



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

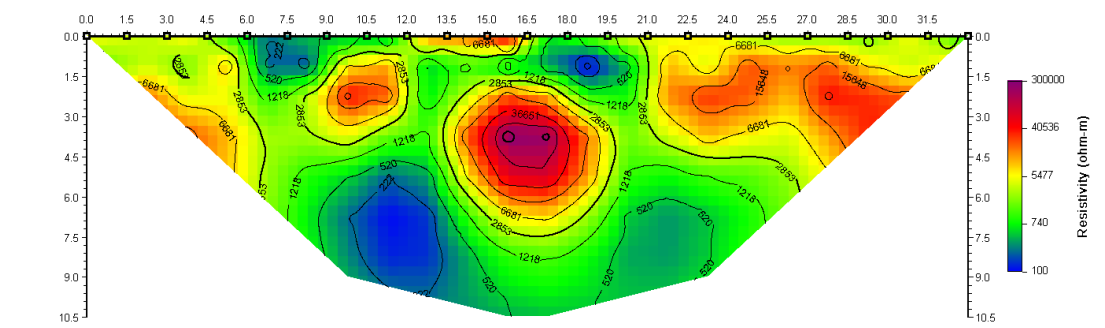
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΕΓΚΟΙΛΩΝ ΣΤΟΝ ΑΡΓΙΛΟ ΚΟΖΑΝΗΣ

ΔΟΔΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Α.Ε.Μ. : 4978



Επιβλέποντες: Παναγιώτης Τσούρλος , Καθηγητής ΑΠΘ

Γιώργος Βαργεμέζης, Αν. Καθηγητής ΑΠΘ

Θεσσαλονίκη 2017

Εισαγωγή.....σελ. 3	
1. Περιοχή μελέτης.....σελ. 4	
1.1 Γεωλογία της περιοχής.....σελ. 5	
2. Ηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης.....σελ. 8	
2.1 Μέθοδος της ειδικής αντίστασης και τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων.....σελ. 13	
2.2 Ηλεκτρική τομογραφία και εφαρμογές της.....σελ. 16	
3. Γεωφυσικές μετρήσεις.....σελ. 19	
3.1 Αντιστροφή των δεδομένων.....σελ. 20	
3.2 Ερμηνεία γεωφυσικών δεδομένων.....σελ. 21	
4. Συμπεράσματα.....σελ. 27	
5. Βιβλιογραφία.....σελ. 28	



Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο εντοπισμός πιθανών εγκοίλων στην περιοχή της Άργιλου Κοζάνης με τη χρήση της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Συγκεκριμένα, στην περιοχή έλαβαν χώρα εργασίες για την ανέγερση των νέων κτηρίων του πανεπιστημίου της Δυτικής Μακεδονίας τον Απρίλιο του 2017 οι οποίες διακόπηκαν εξαιτίας του εντοπισμού εγκοίλων διάφορων μεγεθών κατά τη διάνοιξη των θεμελίων. Η γεωφυσική έρευνα αποσκοπεί στον εντοπισμό και προσδιορισμό του μεγέθους των εγκοίλων με τελικό σκοπό είτε την πλήρωσή τους είτε την αλλαγή της τοποθεσίας κατασκευής, αν κριθεί απαραίτητο.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η γεωλογία της περιοχής μελέτης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται οι βασικές αρχές στις οποίες στηρίζεται η ηλεκτρική τομογραφία και παρουσιάζονται εν συντομία παραδείγματα εφαρμογών της.

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση και ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων που έχουν συλλεχθεί.

Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα της που έχουν εξαχθεί.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους Καθηγητές κ. Παναγιώτη Τσούρλο και κ. Γιώργο Βαργεμέζη για την ανάθεση του θέματος, την καθοδήγησή τους, και την αρωγή τους στη διεκπεραίωση της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Ηλία Φίκο για τις πολύτιμες πληροφορίες τους κατά την διάρκεια της λήψης των γεωφυσικών δεδομένων.

1. Περιοχή μελέτης

Η Άργιλος Κοζάνης βρίσκεται νοτιοανατολικά της πόλης της Κοζάνης. Η περιοχή μελέτης αποτελείται από ασβεστολιθικά-δολομιτικά πετρώματα τα οποία έχουν πτυχωθεί και καρστικοποιηθεί, με αποτέλεσμα την δημιουργία ποικίλων εγκοίλων.



Σχήμα 1.1. Άργιλος Κοζάνης. Εικόνα από Google Earth

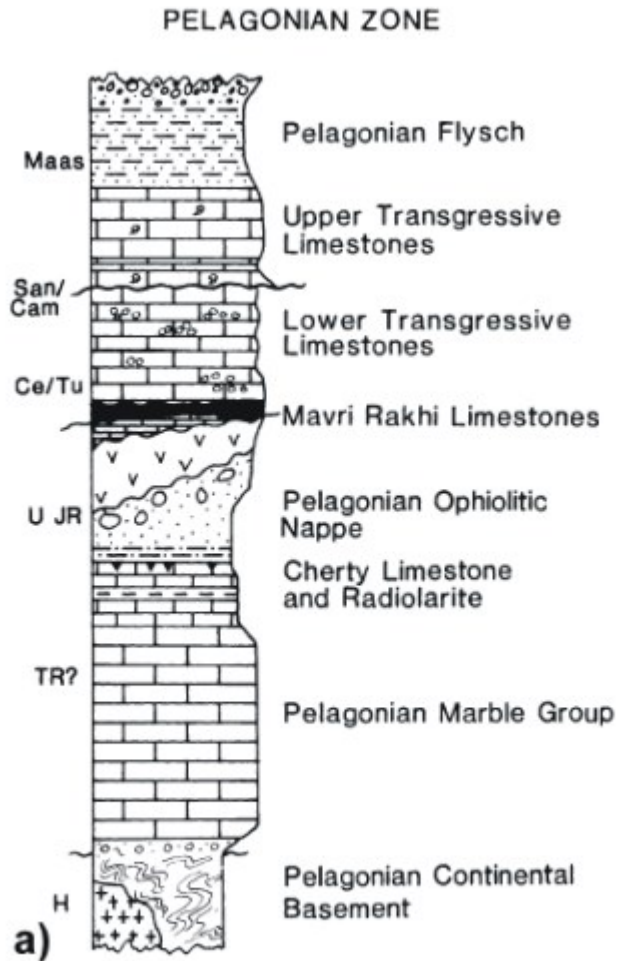
1.1 Γεωλογία της περιοχής

Γεωτεκτονικά, η ευρύτερη περιοχή της Κοζάνης ανήκει στην Πελαγονική ζώνη. Αποτελείται, κατά κύριο λόγο, από κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα όπου πάνω τους βρίσκονται μεσοζωικά ιζήματα. Σύμφωνα με νέες απόψεις, η Πελαγονική αποτελεί ηπειρωτικό τέμαχος της Κιμμερίας ηπείρου που αποσπάστηκε από την Gondwana και εκατέρωθεν του οποίου αναπτύχθηκαν δυο ωκεάνιες περιοχές της Τηθύος από τις οποίες προήλθαν με επώθηση οι οφειόλιθοι (Μουντράκης 1983).

Αναλυτικότερα, αποτελείται από:

- Το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο
 - Τους γνευσιωμένους γρανίτες
 - Τα ημιμεταμορφωμένα Περμοτριάδικα πετρώματα
 - Τα δύο ανθρακικά καλύμματα Τριαδικού-Ιουρασικού
 - Τους οφειόλιθους
 - Τα Άνω Κρητιδικά επικλυσιγενή ιζήματα
-
- Τα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα έχουν ευρεία εξάπλωση στον Πελαγονικό χώρο και αποτελούν το κύριο δομικό στοιχείο της ζώνης. Επίσης, η ηλικία τους έχει υπολογιστεί ως Παλαιοζωική. Αποτελούνται από:
 - Γνεύσιους βιοιτιτικούς οφθαλμοειδείς ορθο-προέλευσης
 - Μιγματιτικούς γνεύσιους
 - Γνεύσιους ταινιωτούς, μοσχοβιτικούς, παρα-προέλευσης
 - Αμφιβολίτες και αμφιβολιτικούς-βιοιτιτικούς σχιστόλιθους
 - Γρανατούχους διμαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους
 - Εναλλαγές αμφιβολιτικών σχιστολίθων, μαρμαρυγιακών σχιστολίθων, επιδοιτιτικών σχιστολίθων με παρεμβολές απλιτογνευσίων.

Στο Παλαιοζωικό συνέβη η πρώτη μεταμόρφωση του υποβάθρου (αμφιβολιτικής φάσης).



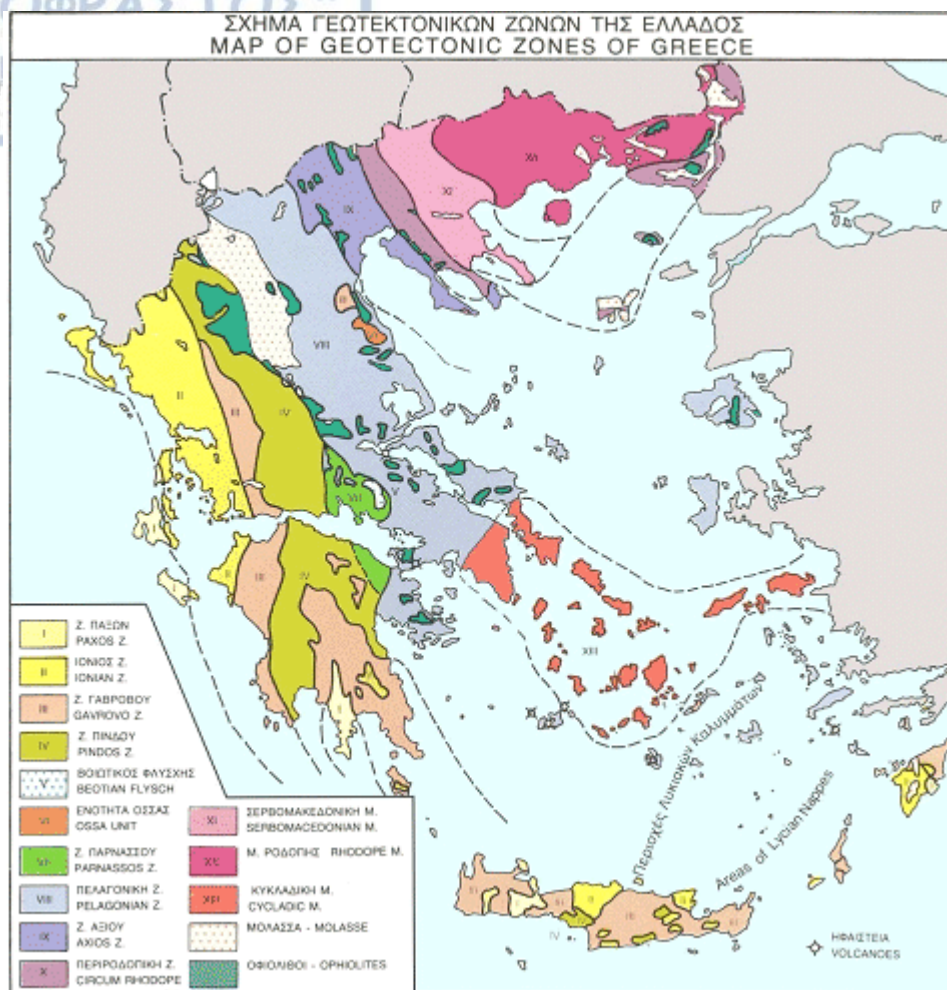
Τεκτονοστρωματογραφική διάρθρωση της Πελαγονικής ζώνης (από Mountrakis 1984)

Σχήμα 1.1.1.

- Μέσα σε αυτά τα πετρώματα παρεμβάλλονται μεγάλοι πλουτωνικοί όγκοι οι οποίοι είναι κυρίως γρανίτες και χαλαζιακοί μονζονίτες παραπλήσιας σύστασης και υφής. Το όνομά τους προκύπτει από την περιοχή εμφάνισής τους. Χρονολογούνται ως Άνω Λιθανθρακοφόρα (300Ma) . Στην μεγαλύτερη μάζα τους οι γρανίτες εμφανίζονται γνευσιωμένοι διότι υπεστήκαν την αλπική μεταμόρφωση στο Άνω Ιουρασικό-Κάτω Κρητιδικό, σε συνθήκες χαμηλής πρασινοσχιστολιθικής φάσης.
- Πάνω σε αυτά έχει αποτεθεί μια μετα-κλαστική ιζηματογενής σειρά πάχους περίπου 200m, μέσα στην οποία μπορούν να βρεθούν ηφαιστειακά υλικά, όξινες και βασικές λάβες και τόφφοι. Η απόθεση

τους έλαβε χώρα στο Πέρμιο και Κάτω Κρητιδικό και στη συνέχεια μαζί με τα ηφαιστειακά υλικά μεταμορφώθηκαν στην διάρκεια Α. Ιουρασικού-Κ. Κρητιδικού σε συνθήκες χαμηλής πρασινοσχιστολιθικής μεταμόρφωσης. Τα πετρώματα αυτά είναι φυλλίτες, μετά-πελίτες, μετά-αρκόζες, χλωριτικοί και σερικιτικοί σχιστόλιθοι, μετά-ψαμμίτες.

- Το Μεσοζωικό ανθρακικό κάλυμμα της Πελαγονικής αφορά την νηρητική, ανθρακική αλπική ιζηματογένεση ηλικίας Τριαδικού-Ιουρασικού. Τα δύο ανθρακικά καλύμματα, ανατολικό κα δυτικό, μεταμορφώθηκαν κατά την περίοδο Α. Ιουρασικού-Κ. Κρητιδικού σε συνθήκες χαμηλής πρασινοσχιστολιθικής φάσης, ανάλογη με την μεταμόρφωση των Περμοτριάδικών μετακλαστικών ιζημάτων.
- Οι οφειόλιθοι μπορούν να βρεθούν στα περιθώρια της Πελαγονικής, ωστόσο υπάρχουν μερικές εμφανίσεις τους ενδότερα. Είναι αλλόχθονοι και η προέλευσή τους είναι οι ωκεάνιες περιοχές των ζωνών Αξιού και Υποπελαγονικής που βρίσκονταν εκατέρωθεν της Πελαγονικής. Χαρακτηριστικά είναι τα οφειολιθικά μίγματα (mélange) που δημιουργήθηκαν λόγω της επώθησης των οφειολίθων πάνω στα ανθρακικά ιζήματα.
- Στο Μέσο-Άνω Κρητιδικό γίνεται επίκλυση της θάλασσας, ύστερα από την ανάδυση των εσωτερικών ζωνών και την μετέπειτα χέρσευσή τους. Πάνω στα πτυχωμένα ανθρακικά πετρώματα τοποθετούνται ασύμφωνα τα ιζήματα της επίκλυσης. Η στρωματογραφική διάρθρωση από κάτω προς τα πάνω είναι:
 - Κροκαλοπαγή, μικρολατυποπαγή Κενομανίου
 - Μικρολατυποπαγείς ασβεστόλιθοι Σαντωνίου
 - Συμπαγής ασβεστόλιθος Μαιστριχτίου
 - Φλύσχης Άνω Μαιστριχτίου



Σχήμα 1.1.2. Θέση της Πελαγονικής ζώνης στον ελλαδικό χώρο.

2. Ηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης

Στόχος των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης είναι ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης με μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων στην επιφάνεια της Γης. Η σημαντικότερες ποσότητες που μετρούνται είναι η **ηλεκτρική τάση** και η **ειδική ηλεκτρική αντίσταση**.

Οι πιο διαδεδομένες ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης είναι η μέθοδος της ειδικής αντίστασης, της επαγόμενης πολικότητας, η μέθοδος των ισοδυναμικών

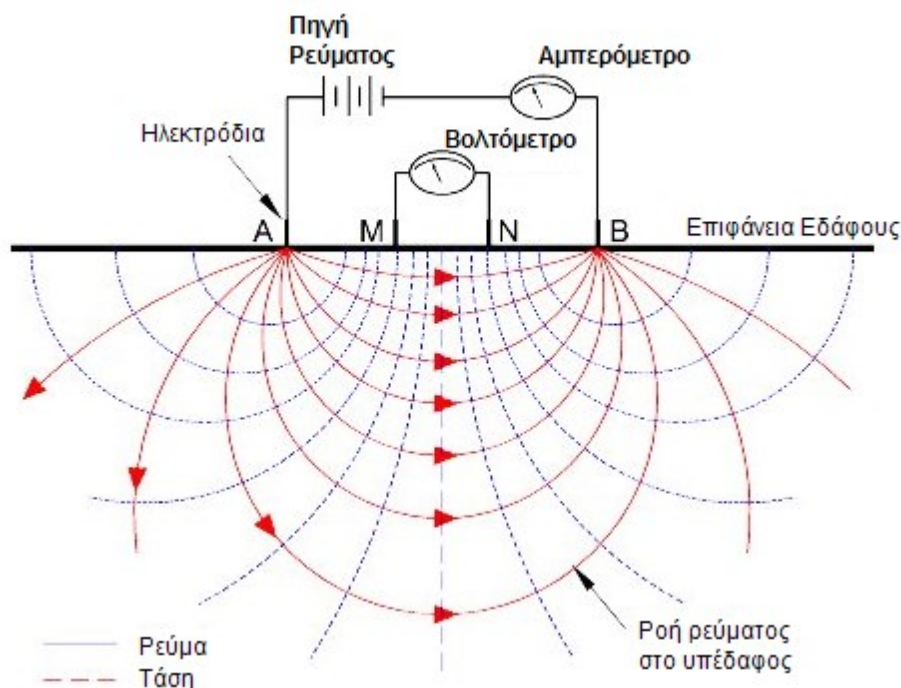
γραμμών καθώς και η μέθοδος των τελλουρικών ρευμάτων και του φυσικού δυναμικού. Διακρίνονται σε δυο γενικές κατηγορίες:

- Αυτές που αφορούν την μέτρηση ποσοτήτων **φυσικών** ηλεκτρικών ρευμάτων ή πεδίων. (Μέθοδος φυσικού δυναμικού, τελλουρικών ρευμάτων)
- Αυτές που αφορούν την μέτρηση μεγεθών που εξαρτώνται από παραγόμενα **τεχνητά** ηλεκτρικά ρεύματα ή πεδία. (Μέθοδος της ειδικής αντίστασης, επαγόμενης πολικότητας, ισοδυναμικών γραμμών)

Η ηλεκτρική αντίσταση ρ , εκφράζει την ευκολία ενός υλικού να επιβραδύνει την κίνηση του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την ροή του στο εσωτερικό του και υπολογίζεται απο την σχέση

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

Όπου R : ηλεκτρική αντίσταση ενός κομματιού πετρώματος σχήματος κυλίνδρου, S : διατομή, l : μήκος αυτού



Σχήμα 2.1 Διάταξη μέτρησης ειδικής αντίστασης

Το αντίστροφο, $\sigma=1/\rho$, της ειδικής αντίστασης λέγεται **ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα** του πετρώματος.

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης στο σύστημα S.I. είναι το $1\Omega m$. Συχνά χρησιμοποιείται και η μονάδα $1\Omega cm$ και είναι $1\Omega m = 100\Omega cm$.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων και ορυκτών παρουσιάζει μεγάλος εύρος σε σχέση με άλλες φυσικές ιδιότητες. Οι τιμές της κυμαίνονται από $10^{-6}\Omega m$ σε ορισμένα ορυκτά, όπως ο γραφίτης, μέχρι $10^{15}\Omega m$ σε ορισμένα ξηρά χαλαζιακά πετρώματα. Καλοί αγωγοί θεωρούνται τα πετρώματα και ορυκτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^{-6} και $10^{-1}\Omega m$ και κακοί αγωγοί αυτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^8 και $10^{15}\Omega m$.

Οι παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν την αντίσταση είναι η γεωλογική τους ηλικία που επηρεάζει τον βαθμό συνοχής των πετρωμάτων. Επιπλέον, άλλοι παράγοντες είναι η **θερμοκρασία** η οποία μεταβάλλει το ιζώδες, το **δευτερογενές πορώδες** σε κρυσταλλικά πετρώματα που επηρεάζει τον όγκο νερού και η **περιεκτικότητα σε χλωρίοντα ή ελεύθερα ιόντα** του υπόγειου ύδατος.

Πιο συγκεκριμένα:

Πορώδες

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα μερικών ορυκτών, (π.χ. μεταλλικά ορυκτά, γραφίτης) οφείλεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Όμως, τα περισσότερα ορυκτά από τα οποία συνήθως αποτελούνται τα πετρώματα είναι μονωτές και η ηλεκτρική αγωγιμότητα των πετρωμάτων αυτών και ιδιαίτερα αυτών που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της Γης οφείλεται στα ιόντα τα οποία περιέχονται στο νερό που πληρώνει στους πόρους τους (ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα). Συνεπώς, η αγωγιμότητα πρέπει να εξαρτάται από το πορώδες του πετρώματος.

Η εμπειρική σχέση μεταξύ της ειδικής αντίστασης, ρ και του πορώδους, ϕ είναι η ακόλουθη:

$$\rho = \alpha \rho_v \phi^{-m}$$

όπου ρ_v η ειδική αντίσταση του νερού που περιέχεται στους πόρους του πετρώματος, ϕ είναι ο λόγος του όγκου των πόρων προς τον ολικό όγκο του πετρώματος (πορώδες) και α, m σταθερές οι οποίες σε πρώτη προσέγγιση έχουν τιμές $\alpha=1$ και $m=2$. Η σχέση είναι γνωστή ως ο **νόμος του Archie** και δείχνει ότι με την ελάττωση του πορώδους επέρχεται αύξηση της ειδικής αντίστασης.

Γεωλογική ηλικία	Θαλάσσια ιζήματα	Χερσαία ιζήματα	Ηφαιστειακά πετρώματα	Πλουτώνια πετρώματα	Ασβεστόλιθος ανυδρίτης δομολίτης
Τετατρογενές	1-10	15-50	10-200	500-2000	50-5000
Μεσοζωικό	5-20	25-100	20-500	500-2000	100-10000
Λιθανθρακοφόρο	10-40	50-300	50-1000	1000-5000	200-10000
Παλαιοζωικό	40-200	100-500	100-2000	1000-5000	10000-100000
Προκάμβριο	100-2000	300-5000	200-5000	5000-20000	10000-110000

Πίνακας 2.1. Ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις ρ (σε Ωm) για πετρώματα τα οποία είναι διαποτισμένα με νερό (Dobrin 1976).

Ηλικία

Η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων αυξάνεται γενικά με την γεωλογική ηλικία τους, λόγω της αύξησης της συνοχής τους η οποία οφείλεται στην αύξηση του πάχους των υπερκείμενων στρωμάτων και συνεπώς και της πίεσης που ασκούν τα στρώματα αυτά στα από κάτω με την αύξηση του χρόνου. Όμως, αυτό δεν ισχύει πάντα και ιδιαίτερα για τα τριτογενή ιζήματα τα οποία, λόγω του ότι σχηματίστηκαν σε γλυκό νερό κατά κύριο λόγο, έχουν μεγαλύτερες ειδικές αντιστάσεις από τα μεσοζωικά ιζήματα τα οποία σχηματίστηκαν σε αλμυρό νερό.

Θερμοκρασία

Η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων εξαρτάται επίσης από την θερμοκρασία τους. Μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας επιδρούν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα των πετρωμάτων που είναι διαποτισμένα με νερό στο βαθμό που επηρεάζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη που περιέχεται στα πετρώματα. Αν αυξηθεί η θερμοκρασία, ελαττώνεται το ιξώδες του νερού οπότε ελαττώνεται και η ειδική αντίσταση (αύξηση της αγωγιμότητας). Η ειδική αντίσταση τόσο των ηλεκτρολυτών όσο και των πετρωμάτων που είναι διαποτισμένα με ηλεκτρολύτη δίνεται σε συνάρτηση με την θερμοκρασία από την σχέση

$$\rho_{\theta} = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha_{\theta} (\theta - 18)}$$

Όπου ρ_{θ} και ρ_{18} είναι η ειδική αντίσταση σε θερμοκρασία $\theta^{\circ}C$ και σε θερμοκρασία $18^{\circ}C$, αντίστοιχα, και α_{θ} είναι ο θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης, ο οποίος έχει τιμή περίπου $0,025/^{\circ}C$, για τους περισσότερους ηλεκτρολύτες.

Η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων που είναι διαποτισμένα με νερό επηρεάζεται έντονα από τη θερμοκρασία μόνο σε περίπτωση μεγάλων μεταβολών αυτής και ιδιαίτερα όταν η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή ώστε να προκαλεί εξάτμιση του νερού ή πολύ χαμηλή ώστε το νερό να παγώσει.

Θερμοκρασία (° C)	Ειδική Αντίσταση (Ohm m)
20	72
10	99
0 (νερό)	138
0 (πάγος)	300
-5	790
-15	3300

Πίνακας 2.2 : Μεταβολή της ειδικής αντίστασης σε συνάρτηση με την θερμοκρασία

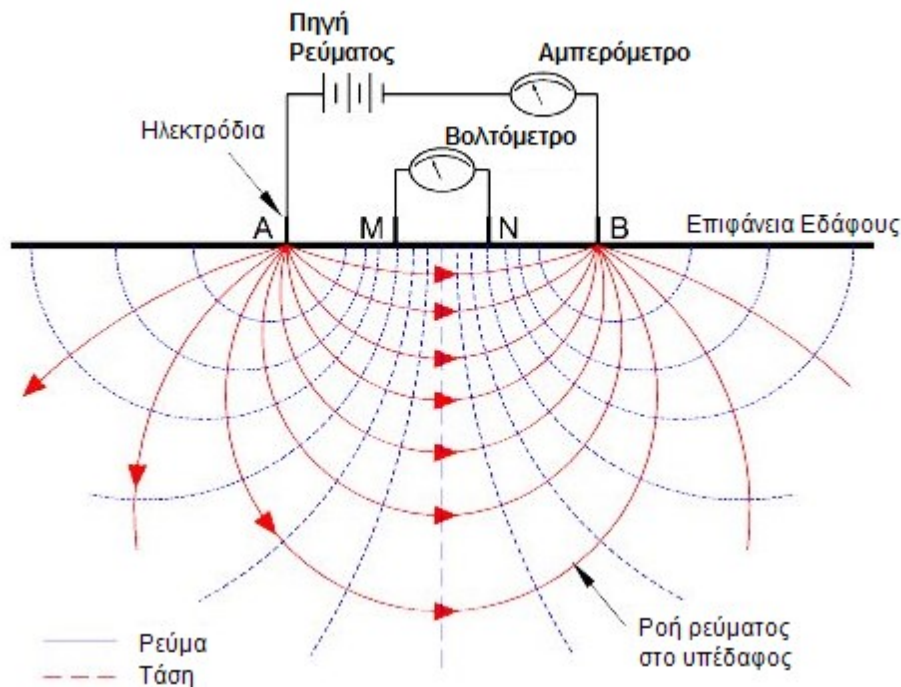
Ενδεικτικά, στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται οι αντιστάσεις των κυριότερων πετρωμάτων που συναντώνται.

ΤΥΠΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	R (Ohm m)
ΠΥΡΙΓΕΝΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	
ΓΡΑΝΙΤΗΣ	$5 \cdot 10^3 - 10^6$
ΒΑΣΑΛΤΗΣ	$10^3 - 10^6$
ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ	$6 \cdot 10^2 - 4 \cdot 10^7$
ΜΑΡΜΑΡΟ	$10^2 - 2.5 \cdot 10^8$
ΧΑΛΑΖΙΤΗΣ	$10^2 - 2 \cdot 10^5$
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	
ΨΑΜΜΙΤΕΣ	$8 - 4 \cdot 10^3$
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΙ	$50 - 4 \cdot 10^2$
ΕΔΑΦΗ ΚΑΙ ΝΕΡΟ	
ΑΡΓΙΛΟΙ	1- 100
ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	10-800
ΓΛΥΚΟ ΝΕΡΟ	10-100
ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΝΕΡΟ	0.2

Πίνακας 2.3: Ειδική αντίσταση πετρωμάτων.

2.1 Μέθοδος της ειδικής αντίστασης και τρόπος διάταξης των ηλεκτροδίων

Η μέθοδος της ειδικής αντίστασης είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος γεωηλεκτρικής διασκόπησης.



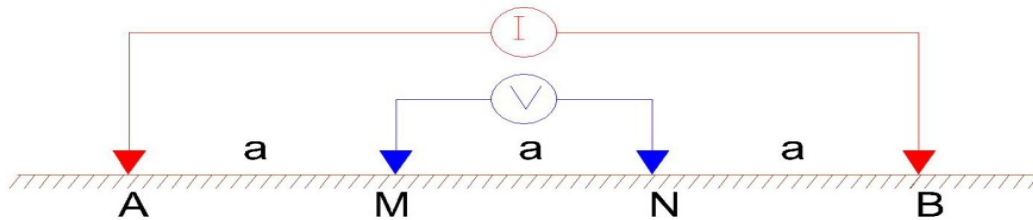
Σχήμα 2.1.1 Διάταξη μέτρησης ειδικής αντίστασης

Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιούνται δύο **ηλεκτρόδια ρεύματος** A,B τα οποία χρησιμεύουν για την διαβίβαση ρεύματος στο έδαφος, ενώ δύο άλλα **ηλεκτρόδια**, αυτά του **δυναμικού**, M,N μετρούν σε διάφορες θέσεις το δυναμικό που έχει δημιουργηθεί από το ρεύμα αυτό. Μετράται και η ένταση του ρεύματος i και η διαφορά δυναμικού ΔV ώστε να καθοριστεί η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ . Ο τρόπος με τον οποίο κατανέμεται η ειδική αντίσταση λέγεται **γεωηλεκτρική δομή**..

Δεν είναι εύκολος ο άμεσος υπολογισμός της ειδικής αντίστασης, από τις ηλεκτρικές μετρήσεις στην επιφάνεια της Γης. Για το λόγο αυτό υπολογίζεται αρχικά μια φυσικώς ανύπαρκτη ποσότητα η οποία ονομάζεται **φαινόμενη ειδική αντίσταση** ρ_a και χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της πραγματικής ειδικής αντίστασης στους διάφορους σχηματισμούς.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατά τους οποίους διατάσσονται τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού. Οι πιο γνωστές είναι οι διατάξεις **Wenner**, **Schlumberger** και **διπόλου-διπόλου**.

Κατά την διάταξη αυτή λαμβάνονται $AM=MN=NB=a$, δηλαδή τα ηλεκτρόδια διατάσσονται συμμετρικά σε ορισμένη γραμμή.



Σχήμα 2.1.2. διάταξη ηλεκτροδίων Wenner

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από την σχέση

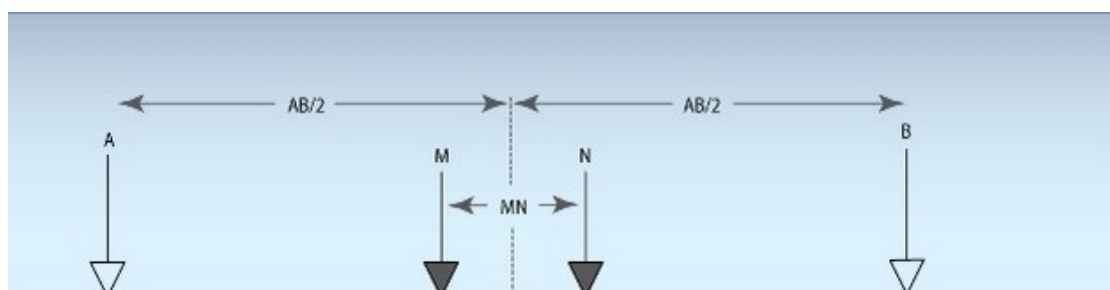
$$\rho_a = 2\pi a \Delta V / i$$

Συνεπώς, ο γεωμετρικός συντελεστής είναι $K=2\pi a$.

Για ηλεκτρική βυθοσκόπηση (κατακόρυφη ηλεκτρική διασκόπηση) τα ηλεκτρόδια αναπτύσσονται σε σχέση με ορισμένο κέντρο με αύξηση της a κατά ορισμένη κάθε φορά απόσταση, ενώ για ηλεκτρική χαρτογράφηση (οριζόντια ηλεκτρική διασκόπηση) η απόσταση a παραμένει σταθερή και τα τέσσερα ηλεκτρόδια κινούνται κατά μήκος ορισμένης τομής και η τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης χαρτογραφείται στο κέντρο κάθε διάταξης.

Διάταξη Schlumberger

Στην διάταξη αυτή η απόσταση $MN=2l$ μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση $AB=2L$, μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος ($L \gg l$).



Σχήμα 2.1.3. Διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger

Για την φαινόμενη ειδική αντίσταση ισχύει:

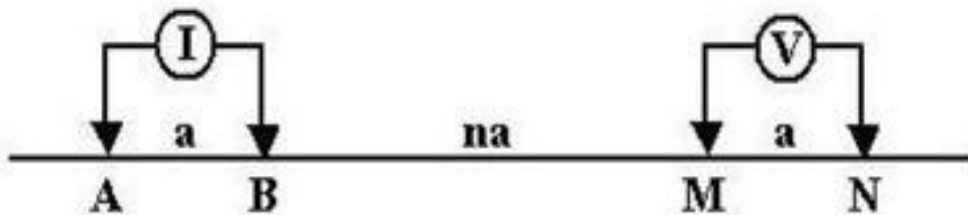
$$\rho_a = \pi L^2 \Delta V / 2Ii$$

Στην προκειμένη περίπτωση ο γεωμετρικός συντελεστής είναι $K = \pi L^2 / 2I$.

Για γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση, τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά, ενώ η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται σταδιακά και συμμετρικά σχετικά με το κέντρο της διάταξης. Για γεωηλεκτρική χαρτογράφηση τα τέσσερα ηλεκτρόδια μετακινούνται πάνω στην τομή, ενώ η απόστασή τους παραμένει σταθερή όπως και στην διάταξη Wenner.

Διάταξη διπόλου-διπόλου

Τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος βρίσκονται σε μικρή απόσταση $AB=2l$, αλλά είναι απομακρυσμένα από τα ηλεκτρόδια δυναμικού, δηλαδή απέχουν από αυτά σημαντική απόσταση $BM=n2l$, ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού απέχουν την ίδια μικρή απόσταση $MN=2l$.



Σχήμα 2.1.4. Διάταξη διπόλου-διπόλου

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από την σχέση

$$\rho_a = 2\pi n(n+1)(n+2)l \Delta V / i$$

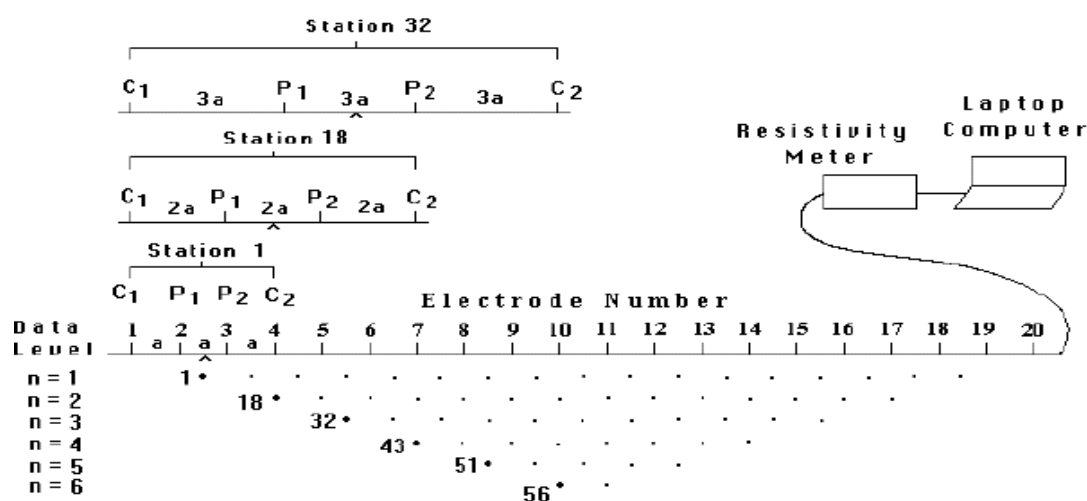
Το πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι η απόσταση $2nl$ μπορεί να αυξηθεί σημαντικά και περιορίζεται μόνο από τον εδαφικό θόρυβο και από την δυνατότητα των οργάνων να καταγράψουν την τάση και όχι από την απαίτηση για μεγάλα μήκη καλωδίων.

2.2 Ηλεκτρική τομογραφία και εφαρμογές της

Η ηλεκτρική τομογραφία είναι η απεικόνιση της ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους όπως αυτή προκύπτει από διαδοχικές βυθοσκοπήσεις κατά μήκος μιας γραμμής.

Το πλεονέκτημα της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι ότι δίνει την δυνατότητα κατανόησης σύνθετων γεωλογικών δομών. Η ηλεκτρική αντίσταση μπορεί να αποτυπωθεί είτε με διδιάστατο είτε με τριδιάστατο τρόπο.

Τα πρώτα δεδομένα έχουν την μορφή ψευδοτομής που αντικατοπτρίζει τις τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Κατόπιν αντιστρέφονται για να γίνει απόδοση των πραγματικών τιμών της ειδικής αντίστασης.

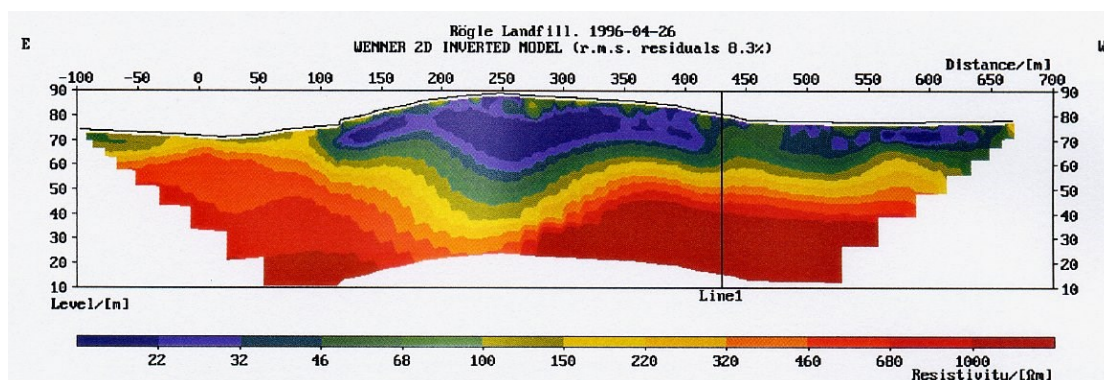
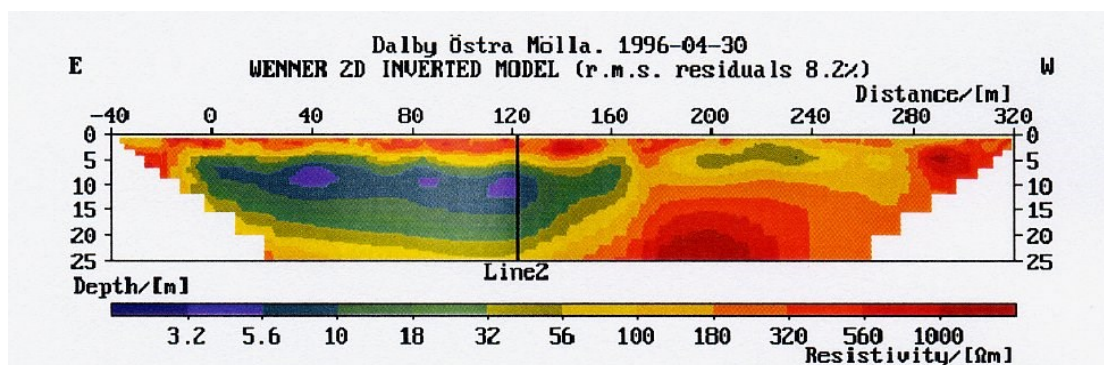


Sequence of measurements to build up a pseudosection

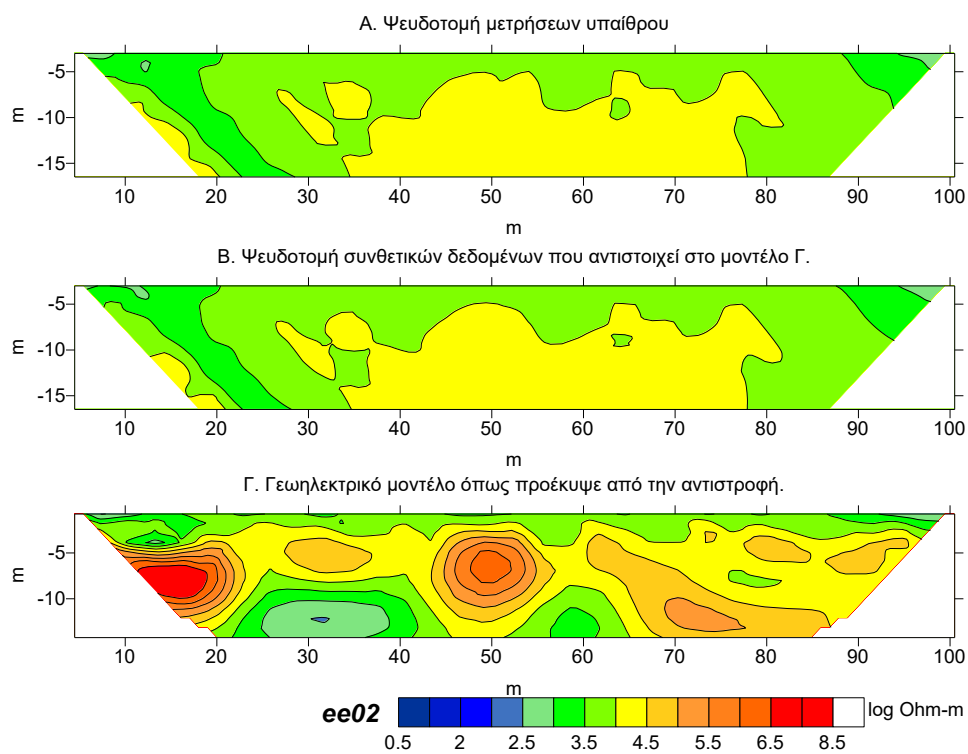
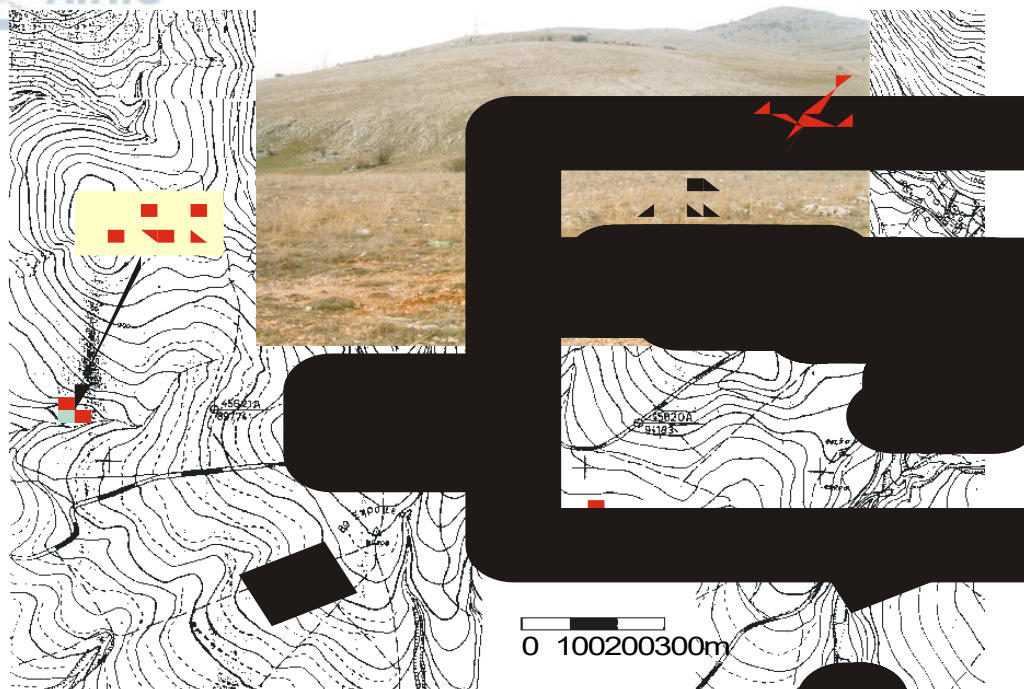
Σχήμα 2.2.1. Διάταξη των ηλεκτροδίων για την δημιουργία ψευδοτομής (Loke, 2003)

Η ηλεκτρική τομογραφία έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που περιλαμβάνει υδρογεωλογικές και τεχνικές μελέτες, τον προσδιορισμό των γεωλογικών δομών και επίσης χρησιμοποιείται για περιβαλλοντική έρευνα ανιχνεύοντας τη ρύπανση που προκαλείται εξαιτίας της μη λήψης των απαραίτητων μέτρων.

Παρακάτω παρατίθενται δύο παραδείγματα ηλεκτρικής τομογραφίας. Στο Σχήμα 2.2.4-2.2.5 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα αντιστροφής τομής ηλεκτρικής τομογραφίας από το σπήλαιο της Ερμακιάς Πτολεμαΐδας όπου η αντίσταση πάνω από το γνωστό θάλαμο του σπηλαίου παρουσιάζεται με ιδιαίτερα μεγάλες τιμές στο κέντρο της τομής.



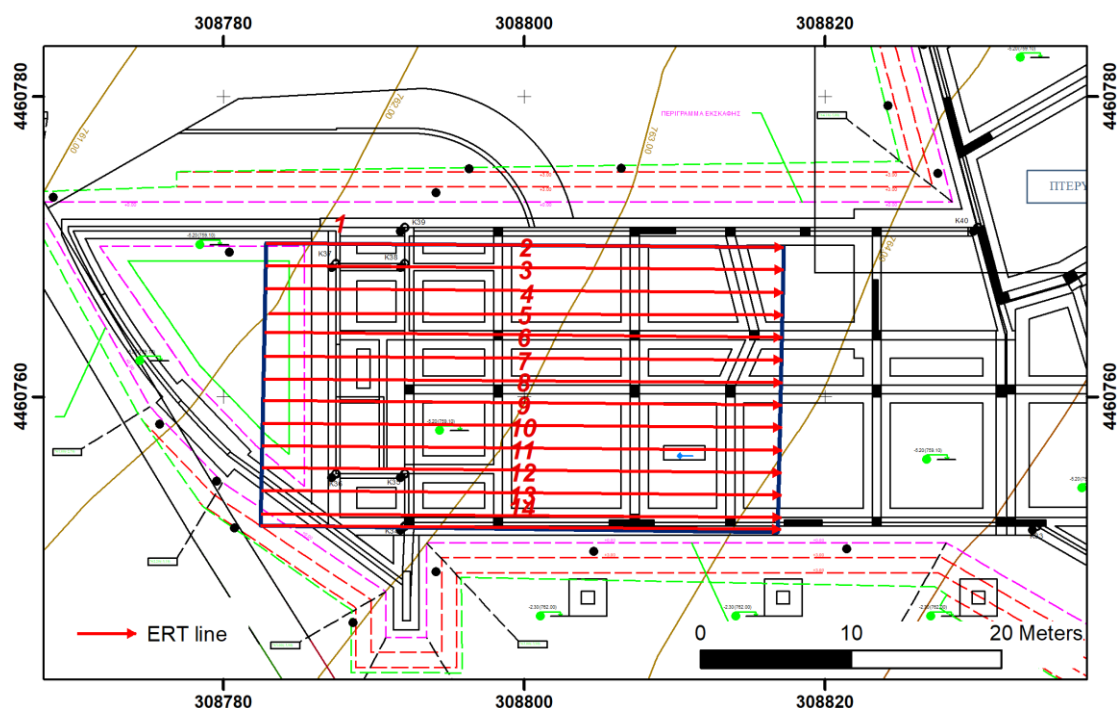
Σχήμα 2.2.2. και 2.2.3. Εντοπισμός ορίων παλιών Χ.Υ.Τ.Α., Dalby, Sweden. (Bernstone, Dahlin, 1996)



Σχήμα 2.2.4. και 2.2.5. Σπήλαιο Ερμακιάς, Πτολεμαΐδα (Βαργεμέζης, Παπαζάχος, Τσούρλος 2001)

3. Γεωφυσικές μετρήσεις

Οι γεωφυσικές μετρήσεις που παρουσιάζονται στην εργασία είναι 13 συνολικά τομές παράλληλες μεταξύ τους. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη έρευνα είναι η διπόλου-διπόλου με την χρήση 24 ηλεκτροδίων σε κάθε τομή. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 1,5μ. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη των μετρήσεων είναι το Syscal Pro της εταιρείας IRIS instruments. Οι αποστάσεις μεταξύ των τομών είναι 1.5μ και μόνο η τελευταία (G14) έχει απόσταση 1m αλλά δεν παρουσιάζεται στην εργασία αυτή.



Σχήμα 3.1. Χωροθέτηση ηλεκτρικών τομογραφιών



Σχήμα 3.2. Syscal Pro

3.1 Αντιστροφή των δεδομένων

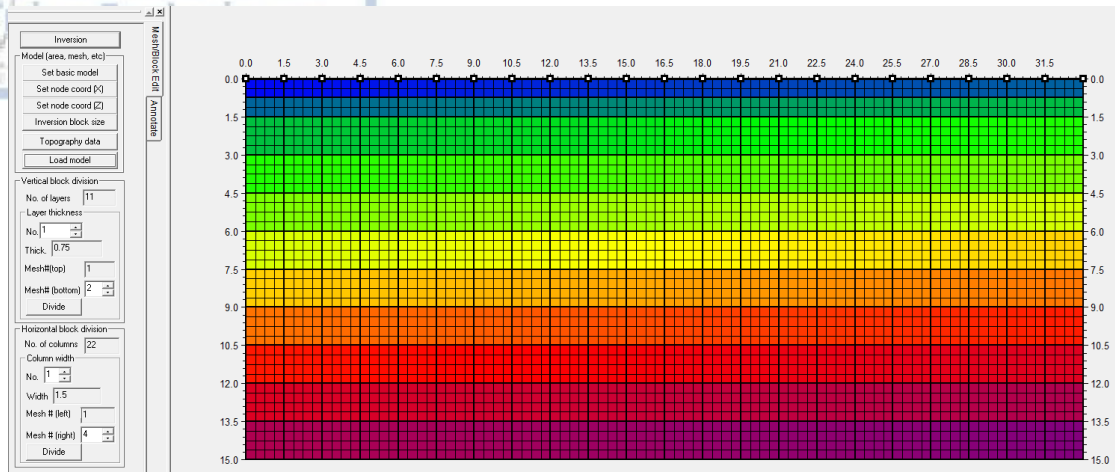
Η αντιστροφή των δεδομένων αφορά μια διαδικασία η οποία έχει ως στόχο την δημιουργία ενός μοντέλου του υπεδάφους το οποίο, εάν υπήρχε, θα παρήγαγε γεωφυσικές μετρήσεις όσο το δυνατό πιο κοντά σε αυτές που πραγματικά μετρήθηκαν. Συγκεκριμένα η αντιστροφή αποτελεί μια περίπλοκη μαθηματική διαδικασία που βασίζεται στην μοντελοποίηση με την αριθμητική επίλυση των διαφορικών εξισώσεων ροής ρεύματος σε μη ομοιογενή γη σε συνδυασμό με τον επαναληπτικό υπολογισμό του αντίστροφου πίνακα ενός γραμμικού συστήματος εξισώσεων.

Για την εφαρμογή της αντιστροφής επιδιώκεται όσο το δυνατόν ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ των θεωρητικών μετρήσεων (που αντιστοιχούν στο γεωφυσικό μοντέλο της αντιστροφής) και των πραγματικών μετρήσεων. Όσο μικρότερο είναι αυτό το σφάλμα μεταξύ θεωρητικών και πραγματικών δεδομένων τόσο πιο αξιόπιστο θεωρείται το αποτέλεσμα της αντιστροφής. Ενδεικτικά, επιθυμητό είναι το όριο του σφάλματος να είναι λιγότερο από 10% και ιδανικά μεταξύ 2-5%.

Η αντιστροφή των δεδομένων και η δισδιάστατη απεικόνισή τους έγινε με το πρόγραμμα DC2DPRO (Yi and Kim, 2010). Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χωρίζει το υπέδαφος σε παραλληλόγραμμα όπου σε κάθε ένα από αυτά ορίζει μια τιμή της πραγματικής αντίστασης. Για να βρεθεί η τιμή αυτή συγκρίνονται τα πραγματικά με τα συνθετικά δεδομένα συνεχώς, έως ότου ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα.

Πιο αναλυτικά, με την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα γίνεται μια πρώτη πλήρης αντιστροφή. Εφόσον το μέσο σφάλμα είναι υψηλό (π.χ. μεγαλύτερο από 10%), τότε εξαιρείται ένας μικρός αριθμός μετρήσεων οι οποίες έχουν την μεγαλύτερη διαφορά από τα συνθετικά δεδομένα και γίνεται εκ νέου η αντιστροφή. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται αρκετές φορές, έως ότου το σφάλμα αγγίξει τα επιθυμητά όρια.

Όλες οι μετρήσεις έχουν αναχθεί στην ίδια χρωματική κλίμακα για ευκολότερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

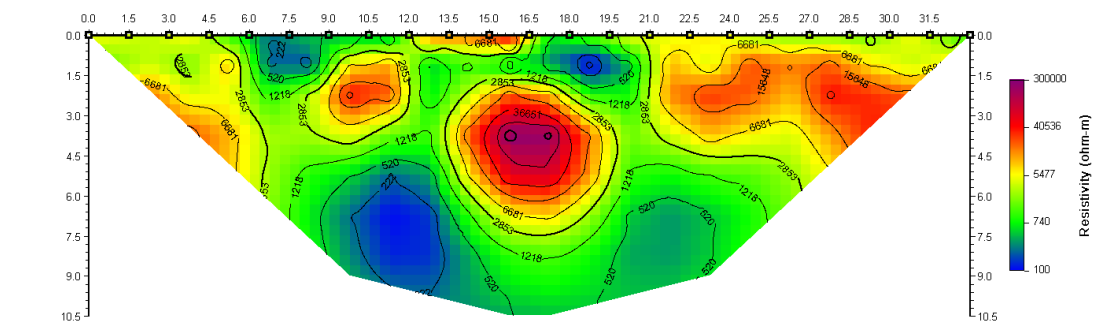


Σχήμα 3.1.1. DC2DPRO. Η απόσταση των ηλεκτροδίων είναι 1,5 m και το μέγιστο βάθος 15 m

3.2 Ερμηνεία γεωφυσικών δεδομένων

Γενικά, οι υψηλές αντιστάσεις αφορούν πιθανά έγκοιλα, η ύπαρξη των οποίων επαληθεύεται γεωλογικά από το σχήμα τους, ενώ οι χαμηλές αντιστάσεις αφορούν αργιλικά κυρίως υλικά. Οι μέτριες αντιστάσεις αναφέρονται στα υγιή ασβεστολιθικά-δολομιτικά πετρώματα.

Τομή G1

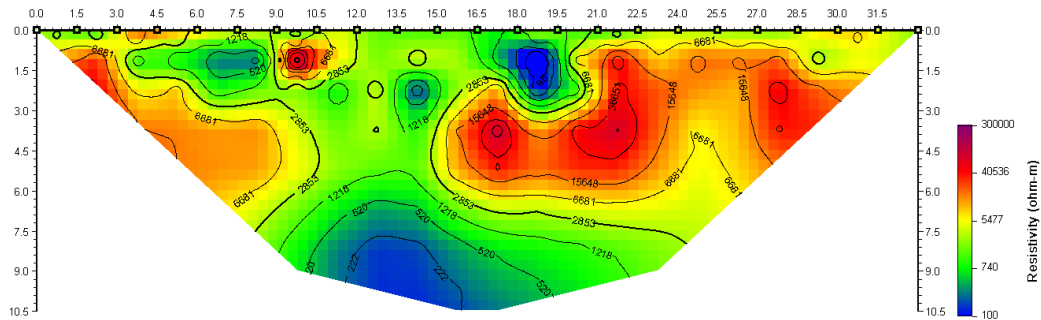


Σχήμα 3.2.1. Τομή G1. RMS error:4%

Διακρίνεται ένα επιβεβαιωμένο έγκοιλο στην μέση ακριβώς της τομής του οποίου το κέντρο βρίσκεται στα 4,5m βάθος και διαμέτρου 3m. Επιπλέον, φαίνεται πως υπάρχουν άλλα δύο πιθανά, το ένα στην θέση 10,5m, βάθους 2m και διαμέτρου 1,5m, ενώ το άλλο, πεπλατυσμένου σχήματος, βρίσκεται σε βάθος 2m, ξεκινάει από την θέση 22,5m και ξεπερνά τα όρια της τομής. Αυτό πιθανά να σχετίζεται όχι με

έγκοιλα αλλά με αλλαγή στα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του ασβεστόλιθου (π.χ. ιδιαίτερα συμπαγής).

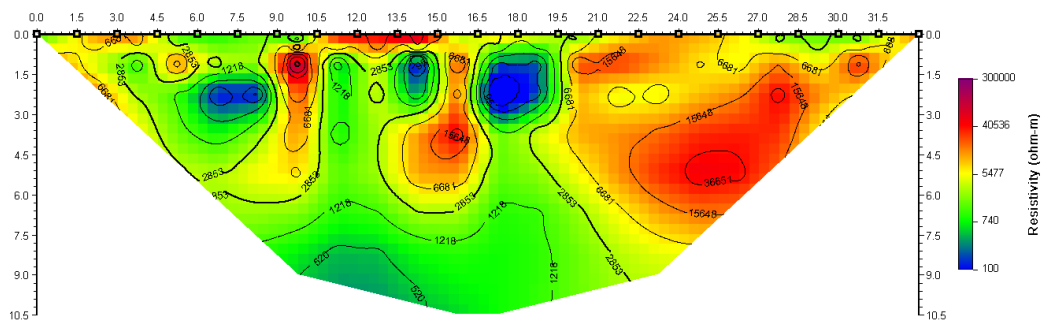
Τομή G2



Σχήμα 3.2.2. Τομή G2. RMS error:10%

Οι καρστικές δομές βρίσκονται στις θέσεις 16,5m, 22m, 27,5m και όλες σε βάθος 4,5m με διάμετρο 1,5m περίπου. Επιπρόσθετα, εμφανίζεται ένα μικρό πιθανό έγκοιλο στην θέση 10m, βάθους 1,5m.

Τομή G3

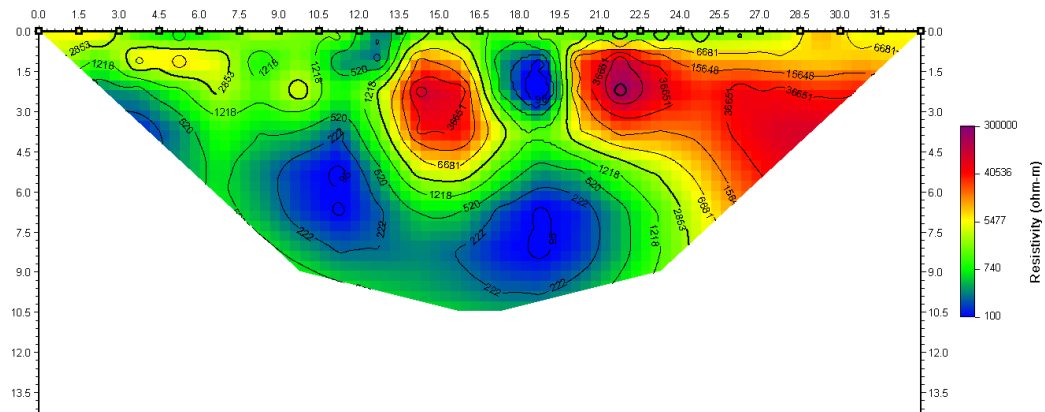


Σχήμα 3.2.3. Τομή G3. RMS error:11%

Στην τομή G3 εμφανίζεται ένα μεγάλο πιθανό έγκοιλο στην θέση 25,5m, βάθους 4,5m. Δύο σαφώς μικρότερα έγκοιλα υπάρχουν στις θέσεις 10m και 16m, βάθους 1,5 και 4,5m αντίστοιχα. Στην θέση 19,5m πιθανότατα υπάρχει ένα ρήγμα μεγάλης κλίσης

καθώς οι αντιστάσεις εκατέρωθεν αυτής της γραμμής παρουσιάζουν σημαντικές μεταβολές.

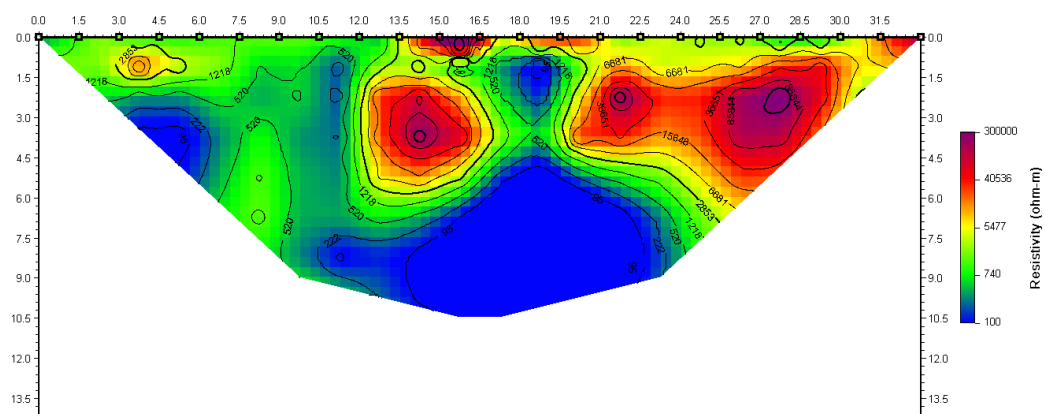
Τομή G5



Σχήμα 3.2.5. Τομή G5. RMS error:7%

Όπως και στις προηγούμενες τομές, εμφανίζονται πιθανά έγκοιλα στις θέσεις 15m, 22,5m και 28m, καθώς και το ρήγμα.

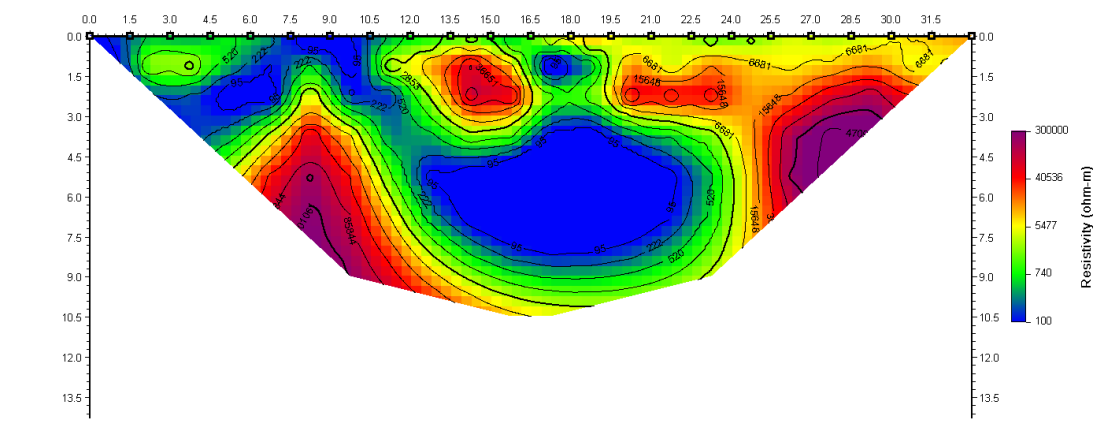
Τομή G6



Σχήμα 3.2.6. Τομή G6. RMS error:10%

Οι προαναφερθείσες τρεις βασικές καρστικές δομές συνεχίζουν να εμφανίζονται και σε αυτή την τομή. Ωστόσο φαίνεται πως στην θέση του ρήγματος έχει αυξηθεί το ποσοστό των αργιλικών υλικών.

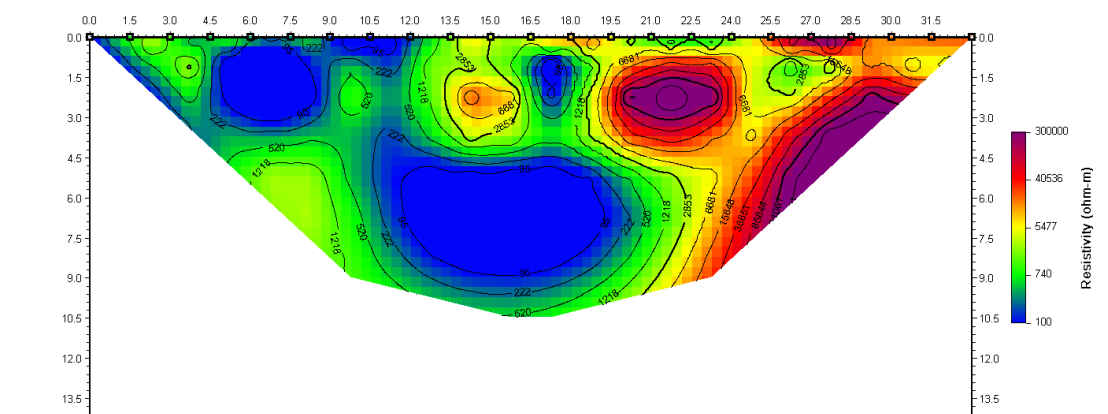
Τομή G7



Σχήμα 3.2.7. Τομή G7. RMS error:10%

Το πιθανό έγκοιλο μεγάλων διαστάσεων στην θέση 27m συνεχίζει την ανάπτυξή του, ενώ στα μικρότερα, στις θέσεις 15m και 22m, συμβαίνει το αντίθετο. Επιπλέον, εμφανίζεται μια μεγάλων διαστάσεων καρστική δομή στην θέση 8m και βάθους 6m.

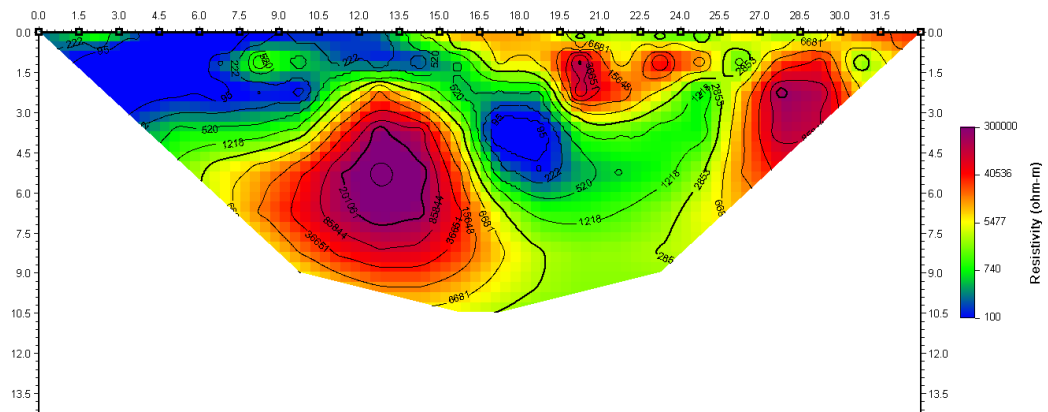
Τομή G8



Σχήμα 3.2.8. Τομή G8. RMS error:10%

Εμφανίζονται καρστικές δομές, όπως προηγουμένως, στις θέσεις 22m και 28m. Αντιθέτως, το πιθανό έγκοιλο της θέσης 15m μικραίνει, ενώ αυτό της θέσης 8m εξαφανίζεται.

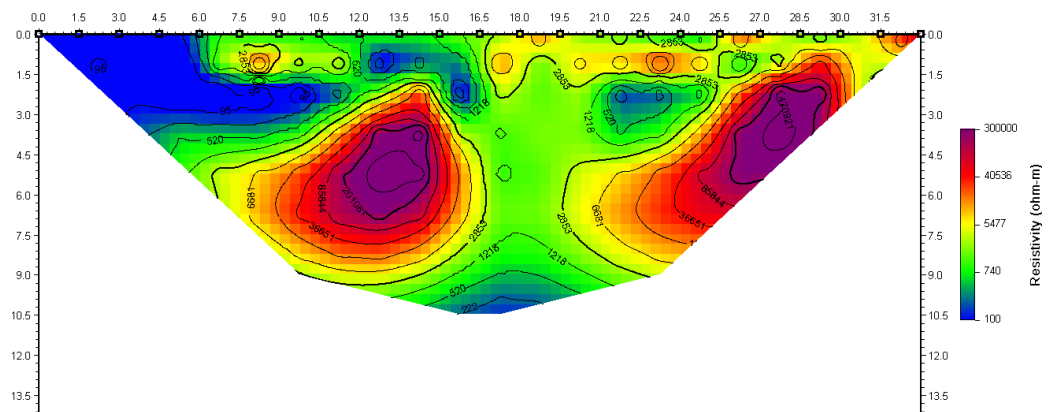
Τομή G9



Σχήμα 3.2.9. Τομή G9. RMS error:10%

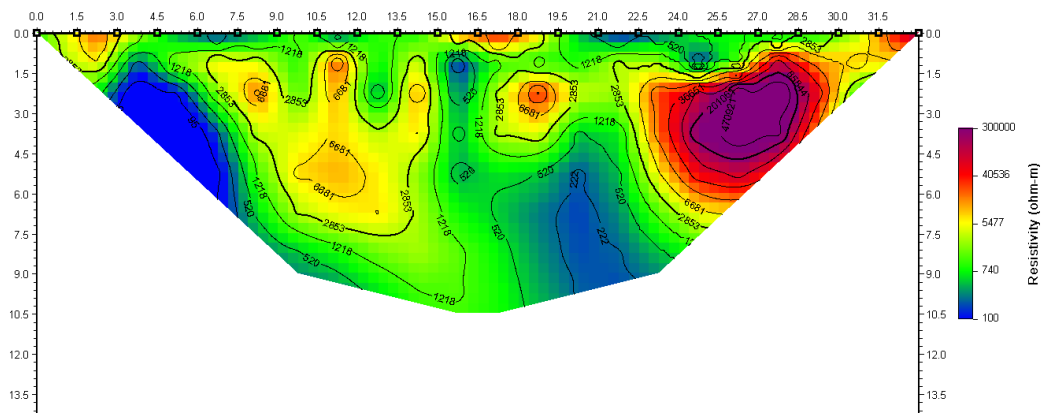
Περιοχές πολύ υψηλών αντιστάσεων βρίσκονται στις θέσεις 12,5m, 20m, 28m και σε βάθη 6m, 2m και 2,5m αντίστοιχα.

Τομή G10



Σχήμα 3.2.10. Τομή G10. RMS error: 10%

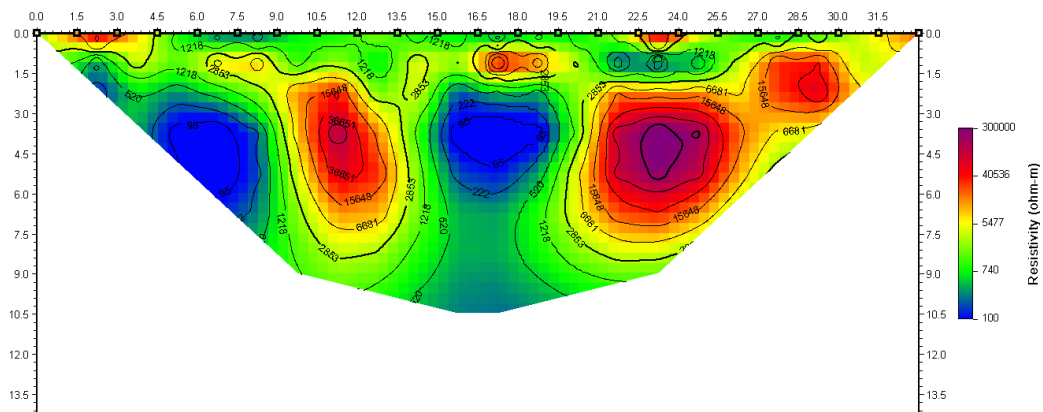
Ένα πιθανό έγκοιλο βρίσκεται στην θέση 13m, βάθους 6m και ένα δεύτερο στην θέση 28m, βάθους 5m.



Σχήμα 3.2.11. Τομή G11. RMS error:7%

Μία καρστική δομή κυριαρχεί στη θέση των 28m.

Τομή G12



Σχήμα 3.2.12. Τομή G12. RMS error:5%

Στην τομή G12, τα δύο κυριότερα πιθανά έγκοιλα συνεχίζουν την ανάπτυξή τους στον χώρο.

4. Συμπεράσματα

Από την ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων, συμπεραίνεται πως η περιοχή μελέτης είναι εξαιρετικά καρστικοποιημένη. Αναλυτικότερα, στο υπέδαφος κυριαρχούν δύο βασικές καρστικές δομές οι οποίες βρίσκονται στην θέση 16m, βάθους 4 περίπου μέτρων, και στην θέση 28m, βάθους 3 μέτρων περίπου. Η θέση και των δύο μεταβάλλεται ελάχιστα στην κάθετη διεύθυνση της ηλεκτρικής τομογραφίας, ενώ συχνά και οι δύο χωρίζονται σε συστήματα μικρότερων εγκοίλων. Ωστόσο, η ακτίνα και των δύο ξεπερνάει αρκετές φορές τα 3m.

Επίσης, υπάρχει ένα πιθανό ρήγμα στην θέση 20m περίπου το οποίο κατά θέσεις είναι εμφανές.

Τέλος, εμφανίζεται μια αντικλινική και συγκλινική δομή αργιλικών υλικών από την θέση 3m έως 20m που καλύπτει όλο το εύρος βάθους, η οποία πιθανόν να σχετίζεται με την πύχωση του ασβεστολίθου.

Συνολικά απαιτείται επιβεβαίωση των παραπάνω ερμηνειών των γεωφυσικών δεδομένων με ερευνητικές γεωτρήσεις, γεγονός που θα βοηθήσει στην καλύτερη βαθμονόμηση των γεωφυσικών τομών σε δεύτερη φάση.

5. Βιβλιογραφία

Μουντράκης Δ. Μ. (2010). Γεωλογία και Γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας.

Παπαζάχος Β. Κ. (1996). Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη γεωφυσική.

Νταγκουνάκη Κ., Κασώλη-Φουρναράκη Α., Τσιραμπίδης Α., Σικαλίδης Κ. (2004). Ανθρακικοί σχηματισμοί της ευρύτερης περιοχής της Κοζάνης και δυνατότητα αξιοποίησής τους στην υαλουργία, στην απομάκρυνση όξινων αερίων και στην μεταλλουργία.

Loke M. H.(2000). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies.*

Γανταδάκη Α.(2012). Γεωφυσική διασκόπηση με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας σε χώρο ανέγερσης των κτιριακών εγκαταστάσεων του τμήματος Μη. Περ. του πολυτεχνείου Κρήτης.

Herman R.(2001). *An introduction to electrical resistivity in geophysics.*

Yi M., Kim J.(2010). *DcDpro 2D and 3D inversion of ERT data. User's Manual, Kigam, Korea*

Iris Instruments(2003). *Syscal Pro user's manual*