

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

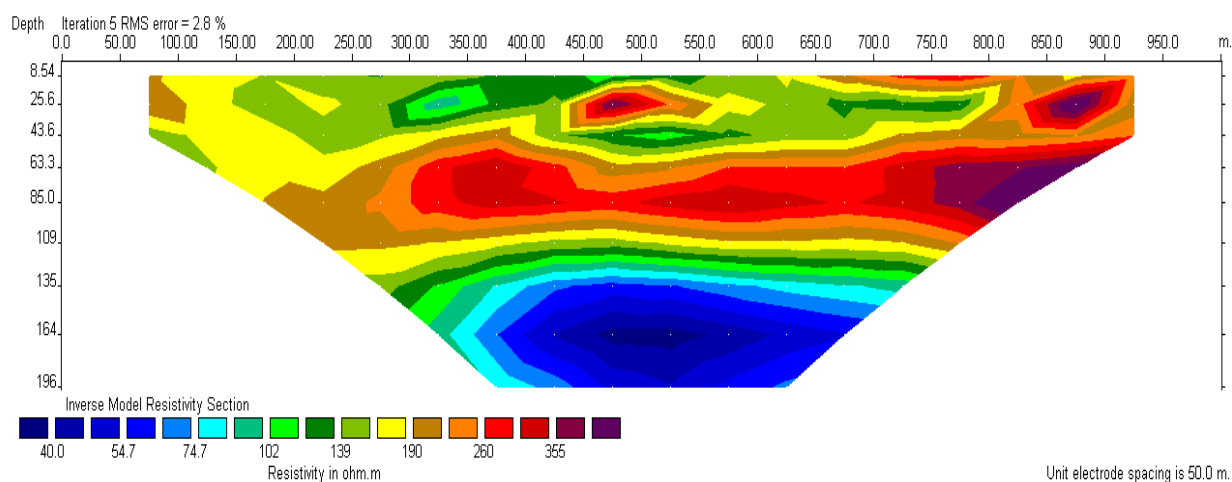


Τμήμα ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
Τομέας Γεωφυσικής

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

" Διερεύνηση των συνθηκών υδροφορίας στο Νομό Καβάλας
με την εφαρμογή πρότυπων γεωφυσικών μεθόδων "

Πόποβα Βαλέρια
Α.Ε.Μ :4471



Επιβλέπων : Βαργεμέζης Γεώργιος , Αναπληρωτής Καθηγητής

Θεσσαλονίκη, Ιούλιος 2015

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

- 1.1 Εισαγωγή

Κεφάλαιο 2

- 2.1 Γεωγραφική Θέση
- 2.2 Γεωλογική Δομή

Κεφάλαιο 3

- 3.1 Ηλεκτρικές Μέθοδοι
- 3.2 Μέθοδος Επαγόμενης Πόλωσης
- 3.3 Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης
- 3.4 Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση
- 3.5 Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση των Πετρωμάτων και Ορυκτών
- 3.6 Φαινόμενη Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση
- 3.7 Γεωηλεκτρικές Διατάξεις Ηλεκτροδίων
- 3.8 Διάταξη Wenner
- 3.9 Διάταξη Schlumberger
- 3.10 Διάταξη Dipole-Dipole
- 3.11 Βάθος διείσδυσης
- 3.12 Ηλεκτρική Τομογραφία
- 3.13 Μέθοδος της Ψευδοτομής
- 3.14 Μέθοδος Αντιστροφής

Κεφάλαιο 4

- 4.1 Γεωφυσική Έρευνα στην περιοχή του Ζυγού
- 4.2 Τομογραφία ZYGOS 1
- 4.3 Τομογραφία ZYGOS 2

Κεφάλαιο 5

- 5.1 Συμπεράσματα

Κεφάλαιο 6

- 6.1 Βιβλιογραφία

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έγινε με βάση τις μετρήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της φορτιστικότητας, που πραγματοποιήθηκαν από το Τομέα Γεωφυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, με επιστημονικά υπεύθυνο τον κ. Βαργεμέζη Γεώργιο, Αναπληρωτή Καθηγητή ΑΠΘ. Οι μετρήσεις σαν στόχο είχαν την απεικόνιση της γεωλογικής δομής της περιοχής νοτιοδυτικά του Ζυγού, ώστε να βρεθεί η καταλληλότερη θέση για την κατασκευή αρδευτικής γεώτρησης.

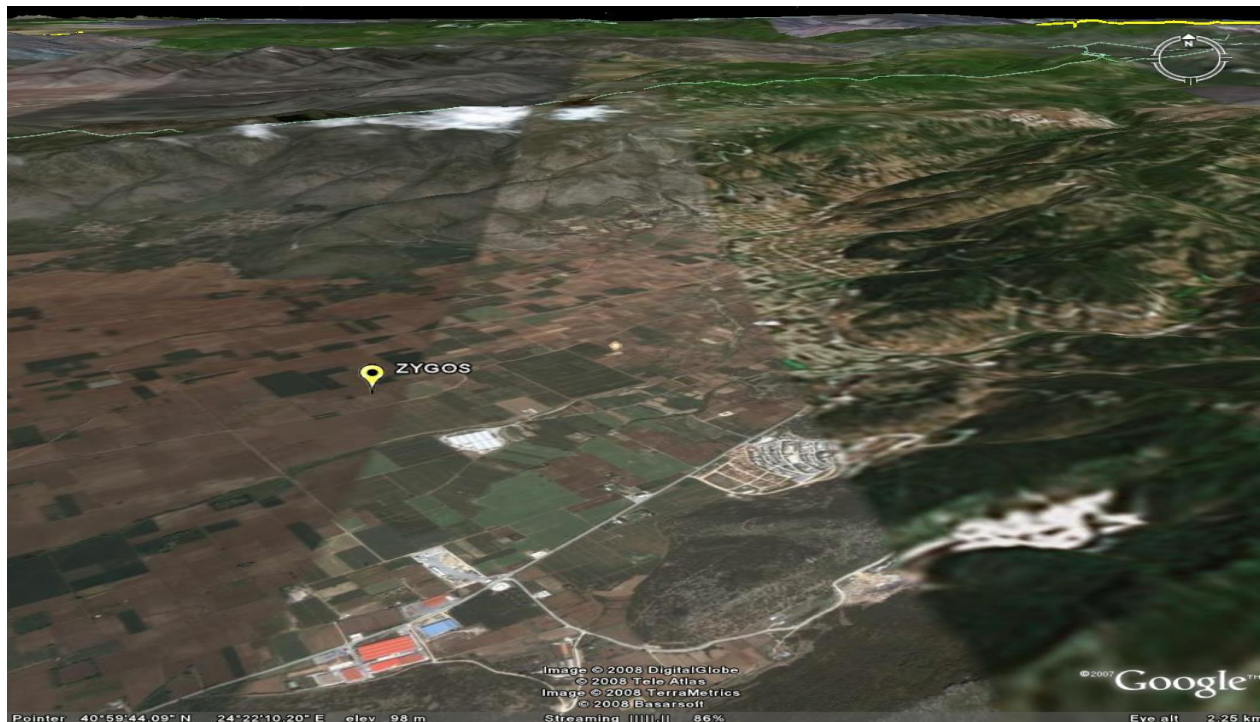
Η μέθοδος που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ήταν της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, με την οποία επιδιώκεται ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους, δηλαδή της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος σε δύο ή τρεις διαστάσεις.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και η αξιολόγηση των στοιχείων των γεωηλεκτρικών μετρήσεων καθώς και των στοιχείων των γεωτρήσεων που είχαν πραγματοποιηθεί στην ευρύτερη περιοχή του Ζυγού στο παρελθόν. Και στο τέλος δίνεται η καταλληλότερη θέση για την κατασκευή αρδευτικής γεώτρησης.

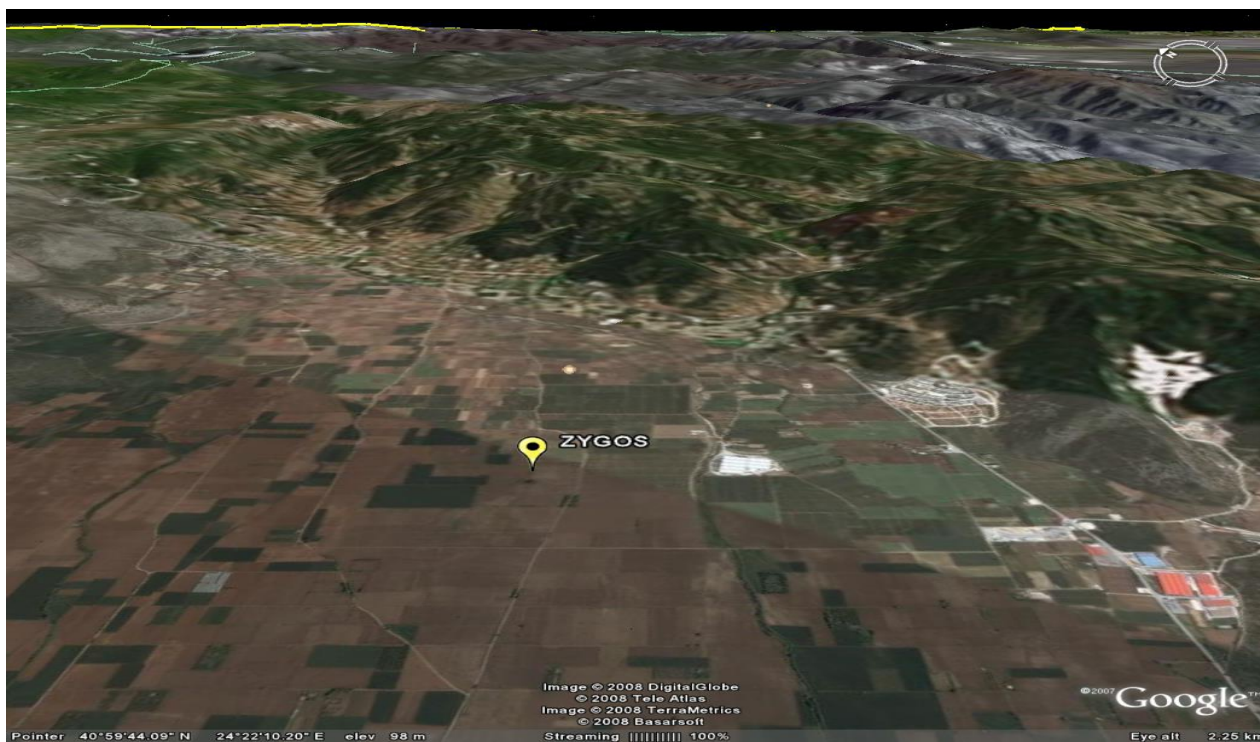
Κεφάλαιο 2

2.1 Γεωγραφική Θέση

Η γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε στην περιοχή του Ζυγού .

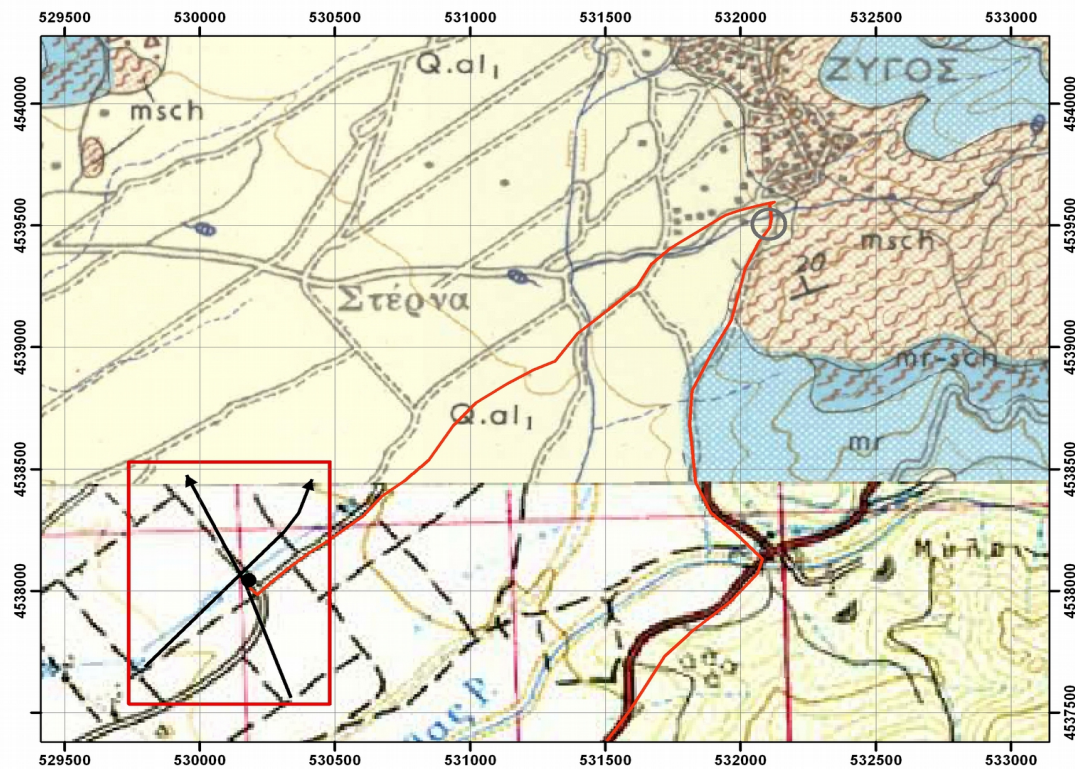


Σχημα 2.1.1 : Δορυφορική εικόνα περιοχής έρευνας (απο Google Earth). Οπτική γωνία προς Βορρά



Σχημα 2.1.1 : Δορυφορική εικόνα περιοχής έρευνας (απο Google Earth) . Οπτική γωνία προς τα ΒΑ

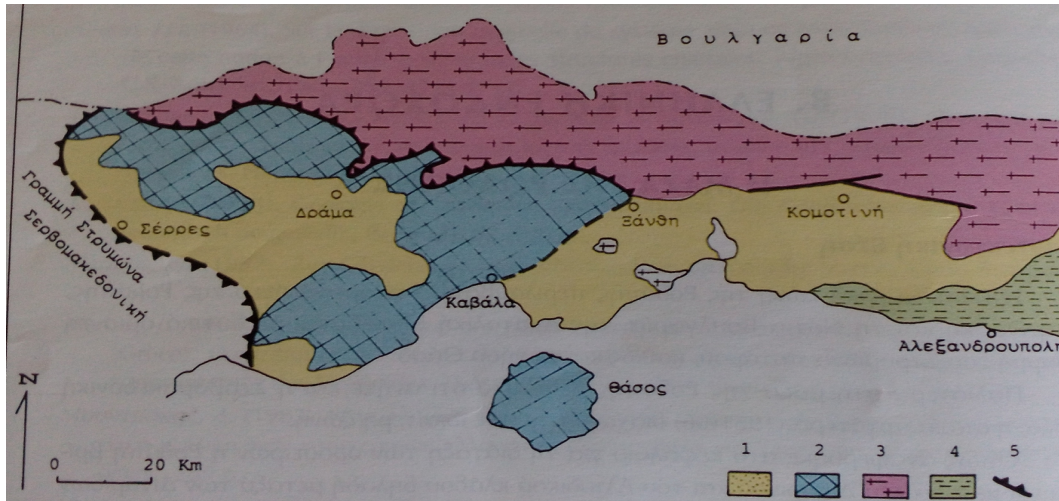
Η περιοχή στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις , βρίσκεται στην νοτιοδυτική πλευρά του Ζυγού και σε απόσταση περίπου 2500 μέτρων (κέντρο της περιοχής έρευνας).



Σχήμα 2.1.3 : Θέση της περιοχής έρευνας (σημειώνεται με κόκκινο τετράγωνο στον χάρτη).

2.2 Γεωλογική Δομή

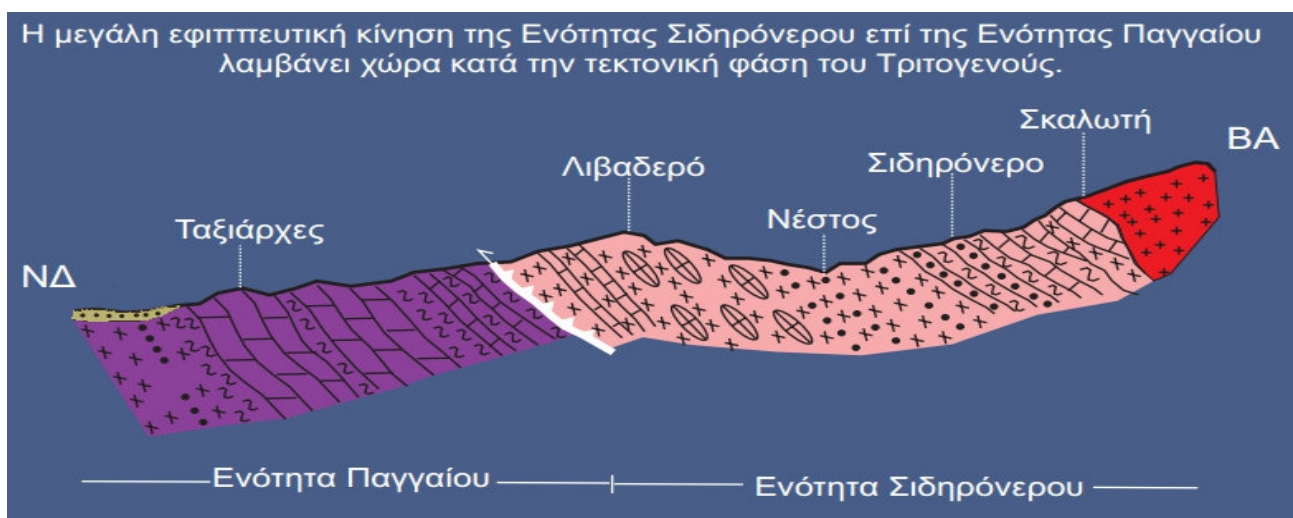
Η περιοχή που μελετάται ανήκει στην "Ελληνική Ενδοχώρα" και συγκεκριμένα στην Μάζα της Ροδόπης.



Σχήμα 2.2.1 : Τεκτονικό σκαρίφημα της μάζας της Ροδόπης με τις δύο ενότητες . 1: μεταλλικά ιζήματα , 2: ενότητα Παγγαίου , 3: ενότητα Σιδηρόνερου , 4: σχηματισμοί της Περιοδοπικής ζώνης , 5 : γραμμή επώθησης.

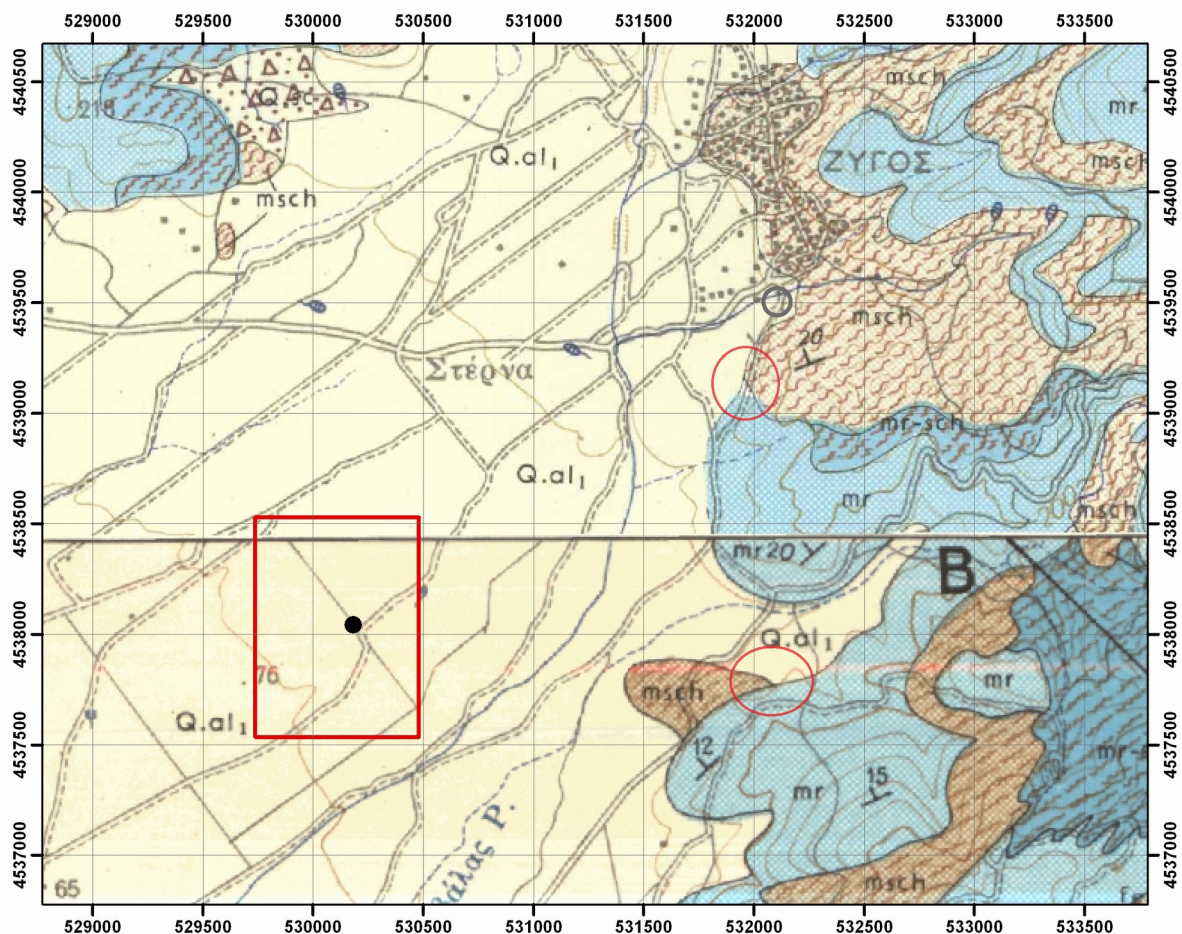
Η μάζα της Ελληνικής Ροδόπης διακρίνεται σε δύο τεκτονικές μονάδες :

- Την κατώτερη τεκτονική Ενότητα Παγγαίου . Αποτελείται από γνεύσιους , μάρμαρο, και μαρμαρυγικούς σχιστόλιθους .
- Την ανώτερη του Ενότητα του Σιδηρόνερου . Αποτελείται από μιγματίτες , γνεύσιους, οφθαλμογνεύσιους , αμφιβολίτες και μαρμαρυγικούς σχιστόλιθους .



Σχήμα 2.2.2 : Σχηματική γεωλογική τομή στην περιοχή Σιδηρόνερου Δράμας στην οποία απεικονίζονται η λιθοστρωματογραφική διαδοχή και η τεκτονική θέση των δύο ενοτήτων Σιδηρόνερου και Παγγαίου .

Πιο συγκεκριμένα για την περιοχή που μελετάται :



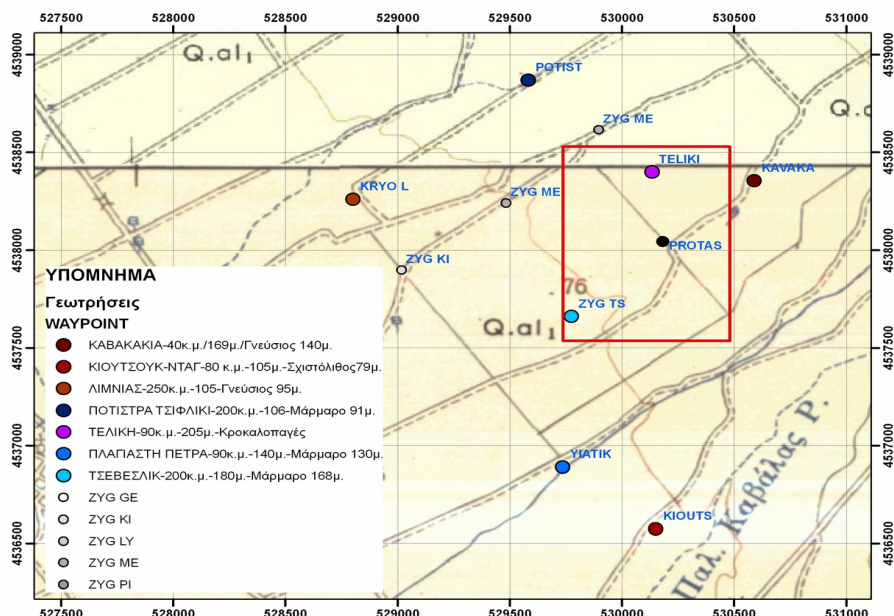
Σχημα 2.2.3 : Γεωλογικός χάρτης της περιοχής έρευνας (ΙΓΜΕ, φύλλα Καβάλα και Νικήσιανη).

Με βάση τα στοιχεία του γεωλογικού χάρτη (Έκδοση ΙΓΜΕ, φύλλα ΚΑΒΑΛΑ και ΝΙΚΗΣΙΑΝΗ, 1:50.000) στην υπό μελέτη περιοχή συναντάται ο σχηματισμός (Q.al1) ο οποίος σύμφωνα με το υπόμνημα αποτελείται από ογκόλιθους, χαλαρά κροκαλοπαγή, λεπτοκοκκώδες υλικό και ερυθρούς πηλούς. Ενώ στα τοπογραφικά ανώτερα σημεία κατά τόπους σχηματίζονται αναβαθμίδες.

Σύμφωνα με τον χάρτη το υπόβαθρο αποτελείται από τον σχηματισμό των μάρμαρων (mr) στον οποίον α) επικρατούν τα ανοικτότερου και σκοτεινότερου φαιού χρώματος μάρμαρα καλώς ή εν μέρη λεπτοστρωματώδη, υπό μορφή στρωμάτων ή φακών. Κατά θέσεις εναλλάσσονται με τους μαρμαρυγικούς σχιστόλιθους ή παρατηρείται πλευρική μετάβαση μεταξύ τους. Τα τεφρά μάρμαρα αποτελούνται τοπικώς, από ποικίλες ποσότητες χαλαζία και μοσχοβίτη καθώς επίσης από βιοτίτη και αλβίτη. Το μέγεθος των κόκκων κυμαίνεται μεταξύ των 0.3 έως 1 cm β) πτωχής στρώσεως ή συμπαγή λευκά μάρμαρα ,

Επίσης παρατηρούμε στον χάρτη ότι ο σχηματισμός μαρμάρων mr βρίσκεται σε επαφή με τον σχηματισμό μαρμαρυγικών σχιστολίθων m.sch, έτσι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να τα συναντήσουμε. Στον σχηματισμό αυτό επικρατούν οι μοσχοβιτικοί σχιστόλιθοι, με ποικίλες ποσότητες χαλαζία και ανθρακικών.

Από την Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση της Καβάλας παραχωρήθηκαν τα στοιχεία των γεωτρήσεων που παρουσιάζονται στο χάρτη (Σχήμα 2.2.4).



Σχήμα 2.2.4 :Θέσεις υπάρχουσών υδρογεωτρήσεων στην ευρύτερη περιοχή έρευνας. Υπόμνημα περιλαμβάνει : α) ο κωδικός της γεώτρησης β) η αντλούμενη παροχή σε κυβικά μέτρα ανά ώρα γ) το βάθος διάτρησης και δ) ο σχηματισμός του υποβάθρου που διατρήθηκε .

Αναλυτικότερα τα στοιχεία των γεωτρήσεων με βάση τις λιθοστρωματογραφικές στήλες μας δίνουν τις παρακάτω πληροφορίες:

- **Γεώτρηση ΚΑΒΑΚΑΚΙΑ:**

Συναντώνται εναλλαγές ερυθρής αργίλου με χαλίκια-κροκάλες και ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή μέχρι το βάθος των 155 μέτρων όπου συναντάται σιφρός ψαμμίτης. Στα 143 μέτρα συναντάται το υπόβαθρο το οποίο αντιστοιχεί σε γνεύσιο, που κατά πάσα πιθανότητα δεν είναι ο αμιγής γνεύσιος αλλά ο σχηματισμός μαρμάρων και γνευσίων.

Υδροφορία συναντάται κυρίως στις στρώσεις χαλίκων και άμμων καθώς επίσης και στον ψαμμιτικό σχηματισμό (40 κ.μ./ώρα).

- **Γεώτρηση ΚΙΟΥΤΣΟΥΚ-ΝΤΑΓ:**

Στην γεώτρηση αυτή συναντώνται και πάλι οι εναλλαγές της αργίλου με χαλίκια και κροκάλες, ενώ στο βάθος των 79 μέτρων συναντάται σχιστόλιθος, ο οποίος κατά πάσα πιθανότητα αντιστοιχεί στο γνευσιακό υπόβαθρο.

Υδροφορία συναντάται αποκλειστικά στους χαλαρούς σχηματισμούς και η απολήψιμη παροχή είναι της τάξης των 80 κ.μ./ώρα.

- **Γεώτρηση ΛΙΜΝΙΑΣ (KRYO L):**

Στην γεώτρηση αυτή συναντήθηκε αποκλειστικά ο σχηματισμός των κροκαλοπαγών από την επιφάνεια και μέχρι το βάθος των 95 μέτρων ενώ στη συνέχεια και μέχρι τα 105 μέτρα συναντάται ο γνεύσιος.

Σημαντική υδροφορία (250 κ.μ./ώρα) συναντήθηκε στο κροκαλοπαγές.

- **Γεώτρηση ΠΟΤΙΣΤΡΑ (ΤΣΙΦΛΙΚΙ):**

Και σ' αυτή τη γεώτρηση συναντήθηκαν οι εναλλαγές αργίλου-κροκαλοπαγών μέχρι το βάθος των 91 μέτρων όπου συναντήθηκε ο σχηματισμός των ασβεστολίθων.

Υδροφορία συναντάται τόσο στα κροκαλοπαγή όσο και στο καρστικοποιημένο υπόβαθρο και συνολικά αποδίδεται απολήψιμη παροχή της τάξης των 200 κ.μ./ώρα.

- **Γεώτρηση ΤΕΛΙΚΗ:**

Σύμφωνα με την γενική περιγραφή συναντάται άργιλος κατά τόπους ερυθρή με κροκάλες χαλαρές κατά θέσεις έως και αργιλοκροκάλες και κροκαλοπαγές.

Σημειώνεται ότι μέχρι το βάθος των 205 μέτρων της γεώτρησης δεν συναντήθηκε σχηματισμός υποβάθρου. Γι' αυτό θα χρησιμοποιηθεί εικονικό βάθος 220 μέτρων .

Συνολικά αποδίδεται απολήψιμη παροχή της τάξης των 90 κ.μ./ώρα.

- **Γεώτρηση ΠΛΑΓΙΑΣΤΗ ΠΕΤΡΑ:**

Το υπόβαθρο που περιγράφεται σαν μάρμαρο συναντάται στο βάθος των 130 μέτρων. Οι υπερκείμενοι σχηματισμοί αποτελούνται από εναλλαγές αργίλων, κροκαλοπαγών καθώς και ψαμμιτικών οριζόντων που εμφανίζονται από τα 52 μέτρα βάθους.

Υδροφορία συναντάται μόνο στα κροκαλοπαγή και συνολικά αποδίδεται απολήψιμη παροχή της τάξης των 90 κ.μ./ώρα.

- **Γεώτρηση ΤΣΕΒΕΣΛΙΚ (ZYGOS TS):**

Το υπόβαθρο που περιγράφεται σαν μάρμαρο συναντάται στο βάθος των 168 μέτρων. Οι υπερκείμενοι σχηματισμοί αποτελούνται από εναλλαγές αργίλων και κροκαλοπαγών.

Υδροφορία συναντάται τόσο στα κροκαλοπαγή όσο και στο καρστικοποιημένο υπόβαθρο και συνολικά αποδίδεται απολήψιμη παροχή της τάξης των 200 κ.μ./ώρα.

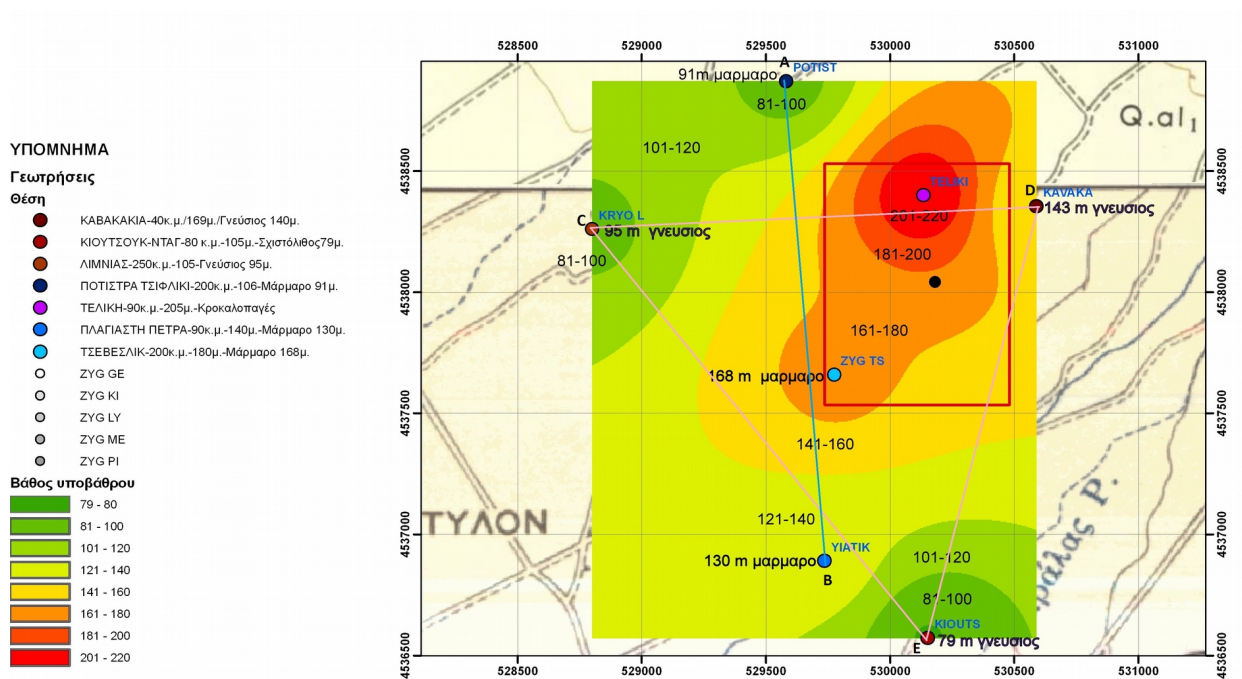
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις γεωτρήσεις , είναι τα εξής :

- Με βάση τα στοιχεία των γεωτρήσεων , υδροφορία αναμένεται από τις χαλαρές αποθέσεις (στρώσεις χαλίκων άμμων , ψαμμιτικό σχηματισμό , χαλίκια και κροκάλες , κροκαλοπαγές) , επίσης υδροφορία αναμένεται και από τα κρυσταλλικά πετρώματα και συγκεκριμένα από το καρστικοποιημένο υπόβαθρο μαρμάρων .
- Αξιοποιώντας τα στοιχεία των γεωτρήσεων, που αφορούν τα βάθη στα οποία συναντάμε το υπόβαθρο σε κάθε γεώτρηση προκύπτει ο χάρτης 2.2.5.

Παρατηρούμε ότι το υπόβαθρο έχει πολύπλοκη δομή :

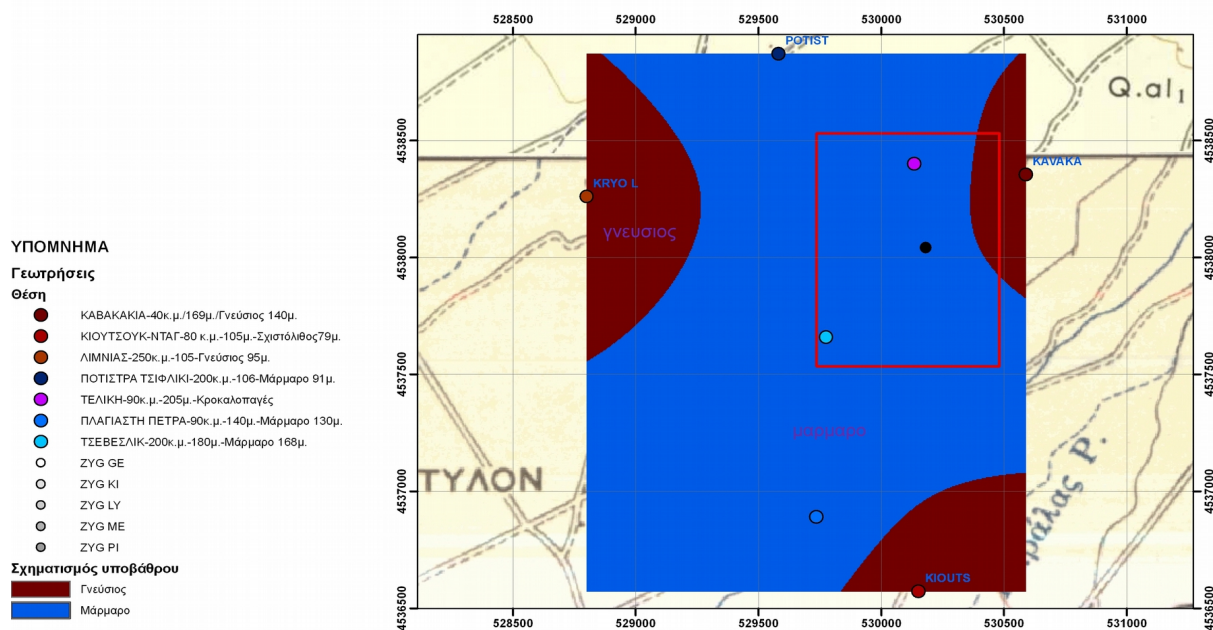
Σε έναν άξονα Βορρά-Νότου , γραμμή AB στον χάρτη, το υπόβαθρο μαρμάρου συναντάται σε βάθη 91 μ (ΠΟΤΙΣΤ), στη συνέχεια παρουσιάζει μια αύξηση, μέχρι το βάθος των 168 μ (ZUG TS), όπου αρχίζει πάλι να μειώνεται μέχρι τα 130μ (ΥΑΤΙΚ) βάθος, δίνοντας έτσι την εντύπωση βυθίσματος κατά μήκος της γραμμής AB με ενδιάμεσο σημείο την γεώτρηση (ZUG TS) .

Αντίστοιχα , το γνευσιακό υπόβαθρο εμφανίζεται σε βάθη από 79 έως 168 μ σε τρίγωνο (CDE) που ορίζεται περιφερειακά της περιοχής έρευνας (Σχήμα 2.2.5).



Σχήμα 2.2.5 : Κατανομή βάθους στο οποίο συναντάμε το υπόβαθρο (από τα στοιχεία των γεωτρήσεων).

Από το παρακάτω σχήμα 2.2.6 που δείχνει την κατανομή των μαρμάρων και των γνευσίων , παρατηρείται ότι υπάρχει ένα βύθισμα των σχηματισμών του υποβάθρου με άξονα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ.



Σχήμα 2.2.6: Κατανομή των σχηματισμών του υποβάθρου που συναντήθηκαν.

Τέλος κατασκευάστηκε ο χάρτης της κατανομής των απολήψιμων παροχών από τις γεωτρήσεις, ο οποίος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Γεωτρήσεις

Θέση

- ΚΑΒΑΚΑΚΙΑ-40κ.μ./169μ./Γνεύσιος 140μ.
- ΚΙΟΥΤΣΟΥΚ-ΝΤΑΓ-80 κ.μ.-105μ.-Σχιστόλιθος 79μ.
- ΛΙΜΝΙΑΣ-250κ.μ.-105-Γνεύσιος 95μ.
- ΠΟΤΙΣΤΡΑ ΤΣΙΦΛΙΚΙ-200κ.μ.-106-Μάρμαρο 91 μ.
- ΤΕΛΙΚΗ-90κ.μ.-205μ.-Κροκαλοπαγές
- ΠΛΑΓΙΑΣΤΗ ΠΕΤΡΑ-90κ.μ.-140μ.-Μάρμαρο 130μ.
- ΤΣΕΒΕΣΛΙΚ-200κ.μ.-180μ.-Μάρμαρο 168μ.

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

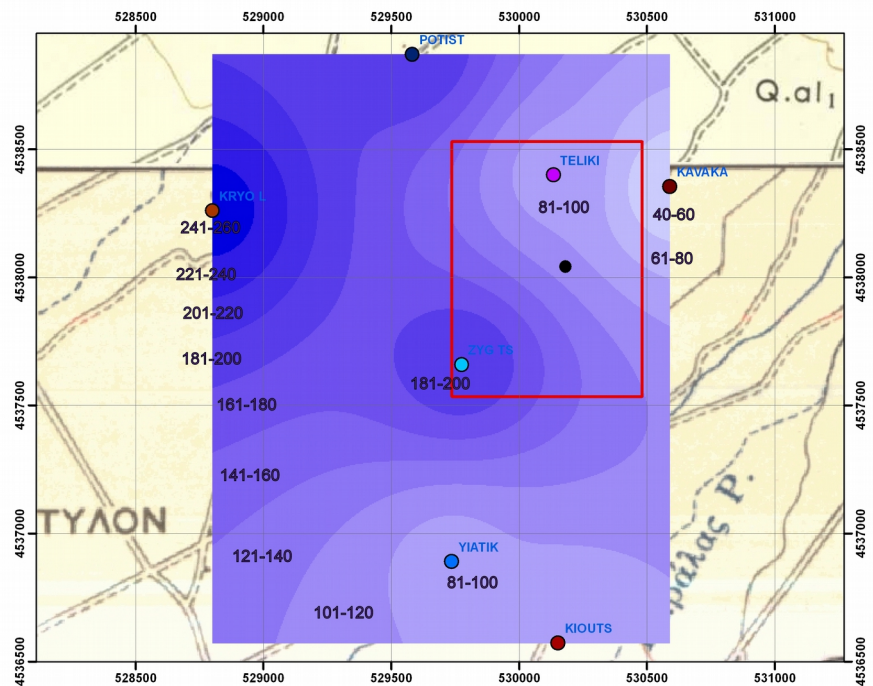
Θέση

Παροχή

Θέση

Παροχή

Θέση



Σχήμα 2.2.7 : Κατανομή απολήψιμων παροχών από τις γεωτρήσεις.

Σε μία διεύθυνση από νοτιοανατολικά προς τα βορειοδυτικά παρατηρείται αύξηση των απολήψιμων παροχών, όπου γίνεται μέγιστη στην γεώτρηση KRYO L, όπου σημαντική υδροφορία συναντήθηκε στο κροκαλοπαγές, με παροχή της τάξης των 250 κ.μ./ώρα και μέχρι τα 105 μέτρα συναντάται το γνευσιακό υπόβαθρο. Σημειώνεται ότι στην περιοχή αυτή παρατηρείται παντελής απουσία αργιλικών σχηματισμών.

Η μικρότερη παροχή εμφανίζεται στα ΒΔ στην γεώτρηση ΚΑΒΑΚΑΚΙΑ με 40κ.μ./ώρα, όπου η υδροφορία συναντάται κυρίως στις στρώσεις χαλικών και άμμων καθώς επίσης και στον ψαμμιτικό σχηματισμό.

Κεφάλαιο 3

3.1 Ηλεκτρικές Μέθοδοι

Με τις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης. Η ποσότητα που μετράμε είναι, συνήθως, η ηλεκτρική τάση, ενώ η ποσότητα η οποία παρουσιάζει περισσότερο ενδιαφέρον και της οποίας επιδιώκεται ο καθορισμός της και η μελέτη της κατανομής των τιμών της μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

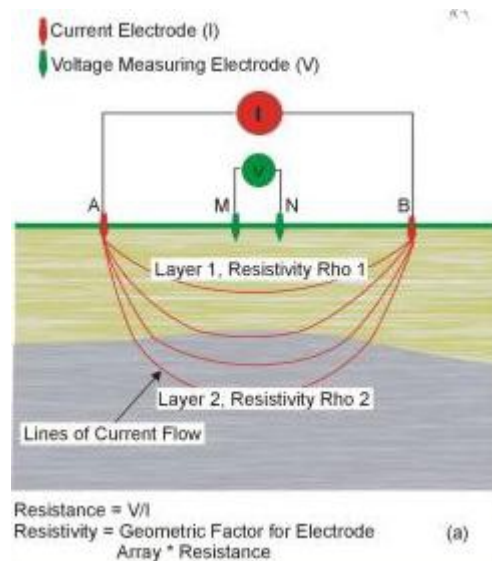
Ο αριθμός των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης είναι σημαντικός, αλλά οι σπουδαιότερες από αυτές είναι η μέθοδος της ειδικής αντίστασης, η μέθοδος των ισοδυναμικών γραμμών, η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης, η μέθοδος του φυσικού δυναμικού και η μέθοδος των τελλουρικών ρευμάτων.

Στην συγκεκριμένη εργασία θα αναφερθεί η μέθοδος της ειδικής αντίστασης και η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης η οποία χρησιμοποιείται στη μεταλλευτική έρευνα, περιβαλλοντικές μελέτες και εντοπισμός σχηματισμών (επαφές αργιλικών).

Η μέθοδος της ειδικής αντίστασης εφαρμόζεται σε μεγάλη κλίμακα για τη λύση τεκτονικών, υδρογεωλογικών, κοιτασματολογικών, γεωθερμικών και αρχαιολογικών προβλημάτων.

3.2 Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

Σκοπός της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι να βρεθεί η γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους και έμμεσα να ληφθούν πληροφορίες για τη γεωλογική δομή του υπεδάφους.



Σχήμα 3.2.1 : Διάταξη ηλεκτροδίων για τη μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους.

Αυτή εφαρμόζεται πλατύτερα από όλες τις άλλες μεθόδους γεωηλεκτρικής διασκόπησης και ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων κατά τις οποίες παράγεται στο έδαφος με τεχνητό τρόπο ηλεκτρικό πεδίο. Οι ιδιότητες του πεδίου αυτού διαμορφώνονται από τη δομή του υπεδάφους και για το λόγο αυτό ο καθορισμός των ιδιοτήτων αυτών με μετρήσεις του δυναμικού οδηγεί στον καθορισμό της δομής του υπεδάφους.

Διαβιβάζεται στο έδαφος ηλεκτρικό ρεύμα με δύο ηλεκτρόδια ρεύματος A, B και μετριέται σε διάφορες θέσεις του εδάφους το δυναμικό που δημιουργεί το ρεύμα αυτό με δύο ηλεκτρόδια δυναμικού M, N (σχήμα 3.2.1). Πραγματοποιούνται μετρήσεις τόσο της έντασης ρεύματος, i , όσο και του δυναμικού (διαφοράς τάσης), ΔV , που παράγεται, με στόχο τον καθορισμό της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ρ , στο υπέδαφος.

Η κατανομή της ειδικής αντίστασης στο υπέδαφος ονομάζεται γεωηλεκτρική δομή. Συνεπώς, άμεσος στόχος της μεθόδου της ειδικής αντίστασης είναι ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους, ενώ η γεωλογική ερμηνεία της δομής αυτής αποτελεί τον τελικό στόχο, ο οποίος παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες και απαιτεί συνήθως πρόσθετα στοιχεία (γεωλογικά, γεωφυσικά, κλπ).

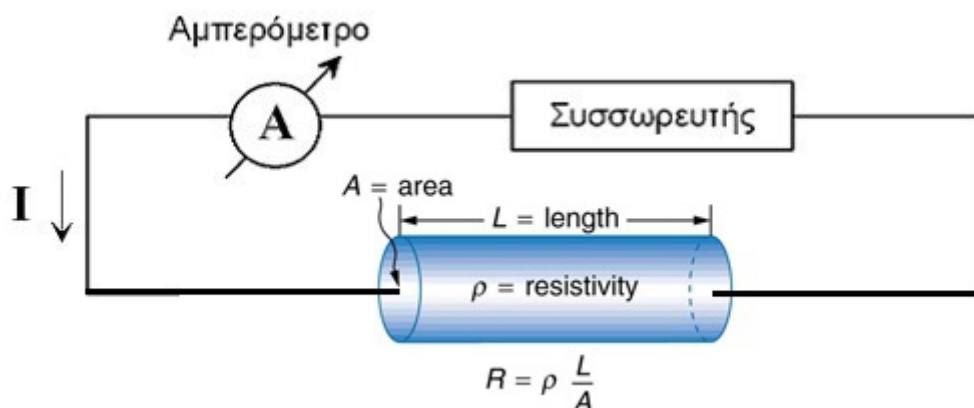
Δεν είναι εύκολος ο άμεσος υπολογισμός της ειδικής αντίστασης, ρ , στο υπέδαφος από τις ηλεκτρικές μετρήσεις στην επιφάνεια της Γης. Για το λόγο αυτό, υπολογίζεται αρχικά μια φυσικώς ανύπαρκτη ποσότητα η οποία ονομάζεται φαινόμενη ειδική αντίσταση, ρ_a , η οποία χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της πραγματικής ειδικής αντίστασης στους διάφορους σχηματισμούς (στρώματα, κλπ) του υπεδάφους. Για την πραγματοποίηση των γεωηλεκτρικών μετρήσεων έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι διάταξης, στην επιφάνεια της Γης, των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού, ανάλογα με το σκοπό της γεωηλεκτρικής διασκόπησης. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση εξαρτάται και από τον τρόπο διάταξης των

ηλεκτροδίων και για το λόγο αυτό πρέπει να γνωρίζουμε τη διάταξη αυτή για τον υπολογισμό της ρα.

Για τους λόγους που αναφέραμε παραπάνω, θα ασχοληθούμε παρακάτω λεπτομερώς με τον ακριβή ορισμό της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, με την περιγραφή των πιο εύχρηστων διατάξεων των ηλεκτροδίων και τον τρόπο υπολογισμού της φαινόμενης ειδικής αντίστασης και κυρίως με τον καθορισμό της γεωηλεκτρικής δομής (μεταβολή της ειδικής αντίστασης με το βάθος) από τις τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

3.3 Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση

Η ειδική αντίσταση είναι μια θεμελιώδης παράμετρος που χαρακτηρίζει το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το μέσο και περιγράφει πόσο εύκολα μπορεί να διαβιβαστεί ηλεκτρικό ρεύμα. Υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης υποδηλώνουν ότι το υλικό είναι πολύ ανθεκτικό στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, αντίθετα, χαμηλές τιμές ότι το υλικό μεταδίδει το ηλεκτρικό ρεύμα πολύ εύκολα.



Σχήμα 3.3.1 : Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ . Ένας κυλινδρικός αγωγός, μήκους L και διατομής A που διαρρέεται από ρεύμα I και στα άκρα του μετράμε την διαφορά δυναμικού ΔV .

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ (σχήμα 3.3.1), είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που υπολογίζεται από την σχέση:

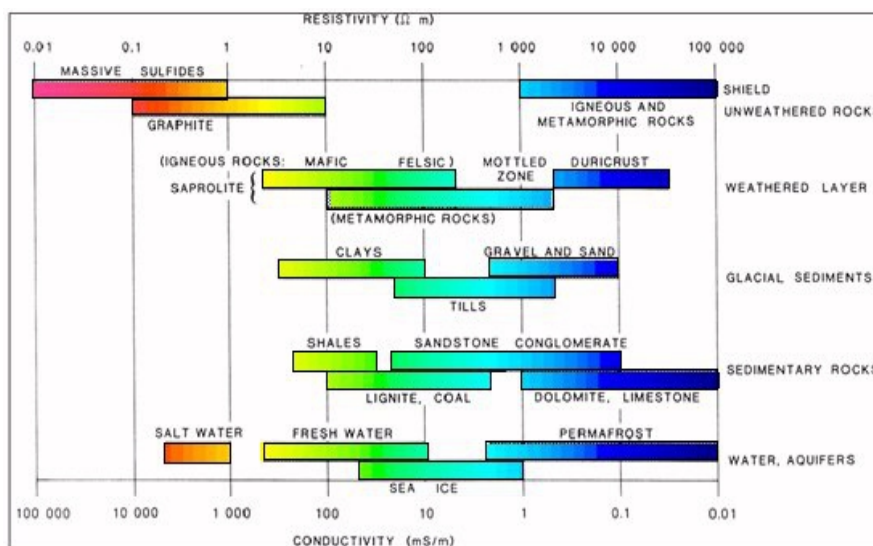
$$\rho = \frac{RA}{L}$$

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) είναι το Ohm.m.

Το αντίστροφο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα ($\sigma = 1/\rho$), με μονάδα μέτρησης στο διεθνές σύστημα το Siemens/m.

3.4 Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση των Πετρωμάτων και Ορυκτών

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων και ορυκτών είναι μια από τις περισσότερο μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων και ορυκτών.



Σχήμα 3.4.1 : Typical ranges of electrical resistivity (ohm-m) or conductivity (mS/m) for selected Earth materials (Palacky 1988).

ΕΙΔΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ohm.m)
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ	80-250
ΝΕΟΓΕΝΗ ΙΖΗΜΑΤΑ	
Αργίλοι	2-20
Μάργες	20-60
Άμμοι και Χαλίκια κορεσμένα	50-500
Εβαπορίτες (Γύψοι)	200
Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι	150-500
Κροκαλοπαγή βάσεως	200-300
Ψαμμίτες	50-70
ΑΛΠΙΚΑ ΙΖΗΜΑΤΑ	
Φλύσχης	70-80
Σχιστόλιθοι-Οφιόλιθοι	100-300
Ασβεστόλιθοι	>500

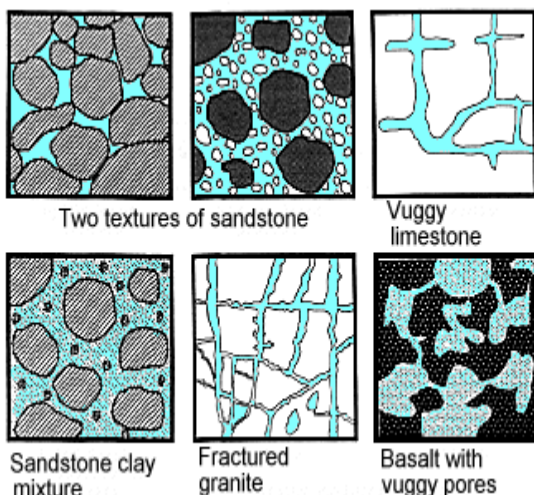
Σχήμα 3.4.2 : Τυπικές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πετρωμάτων (Παπαζάχος 1985)

Το εύρος τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των γεωλογικών σχηματισμών αποτελεί τη βάση για τις μεθόδους των ηλεκτρικών διασκοπήσεων, καθώς π.χ. ο γραφίτης, ο πυρίτης ή ο σιδερίτης εντοπίζονται λόγω της μεγάλης ηλεκτρικής αγωγιμότητας που παρουσιάζουν σε αντιστοιχία με τις αντιστάσεις των πετρωμάτων που τα περιβάλλουν. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι:

- **Λιθολογία πετρωμάτων:** Γενικά τα πλουτώνια και τα μεταμορφωμένα πετρώματα έχουν μεγαλύτερη ηλεκτρική αντίσταση από τα ιζηματογενή, που οφείλεται στο πορώδες και στην περιεκτικότητά τους σε διαλυμένα άλατα (ηλεκτρολυτική αγωγή).
- **Πορώδες πετρωμάτων:** Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη του πορώδους (π.χ. τα πυριγενή και τα μεταμορφωμένα πετρώματα εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές αντίστασης από τα ιζηματογενή).

$$\text{Εμπειρική σχέση: } \rho = \alpha \cdot \rho_u \cdot \phi^{-m} \quad (\text{Archie, 1969})$$

όπου ρ : ειδική αντίσταση πετρώματος, ρ_u : ειδική αντίσταση νερού πόρων, ϕ : πορώδες (ο λόγος του όγκου των πόρων προς τον ολικό όγκο του πετρώματος), α : σταθερά με τιμές 0.5 - 2.5, m : συντελεστής συνεκτικότητας που εκφράζει πόσο συμπαγές είναι το πέτρωμα με τιμές 1.3 - 2.5 (Παπαζάχος 1986).



Χαίρα υλικά	Πορώδες (%)	Ιζηματογενή πετρώματα	Πορώδες (%)	Κρυσταλλικά πετρώματα	Πορώδες (%)
Μικρά χαίρα	24-36	Ψαμμίτες	5-30	Διαρρηγμένα	0-10
Μεγάλα χαίρα	25-38	Τυφολίθοι	21-41	Μη διαρρηγμένα	0-5
Χονδρόκοκκη άμμος	31-48	Ασβεστόλιθοι	1-40	Βασάλτες	1-12
Λεπτόκοκκη άμμος	26-53	Καρστικοποιημένα ασβεστόλιθοι	1-40	Αποσπασμένοι γρανίτες	34-57
Τύλις	34-61	Σχιστόλιθοι	0-10		
Άργιλος	34-60				

Σχημα 3.4.3 : Αριστερα : πετρώματα και οι σχηματισμοί παρουσιάζουν περισσότερο ή λιγότερο ασυνέχειες , πόρους και γενικά κενά διαφόρων τύπων . Δεξια : πορώδες γεωλογικών σχηματισμών.

- **Γεωλογική ηλικία πετρωμάτων:** Γενικά η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων αυξάνεται με τη γεωλογική ηλικία τους, λόγω αύξησης της συνοχής τους που οφείλεται στην αύξηση του πάχους των υπερκείμενων στρωμάτων και επομένως της πίεσης που ασκούν τα στρώματα αυτά στα υποκείμενα με την αύξηση του χρόνου. Επομένως τα μεγαλύτερης ηλικίας υποκείμενα στρώματα παρουσιάζουν αυξημένη συνοχή, μικρό πορώδες και μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Εξάιρεση στον γενικό αυτόν κανόνα αποτελούν τα ιζήματα του Τριτογενούς, τα οποία έχοντας σχηματιστεί κυρίως σε γλυκό νερό έχουν μεγαλύτερες ειδικές αντιστάσεις από τα μεσοζωϊκά ιζήματα, που σχηματίστηκαν σε αλμυρό νερό, αφού η περιεκτικότητα σε ιόντα είναι καθοριστικός παράγοντας διέλευσης του ρεύματος. Για τα πετρώματα που είναι διαποτισμένα με νερό υπάρχει έμμεση σχέση μεταξύ της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της λιθολογίας ή της γεωλογικής ηλικίας καθώς οι δύο παράγοντες καθορίζουν το πορώδες. Τα κρυσταλλικά πετρώματα έχουν εξαιρετικά μικρό πορώδες και η ηλεκτρική αγωγιμότητα οφείλεται αποκλειστικά στις ρωγμές τους.
- **Θερμοκρασία των πετρωμάτων:** Η μεταβολή της θερμοκρασίας προκαλεί αλλαγές στην ηλεκτρική αγωγιμότητα των πετρωμάτων σε τέτοιο βαθμό ώστε να επηρεάζουν την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα. Αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση του ιξώδους του νερού, και επομένως μείωση της ειδικής αντίστασης. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία δίνεται από τη σχέση:

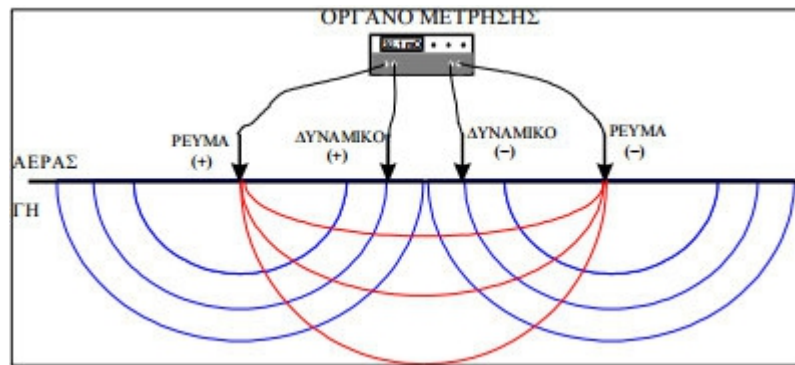
$$\rho_{\theta} = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha_{18}(\theta - 18^{\circ})}$$

όπου, ρ_{θ} : ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε $T = \theta^{\circ} \text{C}$, ρ_{18} : ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε $T = 18^{\circ} \text{C}$, α_{18} : θερμικός συντελεστής με τιμή $0.025 / ^{\circ}\text{C}$

- Στις διασκοπήσεις μικρού βάθους, η αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος επιτυγχάνεται κυρίως μέσω διαλυμένων αλάτων όπως το ανθρακικό ασβέστιο και το ανθρακικό νάτριο που υπάρχουν στο ίδιο το έδαφος (κυρίως στα αργιλώδη εδάφη), ή προέρχονται από τα υποκείμενα γεωλογικά στρώματα, τις βροχοπτώσεις, τα σύγχρονα γεωργικά λιπάσματα ή από άλλες ανθρωπογενείς διαδικασίες. Επίσης συγκεντρώσεις ριζών και κολλοειδών στο νερό επηρεάζουν την αγωγιμότητα.
- Επιδράσεις αργιλικών ορυκτών : Λόγω της αυξημένης αγωγιμότητας των αργιλικών ορυκτών, η ύπαρξή τους έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία χαμηλών τιμών επιφανειακής ειδικής αντίστασης.
- Βαθμός κορεσμού: Όσο ο βαθμός κορεσμού ενός πετρώματος αυξάνεται, η ειδική ηλεκτρική του αντίσταση μειώνεται.
- Περιεκτικότητα σε άλατα : Για δεδομένο πορώδες, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του ρευστού πλήρωσης των πόρων σε άλατα, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος.

3.5 Φαινόμενη Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση

Η φαινόμενη αντίσταση ρ_a αποτελεί ένα είδος "μέσου όρου" των ηλεκτρικών αντιστάσεων του ανομοιογενούς υπεδάφους. Επομένως δεν δίνει ακριβώς την πραγματική αλλά μια "παραμορφωμένη" εικόνα της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους.



Σχήμα 3.5.1: Η βασική διάταξη γεωηλεκτρικών μετρήσεων.

Η Γη είναι ένα ανομοιογενές μέσο, γι' αυτό δεν μπορεί να υπολογιστεί η πραγματική ειδική αντίσταση των πετρωμάτων της εύκολα, δηλαδή με απλή εφαρμογή της σχέσης α.

Σχέση α :

$$\rho = \frac{2\pi V}{i} \cdot \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

Για το λόγο αυτό, απαιτείται η εφαρμογή πιο σύνθετων μεθόδων για τον καθορισμό της κατανομής της ειδικής αντίστασης μέσα στην πραγματική Γη. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται από τη μια μεριά σε μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων (ΔV , i) στην επιφάνεια της Γης και από την άλλη σε πολύπλοκες θεωρητικές σχέσεις που εκφράζουν το μοντέλο της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους και των οποίων σχέσεων πρέπει να καθορίσουμε τις παραμέτρους. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην έννοια της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

Στην περίπτωση που η ειδική αντίσταση δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται στα επιφανειακά στρώματα της Γης, όπως στην πραγματικότητα συμβαίνει, η τιμή του δεύτερου μέλους της σχέσης α μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις μετρήσεις των ποσοτήτων που περιλαμβάνει το μέλος αυτό, αλλά η τιμή του δεν θα είναι σταθερή, όπως συμβαίνει στην περίπτωση ομογενούς Γης, αλλά θα εξαρτάται από τις θέσεις των ηλεκτροδίων και θα μεταβάλλεται όταν μεταβάλλονται οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων. Επομένως δεν εκφράζει πια η τιμή αυτή την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση, αλλά μια φυσικώς ανύπαρκτη ποσότητα, η οποία ονομάζεται φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση και συμβολίζεται ρ_a .

Και εκφράζεται μαθηματικά:

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{i}$$

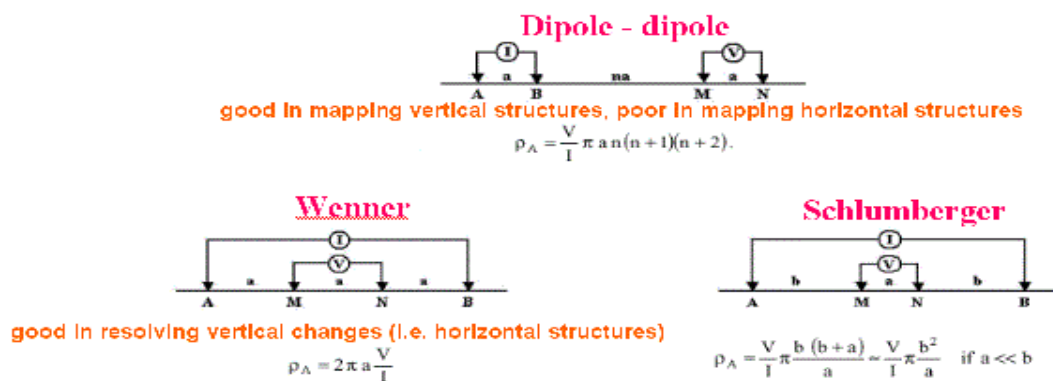
όπου k = γεωμετρικός παράγοντας που εκφράζει την διάταξη των ηλεκτρόδιων

ΔV = διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτρόδιων

i = ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος

3.6 Γεωηλεκτρικές Διατάξεις Ηλεκτροδίων

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατά τους οποίους διατάσσονται τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού . Οι πιο γνωστές από τις διατάξεις αυτές φαίνονται στο Σχήμα 3.6.1 και είναι η "διάταξη Wenner" , η "διάταξη Schlumberger" και η "διάταξη διπόλου-διπόλου".



ELECTRODE ARRAYS

Σχήμα 3.6.1 : Διατάξεις ηλεκτροδίων

Η επιλογή του τρόπου διάταξης των ηλεκτροδίων κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων αποτελεί πολύ σημαντικό βήμα για τις γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις. Η διάταξη των ηλεκτροδίων επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την ακρίβεια των μετρήσεων.

Οι παράγοντες- κριτήρια που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πριν τις ηλεκτρικές διασκοπήσεις είναι οι παρακάτω:

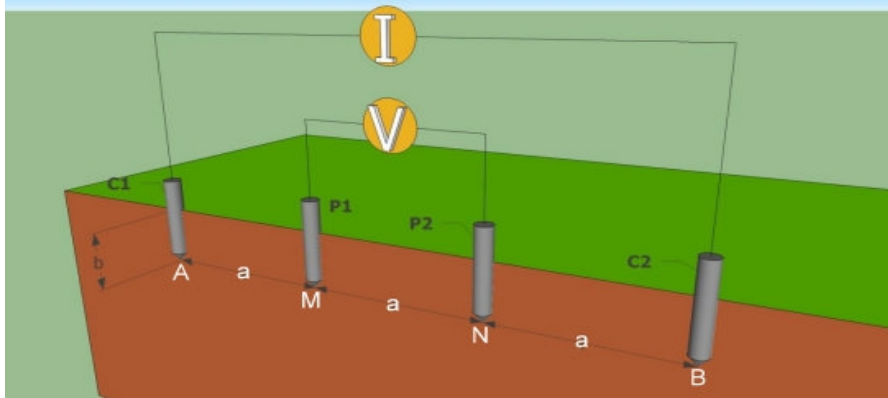
- Λόγος σήματος προς θόρυβο : Ως προς τον παράγοντα αυτό κατά σειρά προτεραιότητας οι διατάξεις είναι: Wenner, Schlumberger, διπόλου-διπόλου.
- Ευαισθησία σε οριζόντιες ανομοιογένειες : Οι οριζόντιες ανομοιογένειες φαίνεται να προκαλούν μεγαλύτερη ευαισθησία στην διάταξη διπόλου-διπόλου και λιγότερη σε Wenner και Schlumberger.
- Ευαισθησία σε βάθος και διεισδυτικότητα δια μέσω επιφανειακού αγωγίμου στρώματος : Οι διατάξεις Schlumberger και Wenner έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούνται σε βυθοσκοπήσεις και η συνεχώς αυξανόμενη απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος δίνει λεπτομερή ανάλυση της ειδικής αντίστασης σε βάθος, σε αντίθεση με τη διάταξη διπόλου-διπόλου.
- Διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγωγίμου στρώματος (Επίδραση του επιδερμικού φαινομένου): Το επιδερμικό φαινόμενο επηρεάζει την ικανότητα διείσδυσης σε μεγάλα βάθη. Η δυνατότητα μεγάλου ανοίγματος ηλεκτροδίων ρεύματος της διάταξης Schlumberger μαζί με την ευαισθησία σε βάθος που έχει, της παρέχουν ένα σαφές προβάδισμα.
- Βάθος διασκόπησης : Το βάθος διασκόπησης εξαρτάται κυρίως από το οριζόντιο ανάπτυγμα (απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων), που σημαίνει ότι η διάταξη Schlumberger πλεονεκτεί. Επίσης το βάθος διασκόπησης επηρεάζεται από τις ανομοιογένειες, την τοπογραφία, την κλίση των στρωμάτων,

το ανάγλυφο του υπόβαθρου και από το μοντέλο των στρωμάτων του υπεδάφους.

- Ευαισθησία στην μορφολογία του υπόβαθρου : Η διάταξη διπόλου-διπόλου υπερτερεί των άλλων διατάξεων στην περίπτωση των γεωλογικών ανωμαλιών.
- Ευαισθησία στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής έρευνας : Το έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο δημιουργεί πύκνωση και αραίωση των ρευματικών γραμμών. Άρα οι διατάξεις των ηλεκτροδίων πρέπει να έχουν διεύθυνση παράλληλη με το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής (Μποτωνάκης-Αντωνοπούλου 2006, Χορευτάκη 2003).

3.7 Διάταξη Wenner

Στη διάταξη Wenner τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού διατάσσονται σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις, δηλαδή, $AM = MN = NB = \alpha$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8.1 .



Σχήμα 3.7.1 : Διάταξη μεθόδου Wenner .

Χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια, δύο ρεύματος C1, C2 και δύο τάσης P1 και P2 τα οποία τοποθετούνται σε βάθος b (στην πράξη τα τέσσερα ηλεκτρόδια πρέπει να τοποθετούνται σε βάθος $b < 0.1\alpha$ [άλλες μελέτες αναφέρουν ότι θα πρέπει $b < 0.05\alpha$], έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η παραδοχή $b=0$) . Τα ηλεκτρόδια P1 και P2 περικλείονται από τα C1, C2 και οι θέσεις τους στο έδαφος συμπίπτουν σε ευθεία και απέχουν μεταξύ τους απόσταση α . Το ρεύμα I που διαβιβάζεται στο έδαφος μέσω των ηλεκτροδίων C1 και C2 μετράται με αμπερόμετρο και η τάση που αναπτύσσεται μεταξύ των P1 P2 με βολτόμετρο.

Έτσι η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ_a υπολογίζεται από την σχέση:

Η ποσότητα:

$$2\pi\left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{2\alpha} - \frac{1}{2\alpha} + \frac{1}{\alpha}\right) = 2\pi\alpha \left(\frac{1}{2\alpha} - \frac{1}{2\alpha} + \frac{1}{\alpha}\right)^{-1} = 2\pi\alpha \frac{V_{MN}}{I}$$

ονομάζεται γεωμετρικός συντελεστής και συμβολίζεται με K .

Η τιμή του μπορεί να υπολογιστεί αν οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων είναι γνωστές.

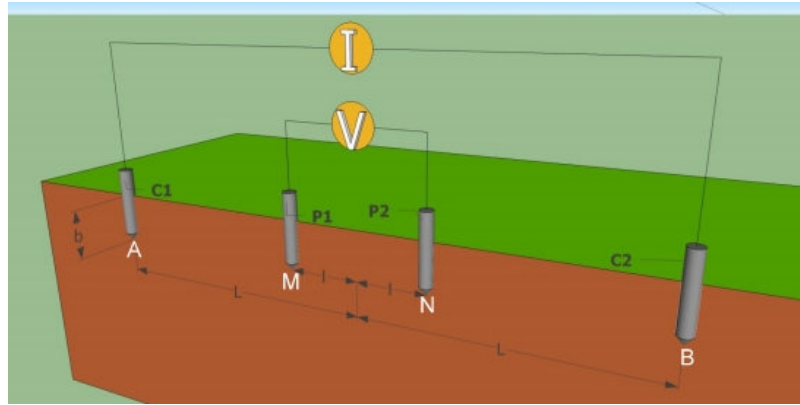
Κατά την εφαρμογή της διάταξης Wenner για ηλεκτρική βυθοσκόπηση, δηλαδή κατακόρυφη ηλεκτρική διασκόπηση, τα ηλεκτρόδια αναπτύσσονται κάθε φορά συμμετρικά ως προς ένα σημείο, που θεωρείται κέντρο της βυθοσκόπησης.

Στην περίπτωση της ηλεκτρικής χαρτογράφησης το α παραμένει σταθερό και τα τέσσερα ηλεκτρόδια μεταφέρονται κατά μήκος γραμμής μελέτης. Η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αντιστοιχείται στο κέντρο της διάταξης.

Η διάταξη Wenner παρά τη γεωμετρική της απλότητα παρουσιάζει ένα σημαντικό μειονέκτημα, αφού κατά την πραγματοποίηση κάθε νέας μέτρησης πρέπει να μετακινούνται όλα τα ηλεκτρόδια και έχει επίσης η διάταξη αυτή και ορισμένα μειονεκτήματα κατά την ερμηνεία των παρατηρήσεων για θεωρητικούς λόγους .

3.8 Διάταξη Schlumberger

Στη διάταξη Schlumberger, τα ηλεκτρόδια ρεύματος A και B βρίσκονται σε απόσταση L και σε συμμετρικές θέσεις ως προς το κέντρο της διάταξης. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού M και N είναι ανάμεσα στα A και B και σε απόσταση l από το κέντρο της διάταξης.



Σχήμα 3.8.1 : Διάταξη μεθόδου Schlumberger .

Έτσι είναι $AB = 2L$ και $MN = 2l$ (Σχήμα 3.8.1), η απόσταση $2l$ μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση $2L$ μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος. Έτσι ο γεωμετρικός συντελεστής K θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{L-b} - \frac{1}{L+b} - \frac{1}{L+b} + \frac{1}{L-b} \right)^{-1} = (L^2 - b^2) \frac{\pi}{2b}$$

Επειδή όμως ($L \gg b$) τότε $(2L - 2b) \sim 2L$, και έτσι η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση θα υπολογίζεται από την σχέση

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2b} \frac{\Delta V}{i}$$

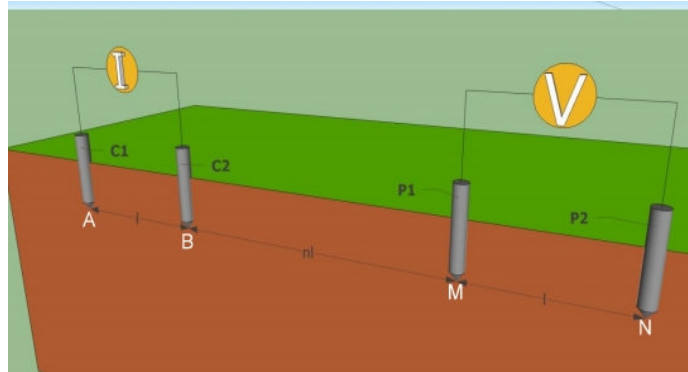
Κατά την εφαρμογή της διάταξης Schlumberger για ηλεκτρική βυθοσκόπηση, τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά. Αντίθετα η απόσταση για τα ηλεκτρόδια ρεύματος αυξάνεται σταδιακά και συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης.

Στην ηλεκτρική χαρτογράφηση τα τέσσερα ηλεκτρόδια μετακινούνται, ενώ η απόστασή τους παραμένει σταθερή όπως και στη διάταξη Wenner.

Η διάταξη Schlumberger είναι η πιο διαδεδομένη διάταξη για την διεξαγωγή ηλεκτρικής βυθοσκόπησης. Αυτό οφείλεται κυρίως στο μικρό χρόνο πραγματοποίησης των μετρήσεων, επειδή αντίθετα με τις άλλες διατάξεις απαιτεί μετακίνηση μόνο των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος κατά την γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού παραμένουν σταθερά, γεγονός που βοηθάει επίσης στον περιορισμό των ανεπιθύμητων επιδράσεων που μπορεί να οφείλονται σε πλευρικές μεταβολές των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων των πετρωμάτων.

3.9 Διάταξη Dipole-Dipole

Η μέθοδος διπόλου-διπόλου (σχήμα 3.9.1) , είναι μια συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος, ειδικά σε γεωλογικές μελέτες.



Σχήμα 3.9.1 : Διάταξη μεθόδου διπόλου-διπόλου .

Χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρόδια για τη μέτρηση του ρεύματος και δύο ηλεκτρόδια για τη μέτρηση της τάσης. Η απόσταση μεταξύ του ζεύγους των ηλεκτροδίων C1,C2 και των ηλεκτροδίων P1,P2 είναι ίδια και ίση με l . Η ενδιάμεση απόσταση είναι ίση με την απόσταση l πολλαπλασιασμένη με έναν ακέραιο n .

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση εδάφους δίνεται από τον τύπο:

$$\rho_a = \frac{V}{I} \pi \ln(n+1)(n+2)$$

όπου:

ρ , η ειδική αντίσταση εδάφους σε Ωm

l , η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος ή τάσης σε m

n , ένας θετικός ακέραιος

V, I , οι μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος που λαμβάνουμε σε A, V

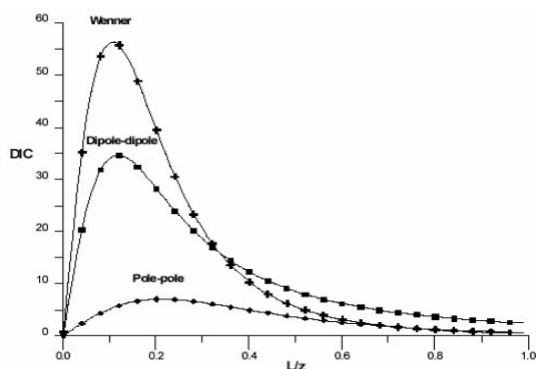
Συνήθως, η απόσταση l διατηρείται σταθερή και μεταβάλλεται το n μέχρι περίπου το 6, για να αυξήσουμε το βάθος της μέτρησης.

Η διάταξη αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι η απόσταση nl , 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.

Για να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά αυτή η μέθοδος πρέπει να διαθέτουμε ένα όργανο μέτρησης με υψηλή ευαισθησία και μεγάλη ικανότητα απόρριψης θορύβου.

3.10 Βάθος διείσδυσης

Η δυσκολία στο να καθοριστεί το βάθος διείσδυσης οφείλεται στο ότι οι θεωρητικοί υπολογισμοί που έχουν γίνει υποθέτουν ομογενή γη, πράγμα το οποίο δεν ισχύει στην πραγματικότητα, και στο ότι οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που μετρώνται στην επιφάνεια, δεν οφείλονται αποκλειστικά σε κάποιο συγκεκριμένο βάθος. Οι Roy και Appa Rao (1971), έδειξαν πως η κατανομή του ηλεκτρικού ρεύματος μόνο, δεν είναι ενδεικτική για την εύρεση του βάθους διείσδυσης κατά τη χρήση μιάς συγκεκριμένης διάταξης ηλεκτροδίων. Αυτό αποδεικνύεται ως εξής: αν σε ένα σύστημα ηλεκτροδίων τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια δυναμικού στις θέσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και αντίθετα, παρατηρείται ότι τα βάθη διείσδυσης είναι ίδια ενώ η κατανομή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι τελείως διαφορετική (Helmholtz's reciprocity theorem). Αντιστρόφως, δύο συστήματα ηλεκτροδίων είναι δυνατόν να έχουν παρόμοια κατανομή των γραμμών του ρεύματος αλλά τελείως διαφορετικά βάθη διείσδυσης. Ενώ δηλαδή η διείσδυση και η κατανομή του ρεύματος έχει άμεση σχέση μόνο με τη θέση των ηλεκτροδίων του ρεύματος, το βάθος διείσδυσης χρησιμοποιώντας κάποια διάταξη ηλεκτροδίων, εξαρτάται και από τα ηλεκτρόδια του δυναμικού.



Σχήμα 3.10.1 : DOI καμπύλες για τις διατάξεις Wenner, διπόλου-διπόλου και πόλου-πόλου.

ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	ΒΑΘΟΣ
Wenner	0.11 L
Schlumberger	0.125 L
Διπόλου-διπόλου	0.195 L
Πόλου-πόλου	0.35 L

L: συνολικό μήκος διάταξης

Πίνακας 3.10.1: Βάθος διείσδυσης διάφορων διατάξεων (Roy and Appa Rao 1971, Roy 1971).

Για αυτό το λόγο οι παραπάνω ερευνητές, λαμβάνοντας υπ όψιν τη συνεισφορά κάθε απειροστού όγκου στο συνολικό σήμα, δηλαδή στη συνολική διαφορά δυναμικού που μετράται στην επιφάνεια του

εδάφους, υπολόγισαν, για τις διάφορες διατάξεις, καμπύλες οι οποίες απεικονίζουν την απόκριση ενός λεπτού οριζόντιου στρώματος με μεταβαλλόμενο βάθος. Η καμπύλη (DIC - Depth of Investigation Characteristic), για διάφορα βάθη, για μία γενικευμένη διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων και για ένα μοντέλο ομογενούς γης, έχει την παρακάτω μορφή (Roy and Apparao 1971)

$$DIC = \int_{x=y=-\infty}^{x=y=+\infty} 2z\rho l \left[\frac{1}{(\alpha^2 + 4z^2)^{3/2}} - \frac{1}{\{(b+c)^2 + 4z^2\}^{3/2}} - \frac{1}{\{(\alpha+b)^2 + 4z^2\}^{3/2}} + \frac{1}{(c^2 + 4z^2)^{3/2}} \right] dz$$

όπου, xy είναι το επίπεδο της επιφάνειας του εδάφους, z ο άξονας του βάθους, $(0,0,0)$ η θέση του θετικού ηλεκτροδίου ρεύματος, $(\alpha,0,0)$ και $(\alpha+b,0,0)$ οι θέσεις των ηλεκτροδίων του δυναμικού και $(\alpha+b+c,0,0)$ η θέση του αρνητικού ηλεκτροδίου του ρεύματος.

Οι καμπύλες DIC για τις διατάξεις Wenner, διπόλου-διπόλου και πόλου- πόλου, φαίνονται στο σχήμα (3.10.1) και το βάθος διείσδυσης z , σε συνάρτηση με την απόσταση L των δύο εξωτερικών ενεργών ηλεκτροδίων της διάταξης, (εκτός των ηλεκτροδίων που βρίσκονται σε 'άπειρη' απόσταση, εάν υπάρχουν), στον πίνακα (3.10.1) (Roy and Apparao 1971, Roy 1971).

Σύμφωνα με τους ερευνητές, το βάθος στο οποίο η καμπύλη DIC γίνεται μέγιστη, είναι το βάθος το οποίο συνεισφέρει περισσότερο στο σήμα που λαμβάνεται στην επιφάνεια, δηλαδή το βάθος διείσδυσης.

Τα βάθη που υπολόγισαν οι Roy και Apparao (1971), συγκρινόμενα με εμπειρικές τιμές (Zhody 1989) αποδείχτηκε πως είναι υποτιμημένα. Ο Edwards (1977) πρότεινε ότι το μέγιστο βάθος διείσδυσης μιάς διάταξης, δεν είναι αυτό στο οποίο η καμπύλη DIC γίνεται μέγιστη (σχήμα 3.10.1), αλλά το βάθος στο οποίο η περιοχή που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη DIC, χωρίζεται σε δύο μέρη ίσου εμβαδού, γεγονός το οποίο υποστηρίχθηκε και από τον Barker (1989). Το βάθος, z_{med} το οποίο ονομάστηκε μέσο βάθος διείσδυσης και που προτάθηκε από τον Edwards (1977) είναι η λύση της παρακάτω εξίσωσης

όπου, NDIC είναι η κανονικοποιημένη καμπύλη DIC που έγινε με βάση τους γεωμετρικούς παράγοντες,

$$\int_{z=0}^{z_{med}} NDIC = 1/2$$

από τους Roy και Apparao. Στον πίνακα (2) φαίνονται οι τιμές του βάθους διείσδυσης για τις διάφορες διατάξεις σε συνάρτηση με το συνολικό μήκος της διάταξης L , όπως υπολογίστηκαν από τον Edwards (1977). Συγκριτικά με τις τιμές που υπολόγισαν οι Roy και Apparao (πίνακας 3.10.1), οι τιμές του πίνακα (3.10.2) βρίσκονται σε καλύτερη συμφωνία με διάφορους εμπειρικούς υπολογισμούς και αποτελέσματα (Zhody 1989).

ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	ΒΑΘΟΣ
Wenner	0.17 L
Schlumberger	0.195 L
Διπόλου-διπόλου	0.25 L
Διδύμου ηλεκτροδίου	0.77 L
Πόλου-διπόλου	0.52 L
L: συνολικό μήκος διάταξης	

Πίνακας 3.10.2: Βάθος διείσδυσης διάφορων διατάξεων (Edwards 1977)

Στον πίνακα (3.10.3), (Edwards 1977), παρουσιάζονται οι τιμές του μέσου βάθους διείσδυσης z_{med} διάφορων διατάξεων, για διάφορες τιμές του n και σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων a και το συνολικό μήκος της διάταξης L . Ουσιαστικά αν και το βάθος διείσδυσης έχει να κάνει με την στρωματογραφία του εδάφους, για παράδειγμα ένα χαμηλής αντίστασης στρώμα μειώνει το βάθος διείσδυσης, οι υπολογισμοί που έχουν γίνει θεωρούν ένα μοντέλο ομογενούς ημιχώρου μιάς και η δομή της γης στις περισσότερες περιπτώσεις είναι άγνωστη. Τα βάθη αυτά έχει αποδειχτεί από διάφορες εφαρμογές πως δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα και στην πραγματικότητα.

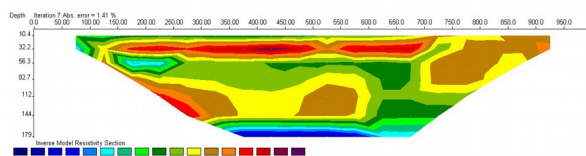
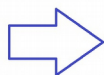
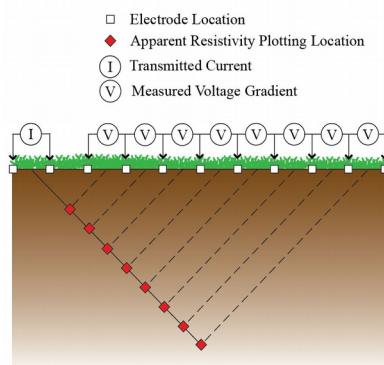
ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ		z_{med}/a	z_{med}/L
Διπόλου-διπόλου	$n=1$	0.416	0.139
	$n=2$	0.697	0.174
	$n=3$	0.962	0.192
	$n=4$	1.220	0.203
	$n=5$	1.467	0.211
	$n=6$	1.730	0.216
	$n=7$	1.983	0.220
	$n=8$	2.236	0.224
Wenner	$n=1$	0.519	0.173
	$n=2$	0.519	0.173
	$n=3$	0.519	0.173
	$n=4$	0.519	0.173
	$n=5$	0.519	0.173
	$n=6$	0.519	0.173
Πόλου-διπόλου	$n=1$	0.519	-
	$n=2$	0.925	-
	$n=3$	1.318	-
	$n=4$	1.706	-
	$n=5$	2.093	-
	$n=6$	2.478	-
	$n=7$	2.863	-
	$n=8$	3.247	-
Πόλου-πόλου	$n=1$	0.867	-
	$n=2$	0.867	-
	$n=3$	0.867	-
	$n=4$	0.867	-
	$n=5$	0.867	-
	$n=6$	0.867	-
a =απόσταση ηλεκτροδίων			
L =συνολικό μήκος διάταξης			

Πίνακας 3.10.3: Το μέσο βάθος διείσδυσης, για τις διάφορες διατάξεις (Edwards 1977).

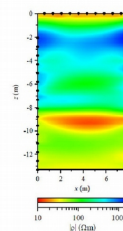
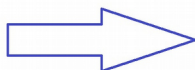
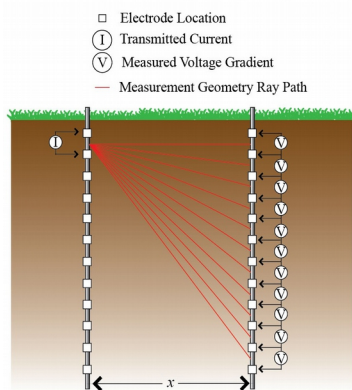
3.11 Ηλεκτρική Τομογραφία

Είναι μια γεωφυσική τεχνική που στόχο έχει την απεικόνιση των δομών του υπεδάφους, με βάση τις μετρήσεις της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης, που γίνονται στην επιφάνεια της γης ή σε γεωτρήσεις (σχήμα 3.11.1).

2 Dimensional Resistivity Profiling: Dipole-dipole Array



2D Electrical Resistance Tomography: Measurement Geometry for Dipole-dipole Array



Σχήμα 3.11.1 : Ηλεκτρική τομογραφία στην επιφάνεια(πάνω) και γεώτρηση(κάτω).

Η ηλεκτρική τομογραφία ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και συμβάλλει στη λεπτομερή απεικόνιση του υπεδάφους, καθώς είναι μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας. Στην ηλεκτρική τομογραφία, η περιγραφή της γεωλογικής δομής βασίζεται στη μελέτη των μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση, εντοπίζοντας έτσι ασυνέχειες κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών, όπως ρήγματα ή έγκοιλα.

Μια σειρά από μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης πραγματοποιείται μετακινώντας τη διάταξη των ηλεκτροδίων από θέση σε θέση κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται επεξεργασία των τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιώντας κάποιο λογισμικό πακέτο για τον υπολογισμό της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Η ηλεκτρική τομογραφία χρησιμοποιείται για την χαρτογράφηση περιοχών περίπλοκης γεωλογικής δομής όπου η συμβατική μέθοδος της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης είναι ανεπαρκής.

Τέτοιες διασκοπήσεις πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας αριθμό ηλεκτροδίων τα οποία

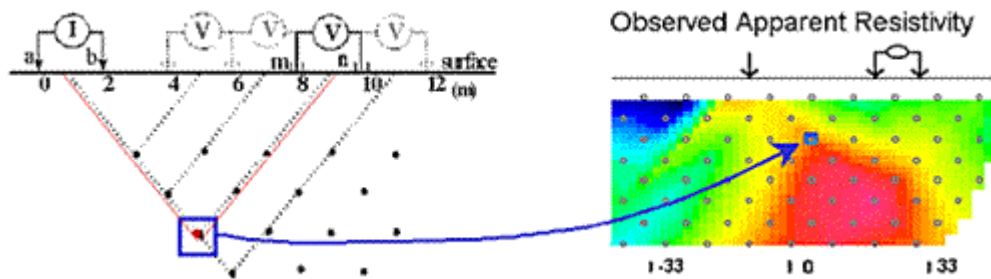
τοποθετούνται πάνω στην γραμμή μελέτης με αύξουσα σειρά (το πρώτο ηλεκτρόδιο ακολουθείται από το δεύτερο κ.ο.κ.). Μια κεντρική μονάδα υπολογιστή επιλέγει αυτόματα τα ενεργά ηλεκτρόδια που θα χρησιμοποιηθούν για κάθε μέτρηση, αναλόγως της διάταξης που έχει επιλεγεί από την χρήση πριν από την έναρξη των μετρήσεων.

Τα δεδομένα της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από αυτές τις διασκοπήσεις αποτελούν μια ψευδοτομή που δίνει μια πρώτη εκτίμηση για την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος.

Το επόμενο βήμα είναι η αντιστροφή των τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε πραγματικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για την ορθή ερμηνεία και τον προσδιορισμό του βάθους των γεωηλεκτρικών δομών.

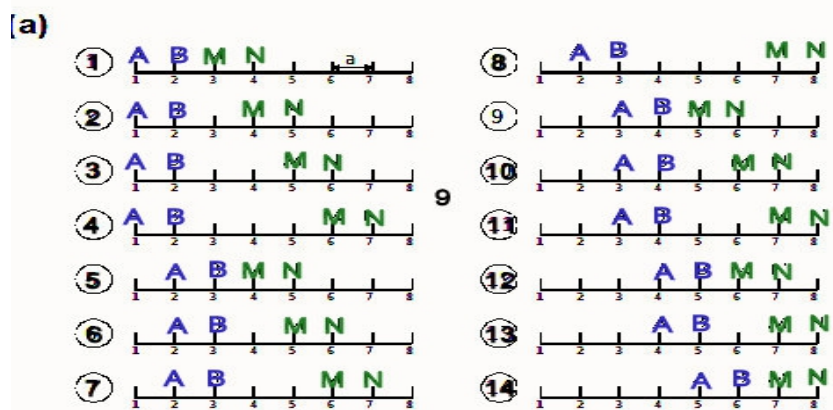
3.12 Μέθοδος της Ψευδοτομής

Η ψευδοτομή δίνει μια “παραμορφωμένη” εικόνα της πραγματικής γεωηλεκτρικής αντίστασης .

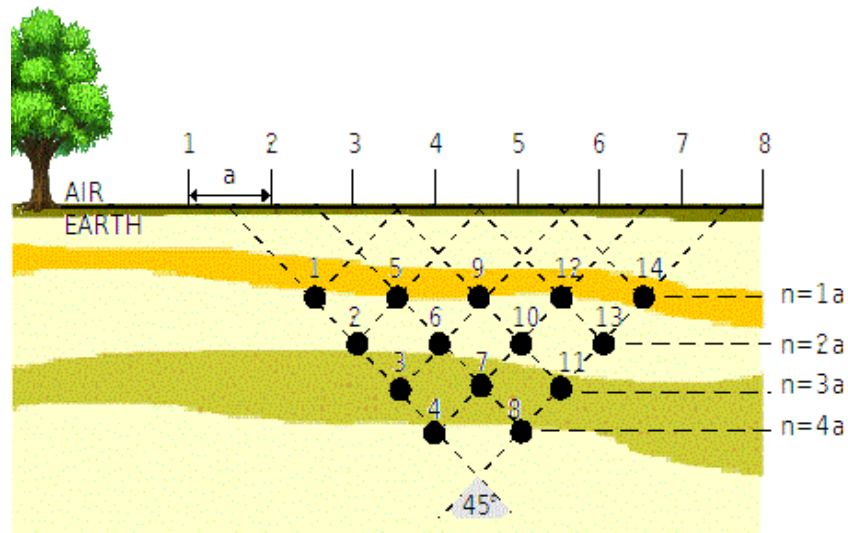


Σχήμα 3.12.1 : Σχεδιασμός της ψευδοτομής με βάση τις μετρήσεις με την μέθοδο διπόλου-διπόλου .

Αρχικά γίνεται η ερμηνεία των μετρήσεων με την μέθοδο της ψευδοτομής. Με τη μέθοδο αυτή, κάθε μέτρηση της φαινόμενης αντίστασης τοποθετείται κατά την οριζόντια διεύθυνση στο κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση προβάλλεται σε βάθος που σχετίζεται με την απόσταση των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 3.12.2 : Τρόπος διάταξης ηλεκτροδίων κατά τη συλλογή των δεδομένων με 8 ηλεκτρόδια και μέγιστο $n=4$



Σχήμα 3.12.2 : Τρόπος τοποθέτηση των μετρήσεων κατά την απεικόνιση με την μέθοδο της ψευδοτομής.

Συγκεκριμένα για την διάταξη διπόλου-διπόλου, κάθε μέτρηση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης θεωρείται ότι προέρχεται από το σημείο τομής των δύο ευθειών που ξεκινάνε με γωνία 45 μοιρών από το μέσο της απόστασης των ηλεκτροδίων του ρεύματος, AB και το μέσο της απόστασης των ηλεκτροδίων του δυναμικού, MN (Hollof 1957) .

Πρέπει να σημειωθεί πως αυτό δεν σημαίνει ότι το βάθος διείσδυσης δίνεται από το σημείο τομής των δύο ευθειών με 45 μοίρες κλίση, είναι μία υπόθεση που γίνεται για λόγους απεικόνισης των μετρήσεων μας (Loke 1996). Μια άλλη τεχνική είναι αντί να χρησιμοποιηθεί η γωνία 45μοιρών να χρησιμοποιηθούν τα βάθη του Edwards (1977).

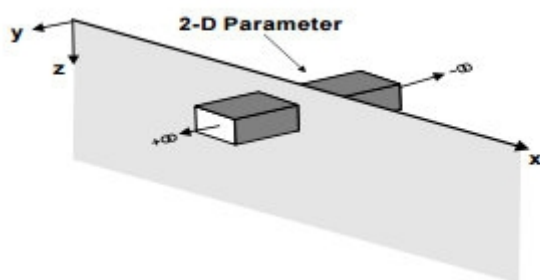
Η μέθοδος της ψευδοτομής δεν πρέπει να χρησιμοποιείται από μόνη της για την ερμηνεία των μετρήσεων, γιατί δίνει μία παραμορφωμένη εικόνα της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους, μιάς και απεικονίζει την κατανομή των φαινόμενων, και όχι των πραγματικών ηλεκτρικών αντιστάσεων, οι τιμές των οποίων, όπως σημειώθηκε, έχουν να κάνουν και με την γεωμετρία της διάταξης των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιείται.

Ειδικότερα, η διάταξη διπόλου-διπόλου είναι ιδιαίτερα παραπλανητική μιάς και δίνει μία εικόνα όπου παρουσιάζονται περιοχές υψηλών αντιστάσεων με μορφή υπερβολής. Η διαδικασία για να απομακρυνθεί η επιρροή της γεωμετρίας της διάταξης από την ψευδοτομή και να προκύψει μία εικόνα της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης σε συνάρτηση με το βάθος, είναι αυτή της αντιστροφής η οποία θα περιγραφεί παρακάτω.

3.13 Μέθοδος Αντιστροφής

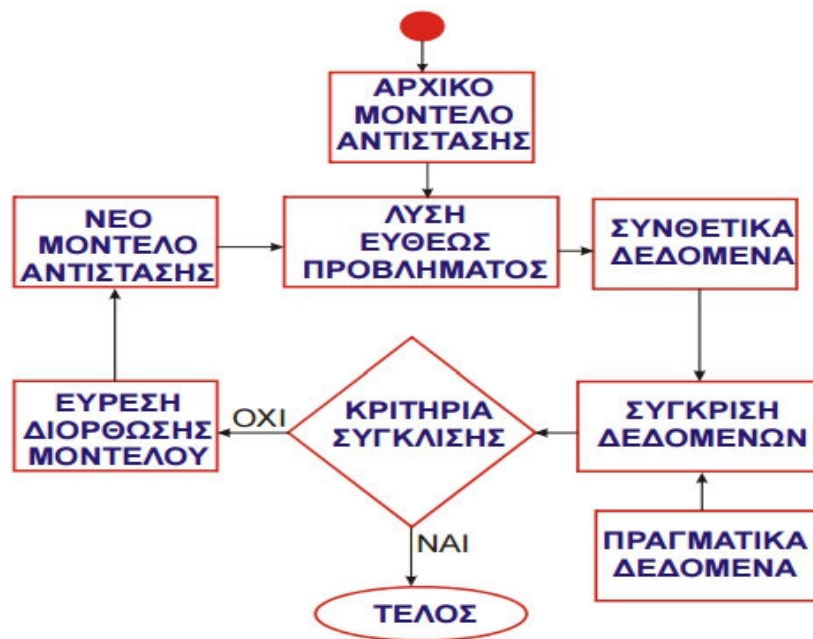
Η ερμηνεία όμως με την μέθοδο της ψευδοτομής είναι ιδιαίτερα δύσκολη και επισφαλής γιατί η εικόνα της κατανομής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι μια παραμορφωμένη εικόνα της πραγματικής κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή έρευνας. Για αυτόν τον λόγο εισήχθηκαν οι τομογραφικές τεχνικές. Οι τεχνικές αυτές επιδιώκουν την επίλυση του αντίστροφου γεωηλεκτρικού προβλήματος είτε με χρήση προσεγγιστικών μεθόδων, π.χ. μέθοδος Zhody-Barker, (Barker 1992), μέθοδος οπισθοπροβολής (Tsourlos et al. 1993), είτε με τη χρήση υπαρχόντων μη γραμμικών τεχνικών αντιστροφής (π.χ. Tripp et al. 1984) που προσαρμόζονται στο πρόβλημα της HT (Shima 1990, Tsourlos et al. 1995).

Η πλέον δημοφιλής τεχνική για την αποκατάσταση της πραγματικής εικόνας της γεωηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους είναι αυτή της αντιστροφής. Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο αντίστασης που να δίνει μετρήσεις που είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές. Προϋπόθεση αποτελεί η ύπαρξη μεθόδου επίλυσης του ευθέως προβλήματος, δηλαδή, να βρεθούν οι μετρήσεις, δοθείσης της κατανομής της αντίστασης. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό, στην παρούσα μελέτη, είναι ένας αλγόριθμος πεπερασμένων στοιχείων ο οποίος λύνει τις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος σε ανομοιογενή γη. Η αντιστροφή μπορεί να γίνει σε δυο (δισδιάστατη) ή τρεις (τρισδιάστατη) διαστάσεις.



Σχήμα 3.13.1 : Γεωηλεκτρική παράμετρος δύο διαστάσεων.

Στην γεωηλεκτρική μέθοδος λόγω της μη-γραμμικής φύσης του αντιστρόφου προβλήματος, οι αλγόριθμοι αντιστροφής είναι μια αυτοματοποιημένη επαναληπτική διαδικασία. Αρχικά, η περιοχή ενδιαφέροντος διακριτοποιείται σε ένα δίκτυο από παραμέτρους στις οποίες και αποδίδεται μια αρχική τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



Σχήμα 3.13.2 : Σχηματοποιημένη διαδικασία μη γραμμικής αντιστροφής.

Βάσει αυτού του μοντέλου υπολογίζονται τα αντίστοιχα συνθετικά δεδομένα, τα οποία και συγκρίνονται με τα πραγματικά δεδομένα. Λαμβάνεται έτσι μια εκτίμηση του λάθους $dy = (\text{πραγματικά δεδομένα} - \text{συνθετικά δεδομένα})$. Στη συνέχεια με μια διαδικασία αντιστροφής πινάκων γίνεται διόρθωση του αρχικού μοντέλου αντίστασης και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το λάθος dy μεταξύ των πραγματικών και συνθετικών δεδομένων ελαχιστοποιηθεί. Το τελικό μοντέλο αντίστασης θεωρείται ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική κατανομή των γεωηλεκτρικών αντιστάσεων.

Η αντιστροφή είναι ένα δύσκολο μη γραμμικό πρόβλημα. Χρησιμοποιούνται ειδικές τεχνικές για την αποφυγή ασταθών λύσεων. Μια από τις πιο σύγχρονες τεχνικές είναι η εξομαλυσμένη αντιστροφή (Occam's). Ορίζεται πίνακας εξομάλυνσης C μεταξύ των παραμέτρων (σχ. 2.4.3) και ζητείται η ελαχιστοποίηση του λάθους dy σε συνδυασμό με μέγιστη εξομάλυνση:

$$S = dy^T dy \rightarrow 0 \text{ \& } R = (Cdx)^T (Cdx) \rightarrow \max$$

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

1	4	7
2	5	8
3	6	9



ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗΣ

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \leftarrow \text{ΓΡΑΜΜΗ 5}$$

Σχήμα 3.13.3 : Σχηματισμός του πίνακα εξομάλυνσης.

Το μοντέλο αντίστασης x^{k+1} στην επανάληψη $k+1$ δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$x^{k+1} = x^k + dx^k = x^k + (J_k^T J_k + \mu C^T C) J_k^T dy^k$$

dx = η διόρθωση της αντίστασης .

C = ο πίνακας εξομάλυνσης.

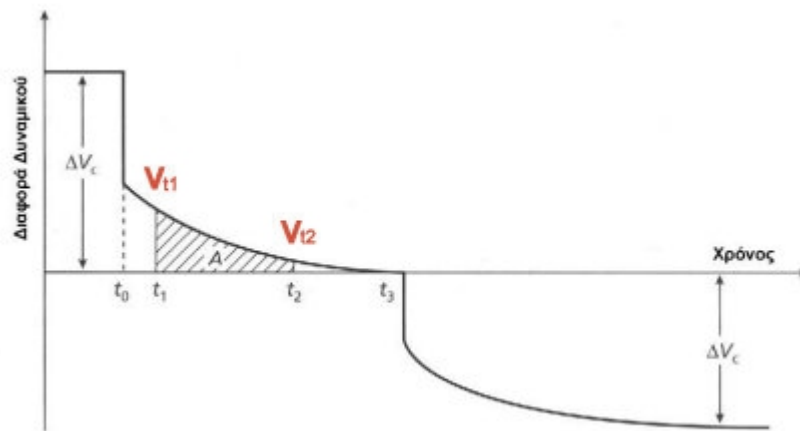
J = ο Ιακωβιανός πίνακας των πρώτων παραγώγων .

μ = πολλαπλασιαστής Lagrange (υπολογίζεται εμπειρικά)

3.14 Μέθοδος Επαγόμενης Πόλωσης

Έχει παρατηρηθεί ότι όταν το συνεχές ρεύμα που διαβιβάζεται στη γη μέσω δύο (Α, Β) ηλεκτροδίων διακοπεί απότομα, τότε, η τάση στα δύο ηλεκτρόδια τάσης (Μ, Ν) δεν μηδενίζεται αμέσως. Αντίθετα, αφού υποστεί μια απότομη σημαντική μείωση, αρχίζει να ελαττώνεται εκθετικά με το χρόνο και περνούν αρκετά δευτερόλεπτα έως ότου αυτή μηδενιστεί. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ικανότητα του υπεδάφους να λειτουργεί ως πυκνωτής και να συσσωρεύει ηλεκτρικά φορτία.

Το φαινόμενο της επαγόμενης πόλωσης φαίνεται στο σχήμα 3.14.1 όπου σε χρόνο t_0 και η διαφορά δυναμικού μετά από μία αρχική πτώση της σταθερής τιμής ΔV_c μειώνεται σταδιακά μέχρι το μηδέν (0). Η ίδια κατάσταση συμβαίνει όταν το ρεύμα αρχίζει να ρέει σε χρόνο t_3 . Το "Α" παριστά την επιφάνεια κάτω από την καμπύλη μείωσης στο χρονικό διάστημα t_1 - t_2 .



Σχήμα 3.14.1: Μεταβολή της τάσης με το χρόνο κατά την παρατήρηση του φαινομένου της επαγόμενης πόλωσης .

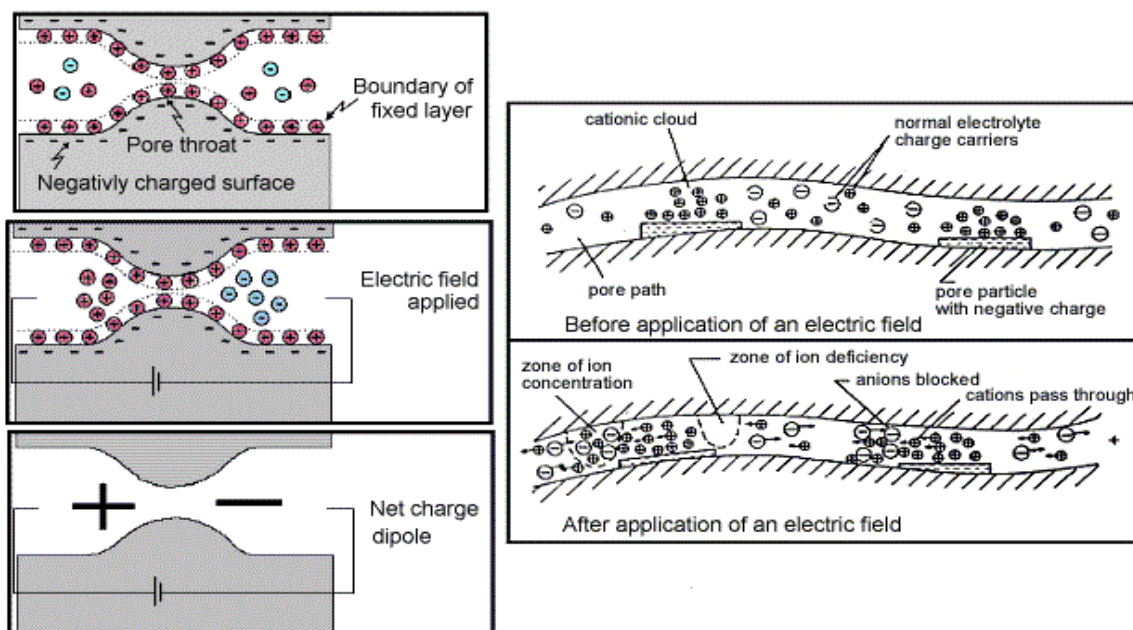
Μηχανισμοί επαγόμενης πόλωσης

- Πόλωση μεμβράνης ή ηλεκτρολυτική πόλωση αποτελεί θόρυβο για την μέθοδο και οφείλεται είτε σε φαινόμενα κατακράτησης ιόντων σε στενώσεις πόρων είτε σε αργιλικά υλικά που ηλεκτρολύονται και κρατούν θετικά ιόντα διαλυμάτων αφήνοντας τα αρνητικά να φορτίζουν το έδαφος (Σχήμα 3.14.2)

Άργιλοι και κάποια άλλα φυλλώδη ή ινώδη ορυκτά παρουσιάζουν αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες, οι οποίες προκαλούν το φαινόμενο πόλωσης μεμβράνης σε πετρώματα με μικρά διάκενα των πόρων. Θετικά φορτισμένα ιόντα που βρίσκονται στο νερό των πόρων τέτοιων πετρωμάτων συγκεντρώνονται κοντά στα τοιχώματα των διακένων. Ο διαχωρισμός των ιόντων γίνεται με ηλεκτροδιάλυση και επιτυγχάνεται με τη λεπτότητα των πόρων και των τριχοειδών μορφών. Οι άργιλοι δρουν ως πολύ λεπτό φίλτρο, οι διάμετροι των πόρων είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τη διάμετρο των ιόντων, έτσι ώστε καθώς τα αρνητικά ιόντα τα οποία κατά κανόνα είναι μεγαλύτερα των θετικών ιόντων κινούνται, κατακρατούνται στο φίλτρο, ενώ τα θετικά ιόντα μπορούν να περάσουν και να οδηγηθούν σε μία αρνητικώς φορτισμένη επιφάνεια.

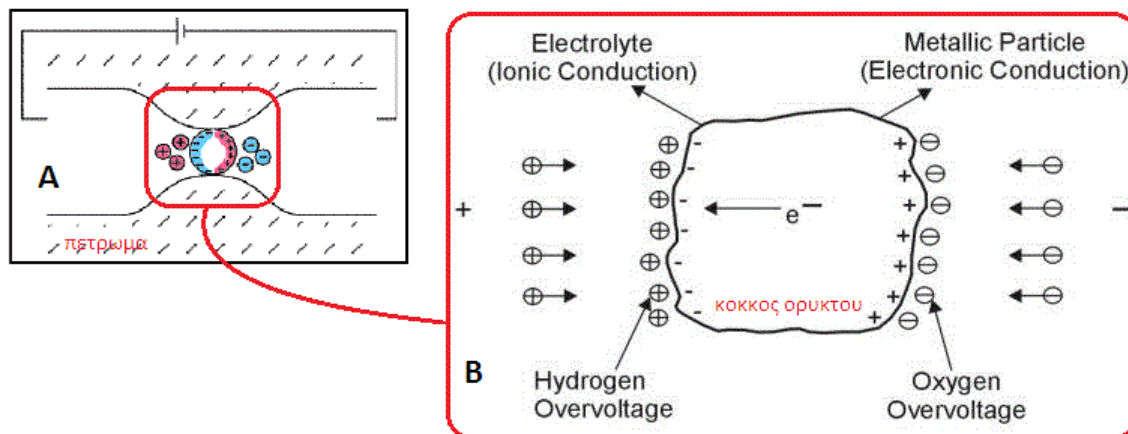
Αυτά τα αρνητικά φορτία ελκύουν ένα ορισμένο αριθμό θετικών φορτίων για να παραμείνουν ηλεκτρικά ουδέτερα και έτσι προκύπτει ένα ηλεκτρικό διπλό στρώμα. Εάν ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο εφαρμοσθεί στην περιοχή, τότε ένα ηλεκτρικό ρεύμα αναγκάζεται να περάσει μέσα από το σώμα της

αργίλου και η ισορροπία του ηλεκτρικού διπλού στρώματος διαταράσσεται και μια νέα μορφή ισορροπίας επιτυγχάνεται για μια ορισμένη χρονική περίοδο . Όταν το εξωτερικό πεδίο παύσει να εξασκείται τα φορτία τείνουν να επαναδιευθετηθούν στην προηγούμενη κατάσταση ισορροπίας και με αυτόν τον τρόπο παρατηρείται το φαινόμενο επαγόμενης πόλωσης .



Σχήμα 3.14.2 : Αριστερα: Μηχανισμός της πόλωσης μεμβράνης . Δεξια: Schematic illustration of membrane polarization in a rock containing clay minerals. (after Ward and Faster , 1967)

- Πόλωση ηλεκτροδίων . Όταν τα δύο ηλεκτρόδια εισάγονται μέσα σε πορώδες πέτρωμα όπου υπάρχει ένας κόκκος μεταλλικού αγωγού , θετικά και αρνητικά φορτία συσσωρεύονται δεξιά και αριστερά του κόκκου με συνέπεια να εμφανιστούν αντίθετα φορτία (ιόντα) στις δύο πλευρές του κόκκου (3.14.3 A,B). Όταν μηδενιστεί η τάση των ηλεκτροδίων , τα ιόντα αρχίζουν να διαχέονται , αλλά , ώσπου να έρθουν στην προηγούμενη κατάσταση τους περνάει ορισμένος χρόνος κατά την διάρκεια του οποίου ο κόκκος ενεργεί ως ηλεκτρική πηγή της οποίας η τάση ελαττώνεται εκθετικά με το χρόνο .



Σχήμα 3.14.3 : A : Μηχανισμός της πόλωσης ηλεκτροδίων. B: Overvoltage on a metallic particle in electrolyte (Seigel 1970 ; coryright permission granted by Geological Survey of Canada). Is a simplified representation of how overvoltages are formed on an electronic conducting particle in an electrolyte under the influence of current flow .

Εφαρμογές της μεθόδου

Η μέθοδος της Επαγόμενης Πόλωσης εφαρμόζεται κυρίως για τον εντοπισμό θειούχου μεταλλοφορίας.

Παράγοντες που επηρεάζουν την πόλωση:

- Συγκέντρωση ορυκτών. Η πιο διασπαρμένη παρουσία του ορυκτού παρουσιάζει μεγαλύτερη πόλωση από την συγκεντρωμένη σαν ένα μεγάλο σώμα.
- Το πορώδες του πετρώματος δίνει περισσότερες εναλλακτικές διαδρομές για ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα
- Παρουσία διαλύματος στο πέτρωμα

Τρόποι προσέγγισης του φαινομένου της επαγόμενης πόλωσης

Το φαινόμενο το προσεγγίζουμε με δύο τρόπους:

Χώρος του χρόνου

Στο χώρο του χρόνου (time domain) όπου παρατηρείται η μεταβολή του δυναμικού μετά την πτώση του ρεύματος. Οι ποσότητες που μετράμε στην περιοχή του χρόνου είναι :

- Η πρώτη απ' αυτές ονομάζεται πόλωση S_a και ορίζεται απο τη σχέση

$$S_a = \frac{V(t)}{\Delta V_c}$$

όπου $V(t)$ είναι η τάση σε ορισμένο χρόνο t μετά την διακοπή του ρεύματος και ΔV_c η αρχική τάση .

Το ολοκλήρωμα χρόνου εξασθένησης είναι η επιφάνεια.

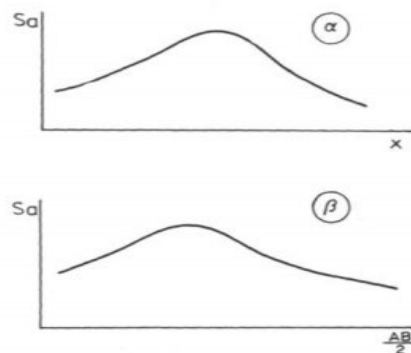
$$A = \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt$$

Η δεύτερη ποσότητα ονομάζεται φορτιστικότητα M και ορίζεται ως

$$M = \frac{A}{\Delta V_c} = \frac{1}{\Delta V_c} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt$$

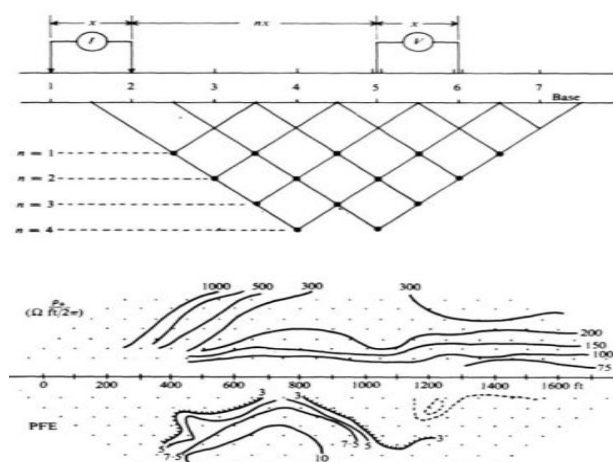
και μετράται σε milliseconds.

Οι μετρήσεις αφορούν τα μεγέθη S_α και M είτε έχοντας τα ηλεκτρόδια της διάταξης σταθερά (χαρτογράφηση) (Σχήμα 3.14.4α), είτε σε όλο και μεγαλύτερες αποστάσεις (βυθοσκόπηση) (Σχήμα 3.14.4β).



Σχήμα 3.14.4. Μέτρηση σταθερών διπόλων (α), βυθοσκόπηση (β).

Χώρος της συχνότητας (Frequency Domain)



Σχήμα 3.14.5 : Ο τρόπος παρουσίασης της φαινόμενης ειδικής αντίστασης και του αποτελέσματος της συχνότητας με διάταξη ηλεκτροδίων dipole-dipole.

Με διάταξη ηλεκτροδίων dipole-dipole, όπως και στην μέθοδο της ειδικής αντίστασης όπου μετράμε την φαινόμενη ειδική αντίσταση. Συνήθως γίνονται δύο μετρήσεις μία με εκπομπή ρεύματος σε υψηλή συχνότητα, 10 Hz (AC) και μία σε χαμηλή, 1Hz (DC). Η υψηλότερη συχνότητα προκαλεί μικρότερο IP αποτέλεσμα. Μετράμε την φαινόμενη ειδική αντίσταση για κάθε συχνότητα

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} = \pi \frac{n(n+1)(n+2)}{I} \frac{\Delta V}{I}$$

Υπολογίζουμε

1. Αποτέλεσμα συχνότητας (frequency effect)

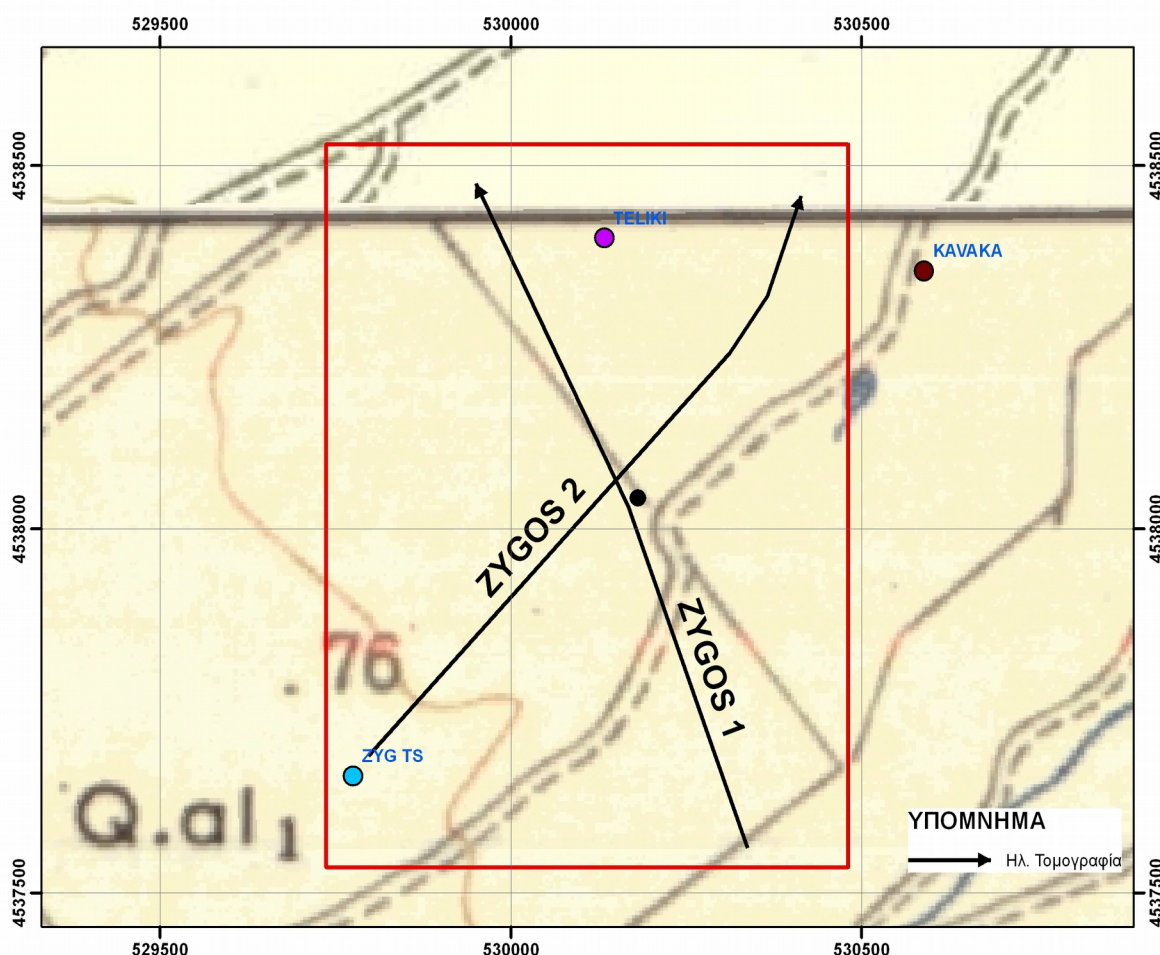
$$f.e. = \frac{\rho_{DC} - \rho_{AC}}{\rho_{AC}}$$

2.Μεταλλικός παράγοντας

$$m.f. = 2\pi \cdot 10^5 \frac{\rho_{AC}\rho_{DC} - \rho_{DC}}{\rho_{AC}\rho_{DC}}$$

4.1 Γεωφυσική Έρευνα στην περιοχή του Ζυγού

Η γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε στην περιοχή του Ζυγού.



Σχήμα 4.1.1 : Οι θέσεις των τομογραφιών ZYGOS 1 , ZYGOS 2 .

Έτσι , έγιναν δυο γεωηλεκτρικές τομογραφίες (σχήμα 4.1.1) στην λεκάνη που αναπτύσσεται νοτιοδυτικά του Ζυγού, με μήκος 1000 μέτρων και με διεύθυνση 338° και 43° αντίστοιχα. Ο στόχος των μετρήσεων ήταν να δώσει ικανά στοιχεία για την γεωλογική δομή της περιοχής , κυρίως σε ότι αφορά την μελέτη του πάχους και της σύστασης των χερσαίων αποθέσεων καθώς και της φύσης και του τεκτονισμού των σχηματισμών υποβάθρου.

Το πλήθος των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν στις τομογραφίες ήταν 21 ηλεκτρόδια , η απόσταση μεταξύ τους ήταν 50 μέτρα, έτσι το βάθος διασκόπησης έφτανε τα 200 μέτρα. Οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος- διπόλων μέτρησης δυναμικού ποίκιλαν σε $n\alpha$, $2n\alpha$, $3n\alpha$ με μέγιστη τιμή του n ίση με 8 .

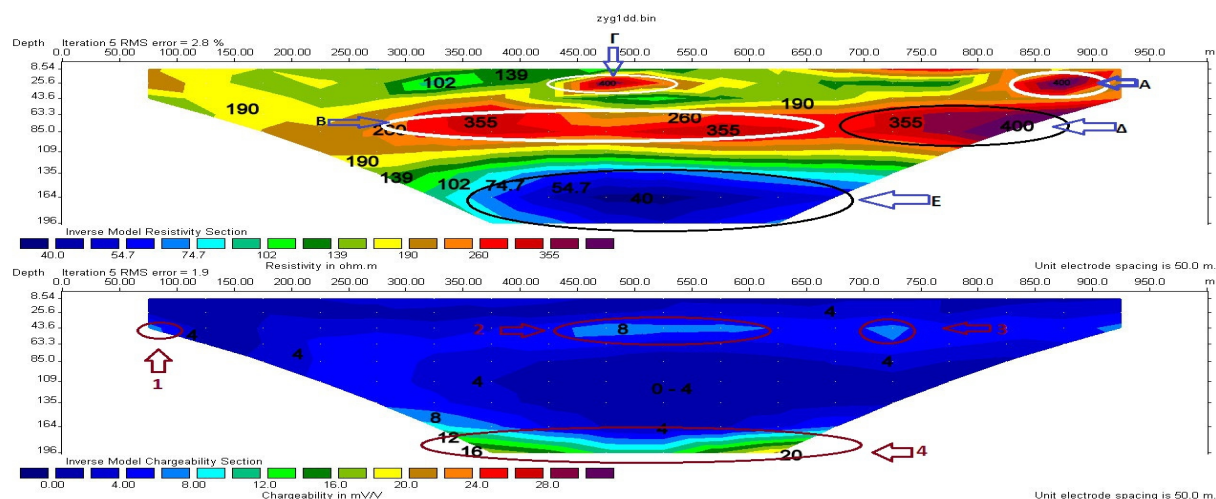
Το αποτέλεσμα ήταν να προκύψει μια τραπεζοειδής τομή γεωηλεκτρικών αντιστάσεων, αποτελούμενη από 220 περίπου μετρήσεις , με συνολικό επιφανειακό μήκος 1000 μέτρων και μέγιστο βάθος διασκόπησης περίπου 200 μέτρα.

Για τις τομογραφίες χρησιμοποιήθηκε η διάταξη διπόλου- διπόλου , που επιλέχθηκε σαν η πλέον αντιπροσωπευτική της περιοχής έρευνας .Η διάταξη αυτή ανταποκρίνεται καλύτερα στο γεωλογικό - γεωηλεκτρικό μοντέλο της περιοχής .

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τομογραφιών , που αποτελούνται από τις μετρήσεις των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της φορτιστικότητας .

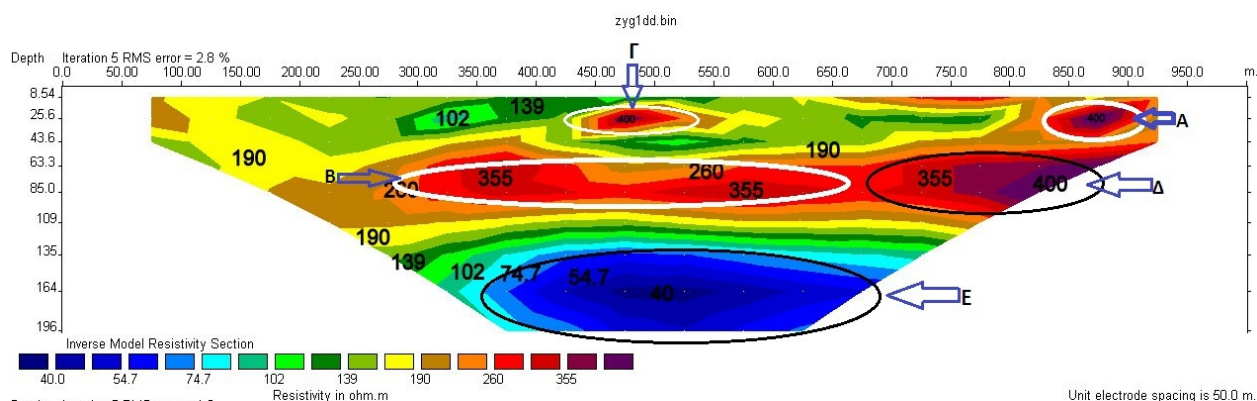
4.2 Τομογραφία ZYGOS 1

Η γεωηλεκτρική τομή που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2.1 προέκυψε από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με την διάταξη διπόλου-διπόλου .



Σχήμα 4.2.1: Αποτέλεσμα αντιστροφής της τομογραφίας ZYGOS 1 . Στο πάνω σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (στην κλίμακα χρωμάτων / ειδικής αντίστασης που βρίσκεται ακριβώς από κάτω). Στο κάτω σχήμα παρουσιάζεται η τιμή της φορτιστικότητας με την χρωματική κλίμακα που παρουσιάζεται ακριβώς από κάτω.

Στην πρώτη τομή (σχήμα 4.2.2) παρουσιάζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης .



Σχήμα 4.2.2 : Κατανομή των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο χώρο.

Στην γεωηλεκτρική τομή της γραμμής μελέτης σε μήκος 830m έως 925 m υπάρχει ένας σχηματισμός (A) μεγάλης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε βάθος από 9m ως 34 μέτρα .

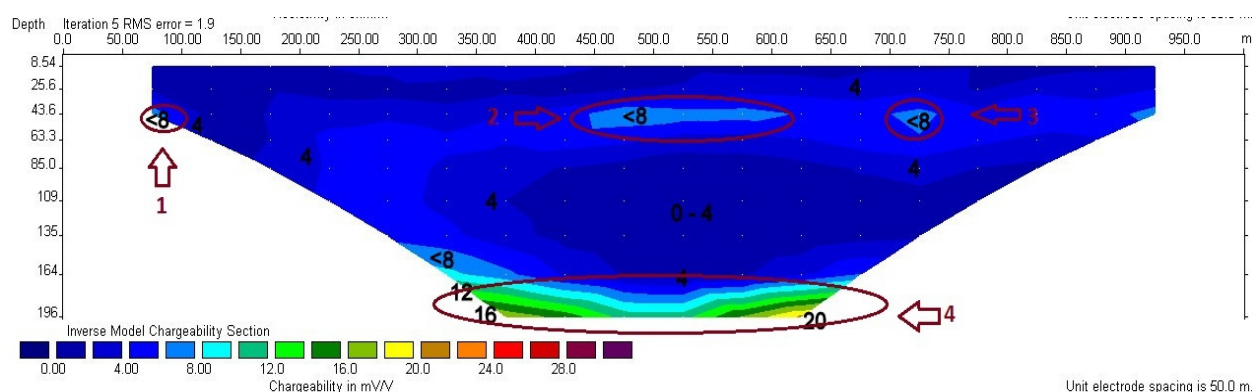
Υπάρχει ένα στρώμα με δυο ζώνες (B) υψηλότερων αντιστάσεων, σε μεγαλύτερο βάθος, που φτάνουν τα 355 Ohm.m κατά τόπους, από 53m ως τα 97 μέτρα βάθους και σε μήκος από 310 μ έως 675 μέτρα. Στο ίδιο βάθος, σε μήκος 725m έως 1000 m (πιθανόν), υπάρχει ένας σχηματισμός (Δ) υψηλής αντίστασης με τιμές που φτάνουν στα 400 Ohm.m.

Ακριβώς από πάνω συναντάται ένας σχηματισμός (Γ) πάλι μεγάλης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που

φτάνει τους 400 Ohm.m περίπου, σε βάθος από 17m ως 34 μέτρα και σε μήκος από 450m έως 560 μέτρα. Οι σχηματισμοί με τις μεγάλες τιμές της αντίστασης, αναμένεται ότι αντιστοιχούν σε κροκαλοπαγή.

Στη συνέχεια από το βάθος των 110 μέτρων περίπου παρατηρείται μείωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος, όπου συναντάμε μια ζώνη χαμηλής αντίστασης, που φτάνει τα 40 Ohm.m. Ο σχηματισμός βρίσκεται σε βάθος από 117m έως 196 μέτρα και σε μήκος από τα 325m έως 700m (πιθανόν). Αναμένεται ότι αντιστοιχεί κυρίως σε εναλλαγές χαλίκων και κροκαλών με αργιλικές στρώσεις. Αυτές οι μικρές αντιστάσεις δηλώνουν την μεγαλύτερη συμμετοχή αργιλικών στρώσεων μετά το βάθος των 110 μέτρων.

Στην δεύτερη τομή (σχήμα 4.2.3) παρουσιάζονται οι τιμές της φορτιστικότητας, M, που λήφθηκαν με την μέθοδο της επαγόμενης πόλωσης.



Σχήμα 4.2.3 : Η τιμή της φορτιστικότητας .

Υπάρχουν τρεις ζώνες (1, 2, 3) στο ίδιο περίπου βάθος, αλλά διαφορετικό πάχος και μήκος, που έχουν τις ίδιες τιμές της φορτιστικότητας, λίγο μεγαλύτερες του 8.

- Ζώνη 1 : εντοπίζεται περίπου από την αρχή της τομής και μέχρι τα 90 m
- Ζώνη 2: τοποθετείται σε μήκος από τα 450m έως 615m . Και οι δυο ζώνες 1, 2 βρίσκονται σε βάθος από 40 ως 53m .
- Ζώνη 3 : βρίσκεται σε βάθος 52 έως 63 m και σε μήκος από 700 έως 735m.

Σε όλη την έκταση της τομής και μέχρι το βάθος των 164m περίπου παρατηρούνται πολύ χαμηλές τιμές της φορτιστικότητας, μικρότερες του 7.

Από το βάθος των 160m και μετά, η τιμή της φορτιστικότητας αυξάνει πάρα πολύ με το βάθος (ζώνη 4) .

- Ζώνη 4 : βρίσκεται σε μήκος από 325m έως 675m. Οι τιμές της φορτιστικότητας ξεπερνούν τα 20 mV/V .

Επομένως όπως παρατηρούμε από την τομή, μέχρι το βάθος των 160m έχουμε απουσία των αργιλιών, μόνο κατά θέσεις παρατηρείται μια μικρή συμμετοχή των αργιλικών (Ζώνες 1, 2, 3) .

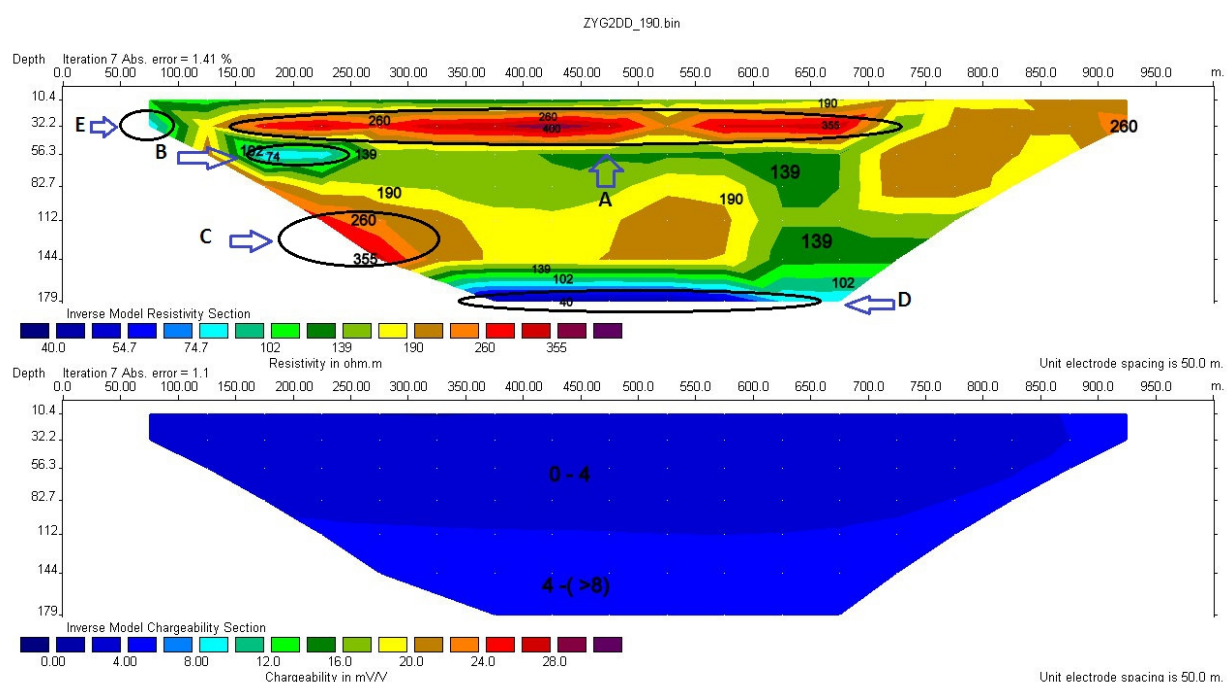
Όμως από το βάθος των 160 m και μέχρι το βάθος των 200m, παρατηρείται έντονη αύξηση των τιμών της

φορτιστικότητας , δείχνοντας έτσι πλούσιους σε αργιλικά σχηματισμούς, με χαμηλές αντιστάσεις , της τάξεις των 40-50 Ohm.m . Άρα με το βάθος παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας των σχηματισμών σε άργιλο.

Επίσης , οι τομές δείχνουν ότι δεν συναντιέται το υπόβαθρο , μέχρι το βάθος των 196 m που γίνεται η διασκόπηση .

4.3 Τομογραφία ZYGOS 2

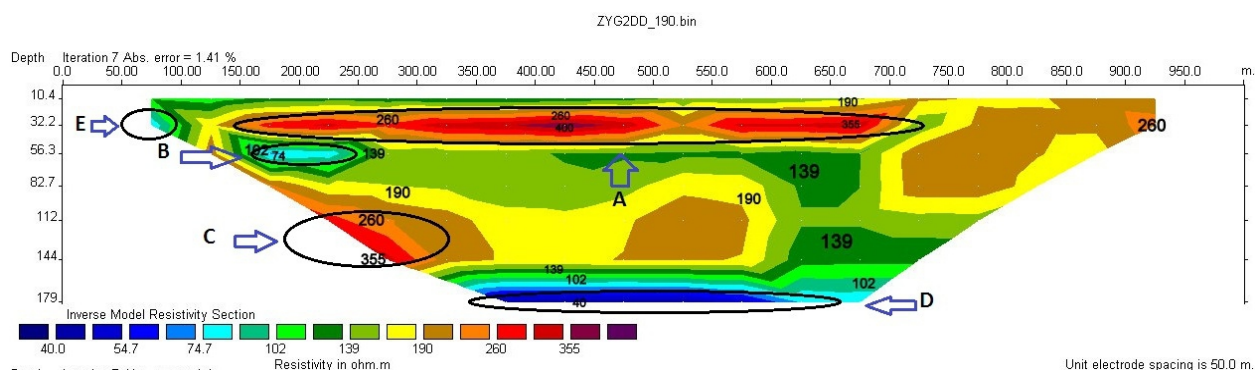
Η γεωηλεκτρική τομή που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.1 προέκυψε από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με την διάταξη διπόλου-διπόλου.



Σχήμα 4.3.1: Αποτέλεσμα αντιστροφής της τομογραφίας ZYGOS 1. Στο πάνω σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (στην κλίμακα χρωμάτων / ειδικής αντίστασης που βρίσκεται ακριβώς από κάτω). Στο κάτω σχήμα παρουσιάζεται η τιμή της φορτιστικότητας με την χρωματική κλίμακα που παρουσιάζεται ακριβώς από κάτω.

Στη γραμμή μελέτης ZYGOS 2, μήκους 1000 m, η οποία έχει γενική διεύθυνση 43° , το μέγιστο βάθος διασκόπησης είναι 180 m.

Στην πρώτη τομή (σχήμα 4.3.2) παρουσιάζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



Σχήμα 4.3.2 : Κατανομή των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο χώρο.

Παρατηρείται μια γεωηλεκτρική ζώνη (A) με μεγάλες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, που κυμαίνεται από 170 - 400 Ohm.m και βάθος που ξεκινά από 15m έως σχεδόν τα 57m στο BA τμήμα της

τομής και στο μήκος από 130 m έως 725m της γραμμής μελέτης . Αποτελείται από τρεις σχηματισμούς σε πλευρική επαφή μεταξύ τους .

Στο ίδιο βάθος και νοτιοδυτικότερα εμφανίζεται ένα στρώμα (E) με χαμηλές σχετικά τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της τάξης των 80 Ohm.m . Επίσης ένα στρώμα (B) με παρόμοιες αντιστάσεις, εμφανίζεται στο βάθος των 57 m μέχρι τα 69m και σε μήκος από 160m έως τα 250m.

Στη συνέχεια , παρατηρείται ένας άλλος σχηματισμός (C) με τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που φτάνουν τα 355 Ohm.m . Ο σχηματισμός αυτός βρίσκεται σε απόσταση 200m από την αρχή της γραμμής μελέτης , μέχρι το 300 μέτρο της γραμμής . Ξεκινά από το βάθος των 100m και έχει κεκλιμένη μορφή και το μεγαλύτερο βάθος της κορυφής του σχηματισμού , αντιστοιχεί στα 145m (οι διαστάσεις του είναι άγνωστες , διότι δεν περατώνεται στην γεωηλεκτρική τομή).

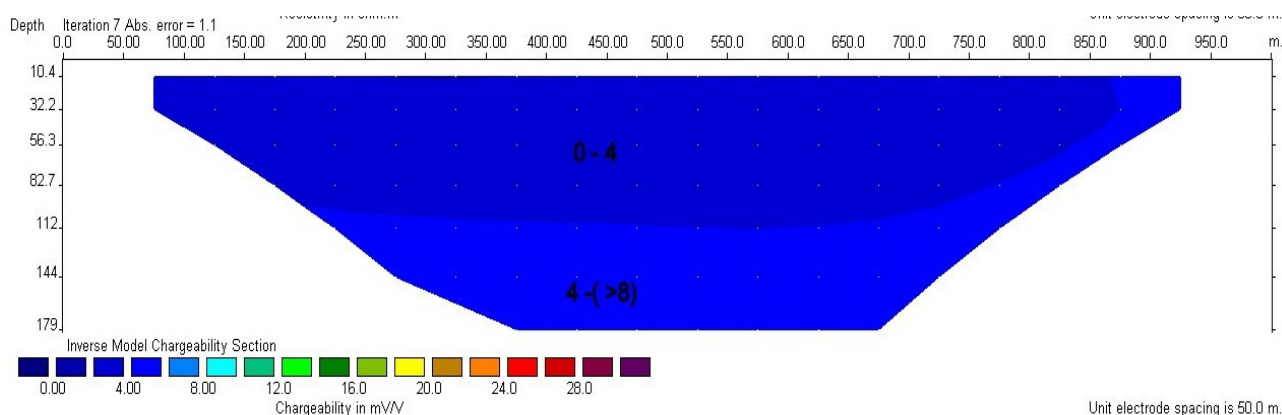
Τέλος , από το βάθος των 160m παρατηρείται μια μείωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και φτάνει να παίρνει τιμές μικρότερες των 40 Ohm.m . Έτσι , μετά το βάθος των 160m συναντάται μια ζώνη (D) χαμηλών αντιστάσεων , που κυμαίνονται από 70Ohm.m έως και μικρότερες των 40 Ohm.m.

Σε όλη την υπόλοιπη έκταση της τομογραφίας , οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κυμαίνονται από 130 Ohm.m έως τα 300 Ohm.m.

Έτσι , οι σχηματισμοί E, B πιθανότατα θα αντιστοιχούν σε εναλλαγές χαλίκων και κροκαλών με αργιλικές στρώσεις . Ενώ οι μεγαλύτερες αντιστάσεις θα αντιστοιχούν σε κροκαλοπαγή , που κατά θέσεις και συγκεκριμένα στις ζώνες A,C θα αποτελούνται από περισσότερο συνεκτικά κροκαλοπαγή.

Τώρα , όπως και στην τομογραφία ZYGOS 1 , έτσι και στην ZYGOS 2 παρατηρείται μια αυξημένη συμμετοχή των αργιλικών στρωμάτων από το βάθος των 160 m .

Στην δεύτερη τομή (σχήμα 4.3.3) παρουσιάζονται οι τιμές της φορτιστικότητας ,M, που λήφθηκαν με την μέθοδο της επαγόμενης πόλωσης .



Σχήμα 4.3.3 : Η τιμή της φορτιστικότητας .

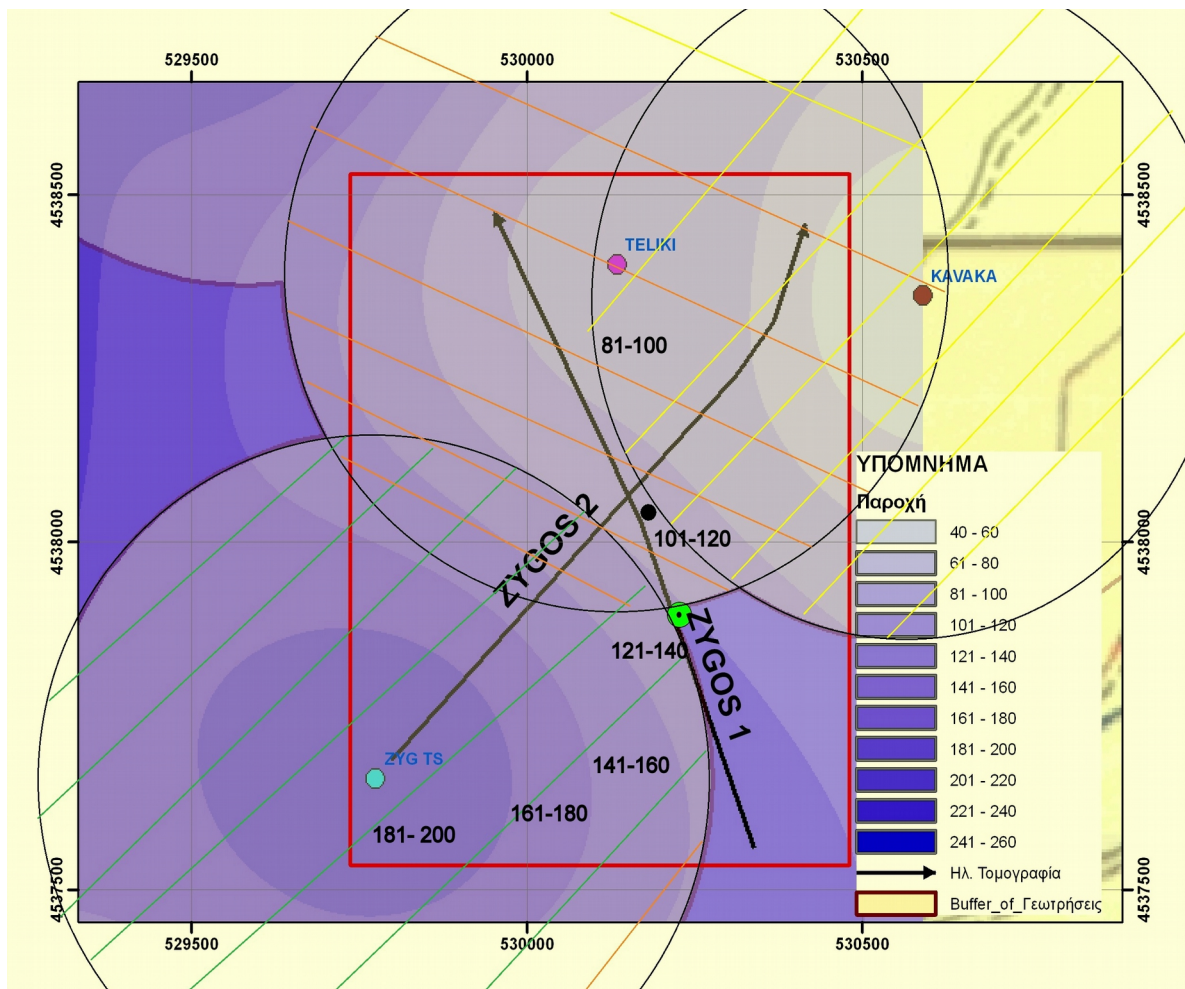
Όσον αφορά την φορτιστικότητα, παρατηρούμε ότι οι τιμές κυμαίνονται από 0 μέχρι τα 4mV/V, έως το βάθος των 110 m και από 4 mV/V έως και μικρότερες των 8 mV/V από το βάθος των 110m μέχρι τα 179m .

Οι χαμηλές τιμές της φορτιστικότητας , υποδηλώνουν την απουσία αργιλικών στρωμάτων.

5.1 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας , μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής :

- Το πρώτο που παρατηρούμε είναι ότι δεν παρατηρείται ο σχηματισμός του υποβάθρου στην τομογραφία ZYGOS 1 , όπου το βάθος διασκόπησης φτάνει τα 196 μέτρα, αλλά ούτε και στη τομογραφία ZYGOS 2 , όπου το βάθος διασκόπησης φτάνει τα 179 μέτρα. Έτσι η γενική παρατήρηση είναι ότι κατά την διασκόπηση δεν συναντάται ο σχηματισμός του υποβάθρου.
- Παρατηρώντας την κατανομή των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων των τομογραφιών, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η στρωματογραφία της περιοχής μελέτης είναι γενικά οριζόντια με πλευρικές μεταβολές(αφορούν κυρίως την σύσταση των σχηματισμών και κυρίως του κροκαλοπαγούς).
- Σύμφωνα με τις τομογραφίες (ειδικής αντίστασης και φορτιστικότητας) παρατηρείται μικρή συμμετοχή των αργιλικών μέχρι το βάθος των 160 μέτρων περίπου . Η στρωματογραφία, έτσι , μέχρι το βάθος των 160 μέτρων αποτελείται από χαλαρούς σχηματισμούς, όπως χαλίκια και κροκάλες, καθώς και κροκαλοπαγή με διάφορους βαθμούς συνεκτικότητας (διότι εμφανίζουν ετερογένεια από πλευράς ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης).
- Τώρα , λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων, που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή του Ζυγού, και τα αποτελέσματα της γεωφυσικής διασκόπησης, διαπιστώνουμε ότι υδροφορία παρατηρείται σε όλο το βάθος που ερευνήθηκε.
- Συγκεκριμένα από τις γεωτρήσεις, παρατηρείται αύξηση των απολήψεων παροχών σε μια διεύθυνση από τα νοτιοανατολικά προς τα βορειοδυτικά , όπου γίνεται μέγιστη στη γεώτρηση ΛΙΜΝΙΑΣ.
- Εκτός από τα παραπάνω πρέπει να λάβουμε υπόψη μας και τις ακτίνες επίδρασης R των γεωτρήσεων που βρίσκονται στην περιοχή μελέτης, πέρα από τις οποίες δεν θα παρατηρείται πτώση της στάθμης δ . Έτσι σχεδιάζονται ζώνες απόστασης 500 μέτρων από τις παρακείμενες γεωτρήσεις, σαν σχετικό όριο ασφαλείας για τον μη επηρεασμό των γεωτρήσεων μεταξύ τους .
- Επίσης , επειδή δεν συναντάμε το υπόβαθρο στο βάθος των 200 περίπου μέτρων, το βάθος της γεώτρησης μπορεί να είναι μεγαλύτερο των 200 μέτρων , ώστε να γίνει καλύτερη εκμετάλλευση της αρδευτικής γεώτρησης.
- Στο χάρτη του σχήματος 5.1.1, απεικονίζονται οι ακτίνες επίδρασης και οι παροχές, που στο σημείο που προτείνεται να γίνει η γεώτρηση είναι της τάξης των $140 \text{ m}^3/\text{hour}$.



Σχήμα 5.1.1 : Θέση προτεινόμενης γεώτρησης .

Βασιζόμενοι στις παραπάνω παρατηρήσεις και συμπεράσματα και στα στοιχεία του χάρτη του σχήματος 5.1.1 , διαπιστώνουμε ότι η καταλληλότερη θέση κατασκευής αρδευτικής γεώτρησης βρίσκεται στο 300 ° μέτρο της τομογραφίας ZYGOS 1 και παρουσιάζεται με πράσινο στον χάρτη και οι συντεταγμένες του σημείου είναι χ:530220 και γ: 4537900.

Κεφάλαιο 6

6.1 Βιβλιογραφία

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αποστοπούλου Γ. 2013 . *Σημειώσεις εφαρμοσμένης γεωφυσικής* . Πηγη στο internet :
< www.metal.ntua.gr/uploads/4694/1168/total-gapo-notes-Applied_Geophysics-2013nn-I.pdf >

Βουδούρης Κ. *Πορώδες- Περρατότητα* . Παρουσίαση του μαθήματος υδρογεωλογίας , απο τον επίκουρο καθηγητή Α.Π.Θ

Ι.Γ.Μ.Ε , φύλλα ΚΑΒΑΛΑ και ΝΙΚΗΣΙΑΝΗ . Κλίμακα 1:50.000 . Έκδοση Ι.Γ.Μ.Ε.

Μουντράκης Δ. 2010 . *Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας*. Εκδόσεις University Studio Press.

Παπαζάχος Β. 1996 . *Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη γεωφυσική* . Εκδόσεις ΖΗΤΗ .

Παπαδόπουλος Τ. 2008 . *Εισαγωγή στη γεωφυσική (σημειώσεις)* . Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών . Πηγη στο internet : < <http://users.uoa.gr/~jalexopoulos/electrical.pdf> >

Σούλιος Γ. 2010 . *Γενική υδρογεωλογία* . Πρώτος τόμος . Εκδόσεις University Studio Press.

Σούλιος Γ. 2010 . *Γενική υδρογεωλογία* . Δεύτερος τόμος . Εκδόσεις University Studio Press.

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Palacky G. J. 1988 . *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics volume 1 , theory*. edited by M. N. Nabighian . Society of exploration geophysicists.

Philip Kearey, Michael Brooks, Ian Hill 2002 . *An Introduction to Geophysical Exploration*. Wiley-Blackwell .

Roy A. , and Apparao A. 1971 . *Depth of investigation in direct current methods* . Geophysics

Tsourlos P. 1933 . *Modeling and inversion schemes for vertical profiling resistivity data*. Transfer report , University of York

Tsourlos P. 1995. Modeling, Interpretation and inversion of multielectrode resistivity data. D. Phil . Thesis, University of York

Ward S. H. , and Fraser D. C. , 1967 . *Conduction of electricity in rocks: in Mining Geophysics* , V.2 Soc. Explor . Geophys

ΠΗΓΗ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

www.hckgeo.com.tw/electric/rip.html

http://www.epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/methods/Surface_Geophysical_Methods/Electrical_Methods/Induced_Polarization.htm

<http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/iag/foundations/properties/2physprop-iag.htm>

http://epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/methods/Surface_Geophysical_Methods/Electrical_Methods/Resistivity_Methods.htm

http://epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/methods/Surface_Geophysical_Methods/Electrical_Methods/index.htm