

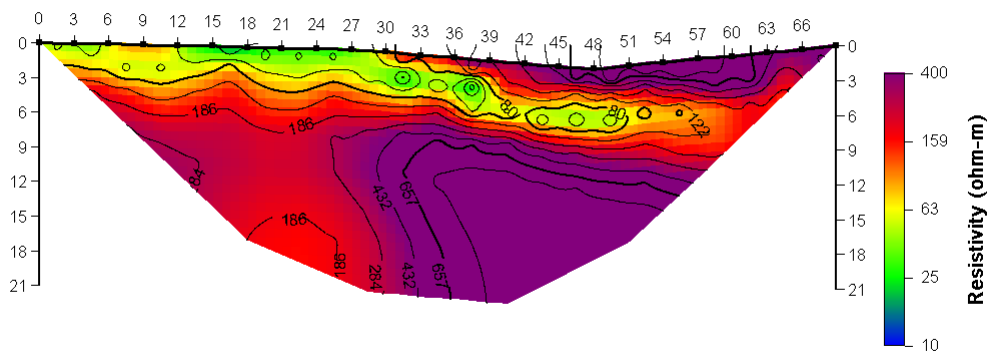
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



Μετρήσεις Ηλεκτρικής Τομογραφίας στην Κοίτη του Ρέματος Μπογδάνα (Ν. Θεσσαλονίκης)



Ρουσοπούλου Βασιλική

A.E.M. : 4917

Επιβλέποντες: Παναγιώτης Τσούρλος, Καθηγητής ΑΠΘ

Γιώργος Βαργεμέζης, Αν. Καθηγητής ΑΠΘ

Θεσσαλονίκη 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ :

Εισαγωγή	3
1. Περιοχή μελέτης	5
1.1 Γεωλογία περιοχής	6
1.2 Υδρογεωλογικά στοιχεία περιοχής	9
1.3 Χημικά στοιχεία	10
2. Ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης	13
2.1 Φαινόμενη ειδική αντίσταση και τρόποι διάταξης ηλεκτροδίων	15
2.2 Μέθοδος ηλεκτρικής τομογραφίας	18
3. Γεωηλεκτρικές μετρήσεις σε Χ.Υ.Τ.Α	20
3.1 Αντιστροφή δεδομένων	22
3.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων	23
4. Συμπεράσματα	27
5. Βιβλιογραφία	28

Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της γεωφυσικής έρευνας που έγινε στο ρέμα Μπογδάνα τον Νοέμβριο του 2015 στο σημείο που αυτό ενώνεται με το ρέμα που εκρέει από τον ΧΥΤΑ Μαυροράχης. Σκοπός της έρευνας ήταν να διαπιστωθεί τυχόν περιβαλλοντική ρύπανση που προκαλείται στο υπέδαφος από το ρέμα του ΧΥΤΑ στο σημείο ένωσής του με τον Μπογδάνα.

Η συγκεκριμένη εργασία αποτελεί μικρό τμήμα επέκτασης μιας μεγαλύτερη και αναλυτικότερης έρευνας που πραγματοποιήθηκε κατά την περίοδο Σεπτεμβρίου 2013-Φεβρουαρίου 2014 από το ΑΠΘ για λογαριασμό του Φορέα Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΦΟΔΣΑ) Κεντρικής Μακεδονίας, και περιελάμβανε γεωφυσική, υδρογεωλογική και υδροχημική έρευνα με σκοπό τον εντοπισμό διαρροών και ποιοτικής επιβάρυνσης του υπόγειου νερού στην ευρύτερη περιοχή .

Στόχος της εργασίας είναι να παρουσιαστούν τα γεωφυσικά αποτελέσματα σε μια συγκεκριμένη θέση και να αξιολογηθεί κατά πόσο η όποια ρύπανση που παρατηρείται στην επιφάνεια και προέρχεται από τον ΧΥΤΑ επηρεάζει το υπέδαφος. Η γεωφυσική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Στην παρούσα εργασία αρχικά παρατίθενται γενικές πληροφορίες σχετικά με την περιοχή μελέτης και παρατίθενται γεωλογικά, υδρογεωλογικά καθώς και χημικά στοιχεία που προέκυψαν από τις δειγματοληψίες στα ρέματα της περιοχής από την απαλιότερη μελέτη.

Στη συνέχεια περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε με ιδιαίτερη έμφαση στη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας .

Κατόπιν περιγράφονται και αναλύονται οι γεωηλεκτρικές μετρήσεις που έλαβαν χώρα στην περιοχή μελέτης και δίνεται έμφαση στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Στο τέλος συνοψίζονται τα συμπεράσματα καθώς και προτάσεις για συστηματική παρακολούθηση της περιοχής μελέτης.

Ευχαριστίες

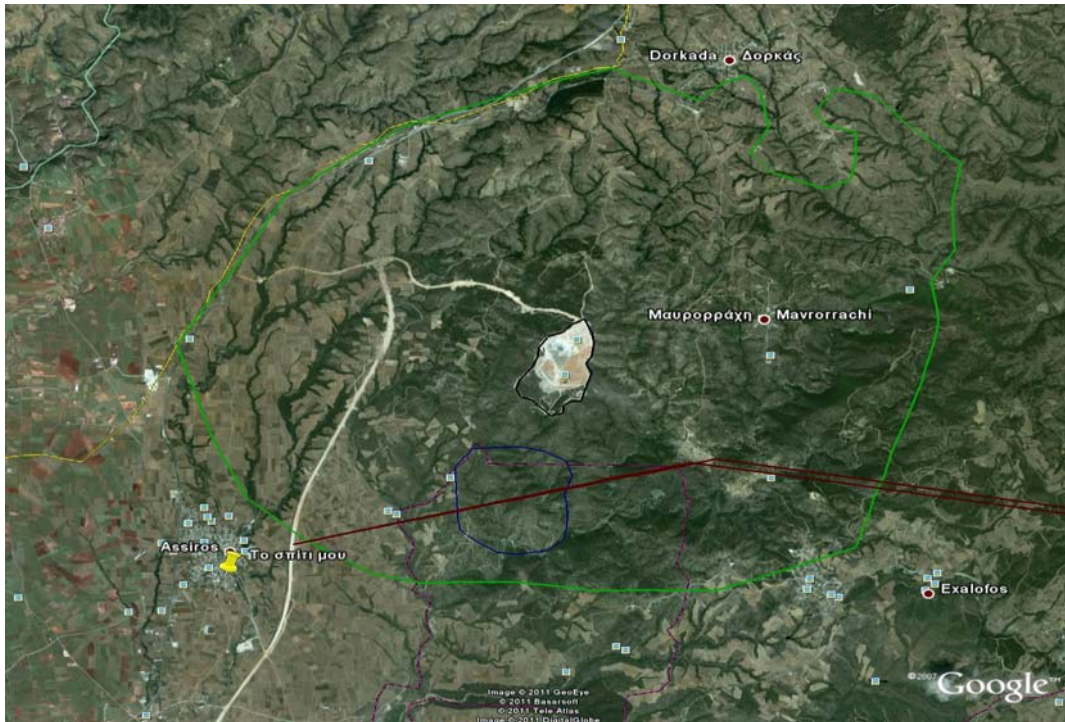
Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους καθηγητές Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης κ. Παναγιώτη Τσούρλο και τον κ. Γιώργο Βαργεμέζη για την σαφή καθοδήγηση, τη σωστή προτροπή, τις στοχευμένες συμβουλές και την αμοιβαία συνεργασία με σκοπό τη διεκπεραίωση της διπλωματικής μου εργασίας .

Επιπλέον, ευχαριστώ τον κ. Άκη Καζάκη για τη μεγάλη βοήθεια που παρείχε με σκοπό την εκτέλεση γεωφυσικών μετρήσεων.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους καθηγητές του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτέλειου πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης που συνέβαλαν μέσα από τη διδασκαλία τους στο να κατανοήσω και να αγαπήσω την επιστήμη της Γεωλογίας.

1.ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ο Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α) Μαυροράχης χωροθετήθηκε περίπου 30km βορειοδυτικά του πολεοδομικού συγκροτήματος της Θεσσαλονίκης . Αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους χώρους ταφής απορριμμάτων και δέχεται απορρίμματα από όλη την περιφέρεια της Θεσσαλονίκης.



Σχήμα 1.1 : Δορυφορική εικόνα της ευρύτερης περιοχής του Χ.Υ.Τ.Α Μαυροράχης



Σχήμα 1.2 : Απεικόνιση του αναμορφωμένου χώρου ταφής σε χάρτη Google Earth.

1.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η περιοχή ανήκει στη Σερβομακεδονική μάζα η οποία αποτελείται από κρυσταλλοσχιστώδη και πυριγενή πετρώματα και βρίσκεται δυτικά του Στρυμώνα από τα σύνορα μέχρι και τη Χαλκιδική, δηλαδή αποτελεί το δυτικό τμήμα που περιλαμβάνεται μεταξύ της ζώνης Αξιού και του ποταμού Στρυμώνα.

Η Σερβομακεδονική μάζα διακρίνεται σε δυο μεγάλες ενότητες :

- Την κατώτερη ενότητα των Κερδυλλίων που καταλαμβάνει και το ανατολικό τμήμα της μάζας και
- Την ανώτερη ενότητα του Βερτίσκου που καταλαμβάνει το δυτικό τμήμα της και στην οποία ανήκει η περιοχή έρευνας.



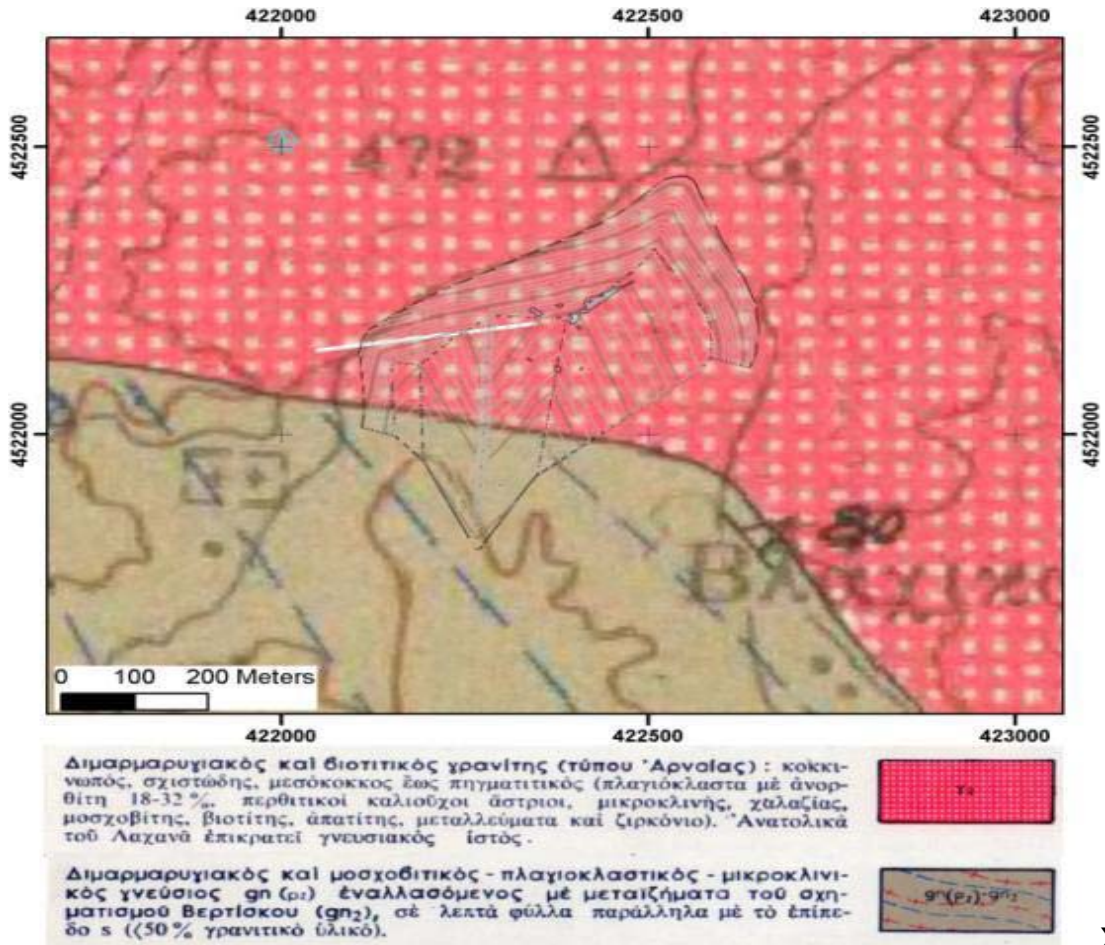
Σχήμα 1.3. : **Τεκτονικό σκαρίφημα Σερβομακεδονικής μάζας** 1: μεταλλικά ιζήματα της κοιλάδας του Στρυμώνα, 2: ενότητα του Βερτίσκου, 3: ενότητα των Κερδυλλίων, 4: μάζα της Ροδόπης , 5: Περιοδοπική ζώνη, 6: ανατολικό όριο της Σερβομακεδονικής(Γραμμή Στρυμώνα),7: δυτικό όριο της Σερβομακεδονικής (Μουντράκης 2010)

Η ενότητα των Κερδυλλίων καταλαμβάνει την Ανατολική Χαλκιδική μεταξύ των εκβολών του Στρυμόνα και του Στρατωνίου , έχει πάχος περίπου 3000 μέτρα και συγκροτείται από πετρώματα όπως οι ορθογνεύσιοι, παραγνεύσιοι, μιγματίτες, μάρμαρα και αμφιβολίτες .

Η ενότητα του Βερτίσκου κατέχει τον κορμό της Χαλκιδικής, εκτείνεται προς Βορρά μέχρι τα σύνορα και συνίσταται από μια ακολουθία μιγματιτικών ορθογνεύσιων, μαρμαρυγιακών σχιστολίθων και λεπτών στρωμάτων μαρμάρων ενώ στους ανώτερους ορίζοντες της συμμετέχουν μεταγάββροι-μεταδιαβάσες και ορθοαμφιβολίτες.

Οι μεγάλοι όγκοι πυριγενών πετρωμάτων που συγκροτούν τη Σερβομακεδονική μάζα έχουν προέλθει από διάφορες φάσεις μαγματισμού. Μια από τις φάσεις μαγματισμού που έλαβε χώρα στο Μεσοζωικό δημιούργησε και τους γρανιτικούς όγκους της Αρναίας, του Λαχανά, το χαλαζιακό διορίτη του Φλαμουρίου οι οποίοι συνεπάγονται και με τη βύθιση του ωκεανού της ζώνης Αξιού.

Τέτοιοι γρανιτικοί όγκοι τύπου Αρναίας υπάρχουν επιφανειακά και στην περιοχή έρευνας ενώ πιο συγκεκριμένα στο χώρο ταφής απορριμμάτων βρέθηκε ο σχηματισμός του γνεύσιου όπως παρουσιάζεται και στον ακόλουθο γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ.

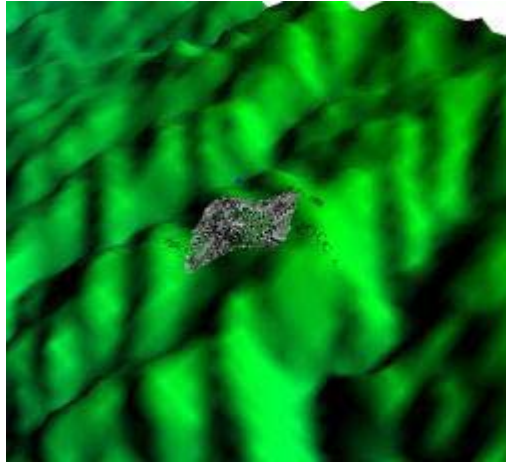


Σχήμ

α 1.4. Γεωλογικός χάρτης περιοχής XYTA (Απόσπασμα από ΙΓΜΕ, Φύλλο Λαχανά)

Σύμφωνα με τα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής η υδροφορία αναμένεται να αναπτυχθεί είτε κατά μήκος των ρηξιγενών δομών των βραχωδών σχηματισμών διότι πρόκειται για αδιαπέρατους σχηματισμούς είτε στον αποσαθρωμένο μανδύα των σχηματισμών αυτών λόγω της καολινιτώσης του αποσαθρωμένου γρανίτη.

Παρόλα αυτά η στάθμη του υπόγειου νερού παρουσιάζει μια σχετική ταπείνωση από τα ΒΑ προς τα ΝΔ εξαιτίας της λειτουργίας των βραχωδών σχηματισμών ως υδροφόρων .



Σχήμα 1.5 : Μορφολογία της περιοχής (Global Mapper, grid 92 m).

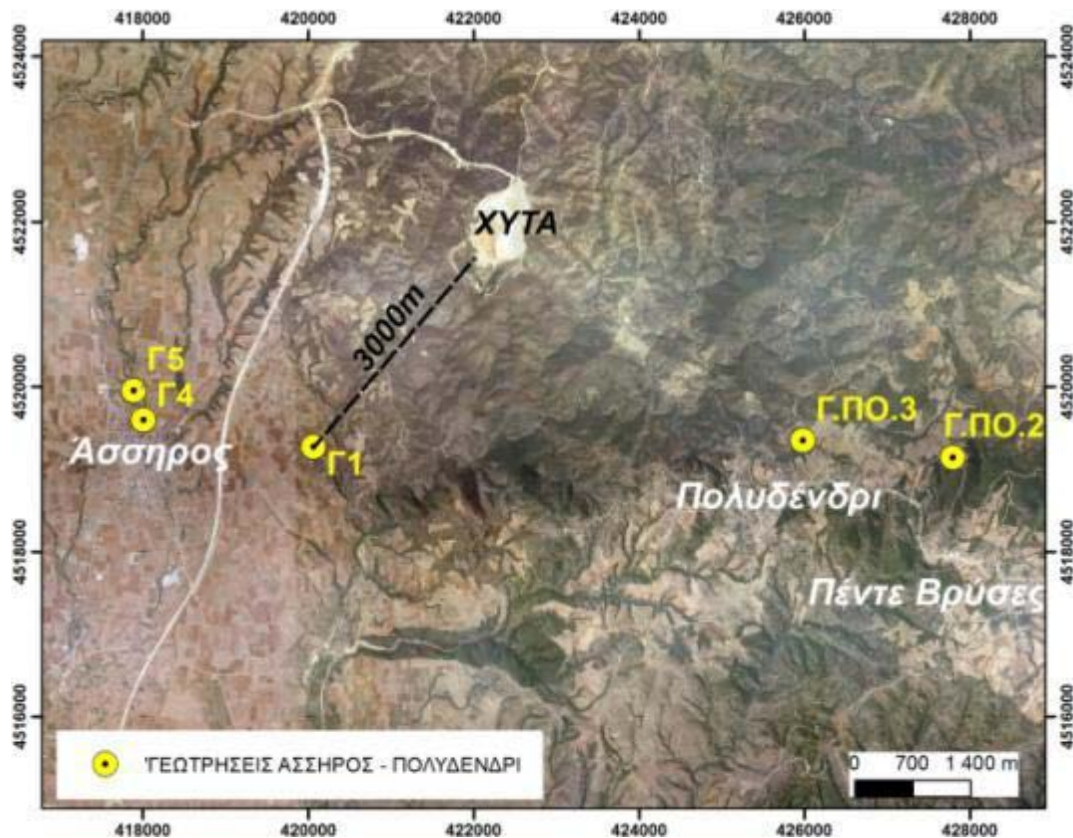
Η στάθμη του υπόγειου νερού όπως διαφαίνεται και από το σχήμα ακολουθεί τη κλίση της περιοχής δηλαδή από τα ΒΑ προς τα ΝΔ και ακολουθούν και τα ρέματα με ανάλογη διεύθυνση .

1.2 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής καθορίζονται με βάση τους γεωλογικούς σχηματισμούς που καλύπτουν την περιοχή . Με βάση αυτά τα δεδομένα, οι γεωλογικοί σχηματισμοί διακρίνονται σε υδροπερατούς, ημιπερατούς και υδροστεγανούς.

Στη συγκεκριμένη περιοχή επικρατούν βραχώδεις σχηματισμοί όπως γνεύσιοι και γρανίτες που θεωρητικά πρόκειται για αδιαπέρατους σχηματισμούς. Επομένως η υδροφορία αναμένεται να αναπτυχθεί στις κατά τόπους ζώνες διάρρηξης του γνευσίου διότι πρόκειται για έναν αδιαπέρατο σχηματισμό και η υδροπερατότητα του οφείλεται στο δευτερογενές ενεργό πορώδες του .

Επίσης σημαντική υδροφορία αναπτύσσεται και σε ζώνες διαρρήξης κοντά στο Πολυδένδρι, στις Πέντε Βρύσες και στην Άσσηρο όπου λειτουργούν οι υδρευτικές γεωτρήσεις.

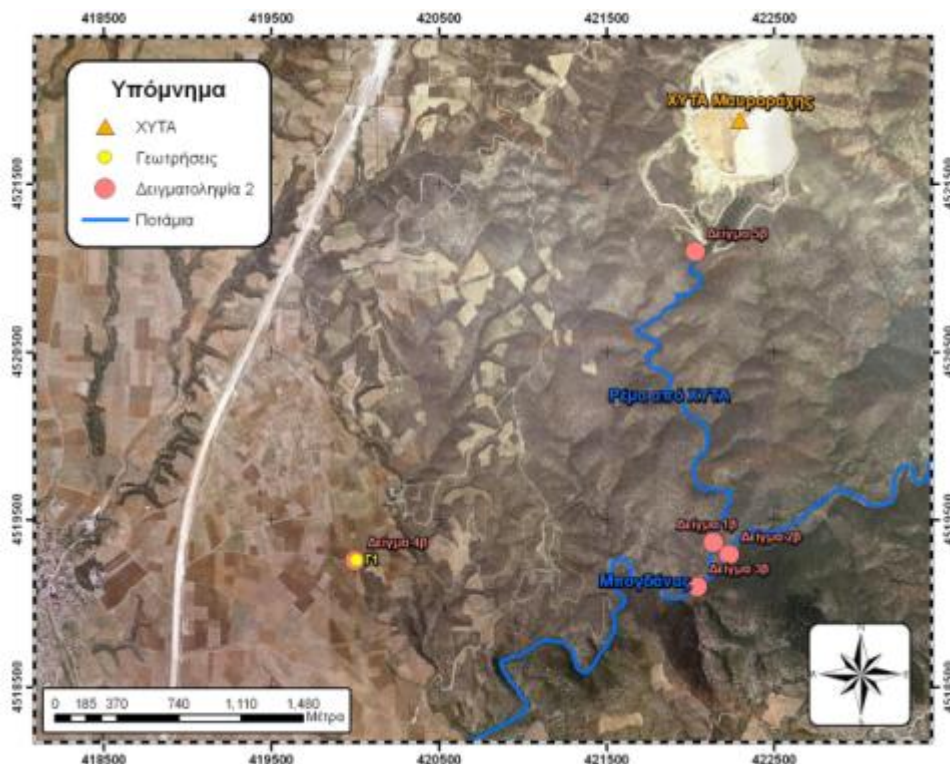


Σχήμα 1.6: Απογραφή υδρευτικών γεωτρήσεων σύμφωνα με στοιχεία της ΔΕΥΑΛ. Σημειώνεται η απόσταση της πλησιέστερης γεώτρησης από τον χώρο του ΧΥΤΑ Μαυροράχης. (Τσούρλος 2014)

1.3 ΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Ο ΧΥΤΑ της Μαυροράχης έχει κατασκευαστεί σε υδατοστεγανούς σχηματισμούς (γενέσιο και γρανίτης) . Το ρέμα που υπάρχει Νότια του ΧΥΤΑ απορρέει στο γενέσιο και καταλήγει στον ποταμό Μπογδάνα.

Στα πλαίσια της ευρύτερης υδρογεωλογικής και υδροχημικής έρευνας στην περιοχή (Τσούρλος κα., 2014) πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες και ελήφθησαν δείγματα από θέσεις στον ποταμό Μπογδάνα πριν την ανάμειξη του με το ρέμα από τον ΧΥΤΑ και μετά, καθώς και από το ρέμα του ΧΥΤΑ στην αρχή και στο τέλος του.



Σχήμα 1.7: Θέσεις δειγμάτων κατά την δειγματοληγία

Από τις χημικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο αναλυτικής Χημείας του τμήματος Χημικών μηχανικών του Α.Π.Θ. προέκυψε ότι ο χημισμός του Μπογδάνα δεν επηρεάζεται σημαντικά από την ανάμειξη του με τις εκροές του ΧΥΤΑ.

Το ρέμα που εκρέει από τον ΧΥΤΑ κατά την έξοδο του (δείγμα 5β) προέκυψε ότι είναι ελαφριά από οργανικές ενώσεις και από βαρέα μέταλλα. Από το δείγμα που λήφθηκε λίγο πριν την ένωση του ρέματος με το Μπογδάνα προέκυψε σημαντική μείωση των τιμών των παραπάνω παραμέτρων. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στη φυσική απορρύπανση του ρέματος κατά τη ροή του. Επίσης η μελέτη συμπεραίνει ότι λόγω της σταθερής παροχής του ρέματος ο γνεύσιος τροφοδοτείται ελάχιστα από το ρέμα με αποτέλεσμα να μην αναμένεται επιβάρυνση των υπόγειων υδάτων από τις εκροές του ΧΥΤΑ.

Παρόλα αυτά χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν και στα ρέματα της ευρύτερης περιοχής και μάλιστα οι θέσεις δειγμάτων είναι πριν την ανάμειξη του Μπογδάνα με το ρέμα του Χ.Υ.Τ.Α. και μετά την ανάμειξη τους.



Σχήμα 1.8 : Δειγματοληψία νερού από ρέμα της περιοχής για τη διαδικασία χημικής ανάλυσης

3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

ΜΕΘΟΔΟΙ

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

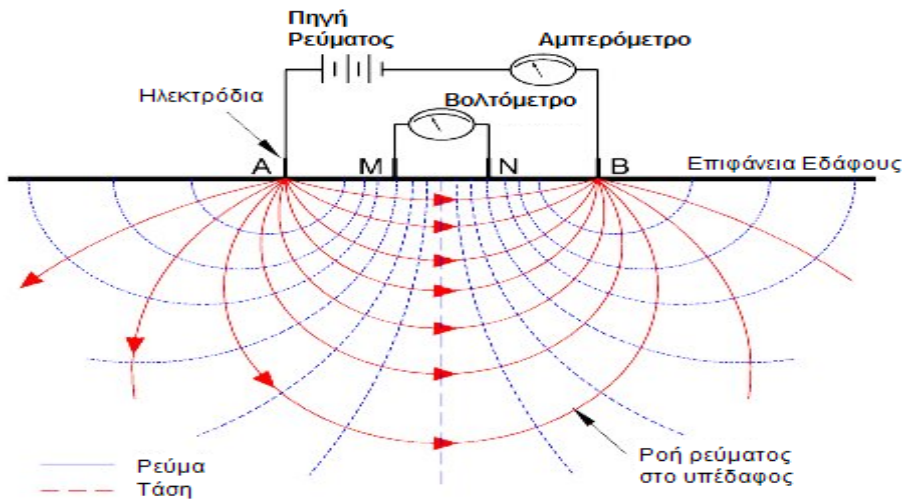
Γεωφυσική διασκόπηση είναι η μελέτη της δομής επιφανειακών στρωμάτων του γήινου φλοιού, με βάση τις μετρήσεις γεωφυσικών μεγεθών και με την εφαρμογή θεμελιωδών νόμων της Φυσικής. Σκοπός της γεωφυσικής διασκόπησης είναι ο εντοπισμός γεωλογικών δομών οικονομικής σημασίας (κοιτάσματα πετρελαίου, φυσικών αερίων, μεταλλευμάτων). Ο συνδυασμός γεωφυσικών μεθόδων με γεωλογικές μεθόδους εφαρμόζεται για τον καθορισμό μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους. Οι βασικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης είναι οι σεισμικές, οι βαρυτομετρικές, οι μαγνητικές, οι ηλεκτρικές και οι ηλεκτρομαγνητικές και σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται μέθοδοι όπως η ραδιομετρική και η θερμική μέθοδος.

Με τις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων και των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Οι ποσότητες που υπολογίζονται και παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι η ηλεκτρική τάση και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Οι σπουδαιότερες ηλεκτρικές μέθοδοι είναι η μέθοδος της ειδικής αντίστασης, η μέθοδος των ισοδυναμικών γραμμών, η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας, η μέθοδος του φυσικού δυναμικού και η μέθοδος των τελλουρικών ρευμάτων.

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι μια από τις σημαντικότερες μεθόδους. Σκοπός της μεθόδου είναι να βρεθεί η γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους και να ληφθούν πληροφορίες για τη γεωλογική του δομή. Λόγω χαμηλού κόστους και μεγάλου εύρους εφαρμογών είναι η πιο διαδεδομένη γεωφυσική μέθοδος.

Κατά την μέθοδο αυτή μετράμε τη διαφορά δυναμικού που προκαλείται από την εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη γη. Ουσιαστικά 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 M, N.

Η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος ονομάζεται γεωηλεκτρική δομή οπότε άμεσος στόχος της μεθόδου είναι ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους.



Σχήμα 2.1: Σχηματική παράσταση κατά την εφαρμογή της μεθόδου της ειδικής αντίστασης

Το βάθος διείσδυσης του ρεύματος (άρα και το βάθος της διασκόπησης) είναι ανάλογο με την απόσταση των ηλεκτροδίων. Η γη είναι γεωηλεκτρικά ανομοιογενής, επομένως η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση είναι συνάρτηση:

- της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους
- της γεωμετρίας της μέτρησής μας (Θέσεις Α, Β, Μ, Ν)

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες με βασικότερο την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα και ειδικότερα τις υδρολογικές-υδρογεωλογικές συνθήκες, τη χημική σύσταση του νερού, το πορώδες των σχηματισμών, τις πιθανές διαρρήξεις-διακλάσεις των σχηματισμών, τη θερμοκρασία και την πίεση. Συνεπώς η ερμηνεία των αποτελεσμάτων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ , υπολογίζεται από τη σχέση: $\rho = RS/L$ όπου

R: η ηλεκτρική αντίσταση ενός κομματιού σχήματος κυλίνδρου που υπολογίζεται από το νόμο του Ohm $R = \frac{V_{MN}}{I}$ επί

S : την επιφάνεια διατομής του δια

L : το μήκος του.

Το αντίστροφο της ειδικής αντίστασης (ρ) είναι το φυσικό μέγεθος ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ), εκφράζει την ευκολία διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από ένα υλικό και ορίζεται ως εξής: $\sigma = 1/\rho$

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

2.1 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

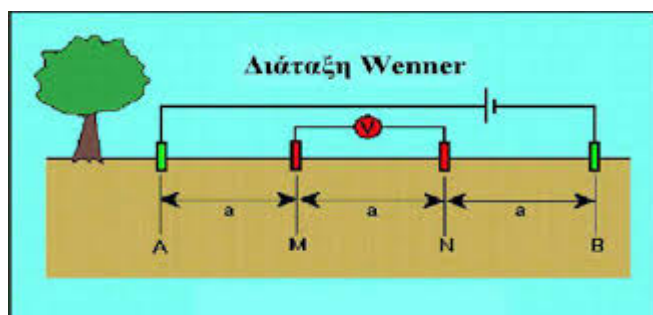
Εξαιτίας της ανομοιογένειας της Γης είναι δύσκολο να υπολογιστεί η πραγματική ειδική αντίσταση οπότε απαιτούνται πιο σύνθετες μέθοδοι για τον καθορισμό της κατανομής της ειδικής αντίστασης μέσα στη Γη. Τέτοιες μέθοδοι επιτυγχάνονται με διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού που υπολογίζουν τη φαινόμενη ειδική αντίσταση ρ_a .

Οι πιο γνωστές διατάξεις είναι η «διάταξη Wenner», η διάταξη «Schlumberger», η «διάταξη διπόλου-διπόλου» και η «διάταξη πόλου-διπόλου».

Διάταξη Wenner : Κατά τη διάταξη αυτή, η απόσταση των ηλεκτροδίων είναι $AM=MN=NB=a$ και τοποθετούνται συμμετρικά σε μια ορισμένη γραμμή. Κατά την **ηλεκτρική βυθοσκόπηση** (κατακόρυφη ηλεκτρική διασκόπηση), τα ηλεκτρόδια αναπτύσσονται συμμετρικά ως προς ένα κέντρο με αύξηση της a κάθε φορά ενώ κατά την **ηλεκτρική χαρτογράφηση** (οριζόντια ηλεκτρική διασκόπηση) η απόσταση a παραμένει σταθερή και τα ηλεκτρόδια κινούνται κατά μήκος ορισμένης τομής. Η διάταξη Wenner εμφανίζει πολύ καλή κατακόρυφη ανάλυση αλλά υστερεί σε αυτή των πλευρικών μεταβολών αντίστασης. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I}$$

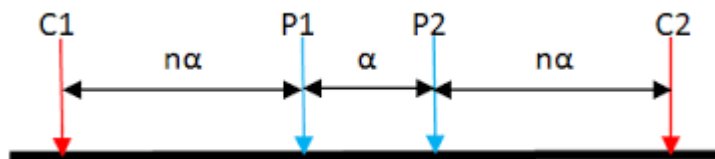
Όπου ο γεωμετρικός συντελεστής είναι $K=2\pi a$.



Σχήμα 2.2 : Αναπαράσταση διάταξης ηλεκτροδίων Wenner

Διάταξη «Schlumberger»: Κατά τη διάταξη αυτή τα ηλεκτρόδια δυναμικού M,N τοποθετούνται σε πολύ μικρότερη απόσταση από αυτή των ηλεκτροδίων ρεύματος A,B. Αν η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος AB είναι 2L τότε η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού MN είναι 2l και ισχύει $L \gg l$. Στην περίπτωση αυτή η φαινόμενη ειδική αντίσταση είναι :

$$\rho_a = \pi L^2 / 2l \times \Delta V / I$$



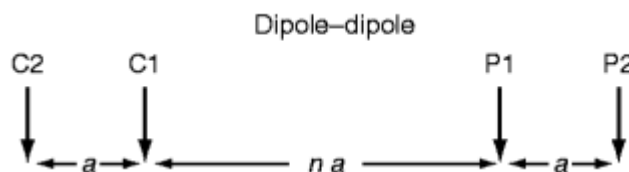
Σχήμα 2.3 : Αναπαράσταση διάταξης ηλεκτροδίων Schlumberger

Η διάταξη Schlumberger εφαρμόζεται περισσότερο από τις υπόλοιπες διατάξεις διότι απαιτείται η μεταβολή της απόστασης μόνο των δυο ηλεκτροδίων κατά τη γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση με καλύτερα αποτελέσματα στις γεωλογικές πλευρικές ασυνέχειες.

Διάταξη διπόλου-διπόλου : Στη συγκεκριμένη διάταξη τα ηλεκτρόδια ρεύματος είναι τοποθετημένα σε απόσταση $AB=a$ καθώς και τα ηλεκτρόδια δυναμικού σε απόσταση $MN=a$ ενώ μεταξύ τους απέχουν μια απόσταση $BM=na$ ($n \gg a$). Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_A = \frac{V}{I} \pi a n (n + 1)(n + 2).$$

Η διάταξη αυτή έχει σχετικά αδύναμο σήμα αλλά παρουσιάζει πολύ καλή διακριτική ικανότητα στις πλευρικές μεταβολές της αντίστασης.

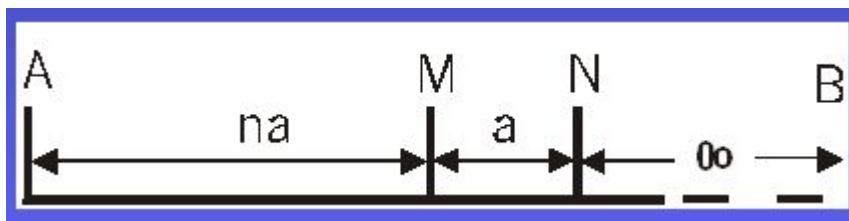


Σχήμα 2.4 : Αναπαράσταση διάταξης διπόλου-διπόλου

Διάταξη πόλου-διπόλου: Τα ηλεκτρόδια δυναμικού βρίσκονται μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος αλλά ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος, είναι τοποθετημένο σε απόσταση πολύ μεγαλύτερη από τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από το τύπο:

$$\rho_0 = \frac{V_{MN}}{I} [2\pi n(n+1)a]$$

Το αποτέλεσμα είναι η διάταξη να έχει μέτριο σήμα αλλά να παρουσιάζει πολύ καλή διακριτική ικανότητα στον εντοπισμό τόσο των πλευρικών όσο και των κατακόρυφων μεταβολών της αντίστασης.



Σχήμα 2.5 : Αναπαράσταση διάταξης πόλου-διπόλου



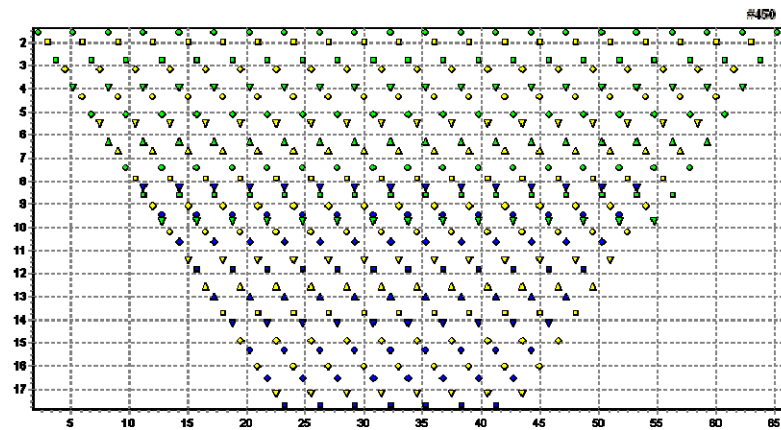
Σχήμα 2.6 : Διαμορφώσεις διάταξης πόλου- διπόλου

2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Η ηλεκτρική τομογραφία (sounding and profiling), η βυθοσκόπηση (sounding) και η όδευση (profiling) αποτελούν τις συνηθέστερες μεθόδους των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης. Γενικότερα, η ηλεκτρική τομογραφία (HT) περιγράφει έναν τύπο μετρήσεων φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Κατά αυτό τον τρόπο μπορεί να θεωρηθεί ότι συνδυάζει ταυτόχρονα δυο από τις βασικές τεχνικές μέτρησης : την όδευση και τη βυθοσκόπηση. Ειδικότερα, η ηλεκτρική τομογραφία απεικονίζει επαναλαμβανόμενες βυθοσκοπήσεις κατά μήκος μιας ορισμένης γραμμής ή μία σειρά από οδεύσεις με διαδοχικά αυξανόμενες αποστάσεις ηλεκτροδίων σε συγκεκριμένη περιοχή έρευνας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη λήψη ενός μεγάλου φορτίου πληροφοριών και μετρήσεων που τη διακρίνει και από τις υπόλοιπες τεχνικές, τόσο για την κατακόρυφη όσο και για την οριζόντια μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με στόχο την πλήρη περιγραφή της «εικόνας» του υπεδάφους της περιοχής μελέτης.

Παράλληλα, λόγω του μεγάλου φορτίου πληροφορίας , οι μετρήσεις δεν μπορούν να ληφθούν με χειροκίνητη αλλαγή των ηλεκτροδίων αλλά μόνο με αυτοματοποιημένα συστήματα πολυπλεκτών. Πλέον χάρη στην εξέλιξη της πληροφορικής έχουν αναπτυχθεί αυτοματοποιημένοι αλγόριθμοι ερμηνείας των μετρήσεων που ενισχύουν τη διακριτική ικανότητα της μεθόδου.

Η ηλεκτρική αντίσταση αποτυπώνεται είτε σε δισδιάστατη είτε σε τρισδιάστατη μορφή. Τα δεδομένα που λαμβάνονται, έχουν την μορφή ψευδοτομής που αντιπροσωπεύει τις τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Η διαδικασία της ψευδοτομής μπορεί να εφαρμοστεί με διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων. Στη συνέχεια οι τιμές της θα υποστούν αντιστροφή δεδομένων για να αποδοθούν οι πραγματικές τιμές ειδικής αντίστασης.



Σχήμα 2.7: Κατανομή μετρήσεων στην τομογραφία βάσει του σχεδιασμού λήψης μετρήσεων από τον αυτόματο πολυπλέκτη (διάταξη Πόλου-Διπόλου).



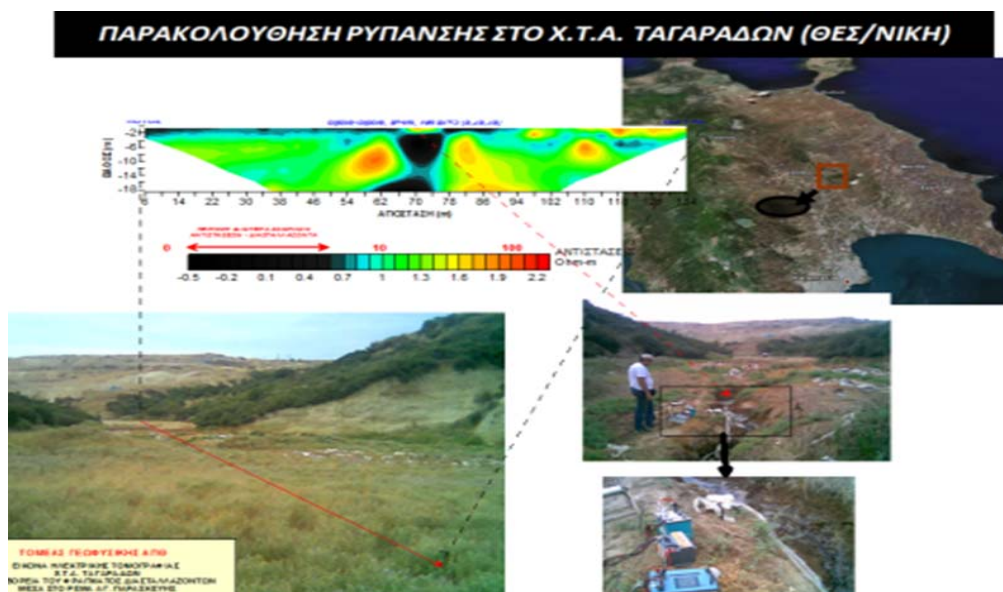
Σχήμα 2.8 : Πολυκάναλο σύστημα λήψης μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας

4. ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΧΥΤΑ

Οι ηλεκτρικές και οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι και κυρίως η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι ευρύτατα γνωστές σε έρευνες που αφορούν χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων εξαιτίας της υψηλής διακριτικής ικανότητάς τους. Χρησιμοποιούνται πολύ συχνά για περιβαλλοντικούς σκοπούς είτε σε ανενεργούς είτε σε σύγχρονους χώρους ταφής (ύπαρξη γεωμεμβράνης) με σκοπό την καλύτερη αποτύπωση της δομής τους, καθώς μέσω αυτών των μεθόδων είναι δυνατό να εντοπιστεί ρύπανση από τυχόν εκροές ή ύπαρξη διάχυσης εκκριμάτων σε βαθύτερα στρώματα που οδηγούν στον έμμεσο προσδιορισμό πιθανών περιοχών διαρροών. Αυτό γίνεται αντιληπτό χάρη στην μικρή ειδική ηλεκτρική αντίσταση που εμφανίζουν τα στραγγίσματα (μεγάλη αγωγιμότητα).

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας έχει αποδειχθεί η πλέον κατάλληλη μέθοδος για τους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων είτε για την εύρεση κατάλληλης θέσης είτε για τον έλεγχο της κατάστασης του υπεδάφους του χώρου λειτουργίας. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας με σκοπό τον εντοπισμό της ύπαρξης διασταλαζόντων σε βαθύτερα γεωλογικά στρώματα κάτω που προϋποθέτει την απεικόνιση χαμηλών ηλεκτρικών αντιστάσεων.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα στον Ελληνικό χώρο είναι η γεωηλεκτρική τομή στο ρέμα της Αγίας Παρασκευής στους Ταγαράδες Θεσσαλονίκης μετά από τη μεγάλη διαρροή στραγγισμάτων το 2006 (Βαργεμέζης και Τσούρλος, 2006). Παρατηρείται η διείσδυση των διασταλαζόντων (μαύρο χρώμα που αντιστοιχεί σε πολύ μικρές αντιστάσεις) σε βαθύτερα στρώματα (65-75 μ της τομής).



Σχήμα 3.1 : Γεωηλεκτρική τομή όπου παρατηρείται η διείσδυση των διασταλαζόντων σε βαθύτερα στρώματα (65-75 μ της τομής).



Σχήμα 3.2: Διαδικασία γεωφυσικών μετρήσεων κατά μήκος κοίτης ποταμού



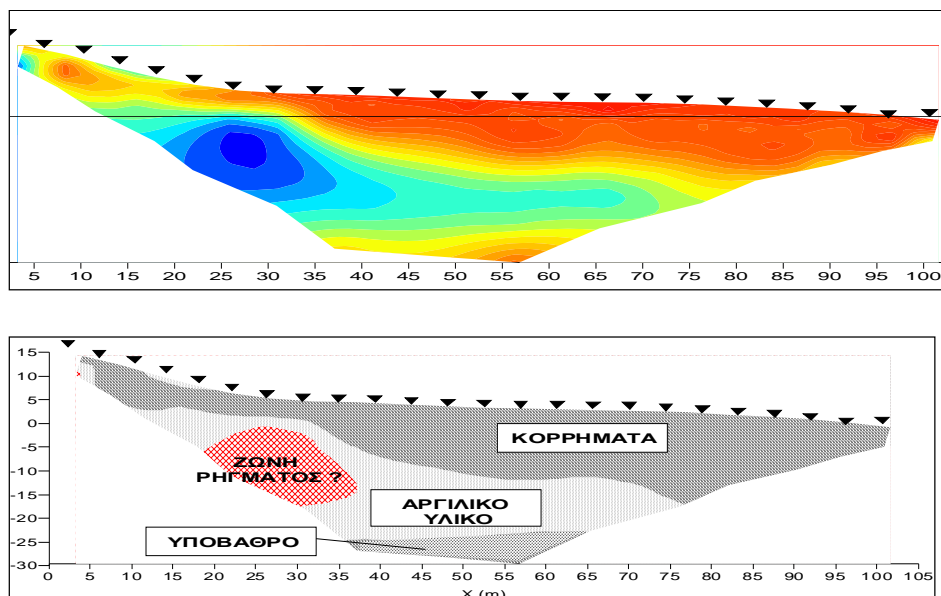
Σχήμα 3.3 : Ηλεκτρική τομογραφία κατά μήκος της κοίτης και έλεγχος αποτελεσμάτων

3.1 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Οι μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας δεν αναπαριστούν την πραγματική εικόνα των ηλεκτρικών αντιστάσεων του υπεδάφους οπότε είναι αναπόφευκτο να υποστούν μια ειδική, πολύπλοκη μαθηματικά επεξεργασία που ονομάζεται αντιστροφή. Η μέθοδος της αντιστροφής χρησιμοποιείται για να προσεγγίσει ένα μοντέλο αντίστασης που οι τιμές του να συγχέονται όσο το δυνατό περισσότερο με τις πραγματικές τιμές. Στην παρούσα εργασία, η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι ένας αλγόριθμος πεπερασμένων στοιχείων που λύνει τις διαφορικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος σε ανομοιογενή γη. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η αντιστροφή μπορεί να απεικονιστεί σε δισδιάστατη ερμηνεία, γεγονός που επικρατεί και στη συγκεκριμένη έρευνα ή σε τρισδιάστατη.

Για την εφαρμογή της μεθόδου αντιστροφής κρίνεται απαραίτητη η συσχέτιση των μετρούμενων τιμών με τις επιθυμητές τιμές μέσω μίας συνάρτησης. Με σκοπό τον προσδιορισμό της συνάρτησης χρησιμοποιείται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων και κάποιων σταθερών παραμέτρων. Γενικότερα, οι αλγόριθμοι αντιστροφής είναι μια αυτοματοποιημένη επαναληπτική διαδικασία.

Με βάση το μοντέλο υπολογίζονται τα αρχικά συνθετικά δεδομένα και κατόπιν συγκρίνονται με τα πραγματικά δεδομένα για την καλύτερη προσέγγιση τους. Το τελικό μοντέλο αντίστασης προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική κατανομή των γεωηλεκτρικών αντιστάσεων και στη συνέχεια πραγματοποιείται ερμηνεία των αντιστάσεων που εκπίπτει στην παρουσία αντίστοιχων λιθολογικών και τεκτονικών δομών του υπεδάφους.



Σχήμα 3.4 : Παράδειγμα γεωλογικής τομής (κάτω) που προκύπτει από την ερμηνεία αποτελεσμάτων αντιστροφής δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας (πάνω).

3.2 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

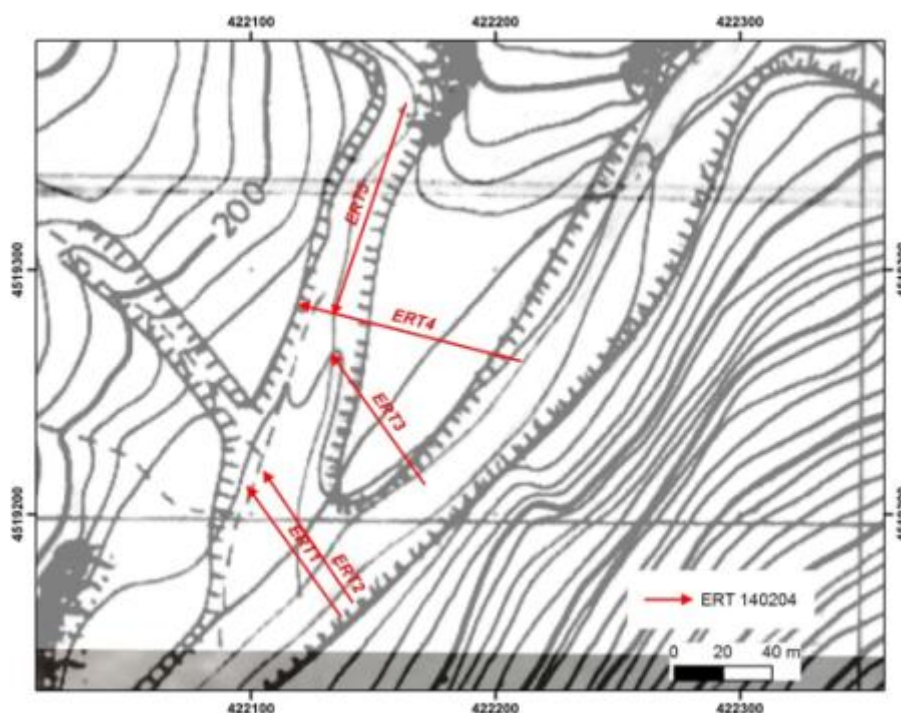
Με δεδομένο ότι ενδέχεται το ρέμα που εκρέει από τον ΧΥΓΑ στην ένωση του με τον Μπογδάνα να επιβαρύνει τον τυχόν υπόγειο υδροφορέα εξετάστηκε η περιοχή με γεωφυσικές μεθόδους έτσι ώστε να διαπιστωθεί η όποια ρύπανση.

Στο σημείο της ανάμειξης των δυο ρεμάτων εκτελέστηκαν το Νοέμβριο του 2015 ηλεκτρικές τομογραφίες ώστε να διερευνηθεί το υπέδαφος στην περιοχή της ανάμειξης και να διερευνηθεί η σε βάθος έκταση της ζώνης αυτής ανάμειξης.

Συνολικά μετρήθηκαν τέσσερις (4) ηλεκτρικές τομογραφίες με αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων 3 ή 4μ. Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη μέτρησης διπόλου-διπόλου, η οποία χαρακτηρίζεται από άριστη διακριτική ικανότητα τόσο στις πλευρικές όσο και στις κατακόρυφες μεταβολές Η θέση των τομογραφιών παρουσιάζεται στο Σχ. 3.5.

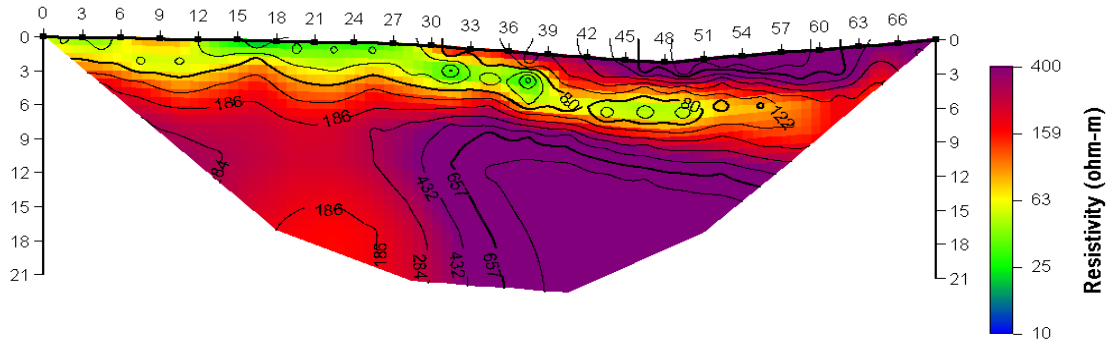
Τα δεδομένα υπέστησαν επεξεργασία με τη διαδικασία της αντιστροφής και οι επεξεργασμένες ηλεκτρικές εικόνες παρουσιάζονται παρακάτω για κάθε τομή ξεχωριστά.

Στις τομές που παρουσιάζονται αποτυπώνονται τα πραγματικά βάθη και οι πραγματικές υπεδάφειες αντιστάσεις οι οποίες και παρουσιάζονται με χρωματική κλίμακα «ουρανού τόξου» με τα ψυχρά χρώματα (μπλε) να αντιστοιχούν σε χαμηλές αντιστάσεις (π.χ. διασταλλάζοντα, άργιλοι, νερό) και θερμά χρώματα (κόκκινα) να αντιστοιχούν σε σχετικά υψηλές αντιστάσεις (π.χ. γνεύσιος).



Σχήμα 3.5 : Θέση των τομογραφιών PEMA 1-5

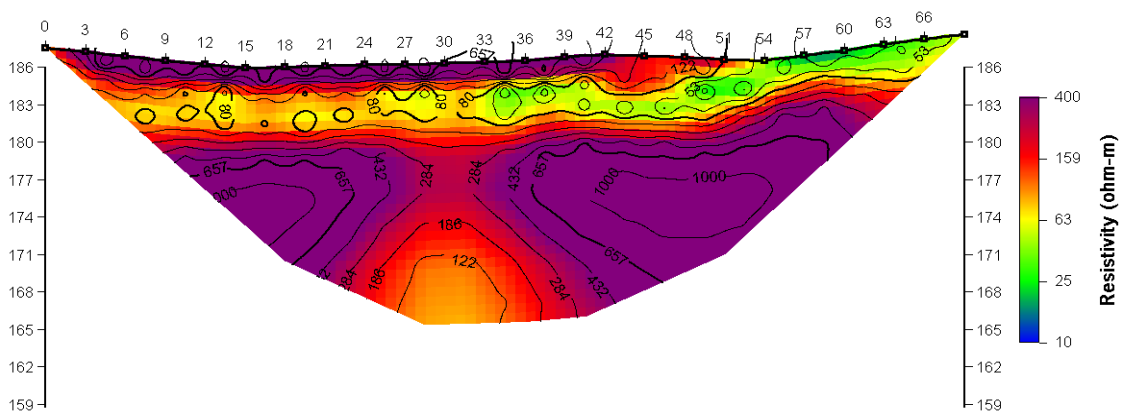
Τομή R1



Σχήμα 3.6: Εικόνα ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους (με χρωματική κλίμακα ουράνιου τόξου) που προέκυψε από την αντιστροφή των μετρήσεων για τη τομογραφία R1

Στη τομή R1 τα σκούρα μωβ και κόκκινα χρώματα (με βάση χρωματική κλίμακα ουράνιου τόξου) αντιπροσωπεύουν το υπόβαθρο που αντιστοιχεί στο γενέσιο και εμφανίζει τις υψηλότερες αντιστάσεις. Στα 0-6 m εμφανίζεται μια λωρίδα μέτριας αντίστασης που αντιστοιχεί στα αμμώδη και αργιλικά υλικά με μέση αντίσταση 30-60 Ohm-m που υπερκείται του υποβάθρου ενώ οι υψηλές αντιστάσεις >200 Ohm-m που εμφανίζονται ξανά στα πρώτα μέτρα της τομής αντιστοιχούν στα ποτάμια αδρομερή υλικά (χαλίκια, άμμοι, κροκάλες). Δεν παρατηρούνται περιοχές χαμηλών αντιστάσεων που πιθανά να σχετίζονται με αυξημένη παρουσία διασταλαζόντων.

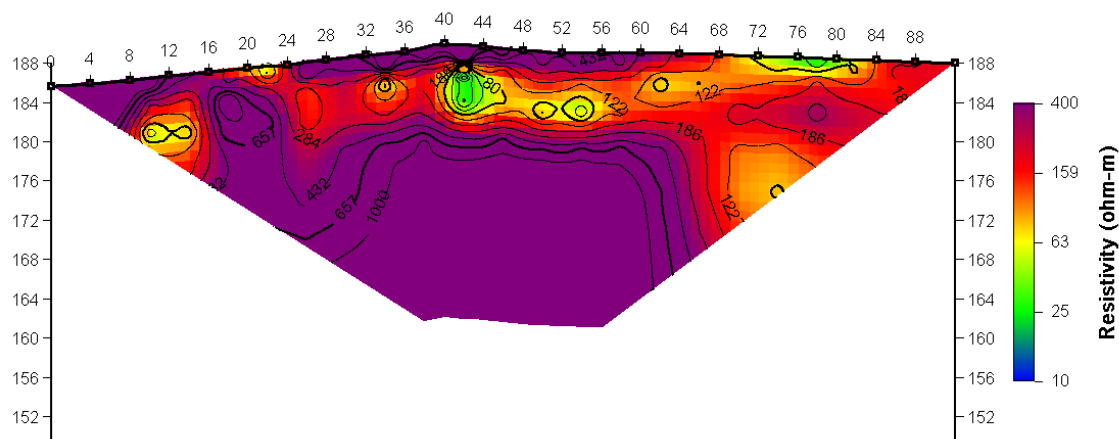
Τομή R2



Σχήμα 3.7: Εικόνα ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους (με χρωματική κλίμακα ουράνιου τόξου) που προέκυψε από την αντιστροφή των μετρήσεων για τη τομογραφία R2

Στη συγκεκριμένη τομή αποτυπώνεται με παρόμοιο τρόπο ο αντιστατικός χαρακτήρας του γενεσιακού υποβάθρου με τα μωβ και έντονα κόκκινα χρώματα (με βάση χρωματική κλίμακα ουράνιου τόξου) με τη διαφορά ότι στο κέντρο της τομής, οι αντιστάσεις παρουσιάζουν μια πτωτική τάση, γεγονός που πιθανά να σχετίζεται με την ύπαρξη κάποιας ζώνης διάρρηξης. Στα πρώτα 2-3 μέτρα βάθους και μέχρι τα 50 μέτρα της τομής εμφανίζεται στρώμα μεγάλης αντίστασης που αντιστοιχεί σε αδρόκοκκα ποτάμια ιζήματα το οποίο και υπέρκειται στρώματος αμμούχων και αργιλικών υλικών με μέση αντίσταση 30-60 Ohm-m που έρχεται σε οριζόντια επαφή με τον γενεύσιο σε βάθος 5-6 μέτρων από την επιφάνεια.

Τομή R3

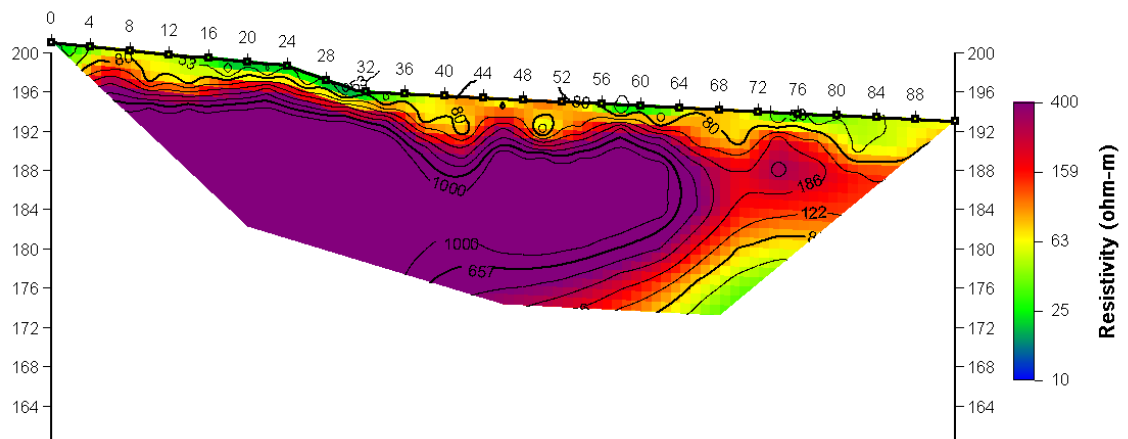


Σχήμα 3.8: Εικόνα ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους (με χρωματική κλίμακα ουράνιου τόξου) που προέκυψε από την αντιστροφή των μετρήσεων για τη τομογραφία R3

Στην παρούσα τομή για μια ακόμα φορά τα σκούρα μωβ και κόκκινα χρώματα (με βάση χρωματική κλίμακα ουράνιου τόξου) αναπαριστούν το υπόβαθρο που αντιστοιχεί στο γενεύσιο και εμφανίζει τις υψηλότερες αντιστάσεις >250 Ohm-m. Μέχρι και τα 65 μέτρα της τομής εμφανίζεται λεπτό στρώμα (πάχος 2-3μ) μεγάλης αντίστασης που αντιστοιχεί σε αδρόκοκκα ποτάμια ιζήματα. Αυτό ακολουθείται από το στρώμα των αμμούχων και αργιλικών υλικών μέχρι το βάθος των περίπου 10 μέτρων. Και πάλι δεν εμφανίζονται περιοχές με πολύ χαμηλές αντιστάσεις γεγονός που ενισχύει την

υπόθεση ότι το ρέμα απορρέει στον ποταμό και δεν κατεισδύει στο σχηματισμό του γνευσίου.

Τομή R4



Σχήμα 3.9: Εικόνα ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους (με χρωματική κλίμακα ουράνιου τόξου) που προέκυψε από την αντιστροφή των μετρήσεων για τη τομογραφία R4

Στη τομή R4 παριστάνεται ξεκάθαρα το υπόβαθρο που αντιστοιχεί στο γνεύσιο και εμφανίζει τις υψηλότερες αντιστάσεις >200 Ohm με τα σκούρα μωβ και κόκκινα χρώματα (με βάση χρωματική κλίμακα ουράνιου τόξου) Στα πρώτα 5m εμφανίζεται μια επιμήκης λωρίδα μέτριας αντίστασης που αντιστοιχεί στα αμμούχα και αργιλικά υλικά με μέση αντίσταση 30-60 Ohm η οποία εξαπλώνεται και στο μεγαλύτερο κομμάτι του δεξιού τμήματος της τομής. Και πάλι το ρέμα φαίνεται να απορρέει κατευθείαν στον ποταμό Μπογδάνα αφού και σε αυτή τη τομή δεν διακρίνεται πουθενά περιοχή χαμηλών αντιστάσεων.

5.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε όλες τις τομές που παρουσιάστηκαν παραπάνω παρατηρείται μια παρόμοια δομή απεικόνισης των ηλεκτρικών αντιστάσεων με βάση τις ηλεκτρικές τομογραφίες. Ουσιαστικά οι τομές αντικατοπτρίζουν τη ξεκάθαρη παρουσία του υποβάθρου με τις υψηλότερες αντιστάσεις που αγγίζουν τα 300 Ohm, ένα στρώμα μέτριας αντίστασης 30-60 Ohm και μέσο πάχος 5μ που οφείλεται στην παρουσία αμμούχων και αργιλικών υλικών. Επιφανειακά στις περισσότερες τομές παρατηρείται ένα στρώμα υψηλής αντίστασης, μέσου πάχους 3μ, το οποίο αντιστοιχεί σε αδρομερή ποτάμια υλικά (χαλίκια, άμμος, κροκάλες).

Συγκρίνοντας τις τομές που λήφθηκαν το Νοέμβριο 2015 από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή μελέτης, διαφαίνεται ξεκάθαρα η μη παρουσία χαμηλών αντιστάσεων και συνεπώς διασταλαζόντων στα βαθύτερα στρώματα του γεωλογικού υποβάθρου.

Επομένως το νερό του ρέματος αναμειγνύεται απευθείας με το νερό του Μπογδάνα οπότε τα ύδατα του ΧΥΤΑ δεν φαίνεται από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις να επηρεάζουν το υπέδαφος στο σημείο συνένωσης του ρέματος με τον Μπογδάνα.

Τα παραπάνω συμπεράσματα που βασίζονται στις γεωφυσικές μετρήσεις χρειάζεται να επιβεβαιωθούν με γεωτρητικά δεδομένα και χημικές αναλύσεις σχετικών δειγμάτων. Επίσης η συστηματική επανάληψη των γεωφυσικών μετρήσεων στις ίδιες θέσεις θα μπορούσε να συμβάλει στην παρακολούθηση τυχόν φαινομένων ρύπανσης στην περιοχή μελέτης.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βαργεμέζης Γ., Τσούρλος, Π, 2006. Διερεύνηση Γεωλογικών Συνθηκών Περιοχής Νότια Του Χ.Υ.Τ.Α. Ταγαράδων Με Εφαρμογή Γεωηλεκτρικών Τομογραφιών. Έκθεση ΑΠΘ.
- Παπαζάχος Β.Κ. (1986). Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Μουντράκης Δ.Μ (2010) Γεωλογία και Γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, UNIVERSITY STUDIO PRESS, Θεσσαλονίκη.
- Athanasiou, E., Tsourlos P., Papazachos C and Tsokas G., 2006. Combined weighted inversion of electrical resistivity data arising from different array types”, J. Appl. Geophys., vol. 62, issue 2, pp 124-140.
- Bernstone C, Dahlin T, Ohlsson T, Hogland W, 2000. DC-resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excitation surveys. Environ Geol 39:3–4
- Binley, A.; Daily, W. 2003. The performance of electrical methods for assessing the integrity of geomembrane liners in landfill caps and waste storage ponds. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Vol. 8, No. 4, 2003, p. 227-237.
- Carpenter PJ, Calkin SF, Kaufmann RS (1991) Assessing a fractured landfill cover using electrical resistivity and seismic refraction techniques. Geophysics 56(11):1896–1904
- Constable, S. C., R. L. Parker, and C. G. Constable (1987). Occam’s inversion - A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, Geophysics, 52 (03), 289–300.
- Loke M.H. 2004. Res2Dinv: 2D Resistivity and IP inversion Software.
- Parra, J. O., and Owen, T. E., 1988, Model studies of electrical leak detection surveys in geomembrane-lined impoundments: Geophysics, 53, 1453-1458.

- Tsourlos P. and Ogilvy R. (1998). An algorithm for the 3-D Inversion of Tomographic Resistivity and Induced Polarisation data: Preliminary Results. Journal of the Balkan Geophysical Society, 2, 30-45.
- Yi M-J and Kim J-H, 2010. Dc3Dpro - 2D Inversion of ERT data. User's Manual, KIGAM, KOREA