεστολίθου.



Εικ.15 – Γεωηλεκτική δομή για τη τομή K3, όπως προκύπτει μετά την αντιστροφή των δεδομένων, με διατάξεις α) Dipole - dipole, β) Pole – dipole, γ) Shlumberger.

3.3.4. Τομή K4 και ερμηνεία

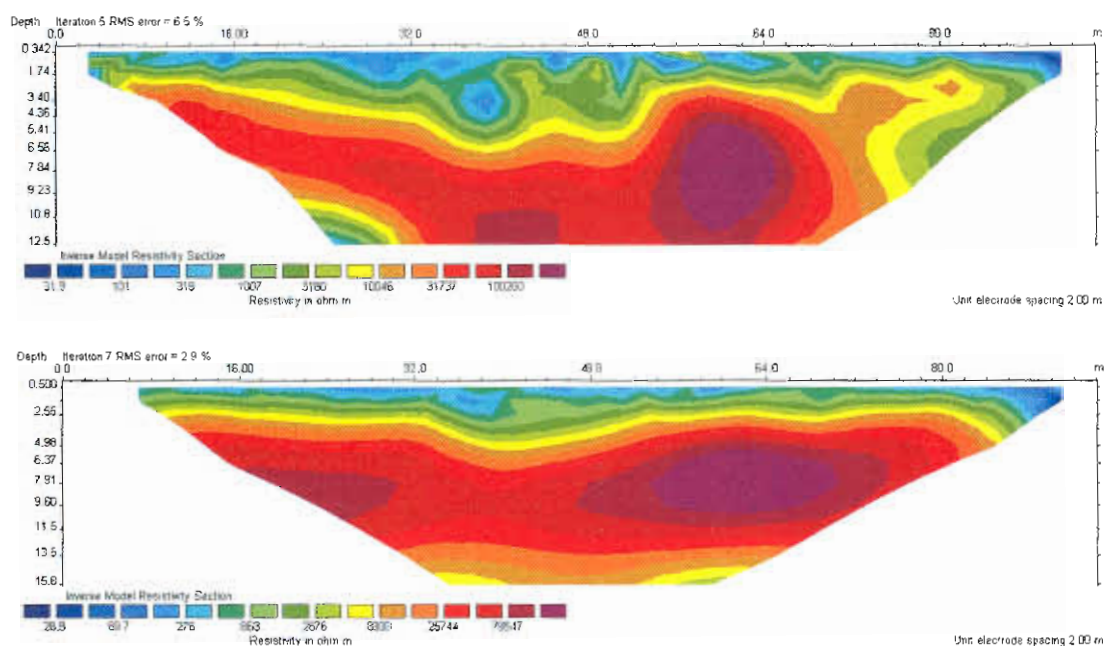
Η τέταρτη τομή αντιστοιχεί στην K4, όπως φαίνεται στο χάρτη (Εικ.7), έχει διεύθυνση BA-ΝΔ και είναι υπό γωνία με το δρόμο. Τα χαρακτηριστικά της τομής είναι:

- ❖ Άνοιγμα ηλεκτροδίων: 2 m
- ❖ Μήκος τομής: 94 m
- ❖ Συντεταγμένες: (Σύστημα EGSA 87, μονάδες μέτρα)

(APXH) $x_1=404868.9$ $y_1=4539006.2$

(ΤΕΛΟΣ) $X_2=404908.6$ $Y_2=4539091.0$

Με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που προέκυψε για τη τομή K4, συμπεραίνουμε δύο περιοχές με μεγάλη ειδ. ηλ. ηλεκτρική αντίσταση σε σχέση με το περιβάλλοντα χώρο, με κέντρα στα 20 m περίπου και βάθος 6 - 11 m και στα 60 m σε βάθος 4 - 12 m, η οποία φαίνεται και στις δύο διατάξεις. Οι περιοχές αυτές είναι είτε πιθανές κενές κοιλότητες (γι' αυτό και η μεγάλη διαφορά στην αντίσταση) ή το πιο πιθανόν πρόκειται για ανωμαλίες που σχετίζονται με εναλλαγή στη ποιότητα του ασβεστολίθου.



Εικ.16 – Γεωηλεκτρική δομή για τη τομή K4, όπως προκύπτει μετά την αντιστροφή των δεδομένων, με διατάξεις α) Dipole - dipole, β) Schlumberger.

3.3.5. Τομή K5 και ερμηνεία

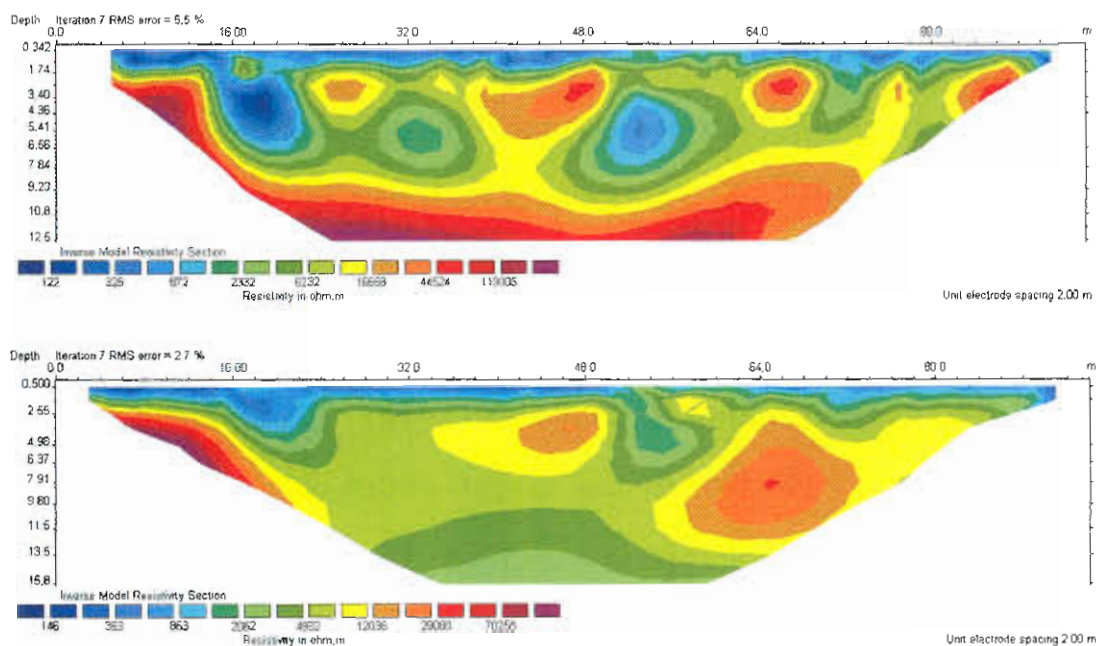
Η πέμπτη τομή αντιστοιχεί στην K5, όπως φαίνεται στο χάρτη (Εικ.7), έχει διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και είναι υπό γωνία με το δρόμο. Τα χαρακτηριστικά της τομής είναι:

- ❖ Άνοιγμα ηλεκτροδίων: 2 m
- ❖ Μήκος τομής: 94 m
- ❖ Συντεταγμένες: (Σύστημα EGSA 87, μονάδες μέτρα)

(ΑΡΧΗ) $x_1=404884.3$ $y_1=4539000.7$

(ΤΕΛΟΣ) $x_2=404929.2$ $y_2=4539082.9$

Η γεωηλεκτρική δομή για αυτή τη τομή δε μας δίνει τη δυνατότητα να αποφανθούμε για τυχόν υπόγειο έγκοιλο, πιθανό τμήμα του σπηλαίου, γιατί η μόνη περιοχή που φαίνεται να έχει αρκετά μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση βρίσκεται εκτός ορίων. Είναι η περιοχή στα 10 m μήκος και 6 m βάθος, όπου δεν έχουμε δεδομένα. Αν η τομή αυτή πραγματοποιούνταν λίγα μέτρα πιο πίσω ίσως να μπορούσαμε να πούμε με μιλήσουμε με περισσότερη σιγουριά. Όσον αφορά την ανωμαλία που φαίνεται στα 18 m μήκος και 5,4 m βάθος φαίνεται πως είναι κάποιο κοίλωμα πληρωμένο με αργιλικό υλικό, γι' αυτό και οι πολύ μικρότερες τιμές ειδ. ηλ. αντίστασης σε αυτό το σημείο. Στην διάταξη Wenner-Schlumberger σε απόσταση 64m και βάθος 8m εντοπίζεται μια περιοχή με σχεδόν κυκλικό σχήμα η οποία όμως δεν διακρίνεται στην άλλη διάταξη.



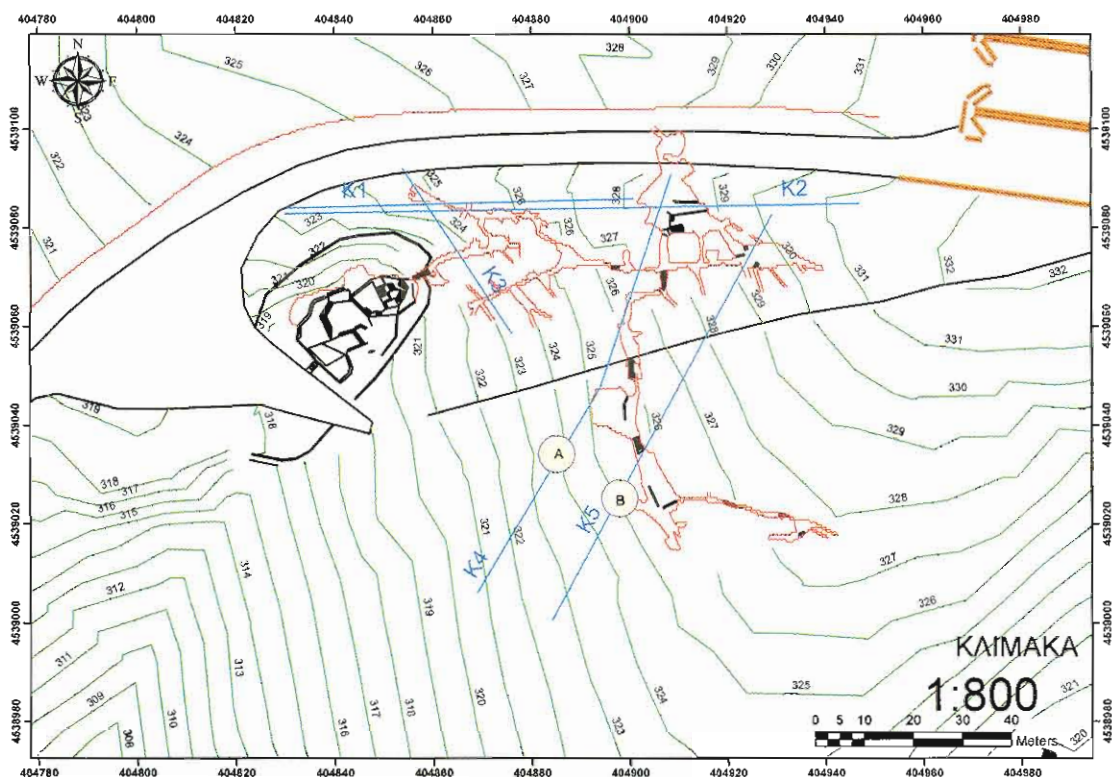
Εικ.17 – Γεωηλεκτρική δομή για τη τομή K5, όπως προκύπτει μετά την αντιστροφή των δεδομένων, με διατάξεις a) Dipole - dipole, b) Shlumberger.

4. Γενική Θεώρηση – Συμπεράσματα

Από τις γεωφυσικές μεθόδους διασκόπησης χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρική τομογραφία, η οποία αποτελεί μια σχετικά φθηνή και εύχρηστη μέθοδο διασκόπησης που δίνει αξιόπιστες και εύκολα ερμηνεύσιμες απεικονίσεις της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους.

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν πέντε τομές με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας για τη χαρτογράφηση του γεωλογικού υποβάθρου του σπηλαίου του Κιλκίς, με απώτερο σκοπό την εύρεση τυχόντων μη εξερευνημένων διαδρόμων του σπηλαίου.

Σε κάθε τομή χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω από μία διατάξεις. Συμπεριελήφθησαν οι ψευδοτομές σε πλήρη ανάλυση, στο παράρτημα για τη καλύτερη ερμηνεία τους. Γενικά από τις τομές προκύπτει ένα στρώμα χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, σχετικά μικρού πάχους, 0,5-3,5 m, που αντιστοιχεί στο εδαφικό κάλυμμα. Αμέσως από κάτω παρατηρούμε ένα στρώμα μεγαλύτερης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, που αντιστοιχεί στον ασβεστόλιθο του σπηλαίου και εντός αυτού του στρώματος διάσπαρτες περιοχές πολύ υψηλής ειδ. ηλ. αντίστασης που πιθανολογούνται να είναι διαφοροποιήσεις στη ποιότητα του ασβεστολίθου, είτε λόγω διάβρωσης (karst), είτε λόγω κατακερματισμού ή/και τεκτονισμού, είτε λόγω μεταβολής του πορώδους και της διαπερατότητας του.



Εικ.18 – Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής του σπηλαίου του Κιλκίς. Με κόκκινο φαίνεται η κάτοψη του σπηλαίου, με μπλε οι τομογραφίες και με πράσινο οι ισοϋψείς. Τα σημεία Α και Β πιθανόν να καθιστούν επέκταση του σπηλαίου προς ΒΔ και σε μικρότερα βάθη από την επιφάνεια.

Γενικά το μέσο βάθος διείδυσης των τομογραφιών, που πραγματοποιήθηκαν και μπορούμε να αποφανθούμε για ασφαλή συμπεράσματα, είναι περί τα 12 m. Όμως το βάθος του σπηλαίου από την επιφάνεια είναι στα 17 m και έτσι οι τομογραφίες δεν έφθασαν το βάθος που βρίσκονται οι γνωστές σπηλαιώσεις. Παρόλα αυτά, στη τομή 4, στα 60 m μήκος, 10 βάθος (σημείο Α – Εικ.18) και στη τομή 5 στα 64 m μήκος, 9 βάθος (σημείο Β – Εικ.18), οι παρατηρούμενες ανωμαλίες, να οφείλονται σε κάποιο καρστικό έγκοιλο, που πιθανόν να σχετίζεται με τον σύστημα του σπηλαίου του Κιλκίς.

5. Παράρτημα

5.1. Μέθοδος υπεδαφίου ραντάρ (Ground Penetrating Radar)

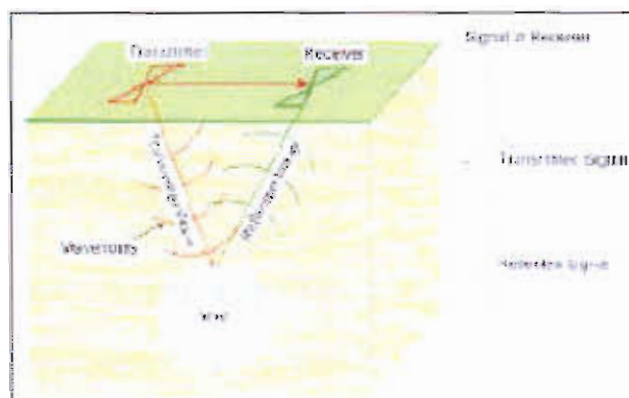
Θεωρήθηκε αναγκαίο να συμπεριληφθεί ακόμη μία ακόμη μέθοδος διασκόπησης που χρησιμοποιείται ευρέως στην έρευνα και χαρτογράφηση σπηλαίων. Δεν ανήκει στις μεθόδους ηλεκτρικής αντίστασης, γι' αυτό παρατίθεται στο παράρτημα.

Βασική αρχή λειτουργίας

Η μέθοδος του υπεδαφίου ραντάρ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό ρηχών κοιλοτήτων στο υπέδαφος. Παρόλα αυτά το βάθος διείσδυσης εξαρτάται από την κάθε περιοχή και κυρίως από το ποσοστό αργίλου στο πρώτο κατά σειράν στρώμα. Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται σε περιοχές με μικρό ποσοστό αργίλου. Η επιλογή της συχνότητας (αντέννα) παίζει μεγάλο ρόλο στη διείσδυση και χρειάζεται αρκετά χαμηλή συχνότητα για εντοπισμό βαθιών κοιλοτήτων.

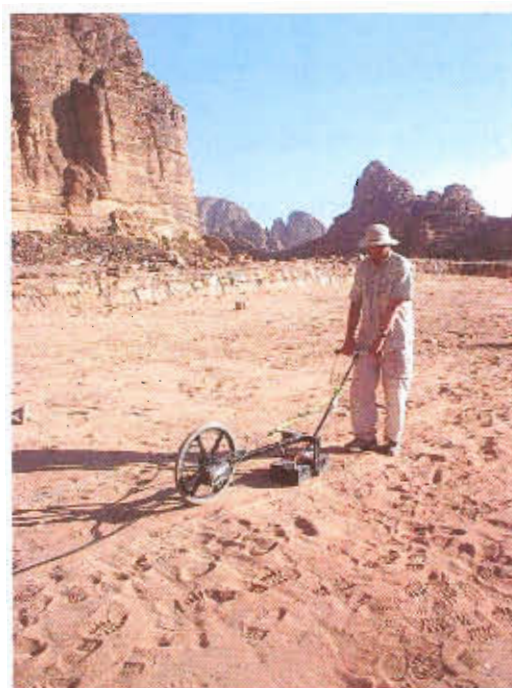
Το όργανο GPR συνίσταται από ένα σύστημα καταγραφής και δύο κεραίες, μια εκπομπής και μια λήψης. Ο πομπός παρέχει υψηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικό κύμα (25 MHz έως 1500 MHz) το οποίο διεισδύει στο έδαφος και ανακλάται από δομές ή επιφάνειες που έχουν διαφορετική διηλεκτρική σταθερά από το περιβάλλον τους (πιθανόν χώμα ή βραχώδες υλικό). Τα ανακλώμενα κύματα ανιχνεύονται από τον δέκτη και αποθηκεύονται στην μνήμη του συστήματος καταγραφής. Η κεραία εκπομπής και λήψης καθώς και η πορεία των κυμάτων

φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί. Ένα κενό στο υπέδαφος παρέχει πάντοτε μια ισχυρή αντίθεση στην διηλεκτρική σταθερά με το περιβάλλον του. Επίσης το ίδιο συμβαίνει όταν το κενό είναι γεμάτο με νερό.



Εικ. 19 - Σύστημα GPR πάνω από ένα κενό στο έδαφος

Οποιαδήποτε κεραία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συλλέγει δεδομένα. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται μια κεραία 100 μεγακύκλων ικανή να εντοπίζει κενά σε βάθη πάνω από 20 μέτρα.



Εικ. 20 – Διαδικασία μετρήσεων GPR

Διαδικασία μετρήσεων:

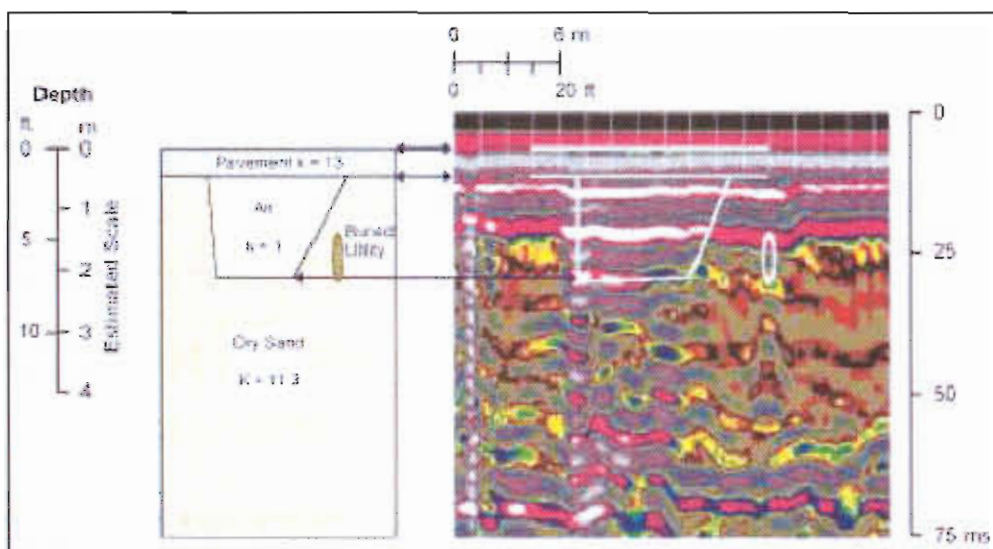
Οι έρευνες με εφαρμογή GPR γίνονται "σέρνοντας" την κεραία στο έδαφος με μια σταθερή ταχύτητα. Ο καταγραφέας αποθηκεύει τα δεδομένα και παράλληλα τα παριστάνει σε μια οθόνη. Η επιλογή της κεραίας είναι πολύ σημαντική για την εκάστοτε εφαρμογή και το επιθυμητό βάθος του γεωφυσικού στόχου (εν προκειμένω: κενά).

Επεξεργασία δεδομένων:

Είναι δυνατόν να επεξεργασθούν τα δεδομένα όπως εκείνα των μονοκάναλων σεισμικών μετρήσεων. Η επεξεργασία μπορεί να περιλαμβάνει κανονικοποίηση της απόστασης, οριζόντια βαθμονόμηση, οριζόντια και κατακόρυφα φίλτρα, διορθώσεις ταχύτητας και άλλα. Παρόλα αυτά δεν χρειάζεται και ιδιαίτερη επεξεργασία όταν τα σήματα είναι καθαρά και χωρίς θόρυβο.

Αξιολόγηση δεδομένων:

Για να υπολογισθεί το βάθος μέχρι την οροφή της κοιλότητας χρειάζεται να βρεθούν οι ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων στο έδαφος κλει στο βραχώδες. Αυτές είναι συνήθως γνωστές και υπάρχουν σε ειδικούς πίνακες. Ένας άλλος τρόπος είναι η βαθμονόμηση πάνω από μια δομή της οποίας το βάθος είναι γνωστό από πριν. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι κοιλότητες επάνω σε μια καταγραφή (στα σημεία που δείχνουν τα βέλη).



Εικ. 21 - Η εικόνα δείχνει δεδομένα GPR από μια σάρωση σε οδόστρωμα. Στην εικόνα φαίνεται καθαρά το κενό κάτω από το οδόστρωμα καθώς και η αντίστοιχη συνθετική γεωλογική τομή που προέκυψε.

Πλεονεκτήματα:

Τα δεδομένα GPR καταγράφονται γρήγορα και ο έλεγχος είναι άμεσος την στιγμή της μέτρησης. Η επιλογή διαφορετικών συχνοτήτων δίνει την ευχέρεια έρευνας σε διαφορετικά βάθη.

Περιορισμοί:

Ο πιο σημαντικός περιορισμός της μεθόδου είναι το βάθος διείσδυσης και η ανάγκη να υπάρχει κάποια διαφορά μεταξύ της διηλεκτρικής σταθεράς του γεωφυσικού στόχου και του περιβάλλοντος μέσου. Οι άργιλοι μπορούν να μειώσουν σημαντικά το βάθος διείσδυσης του ηλεκτρομαγνητικού σήματος.

Στην περιοχή του σπηλαίου Κιλκίς το βάθος από το δάπεδο του σπηλαίου είναι περίπου 17 μέτρα ενώ οι διαστάσεις των στοών είναι περιορισμένες (1-2m). Για το λόγο αυτό δεν έγινε εφαρμογή της μεθόδου αυτής στη συγκεκριμένη έρευνα.

6. Βιβλιογραφία

Δ. Αράμπελος. Στοιχεία Γεωφυσικών Διασκοπήσεων. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1991.

Παπαζάχος Β.Κ. Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1996.

Δημοσθένης Μουντράκης. Γεωλογία της Ελλάδας. University Studio Press, Θεσσαλονίκη 1985

Γρηγορίου Ν. Τσόκα. Γεωφυσική Διασκόπηση με τις μεθόδους των Δυναμικών Πεδίων. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Εκδόσεων, Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο, Θεσσαλονίκη 1999.

Βασίλης Κατσίκης. Αναγνωριστική Γεωλογική – Γεωφυσική Έρευνα στην Περιοχή του Αγίου Γεωργίου. Δήμος Κιλκίς, ΔΕΥΑ Κιλκίς, Θεσσαλονίκη 1997.

Δημητριάδου Μαρία, Μαθιουδάκη Μαρία. Εφαρμογή μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας στο χώρο του ΑΠΘ για τη χαρτογράφηση του γεωλογικού υποβάθρου. Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2005.

Βαμβακίδου Δήμητρα, Τσιμοπούλου Κατερίνα. Μελέτη υπεδάφους σε περιοχή του ΑΠΘ με τη χρήση της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας. Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2007.

M.H Loke. Tutorial 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Copyright (1996 -2004).

C. Demetrescu, V. Dobrica. On the electric properties of rocks under the network of European Geomagnetic Observatories as derived from series of annual means of geomagnetic elements. Institute of Geodynamics, Bucharest 2003.

Kalyan Kumar Roy. Potential Theory in Applied Geophysics. Springer

JM Maillol. Overview of physical properties of earth materials. GOPH365 2001.

Wikipedia. Electrical Conductivity, Electrical impedance tomography, Inverse Problem, Resistivity.

Donland L.Turcotte. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. Second Edition.

<http://www.showcaves.gr>

<http://www.geoservice.gr>