



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**« Γεωφυσική έρευνα στην κοιλάδα του Θορικού, για τον εντοπισμό της  
στρωματογραφίας και του μετώπου της υφαλμύρισης »**



**Βλασσοπούλου Αγγελική**

**Σταθοπούλου Κατερίνα**

**ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Γ. ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ,**

**ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π**

**Αθήνα, Ιούλιος 2014**

## Εξεταστική Επιτροπή

**Δρ Αποστολόπουλος Γεώργιος**  
(Επιβλέπων)

Επίκουρος Καθηγητής Τομέα Μεταλλευτικής  
Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

**Δρ Καλλιώρας Ανδρέας**

Λέκτορας Τομέα Γεωλογικών Επιστημών  
Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

**Δρ Μενεγάκη Μαρία**

Επίκουρη Καθηγήτρια Τομέα Μεταλλευτικής  
Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

## Ευχαριστίες

Τη βαθύτατη και ειλικρινή ευγνωμοσύνη μας θέλουμε να εκφράσουμε στους ανθρώπους αυτούς που στάθηκαν δίπλα μας και βοήθησαν, ο καθένας με τον τρόπο του, την προσπάθειά μας. Ευχαριστούμε ιδιαίτερα :

Τον κ. Αποστολόπουλο Γεώργιο, Επίκουρο Καθηγητή του Τομέα Μεταλλευτικής και υπεύθυνο καθηγητή της παρούσας διπλωματικής. Η εμπιστόσυνη που μας έδειξε με την ανάθεση του θέματος, η καθοδήγησή του, αλλά και η συνολικότερη στηριξή του στη συνεργασία μας αυτή, αποτέλεσε για εμάς κίνητρο ενασχόλησης με τη Γεωφυσική επιστήμη και τροφοδότησε τη διάθεση μας για δουλειά, στην απαισιόδοξη περίοδο που διανύουμε.

Τον κ. Αμολοχίτη Γεώργιο, Γεωφυσικό και μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. του τομέα Μεταλλευτικής, για τη συνολική βοήθειά του στην πραγματοποίηση της διπλωματικής. Η δωρική και αντικειμενική του ματιά, μας βοήθησε στην επίλυση πολλών ερωτημάτων.

Τον κ. Λοΐζο Φωκίων, συμφοιτητή και φίλο μας, για την ανιδιοτελή βοήθειά του σε όλη τη διαδικασία των μετρήσεων και για τα ωραία φοιτητικά χρόνια που περάσαμε παρέα.

Τον κ. Καλλιώρα, Λέκτορα του Τομέα Γεωλογικών Επιστημών, για τη βοήθειά του στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων, τη συνεργασία του και την ευχάριστη διάθεση που μας μετέδιδε μέσα από την αγάπη του για το αντικείμενό του.

Τον κ. Παυλόπουλο Κοσμά, Καθηγητή του Πανεπιστημίου Paris Sorbonne στο Abu Dhabi, για την πολύτιμη συμβολή του στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Τον κ. Μιχαλόπουλο Κωνσταντίνο, συμφοιτητή μας, για τη βοήθειά του στη διαδικασία των μετρήσεων.

Τον κ. Πουλιάρη Χρήστο, Διδακτορικό του Πανεπιστημίου Darmstadt του τμήματος Εφαρμοσμένης Υδρογεωλογίας, για την αρωγή του στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Την κ.α. Μάρθα Περδικάκη, συμφοιτήτρια με διπλωματική εργασία στο αντικείμενο της Υδρογεωλογίας του Τομέα Γεωλογικών επιστημών της σχολής μας, για τη συνεργασία της στο αντίστοιχο κομμάτι της διπλωματικής μας.

Τους γονείς μας, τα αδέρφια και φίλους μας για τη στήριξη των επιλογών μας.

Τέλος, θέλουμε να ευχαριστήσουμε η μία την άλλη, για την άψογη συνεργασία μας για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής, την αμοιβαία εμπιστοσύνη και την ανάπτυξη της φιλίας μας που ευχόμαστε να αντέξει στο χρόνο. Ελπίζουμε να μας δοθεί η ευκαιρία για μελλοντικές συνεργασίες.

*Αγγελική Βλασσοπούλου – Κατερίνα Σταθοπούλου*

*Ιούλιος 2014*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων στην κοιλάδα του Θορικού στο Λαύριο Αττικής, με σκοπό τον εντοπισμό του μετώπου της υφαλμύρισης αλλά και της ευρύτερης στρωματογραφίας της περιοχής. Οι γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την έρευνα, είναι η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας, και η εφαρμογή γεωηλεκτρικής τομογραφίας με τη μέθοδο της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης και της επαγόμενης πόλωσης.

Η δομή της διπλωματικής εργασίας, αποτελείται από πέντε κεφάλαια, τα οποία περιλαμβάνουν τα εξής:

Το πρώτο κεφάλαιο εισάγει τον αναγνώστη στο αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Σε αυτό αναλύεται το πρόβλημα, το οποίο καλείται να επιλύσει ο μηχανικός μέσω της εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων.

Το δεύτερο κεφάλαιο, αναφέρεται στις βασικές θεωρητικές αρχές των μεθόδων που εφαρμόστηκαν στη συγκεκριμένη έρευνα, δηλαδή της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου και της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης με γεωηλεκτρική τομογραφία. Επιπλέον, παρουσιάζεται και η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης, που εφαρμόστηκε στο πλαίσιο της έρευνας αυτής, τα αποτελέσματα της οποίας, όμως, δεν φάνηκαν χρήσιμα στην παρούσα μελέτη και γι αυτό το λόγο δεν παρουσιάζονται στο σχετικό κεφάλαιο. Αναπτύσσονται οι βασικές έννοιες κάθε μεθόδου και γίνεται αναφορά στα όργανα, στην ευρύτερη διαδικασία λήψης των μετρήσεων, αλλά και στις μεθόδους ερμηνείας αυτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παραθέτονται παγκόσμιες εφαρμογές γεωφυσικής έρευνας, που έχουν γίνει με στόχο τον εντοπισμό κάποιου είδους μόλυνσης του υπεδάφους αλλά και στρωματογραφίας, με χρήση ηλεκτρομαγνητικού οργάνου ή και εφαρμογή γεωηλεκτρικής τομογραφίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας, παρουσιάζεται η διερευνητική εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, με χρήση ρυμουλκούμενου οχήματος για τη μεταφορά του ηλεκτρομαγνητικού οργάνου, στο χώρο της Πολυτεχνειούπολης, στην περιοχή του Ζωγράφου. Στόχος, ήταν η εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου για την κάλυψη

μεγάλων εκτάσεων. Παραθέτονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, καθώς και η ερμηνεία των χαρτών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας, για τα δύο βάθη διασκόπησης (3 και 6 μέτρα συνολικά βάθη διασκόπησης), για τα οποία πραγματοποιήθηκε η μέθοδος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, που αποτελεί και τον κύριο όγκο της εργασίας μας, γίνεται η παρουσίαση της γεωφυσικής έρευνας που έλαβε χώρα στην περιοχή του Θορικού. Αρχικά, παρουσιάζονται τα αρχαιολογικά στοιχεία της περιοχής έρευνας, καθώς αποτελεί περιοχή έντονου αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Έπειτα, παρουσιάζεται η ευρύτερη γεωλογία και υδρογεωλογία της περιοχής, βάσει των οποίων στη συνέχεια, γίνεται η ερμηνεία των γεωφυσικών αποτελεσμάτων. Στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου, περιγράφονται οι διαδικασίες εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων στην περιοχή της έρευνας και αναφέρονται τα χαρακτηριστικά των οργάνων και των διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η επεξεργασία των μετρήσεων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Από τα ηλεκτρομαγνητικά δεδομένα, δημιουργούνται χάρτες φαινόμενης αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας για συνολικά βάθη διασκόπησης 3 και 6 μέτρων. Από αυτούς τους χάρτες, προκύπτουν τα πρώτα αναγνωριστικά συμπεράσματα για την ύπαρξη του φαινομένου της υφαλμύρισης, και της περιοχής που αυτή εντοπίζεται. Στην αμέσως επόμενη ενότητα, ακολουθούν τα αποτελέσματα της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, όπου εντοπίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια και σε μεγαλύτερο βάθος οι δομές του υπεδάφους στις οποίες «φιλοξενείται» υφάλμυρο νερό, καθώς επίσης παρουσιάζεται αναλυτικά η στρωματογραφία της περιοχής. Τέλος, αναφέρονται τα γενικά συμπεράσματα που αφορούν συνδυαστικά και τις δύο μεθόδους που εφαρμόστηκαν και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτές. Συνολικά, εκτιμάται η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων για τον εντοπισμό επηρεασμένων από το φαινόμενο της υφαλμύρισης περιοχών, και για τον προσδιορισμό της ευρύτερης στρωματογραφίας μιας περιοχής.

## **ABSTRACT**

The subject of this thesis is the application of geophysical methods in the valley of Thoricos, in Laurio, Attiki, in order to identify the salinization front and the stratigraphy of this region. The methods that were used for the geophysical research, is the electromagnetic method measuring the electrical conductivity and the magnetic susceptibility, and the geoelectrical tomography measuring the electrical resistivity and the induced polarization measuring the chargeability.

The structure of this thesis consists of five chapters:

The first chapter introduces the reader to the main subject of this thesis. In this chapter the problem that the engineer seeks to solve is presented through the application of geophysical methods.

The second chapter, refers to the theoretical principles of the applied geophysical methods of this survey, those of the electromagnetic method and the electrical resistivity method, namely geoelectrical tomography. Furthermore, the induced polarization method is presented, also applied in this survey. The results of this method did not give a useful outcome for the aim of the survey, and for this reason they are not presented in the relevant chapter. Also, the basic principles for each geophysical method are presented, the instruments that were used, the whole procedure that took place during the measurements and finally the interpretation of these methods.

In the third chapter, many international geophysical applications are presented, whose aim was the identification of salinization and also the subsurface stratigraphy using the electromagnetic method or the method of geoelectrical tomography.

In the fourth chapter, a trial application of the electromagnetic method with the CMD2 and CMD4 GF instruments mounted to a cart and trailed by a car is presented, in the campus of National Technical University of Athens, in Zografos city. The aim of that approach of measurements was the quick coverage of large areas. The results of the measurements are presented and also the interpretation. The resulting maps of the electrical conductivity and the magnetic susceptibility for both of the two effective depth ranges (3meters and 6 meters) are presented and interpreted.

In the fifth chapter, which constitutes the widest part of this thesis, the geophysical survey is presented, took place in Thoricos Valley. Initially, all the archeological evidences of the study area are presented, as Thoricos constitutes an area of significant archeological interest. Then, the geology and hydrogeology of the survey area are presented, whose information will help us to conclude in a specific interpretation as far as geophysical results refer. In the following section of the same chapter, the procedures of the applied geophysical methods in the survey area are described and also the characteristics of the instruments that were used and finally the procedure followed in for the interpretation of the maps. Then, the final results of the measurements from the electromagnetic data were presented in detail with maps of apparent conductivity and of magnetic susceptibility, for both effective depths of 3 and 6 meters. These maps give the primary conclusions concerning the saline water intrusion in the underground formations. In the next section, the results of the geoelectrical tomography are presented, which identify with more detail and in bigger depth stratigraph and the formations with saline water in their karsts or in their fractions. Finally, the general conclusions are presented concerning both the geophysical methods applied for this thesis and evaluation of the final results is followed. Last but not least, the overall effectiveness of the geophysical methods to determine the stratigraphy and to identify areas that are affected by the phenomenon of seawater intrusion is analysed.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	<b>3</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>7</b>
<b>1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b> .....	<b>20</b>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>21</b>
<b>2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1 Εισαγωγή</b> .....	<b>28</b>
<b>2.2 Η Κλαστική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος</b> .....	<b>29</b>
2.2.1 Τύποι Ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων - Εφαρμογές της μεθόδου.....	29
2.2.1.1 Ηλεκτρομαγνητικά Συστήματα Μικρού Βρόγχου .....	30
2.2.2 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα .....	30
2.2.2.1 Βάθος και Ανάλυση .....	31
2.2.2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα .....	33
2.2.3 Μαγνητική Επιδεκτικότητα .....	34
2.2.3.1 Βάθος και ανάλυση.....	34
2.2.4 Αρχές της Γεωφυσικής Ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου.....	35
2.2.4.1 Βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.....	37
2.2.4.2 Συστήματα Μέτρησης Φάσης .....	38
2.2.5 Ηλεκτρομαγνητικό Όργανο Μέτρησης.....	41
<b>2.3 Ηλεκτρικές Μέθοδοι</b> .....	<b>44</b>
2.3.1 Ηλεκτρικά Δυναμικά.....	46
2.3.2 Ηλεκτρική Ειδική Αντίσταση – Νόμος του Ohm. ....	47
2.3.3 Πετρώματα και ηλεκτρική ειδική αντίσταση .....	48
2.3.4 Μέθοδος της Ηλεκτρικής Ειδικής Αντίστασης - Ηλεκτρόδιο Ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο .....	55
2.3.4.1 Δύο ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια ημιάπειρου ομογενούς χώρου.....	56
2.3.5 Φαινόμενη ειδική αντίσταση.....	57
2.3.6 Διατάξεις ηλεκτροδίων.....	58
2.3.7 Εξοπλισμός Υπαίθρου.....	60
2.3.8 Μέθοδος Δισδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας.....	63
2.3.9 Μέθοδος της Επαγόμενης Πολικότητας .....	66
2.3.9.1 Γενική Θεωρία της IP Εφαρμογής.....	67

2.3.9.2 Αρχή της μεθόδου.....	70
2.3.9.3 Μηχανισμοί επαγόμενης πολικότητας .....	71
2.3.9.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την πόλωση .....	72
2.3.9.5 Τρόποι προσέγγισης του φαινομένου της επαγόμενης πολικότητας.....	72
<b>3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΩΠΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ .....</b>	<b>75</b>
3.1 Campos Basin, Βραζιλία.....	76
3.2 Φαράγγι Αποκορώνου, Χανιά .....	83
3.3 Kamarooka, Αυστραλία .....	86
3.4 Abergwygregyn, Βόρεια Ουαλία, Ηνωμένο Βασίλειο .....	87
3.5. Στύλος, Χανιά .....	90
3.6 Oued Laou, Μαρόκο .....	97
3.7 Ουάσιγκτον, Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής.....	101
3.8 Shelford, Nottinghamshire, Ηνωμένο Βασίλειο .....	103
<b>4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΓΡΗΓΟΡΗ ΚΑΛΥΨΗ ΜΕΓΑΛΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΣΤΗΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥΠΟΛΗ, ΖΩΓΡΑΦΟΥ .....</b>	<b>107</b>
4.1 Εισαγωγή .....	108
4.2 Γεωλογικό υπόβαθρο .....	109
4.3 Αποτελέσματα μετρήσεων.....	112
<b>5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΟΙΛΑΔΑ ΤΟΥ ΘΟΡΙΚΟΥ.....</b>	<b>117</b>
5.1 Εισαγωγή .....	118
5.2. Ιστορία – Αρχαιολογία περιοχής Θορικού.....	121
5.3 Γεωλογία Περιοχής Έρευνας .....	129
5.3.1 Γεωλογικά Στοιχεία.....	129
5.3.2 Θέση και Μορφολογία .....	130
5.3.3 Γεωλογική δομή – λιθοστρωματογραφία.....	130

5.3.4 Γεωμορφολογική εξέλιξη .....	134
5.3.5 Κοιτασματολογικά στοιχεία – Μεταλλογένεση.....	135
5.3.6 Γεωλογικός χάρτης περιοχής Λαυρίου – Θορικού .....	137
<b>5.4. Υδρογεωλογικά στοιχεία .....</b>	<b>145</b>
<b>5.5 Γεωφυσική έρευνα .....</b>	<b>149</b>
<b>5.5.1 Εισαγωγή – Σχεδιασμός έρευνας .....</b>	<b>149</b>
<b>5.5.2 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος .....</b>	<b>151</b>
5.5.2.1 Μετρήσεις Υπαίθρου .....	151
5.5.2.2 Επεξεργασία Ηλεκτρομαγνητικών Μετρήσεων .....	152
5.5.2.3 Χάρτες συνολικού βάθους διασκόπησης 3m .....	154
5.5.2.4 Χάρτες συνολικού βάθους διασκόπησης 6m .....	158
5.5.2.5 Τελικοί χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας.....	164
<b>5.5.3 Ηλεκτρική Μέθοδος.....</b>	<b>167</b>
5.5.3.1 Επεξεργασία δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας .....	169
5.5.3.2 Τομή TR1 – Σχολιασμός Γεωηλεκτρικής Τομής .....	173
5.5.3.3 Τομή TR2 - Σχολιασμός Γεωηλεκτρικής Τομής .....	175
5.5.3.4 Τομή TR3 - Σχολιασμός Γεωηλεκτρικής Τομής .....	177
5.5.3.5 Τομή TR4 - Σχολιασμός Γεωηλεκτρικής Τομής .....	179
5.5.3.6 Τομή TR5 - Σχολιασμός Γεωηλεκτρικής Τομής .....	181
5.5.3.7 Τομή TR6 - Σχολιασμός Γεωηλεκτρικής Τομής.....	183
5.5.3.8 Τομή TR7 - Σχολιασμός Γεωηλεκτρικής Τομής .....	185
5.5.3.9 Τομή TR8 - Σχολιασμός Γεωηλεκτρικής Τομής .....	187
<b>5.5.4 Συμπεράσματα.....</b>	<b>189</b>
<b>5.5.5 Γενικός Σχολιασμός.....</b>	<b>194</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>199</b>

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>ΣΧΗΜΑ 1.1</b> : ΧΑΡΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ, ΟΠΟΥ ΦΑΙΝΕΤΑΙ Η ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΤΟΥ ΘΟΡΙΚΟΥ...	22
<b>ΣΧΗΜΑ 2.1</b> : ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ «ΕΜΙ» ΚΑΙ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΣΤΟΧΩΝ. .....	32
<b>ΣΧΗΜΑ 2.2</b> : ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΕΠΑΓΩΓΗΣ.....	36
<b>ΣΧΗΜΑ 2.3</b> : ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ Α) ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΟΥΣ ΜΟΡΦΗΣ Β) ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΦΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΓΩΝΙΑΣ ΦΑΣΗΣ Θ.....	38
<b>ΣΧΗΜΑ 2.4</b> : ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΦΑΣΗΣ ΔΙΔΥΜΟΥ ΠΗΝΙΟΥ.....	40
<b>ΣΧΗΜΑ 2.5</b> : ΧΕΙΡΙΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ CMD4.....	43
<b>ΣΧΗΜΑ 2.6</b> : ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ CMD2, CMD4.....	44
<b>ΣΧΗΜΑ 2.7</b> : ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΤΟΥ ΟΗΜ (ΜΑΥΡΟΜΜΑΤΗΣ 2007).....	48
<b>ΣΧΗΜΑ 2.8</b> : ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ (STANLEY H. WARD 1990) .....	51
<b>ΣΧΗΜΑ 2.9</b> : ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΠΟΥ ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΕΝΑ ΑΡΓΙΛΙΚΟ ΤΕΜΑΧΙΔΙΟ ( STANLEY H. WARD 1990). .....	53
<b>ΣΧΗΜΑ 2.10</b> : ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ ( ΠΡΑΣΙΝΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ) ΣΕ ΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ ΜΕΣΟ ΚΑΙ ΤΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ (ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ). .....	55
<b>ΣΧΗΜΑ 2.11</b> : ΡΟΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΣΕ ΗΜΙΑΠΕΙΡΟ ΟΜΟΓΕΝΗ ΧΩΡΟ ΜΕ ΔΥΟ ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ (ΛΟΥΗΣ 2004).....	57
<b>ΣΧΗΜΑ 2.12</b> : ΔΙΑΤΑΞΗ SCHLUMBERGER (ΣΙΜΥΡΔΑΝΗΣ 2009) .....	58
<b>ΣΧΗΜΑ 2.13</b> : ΔΙΑΤΑΞΗ WENNER.....	59
<b>ΣΧΗΜΑ 2.14</b> : ΔΙΑΤΑΞΗ DIPOLE-DIPOLE .....	59
<b>ΣΧΗΜΑ 2.15</b> : ΔΙΑΤΑΞΗ POLE-POLE.....	59
<b>ΣΧΗΜΑ 2.16</b> : ΔΙΑΤΑΞΗ POLE-DIPOLE.....	60
<b>ΣΧΗΜΑ 2.17</b> : ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ .....	60

<b>ΣΧΗΜΑ 2.18:</b> ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ .....	64
<b>ΣΧΗΜΑ 2.19:</b> ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΙΣΜΕΝΟ ΣΕ BLOCKS ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.....	65
<b>ΣΧΗΜΑ 2.20:</b> ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΕΙΔΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ.....	65
<b>ΣΧΗΜΑ 2.21:</b> Α) ΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΙ Β) ΠΕΔΙΟ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗΣ (GLASER 2007).....	67
<b>ΣΧΗΜΑ 2.22 :</b> ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΣΕ ΕΝΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΗ (SEIGEL 1970).....	68
<b>ΣΧΗΜΑ 2.23:</b> ΜΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗΣ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑΣ (SEIGEL 1970).....	69
<b>ΣΧΗΜΑ 2.24 :</b> ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ.....	71
<b>ΣΧΗΜΑ 2.25:</b> ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ Α) ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ ΚΑΙ Β) ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΚΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ. ....	72
<b>ΣΧΗΜΑ 2.26 :</b> ΛΟΓΟΣ SA ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΓΙΑ Α) ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΚΑΙ Β) ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗ.....	73
<b>ΣΧΗΜΑ 2.27 :</b> ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΤΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ DIPOLE-DIPOLE. ....	74
<b>ΣΧΗΜΑ 3.1 :</b> ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ (CARRASQUILLA ET AL, 1999)	76
<b>ΣΧΗΜΑ 3.2 :</b> ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΙΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ CAMPOS (ΜΕΤΑ SCHALLER, 1973).....	77
<b>ΣΧΗΜΑΤΑ 3.3 – 3.4 – 3.5 :</b> ΧΑΡΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΕ ΠΑΛΑΙΟΤΕΡΕΣ ΕΠΟΧΕΣ, ΣΕ ΝΕΟΤΕΡΕΣ ΕΠΟΧΕΣ ΚΑΙ ΣΕ ΜΕΤΑΓΕΝΕΣΤΕΡΟΥΣ ΧΡΟΝΟΥ .....	80
<b>ΣΧΗΜΑ 3.6 :</b> ΨΕΥΔΟΤΟΜΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ- ΤΕΜ ΠΡΟΦΙΛ 1.....	82
<b>ΣΧΗΜΑ 3.7 :</b> ΨΕΥΔΟΤΟΜΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ- ΤΕΜ ΠΡΟΦΙΛ 2.....	82
<b>ΣΧΗΜΑ 3.8 :</b> Η ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΗ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ 4 ΔΙΑΚΡΙΤΟΥΣ ΧΡΟΝΟΥΣ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ (ΔΙΑΤΑΞΗ WENNER – SCHLUMBERGER).....	84

<b>ΣΧΗΜΑ 3.9</b> : ΧΑΡΤΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΜΕ ΤΟ ΤΕΤΡΑΤΡΟΧΟ ΟΧΗΜΑ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ EM-31, ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΖΕΙ ΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ.....	87
<b>ΣΧΗΜΑ 3.10</b> : ΧΑΡΤΗΣ CONTOUR EM-31 ΜΕ ΤΙΜΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ.. .....	89
<b>ΣΧΗΜΑ 3.11</b> : ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΗ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ.....	89
<b>ΣΧΗΜΑ 3.12</b> : ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΟΙ ΘΕΣΕΙΣ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ. ....	91
<b>ΣΧΗΜΑ 3.13</b> : Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΜΙΑΣ ΕΚ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ (LINE6) ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ (CAS2) ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ, ΚΑΙ ΟΙ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ, ΓΕΩΦΩΝΩΝ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ.....	92
<b>ΣΧΗΜΑ 3.14</b> : ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΗ LINE6, ΜΕ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΑ ΠΡΟΣ ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΑ. Η ΔΙΑΚΕΚΟΜΜΕΝΗ ΜΑΥΡΗ ΟΡΙΟΘΕΤΕΙ ΤΙΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΤΩΝ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ. (Α) ΔΙΑΤΑΞΗ WENNER-SCHLUMBERGER, (Β) ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΙΠΟΛΟΥ-ΔΙΠΟΛΟΥ, (C) ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ.....	95
<b>ΣΧΗΜΑ 3.15</b> : ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΟΜΗ CAS2 ΜΕ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΑ ΠΡΟΣ ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΑ. Η ΔΙΑΚΕΚΟΜΜΕΝΗ ΜΑΥΡΗ ΓΡΑΜΜΗ ΟΡΙΟΘΕΤΕΙ ΤΙΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	96
<b>ΣΧΗΜΑ 3.16</b> : ΥΠΕΡΘΕΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ CAS2, ΚΑΙ ΤΗΣ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΗΣ LINE6 (ΔΙΠΟΛΟΥ-ΔΙΠΟΛΟΥ, ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΝΟΡΜΑΣ L1). Η ΜΑΥΡΗ ΔΙΑΚΕΚΟΜΜΕΝΗ ΓΡΑΜΜΗ ΟΡΙΟΘΕΤΕΙ ΤΙΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	97
<b>ΣΧΗΜΑ 3.17</b> : ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΤΗΣ ΚΟΙΛΑΔΑΣ OUED LAOU. ....	98
<b>ΣΧΗΜΑ 3.18</b> : ΧΑΡΤΕΣ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΟΡΓΑΝΟ EM34 ΜΕ 10 HD, 20 HD, 40 HD, 40 VD .....	99
<b>ΣΧΗΜΑ 3.19</b> : ΤΟΜΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	100
<b>ΣΧΗΜΑ 3.20</b> : ΚΟΙΝΕΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΒΟΣΚΟΤΟΠΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΡΧΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ EM3.....	102
<b>ΣΧΗΜΑ 3.21</b> : EM38 (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ EM31 (ΔΕΞΙΑ) ΧΑΡΤΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ BRUNSWIC.....	103
<b>ΣΧΗΜΑ 3.22</b> : ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΣΕ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ 1M ΚΑΙ 5M ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ.....	105
<b>ΣΧΗΜΑ 3.23</b> : ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΜΙΑ ΤΟΜΗ ΝΑ - ΒΔ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	106

<b>ΣΧΗΜΑ 4.1:</b> ΧΑΡΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ, ΣΤΟ ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΥΜΗΤΤΟΥ.....	110
<b>ΣΧΗΜΑ 4.2 :</b> ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ, ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΕΝΤΟΠΙΖΕΤΑΙ Η ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥΠΟΛΗ ΖΩΓΡΑΦΟΥ, ΦΥΛΛΟ ΧΑΡΤΗ ΚΟΡΩΠΙ-ΠΛΑΚΑ.....	111
<b>ΣΧΗΜΑ 4.3 :</b> ΧΑΡΤΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ 6Μ.....	113
<b>ΣΧΗΜΑ 4.4 :</b> ΧΑΡΤΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ 3Μ. .....	113
<b>ΣΧΗΜΑ 4.5:</b> ΧΑΡΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ 6Μ.....	114
<b>ΣΧΗΜΑ 4.6:</b> ΧΑΡΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ 3Μ.....	114
<b>ΣΧΗΜΑ 4.7:</b> ΧΑΡΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ 6 ΜΕΤΡΑ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ ΤΙΜΩΝ ΜΙΚΡΟΤΕΡΕΣ ΤΩΝ 5 ΡΡΤ .....	115
<b>ΣΧΗΜΑ 4.8 :</b> ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΧΑΡΤΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ 6Μ ΣΤΟ GOOGLE EARTH.....	116
<b>ΣΧΗΜΑ 5.1:</b> ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΓΛΥΚΟΥ ΚΑΙ ΑΛΜΥΡΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΥΔΡΟΦΟΡΟ, ΟΠΟΥ ΦΑΙΝΕΤΑΙ Η ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΑΛΑΣΣΑ ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΙΣΩ ΣΤΗΝ ΘΑΛΑΣΣΑ (ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟ ΚΑΛΛΕΡΓΗ, 2000).....	119
<b>ΣΧΗΜΑ 5.2:</b> ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ( ΜΑΡΙΝΟΣ ΚΑΙ ΡΕΤΡΑΣΤΣΕΚ, 1956, ΟΠΩΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΑΠΟ ΣΤΑΜΑΤΗΣ 1999).....	134
<b>ΣΧΗΜΑ 5.3Α :</b> ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ, ΙΓΜΕ, ΦΥΛΛΟ ΧΑΡΤΗ ΚΟΡΩΠΙ-ΠΛΑΚΑ.....	137
<b>ΣΧΗΜΑ 5.3Β :</b> ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ,ΦΥΛΛΟ ΧΑΡΤΗ ΚΟΡΩΠΙ-ΠΛΑΚΑ.....	138
<b>ΣΧΗΜΑ 5.4:</b> ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΚΑΜΑΡΙΖΑ-ΛΑΥΡΙΟ.....	145
<b>ΣΧΗΜΑ 5.5 :</b> ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΚΑΙ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ. 1) ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ, 2) ΧΕΙΜΑΡΡΟΙ ΚΑΙ 3) ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	147
<b>ΣΧΗΜΑ 5.6 :</b> ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΘΟΡΙΚΟΥ (Α. ΚΑΛΛΙΩΡΑΣ, Μ.ΠΕΡΔΙΚΑΚΗ 2014).....	148

<b>ΣΧΗΜΑ 5.7:</b> ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΝΝΑΒΟΥ (GRID).....	153
<b>ΣΧΗΜΑ 5.8:</b> ΧΑΡΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ 3Μ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ.....	154
<b>ΣΧΗΜΑ 5.9:</b> ΧΑΡΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ 3Μ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ, ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΙΚΡΟΤΕΡΕΣ ΤΩΝ 10 ΡΡΤ.....	155
<b>ΣΧΗΜΑ 5.10:</b> ΧΑΡΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ 3Μ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ, ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΙΚΡΟΤΕΡΕΣ ΤΩΝ 5 ΡΡΤ.....	156
<b>ΣΧΗΜΑ 5.11:</b> ΧΑΡΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ 6Μ.....	158
<b>ΣΧΗΜΑ 5.12:</b> ΧΑΡΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ 6Μ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΙΚΡΟΤΕΡΕΣ ΤΩΝ 50 ΡΡΤ.....	159
<b>ΣΧΗΜΑ 5.13:</b> ΧΑΡΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ 6Μ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΙΚΡΟΤΕΡΕΣ ΤΩΝ 20 ΡΡΤ.....	160
<b>ΣΧΗΜΑ 5.14:</b> ΧΑΡΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ 6Μ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΙΚΡΟΤΕΡΕΣ ΤΩΝ 10 ΡΡΤ.....	161
<b>ΣΧΗΜΑ 5.15:</b> ΧΑΡΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ 6Μ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΙΚΡΟΤΕΡΕΣ ΤΩΝ 5 ΡΡΤ.....	162
<b>ΣΧΗΜΑ 5.16:</b> ΧΑΡΤΗΣ Α) ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ 6Μ, ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΙΚΡΟΤΕΡΕΣ ΤΩΝ 5 ΡΡΤ, Β) ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ 3Μ, ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΙΚΡΟΤΕΡΕΣ ΤΩΝ 5 ΡΡΤ, Γ) ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΧΑΡΤΩΝ (Α) – (Β).....	164
<b>ΣΧΗΜΑ 5.17 :</b> ΧΑΡΤΗΣ Α) ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ 6Μ, ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΙΚΡΟΤΕΡΕΣ ΤΩΝ 5 ΡΡΤ , Β) ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ 3Μ, ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΙΚΡΟΤΕΡΕΣ ΤΩΝ 5 ΡΡΤ, Γ) ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΧΑΡΤΩΝ (Α) – (Β) , ΜΕ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΣΤΟ GOOGLE EARTH.....	165
<b>ΣΧΗΜΑ 5.18 :</b> ΟΙ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΘΟΡΙΚΟΥ, ΑΠΟΤΥΠΩΜΕΝΕΣ ΣΤΟ GOOGLE EARTH.....	167



<b>ΣΧΗΜΑ 5.19:</b> ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΘΟΡΙΚΟΥ.....	172
<b>ΣΧΗΜΑ 5.20:</b> Η ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΗ TR1, ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΒΔ – ΝΑ .....	173
<b>ΣΧΗΜΑ 5.21:</b> Η ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΗ TR2 ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ Δ – Α.....	175
<b>ΣΧΗΜΑ 5.22:</b> Η ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΗ TR3 ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ Β – Ν.....	177
<b>ΣΧΗΜΑ 5.23:</b> Η ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΗ TR4 ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΒΑ – ΝΔ.....	179
<b>ΣΧΗΜΑ 5.24:</b> Η ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΗ TR5 ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΒΑ – ΝΔ .....	181
<b>ΣΧΗΜΑ 5.25:</b> Η ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΗ TR6 ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΝΑ – ΒΔ.....	183
<b>ΣΧΗΜΑ 5.26:</b> Η ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΗ TR7 ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΝΔ – ΒΑ .....	185
<b>ΣΧΗΜΑ 5.27:</b> Η ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΗ TR8 ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΒΔ – ΝΑ .....	187
<b>ΣΧΗΜΑ 5.28:</b> ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ (3D) ΤΩΝ 8 ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΗΝ ΚΟΙΛΑΔΑ ΤΟΥ ΘΟΡΙΚΟΥ.....	192
<b>ΣΧΗΜΑ 5.29 :</b> ΧΑΡΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΔΥΟ ΒΑΘΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ ΟΠΟΥ ΦΑΙΝΟΝΤΑΙ Η ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ. ....	193

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

**Πίνακας 2.1** : Ειδική ηλεκτρική αντίσταση διαφόρων υλικών ( Λούης 2004)..... 50

**Πίνακας 2.2**: Επίδραση γεωλογικών διεργασιών στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση  
(Αποστολόπουλος 2008)..... 52

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 1.1:</b> Ο Αρχαίος Ναός ή η Αρχαία Αγορά αφιερωμένη στην Δήμητρα και την Περσεφόνη. Οι συγγραφείς της διπλωματικής εργασίας με τον συνάδελφο Φωκίωνα Λοΐζο.....	24
<b>Εικόνα 1.2:</b> Η γεωφυσική ομάδα υπαίθρου από αριστερά Επικ. Καθηγητής Γ. Αποστολόπουλος, Φ.Λοΐζος, Κ.Σταθοπούλου, Α.Βλασσοπούλου και Γ.Αμολοχίτης (ΕΔΙΠ ΕΜΠ).....	24
<b>Εικόνα 1.3:</b> Το αμαξίδιο που μεταφέρει το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης CMD4 και το διαφορικό GPS τα οποία σύρονται από αυτοκίνητο μέσω πλαστικού σωλήνα 6μ στην περιοχή του Θορικού.....	25
<b>Εικόνα 1.4:</b> Μέτρηση με το διαφορικό GPS της θέσης και του υψομέτρου κάθε ηλεκτροδίου στις τομές γεωηλεκτρικής τομογραφίας.....	25
<b>Εικόνα 1.5:</b> Το κινούμενο αμαξίδιο όπου φαίνονται τα μέρη του ηλεκτρομαγνητικού οργάνου μέτρησης CMD4 και του διαφορικού GPS.....	26
<b>Εικόνα 1.6:</b> Το κινούμενο αμαξίδιο όπου φαίνονται τα μέρη του ηλεκτρομαγνητικού οργάνου μέτρησης CMD4 και του διαφορικού GPS σε δύσκολες συνθήκες στην περιοχή του Θορικού.....	26
<b>Εικόνα 2.1:</b> Syscal Pro Switch-48.....	62
<b>Εικόνα 3.1:</b> Τετράτροχο όχημα για την κάλυψη της περιοχής της έρευνας εξοπλισμένο με τα απαραίτητα όργανα μέτρησης.....	86
<b>Εικόνα 3.2:</b> Έρευνα με το GEEP, για ρυμούλκηση του οργάνου μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας EM34.....	104
<b>Εικόνα 4.1:</b> Το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης, τοποθετημένο στο αυτόσχεδίο καρότσι στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.....	109
<b>Εικόνα 5.1:</b> Το αρχαίο θέατρο του Θορικού.....	124
<b>Εικόνα 5.2:</b> Ο ναός της Δήμητρας και της Κόρης, Χαλκογραφία του J.D., Παρίσι, 1758.....	124
<b>Εικόνα 5.3:</b> Ερείπια του αρχαίου ναού της Θεάς Δήμητρας.....	125
<b>Εικόνα 5.4:</b> Η αρχαιότερη μεταλλευτική στοά της περιοχής της ΝΑ Αττικής..	125
<b>Εικόνα 5.5:</b> Αρχαίο πλυντήριο εμπλουτισμού μεταλλευμάτων στην περιοχή του Θορικού.....	126
<b>Εικόνα 5.6:</b> Διαδρομές μέτρησης με το ηλεκτρομαγνητικό όργανο EM-31, για συνολικά βάθη διασκόπησης 3 μέτρα και 6 μέτρα, αποτυπωμένες στο Google Earth.....	151
<b>Εικόνα 5.7:</b> Το τροχήλατο ρυμουλκούμενο όχημα που χρησιμοποιήθηκε για την κάλυψη μεγάλων αποστάσεων με το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης CMD4.....	151
<b>Εικόνα 5.8:</b> Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας.....	168
<b>Εικόνα 5.9 :</b> Εικόνα από το πρόγραμμα επεξεργασίας RES2DINV για την επιλογή της παραμέτρου Model Refinement.....	169
<b>Εικόνα 5.10:</b> : Εικόνα από το πρόγραμμα επεξεργασίας RES2DINV για την επιλογή της ρύθμισης για έμφαση στην οριζόντια στρωματογραφία.....	170
<b>Εικόνα 5.11:</b> Εικόνα από το πρόγραμμα επεξεργασίας RES2DINV για την επιλογή της παραμέτρου «Robust – Robust».....	170

# **1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ**

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ερχόμαστε αντιμέτωποι και προσπαθούμε να επιλύσουμε προβλήματα που συναντά ο μηχανικός στο πρωταρχικό στάδιο της δουλειάς του. Πρόκειται για βασικά ερωτήματα που αφορούν την επιλογή της περιοχής στην οποία θα επιτελεστεί ένα έργο και τη διερεύνηση της καταλληλότητάς της. Απάντηση στα ερωτήματα αυτά, καλείται να δώσει η Γεωφυσική μέσα από την πρακτική εφαρμογή της.

Η έρευνα του υπεδάφους αποτελεί μια απαιτητική διαδικασία, καθώς βασίζεται σε μια πολυκριτηριακή μέθοδο. Επιβάλλει το συσχετισμό δεδομένων από τον τομέα της αρχαιολογίας, της γεωλογίας, της υδρογεωλογίας, της γεωμορφολογίας, της πολεοδομίας κ.λ.π για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με την περιοχή ενδιαφέροντος. Καταλήγει λοιπόν σε συμπεράσματα που έχουν να κάνουν , μεταξύ άλλων, με τον εντοπισμό μεταλλοφορίας, προϋπάρχοντων δομών ανθρωπογενούς δραστηριότητας, στρωματογραφίας, διακύμανσης του υδροφόρου ορίζοντα κ.α.

Εκμεταλλεζόμενοι τις φυσικές ιδιότητες των στοιχείων του υπεδάφους, μέσω της εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων, και αναλύοντας τα αποτελέσματα, διαμορφώνουμε μια εικόνα της υπο διερεύνηση περιοχής. Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί η αναγκαιότητα της χρήσης τουλάχιστον δύο διαφορετικών μεθόδων, για τον συγκριτικό έλεγχο των αποτελεσμάτων.

Η χρήση των μεθόδων της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής προκρίνεται ένταυτων των πιο παρεμβατικών μεθόδων, όπως π.χ των γεωτρήσεων. Δε διαταράσσουν το περιβάλλον στο οποίο εφαρμόζονται, αποτελούν μια πιο οικονομική και εύχρηστη επιλογή, και δίνουν ένα πιο ευρύ αποτέλεσμα. Βάσει αυτών, μπορούμε να καταλήγουμε ακόμη και στην επιλογή προτεινόμενων θέσεων για περαιτέρω διερεύνηση.

Κατανοεί λοιπόν κανείς, ότι το επιστημονικό πεδίο στο οποίο κινούμαστε αποτελεί τη γειτνίαση των αντικειμένων της γεωλογίας και της έρευνας των μηχανικών. Η γεωφυσική έρχεται να γεφυρώσει αυτό το χάσμα, καλύπτοντας με τον αποδοτικότερο τρόπο τις ανάγκες και των δύο.

Αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η έρευνα της κοιλάδας του Θορικού, στην περιοχή του Λαυρίου, στην νοτιοανατολική πλευρά της Αττικής ( **Σχήμα 1.1**).



*Σχήμα 1.1: Χάρτης Ελλάδος, όπου φαίνεται η τοποθεσία του Θορικού.*

Η εν λόγω περιοχή παρουσίαζε έντονη μεταλλευτική δραστηριότητα στα αρχαία χρόνια και έχει έναν από τους αρχαιότερους οικισμούς της Αττικής. Στο λιμάνι του Θορικού διαδραματίζονταν εμπορικές συναλλαγές ξυλείας και μετάλλων. Μέχρι σήμερα διασώζονται στην περιοχή αρχαιολογικά ευρήματα ναών και μεταλλευτικών στοών, καθώς και το αρχαίο θέατρο του Θορικού στο λόφο Βελατούρι.

Η κοιλάδα του Θορικού αποτελεί χώρο αγροτικής χρήσης, με πολλά πηγάδια εκμετάλλευσης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Από κατοίκους της περιοχής υπάρχουν αναφορές ότι κάποια πηγάδια έχουν υφάλμυρο νερό.

Με βάση αυτά τα δεδομένα, και μελετώντας τη γεωλογία και τη γεωμορφολογία της περιοχής, καθώς και υδρογεωλογικά στοιχεία του υπεδάφους, κληθήκαμε να διασκοπήσουμε μια μεγάλη έκταση (3.500 στρεμμάτων περίπου) της κοιλάδας του Θορικού. Σκοπός μας ήταν ο εντοπισμός του μετώπου της διείσδυσης της θάλασσας και των υφαλμυρισμένων δομών, αλλά και η διαμόρφωση μιας ευρύτερης εικόνας της στρωματογραφίας της περιοχής μελέτης.

Μέσα από την ανάλυση της στρωματογραφίας δίνεται η δυνατότητα του προσδιορισμού, τόσο των γεωμετρικών, όσο και των υδραυλικών χαρακτηριστικών των γεωλογικών σχηματισμών, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω έρευνα.

Ύστερα από τη μελέτη όλων των στοιχείων που διατίθενται για την περιοχή, μπορέσαμε να προχωρήσουμε στο σχεδιασμό της έρευνας. Στην επιλογή των γεωφυσικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν, λήφθηκαν υπόψιν η χρήση γης της περιοχής μελέτης, η ανθρωπογενής δραστηριότητα, η σύσταση του εδάφους, η γεωμορφολογία, όπως επίσης και η δυνατότητα εφαρμογής των μεθόδων. Δόκιμες για την περίπτωση μας κρίθηκαν η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος διασκόπησης, η μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η μέθοδος επαγόμενης πόλωσης.

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος διασκόπησης, μετρώντας την αγωγιμότητα και την μαγνητική επιδεκτικότητα των σχηματισμών του υποβάθρου, μέχρι συγκεκριμένο βάθος διασκόπησης, μας δίνει μια ευρύτερη εικόνα της θαλάσσιας διείσδυσης και της ανθρωπογενούς δραστηριότητας.

Αντίστοιχα, η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, με την τεχνική της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, εμφανίζει δομές του υπεδάφους με μεγαλύτερη λεπτομέρεια και σε μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης απ'ότι η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος. Τα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου μας καθοδηγούν ως προς τα σημεία εφαρμογής των τομών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο χώρο, καθώς υποδεικνύουν περιοχές που η διερεύνηση του υποβάθρου είναι απαραίτητη για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Τέλος, η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης μας δίνει τη δυνατότητα του διαχωρισμού των δομών που παρουσιάζουν χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, για τις οποίες ευθύνεται η ύπαρξη αργιλικών υλικών (φυλλιτικό κάλυμμα), από αυτές που προέρχονται από την ύπαρξη νερού στους σχηματισμούς.



*Εικόνα 1.1:* Ο Αρχαίος Ναός ή η Αρχαία Αγορά αφιερωμένη στη Δήμητρα και την Περσεφόνη. Οι συγγραφείς της διπλωματικής εργασίας με τον συνάδελφο Φωκίωνα Λοΐζο.



*Εικόνα 1.2:* Η γεωφυσική ομάδα υπαίθρου από αριστερά Επικ. Καθηγητής Γ. Αποστολόπουλος, Φ.Λοΐζος, Κ.Σταθοπούλου, Α.Βλασσοπούλου και Γ.Αμολοχίτης (ΕΔΙΠ ΕΜΠ).





*Εικόνα 1.3: Το αμαξίδιο που μεταφέρει το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης CMD4 και το διαφορικό GPS τα οποία σύρονται από αυτοκίνητο μέσω πλαστικού σωλήνα 6μ. στην περιοχή του Θορικού.*



*Εικόνα 1.4: Μέτρηση με το διαφορικό GPS της θέσης και του υψομέτρου κάθε ηλεκτροδίου στις τομές γεωηλεκτρικής τομογραφίας.*



*Εικόνα 1.5: Το κινούμενο αμαξίδιο όπου φαίνονται τα μέρη του ηλεκτρομαγνητικού οργάνου μέτρησης CMD4 και του διαφορικού GPS.*



*Εικόνα 1.6: Το κινούμενο αμαξίδιο όπου φαίνονται τα μέρη του ηλεκτρομαγνητικού οργάνου μέτρησης CMD2 και του διαφορικού GPS σε δύσκολες συνθήκες στην περιοχή του Θορικού.*

## **2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ**

### **ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

## 2.1 Εισαγωγή

Στην εφαρμοσμένη γεωφυσική έρευνα μελετάται σε μια περιοχή η απόκριση του υπεδάφους στα φυσικά πεδία του εσωτερικού της Γης, ή στα τεχνητά εφαρμοζόμενα σ' αυτό, με σκοπό την αποτύπωση των φυσικών ιδιοτήτων των υπεδαφικών δομών της περιοχής.

Κατά την διεξαγωγή της γεωφυσικής έρευνας, πραγματοποιείται μέτρηση διαφόρων φυσικών ιδιοτήτων με γεωφυσικά όργανα, είτε από την επιφάνεια της γης, είτε εναέρια, είτε υποθαλάσσια, είτε εντός του εσωτερικού της γης, μέσω γεωτρήσεων ή στοών. Η έρευνα αυτή περιλαμβάνει τη συλλογή, την επεξεργασία και την ερμηνεία των γεωφυσικών παρατηρήσεων.

Οι φυσικές ποσότητες που μετρώνται σε μια γεωφυσική διασκόπηση είναι επηρεασμένες από τις φυσικές ιδιότητες των υπεδαφικών δομών και από τη γεωμετρία τους στο χώρο. Σκοπός της έρευνας είναι να αποκαλύψει, με κατάλληλη επεξεργασία και ερμηνεία, την εσωτερική κατανομή των φυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους που είχε ως αποτέλεσμα την λήψη των συγκεκριμένων μετρήσεων. Οι μετρούμενες φυσικές ποσότητες, δηλαδή, ερμηνεύονται συνήθως σε συνάρτηση με άλλα φυσικά μεγέθη που περιγράφουν αμεσότερα τις ιδιότητες του υπεδάφους.

Για την επιτυχή εφαρμογή μιας γεωφυσικής διασκόπησης, βασική προϋπόθεση είναι να υπάρχει διαφοροποίηση σε κάποια φυσική ιδιότητα των υπεδαφικών δομών. Αν το υπέδαφος χαρακτηρίζεται από ομοιογένεια ως προς το υπό διερεύνηση φυσικό μέγεθος τότε δεν μπορούμε να ξεχωρίσουμε τίποτα. Οι γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν να εντοπίσουν μόνο υπεδαφικές “ανωμαλίες”, δηλαδή περιοχές στις οποίες κάποια φυσική ιδιότητα παρουσιάζει επαρκώς διαφορετική τιμή από τον περιβάλλοντα χώρο. Τέτοιες “ανωμαλίες” υποδηλώνουν ασυνέχειες της υπόγειας δομής και με κατάλληλη ερμηνεία οδηγούν στις υπεδαφικές εκτιμήσεις.

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο των μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αυτές είναι η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση και η επαγόμενη πόλωση.

## 2.2 Η Κλασσική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος

Η Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος (EMI) χρησιμοποιείται για την έρευνα του υπεδάφους, κάνοντας χρήση της απόκρισης του εδάφους στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, τα οποία αποτελούνται από εναλλασσόμενη ηλεκτρική ένταση και μαγνητική δύναμη. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002)

Εφαρμόζεται με πολλές παραλλαγές συστημάτων μέτρησης (επίγεια ή από αέρος, χώρος χρόνου ή συχνοτήτων, κλπ.) που έχουν και αντίστοιχες δυνατότητες με πολύ μεγάλη ποικιλία εφαρμογών :

- Μεταλλευτική έρευνα
- Εντοπισμός ρύπανσης υδατικών πόρων
- Εντοπισμός μετώπου υφαλμύρισης
- Γεωλογική χαρτογράφηση, χαρτογράφηση εδαφών, κροκαλών
- Εντοπισμός θαμμένων αντικειμένων (σωληνώσεις, δεξαμενές, τοιχία, κλπ.)
- Αρχαιολογική έρευνα
- Εντοπισμός εγκοίλων (σπήλαια, εγκαταλελειμμένες σήραγγες, κλπ.)

Η μέθοδος είναι γρήγορη στην απόκτηση δεδομένων χωρίς την ανάγκη ηλεκτροδίων στο έδαφος. Το βάθος διασκόπησης είναι συγκεκριμένο για συγκεκριμένη συχνότητα ή απόσταση πομπού-δέκτη.

### 2.2.1 Τύποι Ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων - Εφαρμογές της μεθόδου

Έχουμε κατ' αρχήν δύο ειδών συστήματα :

- **TEM** (Time-domain Electromagnetic Measurements) : Μετρήσεις σε συνάρτηση του χρόνου.
- **FEM** (Frequency – domain Electromagnetic Measurements) : Μετρήσεις σε συνάρτηση της συχνότητας.

Επίσης, έχουμε διαφόρων ειδών συστήματα σε σχέση με την πηγή:

- Παθητικά (χρησιμοποιούνται φυσικά υπεδαφικά ηλεκτρομαγνητικά σήματα – π.χ. Μαγνητοτελλουργικά)
- Ενεργητικά (χρησιμοποιείται πομπός ηλεκτρομαγνητικού σήματος που επάγει ρεύμα στο έδαφος)
- Τοπικού πεδίου όργανα μέτρησης αγωγιμότητας)
- Απομακρυσμένου πεδίου (χρησιμοποιούνται σήματα πολύ χαμηλής συχνότητας που εκπέμπει πομπός για επικοινωνία υποβρυχίων)

Τα επαγωγικά ηλεκτρομαγνητικά σήματα διακρίνονται σε :

- Μικρού βρόγχου. Είναι τα περισσότερα συστήματα που δουλεύουν στον χώρο των συχνοτήτων (EM31, EM34, κλπ.) και κάποια στον χώρο του χρόνου. Κυρίως χρησιμοποιούνται σε περιβαλλοντικές εφαρμογές.
- Μεγάλου βρόγχου (5μ με 100μ βρόγχοι). Κυρίως συστήματα στον χώρο του χρόνου που χρησιμοποιούνται στην μεταλλευτική έρευνα.
- Επιπέδου κύματος (VLF, Μαγνητοτελλουργικά). Χρησιμοποιούνται στην μεταλλευτική έρευνα και στον εντοπισμό βαθέων γεωλογικών δομών.

### **2.2.1.1 Ηλεκτρομαγνητικά Συστήματα Μικρού Βρόγχου**

Τα ηλεκτρομαγνητικά συστήματα μικρού βρόγχου λειτουργούν στο χώρο των συχνοτήτων. Το EM31 ή το CMD4 με δύο μικρά πηνία, ένας πομπός και ένας δέκτης, που απέχουν σταθερή απόσταση, είναι τοποθετημένο κάθετα του προφίλ των μετρήσεων. Το EM34 χρησιμοποιεί δύο πηνία, ένας πομπός και ένας δέκτης, μεταβλητής απόστασης και διατάξεων. Τα πηνία λοιπόν μπορούν να είναι διατεταγμένα με διάφορους τρόπους:

- Οριζόντια και στο ίδιο δάπεδο
- Κάθετα και στο ίδιο δάπεδο
- Κάθετα και στον ίδιο άξονα

### **2.2.2 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα**

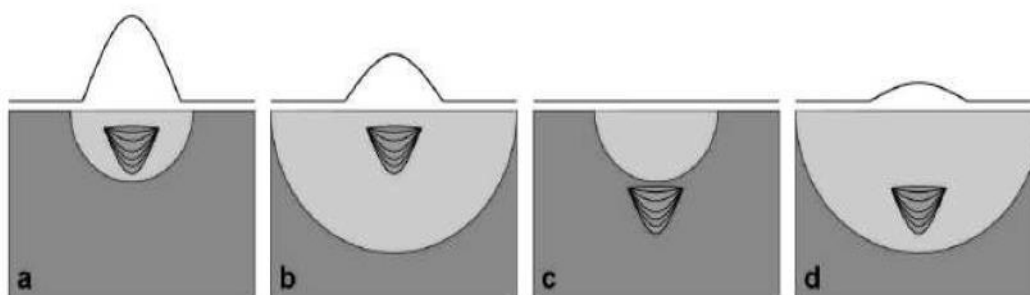
Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ένα μέτρο για το πόσο εύκολα το ηλεκτρικό ρεύμα θα διατρέξει ένα υλικό, και μετριέται σε Siemens ανά μέτρο (S/m). Ένα Siemens

είναι το αντίστροφο ενός Ohm, ή ίσο με  $1/\text{Ohm}$ . Είναι το θεωρητικό αντίστροφο της ειδικής αντίστασης, αλλά όπως συζητήθηκε νωρίτερα, τα στοιχεία αγωγιμότητας δεν είναι συχνά συγκρίσιμα με τις μετρήσεις αντίστασης που λαμβάνονται με τα συστήματα των ηλεκτροδίων. Συνήθως, όταν μιλούν οι αρχαιολόγοι για την ειδική αντίσταση ή την αντίσταση, αναφέρονται συνήθως σε μετρήσεις που συλλέγονται με ένα όργανο που χρησιμοποιεί ηλεκτρόδια στο έδαφος. Όταν μιλάμε για την αγωγιμότητα, σχεδόν πάντα αναφερόμαστε στις μετρήσεις που λαμβάνονται με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο (EMI) επαγωγής. Οι χάρτες αγωγιμότητας τείνουν να μοιάζουν με τους χάρτες των δεδομένων ειδικής αντίστασης και μπορούν να ερμηνευθούν χρησιμοποιώντας τις ίδιες αρχές, αν και η ανάλυση της αγωγιμότητας είναι μερικές φορές φτωχότερη λόγω διαφορών στις βαθιές ευαισθησίες. Παρά το γεγονός ότι τα στοιχεία της EMI συλλέγονται συχνά σε μια υψηλότερη πυκνότητα από τα δεδομένα αντίστασης, οι μετρήσεις της EMI επηρεάζονται συνήθως από έναν μεγαλύτερο όγκο του εδάφους, θολώνοντας ενδεχομένως τα όρια ανωμαλίας. Όπως στην αντίσταση, η αγωγιμότητα είναι μια άριστη μέθοδος για τον εντοπισμό ανωμαλιών που είναι βασισμένες στις αντιθέσεις της επίγειας υγρασίας ή τον τύπο υλικού. Τα μικρά κοιλώματα δεν ανιχνεύονται εύκολα, αλλά μεγαλύτερα κοιλώματα, τάφροι, και τα υπολείμματα των χωματοουργικών έργων μπορούν να ανιχνευθούν πολύ αποτελεσματικά.

### **2.2.2.1 Βάθος και Ανάλυση**

Το βάθος και η ανάλυση των δεδομένων αγωγιμότητας που μετριοούνται με την «EMI» εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, η ειδική συχνότητα, το ύψος των αισθητήρων επάνω από το έδαφος, και ο προσανατολισμός των σπειρών. Αρχικά εξετάζεται η συχνότητα. Τα πεδία χαμηλότερης συχνότητας της «EM» έχουν πιο μεγάλα μήκη κύματος, και είναι επομένως ικανά να διαπεράσουν βαθύτερα στο έδαφος. Γενικά, η διείσδυση σε βάθος είναι μεγαλύτερη για τις χαμηλότερες συχνότητες. Βέβαια, το μειονέκτημα των χαμηλότερων συχνοτήτων είναι ότι ένας μεγαλύτερος όγκος γης μετριέται, επομένως τα μικρά αντικείμενα όπως τα αρχαιολογικά στοιχεία δεν μπορούν να ανιχνευθούν. Είναι καλύτερο να χρησιμοποιηθεί μια υψηλότερη συχνότητα, η οποία θα έχει μικρότερο βάθος, έτσι ώστε τα αρχαιολογικά στοιχεία αποτελούν μεγαλύτερο μέρος του συνολικού όγκου. Με άλλα λόγια, οι υψηλότερες συχνότητες παρέχουν μεγαλύτερη ανάλυση ώστε να ανιχνευθούν τα μικρότερα στοιχεία, αλλά οι χαμηλότερες

συχνότητες μπορούν να επιτρέψουν την ανίχνευση των σχετικά μεγάλων ή υψηλών στόχων αντίθεσης που είναι πάρα πολύ βαθιοί και ειδάλλως δεν μπορούν να ανιχνευθούν. Αν και τα ρηχά αντικείμενα, ίσως να μπορούν να ανιχνευθούν επαρκώς με χαμηλές συχνότητες, οι υψηλότερες συχνότητες είναι συνήθως καλύτερες για την ανίχνευση των αρχαιολογικών στοιχείων. Επομένως, δεν είναι έκπληξη ότι το «Geonics EM38» χρησιμοποιείται τόσο συχνά και τα όργανα χαμηλότερης συχνότητας όπως EM31 χρησιμοποιούνται για τους βαθύτερους και μεγαλύτερους στόχους.



**Σχήμα 2.1 :** Επίδραση της συχνότητας της «EMI» και του βάθους στόχων. Οι γραμμικές απεικονίσεις αντιπροσωπεύουν το σχετικό μέγεθος των μετρήσεων αγωγιμότητας και τα σχέδια αντιπροσωπεύουν τις κατωτέρω διατομές ενός αντικείμενου που θάβεται σε διαφορετικά βάθη. Τα ημικύκλια παρουσιάζουν τα όρια της διείσδυσης βάθους λόγω της συχνότητας. Το καλύτερο δυνατό σενάριο είναι (a) ένα ρηχό αντικείμενο μετρημένο με μια υψηλή σχετικά συχνότητα. Εάν το ίδιο αντικείμενο μετριέται με μια χαμηλότερη συχνότητα (b), μια μεγαλύτερη περιοχή μετριέται και μια μικρότερη ανωμαλία μεγέθους καταγράφεται. Εντούτοις, όταν τα βαθύτερα αντικείμενα είναι ο στόχος, μια υψηλότερη συχνότητα (c) μπορεί να μην διαπεράσει αρκετά βαθιά στο έδαφος, έτσι το αντικείμενο δεν θα ανιχνευόταν. Η καλύτερη προσέγγιση για τα αντικείμενα που είναι γνωστό ότι είναι βαθιά, είναι να χρησιμοποιηθεί μια χαμηλότερη συχνότητα (d).

Το ύψος του οργάνου επάνω από το έδαφος είναι επίσης ένας κύριος παράγοντας που έχει επιπτώσεις στην ευαισθησία του βάθους, δεδομένου ότι η απόσταση μεταξύ του πηνίου δέκτη και των αντικειμένων αυξάνεται, η απόκριση από το αντικείμενο μικραίνει. Πέρα από το μέγιστο επιφανειακό βάθος, το σήμα επιστροφής από ένα αντικείμενο είναι πάρα πολύ μικρό για να ανιχνευθεί. Η ευαισθησία βάθους μπορεί επομένως να αυξηθεί με το να φέρουμε το όργανο όσο το δυνατόν πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά τη χρησιμοποίηση των οργάνων υψηλής συχνότητας όπως το EM38 επειδή το βάθος διείσδυσης είναι περιορισμένο. Ένας άλλος σοβαρός παράγοντας που έχει επιπτώσεις στο βάθος διείσδυσης είναι ο προσανατολισμός των πηνίων (σπειρών). Οι δύο πιο κοινοί προσανατολισμοί είναι να κρατηθούν οι σπείρες είτε οριζόντιες είτε κάθετες όσον αφορά την επιφάνεια του εδάφους. Εάν οι δύο σπείρες τοποθετούνται οριζόντια στην επιφάνεια του εδάφους (φανταστείτε δύο ρόδες που



βρίσκονται στο έδαφος) ο προσανατολισμός τους καλείται οριζόντιο συνεπίπεδο. Σε αυτή τη θέση ο οριζόντιος πομπός παράγει ένα μαγνητικό πεδίο του οποίου οι γραμμές ροής προέρχονται κάθετα, τον οποίο προσανατολισμό ονομάζουμε κάθετο μαγνητικό δίπολο (ή απλά «κάθετος τρόπος»). Σε αυτή τη θέση υπάρχει μέγιστη ενεργειακή διείσδυση στο έδαφος. Αυτός είναι ο πιο κοινός προσανατολισμός για τις περισσότερες αρχαιολογικές έρευνες. Όταν οι σπείρες κρατιούνται κάθετα όσον αφορά την επιφάνεια του εδάφους, ο προσανατολισμός ονομάζεται κάθετο συνεπίπεδο και η μαγνητική ροή που προέρχεται από το πομπό είναι οριζόντια, αποκαλούμενος οριζόντιος μαγνητικός προσανατολισμός διπόλων («οριζόντιος τρόπος»). Σε αυτή τη θέση ένα πολύ μικρότερο μέρος του προκληθέντος ηλεκτρομαγνητικού πεδίου διαπερνά το έδαφος και έτσι η διείσδυση βάθους μειώνεται (Witten 2006).

#### **2.2.2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα**

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα καθώς επίσης και μειονεκτήματα στην έρευνα αγωγιμότητας. Έναντι της ειδικής αντίστασης, τα δεδομένα της «EMI» μπορούν να συλλεχθούν γρηγορότερα επειδή δεν υπάρχει καμία ανάγκη να παρεμβληθούν ηλεκτρόδια στο έδαφος ή να ξαναγίνουν περιστασιακά οι μακρινοί έλεγχοι. Επίσης, τα δεδομένα της «EMI» μπορούν να συλλεχθούν στις περιοχές με πολύ ξηρό ή σκληρό έδαφος, όπου τα ηλεκτρόδια είτε δεν μπορούν να τοποθετηθούν, ή το ρεύμα δεν θα ρεύσει λόγω της έλλειψης υγρασίας. Οι πολύ ξερές συνθήκες επιφάνειας δεν είναι απαραίτητως μια ένδειξη ότι το έδαφος κάτω από την επιφάνεια είναι πάρα πολύ ξηρό για να παρέχει μια αρκετή αντίθεση, συχνά επαρκής υγρασία βρίσκεται μόνο μερικά εκατοστόμετρα κάτω από τα ηλεκτρόδια. Τα όργανα της «EMI» μπορούν επίσης να «πακεταριστούν» και να μεταφερθούν ευκολότερα εξ αιτίας του μικρότερου μεγέθους τους. Τα μειονεκτήματα των ερευνών αγωγιμότητας περιλαμβάνουν την ευαισθησία του EM38 στην ηλεκτρική παρέμβαση (π.χ., φωτισμός, ηλεκτροφόρα καλώδια) και τα συντρίμια μετάλλων (Bevan 1998, Clark 1996, Clay 2006). Σε ορισμένες περιπτώσεις, εντούτοις, η ευαισθησία του EM38 στο μέταλλο είναι ένα πλεονέκτημα, όπως με στα πεδία μάχης ή άλλες περιοχές όπου τα χειροποίητα αντικείμενα μετάλλων είναι μεταξύ των στόχων (Bevan 1998 Heckman 2005).

### 2.2.3 Μαγνητική Επιδεκτικότητα

Η μαγνητική επιδεκτικότητα (MS) είναι ένα μέτρο της δυνατότητας ενός υλικού για να μαγνητιστεί παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου (Clark 1996 Dalan 2006). Μπορεί να μετρηθεί ανά μονάδα όγκου ( $\kappa$ ) ή ως ομαλοποιημένη μάζα επιδεκτικότητας ( $\chi$ ) (Dalan 2006), αλλά όταν μετριέται με το EM38 ή παρόμοια όργανα δίνεται ως αναλογία του αρχικού προς το δευτερεύον πεδίο σε μέρη ανά χίλια (ppt). Όλα τα άτομα περιέχουν μαγνητικά πεδία προερχόμενα από την εξωτερική στοιβάδα των ηλεκτρονίων, έτσι όλες οι ουσίες αντιδρούν (είναι ευαίσθητες) στα κοντινά μαγνητικά πεδία μέχρι ενός ορισμένου βαθμού (Clark 1996). Ο Dalan περιγράφει τους διάφορους τρόπους με τους οποίους η μαγνητική επιδεκτικότητα ενισχύεται.

Ο φυσικός σχηματισμός των εδαφών περιλαμβάνει τη μετατροπή των αδύναμων μαγνητικών οξειδίων και των υδροξειδίων στις εντονότερα μαγνητικές μορφές, έτσι το χώμα είναι πολύ περισσότερο μαγνητικό από τα στρώματα του υπεδάφους. Επιπλέον, οι ανθρώπινες δραστηριότητες ενισχύουν περαιτέρω το χώμα, έτσι ώστε τα χώματα επί των αρχαιολογικών τόπων να είναι συνήθως πιο μαγνητικά από εκείνα στις περιβάλλουσες μη πολιτιστικές περιοχές. Οι άνθρωποι ενισχύουν τις νεογενείς διαδικασίες και επομένως τις αντιθέσεις επιδεκτικότητας, με την αύξηση της οργανικής ουσίας και την αλλαγή του πορώδους των χωμάτων, και επίσης με την αύξηση της εδαφολογικής θερμοκρασίας μέσω της πυρκαγιάς. Μπορούν επίσης να ενσωματώσουν καμένα ή υψηλής επιδεκτικότητας υλικά στο έδαφος. Οι πυρκαγιές, είτε φυσικές είτε προκαλούμενες από τον άνθρωπο, επίσης ενισχύουν την μαγνητική επιδεκτικότητα (Dalan 2006). Η ανθρώπινη μαγνητική ενίσχυση του χώματος αυξάνει συχνά την αντίθεση επιδεκτικότητας επί των αρχαιολογικών τόπων, με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η δυνατότητα να ανιχνευθούν τα τεχνητά αντικείμενα (Clark 1996 Dalan 2006).

#### 2.2.3.1 Βάθος και ανάλυση

Από όλες τις γεωφυσικές μεθόδους που περιγράφονται εδώ, η μαγνητική επιδεκτικότητα που συλλέγεται από την επιφάνεια του εδάφους είναι περιορισμένη από την άποψη της διαπερατότητας σε βάθος εξαιτίας της αδυναμίας των μαγνητικών πεδίων που μετριούνται. Η εκθετική απώλεια εμφανίζεται καθώς το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εισάγεται στο έδαφος, και έπειτα πάλι καθώς ταξιδεύει από το έδαφος στον αισθητήρα

μέτρησης. Η απώλεια είναι εκθετική στην έκτη δύναμη, με συνέπεια την πολύ μικρή διείσδυση σε βάθος. Υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές στην διαπερατότητα σε βάθος ανάμεσα στα μονά και διπλής σπείρας όργανα. Τα μονής σπείρας όργανα πρέπει να έχουν απευθείας επαφή με το έδαφος, και το βάθος της διείσδυσης περιορίζεται από τη διάμετρο του βρόχου (Dalan 2006). Για παράδειγμα, ο «BartingtonMS2D» αισθητήρας μονού βρόχου, διαπερνά μόνο περίπου 0.10 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Οι διπλοί αισθητήρες σπειρών, όπως το Geonics EM38 έχουν μια διείσδυση της τάξης του μισού μέτρου ή περισσότερο (εντούτοις, η ευαισθησία βάθους είναι μεγαλύτερη για την αγωγιμότητα με αυτόν τον αισθητήρα).

Οι πυκνότητες δεδομένων για τις έρευνες περιοχής μαγνητικής επιδεκτικότητας εξαρτώνται από το όργανο. Οι αισθητήρες διπλής-σπείρας είναι γρήγοροι και οι χαρακτηριστικές πυκνότητες δεδομένων είναι σχεδόν οι ίδιες όπως για την αγωγιμότητα, ίσως 0.25m X 0.5m (δηλ., 4 αναγνώσεις ανά γραμμικό μέτρο, με περάσματα που χωρίζονται ανά 0.5m). Οι μονοί αισθητήρες σπειρών, εντούτοις, είναι αρκετά πιο αργοί επειδή κάθε ανάγνωση απαιτεί την απευθείας επαφή με το έδαφος και συχνά ο αισθητήρας πρέπει να μηδενιστεί πριν από κάθε μέτρηση. Άρα η πυκνότητα των μετρήσεων είναι επομένως της τάξης μίας μέτρησης ανά τετραγωνικό μέτρο (ή λιγότερο). Αυτό βάζει ένα προφανές όριο στη χωρική ανάλυση. Με τα όργανα διπλών-σπειρών η χωρική ανάλυση είναι παρόμοια με την αγωγιμότητα.

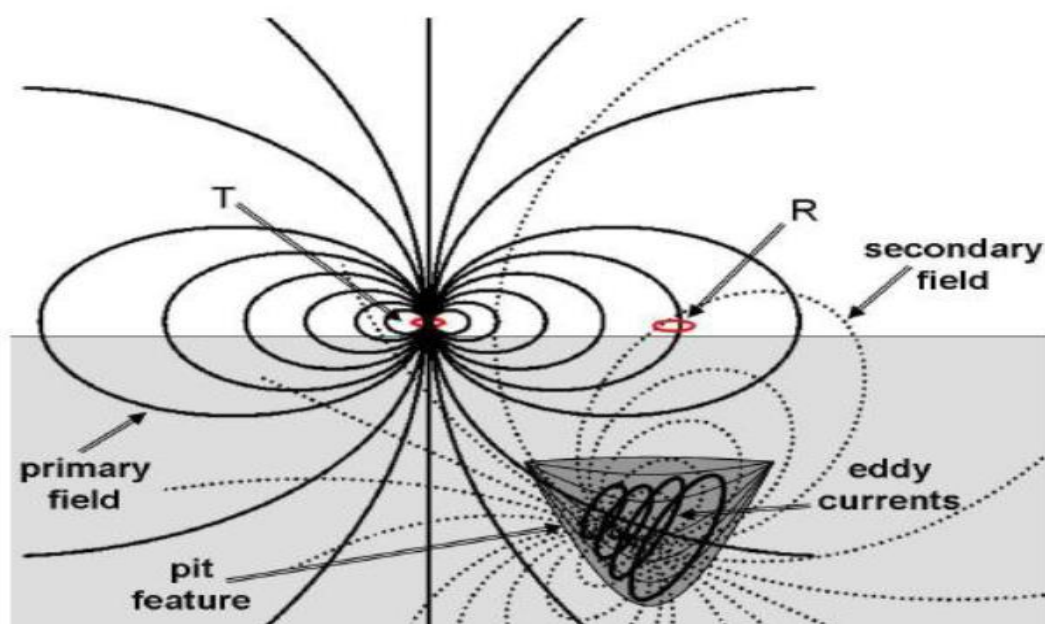
#### **2.2.4 Αρχές της Γεωφυσικής Ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου**

Οι ηλεκτρομαγνητικές (EM) μέθοδοι έρευνας χρησιμοποιούν την απόκριση του εδάφους στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Τα αρχικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορούν να παραχθούν με τη ροή του εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω ενός μικρού πηνίου φτιαγμένου με πολλές περιελίξεις καλωδίου ή μέσω ενός μεγάλου βρόχου του καλωδίου. Η απόκριση του εδάφους είναι η παραγωγή των δευτερογενών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και τα τελικά πεδία μπορούν να ανιχνευθούν από τα εναλλασσόμενα ρεύματα που ρέουν σε ένα πηνίο δέκτη με τη διαδικασία της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

Όλοι οι σχηματισμοί με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα παράγουν ισχυρά δευτερογενή ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Μερικοί χώροι μεταλλεύματος που περιέχουν τα μεταλλεύματα που είναι μονωτές, μπορούν να παράγουν δευτερογενή πεδία εάν επαρκείς

ποσότητες ενός βοηθητικού μεταλλεύματος με μια υψηλή αγωγιμότητα είναι παρούσες. Παραδείγματος χάριν, ηλεκτρομαγνητικές ανωμαλίες που παρατηρούνται πάνω από συγκεκριμένου σουλφιδίου μεταλλεύματα, οφείλονται στην παρουσία αγωγίμου ορυκτού πυρροτίτη που είναι διεσπαρμένο σε όλο το χώρο του μεταλλεύματος.

Αν υπάρχει λοιπόν αγωγίμο υλικό στο υπέδαφος, η μαγνητική συνιστώσα του ηλεκτρομαγνητικού σήματος επάγει εναλλασσόμενα ρεύματα (Eddy Currents) μέσα στον αγωγό. Τα ρεύματα αυτά παράγουν δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που ανιχνεύεται από το πηνίο – δέκτη. Ο δέκτης επίσης ανιχνεύει και το πρωτογενές πεδίο. Το τελικό πεδίο είναι συνδυασμός πρωτογενούς και δευτερογενούς, που διαφέρουν ως προς την φάση και το πλάτος. Μετά την αντιστάθμιση για το πρωτογενές πεδίο (που μπορεί να υπολογισθεί από τις σχετικές θέσεις και προσανατολισμούς των πηνίων), και το μέγεθος και η σχετική φάση του δευτερογενούς πεδίου μπορούν να υπολογιστούν. Η διαφορά στο τελικό πεδίο από το πρωτογενές δίνει πληροφορία για τη γεωμετρία, το μέγεθος και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του αγωγού του υπέδαφους.



**Σχήμα 2.2 :** Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής. Το πηνίο αποστολής σημάτων (T) δημιουργεί ένα αρχικό πεδίο της «EMI» που διαδίδεται προς όλες τις διευθύνσεις. Αυτό αναγκάζει τα ρεύματα να ρεύσουν στα αγωγίμα αντικείμενα όπως το κοίλωμα που παρουσιάζεται εδώ. Τα ρεύματα δημιουργούν στη συνέχεια ένα δευτερεύον πεδίο. Και τα αρχικά και τα δευτερεύοντα πεδία μετριοούνται στο πηνίο του δέκτη (R).

Το δευτερογενές πεδίο μπορεί να μετατραπεί σε συνιστώσες σε φάση και εκτός φάσης 90° ως προς το πρωτογενές πεδίο. Η εκτός φάσης συνιστώσα χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες υποθέσεις, μπορεί να μετατραπεί σε υπολογιζόμενη φαινόμενη αγωγιμότητα. Η σε φάση συνιστώσα, γενικά μη υπεύθυνη για τις αλλαγές της χωρικής αγωγιμότητας, είναι ειδικά υπεύθυνη για τον εντοπισμό υψηλής αγωγιμότητας σωμάτων όπως μεταλλικά. Η μετρούμενη φαινόμενη αγωγιμότητα είναι η μέση αγωγιμότητα ενός ή περισσοτέρων στρωμάτων του υπεδάφους στην περιοχή μέτρησης του οργάνου, σε βάθος έρευνας που σχετίζεται με την απόσταση των πηνίων, την διεύθυνση, τη συχνότητα λειτουργίας του οργάνου και την αγωγιμότητα του κάθε στρώματος του υπεδάφους.

#### 2.2.4.1 Βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

Το βάθος της διείσδυσης ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, εξαρτάται από τη συχνότητά του και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου του οποίου διαδίδεται. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μειώνονται κατά τη διέλευσή τους μέσω του εδάφους, το πλάτος τους μειώνεται εκθετικά με το βάθος. Το βάθος της διείσδυσης  $d$  μπορεί να οριστεί ως το βάθος στο οποίο το πλάτος του πεδίου  $A_d$  μειώνεται κατά έναν παράγοντα  $e^{-1}$  (37%) συγκρινόμενο με το πλάτος στην επιφάνεια  $A_0$ .

$$A_d = A_0 \times e^{-1} \quad (2.1)$$

$$d = \frac{503,8}{\sqrt{\sigma \times f}} \quad (2.2)$$

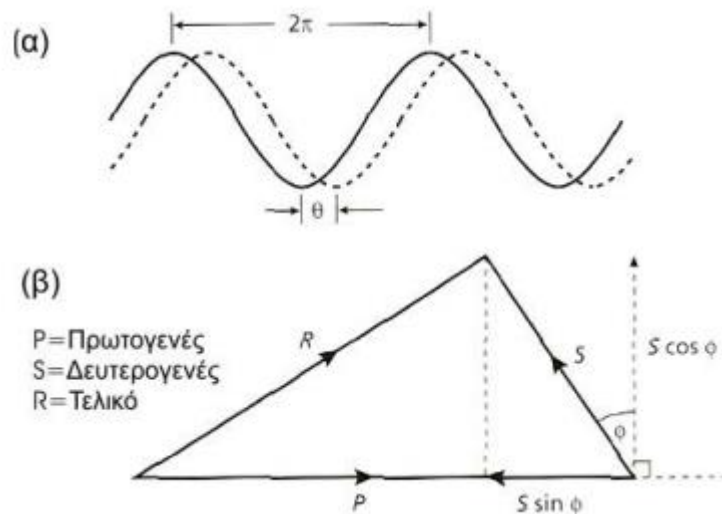
Όπου το  $d$  είναι σε μέτρα, η αγωγιμότητα  $\sigma$  του εδάφους είναι σε  $S m^{-1}$  και η συχνότητα  $f$  του πεδίου είναι σε Hz.

Το βάθος της διείσδυσης αυξάνεται όσο και η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και η αγωγιμότητα του εδάφους μειώνονται. Συνεπώς, η συχνότητα που χρησιμοποιείται σε μια έρευνα EM μπορεί να καθοριστεί για ένα επιθυμητό βάθος σε οποιοδήποτε συγκεκριμένο μέσο. Η παραπάνω εξίσωση αντιπροσωπεύει μια θεωρητική σχέση. Εμπειρικά, ένα αποτελεσματικό βάθος διείσδυσης  $z$  μπορεί να καθοριστεί ως το μέγιστο βάθος στο οποίο ένας αγωγός μπορεί να βρεθεί και να παράγει μια αναγνωρίσιμη ηλεκτρομαγνητική ανωμαλία.

$$Z_e = \frac{100}{\sqrt{\sigma \times f}} \quad (2.3)$$

Η εξάρτηση του βάθους διείσδυσης από την συχνότητα, τοποθετεί τους περιορισμούς στη μέθοδο EM. Κανονικά, οι πολύ χαμηλές τιμές συχνότητας είναι δύσκολο να παραχθούν και να μετρηθούν και η μέγιστη επιτεύξιμη διείσδυση είναι συνήθως της τάξης των 500m.

#### 2.2.4.2 Συστήματα Μέτρησης Φάσης



**Σχήμα 2.3 :** Σχηματική αναπαράσταση α) εναλλασσόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ημιτονοειδούς μορφής β) διαφοράς φάσης κυμάτων, γωνίας φάσης  $\theta$

Ένα ηλεκτρομαγνητικό σύστημα έρευνας μπορεί να μετρά τις σχέσεις φάσης και πλάτους μεταξύ των πρωτογενών, δευτερογενών και τελικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να παρασταθεί από ένα ημιτονοειδές κύμα με ένα μήκος κύματος  $2\pi$  ( $360^\circ$ ) (**Σχήμα 2.3.**). Όταν ένα τέτοιο κύμα καθυστερεί πίσω από άλλο, τα κύματα θεωρούνται ότι είναι εκτός φάσης. Η διαφορά φάσης μπορεί να αντιπροσωπευθεί με γωνία φάσης  $\theta$  στον γωνιακό διαχωρισμό των κυματομορφών. Οι σχέσεις φάσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορούν να αναπαρασταθούν σε ειδικά διανυσματικά διαγράμματα, στα οποία το διανυσματικό μήκος είναι ανάλογο προς το πλάτος του πεδίου και η γωνία που μετριέται αντίθετα προς

τη φορά των δεικτών του ρολογιού από το πρωτογενές διάνυσμα στο δευτερογενές διάνυσμα, αντιπροσωπεύει τη γωνιακή καθυστέρηση φάσης του δευτερογενούς πεδίου πίσω από το πρωτογενές.

Το πρωτογενές πεδίο  $P$  ταξιδεύει άμεσα από τον πομπό στο δέκτη επάνω από το έδαφος και δεν υφίσταται καμία τροποποίηση, εκτός από μια μικρή μείωση του πλάτους που προκαλείται με τη γεωμετρική διάδοση. Επίσης, το πρωτογενές πεδίο εισχωρεί στο έδαφος, μειώνεται πολύ το πλάτος του, αλλά παραμένει σε φάση με το επιφανειακό πρωτογενές. Το πρωτογενές πεδίο προκαλεί μια εναλλασσόμενη τάση σε έναν υπεδαφικό αγωγό με την ίδια συχνότητα με πρωτογενές αλλά με μια καθυστέρηση φάσης  $\pi/2$  ( $90^\circ$ ), σύμφωνα με τους νόμους της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του αγωγού προκαλούν μια περαιτέρω καθυστέρηση φάσης  $\varphi$ .

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{2\pi f L}{r} \right) \quad (2.4)$$

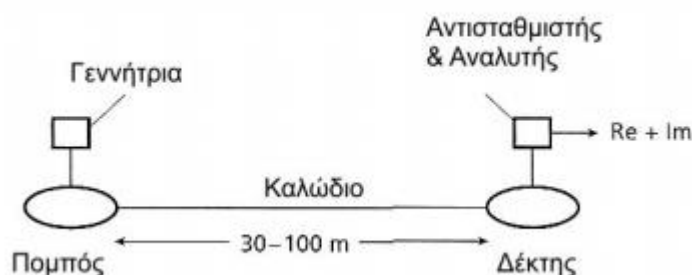
Όπου  $f$  η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου,  $L$  η αυτεπαγωγή του αγωγού (η τάση του να αντιτάξει μια αλλαγή στο εφαρμοζόμενο πεδίο) και  $r$  η αντίσταση του αγωγού. Για έναν καλό αγωγό  $\varphi$  θα πλησιάσει τα  $\pi/2$  ενώ για έναν κακό αγωγό  $\varphi$  θα είναι σχεδόν μηδέν.

Η καθαρή επίδραση είναι το δευτερογενές πεδίο  $S$  που παράγεται από τον αγωγό καθυστερεί πίσω από το πρωτογενές σε μια γωνία φάσης ( $\pi/2 + \varphi$ ). Το τελικό πεδίο  $R$  μπορεί τώρα να βρεθεί.

Η προβολή του  $S$  στον οριζόντιο (πρωτογενές πεδίο) άξονα είναι  $S \sin \varphi$  και είναι σε γωνία  $\pi$ , εκτός φάσης ως προς το  $P$ . Είναι γνωστή ως σε φάση (in-phase) ή πραγματική συνιστώσα του  $S$ . Η κάθετη προβολή είναι  $S \cos \varphi$ ,  $\pi/2$  εκτός φάσης ως προς το  $P$ , και είναι γνωστή ως εκτός φάσης ή φανταστική συνιστώσα.

Τα σύγχρονα όργανα είναι σε θέση να διαχωρίζουν το δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σε πραγματική ( $R_C$ ) και φανταστική ( $I_m$ ) συνιστώσα. Όσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία  $R_C / I_m$ , τόσο καλύτερος ο αγωγός. Μερικά συστήματα, κυρίως αερομεταφερόμενα, μετρούν απλά τη γωνία φάσης  $\varphi$ .

Τα κλασικά συστήματα μέτρησης φάσης χρησιμοποιούν κινούμενους πομπούς και δέκτες και αναφέρονται ως διδύμου πηνίου (twin - coil) ή slingram συστήματα. Τα πηνία πομπού και δέκτη είναι διαμέτρου περίπου 1m και μεταφέρονται συνήθως οριζόντια, αν και διαφορετικοί προσανατολισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Τα πηνία συνδέονται από ένα καλώδιο που φέρνει ένα σήμα αναφοράς και επιτρέπει επίσης την απόσταση των πηνίων να διατηρηθεί σταθερή, συνήθως 30 – 100m. Ο πομπός τροφοδοτείται από μια φορητή γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος.



*Σχήμα 2.4 : Σύστημα μέτρησης φάσης διδύμου πηνίου*

Το σήμα εξόδου από το πηνίο δέκτης περνάει από έναν αντισταθμιστή και έναν αναλυτή. Το όργανο μετράει αρχικά στο «άγονο» έδαφος (χωρίς αγωγίμο σώμα) και ο αντισταθμιστής ρυθμίζεται στο να παράγει μηδενική έξοδο. Με τον τρόπο αυτό, το πρωταρχικό πεδίο αντισταθμίζεται έτσι ώστε το σύστημα να αποκρίνεται στη συνέχεια μόνο στα δευτερογενή πεδία. Συνεπώς, τέτοιες μέθοδοι EM αποκαλύπτουν την παρουσία σωμάτων ανώμαλης αγωγιμότητας, χωρίς παροχή πληροφορίας για τις απόλυτες τιμές αγωγιμότητας. Στην περιοχή έρευνας, ο αναλυτής χωρίζει το δευτερογενές πεδίο στις πραγματικές και φανταστικές συνιστώσες που συνήθως παρουσιάζονται ως ποσοστό του πρωτογενούς πεδίου, του οποίου το μέγεθος αναμεταδίδεται μέσω του διασυνδεδεμένου καλωδίου. Τομές μέτρησης γίνονται γενικά κάθετα στις γεωλογικές ασυνέχειες και οι μετρήσεις αντιστοιχούν στη θέση του μεσαίου σημείου του συστήματος. Το μέγιστο βάθος ανίχνευσης είναι περίπου το μισό της απόστασης πομπού δέκτη.

Οι μετρήσεις υπαίθρου είναι απλή διαδικασία και απαιτεί ένα πλήρωμα μόνο δύο ή τριών χειριστών. Η απόσταση και ο προσανατολισμός των πηνίων είναι κρίσιμα, δεδομένου ότι ένα μικρό ποσοστιαία λάθος στην απόσταση, μπορεί να δημιουργήσει αξιόλογο λάθος στη μέτρηση φάσης. Τα πηνία πρέπει επίσης να κρατηθούν ακριβώς



οριζόντια και συνεπίπεδα, δεδομένου ότι οι μικρές σχετικές κλίσεις μπορούν να παράγουν επίσης ουσιαστικά λάθη. Η απαραίτητη ακρίβεια της απόστασης και του προσανατολισμού είναι δύσκολο να διατηρηθεί σε μεγάλες αποστάσεις και πάνω από ανώμαλη τοπογραφία.

### 2.2.5 Ηλεκτρομαγνητικό Όργανο Μέτρησης

Είναι δυνατό με ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις να βρούμε την αγωγιμότητα του υπεδάφους. Το δευτερογενές EM πεδίο μετράται με ένα κινητό σύστημα πομπού – δέκτη μέσω μιας σύνθετης συνάρτησης της απόστασης μεταξύ των πηνίων  $s$ , της συχνότητας λειτουργίας  $f$  και της αγωγιμότητας του υπεδάφους  $\sigma$ . Ωστόσο, μπορεί να αποδειχθεί ότι, αν το πηλίκο του  $s$  δια του βάθους διείσδυσης  $d$ , γνωστό ως «αριθμός επαγωγής», είναι πολύ μικρότερο από την μονάδα, τότε ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{H_s}{H_p} \approx \frac{i\omega\sigma s^2}{4} \quad (2.5)$$

Όπου,  $H_s$  και  $H_p$  είναι τα πλάτη του δευτερογενούς και πρωτογενούς EM ηλεκτρομαγνητικών πεδίων αντίστοιχα,  $\omega=2\pi f$ ,  $\mu_0$  είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, και η παρουσία του  $i = (-1)^{1/2}$ , δείχνει ότι μετράται η εκτός φάσης (φανταστική) συνιστώσα. Έτσι, η αναλογία  $H_s/H_p$  είναι ανάλογη με την αγωγιμότητα του εδάφους  $\sigma$ . Δεδομένου ότι το  $d$  εξαρτάται από το γινόμενο  $\sigma f$ , εκτίμηση της μέγιστης πιθανής τιμής του  $\sigma$ , μας επιτρέπει την επιλογή του  $f$ , έτσι ώστε η ανωτέρω προϋπόθεση για χαμηλό «αριθμό επαγωγής» ικανοποιείται. Το βάθος διείσδυσης εξαρτάται από το  $s$  και είναι ανεξάρτητο από την κατανομή της αγωγιμότητας του υπεδάφους. Μετρήσεις που λαμβάνονται με χαμηλό «αριθμό επαγωγής», δίνουν την φαινόμενη αγωγιμότητα  $\sigma_a$  :

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega\mu_0 s^2} \times \frac{H_s}{H_p} \quad (2.6)$$

Η παραπάνω σχέση επιτρέπει την κατασκευή των ηλεκτρομαγνητικών οργάνων που παρέχουν άμεση ανάγνωση της αγωγιμότητας εδάφους σε ένα προκαθορισμένο βάθος. Μια τέτοια εφαρμογή του πομπού – δέκτη τοποθετημένων σε έναν βραχίονα 3,7m μεταξύ τους, παρέχοντας ένα σταθερό βάθος διείσδυσης περίπου 6m, είναι το όργανο

CMD4. Το όργανο αυτό επιτρέπει την γρήγορη εκτέλεση έρευνας κατά μήκος γραμμών σε βάθος χρήσιμο για τους μηχανικούς και για αρχαιολογικές έρευνες. Όταν ένα μεγαλύτερο βάθος διεύθυνσης απαιτείται, ένα άλλο σύστημα μέτρησης χρησιμοποιείται με τα πηνία πομπού και δέκτη σε μεταβαλλόμενη απόσταση ανάλογα με το βάθος. Μεταβάλλοντας την απόσταση, άρα και το βάθος, διενεργούμε ηλεκτρομαγνητική βυθοσκόπηση.

Παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υπεδάφους είναι :

- Πετρολογία περιοχής
- Παρουσία αργίλων που είναι πολύ αγωγάμοι
- Υγρασία
- Πορώδες
- Αγωγιμότητα του υπεδάφους ύδατος
- Στρωματογραφία
- Πρόσκαιρες αλλαγές στην αγωγιμότητα του υπεδάφους, λόγω αλλαγής της υγρασίας, της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, της θερμοκρασίας
- Πρόσθεση ή αφαίρεση διαλελυμένων ρυπαντών

Η σε φάση συνιστώσα είναι η άλλη μέτρηση του οργάνου. Ορίζεται σαν σχετική ποσότητα σε ppt (part per thousand), μέρος ως προς χίλια, του πρωτογενούς μαγνητικού πεδίου και είναι άμεσα συσχετιζόμενο με την μαγνητική επιδεκτικότητα του μετρούμενου υλικού. Η σε φάση συνιστώσα παρέχει την ένδειξη παρουσίας μεταλλικών αντικειμένων, όπως καλωδίων, αγωγών, πλέγματος από μπετόν, δεξαμενών, κλπ. Έτσι μπορεί κανείς με τη σε φάση συνιστώσα να διακρίνει μεταξύ των τεχνητών κατασκευών από την γεωλογία της περιοχής που αποτυπώνεται από τον χάρτη φαινόμενης αγωγιμότητας.

### **CMD – EM**

Το όργανο CMD μετράει την φαινόμενη αγωγιμότητα και την in – phase μέτρηση, ανάλογη της μαγνητικής επιδεκτικότητας, σε ένα συγκεκριμένο βάθος ανάλογα με τη διαμόρφωση. Οι τυπικές εφαρμογές του οργάνου είναι :

- Στη γεωτεχνική έρευνα (αξιολόγηση βραχώδους υποβάθρου, αποτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων, κλπ)

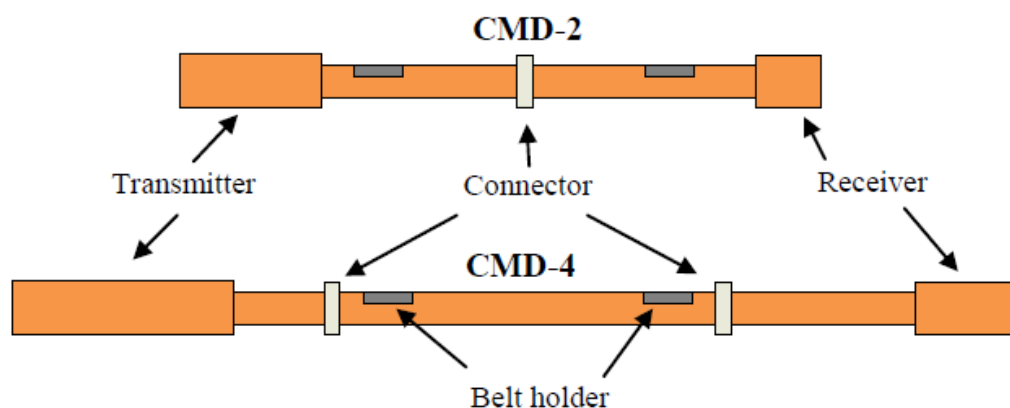
- Στη γεωλογική χαρτογράφηση περιοχών (αναζήτηση κοιτασμάτων, γεωλογική έρευνα, εντοπισμός σπηλαιωμάτων, κλπ)
- Στη γεωργία (προσδιορισμός ποιότητας εδάφους, διαχείριση νερού και λιπασμάτων)
- Στην αρχαιολογία (εντοπισμός τοιχίων, ιστορική έρευνα σπηλαιωμάτων, εντοπισμός υπόγειων στοών, κλπ)
- Για περιβαλλοντικούς σκοπούς (σε υδρογεωλογικές εφαρμογές, σε σημεία ρύπανσης, για διαχείριση νερού λεκανών)



**Σχήμα 2.5 :** Χειριστήριο ηλεκτρομαγνητικού οργάνου CMD4

Το όργανο CMD μπορεί με την κατάλληλη σύνδεση με GPS όργανο να παρέχει και τα στοιχεία γεωγραφικών συντεταγμένων της κάθε θέσης μέτρησης.

Στην περιοχή έρευνας χρησιμοποιήθηκε διαφορικό GPS Leisa πραγματικού χρόνου.



*Σχήμα 2.6: Ηλεκτρομαγνητικά όργανα μέτρησης CMD2, CMD4*

Τα πλεονεκτήματα του μηχανήματος είναι η ταχύτητά του (απόκριση σχεδόν 0,1s), η δυνατότητα για δύο βάθη διασκόπησης αλλά και η άμεση σύνδεσή του με GPS για γρήγορο προσδιορισμό αλλά και αποθήκευση δεδομένων υψομέτρου και γεωγραφικού πλάτους και μήκους σε κάθε σημείο μέτρησης.

Σε συνεχείς μετρήσεις, όταν δηλαδή το όργανο μετακινείται συνεχώς στην περιοχή της έρευνας, η μετρούμενη αγωγιμότητα και η μαγνητική επιδεκτικότητα υπολογίζονται ως μέσος όρος των τιμών που μετρήθηκαν σε κάθε θέση, σε κάθε στιγμή μέτρησης. Λάθος κατά την μέτρηση υπολογίζεται ως τυπική απόκλιση. Το CMD επιτρέπει τον αυτόματο έλεγχο σφάλματος. Ο χρήστης μπορεί να ορίσει το μέγιστο αποδεκτό όριο σφάλματος (<1%, <2%, <5%, 10%) και σε αυτή την περίπτωση η μέτρηση επιμηκύνεται στο διπλάσιο.

### 2.3 Ηλεκτρικές Μέθοδοι

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης του υπεδάφους βασίζονται στην ανίχνευση φυσικών φαινομένων μέσω της υπεδαφικής ροής ηλεκτρικού ρεύματος. Χρησιμοποιώντας τις ηλεκτρικές μεθόδους μετρώνται διαφορές δυναμικού, ρεύματα και ηλεκτρομαγνητικά πεδία που υπάρχουν φυσικά ή εισάγονται τεχνητά στη γη.

Χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα ή εναλλασσόμενο χαμηλής συχνότητας, προκειμένου να ανιχνευθούν οριζόντιες και κατακόρυφες διαφοροποιήσεις των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους.

Στις ηλεκτρικές μεθόδους οι ιδιότητες των ορυκτών και των πετρωμάτων που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα ( ή το αντίστροφο της, η ηλεκτρική ειδική αντίσταση), το φυσικό ηλεκτρικό δυναμικό, η διηλεκτρική σταθερά και η μαγνητική επιδεκτικότητα (σαν έμμεσος παράγοντας).

Ανάλογα με την χρησιμοποίηση φυσικών ή τεχνητών πεδίων γίνεται διάκριση των ηλεκτρικών μεθόδων σε παθητικές και ενεργητικές. Μια περίληψη των πιο γνωστών αυτών δίνεται παρακάτω.

#### Παθητικές μέθοδοι

- Μέθοδος του Φυσικού Δυναμικού (Self Potential Method).

Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις των φυσικών ηλεκτρικών δυναμικών, τα οποία, είτε σχετίζονται με την αποσάθρωση κοιτασμάτων σουλφιδίων, είτε είναι ηλεκτροκινητικής ή γεωθερμικής προέλευσης. Εφαρμόζεται σε υδρογεωλογικές ή γεωθερμικές έρευνες.

- Μαγνητοτελλουρική Μέθοδος (Magnetotelluric Method).

Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις φυσικών τελλουρικών ρευμάτων, τα οποία παράγονται από μαγνητική επαγωγή ηλεκτρικών ρευμάτων στην ιονόσφαιρα. Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών, τα οποία βρίσκονται σε σχετικά μεγάλα βάθη-μέχρι και τον μανδύα-μέσα στη γη.

#### Ενεργητικές μέθοδοι

- Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (DC Resistivity Method).

Χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό δυναμικό που σχετίζεται με την υπόγεια ροή ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από πηγή συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το μετρούμενο δυναμικό, και μπορούν επομένως να χαρτογραφηθούν με χρήση της μεθόδου, περιλαμβάνουν την παρουσία και ποιότητα των ρευστών, των πόρων και των

αργίλων. Χρησιμοποιείται ευρέως σε υδρογεωλογικές, περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές μελέτες, με μέσα βάθι διασκόπησης.

- Μέθοδος της Επαγόμενης Πολικότητας (Induced Polarization Method).

Πραγματοποιείται σε συνδυασμό με τη μέθοδο της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης. Χρησιμοποιεί μετρήσεις των παροδικών (βραχύβιων) χρονικών μεταβολών του δυναμικού όταν, το ρεύμα που αρχικά διαβιβάζεται, παύει να διαβιβάζεται, στο έδαφος. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό συγκεντρώσεων αργίλων και ηλεκτρικά αγώγιμων κόκκων μεταλλικών ορυκτών.

Μία ακόμη ενεργητική γεωηλεκτρική μέθοδος που χρησιμοποιείται σε γεωφυσικές έρευνες είναι η Μέθοδος Ηλεκτρομαγνητισμού ( Electromagnetic Method). Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις ενός χρονικά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου που παράγεται από επαγωγή λόγω της ροής ρεύματος μέσα στη γη. Ο ηλεκτρομαγνητισμός χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό αγώγιμων μεταλλικών δομών και κοιτασμάτων μετάλλων, για τον εντοπισμό θαμμένων σωλήνων και καλωδίων, για την ανίχνευση πυρομαχικών που δεν έχουν εκραγεί και για τη γεωφυσική χαρτογράφηση κοντά στην επιφάνεια.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτές της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης συνεχούς ρεύματος (DC Resistivity Method) και της Επαγόμενης Πολικότητας (Induced Polarization Method).

### **2.3.1 Ηλεκτρικά Δυναμικά**

Τα φυσικά δυναμικά του υπεδάφους οφείλονται σε ηλεκτροχημική ή μηχανική δραστηριότητα. Ο βασικός παράγοντας σε όλες τις περιπτώσεις είναι τα υπόγεια νερά. Τα φυσικά δυναμικά σχετίζονται με την εξαλλοίωση των σουλφιδικών ορυκτών, με την αλλαγή των γεωλογικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων, με τη βιοηλεκτρική δραστηριότητα των οργανικών υλικών, με τη διάβρωση, με τις διαφορές θερμότητας και πίεσης στα υπόγεια ρευστά κτλ.

Ορίζονται 5 τύποι φυσικών δυναμικών, ο πρώτος εκ των οποίων είναι μηχανικής προέλευσης ενώ οι υπόλοιποι χημικής προέλευσης.

A) Ηλεκτροκινητικό Δυναμικό. Όταν διάλυμα ειδικής αντίστασης  $\rho$  και ιξώδους  $\eta$  αναγκάζεται να περάσει δια μέσου εγκοίλων ή πόρων, παρατηρείται στα άκρα τους διαφορά δυναμικού.

B) Δυναμικό Διάχυσης. Οφείλεται στη διαφορά ευκινησίας των διαφόρων ιόντων σε διαλύματα διαφορετικών συγκεντρώσεων.

Γ) Δυναμικό Nerst. Όταν δύο όμοια μεταλλικά ηλεκτρόδια βυθίζονται σε διαλύματα διαφορετικών συγκεντρώσεων προκύπτει διαφορά δυναμικού μεταξύ τους.

Δ) Δυναμικό Ορυκτογένεσης. Όταν δύο διαφορετικά μεταλλικά ηλεκτρόδια βυθίζονται σε ομογενές διάλυμα, τότε δημιουργείται μεταξύ τους διαφορά δυναμικού. Το δυναμικό αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο σε ζώνες που έχουν σουλφίδια των μετάλλων, γραφίτη και μερικές φορές οξειδία των μετάλλων όπως μαγνητίτη.

E) Φυσικό Δυναμικό συσχετιζόμενο με παρουσία γεωθερμικών πεδίων. Η αύξηση της θερμοκρασίας και η κυκλοφορία των υπογείων ρευστών που είναι χαρακτηριστικά γεωθερμικών συστημάτων, είναι ικανά να δημιουργήσουν επιφανειακά δυναμικά. Αν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας σε ένα δείγμα πετρώματος, τότε παρουσιάζεται διαφορά δυναμικού.

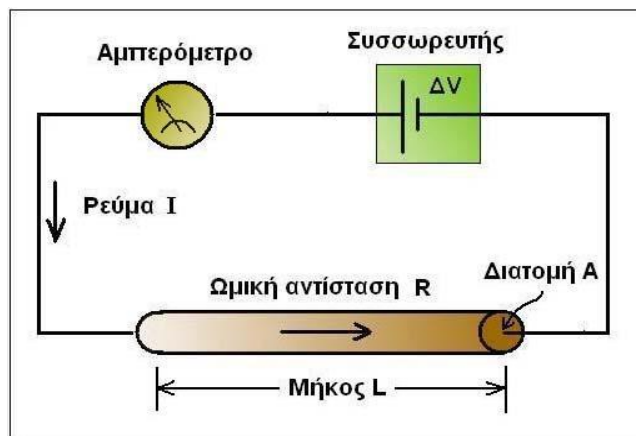
### 2.3.2 Ηλεκτρική Ειδική Αντίσταση – Νόμος του Ohm.

Το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται μέσα στα πετρώματα και τα ορυκτά με τρεις τρόπους: ηλεκτρονικά (ωμικά), ηλεκτρολυτικά και διηλεκτρικά. Στην πρώτη περίπτωση η ροή ρεύματος στα υλικά περιέχει ελεύθερα ηλεκτρόνια (μέταλλα). Στον ηλεκτρολύτη το ρεύμα μεταφέρεται μέσω ιόντων με σχετικά χαμηλό ρυθμό. Η διηλεκτρική αγωγιμότητα λαμβάνει χώρα σε φτωχούς αγωγούς ή μονωτές όπου τα ατομικά ηλεκτρόνια κάτω από την επίδραση εξωτερικού πεδίου μετακινούνται σχετικά με τον πυρήνα.

Σύμφωνα με το Νόμο του Ohm, σε έναν κυλινδρικό αγωγό (**Σχήμα 2.7**) μήκους  $L$  και διατομής  $A$ , που διαρρέεται από ρεύμα  $I$  και στα άκρα του μετράται διαφορά δυναμικού  $\Delta V$ , η ηλεκτρική αντίσταση  $R$  δίνεται από τον τύπο :

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.7)$$

όπου,  $\Delta V$  είναι η τάση σε (Volt) και  $I$  η ένταση του ρεύματος σε (Ampere). Η ηλεκτρική ωμική αντίσταση  $R$  έχει ως μονάδα μέτρησης το Ohm.



*Σχήμα 2.7 : Σχηματική απεικόνιση του Νόμου του Ohm (Μαυρομμάτης 2007)*

Η ηλεκτρική ειδική αντίσταση, συμβολίζεται με το γράμμα  $\rho$ , θεωρείται θεμελιώδης παράμετρος του υλικού που είναι κατασκευασμένος ο αγωγός και περιγράφει την ευκολία του αγωγού να διαβιβάσει ηλεκτρικό ρεύμα. Δίνεται από τον τύπο :

$$\rho = \frac{RA}{L} \text{ ( Ohm } \cdot \text{ m)} \quad (2.8)$$

Όπου,  $R$  η ηλεκτρική ωμική αντίσταση σε Ohm,  $A$  η διατομή του αγωγού σε  $m^2$  και  $L$  το μήκος του κυλινδρικού αγωγού σε  $m$ .

### 2.3.3 Πετρώματα και ηλεκτρική ειδική αντίσταση

Η πλειοψηφία των πετρωμάτων είναι κακοί αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος και οι ειδικές αντιστάσεις τους θα ήταν πολύ υψηλές αν δεν είχαν πόρους με ρευστά, κυρίως νερό. Η διακύμανση της ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτάται σχεδόν εξ ολοκλήρου από το ποσό της υγρασίας στο έδαφος. Χονδρόκοκκα και καλά στραγγισμένα εδάφη (χαλίκια, άμμος) παρουσιάζουν σχετικά υψηλή αντίσταση, ενώ λεπτόκοκκα εδάφη (άργιλοι, ιλύς) που περιέχουν περισσότερη υγρασία παρουσιάζουν μικρότερη αντίσταση.



Δίνεται ο εμπειρικός τύπος υπολογισμού της ειδικής αντίστασης ενός μέσου κατά **Archie**:

$$\rho = \alpha \cdot \phi^{-m} \cdot s^{-n} \cdot \rho_w \quad (2.9)$$

όπου,

$\alpha, m$  : σταθερές ( $0.5 \leq \alpha \leq 2.5$  ,  $1.3 \leq m \leq 2.5$ ) ,  $n \approx 2$

$\phi$  : το ποσοστό όγκου των πόρων ( πορώδες)

$s$  : το ποσοστό πόρων που περιέχουν νερό

$\rho_w$  : η ειδική αντίσταση του νερού

Παρακάτω αναφέρονται οι σημαντικότεροι παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν τις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης πετρωμάτων και ορυκτών :

A) Είδος πετρώματος : Κάθε είδος ορυκτού, εδάφους ή πετρώματος χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο εύρος τιμών ειδικής αντίστασης. Τα πυριγενή πετρώματα παρουσιάζουν, γενικά ,τις υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, ενώ τα ιζηματογενή τις χαμηλότερες, λόγω – συνήθως – υψηλού περιεχόμενου τους σε ρευστά. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα παρουσιάζουν ενδιάμεσες τιμές, με έντονες, όμως, τάσεις αλληλεπικάλυψης. Ενδεικτικές τιμές διαφόρων υλικών φαίνονται στον **Πίνακα 2.1** που ακολουθεί.

Πίνακας 2.1 : Ειδική ηλεκτρική αντίσταση διαφόρων υλικών ( Λούης 2004)

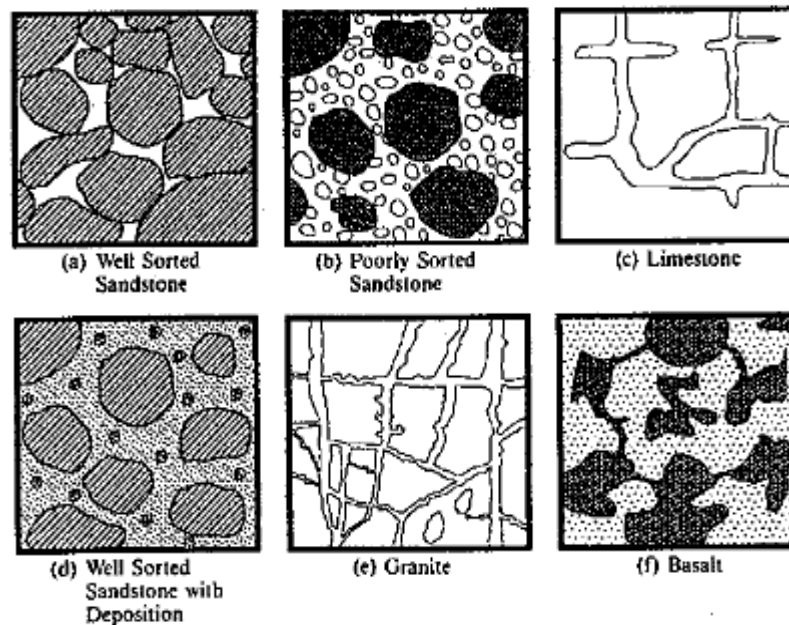
ΥΛΙΚΟ	ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ( $\Omega \cdot m$ )
Αέρας	$\infty$
Μαρμαρυγίας	$9 \times 10^{12} - 1 \times 10^{14}$
Χαλαζίας	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
Ασβεστίτης	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
Ορυκτό άλας	$30 - 1 \times 10^{13}$
Σιδηροπυρίτης	$3 \times 10^{-1}$
Γαληνίτης	$2 \times 10^{-3}$
Γάββρος	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$
Συμπαγής Γρανίτης	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^6$
Αποσαθρωμένος Γρανίτης	$1 - 1 \times 10^2$
Ασβεστόλιθος	$50 - 1 \times 10^7$
Βασάλτης	$10 - 1 \times 10^7$
Ψαμμίτης	$1 - 1 \times 10^8$
Σχιστόλιθος	$20 - 2 \times 10^3$
Δολομίτης	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^4$
Άμμος	$1 - 1 \times 10^3$
Άργιλος	$1 - 1 \times 10^2$
Εδαφικό Νερό	0,5 – 300
Θαλασσινό Νερό	0,2

B) Δομή και Πορώδες: Όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες ενός πετρώματος, τόσο μικρότερη είναι και η ειδική ηλεκτρική του αντίσταση.

Σύμφωνα με το **Σχήμα 2.8** μπορούμε να διαπιστώσουμε τα ακόλουθα:

- Ο κοκκομετρικά ταξινομημένος ψαμμίτης (well sorted sandstone) έχει μεγάλα κενά και, συνεπώς, παρουσιάζει χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης (**Σχήμα 2.8.a**).
- Ο μη ταξινομημένος ψαμμίτης (poorly sorted sandstone) έχει πολύ μικρότερο πορώδες και, επομένως χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερες τιμές ειδικής αντίστασης (**Σχήμα 2.8.b**).
- Η διάλυση του ασβεστολίθου (limestone) κατά μήκος των ρωγμών του, αυξάνει το πορώδες και, κατά συνέπεια μειώνει τις τιμές της ειδικής αντίστασης (**Σχήμα 2.8.c**).
- Η απόθεση ορυκτών σε οποιοδήποτε πέτρωμα μειώνει το πορώδες του, αυξάνοντας την ειδική αντίστασή του (**Σχήμα 2.8.d**).

- e. Ένα πέτρωμα με την γρανιτική υφή θα άγει τον ηλεκτρισμό μέσω διακλάσεων και κατά μήκος των ορίων γωνιωδών κόκκων, έχοντας μικρό πορώδες και συνεπώς υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης (**Σχήμα 2.8.e**).
- f. Ο βασάλτης (basalt) έχει κενούς χώρους που σπάνια συνδέονται μεταξύ τους, καθιστώντας το σχηματισμό ελάχιστα περατό. Επομένως, ακόμα και στην περίπτωση που αυτός χαρακτηρίζεται από μεγάλο πορώδες, παρουσιάζει υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης (**Σχήμα 2.8.f**).



**Σχήμα 2.8 :** Σχηματική απεικόνιση δομής και πορώδους διαφόρων πετρωμάτων (Stanley H.Ward 1990)

Γ) 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.

Δ) Επιδράσεις γεωλογικών διεργασιών : Στον **Πίνακα 2.2** που ακολουθεί, δίνονται οι επιδράσεις διαφόρων γεωλογικών διεργασιών στις ειδικές αντιστάσεις των πετρωμάτων. Κατά κανόνα, οι γεωλογικές διεργασίες μειώνουν την ειδική αντίσταση, αλλά υπάρχουν εξαιρέσεις.

**Πίνακας 2.2:** Επίδραση γεωλογικών διεργασιών στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση (Αποστολόπουλος 2008).

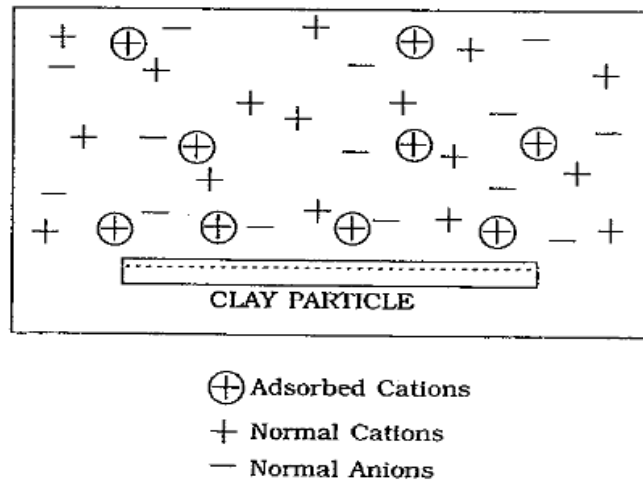
ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ
Αργιλική εξαλλοίωση	Ελάττωση
Διάλυση	Ελάττωση
Ρηγματώση	Ελάττωση
Εισροή θαλασσινού νερού	Ελάττωση
Διάτμηση	Ελάττωση
Αποσάθρωση	Ελάττωση
Σκλήρυνση	Αύξηση
Ιζηματοποίηση	Αύξηση
Απολίθωση	Αύξηση
Μεταμόρφωση	Αύξηση ή Ελάττωση

Ε) Ηλικία πετρώματος : Τα παλαιότερα πετρώματα τείνουν να παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

ΣΤ) Επιδράσεις αργιλικών ορυκτών : Τα αργιλικά ορυκτά δρουν συμπληρωματικά στον χάρτη των αγωγιμοτήτων. Η ηλεκτρική ειδική αντίστασή τους είναι χαμηλή. Η προέλευση αυτής της πολύ υψηλής αγωγιμότητας των αργίλων οφείλεται στη διπλή στρώση ανταλλαγής κατιόντων, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.9**. Τα κατιόντα χρησιμεύουν στην εξισορρόπηση του φορτίου λόγω της υποκατάστασης εντός του κρυσταλλικού πλέγματος και για να «σπάσουν» τους δεσμούς. Το πεπερασμένο μέγεθος των κατιόντων εμποδίζει το σχηματισμό μονού στρώματος. Αντίθετα, σχηματίζεται διπλό στρώμα. Αποτελείται από ένα συμπαγή στρώμα δίπλα από την επιφάνεια της αργίλου και ένα διάχυτο στρώμα που η πυκνότητά του μειώνεται εκθετικά σε σχέση με την απόσταση από το συμπαγή στρώμα.

Το διάχυτο στρώμα, σε σύγκριση με το συμπαγές, κινείται ελεύθερα κάτω από την επιρροή ηλεκτρικού πεδίου. Τα κατιόντα του διάχυτου στρώματος, προστίθενται στη συγκέντρωση των κανονικών ιόντων και έτσι αυξάνεται η πυκνότητα των ηλεκτρικών φορτίων. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η διευρυμένη επιφάνεια αγωγιμότητας. Τα αργιλικά ορυκτά παρουσιάζουν αυτή την ιδιότητα σε μεγάλο βαθμό, εξαιτίας της ικανότητάς τους να ανταλλάσσουν ιόντα σε μεγάλο βαθμό. Οι ζεόλιθοι επίσης παρουσιάζουν αυτή την ιδιότητα, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό. Ωστόσο, όλα τα ορυκτά το παρουσιάζουν σε

ένα βαθμό. Όμως, όλα τα πετρώματα που περιέχουν αργιλικά ορυκτά παρουσιάζουν αυξημένη αγωγιμότητα.



**Σχήμα 2.9 :** Σχηματική αναπαράσταση των ιόντων που απορροφούνται από ένα αργιλικό τεμαχίδιο ( Stanley H.Ward 1990).

Η επίδραση της εξαλλοίωσης των αργιλικών ορυκτών είναι πολύ σημαντική για την ειδική αντίσταση του πετρώματος, καθώς η αγωγιμότητα διαμέσου των πόρων μειώνεται. Η υδροθερμική εξαλλοίωση μετατρέπει τους άστριους σε καοлинίτη, μοντμοριλλονίτη και σε άλλα αργιλικά ορυκτά, ειδικά σε πυριτικά πετρώματα. Σε βασικά πετρώματα, μπορεί να δημιουργηθεί χλωρίτης ή και οφιόλιθος. Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα εξαλλοίωσης, παρουσιάζουν αυξημένη αγωγιμότητα.

**Z) Βαθμός κορεσμού:** Ο βαθμός κορεσμού εκφράζει το επί τοις εκατό ποσοστό του συνολικού όγκου των κενών του πετρώματος που καταλαμβάνεται από ρευστά.

Το ποσοστό του νερού κορεσμού  $S_w$  ορίζεται ως εξής :

$$S_w = \frac{\text{όγκος νερού στους πόρους του πετρώματος}}{\text{συνολικός όγκος των πόρων του πετρώματος}} \quad (2.10)$$

Εμπειρικά, προκύπτει ότι :

$$F = \frac{\alpha \phi^{-m}}{S_w^n} \quad (2.11)$$

ή

$$\rho_r = \frac{\rho_w \alpha \phi^{-m}}{S_w^n} \quad (2.12)$$

Δηλαδή, η ειδική αντίσταση του πετρώματος μειώνεται, όταν αυξάνεται το ποσοστό κορεσμού των πόρων του πετρώματος με νερό. Συνήθως η εξίσωση (2) συναντάται με τη μορφή :

$$S_w^n = \frac{a\rho_w}{\varphi^m\rho_r} \quad (2.13)$$

και αναφέρεται στην εξίσωση του *Archie*.

Μέσω της ανωτέρω εξίσωσης, συμπεραίνουμε ότι εάν τα  $\rho_w$ ,  $\rho_r$ , και  $\varphi$  μπορούν να υπολογιστούν ανεξάρτητα μεταξύ τους και τα  $a$  και  $m$  να υπολογιστούν εμπειρικά, τότε το  $S_w^n$  μπορεί να βρεθεί μέσω των μετρήσεων με τα ηλεκτρικά. Αυτή η παρατήρηση είναι πολύ σημαντική για διασκόπηση κάτω από νερό. Ο εκθέτης κορεσμού  $n$  είναι συνήθως ίσος με 2, αλλά στη πράξη μπορεί και να διαφοροποιείται ελάχιστα.

Όταν υπάρχουν αργιλικά ορυκτά, εξισώσεις όπως του *Simandoux* μπορούν να

χρησιμοποιηθούν : 
$$\frac{1}{\rho_{cl}} = \frac{V_{cl}}{\rho_{cl}} S_w + \frac{\varphi^m}{a\rho_w} S_w^2 \quad (2.14),$$

Όπου,

$\rho_r$  : ειδική αντίσταση του πετρώματος

$\rho_w$  : ειδική αντίσταση του νερού στους πόρους

$a, m$  : συντελεστές της εξίσωσης *Archie*

$\varphi$  : κλασματικό πορώδες

$S_w$  : κλασματικός βαθμός κορεσμού νερού

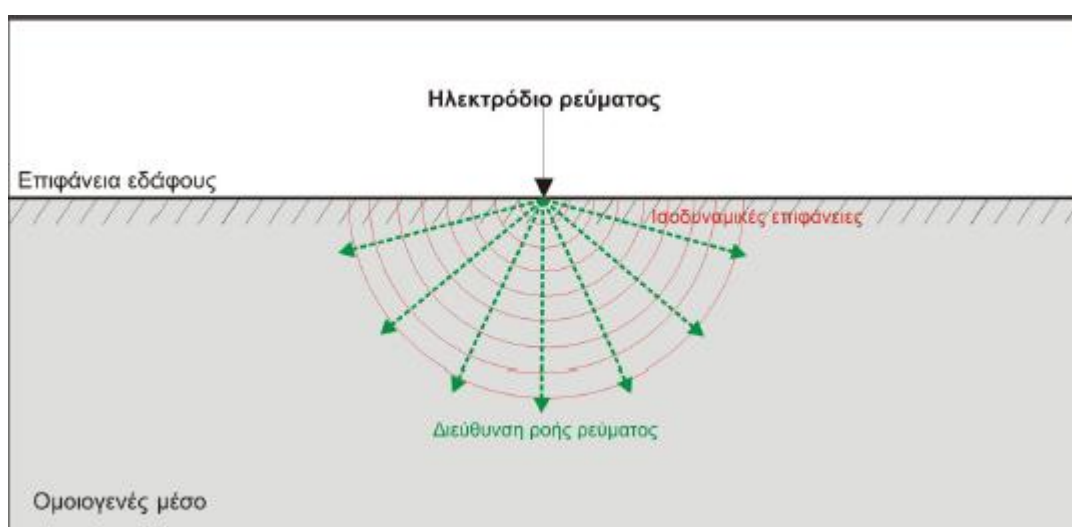
$V_{cl}$  : όγκος διακένων στην άργιλο

$\rho_{cl}$  : ειδική αντίσταση ρωγμάτωσης

Η) Θερμοκρασία : Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος. Αυτός ο παράγοντας, ωστόσο, έχει τόσο μικρή επίδραση, ώστε διαδραματίζει αξιοσημείωτο ρόλο μόνο σε γεωθερμικά συστήματα και όχι σε γεωτεχνικές ή περιβαλλοντικές μελέτες.

### 2.3.4 Μέθοδος της Ηλεκτρικής Ειδικής Αντίστασης - Ηλεκτρόδιο Ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο

Σε αντίθεση με τον άπειρο ομογενή χώρο, όπου η τοποθέτηση του ηλεκτροδίου γίνεται βαθιά μέσα σε ομογενές και ισότροπο μέσο, στον ημιάπειρο ομογενή χώρο το ηλεκτρόδιο τοποθετείται στην επιφάνεια του ηλεκτρικά ομογενούς μέσου. Έτσι το επιφανειακό ηλεκτρόδιο  $C_1$  (σημειακή πηγή ρεύματος) συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου  $C_2$ , το οποίο τοποθετείται επίσης στην επιφάνεια, αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση. Αυτό γίνεται ώστε η επίδρασή του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα.



**Σχήμα 2.10 :** Αναπαράσταση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος από σημειακή πηγή (πράσινες γραμμές) σε ομοιογενές μέσο και των ισοδυναμικών γραμμών (με κόκκινο).

Οι γραμμές ροής του ρεύματος είναι ακτινικές και ξεκινούν από τη σημειακή πηγή, κατευθυνόμενες προς τα έξω. Επίσης, η πτώση τάσης (διαφορά δυναμικού) που προκαλείται από την ηλεκτρική αντίσταση του μέσου, σε διάφορες αποστάσεις από το ηλεκτρόδιο ρεύματος, παραμένει σταθερή κατά μήκος ημικυκλικών γραμμών, οι οποίες έχουν ως κέντρο το ηλεκτρόδιο. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται ισοδυναμικές γραμμές και στις τρεις διαστάσεις σχηματίζουν ημισφαιρικές επιφάνειες, με κέντρο το ηλεκτρόδιο.

Εάν η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο ισοδυναμικών επιφανειών είναι  $dV$  και απέχουν απόσταση  $dr$  τότε από τις σχέσεις :

$$R = \frac{dV}{I} \quad (2.15)$$

και

$$R = \rho \frac{dr}{A} \quad (2.16)$$

Όπου,  $\rho$  η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του μέσου και  $A$  η επιφάνεια ημισφαιρίου, δηλαδή  $A = 2\pi r^2$  και, προκύπτει :

$$\frac{dV}{I} = \rho \frac{dr}{A} \leftrightarrow \frac{dV}{dr} = \rho \frac{I}{A} = \rho \frac{I}{2\pi \cdot r^2} \leftrightarrow dV = \rho \frac{I}{2\pi \cdot r^2} dr \quad (2.17)$$

Με ολοκλήρωση της σχέσης (2.17) προκύπτει :

$$\int dV = \int \rho \frac{I}{2\pi \cdot r^2} dr \leftrightarrow V = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \int \frac{1}{r^2} dr \leftrightarrow V = \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot r} \quad (2.18)$$

Όπου,  $V$  το δυναμικό που δημιουργείται σε σημείο του χώρου λόγω της σημειακής πηγής ρεύματος και  $r$  η απόσταση του σημείου από τη σημειακή πηγή.

Οι διαφορές δυναμικού μεταξύ δύο οποιονδήποτε σημείων του μέσου μπορούν να υπολογιστούν απλά, αφαιρώντας τα δυναμικά των δύο ισοδυναμικών γραμμών, οι οποίες διέρχονται από τα σημεία αυτά.

### 2.3.4.1 Δύο ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια ημιάπειρου ομογενούς χώρου

Στην περίπτωση δύο ηλεκτροδίων ρεύματος, όταν η απόσταση μεταξύ τους είναι πεπερασμένη, το δυναμικό σε κοντινό σημείο της επιφάνειας επηρεάζεται και από τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος.

Από τη σχέση (2.18) έχουμε ότι το δυναμικό στο σημείο  $P_1$  λόγω του ηλεκτροδίου ρεύματος  $C_1$  είναι :

$$V_1 = \frac{I \cdot \rho}{2\pi \cdot r^2} \quad (2.19)$$

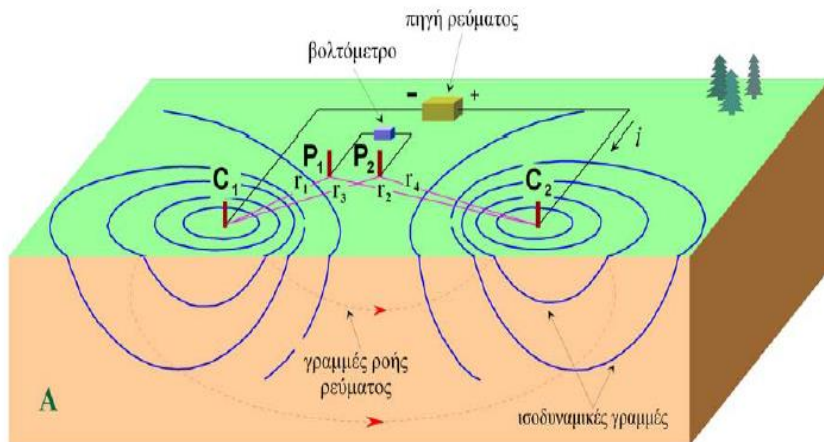
και αντίστοιχα το δυναμικό στο σημείο  $P_1$  λόγω του ηλεκτροδίου ρεύματος  $C_2$  είναι:

$$V_2 = -\frac{I \cdot \rho}{2\pi \cdot r^2} \quad (2.20)$$

Επομένως, επειδή τα ρεύματα στα δύο ηλεκτρόδια είναι ίσα και αντίθετης πολικότητας έχουμε:

$$V_1 + V_2 = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \left( \frac{1}{r^1} - \frac{1}{r^2} \right) \quad (2.21)$$





**Σχήμα 2.11** : Ροή ρεύματος και ισοδυναμικές επιφάνειες σε ημίπειρο ομογενή χώρο με δύο σημειακές πηγές (Λούης 2004).

Αν έχουμε δεύτερο ηλεκτρόδιο δυναμικού στο σημείο P<sub>2</sub> μπορούμε να μετρήσουμε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ P<sub>1</sub> και P<sub>2</sub>, οπότε :

$$\Delta V = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \quad (2.22)$$

και

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{2 \cdot \pi}{\left\{ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\}} = \frac{\Delta V}{I} \cdot k \quad (2.23)$$

όπου, k ορίζεται ως γεωμετρικός παράγοντας που εξαρτάται από τις σχετικές θέσεις των ηλεκτροδίων.

### 2.3.5 Φαινόμενη ειδική αντίσταση

Σε ομογενές και ισότροπο μέσο, η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση από τη Σχέση (2.23) θα είναι σταθερή και ανεξάρτητη των σχετικών θέσεων των τεσσάρων ηλεκτροδίων και θα ισούται με την ειδική αντίσταση του μέσου.

Σε ανομοιογενές όμως μέσο, η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση με τη **Σχέση (2.23)** ποικίλει ανάλογα με τις σχετικές θέσεις των ηλεκτροδίων και λέγεται φαινόμενη ειδική αντίσταση.

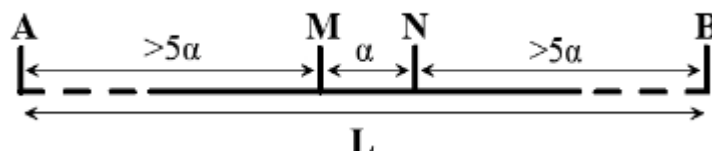
Η φαινόμενη ειδική αντίσταση που μετράμε  $\{\rho_a = k * (\Delta V/I)\}$  για κάθε θέση ή/και διεύθυνση της διάταξης ηλεκτροδίων, δεν είναι αντιπροσωπευτική ούτε της πραγματικής ειδικής αντίστασης μέρους του υπεδάφους, ούτε μιας μέσης τιμής των πραγματικών ειδικών αντιστάσεων των διαφόρων μέσων του υπεδάφους. Μεταβάλλεται όμως συστηματικά ανάλογα με τη γεωλογική τομή και κατανομή των ειδικών αντιστάσεων των στρωμάτων που διαρρέουν οι ρευματικές γραμμές και είναι αντιπροσωπευτική και των στρωμάτων του υπεδάφους και των αγώγιμων ή μη ανομοιογενειών.

### 2.3.6 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της κατανομής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Με τη μέθοδο της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης εισάγεται ηλεκτρικό ρεύμα στο υπέδαφος με τη χρήση δύο ηλεκτροδίων ρεύματος και μετράται η τάση σε δύο άλλα ηλεκτρόδια δυναμικού.

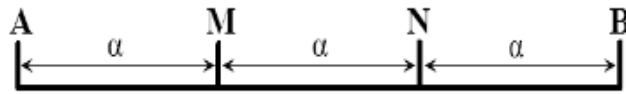
Ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού και τις μεταξύ τους αποστάσεις, έχουμε τις κάτωθι διατάξεις ηλεκτροδίων:

- Διάταξη Schlumberger : Τα ηλεκτρόδια ρεύματος (A,B) και δυναμικού (M,N) βρίσκονται συμμετρικά από το κέντρο της διάταξης απέχοντας αποστάσεις L και α αντίστοιχα.



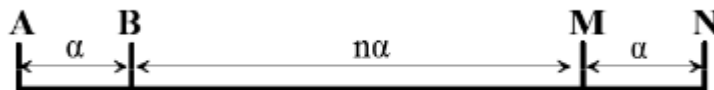
**Σχήμα 2.12** : Διάταξη Schlumberger (Σιμυρδάνης 2009)

- Διάταξη Wenner : Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση  $a$ .



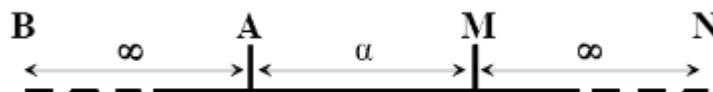
*Σχήμα 2.13: Διάταξη Wenner*

- Διάταξη Dipole-Dipole : Τα ηλεκτρόδια ρεύματος απέχουν απόσταση  $a$ , όσο απέχουν και τα ηλεκτρόδια δυναμικού, ενώ τα δίπολα μεταξύ τους απέχουν απόσταση πολλαπλάσια της απόστασης  $a$  ( $na$ ).



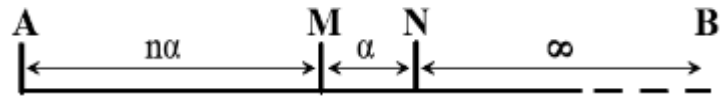
*Σχήμα 2.14 : Διάταξη Dipole-Dipole*

- Διάταξη Pole-Pole : Ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχουν απόσταση  $a$ , ενώ τα άλλα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού απέχουν πολύ μεγάλη απόσταση από τα δύο κοντίνα ηλεκτρόδια.



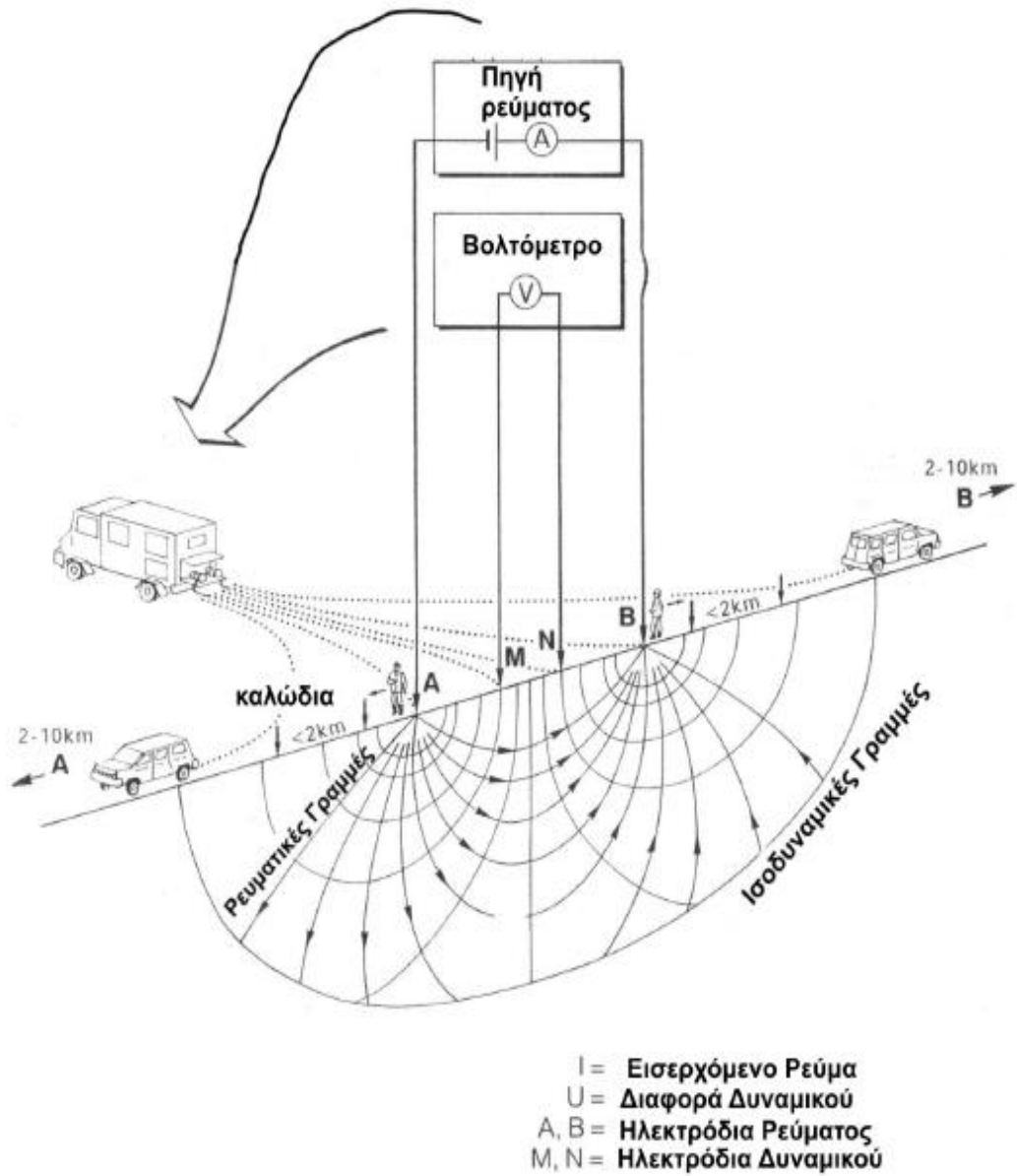
*Σχήμα 2.15 : Διάταξη Pole-Pole*

- Διάταξη Pole-Dipole : Ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $na$ , πολλαπλάσια της απόστασης που απέχουν τα ηλεκτρόδια δυναμικού μεταξύ τους ( $a$ ). Το δεύτερο ηλεκτρόδιο ρεύματος απέχει από το ηλεκτρόδιο δυναμικού πολύ μεγάλη απόσταση.



Σχήμα 2.16 : Διάταξη Pole-Dipole

### 2.3.7 Εξοπλισμός Υπαίθρου



Σχήμα 2.17 : Διάταξη ηλεκτροδίων και εξοπλισμός υπαίθρου

Ο εξοπλισμός για τις μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης περιλαμβάνει μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, το κύκλωμα ρεύματος AB το οποίο εισάγει στο έδαφος μιας ελεγχόμενης έντασης ρεύμα, το κύκλωμα δυναμικού MN το οποίο μετρά τη διαφορά δυναμικού (πτώση τάσης) μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού, καλώδια και ηλεκτρόδια. Για καλύτερα αποτελέσματα τα δύο αυτά κυκλώματα θα πρέπει να είναι ανεξάρτητα και σε απόσταση μεταξύ τους.

Ο απαραίτητος εξοπλισμός που χρειαζόμαστε για τη μέτρηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης ( δηλαδή των  $\Delta V$  και  $I$ ) στο ύπαιθρο είναι ο ακόλουθος:

- Πηγή ηλεκτρικού ρεύματος και Αμπερόμετρο : Μέχρι 1 Ampere χρησιμοποιούμε συσσωρευτές, ενώ για ρεύμα μεγαλύτερης έντασης γεννήτριες.
- Βολτόμετρο : Υψηλής αντίστασης εισόδου ( $>10M\Omega$ ) για ακρίβειες από  $\mu V$  ως  $V$ .
- Όργανο επιλογής της χρησιμοποιούμενης διάταξης
- Όργανο ρύθμισης της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού : Μεταξύ των καλωδίων δυναμικού και του οργάνου επιλογής της κατάλληλης διάταξης, παρεμβάλλεται ένας διακόπτης, ο οποίος ρυθμίζει την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού για την οποία πραγματοποιείται η μέτρηση.
- Καλώδια σε καρούλια
- Ηλεκτρόδια

Το εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, χρησιμοποιεί το όργανο μέτρησης SYSCAL PRO.

Πρόκειται για όργανο μέτρησης υψηλών τιμών Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης και Επαγόμενης Πολικότητας, ταυτόχρονης λήψης 10 καναλιών, με δυνατότητα εναλλαγής της διάταξης ηλεκτροδίων, 1000V-250W-2,5A. Χαρακτηρίζεται από δυνατότητες υψηλής απόδοσης που του επιτρέπουν να δουλεύει σε οποιεσδήποτε πραγματικές συνθήκες. Κατάλληλο για εξερεύνηση υπόγειων υδάτων, εφαρμογές πολιτικού μηχανικού και περιβάλλοντος.



*Εικόνα 2.1: Syscal Pro Switch-48*

Χαρακτηριστικά και δυνατότητες του SYSCAL PRO :

- **Αυτόματη διακύμανση διοχέτευσης ρεύματος :** Το ρεύμα εξόδου μπορεί να ρυθμιστεί αυτόματα για τη βελτιστοποίηση των τιμών της τάσης εισόδου και για την εξασφάλιση της καλύτερης ποιότητας μετρήσεων. Το σύστημα προσφέρει επίσης τη δυνατότητα διοχέτευσης ρεύματος με τάση που καθορίζεται από τον χειριστή.
- **Μέτρηση IP :** IP καμπύλες των 10 καναλιών μπορούν να απεικονιστούν άμεσα σε πραγματικό χρόνο χάρη στη γραφική οθόνη LCD.
- **Θαλάσσια εφαρμογή :** Μία συγκεκριμένη λειτουργία επιτρέπει στο σύστημα να χρησιμοποιηθεί για συνεχή καταγραφή, ειδικά σχεδιασμένο για θαλάσσιες εφαρμογές. Σε αυτή την περίπτωση, ένα GPS μπορεί να συνδεθεί άμεσα με τη μονάδα, μέσω ενός σειριακού συνδέσμου, για μια συνεχή καταγραφή της θέσης των 10 καναλιών καθ'όλη τη διάρκεια του προφίλ μετρήσεων.  
Ένα σύνολο 10 αντιστάσεων μετράται και αποθηκεύεται περίπου κάθε 2 δευτερόλεπτα. Ειδικά καλώδια παρέχονται για να ταιριάξουν με το θαλάσσιο περιβάλλον. Ένα ειδικό απομακρυσμένο λογισμικό pc, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση δεδομένων και για γραφική απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο της ψευδό-τομής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.
- **Λογισμικό λειτουργίας του οργάνου μέσω PC :** Ένα ειδικό λογισμικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη χρήση της συσκευής από μακριά μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η λειτουργία αυτή έχει το πλεονέκτημα της αποθήκευσης των δεδομένων απευθείας στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή, χωρίς περιορισμό μνήμης (χρήσιμο για θαλάσσια εφαρμογή) και προσφέρει, επίσης, τη δυνατότητα

του προ-προγραμματισμού μερικών ακολουθιών μετρήσεων, σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα από το χρήστη (χρήσιμο για απόκτηση δεδομένων ERT).

- **Ικανότητα εναλλαγής διάταξης** : Εσωτερικοί πίνακες εναλλαγής μπορούν να προστεθούν στο βασικό SYSCAL PRO, για τη μετατροπή του σε πολύ γρήγορο σύστημα απεικόνισης των αντιστάσεων. Σε αυτή την έκδοση, η μονάδα καλείται SYSCAL PRO SWITCH -48 -72 ή - 96 (για μια εναλλαγή διάταξης 48, 72 ή 96 ηλεκτροδίων), και επιτρέπει την ταυτόχρονη απόκτηση ενός συνόλου 10 μετρήσεων, καθώς και εκτελεί τη μεταγωγή των ηλεκτροδίων αυτόματα. Μερικές μονάδες εναλλαγής που ονομάζονται Switch Pro , μπορούν να προστεθούν στο σύστημα για 3D έρευνες. Στην έκδοση Switch, τα μέγιστα χαρακτηριστικά εξόδου της μονάδας είναι : 800V-250W-2,5A.

### 2.3.8 Μέθοδος Δισδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας

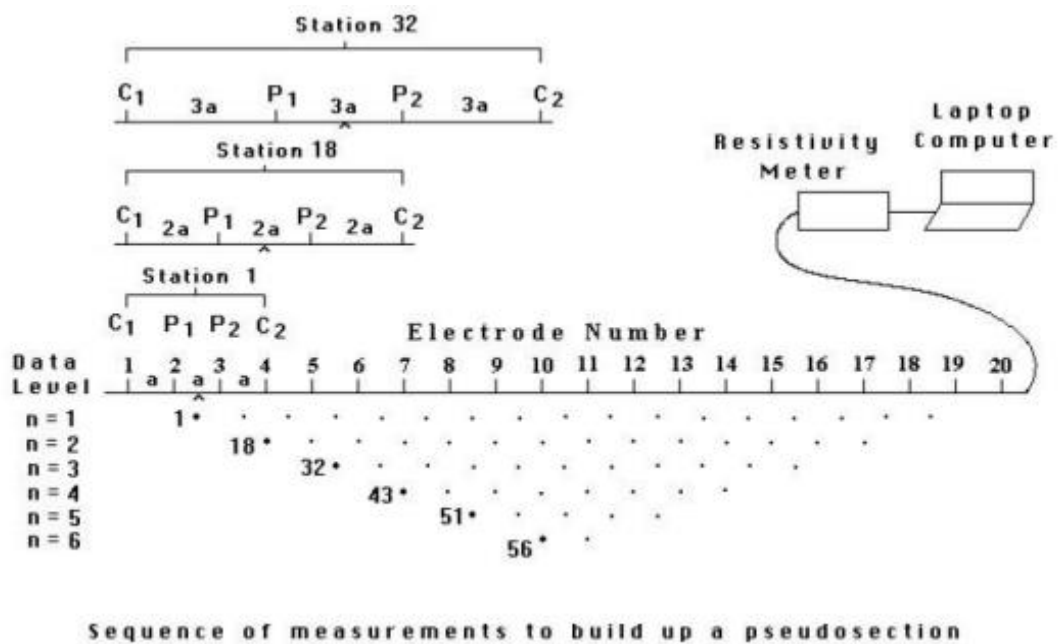
Στην περίπτωση ανάγκης βαθιάς βυθοσκόπησης του υπεδάφους και κάλυψης μεγάλων περιοχών, οι βυθοσκοπήσεις Schlumberger, καλύτερα οι δισδιάστατες βυθοσκοπήσεις CSDD προτιμούνται.

Αν όμως χρειάζεται σε συγκεκριμένες θέσεις μεγάλης ακρίβειας διασκοπήσεις τόσο παράπλευρα όσο και σε βάθος, τότε προτιμάται η ηλεκτρική τομογραφία, η οποία συνίσταται σε πολλές βυθοσκοπήσεις πολύ κοντά μεταξύ τους. Ο τρόπος μέτρησης, οι αποστάσεις και οι θέσεις των ηλεκτροδίων, καθορίζονται με την επιλογή των διατάξεων που θέλουμε (Schlumberger, Wenner, κλπ.). Όλες οι τιμές χρησιμοποιούνται σε μια διαδικασία ερμηνείας, που τελικά δίνει μια δισδιάστατη γεωηλεκτρική τομή μεγάλης ακρίβειας, όπως λέγεται μια *γεωηλεκτρική τομογραφία*.

Η πρόοδος που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στην κατεύθυνση της αυτοματοποίησης της λήψης γεωφυσικών δεδομένων και της αντιστροφής τους, αύξησε σημαντικά την εφαρμοσιμότητα της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η μέθοδος χρησιμοποιείται πλέον ευρέως σε γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές σε πολλές χώρες.

Η δισδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία απαιτεί την καταγραφή δεδομένων με πολλές διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων, κατά μήκος μιας γραμμής. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει μια αρκετά πυκνή πλευρική κάλυψη, από πλευράς λήψης δεδομένων, προκειμένου να καταστεί εφικτή η ανίχνευση πολύπλοκων δομών του

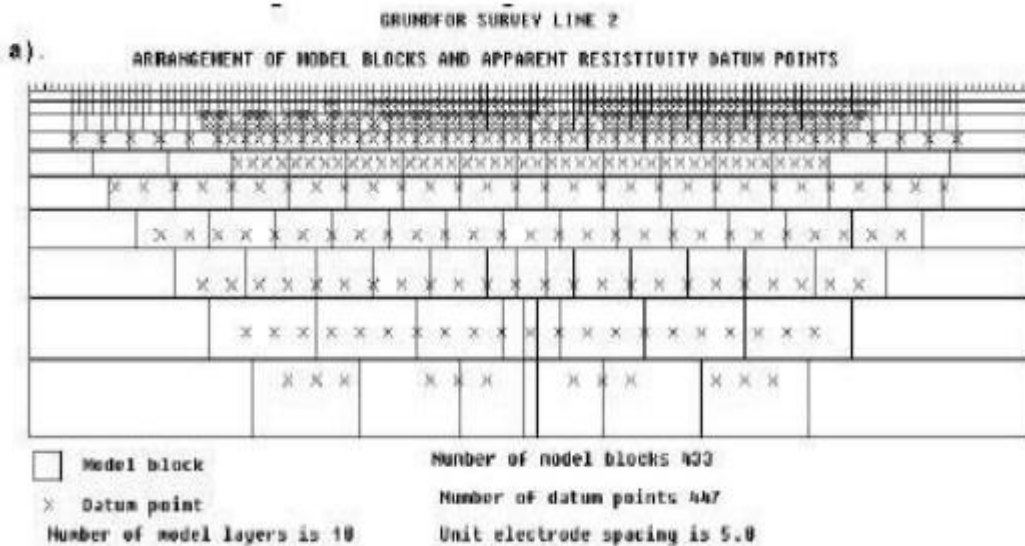
υπεδάφους, γεγονός το οποίο επιβάλλει τη χρησιμοποίηση αυτοματοποιημένων πολυ – ηλεκτροδιακών συστημάτων λήψης δεδομένων.



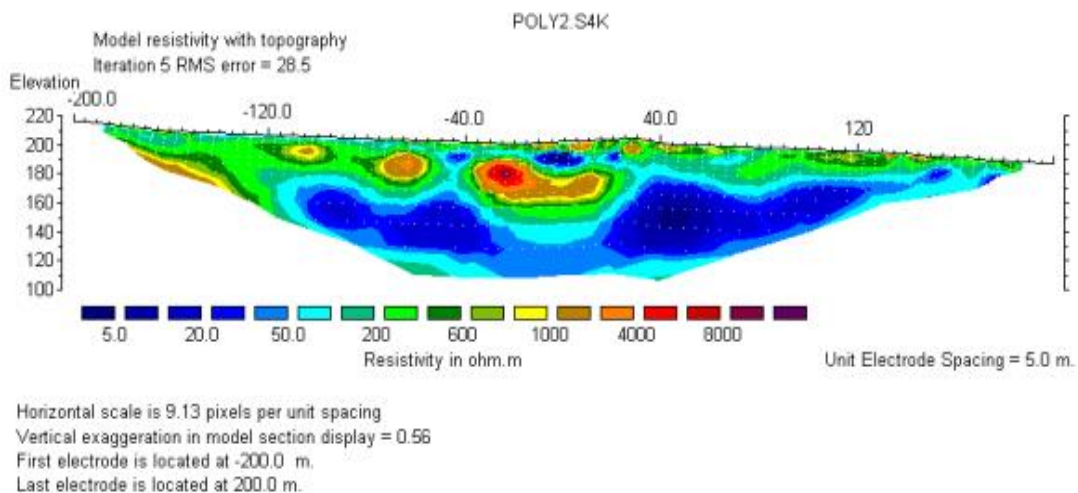
**Σχήμα 2.18:** Διδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία με διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων

Οι μεγάλες ποσότητες δεδομένων, οι οποίες παράγονται από τα συστήματα αυτά, απαιτούν με τη σειρά τους, αυτοματοποιημένο χειρισμό και επεξεργασία των δεδομένων. Αυτόματες αριθμητικές τεχνικές αντίστροφης δημιουργίας μοντέλων, οι οποίες βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων για τους ευθείς υπολογισμούς, έχουν αναπτυχθεί για να καλύψουν την ανάγκη αυτή. Με τις τεχνικές αυτές, το υπέδαφος χωρίζεται σε κελιά σταθερών διαστάσεων, το μέγεθος των οποίων συνήθως αυξάνει με το βάθος (**Σχήμα 2.19**). Οι ειδικές ηλεκτρικές τους αντιστάσεις προσαρμόζονται, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, έως ότου επιτευχθεί μια αποδεκτή συμφωνία ανάμεσα στα δεδομένα εισόδου και την απόκριση του μοντέλου (**Σχήμα 2.20**). Όσον αφορά στην τοπογραφία, αυτή αντιμετωπίζεται είτε με διορθώσεις, δηλαδή μετατροπή των δεδομένων πριν και μετά την αντιστροφή, είτε με απευθείας εισαγωγή της στο πλέγμα.





**Σχήμα 2.19:** Διάταξη μοντέλου χωρισμένο σε blocks και σημεία φαινόμενης ειδικής αντίστασης.



**Σχήμα 2.20:** Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων.

Η μέθοδος της «Αντιστροφής των Δεδομένων» είναι η διαδικασία με την οποία γίνεται η συσχέτιση των φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων με τις πραγματικές, για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η γεωλογική ερμηνεία τους. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται σήμερα με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών και ειδικών λογισμικών. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται διότι κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων για τον προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης σε ανομοιογενή μέσα, παρουσιάζεται μεταβλητότητα στις προσδιοριζόμενες τιμές ανάλογα με τη διάταξη με την οποία πραγματοποιήθηκαν.

Γενικά, η θεωρία της αντιστροφής αποτελεί ουσιαστικά μια μέθοδο βελτιστοποίησης των μεγεθών ενός αρχικού μοντέλου, με σκοπό τη σύγκλισή του στις τιμές εκείνες που επαληθεύουν, με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια τα δεδομένα υπαίθρου.

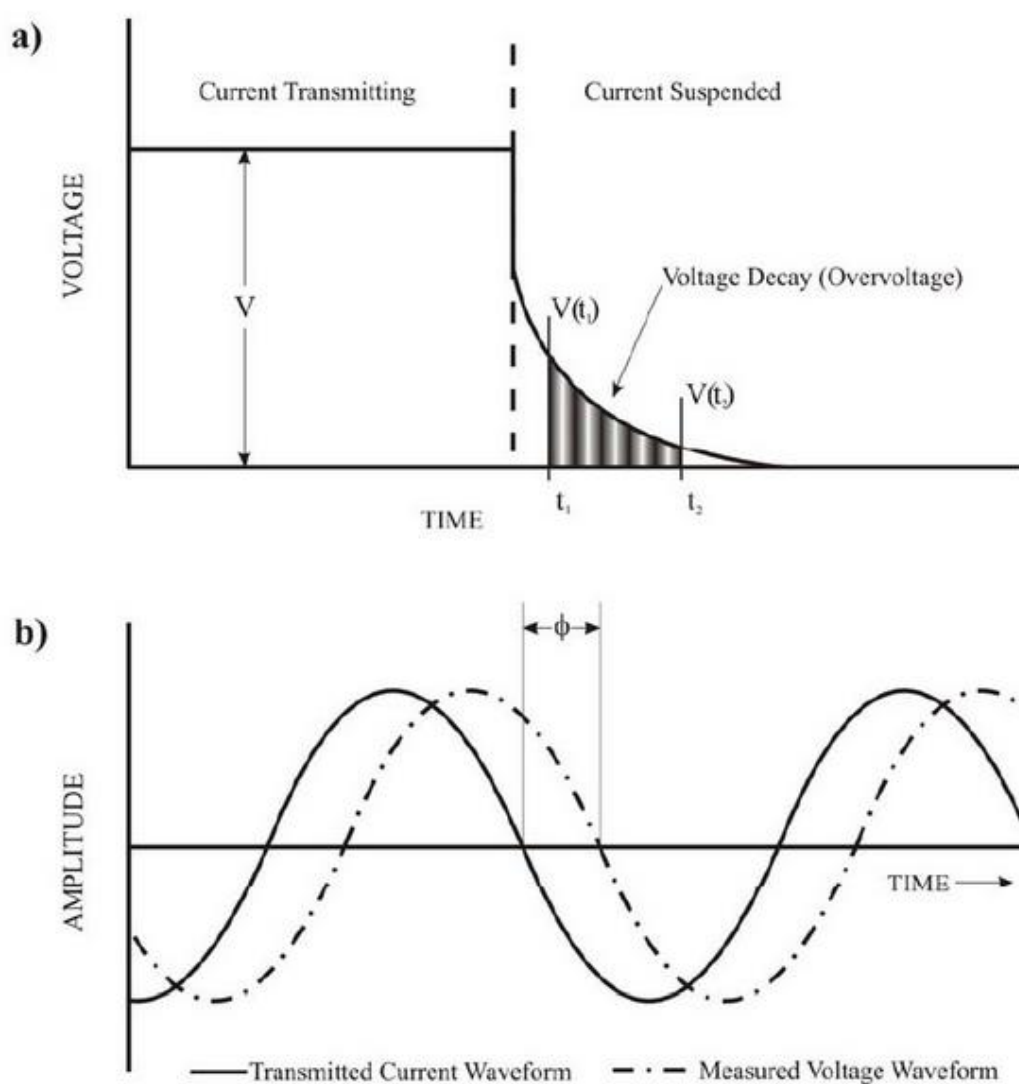
Το αποτέλεσμα της μεθόδου αντιστροφής είναι η κατασκευή ενός μοντέλου κατανομής της ειδικής αντίστασης στο υπέδαφος (γεωλογική τομή ειδικής αντίστασης), σε δύο ή τρεις διαστάσεις ανάλογα με τη διάταξη μέτρησης που ακολουθήθηκε. Για δυο διαστάσεις, η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται με το λογισμικό RES2DINV.

### 2.3.9 Μέθοδος της Επαγόμενης Πολικότητας

Ο Conrad Schlumberger (Dobrin 1960) ίσως ήταν ο πρώτος που αναφέρθηκε στο φαινόμενο της επαγόμενης πολικότητας, την οποία αποκάλεσε "προκληθείσα πόλωση." Ενώ έκανε συμβατικές μετρήσεις αντίστασης, σημείωσε ότι η διαφορά δυναμικού, μετρούμενη μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού, συχνά δεν έπεφτε ακαριαία στο μηδέν όταν το ρεύμα ήταν απενεργοποιημένο. Αντ' αυτού, η διαφορά δυναμικού που μειώθηκε απότομα αρχικά, στη συνέχεια, σταδιακά έφθινε στο μηδέν μετά από ένα δεδομένο χρονικό διάστημα. Ορισμένα στρώματα στο έδαφος μπορεί να γίνουν ηλεκτρικά πολωμένα, σχηματίζοντας μια μπαταρία, όταν ενεργοποιούνται με ηλεκτρικό ρεύμα. Μετά την απενεργοποίηση του πολωμένου ρεύματος, το έδαφος σταδιακά αποφορτίζεται και επιστρέφει σε ισορροπία.

Η μελέτη της φθίνουσας διαφοράς δυναμικού ως συνάρτηση του χρόνου είναι τώρα γνωστή, ως η μελέτη της επαγόμενης πόλωσης (IP) στο πεδίο του χρόνου (**Σχήμα 2.21.a**). Με αυτή τη μέθοδο, ο γεωφυσικός αναζητά τμήματα της γης, όπου η ροή ρεύματος διατηρείται για ένα σύντομο χρονικό διάστημα μετά από τον τερματισμό του εφαρμοζόμενου ρεύματος. Μία άλλη τεχνική είναι η μελέτη της επίδρασης του εναλλασσόμενου ρεύματος για τη μετρούμενη τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία ονομάζεται IP στη "περιοχή συχνοτήτων" (**Σχήμα 2.21.b**). Με αυτή τη μέθοδο ο γεωφυσικός προσπαθεί να εντοπίσει τμήματα της γης, όπου η αντίσταση μειώνεται καθώς η συχνότητα του εφαρμοζόμενου ρεύματος αυξάνεται. Η επαγόμενη μέθοδος ηλεκτρικής πόλωσης χρησιμοποιείται ευρέως στην έρευνα για κοιτάσματα, κυρίως θειούχων ενώσεων. Η χρήση του IP σε γεωτεχνικές εφαρμογές και τη μηχανική είναι περιορισμένη,

και έχει χρησιμοποιηθεί, κυρίως, για την εξερεύνηση των υπόγειων υδάτων. Μελέτες για τα υπόγεια ύδατα με τη μέθοδο IP έχουν, γενικά, γίνει με IP στο πεδίο του χρόνου.



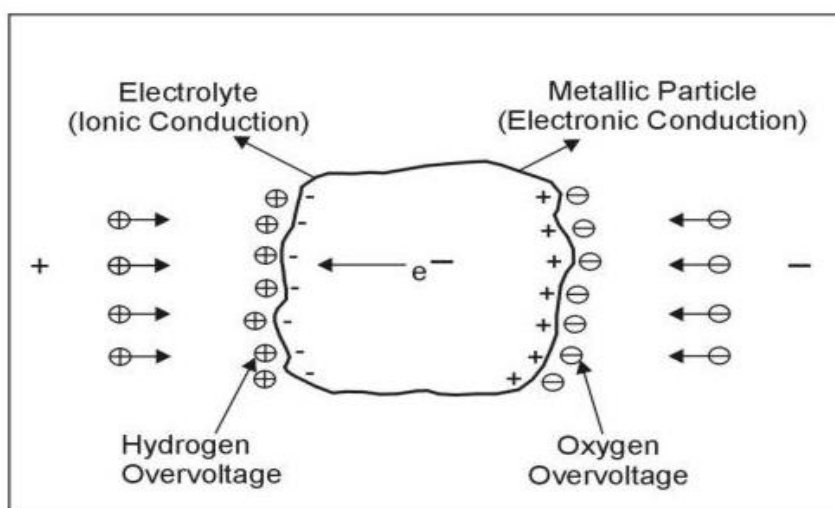
**Σχήμα 2.21:** a) πεδίο του χρόνου και b) πεδίο συχνότητας παραδείγματα κυματομορφής (Glaser 2007).

### 2.3.9.1 Γενική Θεωρία της IP Εφαρμογής

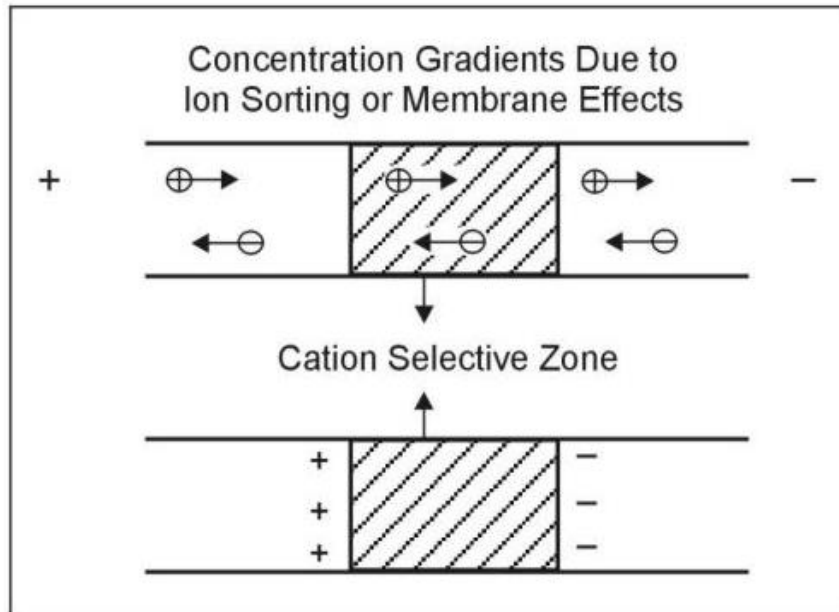
Το φαινόμενο της επαγόμενης ηλεκτρικής πολικότητας είναι πολύπλοκο και δεν γίνεται εύκολα κατανοητό. Αυτό συμβαίνει κυρίως επειδή πολλά φυσικο-χημικά φαινόμενα και οι συνθήκες είναι πιθανόν υπεύθυνα για την εμφάνισή του. Μόνο μια αρκετά απλή εξήγηση θα δοθεί εδώ. Σύμφωνα με τον Seigel (1970), όταν ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο εμβαπτίζεται σε ένα διάλυμα ιόντων ορισμένης συγκέντρωσης και σθένους,

μία διαφορά δυναμικού παγιώνεται μεταξύ του μετάλλου και των πλευρών του διαλύματος της διεπαφής. Αυτή η διαφορά δυναμικού είναι μία συνάρτηση της συγκέντρωσης ιόντων, σθένους, κλπ. Όταν μια εξωτερική τάση εφαρμόζεται σε ολόκληρη τη διεπαφή, ένα ρεύμα αναγκάζεται να ρέει, και το δυναμικό πέφτει κατά πλάτος των αλλαγών διεπαφής από την αρχική του τιμή. Η αλλαγή στην τάση διεπαφής ονομάζεται "υπέρταση" ή "πόλωση" δυναμικού του ηλεκτροδίου. Υπερτάσεις οφείλονται σε συσσώρευση ιόντων στην πλευρά του ηλεκτρολύτη της διεπαφής. Η σταθερά χρόνου της συσσώρευσης και της φθοράς είναι συνήθως αρκετά δέκατα του δευτερολέπτου.

Η υπέρταση καθορίζεται, συνεπώς, όποτε ρεύμα αναγκάζεται να ρεύσει δια μέσου μίας διεπαφής μεταξύ ιονικής και ηλεκτρονικής αγωγιμότητας. Σε κανονικά πετρώματα, το ρεύμα ρέει με την ιοντική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη στους πόρους του πετρώματος. Υπάρχουν, ωστόσο, ορισμένα μέταλλα που το ρεύμα ρέει μέσω της ηλεκτρονικής αγωγιμότητας (σχεδόν όλα τα μεταλλικά σουλφίδια (εκτός του σφαλερίτη) όπως ο πυρίτης, γραφίτης, ορισμένοι άνθρακες, μαγνητίτης, πυρολουσίτης, τα «καθαρά» μέταλλα, ορισμένα αρσενιούχα, και άλλα μέταλλα με μεταλλική λάμψη). Το **Σχήμα 2.22** είναι μία απλοποιημένη αναπαράσταση του πώς σχηματίζονται υπερτάσεις σε ένα ηλεκτρονικά αγώγιμο σωματίδιο σε έναν ηλεκτρολύτη υπό την επίδραση της ροής του ρεύματος.



**Σχήμα 2.22** : Υπέρταση σε ένα μεταλλικό σωματίδιο σε ηλεκτρολύτη ( Seigel 1970)



**Σχήμα 2.23:** Μη μεταλλικός παράγοντας επαγόμενης πολικότητας ( Seigel 1970)

Οι σημαντικότερες πηγές των μη μεταλλικών IP σε πετρώματα είναι ορισμένα είδη αργιλικών ορυκτών (Vacquier 1957, Seigel 1970). Αυτές οι επιδράσεις πιστεύεται ότι σχετίζονται με ηλεκτροδιάλυση των σωματιδίων αργίλου. Αυτό είναι μόνο ένας τύπος του φαινομένου που μπορεί να προκαλέσει «ιοντοδιαλογή» ή "επιδράσεις μεμβράνης". Για παράδειγμα, το **Σχήμα 2.23** δείχνει ένα κατιόν-επιλεκτική ζώνη μεμβράνης στην οποία η κινητικότητα του κατιόντος είναι αυξημένη σε σχέση με εκείνη του ανιόντος, προκαλώντας ιοντικών κλίσεων συγκεντρώσεις και κατά συνέπεια πόλωση. Μια δεύτερη ομάδα φαινομένων περιλαμβάνει ηλεκτροκινητικά αποτελέσματα, που παράγουν μεταβολές τάσεως, μέσω του φαινομένου της ροής δυναμικού. Αυτές οι μεταβολές τάσεως θα έχουν την ίδια εξωτερική εμφάνιση, όπως τα άλλα αποτελέσματα πόλωσης. Τα ηλεκτροκινητικά αποτελέσματα φαίνονται λιγότερο σημαντικά από τις επιπτώσεις μεμβράνης στη συνολική εικόνα πόλωσης.

Στον χώρο του χρόνου, αρκετοί δείκτες έχουν χρησιμοποιηθεί για να οριστεί η πολωσιμότητα του μέσου. Ο Seigel (1959) όρισε τη "φορτιστικότητα" (σε δευτερόλεπτα) ως το λόγο του εμβαδού κάτω από την καμπύλη εξασθένησης (σε μιλιβολτ-δευτερολέπτων, mV-s) προς τη διαφορά δυναμικού (σε mV) μετρούμενη πριν το σβήσιμο του ρεύματος. Ο Komarov, et al, (1966) όρισαν την "πολωσιμότητα" ως το λόγο της διαφοράς δυναμικού μετά από δεδομένο χρόνο από το κλείσιμο του ρεύματος προς την διαφορά δυναμικού πριν από το κλείσιμο. Η πολωσιμότητα εκφράζεται ως ποσοστό.

Ο Seigel (1959) έδειξε ότι πάνω από ένα ετερογενές μέσο που αποτελείται από  $n$  διαφορετικά υλικά, η φαινομενική φορτιστικότητα  $n_a$ , κατά προσέγγιση, σχετίζεται με τη φαινόμενη αντίσταση :

$$n_a = \sum_{i=1}^n n_i \frac{\partial \log \rho_a}{\partial \log \rho_i} \quad (2.24)$$

όπου,  $n_i$  = φορτιστικότητα του κάθε υλικού

$\rho_i$  = ειδική αντίσταση του κάθε υλικού.

Ο Seigel όρισε επίσης και το παρακάτω άθροισμα:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial \log \rho_a}{\partial \log \rho_i} = 1 \quad (2.25)$$

Οι εξισώσεις (2.24) και (2.25) δίνουν τη χρήσιμη σχέση :

$$\frac{n_a}{n_1} = 1 + \sum_{i=2}^n \frac{\partial \log \rho_a}{\partial \log \rho_i} \left[ \frac{n_i}{n_1} - 1 \right] \quad (2.26)$$

$\rho_a$  = φαινόμενη ειδική αντίσταση

$n_a/n_1$  = φαινόμενη φορτιστικότητα

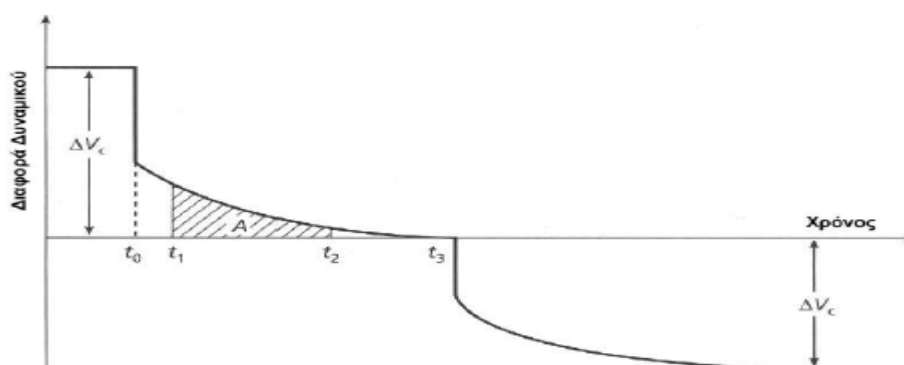
### 2.3.9.2 Αρχή της μεθόδου

Η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας μπορεί να περιγραφεί, εν συντομία, ως ακολούθως :

Εάν τεχνητά εισάγουμε ρεύμα δια μέσου ενός πετρώματος και απότομα σταματήσουμε την εισαγωγή του, τότε η διαφορά δυναμικού μειώνεται σε μία τιμή  $V_0$  και στη συνέχεια η μείωση συνεχίζεται αργά, όχι εκθετικά. Για την περίπτωση ενός κυκλώματος αντίστασης- πυκνωτή (R-C) η μείωση του  $V$  είναι εκθετική, χωρίς αρχική πτώση.

Το φαινόμενο της επαγόμενης πώλωσης φαίνεται στο **Σχήμα 2.24**, όπου σε χρόνο  $t_0$  το ρεύμα σταματάει και η διαφορά δυναμικού μετά από μία αρχική πτώση της σταθερής τιμής  $\Delta V_c$  μειώνεται σταδιακά μέχρι το μηδέν (0). Η ίδια κατάσταση συμβαίνει

όταν το ρεύμα αρχίζει να ρέει σε χρόνο  $t_3$ . Το «A» παριστά την επιφάνεια κάτω από την καμπύλη μείωσης στο χρονικό διάστημα  $t_1$ - $t_2$ .



*Σχήμα 2.24 : Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου επαγόμενης πόλωσης.*

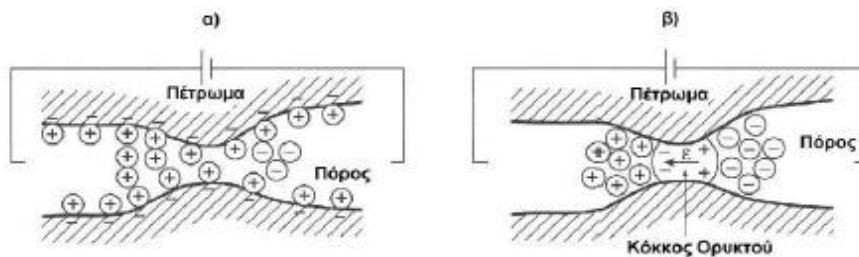
### 2.3.9.3 Μηχανισμοί επαγόμενης πολικότητας

- Πόλωση μεμβράνης ή ηλεκτρολυτική πόλωση.

Αποτελεί θόρυβο για τη μέθοδο και οφείλεται ,είτε σε φαινόμενα κατακράτησης ιόντων σε στενέματα πόρων, είτε σε αργιλικά υλικά που ηλεκτρολύονται και κρατούν θετικά ιόντα διαλυμάτων αφήνοντας τα αρνητικά να φορτίζουν το έδαφος (**Σχήμα 2.25α**).

- Ηλεκτροδιακή πόλωση

Το ρεύμα που διαρρέει κατά μήκος πόρων με ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα, συναντά ορυκτό-αγωγό και φορτίζει αντίστροφα τις δύο πλευρές του (**Σχήμα 2.25β**). Όταν το ρεύμα σταματά, τα ιόντα διαχέονται προς τα πίσω για να φτάσουν στη φάση ισορροπίας.



Σχήμα 2.25: Μηχανισμοί α) ηλεκτρολυτικής πόλωσης και β) ηλεκτροδιακής πόλωσης.

#### 2.3.9.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την πόλωση

Η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας εφαρμόζεται κυρίως για τον εντοπισμό θειούχου μεταλλοφορίας. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την πόλωση είναι οι εξής :

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

#### 2.3.9.5 Τρόποι προσέγγισης του φαινομένου της επαγόμενης πολικότητας

Το φαινόμενο το προσεγγίζουμε με δύο τρόπους :

- ❖ Στο χώρου του χρόνου (time domain), όπου παρατηρείται η μεταβολή του δυναμικού μετά την πτώση του ρεύματος.
- ❖ Στο χώρο συχνοτήτων (frequency domain), όπου μετράται το πλάτος και η φάση της διαφοράς δυναμικού σε σχέση με το ρεύμα σε διάφορες συχότητες εκπομπής ρεύματος.

#### Χώρος του χρόνου (Time Domain)

Ο λόγος  $Sa = \frac{V(t)}{\Delta Vc}$  (2.27) ονομάζεται φαινόμενη ικανότητα πόλωσης, όπου t είναι ο χρόνος μετά την διακοπή του ρεύματος.

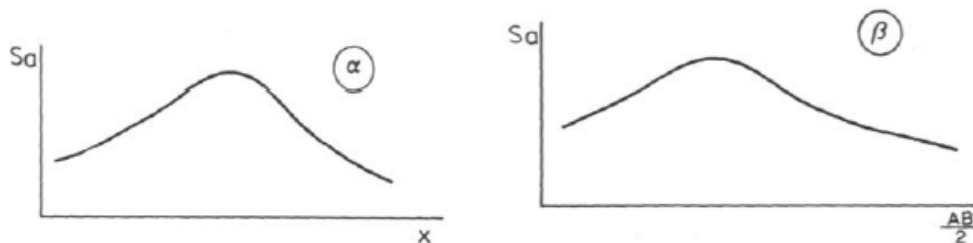


$$\text{Το ολοκλήρωμα χρόνου εξασθένησης είναι η επιφάνεια } \mathbf{A} = \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{V}(t) dt \quad (2.28)$$

$$\text{Η Φορτιστικότητα ορίζεται ως } \mathbf{M} = \frac{A}{\Delta V_c} = \frac{1}{\Delta V_c} \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{V}(t) dt \quad (2.29)$$

και μετράται σε milliseconds.

Οι μετρήσεις αφορούν τα μεγέθη  $S_a$  και  $M$ , είτε έχοντας τα ηλεκτρόδια της διάταξης σταθερά (χαρτογράφηση) (Σχήμα 2.26 α), είτε σε όλο και μεγαλύτερες αποστάσεις (βυθοσκόπηση) (Σχήμα 2.26 β).



**Σχήμα 2.26 :** Λόγος  $S_a$  συναρτήσει της απόστασης ηλεκτροδίων για α) Χαρτογράφηση και β) Βυθοσκόπηση.

### Χώρος της συχνότητας (Frequency Domain)

Με διάταξη ηλεκτροδίων Dipole-Dipole, όπως και στη μέθοδο της ειδικής αντίστασης, μετράμε την φαινόμενη ειδική αντίσταση. Συνήθως γίνονται δύο μετρήσεις, μία με εκπομπή ρεύματος σε υψηλή συχνότητα, 10 Hz (AC) και μία σε χαμηλή, 1 Hz (DC). Η υψηλότερη συχνότητα προκαλεί μικρότερα αποτελέσματα IP.

Μετράμε τη φαινόμενη ειδική αντίσταση για κάθε συχνότητα:

$$\rho_{\alpha} = k \frac{\Delta V}{I} = \pi n(n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{I} \quad (2.30)$$

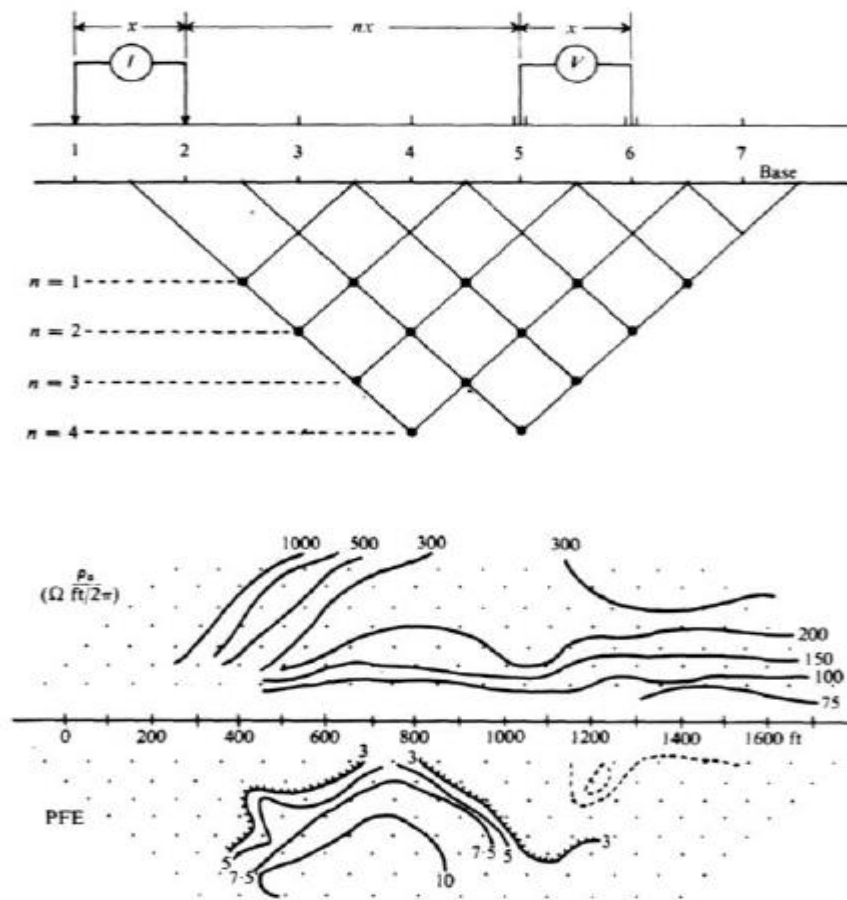
Υπολογίζουμε:

1. Αποτέλεσμα συχνότητας (frequency effect)

$$f.e = \frac{\rho_{DC} - \rho_{AC}}{\rho_{AC}} \quad (2.31)$$

2. Μεταλλικός παράγοντας

$$m.f = 2\pi 10^5 \frac{\rho_{AC}\rho_{DC} - \rho_{DC}}{\rho_{AC}\rho_{DC}} \quad (2.32)$$



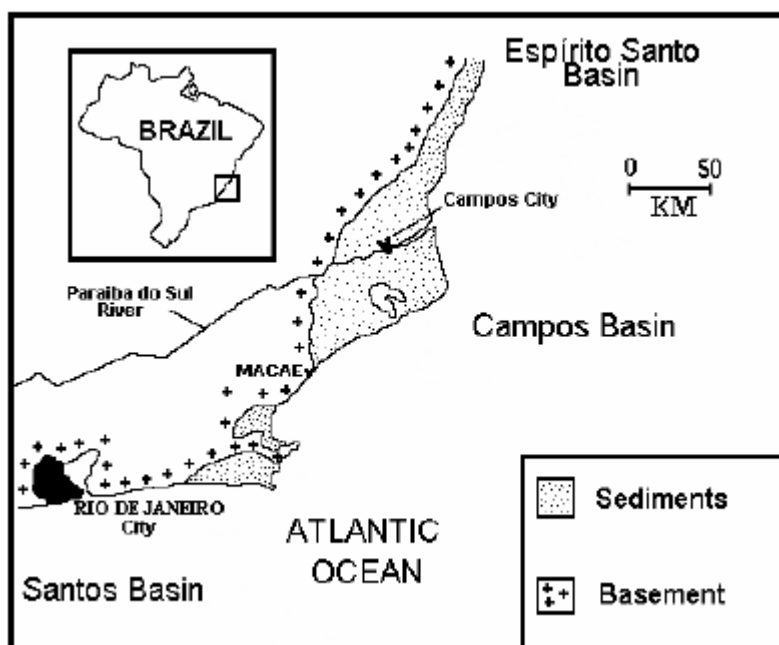
Σχήμα 2.27 : Τρόπος παρουσίασης της φαινόμενης ειδικής αντίστασης και του αποτελέσματος της συχνότητας με διάταξη ηλεκτροδίων dipole-dipole.

## **3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ**

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ  
ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΩΠΟΥ  
ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ**

### 3.1 Campos Basin, Βραζιλία

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στο Campos City, Βόρεια του Ρίο ντε Τζανέιρο-Βραζιλία, και ανήκει στο χερσαίο τμήμα του Campos Basin, το οποίο έχει ένα συνολικό ποσοστό ιζηματογενών 30.000 km<sup>2</sup>, με μόνο 600 km<sup>2</sup> στο ηπειρωτικό τμήμα (**Σχήμα 3.1**). Αυτή η λεκάνη περιορίζεται παράκτια από το τόξο Vit'orgia (B), από το τόξο Cabo Frio (N) και από το φλοιό του ωκεανού εντός της ηπειρωτικής πλατφόρμας (A), ενώ, στην ξηρά, (Δ) συνορεύει με ένα κρυσταλλικό γενευσιακό υπόβαθρο (DRM/PETROBRAS,1997).

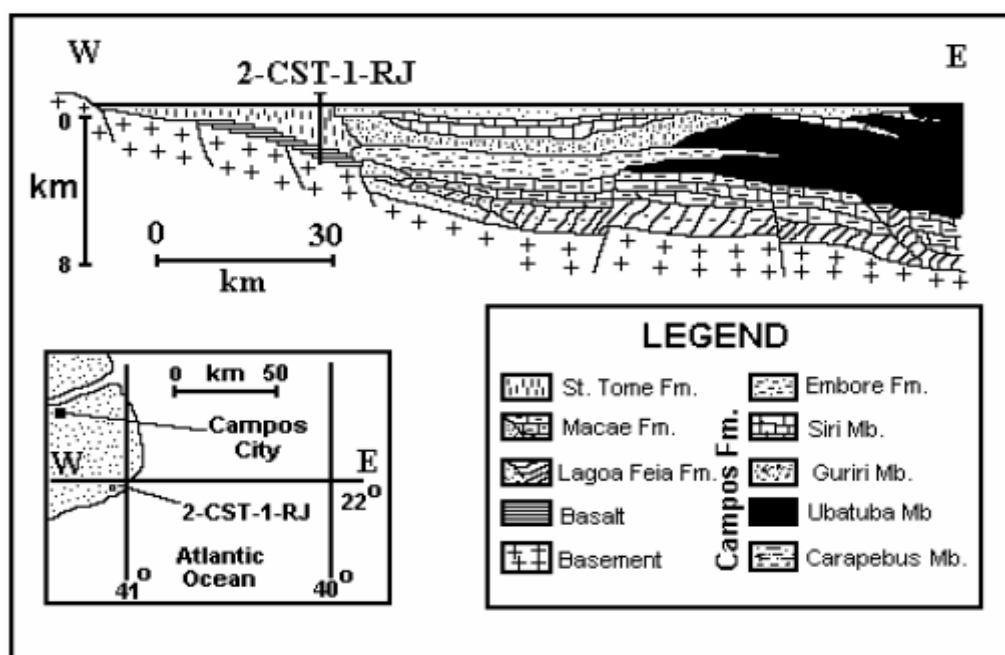


*Σχήμα 3.1 : Τοποθεσία της περιοχής έρευνας (Carrasquilla et al, 1999)*

Σε αυτό το χερσαίο τμήμα, κατά μήκος του δυτικού άκρου της λεκάνης, επισημαίνεται ένα λεπτό κόκκινο ηπειρωτικό τμήμα αλλουβιακών αποθέσεων τεταρτογενούς ηλικίας σε επαφή με τα τριτογενή ιζήματα της ομάδας Barreiras, υπερκείμενα ηφαιστειακά Μεσοζωικού και κρυσταλλικά πετρώματα Προκάμβριου (**Σχήμα 3.2**). Στα ιζήματα που προκύπτουν από διαβάθμιση των αποθέσεων του συστήματος του δέλτα του Para'iba do Sul ποταμού (**Σχήμα 3.1**), είναι δυνατόν να εντοπιστούν: μια έντονη ενσωμάτωση των αλλουβιακών φάσεων, ιζήματα του βάλτου και της λιμνοθάλασσας, εβαπορίτες λιμνοθάλασσας και εκτεταμένες γραμμές παραλίας,

σχηματίζοντας τη γεωμορφολογία της παράκτιας πεδιάδας. Από την άλλη πλευρά, η ομάδα Barreiras, πολύ κοινό στην ακτή της Βραζιλίας, αποτελείται από λεπτή άμμο με αργιλικά υλικά, χοντρόκοκκους ιλυολίθους, και κροκαλοπαγή να παρεμβάλλονται με αργιλλώδη και βωξιτικά στρώματα (Figueiredo, 1985).

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος (TEM), συναρτήσει του χρόνου, έχει επιτυχώς εφαρμοστεί για την οριοθέτηση στρωματοποιημένων δομών γεωλογικού ενδιαφέροντος, όπως επίσης, και για την αναζήτηση υπόγειων υδάτων, γεωθερμικών πεδίων, θειούχων μεταλλευμάτων, μεγάλου βάθους αγωγούς γραφίτη, κλπ. (Fitterman&Stewart, 1986), αλλά δεν είχε δοκιμαστεί Βόρεια του Ρίο ντε Τζανέιρο. Πρόσφατα, αυτή η μέθοδος έχει γίνει η πιο αποτελεσματική τεχνική για τη διόρθωση της στατικής μετατόπισης, η οποία διαστρεβλώνει τις διασκοπήσεις της μαγνητοτελλουρικής μεθόδου (Meju et al., 1993) .



Σχήμα 3.2 : Ιζηματογενείς στρώσεις στη λεκάνη Campos (μετά Schaller, 1973).

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δοκιμάστηκε η TEM γεωφυσική τεχνική στις ειδικές γεωλογικές συνθήκες του χερσαίου τμήματος του Campos Basin, με στόχο τη χαρτογράφηση της στρωματογραφίας ενός μικρού τμήματος της λεκάνης, και, ως εκ τούτου, τη σκιαγράφηση των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών του .

Έτσι, για την παροχή νερού για τις τοπικές ανάγκες, αναζητήθηκε το πάχος των ρυπασμένων στρωμάτων, με στόχο τη λήψη κάποιων προληπτικών μέτρων στο

σχεδιασμό και την ολοκλήρωση γεωαρδεύσεων και την τοποθέτηση αδιαπέρατου περιβλήματος. Με αυτόν τον τρόπο, θα μπορεί να αποφευχθεί η φυσική μόλυνση που προκαλείται με ανάμιξη νερού πλούσιου σε σίδηρο που προέρχεται από λεπτές αργίλους πλούσιες σε σίδηρο, με πόσιμο νερό που προέρχεται από το βαθύτερο υδροφόρο ορίζοντα (φάσεις κροκαλοπαγών ή ρωγματωμένο υπόβαθρο). Αυτή η φυσική μόλυνση βρέθηκε σε προϋπάρχον αβαθές πηγάδι κοντά στη περιοχή έρευνας (30 m απόσταση ανατολικά), η οποία δείχνει μια στάθμη νερού περίπου 5 μ. με μολυσμένο νερό (Carrasquilla et al., 1999).

Για να εκτελεστεί η έρευνα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο TEM, ένα ισχυρό άμεσο ρεύμα περνά μέσα από ένα μη γειωμένο βρόγχο (Nabighian & Macnae, 1988). Σε χρόνο  $t = 0$ , αυτό το ρεύμα διακόπτεται και ένας διαφορετικός βρόγχος λήψεως μετρά τα δευτερεύοντα πεδία που παράγονται από τις γεωλογικές ανομοιογένειες στο υπέδαφος, που εμφανίζονται στην απουσία επαγωγικού πρωτογενούς τομέα και στη μορφή μειωμένης τάσης.

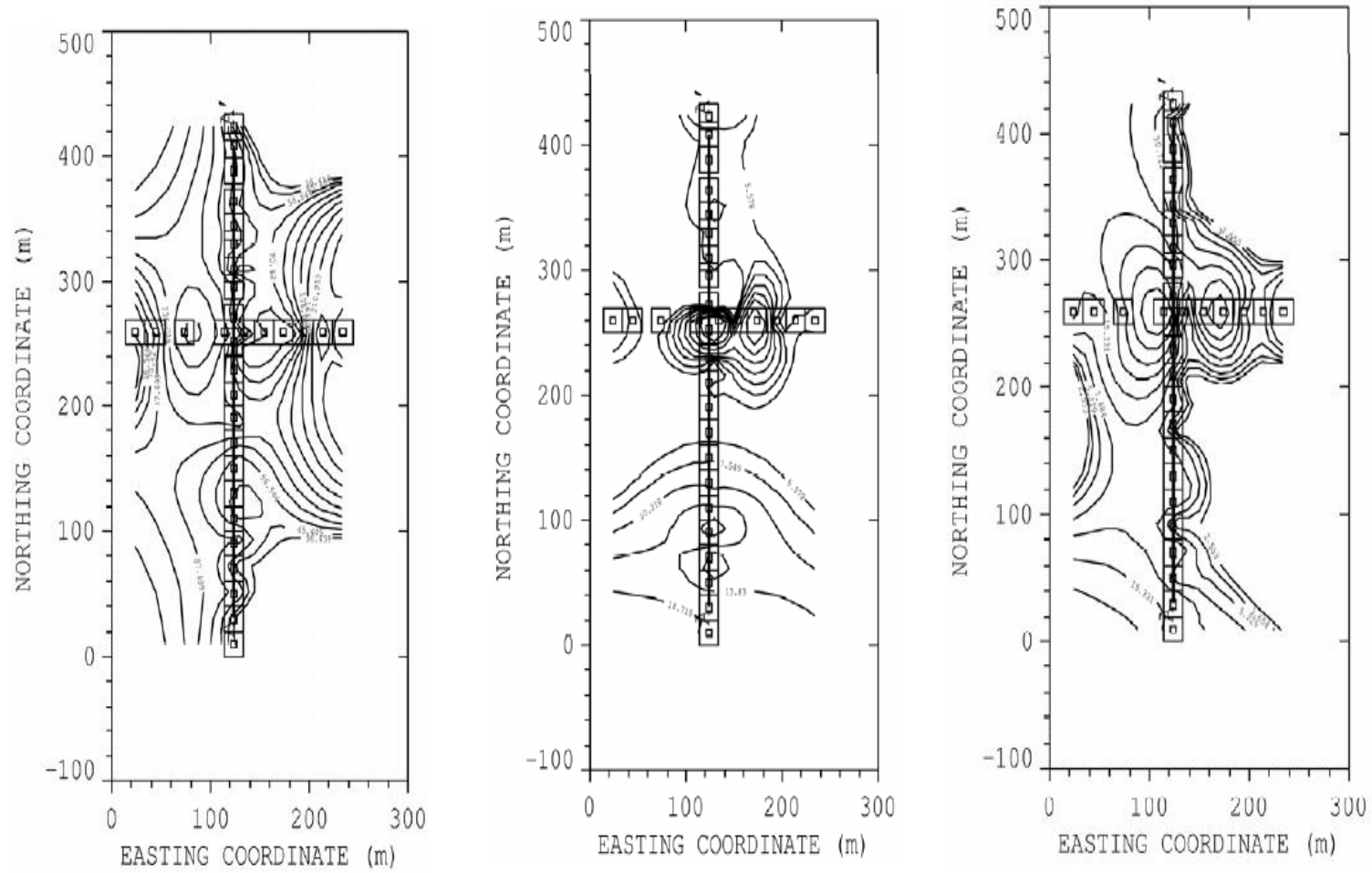
Σε αυτήν την καμπύλη, το ηλεκτρικό δυναμικό μετρείται σε διαφορετικούς χρόνους, οι οποίοι σχετίζονται με διαφορετικά γεωλογικά υλικά στο υπέδαφος. Η διαδικασία συνίσταται στην εκτέλεση πολλών ηλεκτρομαγνητικών διασκοπήσεων κατά μήκος ενός προφίλ, για να φανούν οι αλλαγές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την απόσταση και το βάθος. Γενικότερα, τα αποτελέσματα μπορούν να εμφανίζονται ως διασκοπήσεις με τη μονοδιάστατης (1D) αντιστροφής ερμηνεία τους, αλλά συνήθως, παρουσιάζονται σε ειδικής αντίστασης ψευδοτομή (**Σχήματα 3.6 και 3.7**).

## ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ

Οι μετρήσεις έγιναν με τη χρήση του εξοπλισμού SIROTEM MK3, καλύπτοντας μια έκταση 15.000m<sup>2</sup>, περίπου, εκτελώντας 32 διασκοπήσεις TEM, που ελήφθησαν χρησιμοποιώντας ένα κεντρικό πίνακα βρόγχων με 10 και 20 m από την πλευρά του βρόγχου, ανάλογα με γεωμετρικούς περιορισμούς στο χώρο. Η έρευνα αναπτύχθηκε σε μια ολόκληρη ημέρα εργασίας μέσω δύο εγκάρσιων προφίλ: μία στη Α-Δ κατεύθυνση (10 διασκοπήσεις, που ονομάζεται Προφίλ 1) και το άλλο προς την κατεύθυνση Β-Ν (22 διασκοπήσεις, που ονομάζεται Προφίλ 2), όπου το κέντρο κάθε τετραγώνου αντιστοιχεί στο κέντρο των διασκοπήσεων.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

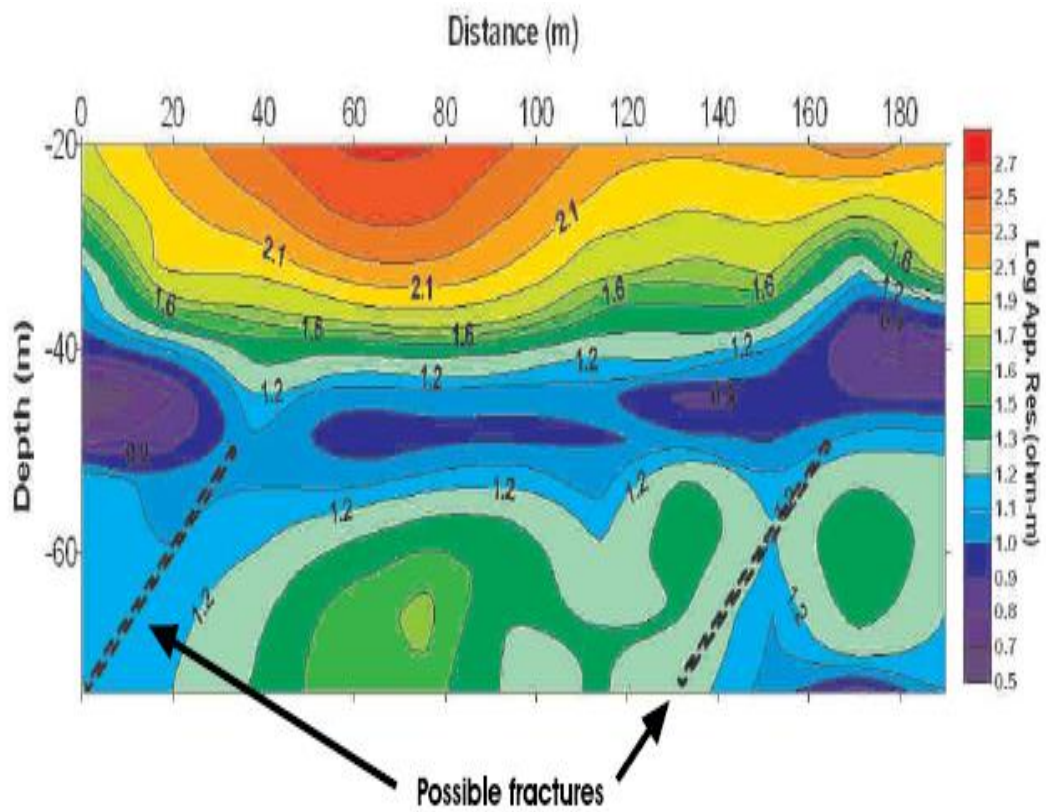
Τα ληφθέντα δεδομένα απεικονίζονται στους χάρτες ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (resistivity contour maps) , όπως φαίνονται στα **Σχήματα 3.3, 3.4** και **3.5**. Το **Σχήμα 3.3** δείχνει τις τιμές αντίστασης που λαμβάνονται σε πρώιμους χρόνους (μικρότερο βάθος). Είναι δυνατό να παρατηρούνται υψηλές τιμές αντίστασης σε όλους τους τομείς, και ειδικά, υψηλότερες τιμές στους Δ, ΒΑ και ΝΑ τομείς. Στο **Σχήμα 3.4**, όσον αφορά στο μεσαίο χρόνο (ενδιάμεσα βάθη), μπορούμε να δούμε χαμηλές τιμές αντίστασης, που πιθανώς σχετίζονται με την παρουσία αγωγίμων αργίλων σε αυτό το βάθος. Το **Σχήμα 3.5**, που αναφέρεται σε μεταγενέστερους χρόνους (μεγαλύτερα βάθη), μπορούμε να παρατηρήσουμε ενδιάμεσες τιμές αντίστασης W και ΝΑ της προσελκύσεως περιοχή, πιθανώς να σχετίζονται με ιζήματα αργίλου ανεμιγμένα με άμμο, κροκαλοπαγή ή ρωγματωμένο υπόβαθρο.



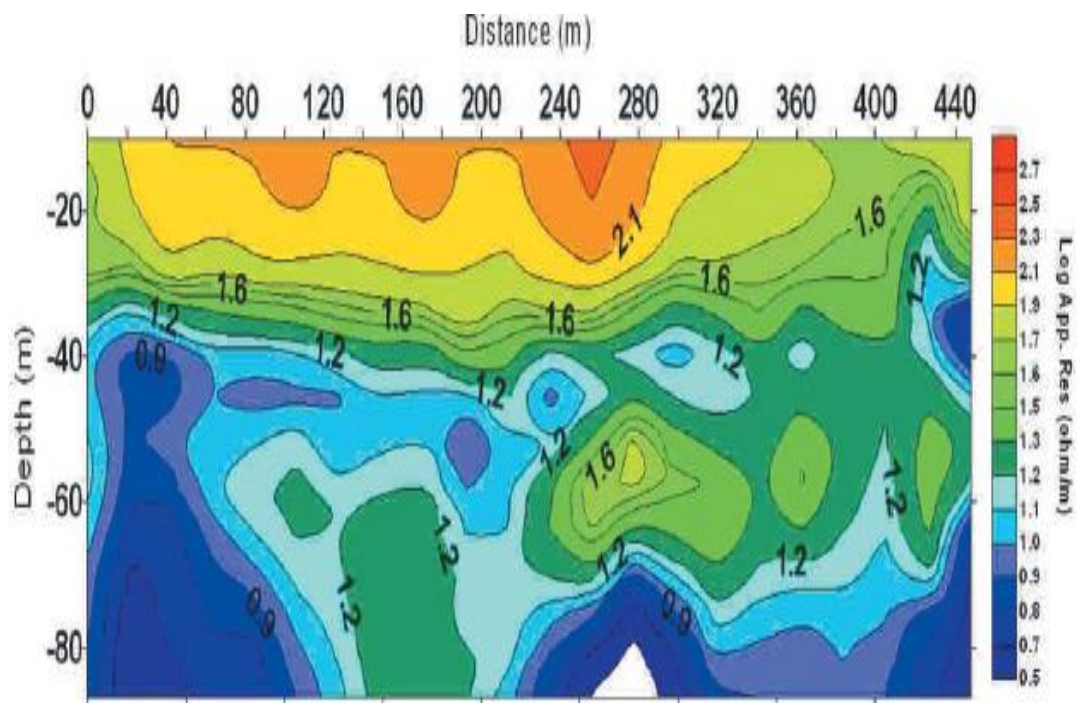
Σχήματα 3.3 – 3.4 – 3.5 : Χάρτες ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης σε παλαιότερες εποχές, σε νεότερες εποχές και σε μεταγενέστερους χρόνους.



Τα **Σχήματα 3.6** και **3.7** δείχνουν τις ψευδοτομές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για τα Προφίλ 1 (Α-Δ) και 2 (Β-Ν), αντιστοίχως. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι, και στις δύο περιπτώσεις, τα πρώτα στρώματα των ψευδο τομών δεν εμφανίζονται, επειδή, κατά την επεξεργασία των δεδομένων, με στόχο την εξάλειψη του υψηλού πολιτιστικού θορύβου στην περιοχή, πολλές φορές κόβονταν όταν το φίλτρο εμφανιζόνταν. Για το Προφίλ 1 (**Σχήμα 3.6**) μπορούμε να παρατηρήσουμε ένα πρώτο στρώμα με υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης (μέχρι τα 250Ωm) και ένα μέσο πάχος 30m. Η δεύτερη στοιβάδα είναι ένα αγωγίμο στρώμα, με ειδική αντίσταση περίπου 10Ωm και πάχος 30m. Κάτω από αυτά τα δύο στρώματα, παρατηρούνται εναλλασσόμενες αγωγίμες (10Ωm) και λιγότερο αγωγίμες (50Ωm) κάθετες φάσεις. Αρχικά, οι φάσεις ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ερμηνεύτηκαν ως καινούργια κρυσταλλικά πετρώματα, οι αγωγίμες ως ρωγματώσεις του υποβάθρου, που έχουν συμπληρωθεί από τα υπόγεια νερά ή/και άργιλο. Μετά τη διάτρηση, ανακαλύφθηκε ότι σε αυτά τα βάθη βρίσκεται ένα μίγμα άμμου και κροκαλοπαγών στρώσεων με γενεσιακό υπόβαθρο. Το Προφίλ 2, από την άλλη πλευρά, δείχνει το ίδιο ωμικά στρώμα στα πρώτα μέτρα βάθος, με ηλεκτρικές αντιστάσεις έως 60Ωm και 30m πάχους (**Σχήμα 3.7**). Κάτω από αυτό το στρώμα, είναι δυνατό να παρατηρηθούν κάποια αγωγίμα διαστήματα με 10Ωm αντίσταση, αλλά όχι σε συνεχή και σαφές μοτίβο. Κάτω των 60m βάθος, παρατηρείται εναλλαγή ζωνών αντίστασης και αγωγιμότητας, που ερμηνεύεται αρχικά ως νεοσχηματισθέντα πετρώματα και ρωγματώσεις. Η λευκή φάση που εμφανίζεται σε απόσταση 150m και 70m βάθος, μπορεί να προκαλείται από την απουσία του σήματος σε αυτά τα βάθη. Η διαφορά μεταξύ των δύο τομών (**Σχήματα 3.6 και 3.7**) θα μπορούσε να εξηγείται από μια ανισοτροπία αντίστασης.



Σχήμα 3.6 : Ψευδοτομή φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης- TEM Προφίλ 1.



Σχήμα 3.7 : Ψευδοτομή φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης- TEM Προφίλ 2.

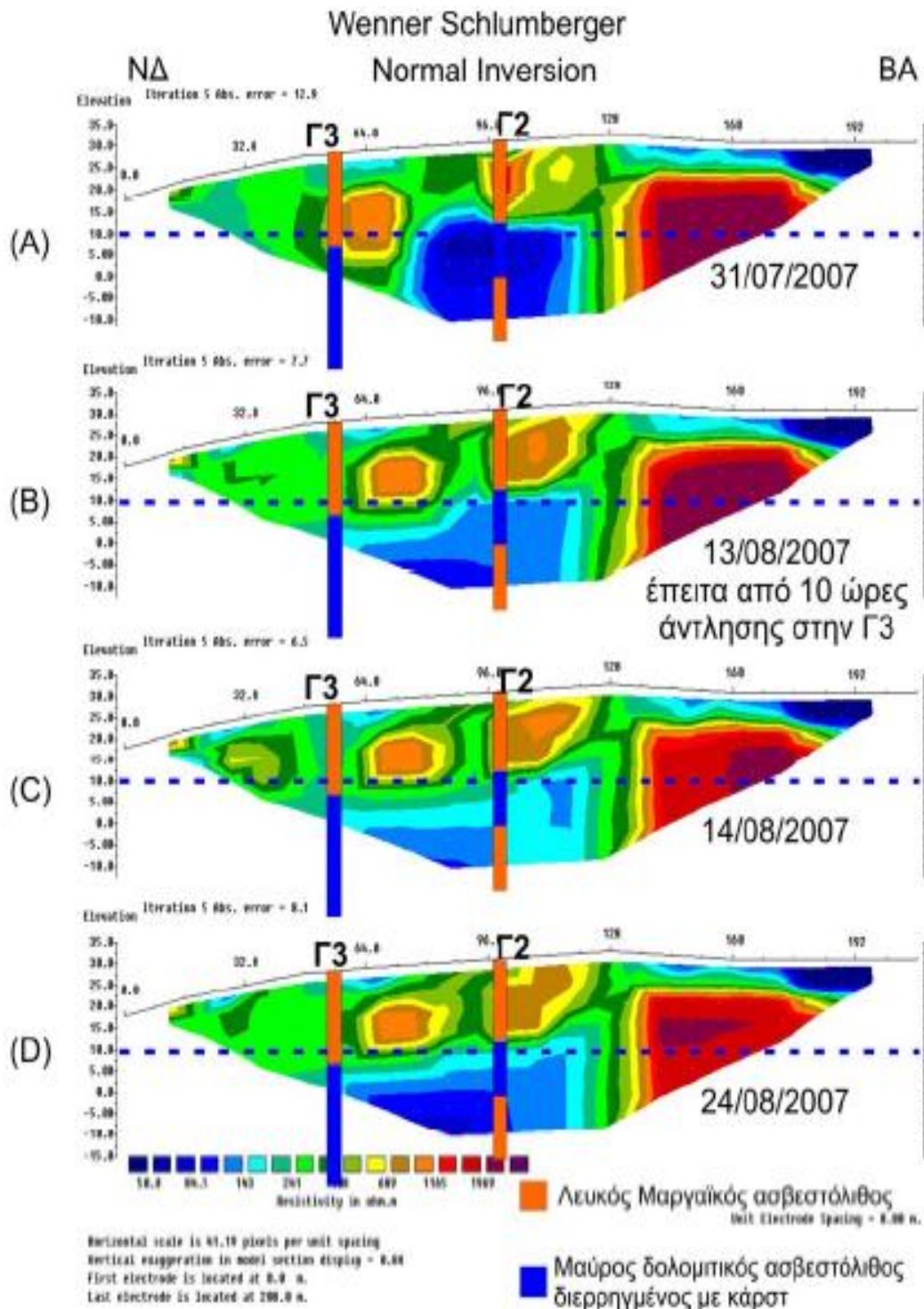
### 3.2 Φαράγγι Αποκορώνου, Χανιά

Η γεωφυσική έρευνα διεξήχθη στο νομό Χανίων το 2007, στον οικισμό Φαράγγι Αποκορώνου για τις ανάγκες διατριβής μεταπτυχιακού του φοιτητή Μιχαλακάκη Ιωάννη με τίτλο «Συμβολή της ηλεκτρικής τομογραφίας στην παρακολούθηση της υφαλμύρισης πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την δοκιμή άντλησης στον οικισμό Φαράγγι Αποκορώνου.»

Σε πόλγη που βρίσκεται ΝΑ του οικισμού Φαράγγι στην ευρύτερη περιοχή του οικισμού Στύλος, στο νομό Χανίων, χημικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, έδειξαν υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων. Το γεγονός ότι η θέση των γεωτρήσεων βρίσκεται σε μεγάλη σχετικά απόσταση από την ακτογραμμή, δημιούργησε προβληματισμό για τη γενικότερη θαλάσσια υφαλμύριση του υπό εκμετάλλευση υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής. Αναδεικνύεται ότι η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας μπορεί να βρει πρακτική εφαρμογή στον εντοπισμό της ρύπανσης (υφαλμύριση) του υπόγειου νερού, ακόμα και σε καρστικοποιημένες δομές.

Στα πλαίσια της έρευνας, πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική άντληση στην υδρογεώτρηση Γ3. Σε μικρή απόσταση από την θέση της υδρογεώτρησης πραγματοποιήθηκε ηλεκτρική τομογραφία (γραμμή 4) σε 4 διακριτές χρονικές περιόδους. Σκοπός της δοκιμαστικής άντλησης (πέρα από την ποιοτική παρακολούθηση του καρστικού υδροφόρου συστήματος κατά την διάρκεια της εκτέλεσής της) ήταν η παρακολούθηση (αξιολόγηση) της επίδρασής της στην κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος. Για τον λόγο αυτό, οι ηλεκτρικές τομογραφίες πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης στην περιοχή στα ακόλουθα διακριτά χρονικά διαστήματα:

1. Στις 31/7/2007 (2 εβδομάδες πριν την εκτέλεση της δοκιμαστικής άντλησης)
2. Στις 13/8/2007 (την ημέρα της άντλησης ~10 ώρες από την έναρξη της αντλητικής δοκιμής)
3. Στις 14/8/2007 (24 ώρες αφού η δοκιμή είχε ολοκληρωθεί)
4. Στις 24/8/2007 (10 ημέρες αργότερα)



**Σχήμα 3.8 :** Η γεωηλεκτρική τομή του υπεδάφους για τους 4 διακριτούς χρόνους που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας (διάταξη Wenner – Schlumberger). Η μαύρη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην κάθετη προβολή της θέσης υδρογεώτρησης Γ3 στην γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας (απόσταση ~65m). Οι ψευδοτομές (A), (B), (C) και (D) αντιστοιχούν στα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα 4 διακριτά χρονικά διαστήματα. Η γαλάζια οριζόντια διακεκομμένη γραμμή δείχνει τη στάθμη της επιφάνειας του καρστικού υδροφόρου (~+10m) την περίοδο της δοκιμής.

Έπειτα από την αξιολόγηση των παραπάνω χαρτών και όλων των διαθέσιμων πληροφοριών για την περιοχή, προκύπτουν τα ακόλουθα στοιχεία:

1. Το γεωηλεκτρικό στρώμα με τις χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης που απαντά επιφανειακά, αποδίδεται στις προσχωματικές αποθέσεις που παρατηρούνται εντός των καρστικών εγκοίλων. Στο Βορειοανατολικό τμήμα της γραμμής, οι αποθέσεις αποκτούν μεγαλύτερο πάχος.
2. Το γεωηλεκτρικό στρώμα με τιμές ειδικής αντίστασης 240 – 400 Ohm.m αποδίδεται στον μαργαϊκό ασβεστόλιθο, ο οποίος απαντά επιφανειακά στην περιοχή που πραγματοποιήθηκε η γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας.
3. Τα δύο γεωηλεκτρικά σώματα εντός του μαργαϊκού ασβεστόλιθου αποδίδονται στη ύπαρξη καρστικών εγκοίλων (πληρωμένων ή μη), όπως εκτιμάται από την συνολική εμφάνιση του σχηματισμού στην ευρύτερη περιοχή. Τα δύο σώματα που εμφανίζονται στις ψευδοτομές βρίσκονται πάνω από τη στάθμη του καρστικού υδροφόρου.
4. Οι μεγάλες τιμές ειδικής αντίστασης που εμφανίζει το γεωηλεκτρικό σώμα στα Βορειοανατολικά της γραμμής 4, πιθανόν να οφείλονται είτε στην παρουσία μεγάλου καρστικού εγκοίλου, είτε σε έξαρση του υποκείμενου γεωλογικού στρώματος (λατυποπαγή μεταμορφωμένα ανθρακικά πετρώματα).

Από τη σύγκριση των τεσσάρων ψευδοτομών που προέκυψαν έπειτα από την επεξεργασία των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στη γραμμή 4, προκύπτουν τα ακόλουθα:

1. Δεν παρατηρείται αξιόλογη μεταβολή της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους στην θέση όπου πραγματοποιήθηκε η γραμμή 4 ηλεκτρικής τομογραφίας, έπειτα από την εκτέλεση της αντλητικής δοκιμής στην υδρογέωτρηση Γ3.
2. Οι μικρές διαφοροποιήσεις της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους εντάσσονται στα περιθώρια σφάλματος της μεθόδου, τόσο κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων όσο και κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους.

3. Στις γεωηλεκτρικές τομές (B) και (C) παρατηρούνται ενδείξεις μείωσης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κοντά στη θέση της υδρογεώτρησης Γ3.

### 3.3 Kamarooka, Αυστραλία

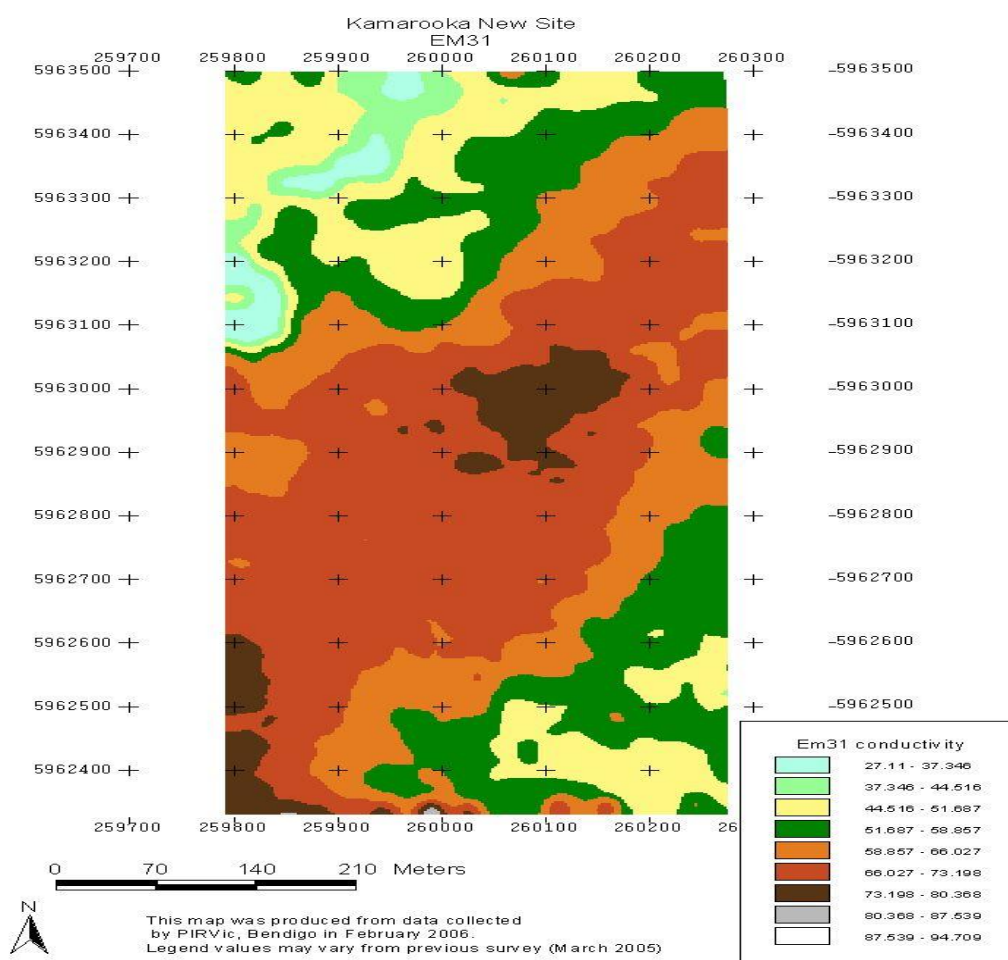
Το Μάρτιο του 2005, το NUGF σε συνεργασία με το DPI, χαρτογράφησαν την κατανομή της υφαλμύρισης σε μια περιοχή. Το DPI ανέλαβε την έρευνα με τη χρήση ενός τετράτροχου αυτοκινούμενου οχήματος, εφοδιασμένο με τον εξοπλισμό για την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο.



*Εικόνα 3.1: Τετράτροχο όχημα για την κάλυψη της περιοχής της έρευνας εξοπλισμένο με τα απαραίτητα όργανα μέτρησης.*

Οι ηλεκτρομαγνητικές έρευνες μετράνε τη φαινόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους. Αφού οι περιοχές με υφαλμύριση είναι πιο αγωγίμες σε σύγκριση με τα εδάφη χωρίς υφαλμύριση, οι χάρτες της ηλεκτρικής αγωγιμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να απεικονίσουν την κατανομή της υφαλμύρισης σε μια περιοχή.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο όργανα EM-38 μαζί με ένα EM-31. Τα διαφορετικά όργανα και οι διαφορετικοί προσανατολισμοί με τους οποίους τοποθετήθηκαν αυτά, βοηθούν στον εντοπισμό των περιοχών της υφαλμύρινσης σε διαφορετικά βάθη στο υπέδαφος.



*Σχήμα 3.9 : Χάρτης αγωγιμότητας από την ηλεκτρομαγνητική έρευνα με το τετράτροχο όχημα με τη βοήθεια του οργάνου EM-31, το οποίο προσδιορίζει τις περιοχές της υφαλμύρινσης.*

### 3.4 Abergwygregyn, Βόρεια Ουαλία, Ηνωμένο Βασίλειο

Η παρακάτω έρευνα διεξήχθη για τις ανάγκες διατριβής μεταπτυχιακού, του τμήματος School of Ocean Sciences του Πανεπιστημίου της Ουαλίας από τους

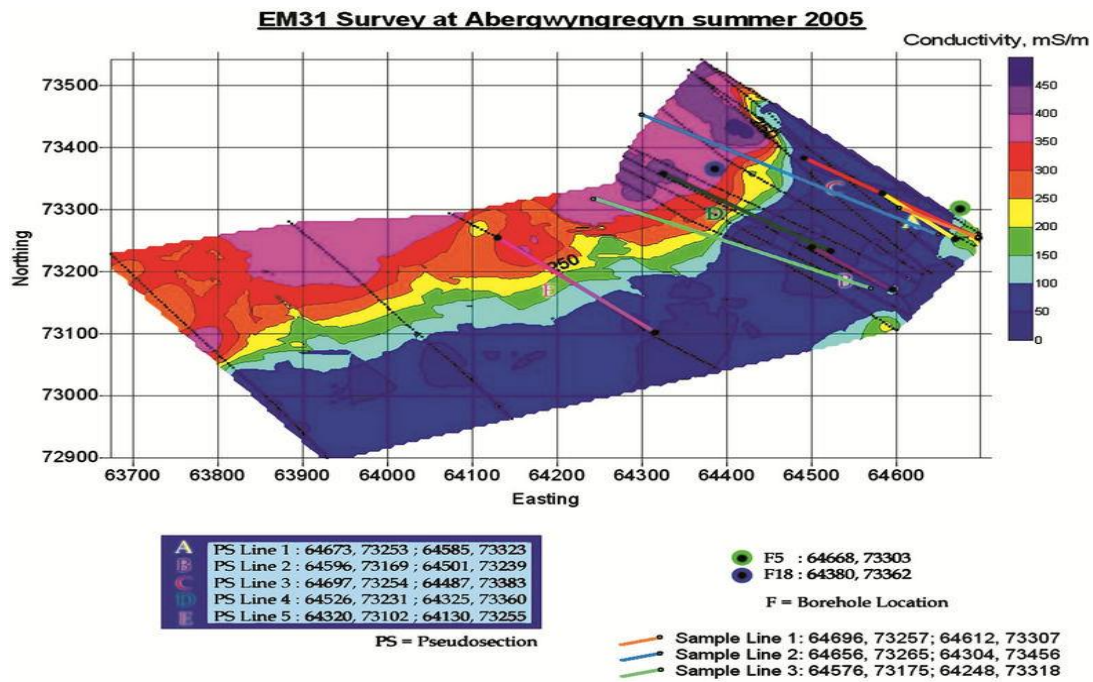
Ismalia B. Obikoya και Jim D. Bennell το 2012 στην περιοχή Abergwygregyn στη Βόρεια Ουαλία, στο Ηνωμένο Βασίλειο.

Προκειμένου να προσδιοριστούν τα προβλήματα που προκαλούνται από την εισχώρηση αλάτων, είτε από φυσική αιτία, είτε από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, έχουν εφαρμοστεί πολλές μέθοδοι. Η εφαρμογή γεωτρήσεων είναι παρεμβατική μέθοδος, δύσκολη στην εφαρμογή, αρκετά ακριβή και απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτή η έρευνα διερευνά την αποτελεσματικότητα της χρήσης μη παρεμβατικών γεωφυσικών μεθόδων για να χαρτογραφήσουν και να οριοθετήσουν τη διεπιφάνεια του καθαρού νερού. Η άντληση υδάτινων πόρων είναι η κύρια αιτία διείσδυσης υφάλμυρου νερού. Πολλές χώρες βασίζουν την παροχή τους σε νερό στα υπόγεια ύδατα. Συνεπώς, η έρευνα σχετικά με την υφαλμύριση είναι καθοριστικής σημασίας, προκειμένου να αποφευχθεί η ανάμιξη του υφάλμυρου με το καθαρό νερό, το οποίο προορίζεται για κατανάλωση ή για άλλες γενικές χρήσεις.

Ο συνδυασμός της μεθόδου της ηλεκτρικής αντίστασης και των ηλεκτρομαγνητικών, αντισταθμίζει τις ελλείψεις που ίσως έχει η κάθε μέθοδος χωριστά. Η μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης επιτρέπει τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα στο έδαφος με τη βοήθεια δύο ηλεκτροδίων και μετρώντας το πεδίο που δημιουργείται με τη βοήθεια άλλων δύο ηλεκτροδίων. Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή είναι μια άλλη γεωφυσική μέθοδος, που χρησιμοποιείται για να μετρήσει την αγωγιμότητα του εδάφους, που είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα των πετρωμάτων και των διαφόρων υλικών του εδάφους.

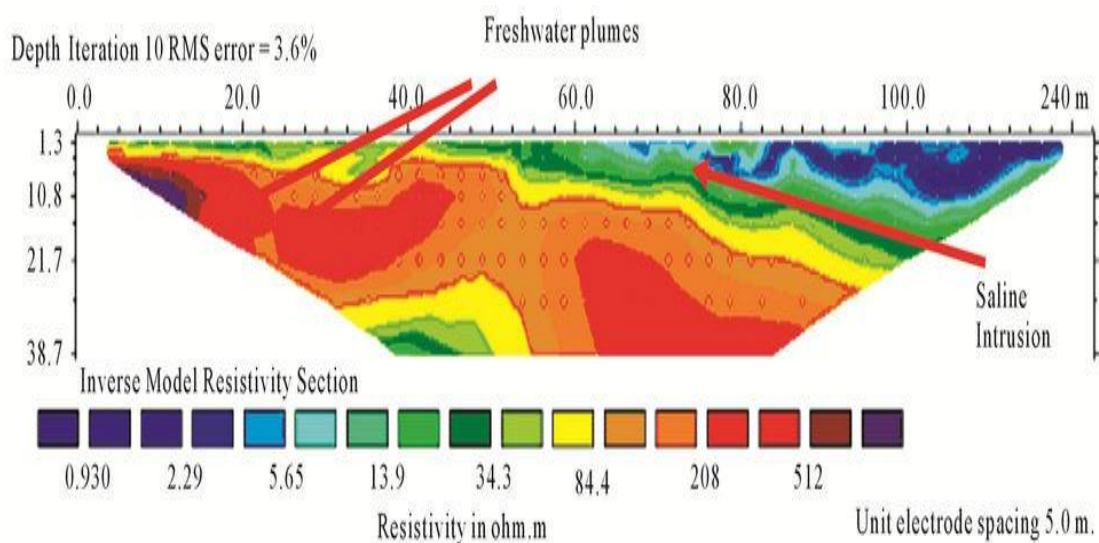
Η περιοχή της έρευνας ήταν παράκτια, κατά μήκος της ακτογραμμής της Βόρειας Ουαλίας στο Abergwygregyn. Χαλίκια και κροκαλοπαγή οριοθετούν τη νοτιότερη πλευρά και αυτή η περιοχή αποτελεί το όριο του θαλάσσιου περιβάλλοντος από την καλλιεργήσιμη έκταση. Για την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο χρησιμοποιήθηκε το μηχάνημα Geonics EM-31 για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.





**Σχήμα 3.10:** Χάρτης contour EM-31 με τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Από τον χάρτη (Σχήμα 3.10), παρατηρούμε ότι η αγωγιμότητα ποικίλει, υποδεικνύοντας την άνιση κατανομή του θαλασσινού νερού, μια ελαφρά μεγαλύτερη τιμή αγωγιμοτήτων (150 – 200 mS/m) προκύπτει στη ΒΑ πλευρά. Επίσης, στο χάρτη παρουσιάζονται και οι θέσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας (ψευδοτομές). Οι χάρτες της ειδικής αντίστασης έχουν πλεονέκτημα έναντι των χαρτών των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων EM-31, καθώς μπορούν να προσδιορίσουν τόσο τις πλευρικές όσο και τις κάθετες προεκτάσεις των στρωμάτων.



**Σχήμα 3.11 :** Γεωηλεκτρική τομή υπεδάφους

Η γεωηλεκτρική τομή του **Σχήματος 3.11** έχει μήκος 245 μέτρα. Μια περιοχή με υφάλμυρο νερό εντοπίζεται στο επάνω μέρος της διεπιφάνειας με το καθαρό νερό, στο βορειότερο άκρο της τομής, το οποίο εκτείνεται από τα 120m έως τα 235m. Αυτή η περιοχή εμφανίζει ειδικές αντιστάσεις από 1 έως 3 Ωm.

### **3.5. Στύλος, Χανιά**

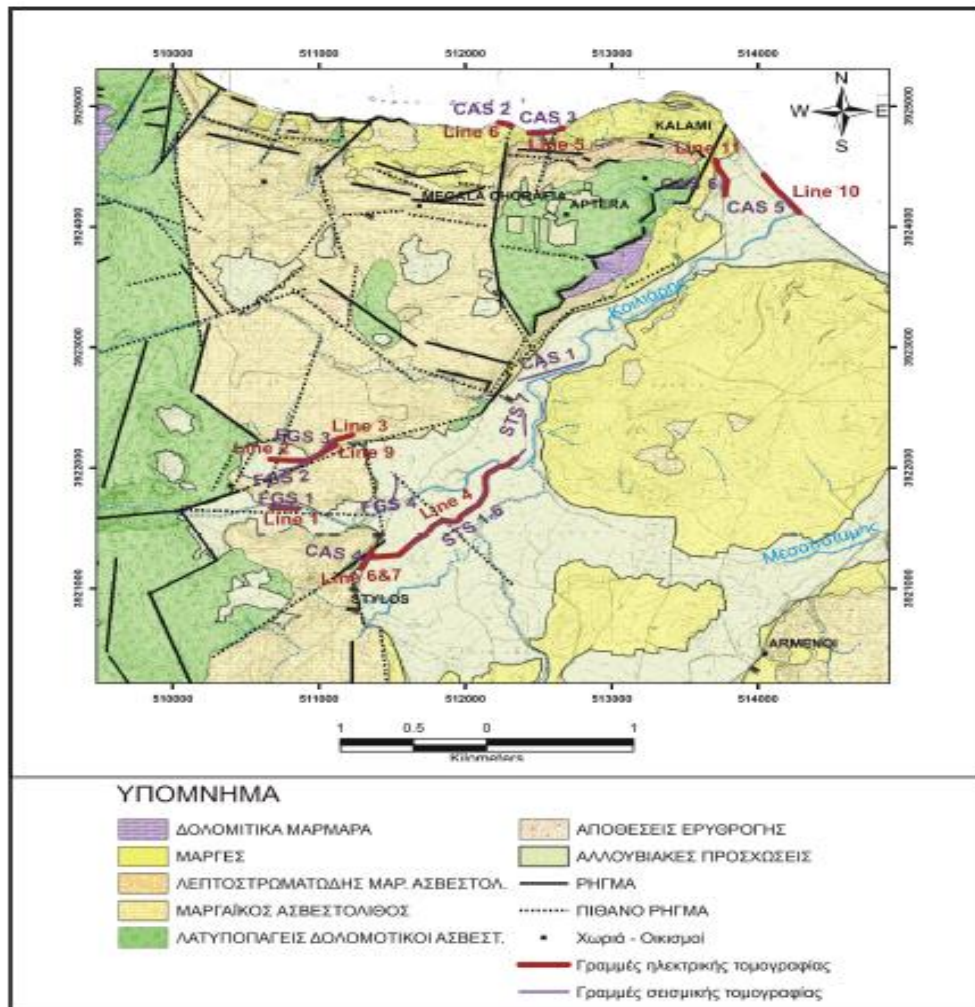
Η περιοχή μελέτης ανήκει διοικητικά στο Νομό Χανίων και εκτείνεται νοτιώς της εθνικής οδού Χανίων-Ρεθύμνης. Αφορμή για την παρούσα διερεύνηση, αποτέλεσε η διαπίστωση παρουσίας υφάλμυρων υδάτων σε ερευνητικές γεωτρήσεις που είχε πραγματοποιήσει ο Ο.Α.ΔΥ.Κ. κατά την χρονική περίοδο 1981-1982, σε πόλη που βρίσκεται 1300m περίπου, Β-ΒΔ του οικισμού Στύλος, στην επαρχία Αποκορώνου, του νομού Χανίων.

Βασικός στόχος της διερεύνησης αποτέλεσε η διαπίστωση των γεωλογικών δομών στις οποίες οφείλεται η παρουσία αυξημένων χλωριόντων (Cl-) στα ύδατα της περιοχής. Η απουσία χαρτογραφημένων δομών γύψου, ανυδρίτη, ή ορυκτού αλατιού στην περιοχή οδήγησε αρχικά στην εκτίμηση, ότι η πιθανότερη αιτία για την αλμύριση των υπογείων υδάτων, οφείλεται σε διείσδυση της θάλασσας.

Η παρούσα έρευνα διεξήχθη από τον Hamdan Hamdan, Μηχανικό Ορυκτών Πόρων, στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής του, για την απεικόνιση του μετώπου της υφαλμύρισης. Στο πλαίσιο αυτό, εφαρμόστηκαν δύο γνωστές μέθοδοι της γεωφυσικής (ηλεκτρική τομογραφία και τομογραφία σεισμικής διάθλασης), καθώς και ένα βασικό μαθηματικό εργαλείο, που χρησιμοποιείται ευρέως στην επεξεργασία γεωφυσικών δεδομένων, αυτό της αντιστροφής.

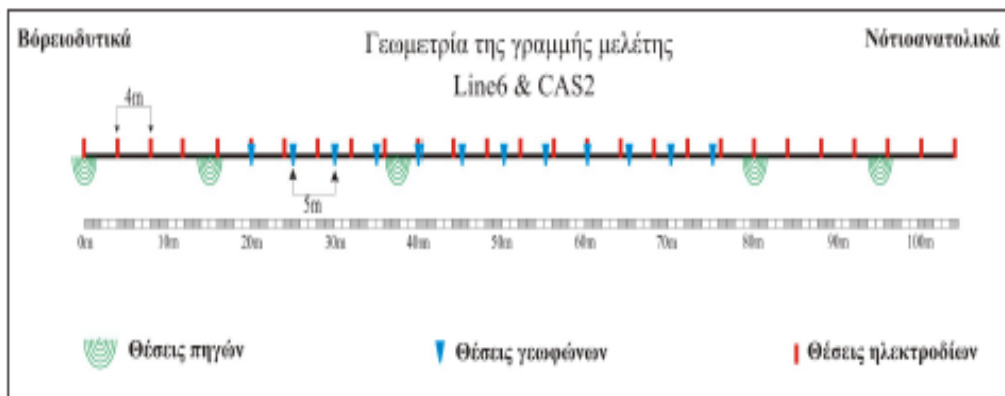
Όλες οι μέθοδοι αντιστροφής επιδιώκουν τον προσδιορισμό των παραμέτρων ενός μοντέλου του υπεδάφους, το οποίο αναπαράγει τα μετρούμενα δεδομένα κάτω από συγκεκριμένους περιορισμούς. Για τις μεθόδους αντιστροφής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, οι παράμετροι του μοντέλου είναι οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του κάθε κελιού ή στοιχείου του μοντέλου, ενώ τα μετρούμενα μεγέθη είναι οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Στην περίπτωση της μεθόδου σεισμικής διάθλασης, οι παράμετροι του μοντέλου είναι οι τιμές της ταχύτητας διάδοσης των (διαμηκών ή εγκαρσίων) σεισμικών κυμάτων για

κάθε κελί ή στοιχείο, ενώ τα μετρούμενα μεγέθη είναι οι χρόνοι των πρώτων αφίξεων των κυμάτων αυτών.



**Σχήμα 3.12 :** Λεπτομερής γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης και οι θέσεις των γραμμών μελέτης.

Με την ηλεκτρική τομογραφία έγιναν έντεκα (11) τομές συνολικού μήκους 3500 m περίπου, και με την σεισμική τομογραφία δεκαεφτά (17) γραμμές συνολικού μήκους 3500 m περίπου. Οι θέσεις των γραμμών επιλέχθηκαν βάσει των αποτελεσμάτων ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων και της λεπτομερούς γεωλογικής χαρτογράφησης και όπου επέτρεπαν οι συνθήκες της περιοχής (ανάγλυφο, δρόμοι, οικισμοί κλπ). Τονίζεται ότι κατά την διάρκεια των μετρήσεων επιχειρήθηκε η διασκόπηση κάθε γραμμής μελέτης με τις μεθόδους της ηλεκτρικής και σεισμικής τομογραφίας όπου αυτό ήταν εφικτό, προκειμένου να είναι άμεση η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.



**Σχήμα 3.13:** Η γεωμετρία μιάς εκ των γραμμών ηλεκτρικής (Line6) και σεισμικής (CAS2) τομογραφίας, και οι σχετικές θέσεις των ηλεκτροδίων, γεωφώνων και σεισμικών πηγών.

Η συλλογή των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιήθηκε με το σύστημα StingR1/Swift της AGI (Advanced Geosciences, Inc). Σχεδόν σε όλες τις γραμμές μελέτης χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις Wenner-Schlumberger και διπόλου-διπόλου, ενώ η απόσταση ανάμεσα από τα ηλεκτρόδια κυμαινόταν από 2 m μέχρι 20m.

Η πρώτη διάταξη είναι περισσότερο ευαίσθητη στις μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος, με αποτέλεσμα να προσφέρει πολύτιμη πληροφορία για την στρωματογραφία στην περιοχή μελέτης. Ο μεγάλος λόγος σήματος προς θόρυβο που την χαρακτηρίζει (Ward 1990, Loke 1995), την καθιστά κατάλληλη για περιοχές όπου η παρουσία ρηγμάτων και η έντονη υδροφορία αναμένεται να αυξήσει την αβεβαιότητα στις μετρήσεις.

Από την άλλη, η διάταξη διπόλου-διπόλου είναι περισσότερο ευαίσθητη σε πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η μεγάλη πλευρική διακριτική ικανότητα της συγκεκριμένης διάταξης, θεωρήθηκε αρκετά σημαντική για τον εντοπισμό καρστικών δομών που κυριαρχούν στην περιοχή, και συνεισφέρουν τα μέγιστα στη διεύθυνση του θαλασσινού νερού στον υδροφόρα.

Για την καταγραφή των σεισμικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε 12-κάναλος σειсмоγράφος GEODE, 24-κάναλος σειсмоγράφος ES2401 της Geometrics(TM) και γεώφωνα κατακόρυφης συνιστώσας χαρακτηριστικής συχνότητας 4.5 και 14 Hz. Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με την διάταξη κοινής πηγής σε όλες τις γραμμές μελέτης. Η παραγωγή σεισμικών κυμάτων πραγματοποιήθηκε με την

κρούση βαριοπούλας 6 kg πάνω σε μεταλλική πλάκα ή με τη χρήση του Seisgun “Betsy”.

### ***Γεωηλεκτρική γραμμή Line6 και σεισμική γραμμή CAS2***

Η γραμμή μελέτης Line6 (ηλεκτρικής τομογραφίας) και CAS2 (σεισμικής τομογραφίας) βρίσκεται παραλιακά σε απόσταση 25 m περίπου από την θάλασσα και σε απόλυτο υψόμετρο 4-5 m. Η διεύθυνση της γραμμής μελέτης ήταν από βορειοδυτικά προς νοτιοανατολικά, όπου το βορειοδυτικό άκρο της σεισμικής γραμμής (πρώτη πηγή) συμπίπτει με το αντίστοιχο βορειοδυτικό άκρο της ηλεκτρικής γραμμής (πρώτο ηλεκτρόδιο). Η συλλογή των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιήθηκε με δύο διατάξεις (Wenner Schlumberger και διπόλου-διπόλου), χρησιμοποιώντας 27 ηλεκτρόδια με απόσταση  $a=4$  m ανάμεσα τους, ενώ το συνολικό μήκος της γραμμής μελέτης ήταν 104 m. Για τη σεισμική τομογραφία, χρησιμοποιήθηκαν πέντε πηγές σε αναπτύγματα των 12 γεωφώνων, όπου η ισαπόσταση των γεωφώνων ήταν 5 m. **(Σχήμα 3.13)**.

### ***Εφαρμογή συνδυασμένης αντιστροφής διατάξεων στη γεωηλεκτρική γραμμή Line6***

Η γραμμή μελέτης Line6 βρίσκεται πολύ κοντά στην θάλασσα, και σε απόλυτο υψόμετρο 4m περίπου. Γεωλογικά, παρατηρούνται μάργες επιφανειακά, που καλύπτουν τον μαργαϊκό ασβεστόλιθο **(Σχήμα 3.12)**. Τα αποτελέσματα και των δύο διατάξεων, αλλά και της συνδυασμένης αντιστροφής τους φαίνονται στο **Σχήμα 3.14**, όπου παρατηρούνται γενικώς τρία γεωηλεκτρικά στρώματα:

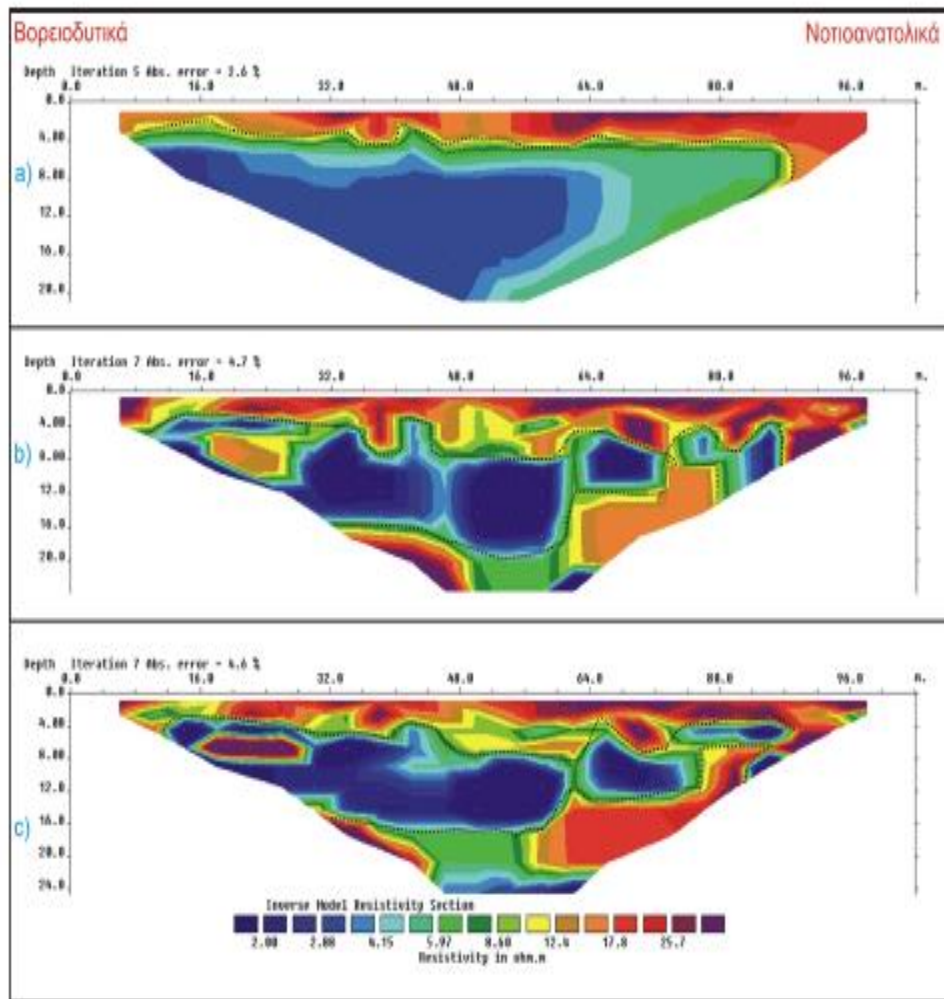
- Ένα επιφανειακό γεωηλεκτρικό στρώμα που εκτείνεται κατά μήκος της γραμμής μελέτης, με τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης να κυμαίνονται από 20 ως 70  $\Omega\text{m}$  περίπου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της διάταξης Wenner-Schlumberger **(Σχήμα 3.14a)** το στρώμα αυτό είναι σχετικά ομοιογενές και το πάχος του δεν ξεπερνά τα 4 m. Στην διάταξη διπόλου-διπόλου **(Σχήμα 3.14b)**, το αντίστοιχο στρώμα εμφανίζει έντονη πλευρική ανομοιογένεια, ενώ το πάχος του φτάνει και τα 8 m κατά τόπους.
- Ένα δεύτερο γεωηλεκτρικό στρώμα με πολύ χαμηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ( $<5$   $\Omega\text{m}$ ). Σύμφωνα με την διάταξη Wenner-

Schlumberger το πάχος του ξεπερνά τα 16 m, ενώ τα αποτελέσματα της διάταξης διπόλου-διπόλου διαφέρουν καθώς το πάχος του φαίνεται να κυμαίνεται μεταξύ 5 m στο νοτιοανατολικό τμήμα της γραμμής και 10 m στο βορειοδυτικό.

- Τέλος, υπάρχει ένα γεωηλεκτρικό στρώμα που εντοπίζεται μόνο με την διάταξη διπόλου-διπόλου, όπου οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι ελαφρώς αυξημένες (10 – 50 Ωm). Το στρώμα αυτό βρίσκεται σε βάθος 16 m περίπου, στο βορειοδυτικό τμήμα της γραμμής, ενώ εντοπίζεται 4 m πιο ρηχά στο τέλος της.

Στην γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή των δεδομένων της διάταξης διπόλου-διπόλου (**Σχήμα 3.14b**), παρατηρείται πλευρική μεταβολή στις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στα πρώτα δύο γεωηλεκτρικά στρώματα. Το μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης της συγκεκριμένης διάταξης επιτρέπει τον εντοπισμό ενός τρίτου γεωηλεκτρικού στρώματος σε βάθος 16 m περίπου από την επιφάνεια, με ελαφρώς αυξημένες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από τον συνδυασμό των δεδομένων των δύο διατάξεων (**Σχήμα 3.14c**), είναι περισσότερο επηρεασμένη από τα δεδομένα της διάταξης διπόλου-διπόλου, όπως αναμενόταν. Παρατηρείται πλευρική μεταβολή στις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο δεύτερο και τρίτο γεωηλεκτρικό στρώμα, που μπορεί να αποδοθεί σε διαφορετικό βαθμό καρστικοποίησης του μαργαϊκού ασβεστόλιθου. Οι πολύ χαμηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, αποτελούν ένδειξη έντονης εισροής του θαλασσινού νερού στην ενδοχώρα από αυτή τη θέση.



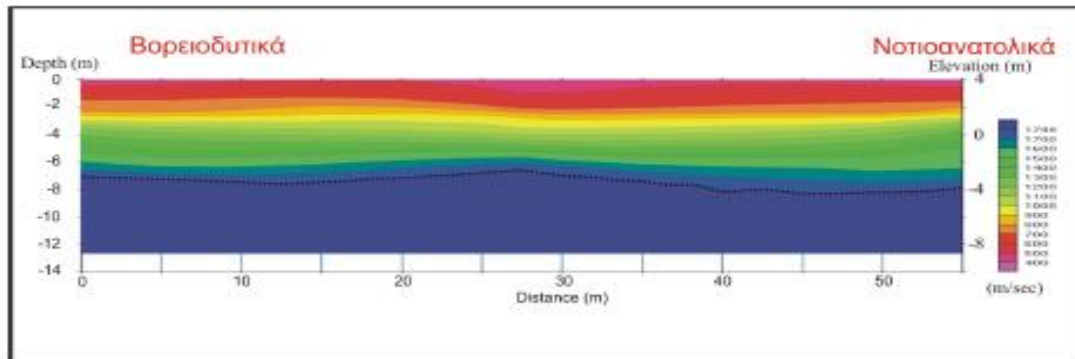
**Σχήμα 3.14:** Γεωηλεκτρική τομή Line6, με διεύθυνση βορειοδυτικά προς νοτιοανατολικά. Η διακεκομμένη μαύρη οριοθετεί τις διεπιφάνειες των γεωηλεκτρικών στρωμάτων. (a) Διάταξη Wenner-Schlumberger, (b) Διάταξη διπόλου-διπόλου, (c) Συνδυασμένη αντιστροφή των δύο διατάξεων.

### Σεισμική γραμμή CAS2

Η σεισμική γραμμή CAS2 βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης, δυτικά του οικισμού Καλάμι, στην ίδια θέση με την ηλεκτρική γραμμή Line6, προκειμένου να είναι άμεση η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων (Σχήμα 3.14). Αποτελείται από 1 ανάπτυγμα 12 γεωφώνων, συνολικού μήκους 55 m και έχει διεύθυνση νοτιοδυτικά προς βορειοανατολικά. Η απόσταση ανάμεσα από τα γεώφωνα ήταν 5 m. Από τα αποτελέσματα της σεισμικής τομογραφίας παρατηρούνται τρία σεισμικά στρώματα (Σχήμα 3.15) :

- Ένα επιφανειακό στρώμα που εκτείνεται κατά μήκος της γραμμής, με τιμές της ταχύτητας διάδοσης των P - κυμάτων που κυμαίνονται από 500 έως 1000 m/s περίπου. Το πάχος του εκτιμάται στα 7 με 8 m.

- Κάτω από αυτό το επιφανειακό στρώμα, εντοπίζεται ένα δεύτερο με υψηλότερες τιμές της ταχύτητας διάδοσης των P – κυμάτων που φτάνουν τα 1700 m/s περίπου.



**Σχήμα 3.15:** Σεισμική τομή CAS2 με διεύθυνση βορειοδυτικά προς νοτιοανατολικά. Η διακεκομμένη μαύρη γραμμή οριοθετεί τις διεπιφάνειες των σεισμικών στρωμάτων.

### Σύγκριση της γεωηλεκτρικής τομής Line6 και της σεισμικής τομής CAS2

Το βορειοδυτικό άκρο της σεισμικής τομής βρίσκεται 20 m περίπου από την αρχή της γεωηλεκτρικής τομής. Οι γραμμές αυτές ταυτίζονται και έχουν διεύθυνση βορειοδυτικά προς νοτιοανατολικά. Στο **Σχήμα 3.16** απεικονίζονται σε τομή υπέρθεσης τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων. Ως υπόβαθρο, έχει χρησιμοποιηθεί η γεωηλεκτρική τομή που πραγματοποιήθηκε με τη διάταξη διπόλου-διπόλου, πάνω στην οποία έχει τοποθετηθεί η σεισμική τομή, ως ημιδιαφανής εικόνα. Η διακεκομμένη μαύρη γραμμή οριοθετεί την διεπιφάνεια ανάμεσα από τα σεισμικά στρώματα. Στη θέση αυτή της γεωφυσικής διασκόπησης, από τις γεωηλεκτρικές μεθόδους εντοπίζονται 3 στρώματα, ενώ από τις σεισμικές εντοπίζονται 2 στρώματα.

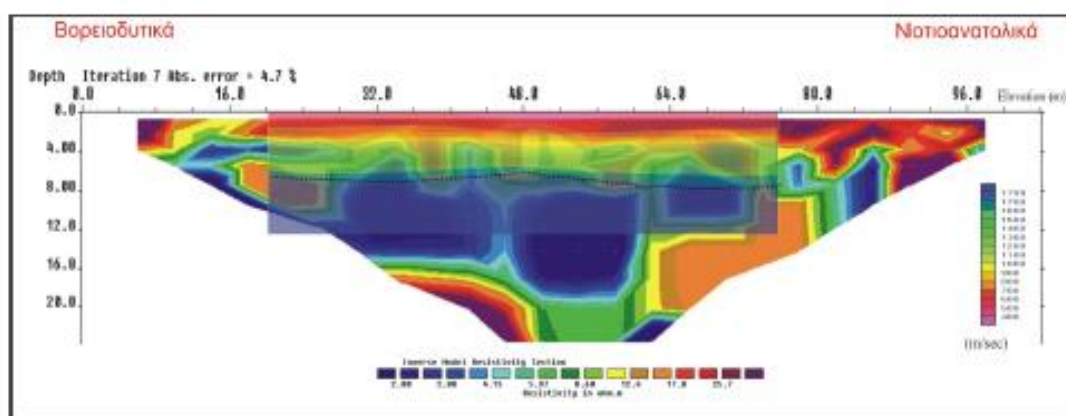
Η γεωλογική και υδρογεωλογική ερμηνεία των γεωφυσικών αποτελεσμάτων συνοψίζεται ως εξής:

- Το επιφανειακό στρώμα που εντοπίζεται στις δύο μεθόδους αποδίδεται σε μάργα που παρατηρείται και επιφανειακά. Η πλευρική διακριτική ικανότητα της διάταξης διπόλου-διπόλου επιτρέπει την καλύτερη απεικόνιση της έντονης ανομοιογένειας κυρίως σε βάθη 4 με 8 m.
- Το δεύτερο γεωηλεκτρικό στρώμα που χαρακτηρίζεται από τιμές μικρότερες των 5 Ωm, και ταχύτητας διάδοσης των P κυμάτων μεγαλύτερες των 1500 m/s, αποδίδεται σε κορεσμένο μαργαϊκό ασβεστόλιθο έντονα



καρστικοποιημένο. Οι πολύ χαμηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αποτελούν ένδειξη της εισροής του υφάλμυρου νερού σε αυτό το βάθος.

- Τέλος, το τρίτο στρώμα εντοπίζεται μόνο με την ηλεκτρική τομογραφία, καθώς το βάθος του ξεπερνά το μέγιστο βάθος διασκόπησης της σεισμικής τομογραφίας. Το στρώμα αυτό εντοπίζεται πιο ρηχά στο νοτιοανατολικό τμήμα της γραμμής μελέτης, αποδίδεται επίσης σε κορεσμένο μαργαϊκό ασβεστόλιθο, λιγότερα καρστικοποιημένο από το δεύτερο.



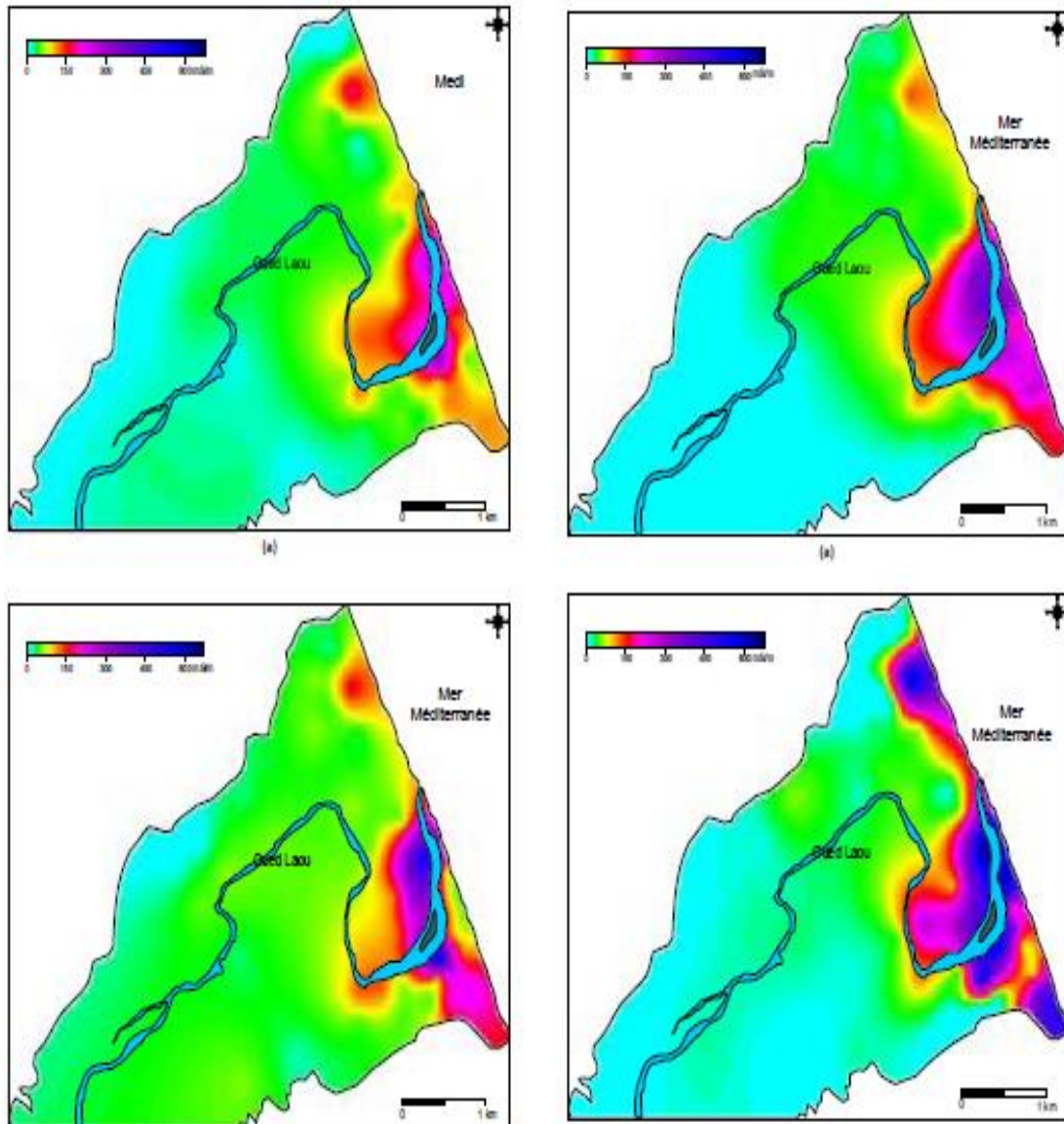
**Σχήμα 3.16:** Υπέρθωση της σεισμικής γραμμής CAS2, και της γεωηλεκτρικής τομής Line6 (διπόλου-διπόλου, αντιστροφή με την χρήση της νόρμας L1). Η μαύρη διακεκομμένη γραμμή οριοθετεί τις διεπεράσεις των σεισμικών στρωμάτων.

### 3.6 Oued Laou, Μαρόκο

Οι υδρογεωλογικές μελέτες είναι πολύ σημαντικές για την ανίχνευση και τον περιορισμό των προβλημάτων μόλυνσης. Η ολοκληρωμένη χρήση γεωφυσικών και υδρογεωλογικών μεθόδων μπορεί να είναι ακόμη πιο αποδοτική σε μεγάλο εύρος περιβαλλοντικών προβλημάτων, όπως η διείσδυση υφάλμυρου νερού σε παράκτιους υδροφορείς. Η μεγάλη αντίθεση μεταξύ κορεσμένων σχηματισμών με υφάλμυρο και με καθαρό νερό, έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές για την μελέτη της διείσδυσης θαλασσινού νερού σε παράκτιους υδροφορείς.

Σε αυτή την έρευνα, παράλληλα με τις υδρογεωλογικές μεθόδους, χρησιμοποιήθηκαν η ηλεκτρική και η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος με το όργανο



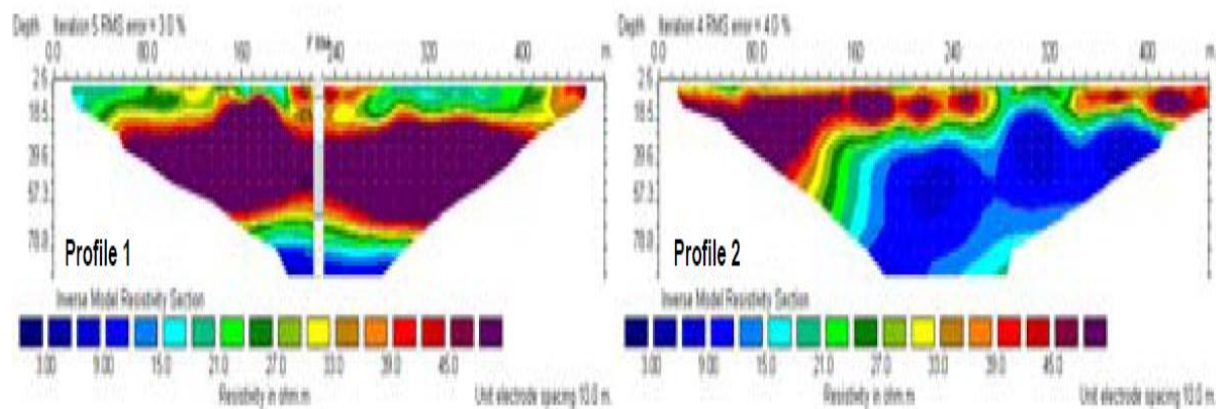


**Σχήμα 3.18:** Χάρτες μετρούμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας από το ηλεκτρομαγνητικό όργανο EM34 με 10 HD, 20 HD, 40 HD, 40 VD

Από τους ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες του **Σχήματος 3.18**, παρατηρούμε ότι η υφαλμύριση εντοπίζεται γενικά στην ανατολική πλευρά της κοιλάδας. Στον ηλεκτρομαγνητικό χάρτη 20HD, το μέτωπο της υφαλμύρισης αποτυπώνεται σε μεγαλύτερη έκταση, σε σύγκριση με τους χάρτες των 10HD και 40HD. Τέλος, στον ηλεκτρομαγνητικό χάρτη 40VD, οριοθετείται ολόκληρη η περιοχή της υφαλμύρισης που προκύπτει από τους προηγούμενους ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες.

Με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας, έγιναν 5 τομές με διάταξη Wenner – Schlumberger. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ήταν 10 μέτρα σε σύνολο 48 ηλεκτροδίων. Για την Τομή 1 (**Σχήμα 3.19a**), η οποία βρίσκεται ΒΑ της

περιοχής έρευνας, εντοπίζονται τρία διαφορετικά στρώματα. Το πρώτο επιφανειακό στρώμα παρουσιάζει ειδική αντίσταση περίπου 30 Ωm και ένα μεταβλητό πάχος 2 – 15 μέτρων. Το δεύτερο στρώμα παρουσιάζει τιμές ειδικής αντίστασης μεγαλύτερες από 100 Ωm και πάχος 40 μέτρων, ενώ το τρίτο και βαθύτερο στρώμα έχει τιμές μικρότερες των 10 Ωm.



*Σχήμα 3.19: Τομές ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης*

Ο συσχετισμός των τιμών των ειδικών αντιστάσεων με τις γεωλογικές πληροφορίες, μας βοηθά να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι το πρώτο στρώμα αποτελείται από αργίλους, το δεύτερο στρώμα αποτελείται από χαλίκια και το βαθύτερο και παράλληλα το πιο αγωγίμο στρώμα αποτελείται από αργίλους και άμμο κορεσμένες με θαλασσινό νερό.

Για την Τομή 2 (**Σχήμα 3.19b**), η οποία βρίσκεται κοντά στην ακτογραμμή, οι χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης, αυτές των 5 Ωm, που εντοπίζονται στο κάτω μέρος της τομής, απευθύνονται σε υφάλμυρο νερό. Το στρώμα του καθαρού νερού επιπλέει πάνω από το στρώμα του αλμυρού, καθώς το καθαρό νερό παρουσιάζει χαμηλότερη πυκνότητα σε σύγκριση με το αλμυρό. Σ' αυτή την περίπτωση, η προέλευση της υφαλμύρισης οφείλεται στην διείσδυση του αλμυρού νερού.

### 3.7 Ουάσιγκτον, Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής

Η παρούσα μελέτη διεξήχθη στη νοτιοδυτική Ουάσιγκτον, σε μεγάλες ξηρές περιοχές άρδευσης της παράκτιας πεδιάδας του Swan. Σκοπός ήταν η χαρτογράφηση της αλατότητας, η οποία αποτελεί πρόβλημα για τις γεωργικές αυτές περιοχές. Η αλατότητα είναι συνήθως καλυμμένη κάτω από ενεργά αναπτυσσόμενα βοσκοτόπια, στα οποία υπάρχουν ανεχόμενες ποσότητες αλατιού. Δύσκολα γίνεται αναγνωρίσιμη, εξαιτίας της εμφανής ζώνης του σίτου. Παρ' όλα αυτά, οι μεγάλες απώλειες παραγωγής αποδίδονται στην αλατότητα σε αυτό το τοπίο. Παραδοσιακά, η χαρτογράφηση βασίστηκε σε αεροφωτογραφίες, οπτική και ειδικά συστήματα αφήνοντας περιορισμένη δυνατότητα για αντικειμενική ανάλυση, περιορίζοντας την αποκατάσταση και δίνοντας μικρή έμφαση από άποψη κυβερνητικού σχεδιασμού.

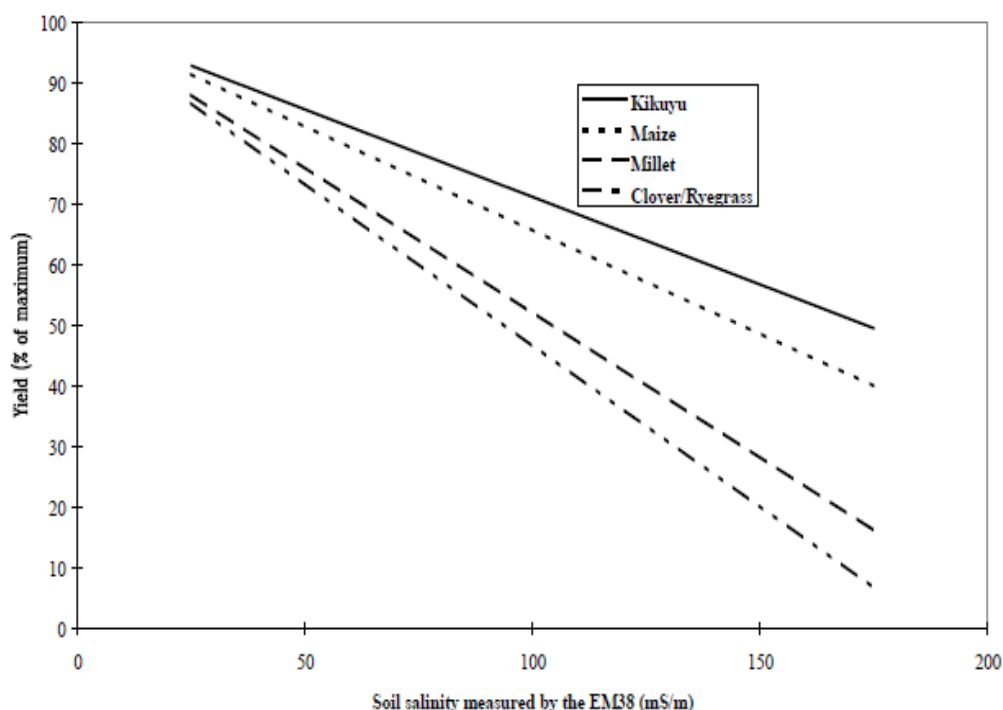
#### Περιγραφή του προβλήματος:

Η απορροή του χειμώνα που αποθηκεύεται, χρησιμοποιείται για την άρδευση των αιωνόβιων λιβαδιών με περίπου 91.700ml νερού στο Νοτιοδυτικό Αρδευτικό Δίκτυο (ΝΔΑΔ). Περίπου 34.000 εκτάρια γης έχουν τη δυνατότητα να ποτίζονται αν και μόνο ~ 40% αυτής της περιοχής είναι σήμερα αρδεύσιμη. Οι γαλακτοπαραγωγοί (170 αγροκτήματα) είναι οι κύριοι χρήστες ύδατος (64% του νερού που χρησιμοποιείται), ενώ οι αγρότες βοοειδούς κρέατος (120 αγροκτήματα, 30%), με την κηπευτική (> 20 αγροκτήματα, ~ 1%) και > 140 μικρές γεωργικές εκμεταλλεύσεις (5%) να κατέχουν το λογαριασμό για το υπόλοιπο. Επιπροσθέτως, επιπλέον 200.000 εκτάρια της παράκτιας πεδιάδας είναι μη αρδεύομενες, αλλά εξακολουθούν να υπόκεινται σε ξερική αλατότητα (5%).

#### Τι έγινε για να μελετηθεί το πρόβλημα:

Μια μεγάλη περιοχή κοντά στο Brunswick, στην παράκτια πεδιάδα του Κύκνου, ερευνήθηκε με EM38 και EM31, φορητές συσκευές ηλεκτροδιέγερσης αγωγιμότητας για τη χαρτογράφηση των ζωνών προέλευσης και της αλατότητας του υπεδάφους, και ραδιόμετρα χρησιμοποιήθηκαν για τη χαρτογράφηση των εδαφών. Το όργανο EM38 έχει ένα εύρος βάθους μικρότερο από 1 m, ενώ το EM31 ερευνά σε μεγαλύτερα βάθη από 4 έως 6 m. Η αγωγιμότητα που μετρήθηκε από το EM38 και οι σχέσεις απόδοσης των βοσκοτόπων προσδιορίστηκαν για τα μεγάλα είδη

βοσκοτόπων και οι EM38 χάρτες μετατράπηκαν σε χάρτες των επιπτώσεων της παραγωγής (Σχήμα 3.20).

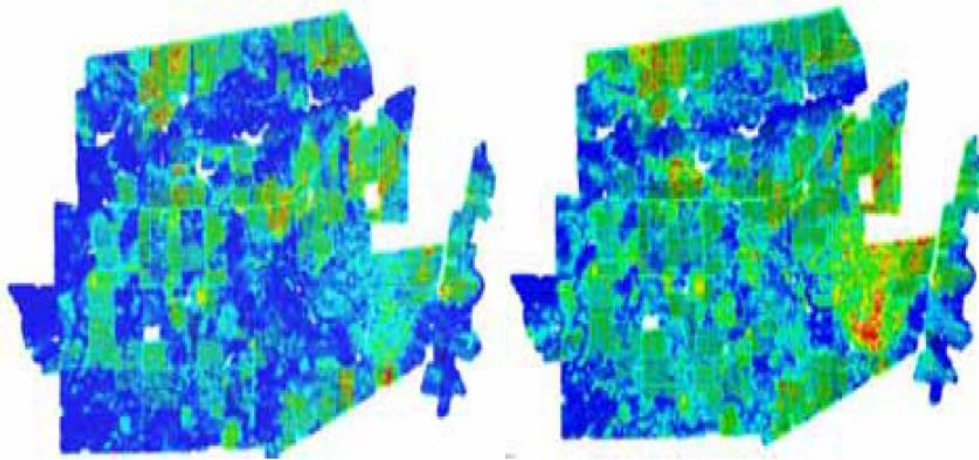


*Σχήμα 3.20 : Κοινές παλινδρομήσεις μεταξύ της απόδοσης των βοσκοτόπων και της αλατότητας που προέρχεται από το EM38. Σε 100 mS/ m, η παραγωγή των περισσότερων βοσκοτόπων και καλλιεργειών μειώνεται κατά 50%.*

#### Αποτελέσματα:

Οι EM38 χάρτες συνδέονται σε μεγάλο βαθμό με τα αυξημένα επίπεδα αλατότητας του εδάφους στις περιοχές των ριζών των βοσκοτόπων στην περιοχή που έχει χαρτογραφηθεί (βάθος < 1m). Οι EM31 εικόνες, ενώ δείχνουν συνεπείς χωρικές σχέσεις, υποδεικνύουν αποθήκες άλατος σε βάθος τουλάχιστον 4-5 m.

Στην περιοχή έρευνας (περίπου 8.000 εκτάρια ), υφάλμυρα εδάφη ( $EC > 100$  mS/m) υπάρχουν σε περίπου 20-25% των γεωργικών περιοχών. Τα αποτελέσματα των ερευνών σχετικά με ένα υποσύνολο των επτά αρδεύσιμων αγροκτημάτων (1220 εκτάρια) έδειξαν ότι το 64% της περιοχής μελέτης έχει επίπεδα αλατότητας άνω των 50 mS/m, 20,7% υπερβαίνει τα 100 mS/m και 1,3% υπερβαίνει τα 200 mS/m. Τα επίπεδα αλατότητας του υπεδάφους που υπερβαίνουν τα 100 mS/m είναι πάνω από το 40-60% της περιοχής, ενώ η ακραία υπεδάφικη αλατότητα εμφανίζεται πάνω από το 10% της περιοχής.



**Σχήμα 3.21 :** EM38 (αριστερά) και EM31 (δεξιά) χάρτες της περιοχής Brunswick. Οι κουκίδες αναφέρουν τη θέση των ερευνών και της πυκνότητάς τους (<50 κοινή γραμμή απόστασης). EM38 (αριστερά): Οι μπλε περιοχές είναι χαμηλής αγωγιμότητας (<50 mS/m) και τα αναπτυσσόμενα βοσκοτόπια σε δυναμικούς ρυθμούς, ενώ οι αγώγιμες (> 100 mS/m) περιοχές (κίτρινο / κόκκινο) παρουσιάζονται ελάχιστα (<25% πιθανότητας). Οι περισσότερες πράσινες και κίτρινες περιοχές είναι αρδεύσιμες. Οι σκούρες κόκκινες περιοχές υπάρχουν όπου κακή αποστράγγιση της επιφάνειας υφίσταται ή όταν βαθύτερα υπόγεια ύδατα μπορεί να αποφυλακίζονται. EM31 (δεξιά) δείχνει μεγαλύτερη αγωγιμότητα σε βάθος πάνω από μεγάλο μέρος της ανατολικής περιοχής. Δείχνει επίσης την επιρροή των βαθύτερων αλλουβιακών εδαφών που συνδέονται με το ποτάμι (επίμηκες σχήμα στα βόρεια).

### 3.8 Shelford, Nottinghamshire, Ηνωμένο Βασίλειο

Το πρόγραμμα FIESTA, το UK Department of Trade and Industry Foresight LINK χρηματοδότησαν την έρευνα, η οποία επινοήθηκε στις αρχές του 2000 και οργανώθηκε από την Αγγλική Γεωλογική Υπηρεσία (British Geological Survey) και το πανεπιστήμιο του Leicester. Έτσι δόθηκε η ευκαιρία να αξιοποιηθούν η αυξημένη ανάπτυξη στην έρευνα αλλά και η μεγάλη ακρίβεια πραγματικού χρόνου, τοποθετώντας τις συσκευές σε μια μικρή πλατφόρμα, η οποία μπορεί να ρυμουλκηθεί από μικρό όχημα.

Το FIESTA ήταν ένα εγχείρημα τριών χρόνων και στόχευε στην ολική προσέγγιση της μεταλλευτικής έρευνας βαρυτικών/φθοριτικών κοιτασμάτων σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές. Συμπεριλάμβανε γεωχημική ανάλυση, επιφανειακή γεωλογική χαρτογράφηση, γεωφυσική έρευνα, αλλά και

επανεπεξεργασία δεδομένων εναέριας γεωφυσικής έρευνας. Σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές είναι αναγκαία η μη παρεμβατική χαρτογράφηση αλλά και το έδαφος να είναι ομοιόμορφο ως δείγμα. Και οι δύο αυτοί παράγοντες ικανοποιούνται, εάν τοποθετηθούν αισθητήρες σε μια πλατφόρμα έτσι ώστε δύο ή περισσότεροι παράμετροι να μπορούν να καταγράφονται αυτόματα. Η συγκεκριμένη έρευνα στόχευε στην προσομοίωση αποτελεσμάτων αέριας ή θαλάσσιας πλατφόρμας αλλά στην ξηρά.



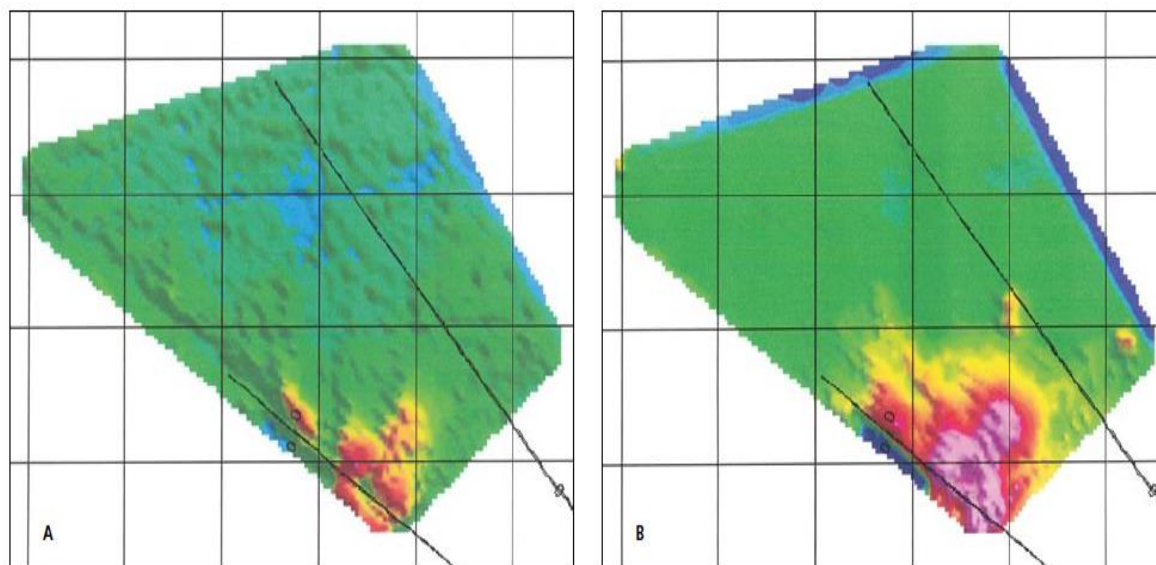
*Εικόνα 3.2: Έρευνα με το GEEP, για ρυμούλκηση του οργάνου μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας EM34.*

Ο στόχος της συγκεκριμένης έρευνας ήταν να αναπτύξει μια γεωλογική και γεωφυσική μέθοδο για τον εντοπισμό πιθανών σημείων εξόρυξης αδρανών υλικών. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, τα χαρακτηριστικά σημεία αδρανών είναι κυρίως ποτάμιας προέλευσης και είναι γενικά ομοιόμορφα κατά μήκος της έκτασής τους, το οποίο οδηγεί σε αρκετά αποτελεσματικό και αποδοτικό σχεδιασμό εκμετάλλευσης. Ωστόσο, τα σημεία αυτά έχουν πλέον εξαντληθεί και η βιομηχανία αδρανών ερευνά για νέα αποθέματα.

Προκειμένου να γίνουν όλα τα παραπάνω, τα γεωφυσικά δεδομένα πρέπει να είναι σε μορφή 3D. Παρόλο που συνήθως αυτά τα σημεία περικλείονται από



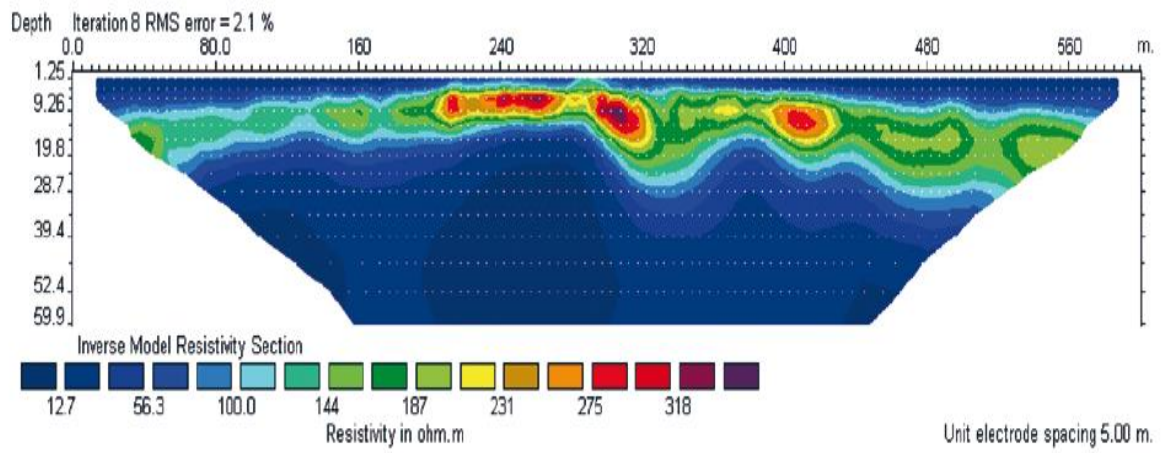
αργίλους, η μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης και των ηλεκτρομαγνητικών αποτελούν πολύ αποδοτικές μεθόδους χαρτογράφησης. Με το EM38 και EM31 στην ίδια πλατφόρμα, καταγράφηκαν ταυτόχρονα δεδομένα ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε δύο βάθη διασκόπησης. Για να προκύψουν επιπρόσθετα δεδομένα, για επιπλέον βάθος διασκόπησης, χρησιμοποιήθηκε και το μηχάνημα EM43.



**Σχήμα 3.22:** Δεδομένα ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου για ηλεκτρική αγωγιμότητα σε βάθος διασκόπησης 1μ και 5μ αντίστοιχα.

Η περιοχή της έρευνας, η οποία είναι μέρος ενεργούς εκμετάλλευσης ορυκτών, περιλαμβάνει ένα στρώμα αδρανών σε βάθος 5 – 15 μέτρα, το οποίο όμως μεταβάλλεται σε ποιότητα και πάχος κατά μήκος της έκτασής του. Το στρώμα αυτό οριοθετείται από πολύ αγωγίμες αργίλους. Για την γεωλογική χαρτογράφηση χρησιμοποιήθηκαν τα εξής μηχανήματα : EM38, EM31, EM43, έτσι ώστε να προκύψουν δεδομένα ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε πολλά βάθη διασκόπησης.

Επιπλέον, έγιναν δύο τομές ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT) κατά μήκος της περιοχής έρευνας. Τα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας παρουσιάζουν εξαιρετική συσχέτιση με αυτά από την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο, τα οποία εντοπίζουν ένα μη αγωγίμο στρώμα παγιδευμένο από ηλεκτρικά αγωγίμες αργίλους.



*Σχήμα 3.23: Τομογραφία ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για μια τομή NA - ΒΔ κατά μήκος της περιοχής έρευνας.*

## **4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ  
ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ  
ΓΡΗΓΟΡΗ ΚΑΛΥΨΗ ΜΕΓΑΛΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΣΤΗΝ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥΠΟΛΗ, ΖΩΓΡΑΦΟΥ**

## 4.1 Εισαγωγή

Η παρούσα εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, διεξήχθη στο πλαίσιο της προετοιμασίας για τις μετρήσεις, που αποτελούν τον κύριο όγκο του παρόντος πονήματος. Ζητούμενο ήταν η εξοικείωση με τη λειτουργία του συστήματος, αλλά και η δοκιμή, σε πραγματικές συνθήκες, του τροχίλατου οχήματος που κατασκευάστηκε από τον Επίκουρο Καθηγητή Γ.Αποστολόπουλο, για πραγματοποίηση ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων στη διαδικασία των ερευνών στην περιοχή του Θορικού.

Σκοπός ήταν η κατασκευή ενός μεταφερόμενου συστήματος, που θα φέρει το ηλεκτρομαγνητικό όργανο και θα έχει τη δυνατότητα να καλύπτει περιοχή μεγάλης έκτασης, λαμβάνοντας συνεχόμενες μετρήσεις. Προαπαιτούμενο ήταν επίσης, ο εύκολος χειρισμός του συστήματος και η εφαρμογή του σε ποικιλία εδαφών, καθώς και η μη χρήση μεταλλικών υλικών στην κατασκευή του, για την αποφυγή παρεμβολών στις μετρήσεις. Για την κάλυψη αυτών των αναγκών, κατασκευάστηκε ένα αυτοσχέδιο, ελαφρύ, καρότσι από ξύλινα και πλαστικά εξαρτήματα. Το καρότσι συνδεόταν με το αυτοκίνητο μέσω ενός πλαστικού σωλήνα μεγάλου μήκους (6 μέτρων), έτσι ώστε να είναι δυνατή η ρυμούλκησης του, και συγχρόνως να έχουμε την μικρότερη παρεμβολή των μεταλλικών τμημάτων του αυτοκινήτου στις μετρήσεις. Στην όλη κατασκευή, προσαρτήθηκε και το GPS για τον ταυτόχρονο προσδιορισμό των συντεταγμένων των μετρήσεων.

Ως περιοχή δοκιμής επιλέχθηκε ο χώρος της Πολυτεχνειούπολης στην περιοχή Ζωγράφου, καθώς κάλυπτε τις απαραίτητες προϋποθέσεις. Πρόκειται για μια περιοχή μεγάλης έκτασης, ήπιου αστικού περιβάλλοντος και με εγγύτητα στα εργαστήρια της σχολής μας, σε περίπτωση που ήταν απαραίτητες κάποιες διορθώσεις στο σύστημα που φέρει τον εξοπλισμό.



*Εικόνα 4.1 : Το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης, τοποθετημένο στο αυτοσχέδιο καρότσι στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.*

## 4.2 Γεωλογικό υπόβαθρο

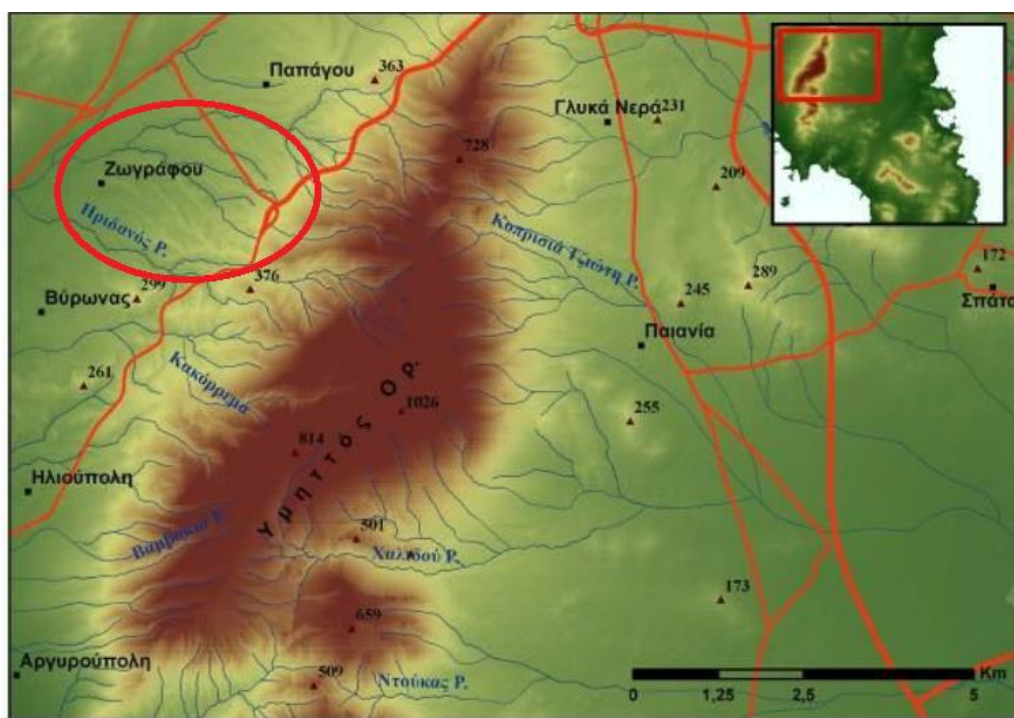
Η Πολυτεχνειούπολη ζωγράφου βρίσκεται στις βορειοδυτικές παρυφές του ορεινού όγκου του Υμηττού (Νομός Αττικής), γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα, να χαρακτηρίζεται από τη γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής του Υμηττού.

Ο ορεινός όγκος του Υμηττού δομείται από σχηματισμούς του Μεταμορφωμένου συστήματος της Αττικής. Σε γενικές γραμμές, στην ευρύτερη περιοχή του Υμηττού, ισχύει η στρωματογραφική διάρθρωση, την οποία πρώτος περιέγραψε ο R.Lepsius (1893). Σύμφωνα με αυτή, οι σχηματισμοί που απαντώνται, ταξινομημένοι από τους παλαιότερους προς τους νεότερους, είναι οι εξής:

1. Ασβεστομιγείς μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι, με λεπτοστρωματώδεις κρυσταλλικούς ασβεστολίθους ( Σχιστόλιθοι Βάρης). Έχουν πάχος ~100m και απαντώνται μόνο σε περιοχές της Βάρης.
2. Δολομιτικοί και ασβεστολιθικοί σχιστόλιθοι ανοικτότεφρου, τεφρού ή μελανού χρώματος, πάχους ~200m ( Βαθμίδα Πιρναρής). Απαντώνται στο Νότιο Υμηττό, πάνω από τις περιοχές Ελληνικού και Αργυρούπολης.
3. Κατώτερο Μάρμαρο, το οποίο συνίσταται σε ροδόχρωμα, υποκίτρινα ή λευκά, κυρίως άστρωτα μάρμαρα, κατά θέσεις κυσελώδη-λατυποπαγή. Εμφανίζουν πάχος ~500m, ενώ αποτελούν την κύρια μάζα του Υμηττού.

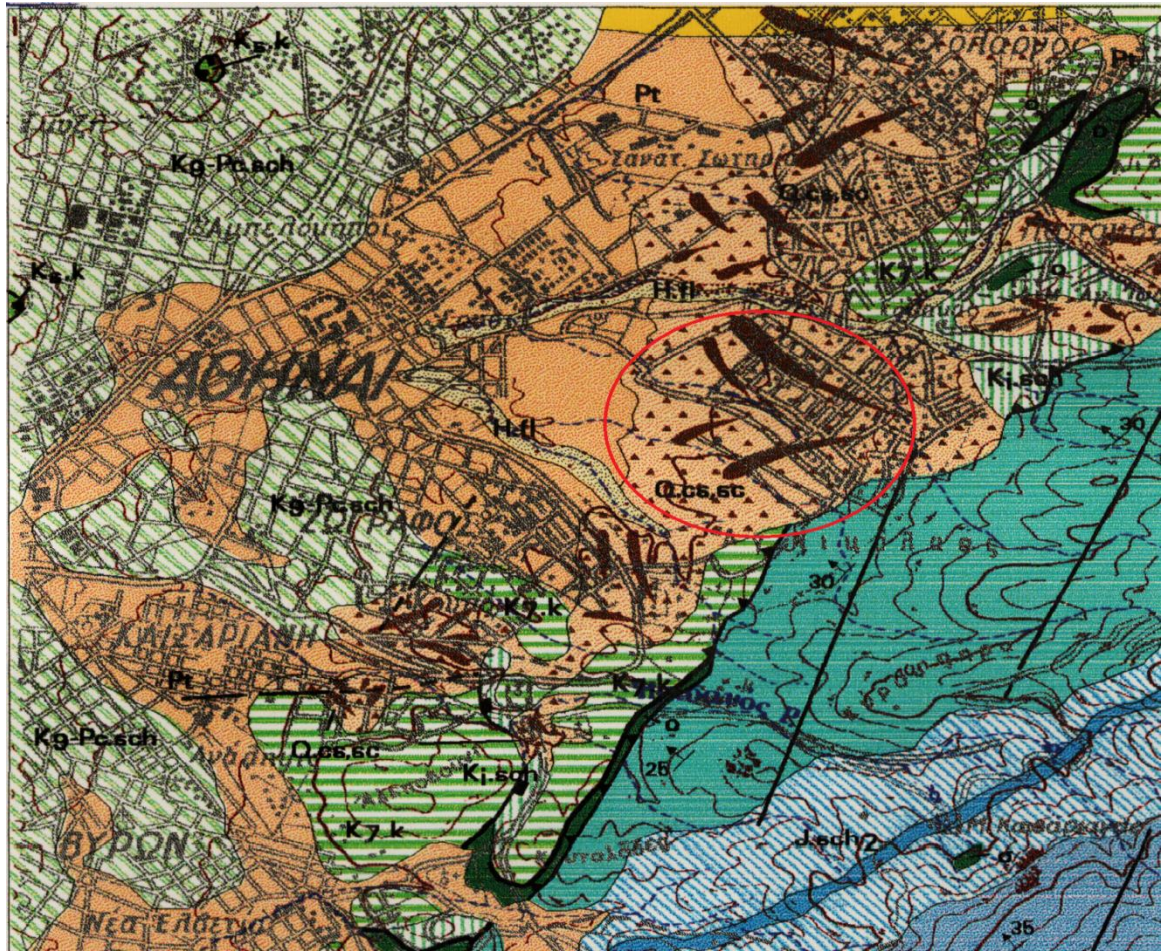
4. Μαρμαρυγιακοί και ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι, με ενστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων ή μαρμάρων ( Σχιστόλιθοι Καισαριανής). Το πάχος του σχηματισμού είναι ~250m και εμφανίζεται στο Βόρειο Υμηττό.
5. Ανώτερο Μάρμαρο, το οποίο αποτελείται από ταινιωτά, υποκυάνου τεφρού χρώματος μάρμαρα, πάχους ~250m. Απαντώνται στο Βόρειο Υμηττό.

Πάνω στα πετρώματα αυτά, ο R .Lepsius τοποθετεί, με στρωματογραφική συμφωνία, τον “Κατώτερο Ασβεστόλιθο” και τα “Στρώματα Καρά”, Κατωκρητιδικής και, ίσως, Ιουρασικής ηλικίας, τα οποία εμφανίζονται στους βόρειους και δυτικούς πρόποδες του Υμηττού. Στη συνέχεια, τοποθετεί, με συμφωνία τους “Σχιστόλιθους των Αθηνών” και τον “Ανώτερο ασβεστόλιθο του Λυκαβηττού”, Κρητιδικής ηλικίας. Στο σύστημα Μεταμορφωμένων πετρωμάτων που αναφέραμε, έχει παρατηρηθεί, ότι σε διάφορες περιοχές, επικρατούν άλλοτε τα μάρμαρα και άλλοτε οι σχιστόλιθοι.



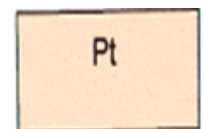
*Σχήμα 4.1: Χάρτης περιοχής μελέτης, στο Βορειοδυτικό τμήμα του Υμηττού.*

Τα χαλαρά ιζήματα που βρίσκονται επιφανειακά, προέρχονται κυρίως από αποθέσεις χειμάρρων και από υλικά του αλτικού υποβάθρου. Αυτά αποτελούνται από κροκάλες, λατύπες, κροκαλοπαγή, αργιλικής και ανθρακικής σύστασης.



Σχήμα 4.2 : Γεωλογικός χάρτης Αττικής, με κόκκινο εντοπίζεται η Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Φύλλο Χάρτη Κορωπί-Πλάκα.

### Υπόμνημα



**Αποθέσεις χειμάρρων:** Αργιλοαμμώδεις αναβαθμίδες, πλούσιες σε κροκάλες και λατύπες.

**Πλευρικά κορήματα:** Χαλαροί και συνεκτικοί σχηματισμοί από υλικά του αλτικού υποβάθρου.

**Ποταμοχερσαία ιζήματα:** Πολύμικτα, ετερομετρικά, συνεκτικά κροκαλοπαγή, κυρίως με κροκάλες πρασινιτών και με παρεμβολές ερυθρών αργίλων. Αναπτύσσονται πάνω σε ερυθροκιτρινόχρωμους, αδρόκοκκους, ψαμμιτικούς ορίζοντες. Τα πολύμικτα κροκαλοπαγή μεταβαίνουν προς τα πάνω σε ορίζοντες συνεκτικών ανθρακικών κροκαλοπαγών με ερυθρό συνδετικό αργιλικό υλικό και σε καστανόχρωμους συνεκτικούς αργιλοπηλούς με διάσπαρτες κροκάλες.

### 4.3 Αποτελέσματα μετρήσεων

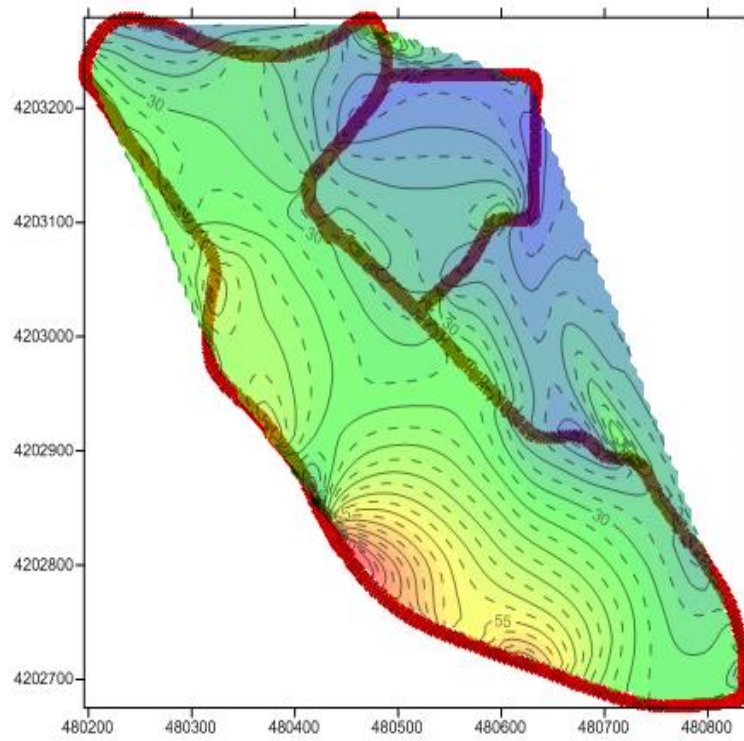
Οι μετρήσεις οι οποίες λήφθηκαν, πραγματοποιήθηκαν στο κυκλικό οδικό δίκτυο της Πολυτεχνειούπολης. Η διαδρομή των μετρήσεων φαίνεται με κόκκινο χρώμα στο χάρτη ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 6m και με πράσινο χρώμα στο χάρτη για συνολικό βάθος διασκόπησης 3m (**Σχήματα 4.3** και **4.4** αντίστοιχα).

Όπως παρατηρούμε στο **Σχήμα 4.3**, υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας εντοπίζονται στη δυτική και νότια περιοχή του χάρτη, ενώ οι χαμηλότερες τιμές βρίσκονται στην βορειοανατολική πλευρά. Το ίδιο παρατηρείται και στο **Σχήμα 4.4**, με τη μόνη διαφορά ότι οι τιμές παρουσιάζουν μειωμένη τάση. Τις χαμηλές τιμές αγωγιμότητας μπορούμε να τις αποδώσουμε σε συνεκτικά κροκαλοπαγή. Ενδιάμεσες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας εμφανίζονται πολύ πιθανά εξαιτίας των πλευρικών χαλαρών κορημάτων, με τις υψηλότερες τιμές να υποδεικνύουν παρουσία σε αυτά αργιλικών υλικών.

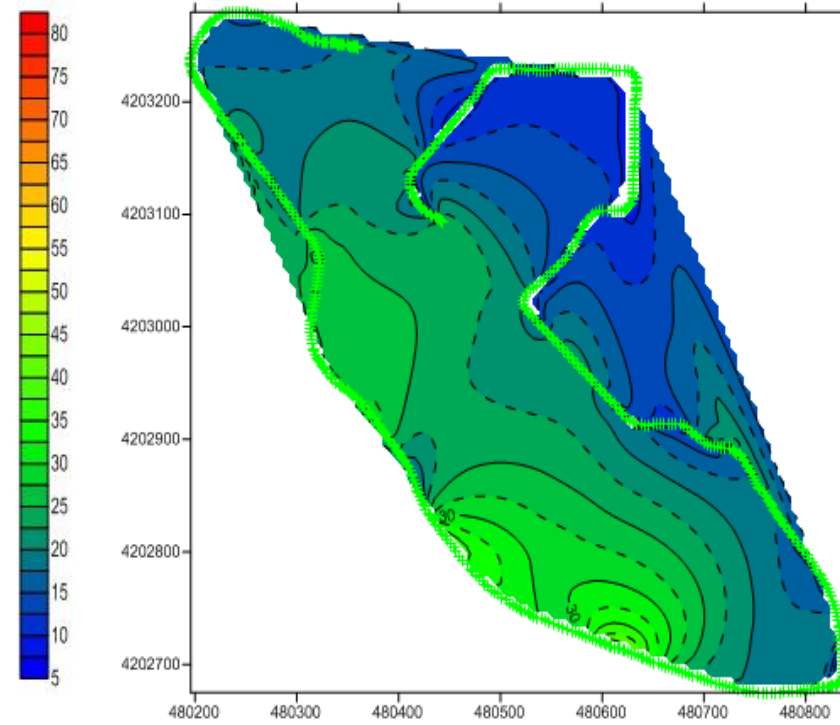
Τα **Σχήματα 4.5** και **4.6** αποτελούν τους χάρτες μαγνητικής επιδεκτικότητας της περιοχής διασκόπησης.

Όπως φαίνεται από τους χάρτες μαγνητικής επιδεκτικότητας, στα 3 μέτρα συνολικού βάθους διασκόπησης οι τιμές είναι χαμηλές στο σύνολο του χάρτη. Αντιθέτως, για συνολικό βάθος διασκόπησης 6 μέτρων λαμβάνουμε πολύ υψηλές τιμές. Στο σημείο αυτό, παρουσιάζεται μεγάλη διαφοροποίηση των τιμών στα δύο βάθη διασκόπησης. Πρέπει να διαπιστώσουμε αν οι τιμές αυτές προέρχονται από λανθασμένες μετρήσεις ή υποδηλώνουν πραγματικές τιμές. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήσαμε τον περιορισμό τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας μικρότερες των 5 ppt και διαπιστώσαμε ότι οι χάρτες αγωγιμότητας και για τα δύο βάθη διασκόπησης είναι ίδιοι με τους αρχικούς, όπως και ο χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 μέτρων. Η μόνη διαφοροποίηση που παρουσιάστηκε είναι στον χάρτη μαγνητικής επιδεκτικότητας, όπου οι τιμές εμφανίζονται αισθητά μικρότερες.

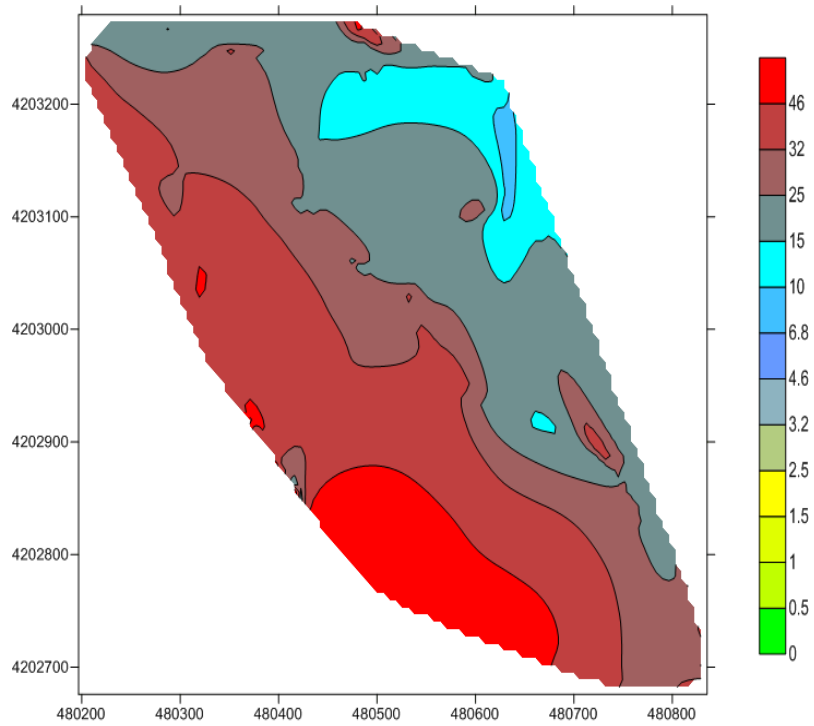




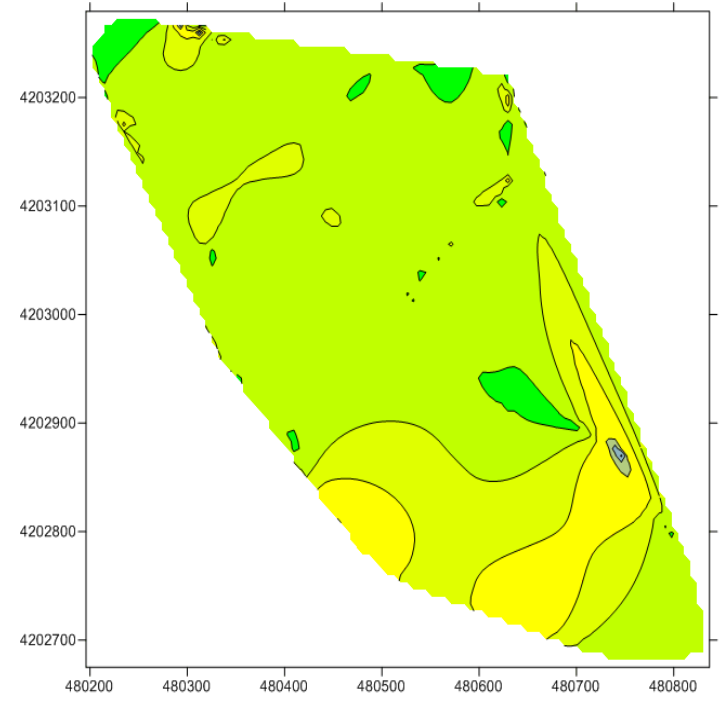
*Σχήμα 4.3 : Χάρτης αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 6m.*



*Σχήμα 4.4 : Χάρτης αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3m.*

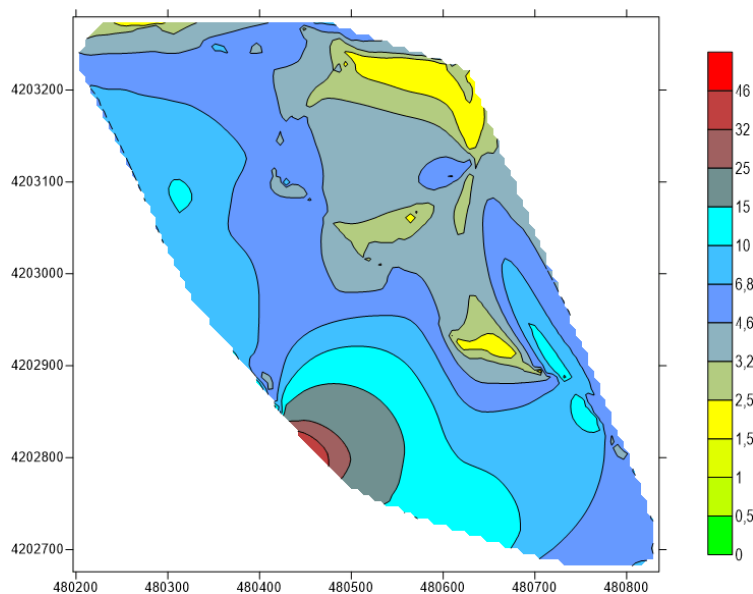


**Σχήμα 4.5:** Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 6m.



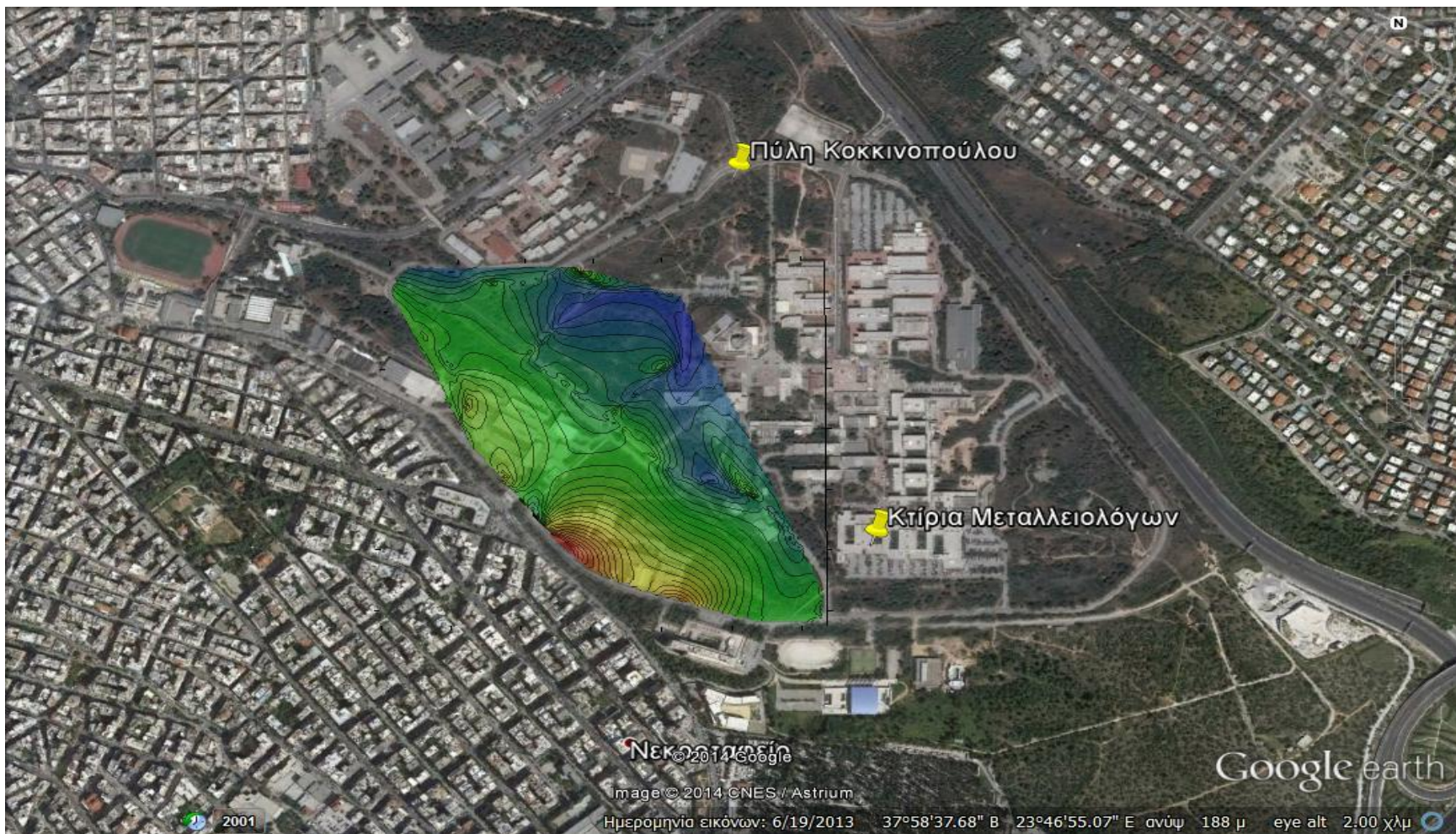
**Σχήμα 4.6:** Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3m.

Τα αποτελέσματα αυτά, μας οδηγούν στην υπόθεση ότι οι αυξημένες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας στο χάρτη του **Σχήματος 4.5** προέρχονται λόγω της χρησιμοποίησης του ηλεκτρομαγνητικού οργάνου για 6 μέτρα συνολικό βάθος διασκόπησης, που επηρεάζεται εντονότερα από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες της Πολυτεχνειούπολης. Στο **Σχήμα 4.7** παρατίθεται ο χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 6 μέτρων, με τον περιορισμό τιμών που προαναφέρθηκε.



**Σχήμα 4.7:** Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 6 μέτρων με περιορισμό τιμών μικρότερες των 5 ppt.

Στο **Σχήμα 4.8**, παρουσιάζεται ο χάρτης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας συνολικού βάθους διασκόπησης 6 μέτρων στο Google Earth, όπου φαίνονται οι εγκαταστάσεις των κτιρίων της Πολυτεχνειούπολης και η ευρύτερη μορφολογία της περιοχής.



Σχήμα 4.8 : Τοποθεσία χάρτη αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 6m στο google earth.

## **5ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ**

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ  
ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ  
ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΟΙΛΑΔΑ ΤΟΥ  
ΘΟΡΙΚΟΥ

## 5.1 Εισαγωγή

Η έρευνα των παράκτιων καρστικών υδροφορέων και η εκμετάλλευσή-αξιοποίηση των υπόγειων νερών τους, έχουν πολύ μεγάλο παγκόσμιο ενδιαφέρον, κυρίως για τις χώρες που δομούνται κατά ένα υψηλό ποσοστό της έκτασής τους από ανθρακικά πετρώματα και γειτνιάζουν με τη θάλασσα.

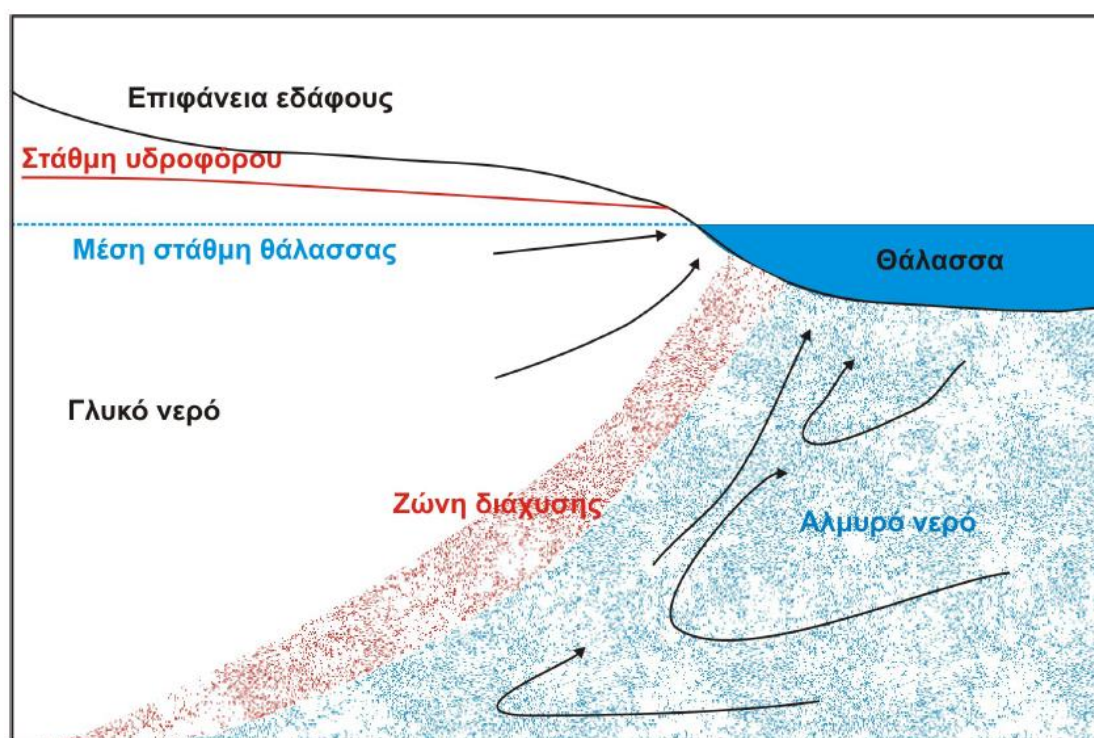
Η Ελλάδα αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα τέτοιας χώρας, δεδομένου ότι το 35% περίπου της έκτασής της αποτελεί χώρο ανάπτυξης ανθρακικών πετρωμάτων (ασβεστολίθων, μαρμάρων και δολομιτών), τα οποία επί πολλές εκατοντάδες χιλιόμετρα βρίσκονται σε απευθείας υδραυλική επικοινωνία με τη θάλασσα. Τα πετρώματα αυτά κατά την πολύπλοκη γεωλογική εξέλιξη της χώρας έχουν υποστεί διάρρηξη-κερματισμό και καρστικοποίηση σε βαθμό που ποικίλλει ευρύτατα από περιοχή σε περιοχή.

Είναι γνωστό ότι οι παράκτιοι καρστικοί υδροφορείς είναι γενικά ιδιαίτερα ευαίσθητοι σε υφαλμύριση των νερών τους. Με τον όρο «*υφαλμύριση υπόγειων υδροφορέων*» εννοείται ύπαρξη όχι μόνο γλυκού αλλά και υφάλμυρου νερού στους υδροφορείς αυτούς. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το γλυκό και το θαλασσινό νερό δεν αναμιγνύονται, δεδομένου ότι έχουν διαφορετικές πυκνότητες, σχηματίζεται στα σημεία επαφής τους μια διεπιφάνεια το σχήμα της οποίας καθορίζεται από το υδροδυναμικό ισοζύγιο.

Αιτία ύπαρξης της υφαλμύρισης μπορεί να είναι γεωλογικοί παράγοντες, συνήθως όμως το φαινόμενο παρατηρείται κατά τη διείσδυση θαλασσιού νερού στους παράκτιους υδροφορείς. Η διείσδυση αλμυρού νερού σε παράκτιους υδροφορείς μπορεί να οφείλεται τόσο σε φυσικούς παράγοντες (πχ. ανύψωση της στάθμης της θάλασσας), όσο και σε ανθρωπογενείς (υπεραντλήσεις) ή πολλές φορές συνδυασμό των δύο.

Η υφαλμύριση υπόγειων υδροφορέων αποτελεί ειδική περίπτωση υπόγειας ροής και αφορά συγκεκριμένους υδροφορείς, με γνωστά υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά. Όταν ο ρυθμός άντλησης σε φρέατα κοντά στη θάλασσα υπερβεί το ρυθμό φυσικής ή τεχνητής επαναφόρτισης του υδροφορέα, τότε θαλάσσιο νερό εισρέει στους υδροφορείς, καταστρέφοντάς τους από πηγή πόσιμου νερού. Πρέπει να τονισθεί ότι το φαινόμενο δεν μπορεί να θεωρηθεί αναστρέψιμο, γι' αυτό η αντιμετώπισή του συνδέεται πρακτικά με πρόβλεψη και ορθή διαχείριση.

Το φαινόμενο της υφαλμύρινσης έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα πάνω από 100 χρόνια, δίνοντας διαφορετικά μοντέλα για την ποιοτική και ποσοτική ερμηνεία ζωνών ανάμειξης αλμυρού και γλυκού νερού (Hubbert 1940, Cooper 1959, Luszczynski 1961, Glover 1964, Καλλέργης 2000). Το επικρατέστερο μοντέλο βασίζεται στην υπόθεση, ότι κάτω από δυναμικές συνθήκες το θαλασσινό νερό δεν είναι στατικό αλλά ρέει αδιάκοπα από τον πυθμένα της θάλασσας σε μία ζώνη διάχυσης. Στην ζώνη αυτή, η οποία έχει σημαντικό πάχος, υπάρχει πλήρης διαβάθμιση της αλμυρότητας από εκείνη του γλυκού νερού σε αυτή του θαλασσινού (Cooper 1964). Επίσης παρατηρείται συνεχής ροή αλμυρού νερού από την ζώνη της διάχυσης προς την θάλασσα με αποτέλεσμα τον περιορισμό της έκτασης που καταλαμβάνει στον υδροφόρο το θαλασσινό νερό (**Σχήμα 5.1**).



**Σχήμα 5.1:** Απλοποιημένο διάγραμμα ροής γλυκού και αλμυρού νερού σε ελεύθερο παράκτιο υδροφόρο, όπου φαίνεται η κυκλοφορία του θαλασσινού νερού από την θάλασσα στην ζώνη διάχυσης και πίσω στην θάλασσα (τροποποίηση από Καλλέργη, 2000)

Στην ζώνη διάχυσης, το θαλασσινό και γλυκό νερό αναμιγνύονται. Το αραιωμένο θαλασσινό νερό καθώς γίνεται αραιότερο μετατοπίζεται προς την θάλασσα. Με τον τρόπο αυτό, τα άλατα τα οποία εισέρχονται στην περιοχή του γλυκού νερού, επιστρέφουν στην θάλασσα. Η ζώνη διάχυσης δημιουργείται από την

κίνηση του μετώπου αλμυρού νερού, που οφείλεται σε παλιρροιακά φαινόμενα σε συνδυασμό με την διακύμανση της στάθμης του υδροφόρου.

Όταν ένας υδροφόρος περιέχει ένα υποκείμενο στρώμα αλμυρού νερού και αντλείται από υδρογεώτρηση που εισχωρεί μόνο στο ανώτερο μέρος του, το οποίο περιέχει γλυκό νερό, τότε παρατηρείται μία τοπική ανύψωση της διεπιφάνειας κάτω από την υδρογεώτρηση με την μορφή ενός ανεστραμμένου κώνου κατάπτωσης, δηλαδή ενός κώνου ανόδου της διεπιφάνειας.

Σε αυτήν την περίπτωση η διεπιφάνεια, την στιγμή έναρξης της άντλησης, είναι οριζόντια. Με την συνεχιζόμενη άντληση η διεπιφάνεια ανεβαίνει σε διαδοχικά υψηλότερα επίπεδα, μέχρι ενδεχόμενα να φτάσει στην υδρογεώτρηση. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να διακοπεί η άντληση, ώστε το βαρύτερο αλμυρό νερό να επιστρέψει στην αρχική του θέση (Ackermann and Chang 1971, Bennett 1968, Wang 1965, Dagan and Bear 1968, Haubolt 1975, Καλλέργης 2000).

Η υφαλμύριση των υπόγειων νερών συνδέεται άμεσα με τις γεωλογικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε γεωφυσική έρευνα για τον εντοπισμό της στρωματογραφίας της περιοχής μελέτης και τον υφαλμυρισμένων δομών. Οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή του Θορικού περιγράφονται στις ακόλουθες παραγράφους του κεφαλαίου αυτού, και αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της γεωφυσικής διασκόπησης.

Σημαντικές πληροφορίες, επίσης, μπορεί να δώσει και η μελέτη της ιστορίας και αρχαιολογίας της περιοχής μελέτης στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τους σχηματισμούς του υπεδάφους.

Η γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε, τα αποτελέσματα που εξήχθησαν και η ερμηνεία τους, περιγράφονται αναλυτικά στην παράγραφο 5.5 του παρόντος κεφαλαίου.



## 5.2. Ιστορία – Αρχαιολογία περιοχής Θορικού

Ο Θορικός βρίσκεται στη βορειοανατολική ακτή της Λαυρεωτικής και απέχει περίπου 50 χιλ. από την Αθήνα. Ήταν αρχαία σημαντική παράλια πόλη της ΝΑ Αττικής, της λεγόμενης Λαυρεωτικής, η οποία έλεγχε τα γειτονικά μεταλλεία του Λαυρίου από τα οποία γινόταν κατά την αρχαιότητα εξόρυξη μολύβδου και αργύρου. Ο Θορικός σύμφωνα με τις ανασκαφικές έρευνες που διενήργησε στη περιοχή η Βελγική αρχαιολογική αποστολή, κατά την περίοδο 1963-1976, ήταν ένας από τους αρχαιότερους οικισμούς της Αττικής και ένα από τα αρχαιότερα ναυτικά φρούριά της. Φαίνεται να κατοικείται από την τέταρτη χιλιετία π.Χ. Η κατοίκηση στο λόφο Βελατούρι υπήρξε μακράιωνη και πυκνή. Στην κορυφή του σώζονται τα ερείπια της ακρόπολης με ίχνη εγκατάστασης από το τέλος της νεολιθικής εποχής, σπίτια της πρωτοελλαδικής και μεσοελλαδικής περιόδου (2900 - 1600 π.Χ.) και πέντε θολωτοί και θαλαμωτοί τάφοι της υστεροελλαδικής (μυκηναϊκής) περιόδου (1600-1100 π.Χ.).

Στο μυκηναϊκό τάφο βρέθηκαν αγγεία και ειδώλια από τον 7ο και έως το τέλος του 5ου αιώνα π.Χ., που υποδεικνύουν την παρουσία μιας ηρωϊκής λατρείας που συνεχίστηκε για πολλούς αιώνες. Η κορυφή του λόφου εξακολούθησε να κατοικείται στη γεωμετρική εποχή, στην οποία ανήκει ένα μεγάλο δωμάτιο με κτιστούς πάγκους που ήταν πιθανώς χώρος συγκέντρωσης των κατοίκων της περιοχής. Λιθάργυροι που βρέθηκαν σε δωμάτιο σπιτιού της ίδιας περιόδου δείχνουν ότι και κατά την εποχή αυτή υπήρχε παραγωγή μολύβδου και αργύρου. Χαμηλότερα στις πλαγιές εκτείνονταν τα νεκροταφεία με πλούσια κτερίσματα από τη γεωμετρική (1100 π.Χ) έως την ύστερη κλασική περίοδο (350 π.Χ.) που φανερώνουν τη συνεχή κατοίκηση του χώρου. Το 412 π.Χ. κατά τη διάρκεια του Πελοποννησιακού πολέμου οι Αθηναίοι οχύρωσαν τη χερσόνησο του Αγίου Νικολάου για να προστατεύσουν τα μεταλλεία. Κατά τους κλασικούς χρόνους αποτελούσε την πρωτεύουσα του δήμου Θορικίων που βρισκόταν στον σημερινό λόφο Βελατούρι προς την βόρεια και νότια σχηματιζόμενες μικρές πεδιάδες. Ο δε λιμένας του Θορικού, στον ομώνυμο σήμερα όρμο, εμφάνιζε μεγάλη κίνηση διαμετακομιστικού εμπορίου, ιδίως ξυλείας και μετάλλων.

Αρχαιολογικά στοιχεία δείχνουν πως η εξόρυξη μολύβδου στην περιοχή ξεκίνησε κατά την διάρκεια της 3ης χιλιετίας π.Χ. ενώ του αργύρου από το 1500 π.Χ. Στην περιοχή έχουν αποκαλυφθεί ίχνη μυκηναϊκής εγκατάστασης στα οποία

περιλαμβάνονται πέντε θολωτοί τάφοι που ανήκουν στην περίοδο 1600 - 1100 π.Χ.. Η εγκατάσταση πιθανόν συνδεόταν με την εκμετάλλευση των μεταλλείων της περιοχής. Σύμφωνα με την παράδοση η πόλη του Θορικού ιδρύθηκε από τον Κέκροπα και ήταν ένας από τους 12 δήμους της Αττικής που συνένωσε ο Θησέας σε ένα κράτος. Στη μυθολογία συνδέεται με τον Κέφαλο που παντρεύτηκε την κόρη του Κέκροπα Προκρίδα ενώ, όπως αναφέρεται στον ομηρικό ύμνο στη Δήμητρα, εδώ βρέθηκε η θεά κατά το ταξίδι της από την Κρήτη στην Ελευσίνα. Η πόλη συνέχισε να κατοικείται και τα μετέπειτα χρόνια. Κάλυπτε κυρίως τον λόφο και την μικρή χερσόνησο που βρίσκεται μεταξύ του όρμου του Θορικού και του Φραγκολίμανου. Η πόλη οχυρώθηκε κατά την διάρκεια του Πελοποννησιακού πολέμου από τους Αθηναίους για να προστατευτούν τα μεταλλεία.

Στο τέλος του 6<sup>ου</sup> αιώνα π.Χ. εγκαθιδρύεται στην Αθήνα το δημοκρατικό πολίτευμα, ένα γεγονός που θεωρείται από τα σημαντικότερα στην παγκόσμια ιστορία. Βασικός συντελεστής της εγκαθίδρυσης των νέων θεσμών υπήρξε ο Κλεισθένης, ο οποίος με τις επιλογές του έκανε τον αθηναϊκό δήμο τη μεγάλη πολιτική δύναμη των κλασσικών χρόνων.

Μια βασική δημοκρατική επιλογή ήταν η αναδιάταξη του χώρου, που εκφράστηκε με τη διαίρεση της Αττικής σε δήμους. Οι κάτοικοι κατανεμήθηκαν σε δήμους σύμφωνα με τον τόπο κατοικίας τους και όχι την καταγωγή τους από τις αρχαίες φυλές. Με τον τρόπο αυτό κλονίστηκαν οι κοινωνικές βάσεις της παλιάς αριστοκρατίας, καθιερώθηκε η ισονομία των πολιτών και καθένας δηλώνεται με το όνομα του δήμου της καταγωγής του. Η εδαφική αναδιοργάνωση, που στηρίχτηκε στη δημιουργία των δήμων και των δέκα φυλών, ένωσε μεταξύ τους τα διάφορα μέρη της Αττικής και δημιούργησε την πόλη-κράτος των Αθηνών, που κατόρθωσε να αντιμετωπίσει την περσική εισβολή και είχε τόσο σημαντική προσφορά στην παγκόσμια σκέψη.

Με τη διοικητική διαίρεση του Κλεισθένη, δημιουργήθηκαν στη Λαυρεωτική πέντε βασικοί δήμοι: του Σουνίου, του Θορικού, της Αναφλύστου, της Βήσας και της Αμφιτροπής. Συνήθως αποκαλούνται και μεταλλευτικοί εξ'ατίας της σχέσεώς τους με τα μεταλλεία του Λαυρίου. Ανάλογα με την εδαφική έκταση, τον αριθμό των δημοτών και άλλους ιστορικούς παράγοντες, έστελναν έναν αριθμό αντιπροσώπων τους στην Αθήνα, στη Βουλή των Πεντακοσίων.

Η αναλογική αυτή εκπροσώπηση της κάθε περιοχής στα όργανα της Πολιτείας αποτελούσε έναν βασικό θεσμό της δημοκρατικής λειτουργίας. Κάθε δήμος μέσα στα όρια της περιφέρειάς του είχε ένα κέντρο, πολιτικό-διοικητικό-θρησκευτικό, μικρότερους οικισμούς, ιερά, καλλιεργήσιμες εκτάσεις, αγροκτήματα και αγροτικές εγκαταστάσεις και στην περίπτωση της Λαυρεωτικής μεταλλευτικές εγκαταστάσεις (στοές, εργαστήρια, καμίνους τήξεως μεταλλεύματος( αλλά και τα λατομεία στο Σούνιο (Αγριλέζα) και τον Θορικό (Στεφάνι).

Παράλληλα με τα μεγάλα επίσημα ιερά του Σουνίου και του Θορικού, ένα πλήθος μικρότερων ιερών και τόπων λατρείας διασκορπισμένων σε όλη τη Λαυρεωτική βγαίνει μέσα από τις επιγραφές, σε έναν τόπο όπου η εύνοια της θεότητας ήταν απαραίτητη και για τους επιχειρηματίες αλλά και για τους εργαζόμενους στα μεταλλεία. Ελεύθεροι πολίτες και δούλοι ξενικής καταγωγής – όπως φαίνεται από τα ονόματά τους – κάνουν αφιερώματα σε θεότητες και ιερά. Μαρτυρείται λατρεία της Δήμητρας, της Κυβέλης, της Άρτεμης, της Αφροδίτης, του Απόλλωνα αλλά και θεοτήτων ανατολικής προέλευσης όπως του Μηνός και της Βενδίδος.

Το κέντρο του αρχαίου δήμου του Θορικού βρίσκεται στη νοτιοδυτική πλευρά του λόφου Βελατούρι κάτω από τη μυκηναϊκή ακρόπολη και τους θολωτούς τάφους. Πρόκειται για έναν πυκνοχτισμένο οικισμό με ιερά, θέατρα, νεκροταφεία και εργαστήρια, ένα εμπορικό κέντρο που θα φιλοξενούσε έμπορους και ναυτικούς καθώς χτίστηκε κοντά στη θάλασσα και είχε ένα λιμάνι που προστατευόταν από το οχυρό που σώζεται στη χερσόνησο του Αγίου Νικολάου.

Το θέατρο του Θορικού θεωρείται το αρχαιότερο στον ελλαδικό χώρο και μοναδικό για το ιδιόμορφο ελλειψοειδές σχήμα του, του οποίου η αρχική κατασκευή χρονολογείται στον 6<sup>ο</sup> αι. π.Χ. Χωρούσε περίπου 4.000 ανθρώπους και κατασκευάστηκε στους νότιους πρόποδες του λόφου. Δυτικά της ορχήστρας, δίπλα στη δυτική πάροδο, σώζονται τα θεμέλια ενός μικρού ναού του Διονύσου του 5<sup>ου</sup> αι. π.Χ. Στην ανατολική πλευρά του υπάρχει μια μεγάλη αίθουσα με θρανίο λαξευμένο στο βράχο, που ήταν πιθανώς τόπος συγκέντρωσης. Δίπλα στο δυτικό διάζωμα του θεάτρου, υπήρχε ένα σπίτι με πεντάκλινο ανδρώνα (δωμάτιο συμποσίων) και αυλή.

Κοντά στον οικισμό, στην άκρη της πεδιάδας, σώζεται ένα μεγάλο δωρικό οικοδόμημα του 5<sup>ου</sup> αι. π.Χ., γνωστό ως ναός της Δήμητρας και Κόρης που αποκαλύπτεται τώρα σε όλη του την έκταση. Γύρω από το λόφο απλώνονται εύφορες πεδινές εκτάσεις και στα απέναντι υψώματα υπάρχουν μικρότεροι οικισμοί, αγροκίες, λατομεία, ενώ πρόσφατα αποκαλύφθηκε ένα ακόμη ιερό, που ήταν και αυτό αφιερωμένο πιθανότατα στη Δήμητρα. Άλλα μικρότερα οικιστικά κέντρα έχουν εντοπιστεί τη ΝΑ άκρη της κοιλάδας του Θορικού, στα υψώματα Στεφάνι και στη χερσόνησο του Αγίου Νικολάου. Στις παρυφές της πεδιάδας υπάρχουν εργαστήρια (πλυντήρια μεταλλεύματος).



*Εικόνα 5.1: Το αρχαίο θέατρο του Θορικού*



*Εικόνα 5.2: Ο ναός της Δήμητρας και της Κόρης, Χαλκογραφία του J.D., Παρίσι, 1758.*



*Εικόνα 5.3: Ερείπια του αρχαίου ναού της Θεάς Δήμητρας*

Οι πρώτες στοές για την εξόρυξη μετάλλου φτιάχτηκαν γύρω στο 3000 π.Χ. στον Θορικό. Αλλά η μεγάλη ανάπτυξη των μεταλλείων άρχισε τον 6ο π.Χ. αιώνα και κορυφώθηκε τον 5ο π.Χ. αιώνα. Οι εγκαταστάσεις στα μεταλλεία περιλάμβαναν στοές εξόρυξης, φρεάτια εξαερισμού, εργαστήρια διαχωρισμού και εμπλουτισμού του μετάλλου, δεξαμενές νερού και καμίνια για να τήκεται το μέταλλο.



*Εικόνα 5.4: Η αρχαιότερη μεταλλευτική στοά της περιοχής της ΝΑ Αττικής. Η στοά αυτή βρίσκεται στο λόφο Βελατούρι στην περιοχή του Θορικού και χρονολογείται στο 3000 π.Χ.*

Για τη διάνοιξη των στοών οι αρχαίοι τεχνίτες χρησιμοποιούσαν σφυρί και καλέμι και για την εξόρυξη του μεταλλεύματος κασμά ή αξίνα. Το μέταλλευμα σπασμένο σε κομμάτια μεταφερόταν με κοφίνια στην έξοδο των στοών και από κει με κάρα στα εργαστήρια. Οι στοές φωτίζονταν με λυχνάρια που είχαν μαζί τους οι τεχνίτες. Για τη στήριξη των στοών άφηναν κατά διαστήματα υποστηλώματα από το κοίτασμα ή έχτιζαν στηρίγματα με ξερολιθιά. Ένας νόμος του Λυκούργου (4<sup>ος</sup> αι. π.Χ.) προέβλεπε τη θανατική ποινή για όποιον κατέστρεφε τα υποστηλώματα των στοών και έτσι ουσιαστικά εξασφαλιζόταν η ασφάλεια των εργατών που δούλευαν εντός των στοών. Βασικός χώρος των εργαστηρίων ήταν τα πλυντήρια για τον καθαρισμό του μεταλλεύματος, τα οποία διακρίνονται σε επίπεδα και ελικοειδή. Οι στοές του Θορικού έχουν μείνει ανέπαφες στο πέρασμα των αιώνων. Είναι στενές και μικρές, έτσι που σχεδόν μόνο έρποντας μπορείς να τις διασχίσεις.

Στα επίπεδα πλυντήρια μέσα από ένα σύστημα δεξαμενών και καναλιών γύρω από ένα κεντρικό επίπεδο κυκλοφορούσε το νερό που έπλενε το μέταλλευμα σε ξύλινα ρείθρα. Το πλούσιο, καθαρό μέταλλευμα στέγνωνε σε σωρούς πάνω στο κεντρικό επίπεδο του πλυντηρίου για να μεταφερθεί κατόπιν στις καμίνους τήξεως.



*Εικόνα 5.5: Αρχαίο πλυντήριο εμπλουτισμού μεταλλευμάτων στην περιοχή του Θορικού.*

Εξέλιξη του επίπεδου πλυντηρίου αποτελεί το ελικοειδές πλυντήριο, όπου, κατά τον Κ. Κονοφάγο, η πλύση του μεταλλεύματος γινόταν σε κλειστό κύκλωμα, δηλ. σε κυκλικό μαρμάρινο ρείθρο με ελλειψοειδείς κοιλότητες που μιμούνται τα

ξύλινα ρείθρα. Για τον εφοδιασμό των πλυντηρίων με νερό κατασκευάστηκαν μεγάλες δεξαμενές, που ανοίχτηκαν στο έδαφος σε αρκετό βάθος και στεγανοποιήθηκαν με υδραυλικό κονίαμα. Η πορεία της αρχαίας Αθήνας είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εκμετάλλευση των μεταλλείων του Λαυρίου. Ο τύραννος Πεισίστρατος (561-527 π.Χ.) έφτιαξε πολλά δημόσια έργα με τα έσοδα από τα μεταλλεία. Με αντίστοιχα έσοδα, ο Θεμιστοκλής ναυπήγησε τον αθηναϊκό στόλο που νίκησε τους Πέρσες στη ναυμαχία της Σαλαμίνας, ενώ ο Περικλής ανοικοδόμησε όλα τα σημαντικά δημόσια κτίρια της Αθήνας.

Η εντατική εκμετάλλευση των λατομείων συνεχίστηκε μέχρι το τέλος του 2ου π.Χ. αιώνα, οπότε και σταμάτησε η εξόρυξη μεταλλεύματος. Μετά την εξάντληση των μεταλλείων του Λαυρίου και την καταστροφή του Θορικού από το Ρωμαίο αυτοκράτορα Σύλλα το 86 π.Χ. η περιοχή εγκαταλείφτηκε. Κατοικήθηκε και πάλι κατά τη ρωμαϊκή περίοδο ως τον 6ο αι. μ.Χ., οπότε αρχίζουν οι σλαβικές επιδρομές που ερημώνουν την ύπαιθρο της Αττικής. Από τότε, ελάχιστο ασήμι βγήκε, περιστασιακά, από το Λαύριο. Αλλά, τον 19ο αιώνα, η Λαυρεωτική γνωρίζει μια δεύτερη περίοδο ακμής.

Τα εργαστήρια, που είχαν μεγάλες ανάγκες σε νερό, συγκεντρώθηκαν σε σημεία όπου υπήρχε δυνατότητα αξιοποιήσεως των ρεμάτων καθώς η φύση του εδάφους δεν επέτρεπε την ασφαλή κατασκευή των τεράστιων δεξαμενών που συναντάται στην υπόλοιπη, ορεινή Λαυρεωτική.

Η περιφέρεια του δήμου Σουνίου εκτεινόταν κατά προσέγγιση από το σημερινό Λαύριο και την Καμάριζα ως τα Μεγάλα Πεύκα και το ακρωτήριο του Σουνίου. Περιελάμβανε το μεγαλύτερο τμήμα της μεταλλοφόρας περιοχής και τις περισσότερες εργαστηριακές εγκαταστάσεις. Υπήρχαν επίσης καλλιεργήσιμες εκτάσεις καθώς και τα λατομεία μαρμάρου της Αγριλέζας. Ανάμεσα στους δημότες του Σουνίου, υπήρχαν πλούσιοι γαιοκτήμονες και επιχειρηματίες όπως ο Τιμήσιος, ο Λεύκιος, ο Χαιρεφών και άλλοι. Εξαιτίας της μεγάλης έκτασης του δήμου και της έντονης μεταλλευτικής και λατομικής δραστηριότητας αναπτύχθηκαν κατά εποχές οικιστικά κέντρα σε διάφορα σημεία της περιφέρειάς του.

Ένα από αυτά βρισκόταν στο ακρωτήριο με το φρούριο και τους ναούς της Αθηνάς και του Ποσειδώνα. Ένα μεγάλο νεκροταφείο που χρονολογείται από τον 7<sup>ο</sup> έως τον 4<sup>ο</sup> αι. π.Χ. στην παραλιακή έκταση δυτικά του ακρωτηρίου μαρτυρεί την

συνέχεια της κατοίκησης που συνεχίζεται ως την ύστερη ρωμαϊκή περίοδο, όπως συμπεραίνεται από τον οικισμό που βρέθηκε στην περιοχή του ξενοδοχειακού συγκροτήματος Καραδόντη.

Ένα άλλο μεγάλο οικιστικό κέντρο εκτείνεται στην περιοχή της Αγριλέζας. Σώζονται σπίτια, αγροκτήματα, συγκροτήματα εργαστηρίων, τα λατομεία από όπου βγήκε το μάρμαρο για το ναό του Ποσειδώνα Σουνίου και η αγορά που δώρησε ο Λεύκιος, δημότης Σουνίου. Επιγραφές χαραγμένες στους βράχους της Αγριλέζας ζητούν την εύνοια των θεών ή παραθέτουν ημερολόγια θρησκευτικών εορτών. Μια συνήθεια που συνεχίστηκε ως τις μέρες μας καθώς κοντά στις αρχαίες επιγραφές βρίσκονται και σύγχρονα χαράγματα ανθρώπων που ζούσαν στην περιοχή.

Ένα άλλο σημαντικό κέντρο αναπτύχθηκε στο Λιμάνι Πασά όπου έχουν ανασκαφεί μια μεγάλη αγορά, σπίτια, τάφοι και μια αγροικία. Η περιοχή με τις εύφορες καλλιεργήσιμες εκτάσεις, την αγορά, τις λιμενικές εγκαταστάσεις στην ανατολική πλευρά του όρμου και τις καμίνους τήξεως μεταλεύματος στη δυτική φαίνεται ότι συγκέντρωνε τις εμπορικές δραστηριότητες, ενώ στη κοντινή Πουνταζέζα κυριαρχεί η αγροτική δραστηριότητα, όπως συνάγεται από τις αγροικίες που βρίσκονται στους λόφους της. Ένα λατρευτικό κέντρο με ιερό και λουτρά στα Πουσιπέλια και οι εκτεταμένες εργαστηριακές εγκαταστάσεις στα Μεγάλα Πεύκα και στη Σούριζα, συμπληρώνουν την εικόνα του μεγάλου, πλούσιου δήμου.

Μετά το τέλος της κλασικής περιόδου αρχίζει η παρακμή που συμπίπτει με τη σταδιακή εγκατάλειψη των μεταλλείων, των οποίων η εκμετάλλευση συνεχίζεται με μικρότερη ένταση έως τον 1<sup>ο</sup> αι. π.Χ. Οι πόλεμοι, οι εξεγέρσεις των δούλων και οι γενικότερες ανακατατάξεις της ελληνιστικής εποχής επηρεάζουν τη ζωή στην ύπαιθρο της Αττικής. Η περιοχή όμως συνεχίζει να κατοικείται τουλάχιστον ως τον 6<sup>ο</sup> αι. μ.Χ. Στο Λαύριο υπήρχε ένας μεγάλος οικισμός αυτής της εποχής οπότε χτίστηκε και μια μεγάλη βασιλική στην ανατολική άκρη της πόλης, πάνω από τη θάλασσα, ενώ σύμφωνα με αναφορά του Παύλου Σιλεντιάρου, ασήμι από το Λαύριο χρησιμοποιήθηκε στην Αγία Σοφία της Κωνσταντινούπολης.

Τα ίχνη της μακραίωνης ιστορίας και της πλούσιας ανθρώπινης δραστηριότητας σώζονται ακόμη σε μεγάλο μέρος της Λαυρεωτικής. Το τοπίο που τις περιβάλλει και χαρακτηριστικά του οποίου συναντάται τις αρχαίες επιγραφές μισθώσεως των μεταλλείων έχει επίσης διατηρηθεί σε μεγάλο βαθμό.



## 5.3 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

### 5.3.1 Γεωλογικά Στοιχεία

Γεωλογικά, την Αττική δομούν δύο διακριτά συστήματα, το δομικό υπόβαθρο που αποτελείται από πετρώματα ηλικίας Παλαιοζωϊκού μέχρι Ανωτάτου Κρητιδικού και το κλαστικό κάλυμμα από Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις.

Οι Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις κυρίως χαλαρές ή μέτριας συνεκτικότητας, πληρώνουν τις γεωμορφολογικές ταπεινώσεις ή τεκτονικές τάφρους των Αθηνών, της Μεσογαίας, των Μεγάρων, τον Μαραθώνα και των μικρών κοιλάδων της Λαυρεωτικής. Οι εν λόγω αποθέσεις αποτελούνται κυρίως από άμμους, χάλικες, κροκάλες, μάργες, ψαμμίτες, πηλούς και κροκαλολατυποπαγή. Το δομικό υπόβαθρο αποτελείται κυρίως από ανθρακικά πετρώματα και σχιστόλιθους.

Στην ανατολική Αττική το υπόβαθρο συνίσταται από μεταμορφωμένα πετρώματα (μάρμαρα και χαλαζιακοί, μοσχοβιτικοί, ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι), ενώ στην δυτική Αττική από μη μεταμορφωμένα (ασβεστόλιθοι, δολομιτικοί, ασβεστόλιθοι, δολομίτες, αργιλικοί σχιστόλιθοι, ψαμμίτες, οφιόλιθοι κ.λ.π.). Το υπόβαθρο αυτό στη δυτική Αττική δομεί τους όγκους της Πάρνηθας, του Κιθαιρώνα, του Πατέρα και του μεγαλύτερου μέρους των Γερανείων. Στρωματογραφικά τοποθετείται μεταξύ Αν. Παλαιοζωϊκού και Αν. Κρητιδικού. Στην ανατολική Αττική δομεί τους ορεινούς όγκους του Πεντελικού, του Υμηττού, του Πανείου καθώς και μικρότερους της νότιας Αττικής με στρωματογραφικό εύρος από Αν. Παλαιοζωϊκό έως Ηώκαινο.

Το μεταμορφωμένο υπόβαθρο της ανατολικής Αττικής εντάσσεται στην αυτόχθονη ενότητα Αλμυροποτάμου – Αττικής. Πρόκειται για τη μεγάλη Ενότητα σχηματισμών, που εμφανίζεται στο χώρο των Εσωτερικών ζωνών με μορφή τεκτονικών παραθύρων, η οποία ανήκει στην τεράστια πλατφόρμα της ζώνης Γαβρόβου – Τρίπολης.

Αποτελείται από μια σειρά μεσοζωϊκών μέχρι και μεσοηωκαινικών μαρμάρων, μεγάλου πάχους, που συνοδεύεται από σχηματισμούς μεταφλύσχη και από μεταμορφωμένους κάτω-μεσοτριάδικούς και νεοπαλαιοζωϊκούς σχηματισμούς που αποτελούν το υπόβαθρό της. Σχηματισμοί της Ενότητας αυτής απαντώνται τόσο στην Αττική (Σειρά Αττικής), όσο και στη Νότια Εύβοια (Σειρά Αλμυροποτάμου).

Στην μεταξύ της Αυτόχθονης Ενότητας Αλμυροποτάμου – Αττικής και της Πελαγονικής ζώνης περιοχή απαντάται ένα σύνολο σχηματισμών που ανήκουν στις Εξωτερικές ζώνες και διακρίνονται σε δύο μεγάλα σύνολα. Την Ενότητα Αφιδνών – Τουρκοβουνίων και την Ενότητα Νεοελληνικού Τεκτονικού Καλύμματος.

Οι σχηματισμοί της πρώτης Ενότητας είναι αμεταμόρφωτοι και κατά πάσα πιθανότητα αποτελούν μέλη της Βοιωτικής ζώνης, ενώ οι σχηματισμοί της δεύτερης είναι μεταμορφωμένοι. Οι σχηματισμοί της Ενότητας του Νεοελληνικού Τεκτονικού Καλύμματος απαντώνται στις περιοχές Βαρνάβα – Λίμνης Μαραθώνα – Αγίου Στεφάνου και Υμηττού, σε μικρές, γενικά, εμφανίσεις, επειδή ο κύριος όγκος αυτών καλύπτεται από μεταλλικές αποθέσεις. Είναι επωθημένοι πάνω στους μεταμορφωμένους σχηματισμούς της Αυτόχθονης Ενότητας Αλμυροποτάμου – Αττικής και αποτελούν τμήμα του μεγάλου Νεοελληνικού Τεκτονικού Καλύμματος που καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της Νότιας Εύβοιας και σημαντικό τμήμα της Νότιας Αττικής.

### **5.3.2 Θέση και Μορφολογία**

Η Λαυρεωτική βρίσκεται στη ΝΑ πλευρά της Αττικής. Απέχει 55χλμ. από την Αθήνα και καταλαμβάνει έκταση 200 τετραγωνικά χλμ. περίπου. Η μορφολογία της είναι λοφώδης ως ημιορεινή, με μεγαλύτερο υψόμετρο στη θέση Μεγάλο Ριμπάρι (372 μ.). Η περιοχή είναι άνυδρη, εν μέρει πευκόφυτη και διασχίζεται από κοιλάδες. Η προσπέλαση γίνεται κατά κανόνα με ασφαλτοστρωμένους δρόμους.

### **5.3.3 Γεωλογική δομή – λιθοστρωματογραφία**

Η περιοχή της νότιας Αττικής αποτελεί μια μεταβατική γεωμορφολογική ενότητα μεταξύ της ηπειρωτικής Ελλάδας και των βορείων Κυκλάδων. Η Λαυρεωτική αποτελεί τμήμα του Αττικοκυκλαδικού Μεταμορφωμένου Συμπλέγματος και ανήκει στην Ενδιάμεση Μεταμορφική Ζώνη των Ελληνίδων (Πελαγονική Ζώνη).

Δομείται από τρεις κύριες τεκτονικές ενότητες αλπικής ηλικίας: την Κατώτερη (Παρααυτόχθονη Σειρά ή Σειρά Καμάριζας), την Ενδιάμεση (Κυανοσχιστολιθική Ενότητα που αντιστοιχεί με τη Σειρά Πλάκας της Λαυρεωτικής) και την Ανώτερη (μη μεταμορφωμένη σειρά, ασβεστολιθικά ράκη).

#### A. Κατώτερη Τεκτονική Ενότητα (Σειρά Καμάριζας):

Θεωρείται αυτόχθονη. Χαρακτηρίζεται από μεταμορφικές διαδικασίες πρασινοσχιστολιθικής και αμφιβολιτικής φάσης. Ηλικία τριαδική-κάτω ιουρασική. Αποτελείται από τους εξής σχηματισμούς:

1. Κατώτερο Μάρμαρο Καμάριζας: Λευκό-τεφροκύανο μάρμαρο, άστρωτο ως παχυπλακώδες, αδροκρυσταλλικό, το οποίο στην οροφή του γίνεται λεπτοστρωματώδες και μικροκρυσταλλικό, με ανάπτυξη λατυποπαγοειδούς δομής κατά θέσεις. Πάχος 300-500 μ. και ηλικία τριαδική.
2. Σχιστόλιθος Καμάριζας: Επικρατούν μαύροι ως καστανόχρωμοι μαρμαρυγικοί, χαλαζιακοί και χλωριτικοί σχιστόλιθοι με μεταμόρφωση κατώτερης-μέσης πρασινοσχιστολιθικής φάσης. Στην περιοχή Πλάκα, λόγω γειτνίασης με γρανοδιοριτική διείδυση, έχει μετατραπεί σε κερατίτη. Συμμετέχουν επίσης ηφαιστειακά πετρώματα και βασικά-υπερβασικά σώματα. Η επαφή με το Κατώτερο Μάρμαρο Καμάριζας είναι κανονική και υπάρχει χαρακτηριστική μεταβατική ζώνη από εναλλαγές ασβεστιτικών σχιστόλιθων και λεπτοστρωσιγενών ασβεστιτικών μαρμάρων. Πάχος 20-300 μ. Πιθανή ηλικία ιουρασική.
3. Ανώτερο Μάρμαρο Καμάριζας: Λευκό-λευκότεφρο μάρμαρο μεσολεπτοπλακώδες, πλούσιο σε κονδυλοειδείς δομές μετα-πυριτολίθων και δολομιτών. Πάχος 0-150 μ. Ηλικία ιουρασική.
4. Επικλυσιγενής Ασβεστόλιθος (ή Κατώτερος Ασβεστόλιθος Πλάκας): Συνήθως άστρωτος, χαοτικής μορφής, έντονα καρστι-κοποιημένος και οξειδωμένος. Αναπτύσσεται επικλυσιγενώς επί του Ανώτερου Μαρμάρου Καμάριζας και απευθείας επί του Σχιστόλιθου Καμάριζας, διά μέσου κροκαλοπαγούς βάσης. Πάχος 0-80 μ. Ηλικία άνω ιουρασική-κάτω κρητιδική.

## B. Ενδιάμεση Τεκτονική Ενότητα (Σειρά Πλάκας):

Είναι αλλόχθονη και βρίσκεται επωθημένη στους σχηματισμούς της αυτόχθονης Ενότητας Καμάριζας. Αποτελεί το Φυλλιτικό ή Νεοελληνικό κάλυμμα στην περιοχή της Λαυρεωτικής. Χαρακτηρίζεται από μεταμορφικές συνθήκες υψηλών πιέσεων / χαμηλών θερμοκρασιών (γλαυκοφανιτική φάση) ηωκαινικής ηλικίας και από ανάδρομη μεταμόρφωση πρασινοσχιστολιθικής φάσης μειοκαινικής ηλικίας. Διαχωρίζεται σε σχιστόλιθους, πρασινίτες (μεταοφιολιθικά εκρηξιγενή πετρώματα) και ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους.

1. Σχιστόλιθοι Πλάκας: Καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση στη Λαυρεωτική. Πρόκειται για φυλλίτες με χαλαζία, σερικήτη ως μοσχοβίτη, ασβεσίτη και χλωρίτη. Κατά θέσεις, παρεμβάλλονται πρασινοσχιστόλιθοι (πρασινίτες, μεταοφιόλιθοι) με γλαυκοφανή καθώς και ανθρακικοί σχηματισμοί. Πάχος 50-180 μ. Πιθανή ηλικία ιουρασική.
2. Ασβεστόλιθοι Πλάκας: Διακριτός, υπολειμματικός ορίζοντας. Καταλαμβάνουν τα ανώτερα στρωματογραφικά μέλη του καλύμματος. Πρόκειται για ανακρυσταλλωμένους, κατά κανόνα, λεπτοπλακώδεις, λεπτοστρωσιγενείς ασβεστολίθους, συνήθως λευκού ως τεφρόλευκου χρώματος. Τοπικά έχουν λατυποπαγοειδή υφή, διασχίζονται από πυκνό δίκτυο ασβεστιτικών φλεβών και κατά θέσεις είναι πλούσιοι σε κονδύλους πυριτόλιθων. Πάχος 5-70 μ. Ηλικία μεσοκρητιδική.

## Γ. Ανώτερη Τεκτονική Ενότητα (ασβεστολιθικά ράκη):

Σε περιορισμένη έκταση της Κεντρικής Λαυρεωτικής αναπτύσσεται ένας ανθρακικός μη μεταμορφωμένος σχηματισμός. Πρόκειται για ασβεστολίθους μικριτικού τύπου, λεπτο-παχυπλακώδεις, οι οποίοι κατά κανόνα είναι αγκεριτωμένοι και συνοδεύονται συχνά από τεκτονικό πέγμα σερπεντινιτών ή και ερυθρών ραδιολαριτών. Οι ασβεστόλιθοι αυτοί χαρακτηρίζονται ασβεστολιθικά ράκη και, σύμφωνα με νεότερες έρευνες, θεωρείται ότι αποτελούν μέρος της μη μεταμορφωμένης Ανώτερης Τεκτονικής Ενότητας του Αττικοκυκλαδικού Συμπλέγματος. Πάχος 0-80 μ. και ηλικία μέση-ανώτερη κρητιδική.

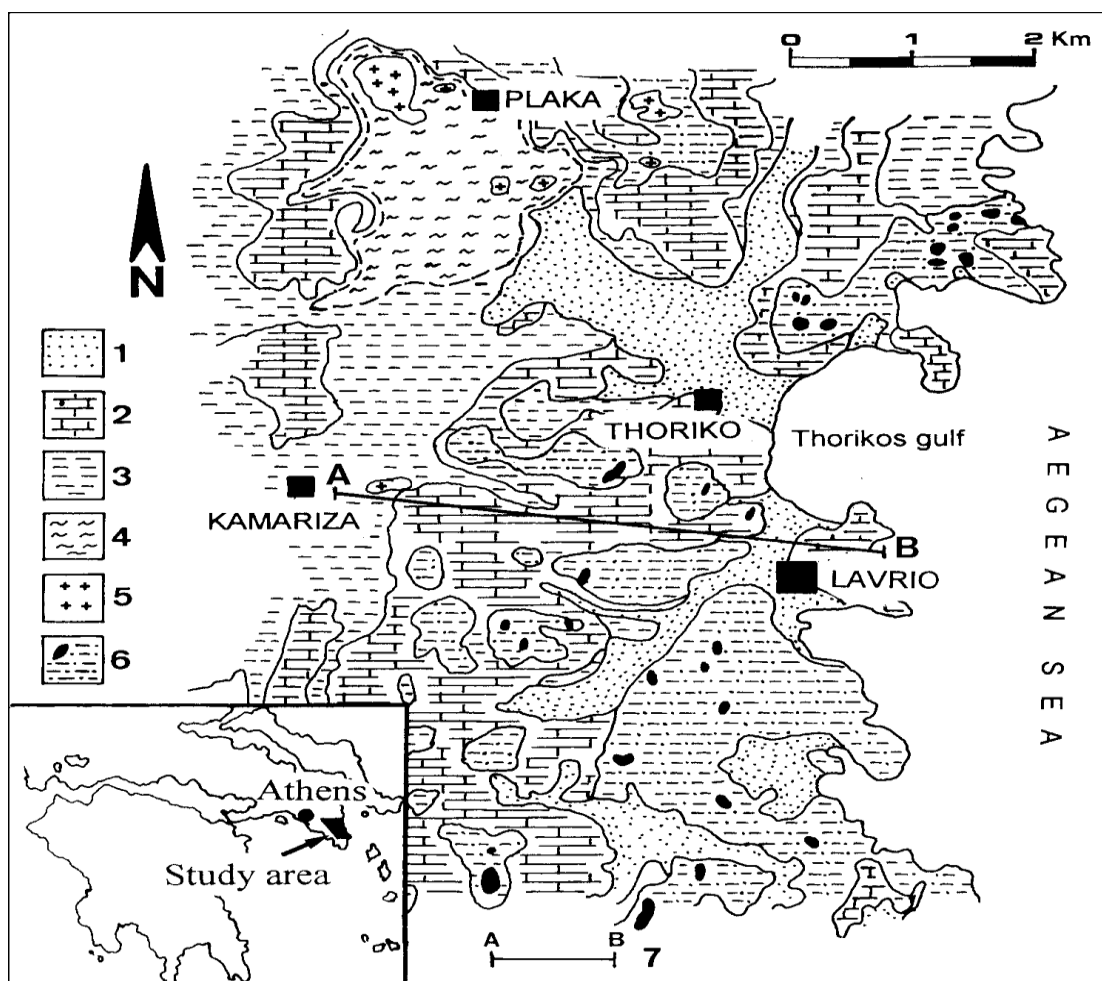
Γρανοδιορίτης Πλάκας: Εκτός των προαναφερθέντων, σε ολόκληρη την ανατολική κυρίως Λαυρεωτική εντοπίζονται κατά θέσεις και εμφανίσεις εκρηξιγενών πετρωμάτων όξινου χημισμού, φλεβικής μορφής ή μορφής σωρού. Πρόκειται για τυπικούς μετατεκτονικούς γρανοδιορίτες I-τύπου, μειοκαινικής ηλικίας, με πλέον χαρακτηριστικό εκείνο της Πλάκας. Ο γρανοδιορίτης της Πλάκας είναι μορφής σωρού, περιορισμένης επιφανειακής έκτασης (περίπου 0,5χλμ<sup>2</sup>) και θεωρείται ότι αποτελεί τη Δ-ΒΔ απόληξη μεγάλου λακκολίθου που εντοπίζεται στον ευρύτερο χώρο του Αττικοκυκλαδικού Συμπλέγματος. Συναντάται κυρίως εντός των σχιστολιθικών πετρωμάτων της Σειράς Καμάριζας, στα περιθώρια των οποίων έχει δημιουργήσει τόσο άλω μεταμόρφωσης (κερατίτη, τοπική ονομασία πλακίτης), όσο και μετασωματικά φαινόμενα τύπου skarn (κοίτασμα μαγνητίτη). Σύμφωνα με την επικρατούσα άποψη, η μεταλλοφορία της Λαυρεωτικής συνδέεται με τη διακίνηση υδροθερμικών διαλυμάτων, τα οποία έχουν άμεση σχέση με τη διείδυση του γρανοδιορίτη της περιοχής Πλάκας.

*Σε γενικές γραμμές η γεωλογία της περιοχής Κερατέας-Θορικού και κατ' επέκταση της νότιας Αττικής αποδίδεται σύμφωνα με τις απόψεις των Μαρίνου – Petrascheck (1956) και Κατσικάτσου (1976), ως εξής :*

*Διακρίνονται τρεις κύριες λιθοστρωματικές ενότητες :*

- 1. Η κατώτερη γεωτεκτονική ενότητα της Αττικής, που θεωρείται αυτόχθονη και αποτελείται από μάρμαρα, δολομίτες και μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους σε εναλλαγές, Τριαδικής – Ιουρασικής ηλικίας.*
- 2. Η αλλόχθονη ενότητα του επωθημένου συστήματος των φυλλιτών με λέπη και παρεμβολές μαρμάρων, χαλαζιτών και μεταμορφωμένων βασικών εκρηξιγενών.*
- 3. Η ακολουθία των Νεογενών και Τεταρτογενών σχηματισμών που επίσκειται ασύμφωνα πάνω στις προηγούμενες. Τα νεογενή στρώματα αποτελούνται από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, μάργες και μαργαϊκούς ασβεστολίθους. Είναι κυρίως λιμναία ιζήματα γλυκού και υφάλμυρου υδάτινου περιβάλλοντος. Οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί διακρίνονται σε αποθέσεις αλλουβιακών*

ριπιδίων, κόνων, πλευρικών κορριμάτων, αναβαθμίδων, ασβεστιτικών ψαμμιτών και ποταμοχειμάρριων αποθέσεων.



**Σχήμα 5.2 :** Γεωλογική δομή περιοχής έρευνας (Μαρίνος και Petrascheck, 1956, όπως τροποποιήθηκε από Σταμάτης, 1999) 1) τεταρτογενείς αποθέσεις, 2) μάρμαρα, 3) μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι, 4) κερατόλιθος (μεταμορφωμένος), 5) όξια πυριγενή πετρώματα, γρανοδιорίτες και 6) καλλυματικοί φυλλίτες με μάρμαρα και πρασινίτες, 7) γραμμή της γεωλογικής τομής. Γ. ΣΤΑΜΑΤΗΣ ET AL

### 5.3.4 Γεωμορφολογική εξέλιξη

Κατά την περίοδο του Ανωτέρου Πλειοκαίνου η περιοχή αποτελούσε λεκάνη υποδοχής ιζημάτων λιμναίας και υφάλμυρης φάσης, κροκαλοπαγών, ψαμμιτών, μαργών με την μορφή κλειστής λίμνης, που κατά περιόδους επικοινωνούσε με την θάλασσα. Το υδρογραφικό δίκτυο του Ποτάμι δεν υφίσταται την περίοδο εκείνη με

την μορφή που έχει σήμερα. Πιθανόν ένα τμήμα του Αδάμι να λειτουργούσε και να είχε τις εκβολές του στον όρμο του Θορικού.

Στην περίοδο του Κατωτέρου Πλειστοκαίνου εξαιτίας τεκτονικών κινήσεων, έχουμε βύθιση των ανατολικών περιοχών της Κακής Θάλασσας, Βιέθι, Τουρκολίμανου. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την διαφορετική κλίση που παρουσιάζουν οι επιφάνειες ισοπέδωσης των 100-120 m προς A-N.A. στις παραπάνω περιοχές σε αντίθεση με την γενική κλίση προς τα B.A. που εμφανίζουν οι αντίστοιχες επιφάνειες στην υπόλοιπη περιοχή. Τότε το υδρογραφικό δίκτυο του ποτάμι δημιουργείται και μεταφέρει τα προϊόντα διάβρωσης των δυτικών της Κερατέας εκβάλλοντας προς τα ανατολικά.

Σε πολλές περιπτώσεις, οι μεταλλοφόροι ορίζοντες σχηματίζονται όταν χημικές ενώσεις μετάλλων οι οποίες μεταφέρονται διαλυμένες σε θερμό νερό υπό πίεση, εναποτίθενται στις επαφές διαφορετικών πετρωμάτων. Στο φαινόμενο αυτό, το οποίο ονομάζεται υδροθερμική μεταλλογένεση (Κονοφάγος 1980), οφείλεται και η μεταλλοφορία της Λαυρεωτικής.

Στο υπέδαφος της Λαυρεωτικής εναλλάσσονται διαδοχικά σχιστόλιθος και μάρμαρο. Σημαντική μεταλλοφορία εμφανίζεται σε τρεις διαδοχικές επαφές μεταξύ των δύο αυτών πετρωμάτων. Το πάχος του επιφανειακού στρώματος σχιστόλιθου ποικίλλει, σε μερικά μάλιστα σημεία, όπως στο Θορικό (όπου φτιάχτηκε και η πρώτη μεταλλευτική στοά), η πρώτη επαφή σχιστόλιθου-μαρμάρου φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους.

Γενικότερα, στο Λαύριο απαντάται πολύ μεγάλη ποικιλία ορυκτών, όχι μόνο πρωτογενών, αλλά και δευτερογενών. Τα δευτερογενή ορυκτά σχηματίστηκαν από τη μακροχρόνια παραμονή των παραπροϊόντων της τήξης (σκουριές) που οι αρχαίοι πετούσαν και μέσα στη θάλασσα (slag minerals).

### **5.3.5 Κοιτασματολογικά στοιχεία – Μεταλλογένεση**

Στο υπέδαφος της Λαυρεωτικής εντοπίζονται δύο κυρίως τύποι μεταλλοφορίας: μία μικτών θειούχων μεταλλευμάτων βασικών μετάλλων, όπως μολύβδου (Pb), ψευδαργύρου (Zn), σιδήρου (Fe) και χαλκού (Cu), η οποία έτυχε

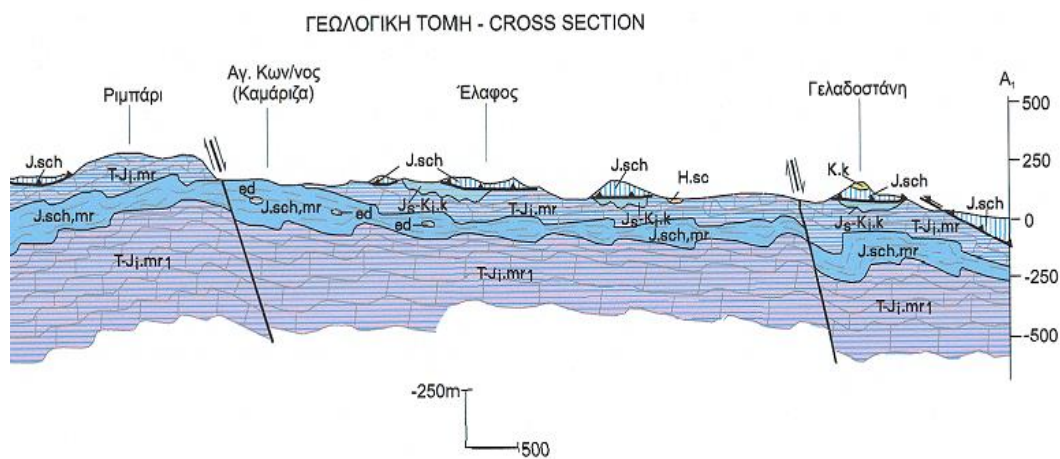
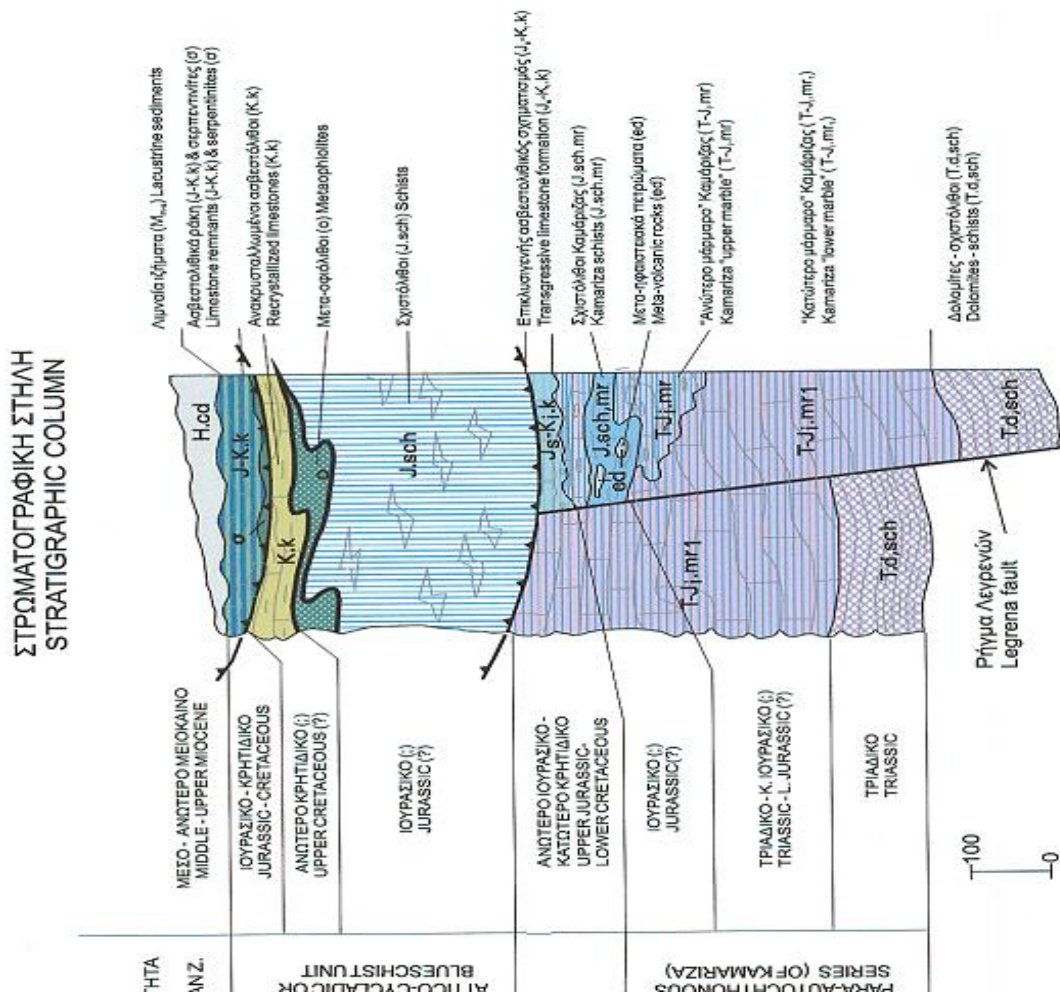
ιδιαίτερα έντονης εκμετάλλευσης, και μία σιδηρομαγγανιούχων μεταλλευμάτων, η παρουσία της οποίας είναι γενικά περιορισμένη. Η πρωτογενής θειούχος μεταλλοφορία των μικτών θειούχων (PBG), που αποτελεί και τη βασική μεταλλοφορία της περιοχής, χαρακτηρίζεται από την παρουσία γαληνίτη (PbS) πλούσιου σε άργυρο, σφαλερίτη (ZnS) και σιδηροπυρίτη (FeS<sub>2</sub>). Πλήθος άλλων θειούχων ορυκτών (π.χ. Cu, As) και θειοαλάτων μετέχουν ως επουσιώδη συστατικά της μεταλλοφορίας. Από τα σύνδρομα ορυκτά επικρατούν ο φθορίτης, ο ασβεστίτης, ο βαρίτης, ο χαλαζίας και ο δολομίτης. Η θειούχος μεταλλοφορία φιλοξενείται κυρίως εντός των ανθρακικών σχηματισμών της «σχετικά αυτόχθονης» σειράς της Λαυρεωτικής ή «σειράς Καμάριζας» («κατώτερο μάρμαρο», «ανώτερο μάρμαρο», «επικλυσιογενής ασβεστόλιθος»), ενώ, ως προς τη μορφή των μεταλλοφόρων συγκεντρώσεων, επικρατούν η φλεβοειδής, η φακοειδής και η στρωματόμορφη (η τελευταία κοντά στις επαφές ανθρακικών και σχιστολιθικών πετρωμάτων). Η μεταλλογένεση της θειούχου μεταλλοφορίας, σύμφωνα με την επικρατούσα άποψη, είναι επιγενετική, έχει άμεση σχέση με την ανωμειοκαινική μαγματική δραστηριότητα (υδροθερμική προέλευση), με θερμοκρασία σχηματισμού τους 280°C και ανήκει στην κατηγορία των συμπαγών θειούχων μεταλλευμάτων βασικών μετάλλων (Pb-Zn-Ag) τύπου αντικατάστασης, εντός ανθρακικών σχηματισμών. Επίσης, σαν αποτέλεσμα έντονων φαινομένων οξείδωσης και στη συνέχεια μετακίνησης των συστατικών της πρωτογενούς μεταλλοφορίας, είχαμε τη δημιουργία, στον ευρύτερο χώρο της Λαυρεωτικής, δευτερογενών ορυκτών σε μεγάλες συγκεντρώσεις, για παράδειγμα ανθρακικό ψευδάργυρο ή σμισθονίτη ή «καλαμίνα» (ZnCO<sub>3</sub>), αργυρούχο ανθρακικό μόλυβδο ή κερουσίτη (PbCO<sub>3</sub>), που υπέστησαν έντονη εκμετάλλευση. Τέλος, στην περιοχή Πλάκα Κερατέας εντοπίστηκε σημαντικό κοίτασμα σιδηρούχου μεταλλεύματος (μαγνητίτης, μαγνητοπυρίτης) μετασωματικού τύπου (skarn).



### 5.3.6 Γεωλογικός χάρτης περιοχής Λαυρίου – Θορικού



Σχήμα 5.3Α : Γεωλογικός χάρτης περιοχής έρευνας, ΙΓΜΕ, ΦΥΛΛΟ ΧΑΡΤΗ ΚΟΡΩΠΙ-ΠΛΑΚΑ



**Σχήμα 5.3B** : Στρωματογραφική στήλη και γεωλογική τομή ΦΥΛΛΟ ΧΑΡΤΗ ΚΟΡΩΠΙ-ΠΛΑΚΑ

## ΥΠΟΜΝΗΜΑ

### ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

#### ΟΛΟΚΑΙΝΟ

**Ανθρωπογενείς δραστηριότητες :** απορρίματα επίπλευσης μεταλλεύματος, σκωρίες, σωροί θειούχων μεταλλευμάτων (σιδηροπυρίτης) και μάζα μεταλλείων.

**Παράκτιοι σχηματισμοί:** άμμοι και θίνες.

**Αποθέσεις χειμάρρων:** αργιλοαμμώδεις αναβαθμίδες πλούσιες σε κροκάλες και λατύπες.

**Πλευρικά κορήματα:** χαλαροί και συνεκτικοί σχηματισμοί από υλικά του αλτικού υποβάθρου.

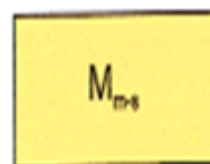
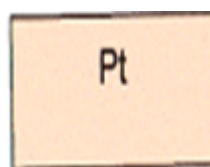
#### ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ

**Ποταμοχερσαία ιζήματα :** πολύμεικτα, ετερομετρικά, συνεκτικά κροκαλοπαγή, κυρίως με κροκάλες πρασινιτών και με παρεμβολές ερυθρών αργίλων. Αναπτύσσονται πάνω σε ερυθρο-κιτρινόχρωμους, αδρόκοκκους ψαμμιτικούς ορίζοντες. Τα πολύμεικτα κροκαλοπαγή μεταβαίνουν προς τα πάνω σε ορίζοντες συνεκτικών ανθρακικών κροκαλοπαγών με ερυθρό συνδετικό αργιλικό υλικό και σε καστανόχρωμους συνεκτικούς αργιλοπηλούς με διάσπαρτες κροκάλες.

#### ΝΕΟΓΕΝΕΣ

##### ΜΕΣΟ – ΑΝΩΤΕΡΟ ΜΕΙΟΚΑΙΝΟ

**Λιμναία ιζήματα:** λευκές έως κιτρινόλευκες ψαμμιτομάργες, ερυθρο-κιτρινόχρωμοι εύθρυπτοι ή και συνεκτικοί ψαμμιτικοί ορίζοντες, λευκοί ως κιτρινόλευκοι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι που υπερκαλύπτονται από συνεκτικά κροκαλολατυποπαγή, των οποίων οι κροκάλες και λατύπες προέρχονται από τους υποκείμενους προνεογενείς σχηματισμούς.



## ΑΝΩΤΕΡΗ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ

### ΠΕΛΑΓΟΝΙΚΗ ΖΩΝΗ

#### ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ – ΚΡΗΤΙΑΙΚΟ

**Ασβεστολιθικά ράκη (J-K,k):** κιτρινωποί και καστανόχρωμοι, κατά θέσεις σιδηρούχοι και αγκεριτιωμένοι, παχύ έως λεπτοπλακώδεις μικριτικοί ασβεστόλιθοι που συνοδεύονται από τεκτονικό πέγμα σερπεντινιτών (σ) με ή χωρίς πιθανώς ιουρασικούς ερυθρούς ραδιολαρίτες.



## ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ

### ΑΤΤΙΚΟ-ΚΥΚΛΑΔΙΚΗ Ή ΚΥΑΝΟΣΧΙΣΤΟΛΙΘΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ

Αποτελεί το «Φυλλιτικό» ή «Νεοελληνικό» κάλυμμα στη Λαυρεωτική. Χαρακτηρίζεται από μεταμορφικές συνθήκες υψηλών πιέσεων – χαμηλών θερμοκρασιών ηωκαινικής ηλικίας και από ανάδρομη μεταμόρφωση πρασινοσχιστολιθικής φάσης μειοκαινικής ηλικίας. Ανήκει στην εσωτερική μεταμορφική ζώνη του Αττικο-Κυκλαδικού συμπλέγματος και βρίσκεται επωθημένη κατά τη διάρκεια του Μεσου-Ανωτέρου Μειοκαίνου τόσο επί της σχετικώς αυτόχθονης σειράς Καμάριζας, όσο επί των επικλυσιγενών ασβεστολίθων. Από την βάση προς την οροφή, διαχωρίζεται σε σχιστολίθους, πρασινίτες και ανακρυσταλλωμένα ανθρακικά πετρώματα.

#### ΑΝΩΤΕΡΟ ΚΡΗΤΙΑΙΚΟ

**Ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι με κονδύλους πυριτολίθων:** πρασινόχρωμοι, σκουρόφαιοι, τερφοί, λεπτο-, μέχρι παχυστρωματώδεις έως άστρωτοι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι με πυριτολιθικές ενστρώσεις ή κονδύλους. Σε αρκετές θέσεις είναι βαθυκαστανόχρωμοι έως καστανέρυθροι, λόγω αγκεριτίωσης, σχηματίζοντας αγκεριτιωμένους ασβεστόλιθους πλούσιους σε πυριτικούς κονδύλους. Τοπικά είναι λατυποπαγείς και διασχίζονται από πυκνό δίκτυο ασβεστιτικών φλεβιδίων. Αποτελούν ένα διακριτικό υπολειμματικό ορίζοντα και καταλαμβάνουν τα ανώτερα στρωματογραφικά μέλη του καλύμματος.



#### ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ

**Μετα-οφιόλιθοι:** βασικά ηφαιστειακά πετρώματα οφιολιθικής προέλευσης, όπως μεταδιαβάσεις και μεταγάββροι, συχνά σχιστοποιημένοι και γνωστοί ως

πρασινίτες. Χαρακτηρίζονται από μια γλαυκοφανιτική φάση που μεταπίπτει σε μεταμόρφωση πρασινοσχιστολιθικής φάσης. Εμφανίζονται στην οροφή των σχιστολίθων και στη βάση των ανακρυσταλλωμένων ασβεστολίθων, κυρίως στη περιοχή του Σουνίου, αλλά και σε διάσπαρτες θέσεις της Λαυρεωτικής, υπό μορφή υπολειμματικών ρακών.



**Σχιστόλιθοι:** συμπτυχωμένοι μοσχοβιτικοί, γλαυκοφανιτικοί, επιδοτιτικοί, γλωριτικοί, χαλαζιακοί, αλβιτικοί, σερικιτικοί και ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι, πρασινοσχιστόλιθοι με γλαυκοφανή, σπάνιες τεκτονικές παρεμβολές μαρμάρων, σιπολινομαρμάρων και σιπολινών. Φέρουν συμπτυχωμένες πηγματιτικές και χαλαζιακές φλέβες, όπως επίσης και μεταγρανодиοριτικά φακοειδή σώματα με γλαυκοφανή.

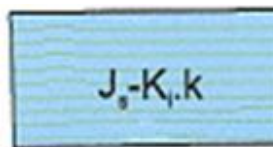


## ΚΑΤΩΤΕΡΗ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ

### ΠΕΛΑΓΟΝΙΚΗ ΖΩΝΗ

#### ΑΝΩΤΕΡΟ ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ - ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΚΡΗΤΙΑΔΙΚΟ

**Επικλυσιγενής ασβεστολιθικός σχηματισμός:** κιτρινο-καστανόχρωμοι και ερυθρόχρωμοι, ελαφρώς ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι, συχνά με εμποτισμούς σιδηρούχων οξειδίων. Αναπτύσσονται επικλυσιγενώς επί του «ανωτέρου μαρμάρου» δια μέσου φωλεών ασυμφωνίας και κροκαλολατυποπαγούς βάσης. Το τελευταίο συνίσταται από κροκάλες και λατύπες σχιστολίθων και μαρμάρων προερχόμενες από τους υποκείμενους σχηματισμούς και με συνδετικό μικριτικό υλικό που περιέχει θραύσματα εχινοδέρμων και κοραλλίων τριαδικής ηλικίας.



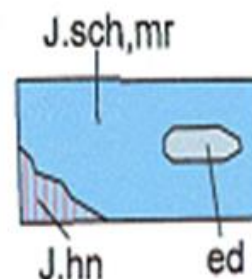
#### «ΠΑΡΑ-ΑΥΤΟΧΘΟΝΗ» ΣΕΙΡΑ (ΣΕΙΡΑ ΚΑΜΑΡΙΖΑΣ)

Η «παρα-αυτόχθονη» σειρά της Λαυρεωτικής, ή σειρά «Καμάριζας», χαρακτηρίζεται από συντεκτονικές μεταμορφικές διαδικασίες πρασινοσχιστολιθικής μέχρι αμφιβολιτικής φάσης. Οι συνθήκες αυτές ταυτίζονται με αυτές του ευρύτερου πελαγονικού χώρου, ηλικίας Ανωτέρου Ιουρασικού. Πάνω στη σειρά αυτή, μετά από ανάδυση και διάβρωση, αποτέθηκε ο παραπάνω αμεταμόρφωτος επικλυσιγενής ασβεστολιθικός σχηματισμός. Η παρουσία του επιβεβαιώνει τη στρωματογραφική αλλά και τη μεταμορφική ασυμφωνία που οφείλεται στην Ηωελληνική

ορογενιτική φάση των Εσωτερικών Ελληνίδων και χαρακτηρίζει τον πελαγονικό χώρο.

### ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ

**Σχιστόλιθοι Καμάριζας (J.sch):** τεφροί, μαύροι και καστανόχρωμοι, μαρμαρυγικοί, χαλαζιακοί, αλβιτικοί και χλωριτικοί σχιστόλιθοι, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από γρानοβλαστικό έως λεπιδοβλαστικό ιστό και με μεταμορφικές παραγενέσεις κατώτερης – μέσης πρασινοσχιστολιθικής φάσης. Οι σχιστόλιθοι που εμπíπτουν στην άλω μεταμόρφωση της ανωμειοκαινικής διείσδυσης του γρानοδιορίτη της Πλάκας μεταμορφώνονται σε κερατίτες (J.hn) ή πλακίτες. Περιέχουν κατά θέσεις μετα-ηφαιστειακά πετρώματα (επιδοτίτες) (ed). Οι σχιστόλιθοι Καμάριζας, προς τη βάση τους, μεταβαίνουν στο «κατώτερο μάρμαρο» Καμάριζας δια μέσου μιας μεταβατικής ζώνης αποτελούμενης από εναλλαγές τεφρών ασβεστιτικών σχιστολίθων και λεπιδοστρωματώδων ασβεστιτικών μαρμάρων.



### ΤΡΙΑΔΙΚΟ – ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ

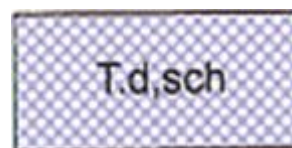
«Ανώτερο μάρμαρο» Καμάριζας: τεφρόχρωμα έως λευκόχρωμα, μεσο-λεπτοστρωματώδη μάρμαρα, πλούσια σε κονδυλοειδείς δομές μεταπυριτολίθων και δολομιτών.



«Κατώτερο μάρμαρο» Καμάριζας: λευκά – τεφροκυανά, άστρωτα έως παχυ-μεσοστρωματώδη, αδροκρυσταλλικά μάρμαρα, τα οποία στην οροφή γίνονται λευκά, λεπτοστρωματώδη και μικροκρυσταλλικά. Στις δυτικές περιοχές της χερσονήσου, γίνονται λατυποπαγοειδή.

### ΤΡΙΑΔΙΚΟ

**Δολομίτες – Σχιστόλιθοι:** λεπτοστρωματώδη δολομιτικά μάρμαρα με σπάνιες εναλλαγές, προς τη βάση, με σχιστολίθους και πρασινοσχιστολίθους. Προς την οροφή κυριαρχούν οι δολομίτες και τα τεφρόλευκα στρωματώδη δολομιτικά μάρμαρα. Αποτελούν το βαθύτερο μέλος του «Κατωτέρου Μαρμάρου».



Γεωλογικό όριο

Ρήγμα

Ρήγμα πιθανό

Επιώθηση ή/και αποκόλληση

Τεκτονική επαφή

Άξονας κατακεκλιμένης συγκλινικής πτυχής

Διεύθυνση και κλίση ανεστραμμένων στρωμάτων

Διεύθυνση και κλίση σχιστότητας

Γράμμωση έκτασης

Κατολισθήσεις

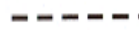
Μεταλλεία σε αργία:



Geological boundary



Fault



Fault probable



Overthrust or/and décollement



Tectonic contact



Recumbent synclinal fold axis



Strike and dip of reversed beds



Strike and dip of schistosity



Stretching lineation

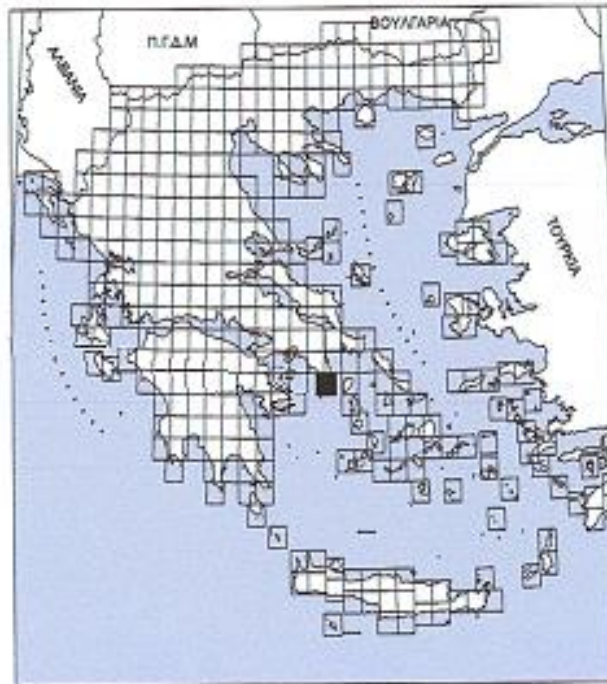


Landslides



Idle mines:



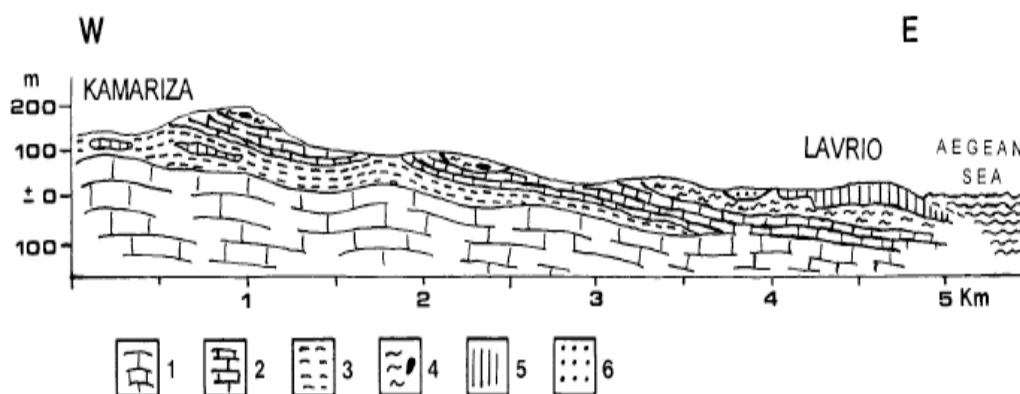


**ΚΛΙΜΑΚΑ 1:50000 SCALE**  
Ισοδιάσταση 40m Contour interval



## 5.4. Υδρογεωλογικά στοιχεία

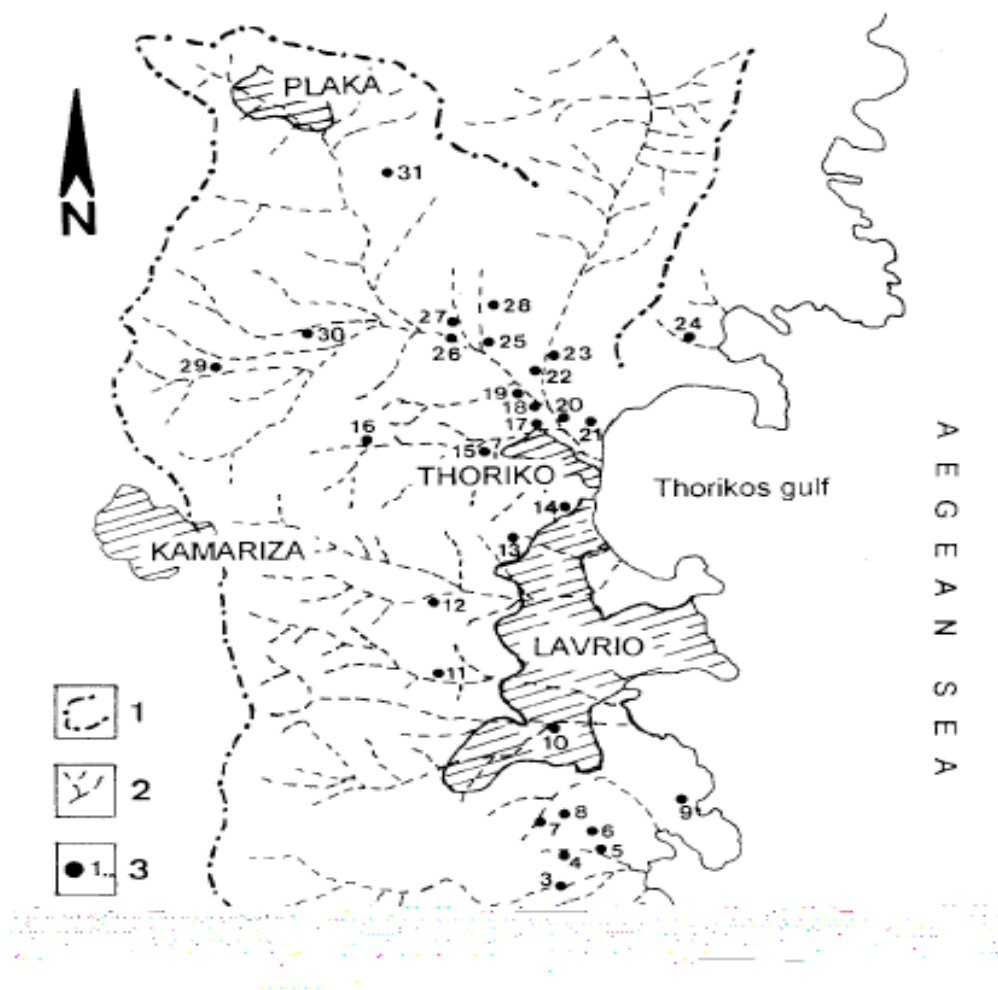
Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής μελέτης, έχουν άμεση σχέση με την λιθολογική σύνθεση των γεωλογικών σχηματισμών και την έντονη τεκτονική. Η περιοχή του Λαυρίου αποτελείται από γεωλογικούς σχηματισμούς με διαφορετική υδρογεωλογική συμπεριφορά. Παρόμοιες υδρογεωλογικές ιδιότητες υπάρχουν ανάμεσα στα συμπαγή πετρώματα, σχιστόλιθοι και φυλλίτες. Αυτά τα πετρώματα είναι ιδιαίτερα αδιαπέρατα, γιατί το σύστημα διακλάσεων παρεμποδίζεται από λεπτόκοκκο υλικό. Πεπερασμένες ζώνες κάτω από την επιφάνεια των σχιστολίθων και των φυλλιτών αποτελούν έναν ελεύθερο υδροφόρο ορίζοντα εκμετάλλευσης από τους κατοίκους, ως επί το πλείστον στη νότια περιοχή του Λαυρίου και της Καμάριζας (Αγ. Κωνσταντίνος) από ρηχά πηγάδια (**Σχήμα 5.4**). Η παροχή νερού από αυτά τα φρεάτια δεν είναι επαρκής για να καλύψει τις απαιτήσεις σε νερό και τα περισσότερα από στεγνώνουν κατά τη διάρκεια παρατεταμένων περιόδων ξηρασίας. Η περιορισμένη διαπερατότητα, που χαρακτηρίζει αυτούς τους σχηματισμούς, οδηγεί σε υψηλή απορροή. Αυτό αντικατοπτρίζεται στην ανάπτυξη μοτίβου αποστράγγισης, το οποίο είναι του δενδριτικού τύπου. Αντιθέτως, στις ζώνες ανθρακικών πετρωμάτων αναπτύσσεται το τυπικό παράλληλο μοτίβο. Κατά συνέπεια, η διάκριση μεταξύ των δύο επικρατούντων υδρογεωλογικών μονάδων της περιοχή μελέτης είναι εφικτή (**Σχήμα 5.5**).



**Σχήμα 5.4:** Απλοποιημένη γεωλογική τομή της περιοχής Καμάριζα-Λαύριο. 1) Κατώτερο μάρμαρο, 2) ανώτερο μάρμαρο, 3) μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι, 4) φυλλιτικό κάλυμμα με μάρμαρα και πρασινίτες, 5) μάρμαρα υπερέκλυσης του φυλλιτικού καλύμματος 6) τεταρτοταγείς αποθέσεις.

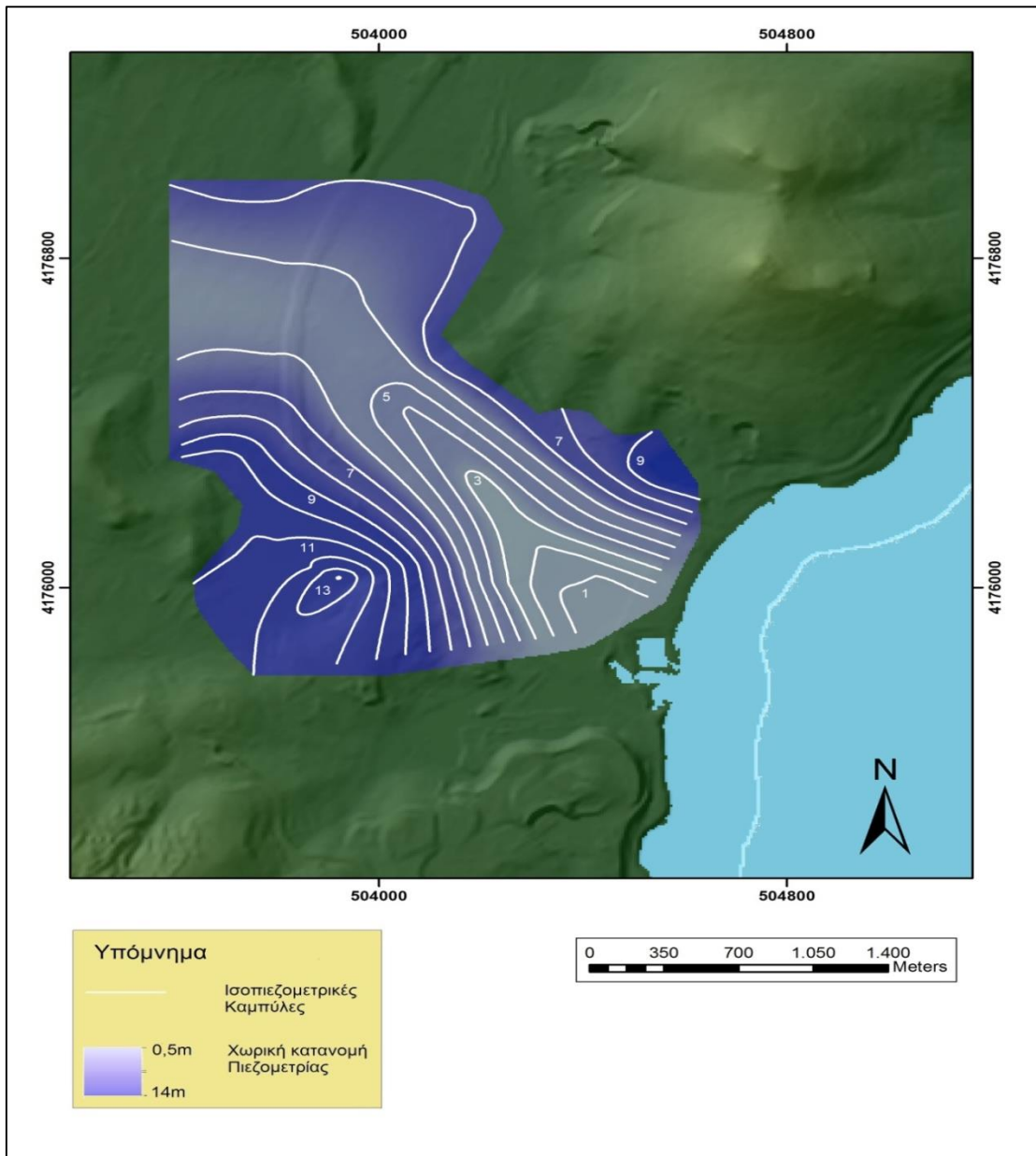
Ανθρακικοί σχηματισμοί, τα άνω και κάτω μάρμαρα, συνθέτουν το κύριο υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής μελέτης. Αυτά τα πετρώματα έχουν υψηλή διαπερατότητα λόγω της έντονης ρωγμάτωσης και ιδιαίτερα μεγάλη καρστικοποίηση. Τα κατώτερα μάρμαρα εμφανίζονται σε περιορισμένες περιοχές νότια της Καμάριζας και νοτιοδυτικά του Λαυρίου (**Σχήμα 5.4**). Αντιθέτως, στο δυτικό τμήμα της χερσονήσου του Λαυρίου η ανάπτυξη του κατώτερου μαρμάρου είναι πιο εκτεταμένη και αποτελεί την ακτογραμμή. Η έλλειψη ενός αδιαπέρατου ορίζοντα (βασικό επίπεδο) έχει σαν αποτέλεσμα τα υπόγεια ύδατα να ρέουν κάτω από το κατώτερο μάρμαρο προς το επίπεδο της θάλασσας. Το ανώτερο μάρμαρο έχει επικαλύψει τους σχιστόλιθους της Καμάριζας και είναι ευρέως διαδεδομένο στην περιοχή μελέτης. Το πάχος του μπορεί να φθάσει έως και 100 m και ποικίλλει είτε επειδή το ανώτερο μάρμαρο επικαλύπτει το κατώτερο, χωρίς καμία παρεμβολή σχιστόλιθου, ή επειδή έχει υποστεί έντονη διάβρωση και τις καιρικές συνθήκες. Η κατείσδυση νερού ακολουθώντας ανατολική διεύθυνση, μεταγγίζεται μερικώς πλευρικά προς τις χαλαρές τεταρτογενείς αποθέσεις ή να βρίσκει μια πιθανή διέξοδο υπόγεια.

Στις αλλουβιακές αποθέσεις, οι οποίες καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της πεδιάδας της λεκάνης του Θορικού και περιοχές της λεκάνης Λαυρίου, ένας ελεύθερος υδροφόρος ορίζοντας έχει αναπτυχθεί. Ο υδροφορέας αυτός εμφανίζει περιορισμένη διαπερατότητα και φτωχά υδραυλικά χαρακτηριστικά που οφείλονται στη λεπτόκοκκη σύσταση. Το αδιαπέρατο υπόβαθρο στη λεκάνη του Θορικού σχηματίζεται από μαρμαρυγικούς σχιστόλιθους της Καμάριζας. Αντιθέτως, στη λεκάνη του Λαυρίου το αδιαπέραστο υπόβαθρο αποτελείται από φυλλίτες και σχιστόλιθους της καλλυματικής επώθησης. Η τροφοδότηση του ελεύθερου υδροφόρου ορίζοντα στις αλλουβιακές αποθέσεις εξασφαλίζεται, τόσο από την άμεση διείσδυση των βροχοπτώσεων σε όλες τις αλλουβιακές αποθέσεις, αλλά και από την πλευρική διαρροή των καρστικών υδάτων του ανώτερου μαρμάρου και των υπόγειων υδάτων από διερχόμενους σχιστόλιθους.



**Σχήμα 5.5 :** Πρότυπες θέσεις αποστράγγισης και δειγματοληψίας υπόγειων υδάτων της περιοχής μελέτης. 1) διαχωρισμός αποστράγγισης, 2) χειμαρροί και 3) τα σημεία δειγματοληψίας του νερού.

Η υδραυλική σύνδεση των δύο υδροφόρων οριζόντων, του καρστικού και του ελεύθερου, με τη θάλασσα σε συνδυασμό με την εντατική εκμετάλλευσή τους για άρδευση έχουν συμβάλει στην επιδείνωση του ποιότητας των υπόγειων υδάτων, λόγω της υφαλμύρινσης. Η διείσδυση του θαλασσινού νερού είναι εξαιρετικά έντονη και στις δύο λεκάνες, Θορικού του Λαυρίου.



**Σχήμα 5.6 :** Πιεζομετρικός χάρτης κατανομής υδραυλικού φορτίου στην περιοχή του Θορικού (Α. Καλλιώρας, Μ.Περδικάκη 2014)

Στο χάρτη του **Σχήματος 5.6** φαίνεται η κατανομή του υδραυλικού (πιεζομετρικού) φορτίου στον αλλουβιακό υδροφορέα του Θορικού.

Οι πιεζομετρικές καμπύλες δείχνουν τα δύο κύρια χαρακτηριστικά του υδροφόρου στρώματος. Από τις γραμμές ροής (κάθετες στις ισοπιεζομετρικές καμπύλες) φαίνεται η πλευρική τροφοδοσία του υδροφόρου από το Ανώτερο Μάρμαρο, έχοντας διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και ΝΔ-ΒΑ. Ακόμη, η ύπαρξη συγκλίνουσας ροής υποδεικνύει τον κύριο άξονα αποστράγγισης του υδροφόρου προς τη θάλασσα, με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ.

## 5.5 Γεωφυσική έρευνα

### 5.5.1 Εισαγωγή – Σχεδιασμός έρευνας

Στην παρούσα μελέτη, ένα από τα δυσκολότερα κομμάτια με το οποίο ήρθαμε αντιμέτωποι κατά την εφαρμογή των μεθόδων, ήταν ο σχεδιασμός της έρευνας. Η μεγάλη έκταση της περιοχής, σε συνδυασμό με την απουσία προγενέστερων μελετών, που θα μπορούσαν να μας καθοδηγήσουν στο χώρο σχετικά με την εξάπλωση του μετώπου της υφαλμύρινης, καθιστούσε το σχεδιασμό ιδιαίτερα απαιτητικό.

Στόχος μας ήταν η σάρωση της περιοχής, λαμβάνοντας ταυτόχρονα τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα δεδομένων των δυσκολιών, εξαιτίας της ανομοιογένειας της υπαίθρου και της όποιας οικιστικής κάλυψης της περιοχής.

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος, εφαρμόστηκε με λήψη συνεχόμενων μετρήσεων, μέσω της μετακίνησης του οργάνου μέτρησης, ρυμουλκούμενου από το αυτοκίνητο στο οποίο επιβαίναμε. Οι περιορισμοί που εμφανίστηκαν, είχαν να κάνουν με τη δυσκολία του οργάνου να περάσει από κάποιους δρόμους μικρού πλάτους. Για το λόγο αυτό οι μετρήσεις λήφθηκαν, όπου υπήρχε η δυνατότητα προσπέλασης.

Η εφαρμογή της μεθόδου της γεωηλεκτρικής τομογραφίας στην ύπαιθρο, αναπτύσσεται βάσει συγκεκριμένης διαδικασίας, όπως έγινε και στην περιοχή του Θορικού.

Αρχικά, ορίζονται κατάλληλες θέσεις έρευνας, από τις οποίες θεωρούμε ότι μπορούμε να λάβουμε τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Προσδιορίζεται η τοποθεσία και η διεύθυνση των τομών που πρόκειται να εφαρμοστούν. Σκοπός της έρευνας είναι να μπορεί να φτάνει η διασκόπηση στο μέγιστο δυνατό βάθος. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος μια τομής, τόσο μεγαλύτερο είναι και το βάθος διασκόπησης. Σχετικά με τη διεύθυνση των τομών, προσπαθούμε γενικά να είναι κάθετες στη διεύθυνση των δομών που είναι υπό έρευνα. Με αυτό τον τρόπο αποτυπώνονται καλύτερα οι κλίσεις των στρωμάτων, αλλά και ο ζητούμενος στόχος.

Σε δεύτερο στάδιο, πρέπει να γνωρίζουμε τον απαιτούμενο εξοπλισμό που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, προκειμένου να οδηγηθούμε στην αποτελεσματικότερη λήψη μετρήσεων στην ύπαιθρο.

Ως τρίτο στάδιο εφαρμογής της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, θεωρούμε την επιλογή της κατάλληλης διάταξης των ηλεκτροδίων, τις αποστάσεις μεταξύ αυτών και κατ'έκταση του μήκους της τομής.

Τέταρτο στάδιο είναι η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων, σύμφωνα με την επιλεγμένη διάταξη στην προκαθορισμένη τοποθεσία, με συγκεκριμένη διεύθυνση αλλά και αποστάσεις ηλεκτροδίων.

Πέμπτο στάδιο είναι η λήψη των μετρήσεων.

Τέλος, αφού ολοκληρωθούν τα παραπάνω στάδια, τα οποία πραγματοποιούνται στην ύπαιθρο, σειρά έχει η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της τομογραφίας. Έπειτα, γίνεται η ανάλυση και η ερμηνεία των Γεωηλεκτρικών Τομών, βάσει των οποίων βγαίνουν τα συμπεράσματα για το πρόβλημα που είναι προς διερεύνηση.

## 5.5.2 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος

### 5.5.2.1 Μετρήσεις Υπαίθρου



**Εικόνα 5.6:** Διαδρομές μέτρησης με το ηλεκτρομαγνητικό όργανο EM-31, για συνολικά βάθη διασκόπησης 3 μέτρα και 6 μέτρα, αποτυπωμένες στο Google Earth. Η κόκκινη γραμμή αποτυπώνει τις μετρήσεις με συνολικό βάθος διασκόπησης 3 μέτρα, ενώ η γαλάζια γραμμή αφορά τις μετρήσεις με συνολικό βάθος διασκόπησης τα 6 μέτρα.



**Εικόνα 5.7:** Το τροχήλατο ρυμουλκούμενο όχημα που χρησιμοποιήθηκε για την κάλυψη μεγάλων αποστάσεων με το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης CMD4 και το όργανο λήψης συντεταγμένων GPS.

Στην εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, χρησιμοποιήσαμε τα ηλεκτρομαγνητικά όργανα διασκόπησης CMD-2 για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 μέτρα και CMD-4 για συνολικό βάθος διασκόπησης 6 μέτρα. Ο τρόπος εφαρμογής της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου που ακολουθήσαμε, είναι όπως αυτός που εφαρμόσαμε στην Πολυτεχνειούπολη, Ζωγράφου, που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας εργασίας. Με την ρυμούλκηση του οχήματος που φέρει τον εξοπλισμό των μετρήσεων, διασκοπήθηκε η κοιλάδα του Θορικού, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 5.6**.

Σε αντίθεση με την εφαρμογή της μεθόδου στην Πολυτεχνειούπολη, Ζωγράφου, οι διασκοπήσεις με τα ηλεκτρομαγνητικά όργανα, δεν εφαρμόστηκαν μόνο σε ασφαλτόστρωτους δρόμους, αλλά πραγματοποιήθηκαν κυρίως σε χωμάτινες διαδρομές της κοιλάδας, όπου ήταν δυνατή η προσπέλασή τους με το όχημα. Στον εξοπλισμό που έφερε το ρυμουλκούμενο όχημα, συμπεριλαμβανόταν και το όργανο GPS (Global Positioning System), το οποίο πραγματοποιούσε συνεχόμενη λήψη συντεταγμένων, καθόλη τη διάρκεια των διαδρομών, παράλληλα με τη λήψη μετρήσεων του ηλεκτρομαγνητικού οργάνου.

Γενικός γνώμονας που ακολουθήθηκε για τον σχεδιασμό των διαδρομών διασκόπησης, ήταν η κάλυψη της περιοχής από το μέτωπο της θάλασσας προς τα βορειοδυτικά, δηλαδή προς το εσωτερικό της κοιλάδας του Θορικού. Οι ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις ολοκληρώθηκαν σε χρονικό διάστημα δύο ημερών.

#### **5.5.2.2 Επεξεργασία Ηλεκτρομαγνητικών Μετρήσεων**

Η επεξεργασία των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων έγινε με χρήση του προγράμματος SURFER, για δημιουργία χαρτών ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας. Πριν τα δεδομένα εισαχθούν στο Surfer έγινε επεξεργασία τους στο πρόγραμμα GRAPHER για την αφαίρεση τοπικών μεταβολών, που παρουσίαζαν έντονη διαφοροποίηση ως προς τη γενική κατανομή των μετρήσεων, και προέρχονταν από την παρεμβολή μεταλλικών υλικών κατά τη διάρκεια της λήψης μετρήσεων.

Η δημιουργία των χαρτών έγινε με την ακόλουθη διαδικασία :

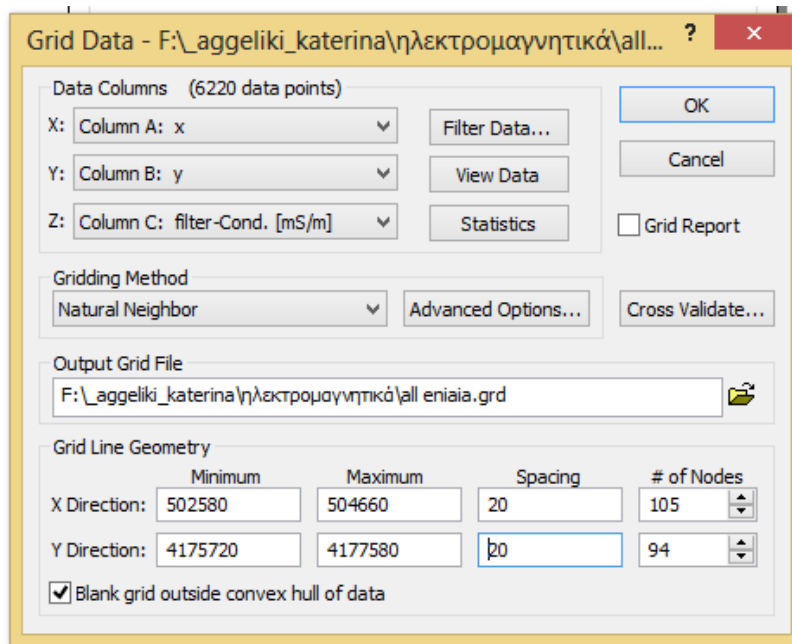


Στο πρόγραμμα Surfer εισάγουμε τα δεδομένα που λάβαμε από το ηλεκτρομαγνητικό όργανο διασκόπησης και το GPS, από φύλλο του Excel, για τη δημιουργία καννάβου (grid). Ορίζουμε τις στήλες με τις συντεταγμένες των μετρήσεων x και y, και τη στήλη με την μέτρηση της οποίας θα φτιάξουμε χάρτη αγωγιμότητας ή μαγνητικής επιδεκτικότητας.

Στη συνέχεια, επιλέγουμε τη μέθοδο δημιουργίας του καννάβου, δηλαδή συνδυασμού σημείων στο χώρο στα οποία έχουν ληφθεί μετρήσεις για τη δημιουργία χάρτη κατανομής της εξεταζόμενης φυσικής ιδιότητας. Στη συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος “Natural Neighbor”.

Επιπλέον, δίνονται μέγιστα και ελάχιστα άκρα μετρήσεων για τις δύο διευθύνσεις x και y και ορίζεται η απόσταση των σημείων του καννάβου, για τη δημιουργία της γεωμετρίας του χάρτη. Επισημαίνεται, ότι για τη δημιουργία χαρτών με κοινά κριτήρια σύγκρισης, λάβαμε υπόψιν τα ίδια άκρα και απόσταση σημείων στη δημιουργία των καννάβων όλων των χαρτών της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδους που εφαρμόστηκε, **Σχήμα 5.7**.

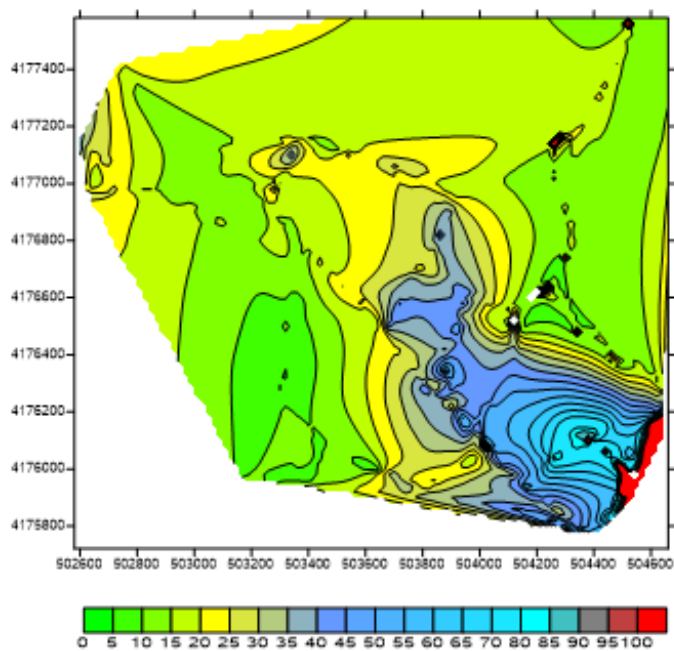
Η δημιουργία των χαρτών γίνεται από την εντολή “Contour Map”, της γραμμής εργασιών Map. Με αυτή την εντολή, εισάγεται ο κάνναβος που δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα για τη δημιουργία του επιθυμητού χάρτη.



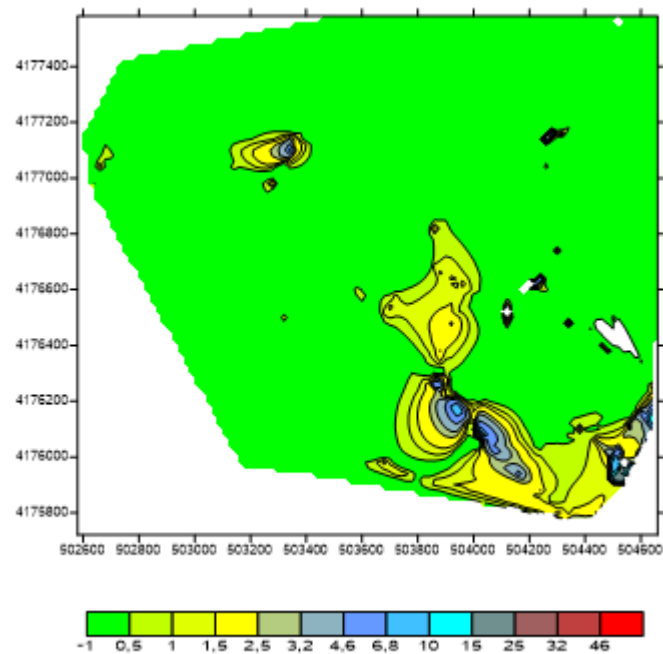
**Σχήμα 5.7:** Δημιουργία καννάβου (grid)

### 5.5.2.3 Χάρτες συνολικού βάθους διασκόπησης 3m

Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (3m)

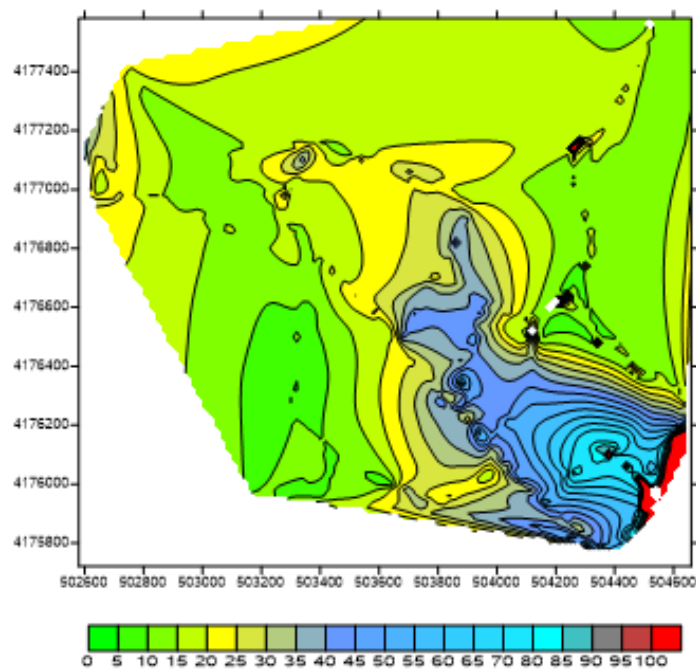


Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας (3m)

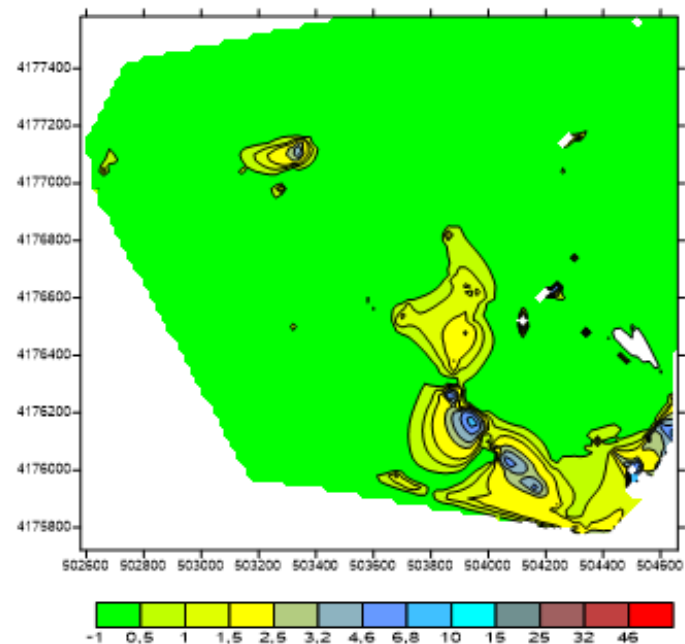


*Σχήμα 5.8: Χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας για 3m συνολικό βάθος διασκόπησης.*

Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας <10 (3m)

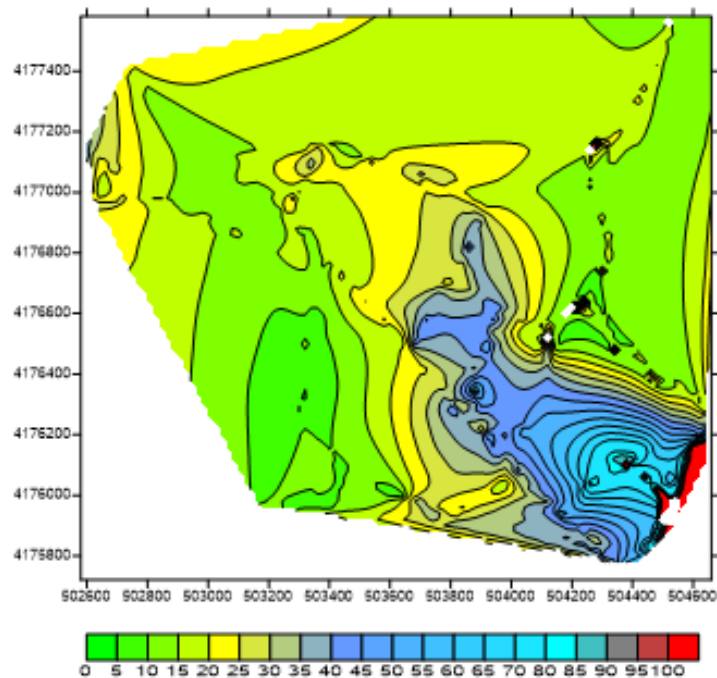


Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας <10 (3m)

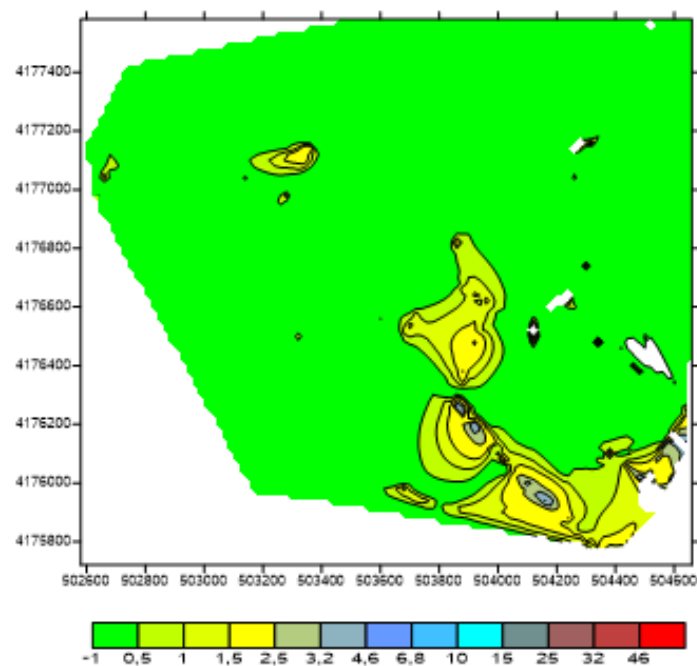


*Σχήμα 5.9: Χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας για 3m συνολικό βάθος διασκόπησης, και περιορισμό τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας μικρότερες των 10 ppt.*

Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας <5 (3m)



Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας <5 (3m)



*Σχήμα 5.10: Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας για 3m συνολικό βάθος διασκόπησης, και περιορισμό τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας μικρότερες των 5 ppt.*

### Σχολιασμός αποτελεσμάτων συνολικού βάθους διασκόπησης 3 μέτρων

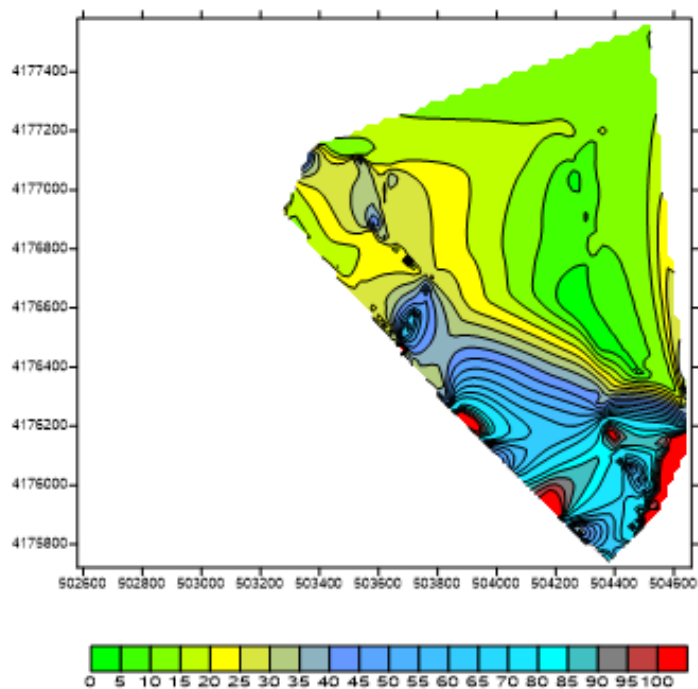
Στο χάρτη ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε συνολικό βάθος διασκόπησης 3 μέτρων, παρατηρούνται στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής έρευνας, σχετικά χαμηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας, που κυμαίνονται περίπου από 0 έως 35 Ms/m (**Σχήμα 5.8**). Οι υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας εντοπίζονται στην νοτιοανατολική πλευρά του χάρτη. Σε αυτό το σημείο, οι τόσο αυξημένες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας, σίγουρα οφείλονται στην διείσδυση αλμυρού νερού στην παράκτια αυτή περιοχή. Σε λίγο πιο κεντρικό σημείο στον χάρτη αυτό, και βορειότερα από την περιοχή με τις πολύ αυξημένες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας, παρατηρούμε κάποιες επίσης υψηλές τιμές. Οι τιμές αυτές, βάσει γεωλογικών και γεωμορφολογικών στοιχείων, πιθανά να οφείλονται στην τροφοδοσία του αλλουβιακού σχηματισμού που βρίσκεται σε αυτό το σημείο και σε αυτό το βάθος διασκόπησης, από υφάλμυρα νερά που προκύπτουν από το πέρασμα νερού από το επιφανειακό ανώτερο μάρμαρο, το οποίο εντοπίζεται βορειότερα στο χάρτη.

Αντίστοιχα, ο χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας παρουσιάζει γενικά χαμηλές τιμές στο σύνολό του. Ωστόσο, ενδιάμεσες τιμές παρατηρούνται στην νοτιοανατολική πλευρά του χάρτη, αλλά και στο βορειοδυτικό άκρο.

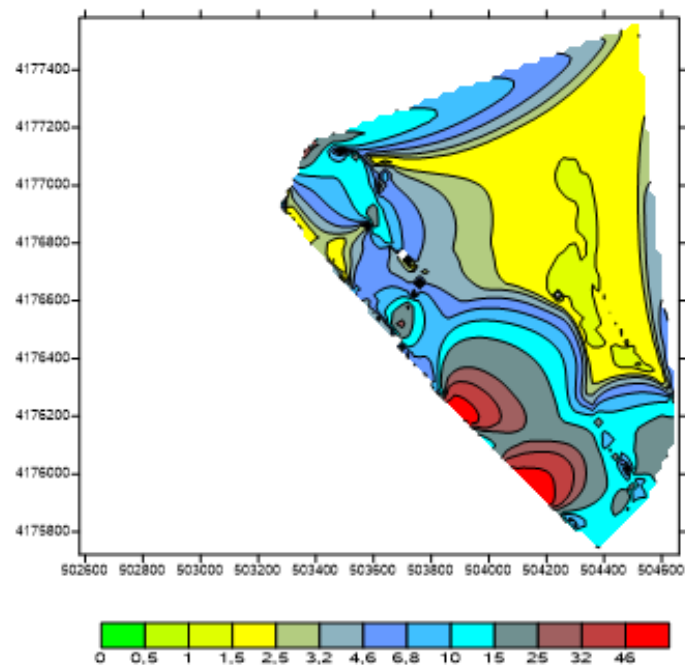
Για να διαπιστώσουμε αν οι υψηλές τιμές στους παραπάνω χάρτες οφείλονται στην ύπαρξη αλμυρού νερού ή σε ανθρωπογενή δραστηριότητα, τέθηκε περιορισμός τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας μικρότερες των 10 ppt και 5 ppt (**Σχήμα 5.9 και 5.10 αντίστοιχα**). Οι χάρτες οι οποίοι προέκυψαν βάσει των περιορισμών αυτών, παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις συγκριτικά με τον αρχικό χάρτη, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι υψηλές τιμές αγωγιμότητας προέρχονται από την ύπαρξη αλμυρού νερού στην περιοχή έρευνας και όχι στην ύπαρξη κάποιας μεταλλοφορίας ή γενικότερα στην ύπαρξη μεταλλικών υλικών και αντικειμένων.

### 5.5.2.4 Χάρτες συνολικού βάθους διασκόπησης 6m

Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (6m)

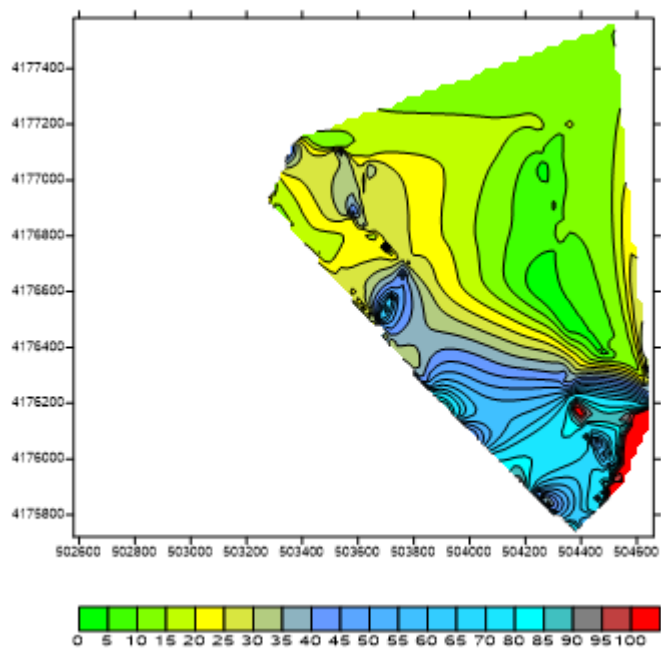


Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας (6m)

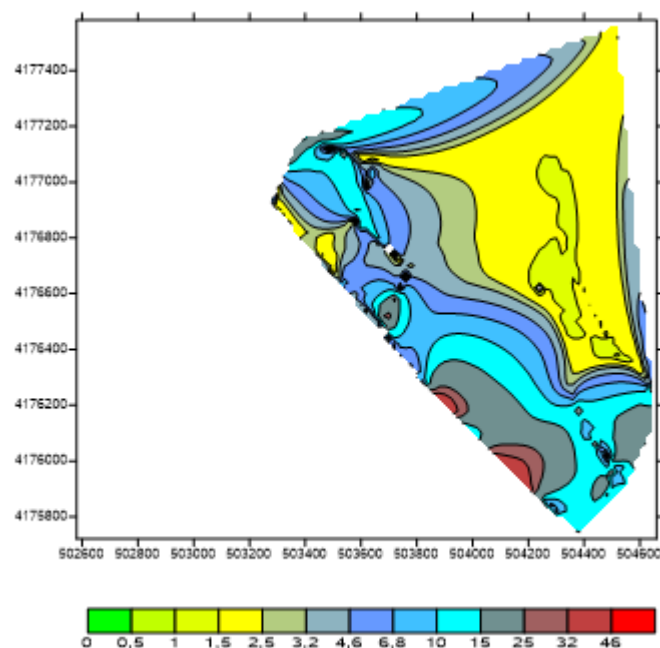


*Σχήμα 5.11: Χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 6m.*

Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας <50 (6m)

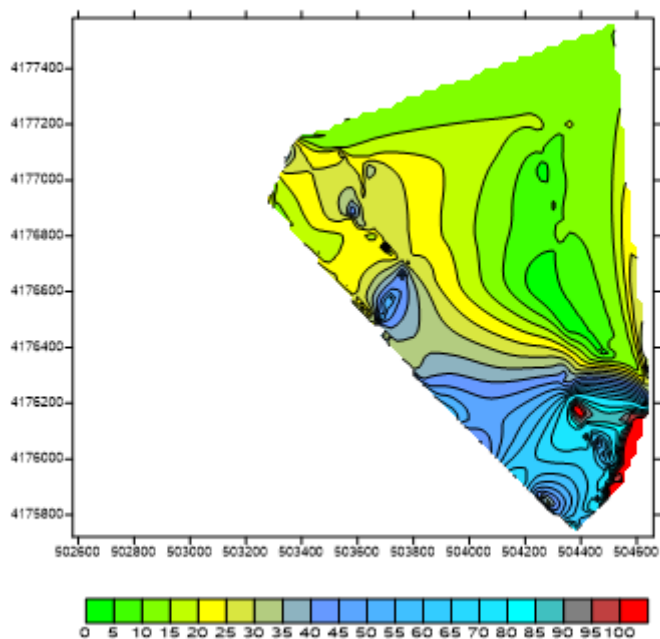


Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας <50 (6m)

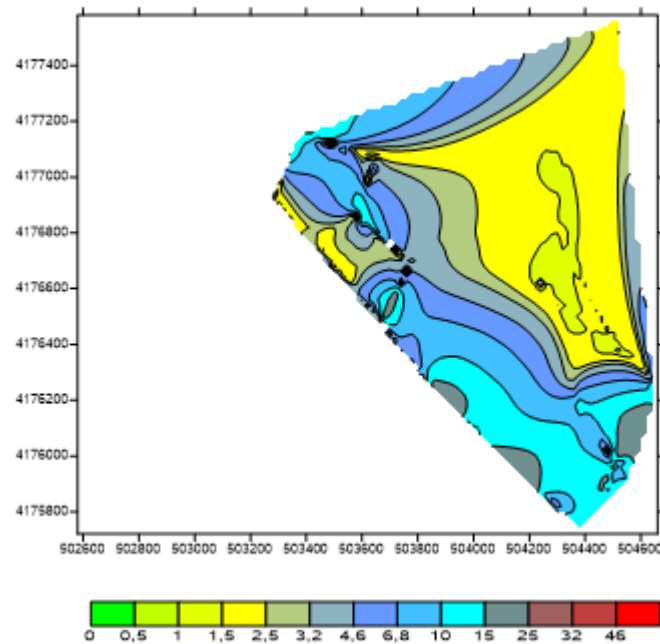


*Σχήμα 5.12: Χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 6m και περιορισμό τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας μικρότερες των 50 ppt.*

Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας <20 (6m)



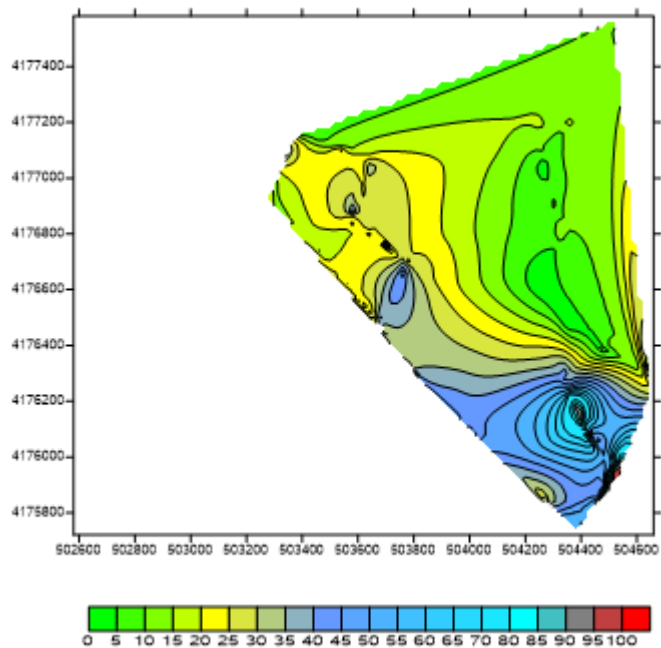
Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας <20 (6m)



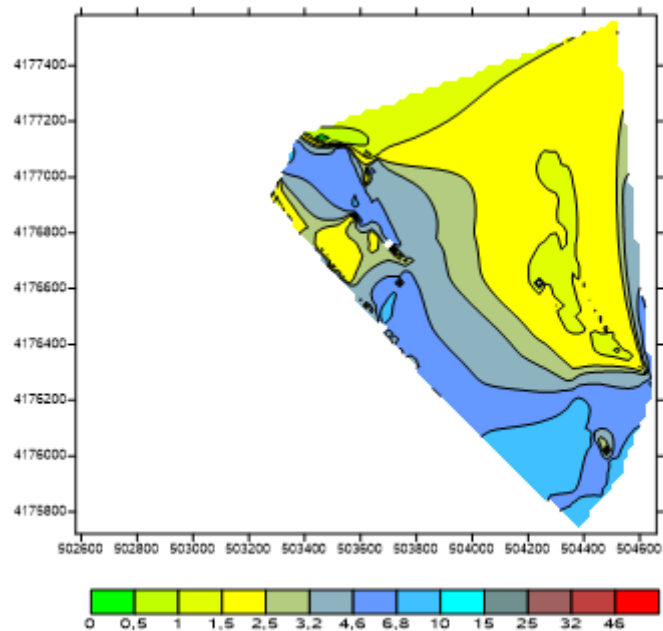
*Σχήμα 5.13: Χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 6m και περιορισμό τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας μικρότερες των 20 ppt.*



Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας <10 (6m)

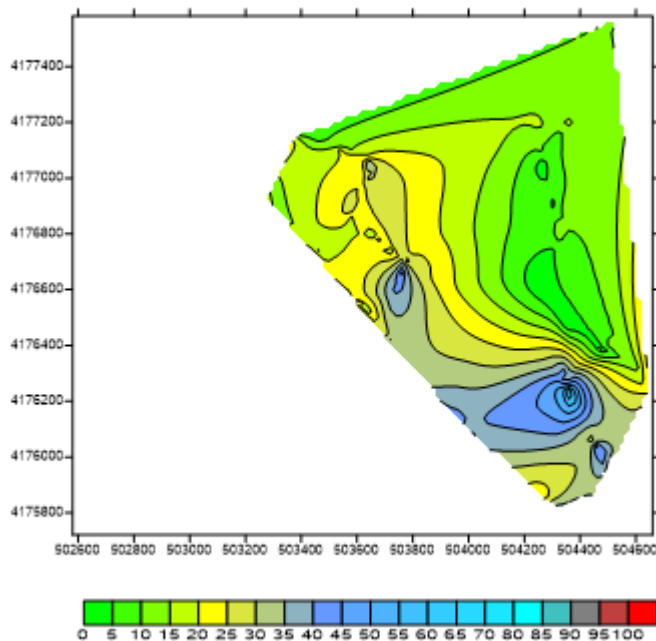


Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας <10 (6m)

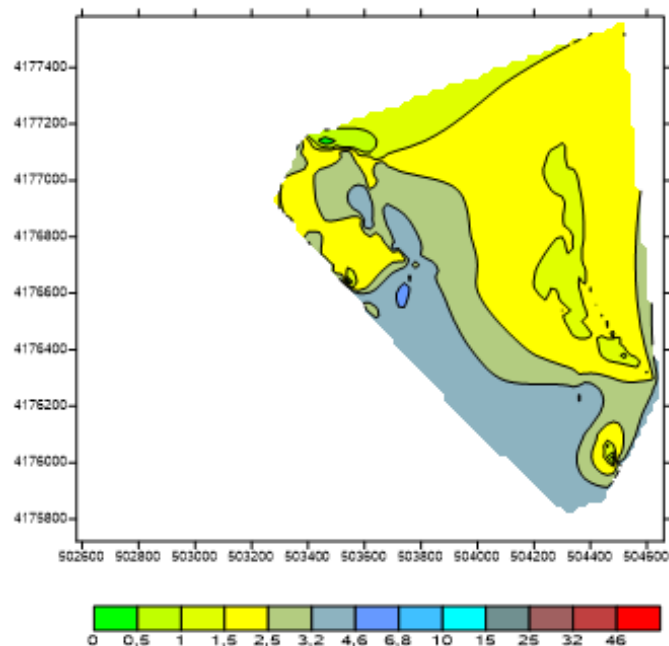


*Σχήμα 5.14: Χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 6m και περιορισμό τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας μικρότερες των 10 ppt.*

Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας <5 (6m)



Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας <5 (6m)



*Σχήμα 5.15: Χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 6m και περιορισμό τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας μικρότερες των 5 ppt.*

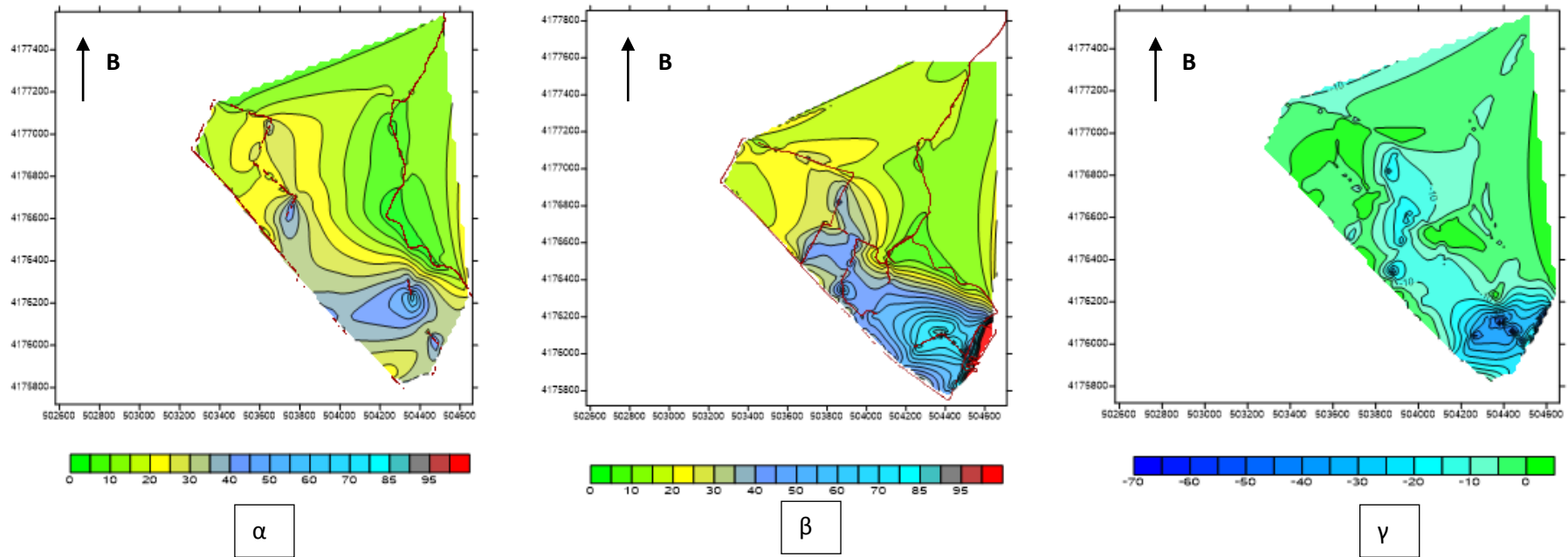
## Σχολιασμός αποτελεσμάτων συνολικού βάθους διασκόπησης 6 μέτρων

Στο χάρτη ηλεκτρικής αγωγιμότητας με συνολικό βάθος διασκόπησης 6 μέτρων (**Σχήμα 5.11**), παρατηρούνται όπως και στον χάρτη με συνολικό βάθος διασκόπησης 3 μέτρων (**Σχήμα 5.8**), υψηλές τιμές στην νοτιοανατολική πλευρά. Οι τιμές αυτές οφείλονται στην διείσδυση του υφάλμυρου νερού στους παράκτιους σχηματισμούς.

Στον περιβάλλοντα χώρο εντοπίζονται μέσες έως χαμηλές κυρίως τιμές. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι χάρτες **Σχήματα 5.12-5.13-5.14-5.15**, προέκυψαν βάση συγκεκριμένων περιορισμών στις τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας. Οι χάρτες αυτοί συνεχίζουν να παρουσιάζουν αυξημένες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην ίδια περιοχή, νοτιοανατολικά των χαρτών. Παρ' όλα αυτά, όσο αυξάνεται ο περιορισμός, οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας που προκύπτουν είναι μειούμενες, αλλά πάντα αυξημένες σε σχέση με αυτές του περιβάλλοντα χώρου. Με αυτόν τον τρόπο, όσο αυξάνεται ο περιορισμός, τόσο πιο ευδιάκριτα εντοπίζεται η περιοχή που είναι επηρεασμένη από την υφαλμύριση.

Αντίστοιχα, στους χάρτες της μαγνητικής επιδεκτικότητας αυξημένες τιμές παρουσιάζονται στη βόρεια, βορειοδυτική και νοτιοανατολική πλευρά του χάρτη. Όσο αυξάνεται ο περιορισμός, και σε αυτή την περίπτωση, οι υψηλές τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας μειώνονται και το μέτωπο των τιμών αυτών περιορίζεται. Έτσι προκύπτει ο τελικός χάρτης **Σχήμα 5.16**, όπου με τη μέθοδο των περιορισμών, οι αυξημένες τιμές που οφείλονται σε ανθρωπογενή δραστηριότητα έχουν εξαλειφθεί και οι υψηλές τιμές που συνεχίζουν να υφίστανται προέρχονται από το φαινόμενο της υφαλμύρισης.

### 5.5.2.5 Τελικοί χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας



**Σχήμα 5.16:** Χάρτης α) ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 6m, με περιορισμό τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας μικρότερες των 5 ppt, β) ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3m, με περιορισμό τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας μικρότερες των 5 ppt, γ) διαφοράς των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των χαρτών (α) – (β)



α



β



γ

**Σχήμα 5.17 :** Χάρτης α) ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 6m, με περιορισμό τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας μικρότερες των 5 ppt , β) ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3m, με περιορισμό τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας μικρότερες των 5 ppt, γ) διαφοράς των τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας των χαρτών (α) – (β) , με εντοπισμό της θέσης και της συνολικής διαδρομής στο Google Earth.

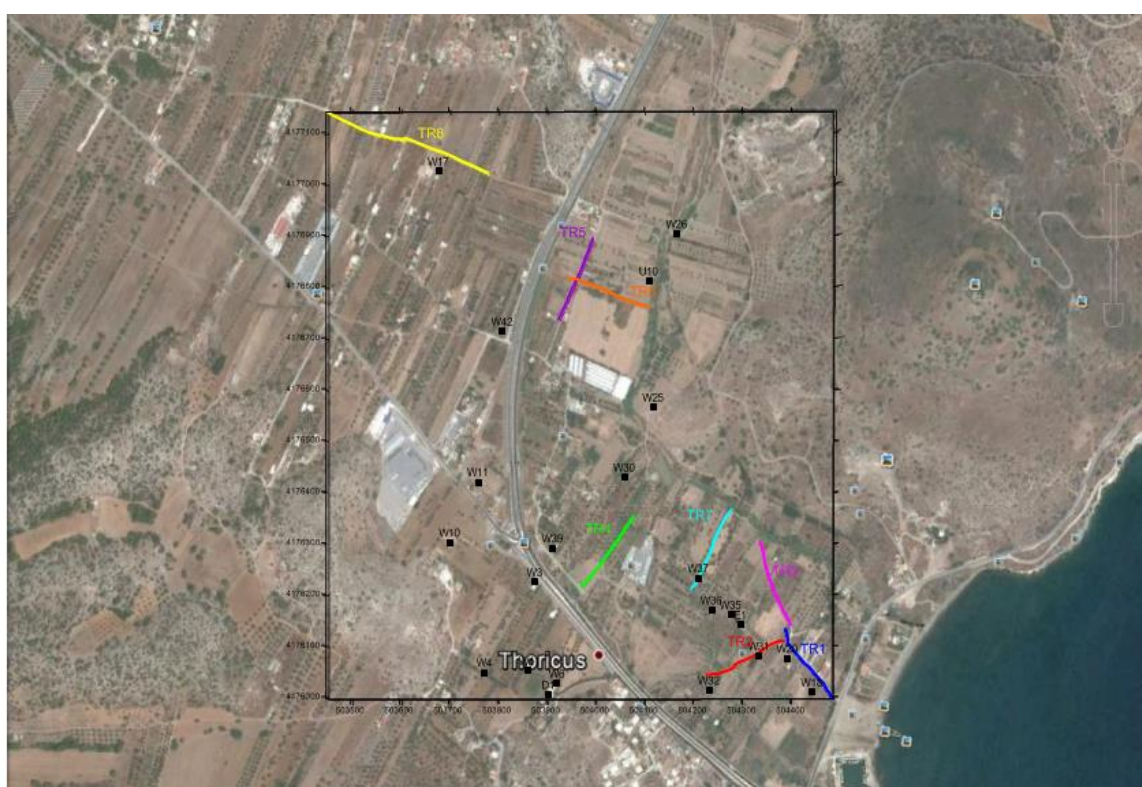
## Σχολιασμός αποτελεσμάτων τελικών χαρτών αγωγιμότητας

Από τους αρχικούς χάρτες αγωγιμότητας για 3 και 6 μέτρα βάθους διασκόπησης (**Σχήματα 5.8 και 5.11**), και έχοντας κάνει χρήση περιορισμών στις τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας μικρότερες του 50, 20, 10 και 5 ppt , βλέπουμε ότι ο χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας με τον περιορισμό τιμών μικρότερες του 5 είναι ο πιο ευδιάκριτος ως προς το μέτωπο της υφαλμύρισης και για τα δύο βάθη διασκόπησης (**Σχήματα 5.10 και 5.15**).

Επομένως, η δημιουργία του χάρτη της διαφοράς αγωγιμοτήτων στον εν λόγω περιορισμό μας δίνει μια ολοκληρωμένη εικόνα για τη διαμόρφωση του μετώπου της υφαλμύρισης στην περιοχή της έρευνας. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, σε συνολικό βάθος διασκόπησης 3 μέτρων η διείσδυση του θαλασσινού νερού είναι μεγαλύτερη, από ότι στο συνολικό βάθος των 6 μέτρων. Για αυτό το λόγο, από την διαφορά των αγωγιμοτήτων προκύπτουν αρνητικές τιμές αγωγιμότητας (**Σχήμα 5.16γ**), καθώς έχουμε αφαιρέσει τον χάρτη των 3 μέτρων βάθους διασκόπησης από αυτόν των 6 μέτρων. Αυξημένες τιμές αγωγιμότητας εντοπίζονται στη νότια και νοτιοδυτική πλευρά της περιοχής έρευνας. Οι τιμές αυτές μας προϊδεάζουν για την ύπαρξη αλμυρού νερού στους επιφανειακούς σχηματισμούς , ενώ όσο πάμε προς μεγαλύτερα βάθη η υφαλμύριση μειώνεται. Βάσει γεωλογικών αλλά και γεωμορφολογικών στοιχείων της συγκεκριμένης περιοχής, οι σχετικά αυξημένες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας που συνεχίζουν να εμφανίζονται στο κέντρο του χάρτη της διαφοράς των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας από τα δύο βάθη διασκόπησης, πιθανά να οφείλονται στην τροφοδοσία του αλλουβιακού σχηματισμού από τα υφάλμυρα νερά που προκύπτουν από τα επιφανειακά ανώτερα μάρμαρα που εντοπίζονται βορειότερα, δίπλα από το λόφο Βελατούρι.

### 5.5.3 Ηλεκτρική Μέθοδος

Κατά τη διάρκεια της γεωφυσικής έρευνας, πραγματοποιήθηκαν 8 τομογραφίες ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης και ταυτόχρονα, στις ίδιες τομές έγιναν και μετρήσεις με τη μέθοδο της επαγόμενης πολικότητας (IP). Όλες οι τομογραφίες έγιναν με διάταξη Pole – Dipole, είχαν συνολικό μήκος 175 μέτρα και σε αυτές χρησιμοποιήθηκαν 72 ηλεκτρόδια. Εξάιρεση αποτελεί η 8<sup>η</sup> τομογραφία, η οποία πραγματοποιήθηκε με τη διάταξη Schlumberger, με συνολικό μήκος τομής 355 μέτρα και 72 χρησιμοποιούμενα ηλεκτρόδια.



*Σχήμα 5.18 : Οι γεωηλεκτρικές τομές στην περιοχή του Θορικού, αποτυπωμένες στο Google Earth.*

Ιδιαίτερα για τον εντοπισμό ζωνών υφαλμύρισης, χρησιμοποιείται η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου οφείλεται στην επίδραση που έχει ο υδροχημικός χαρακτήρας του νερού των σχηματισμών στη γεωηλεκτρική ανταπόκριση του υπεδάφους. Η ανίχνευση του μετώπου της υφαλμύρισης, βασίζεται στην επίδραση του υδροχημικού χαρακτήρα των ιόντων του χλωρίου, το οποίο είναι ένα από τα πιο ηλεκτρικά ενεργά ιόντα που εμφανίζονται στη φύση.



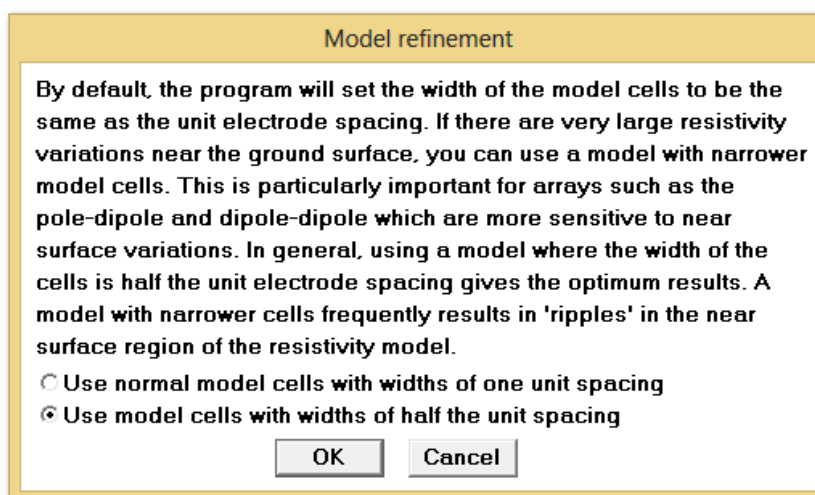
*Εικόνα 5.8: Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας.*



### 5.5.3.1 Επεξεργασία δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας

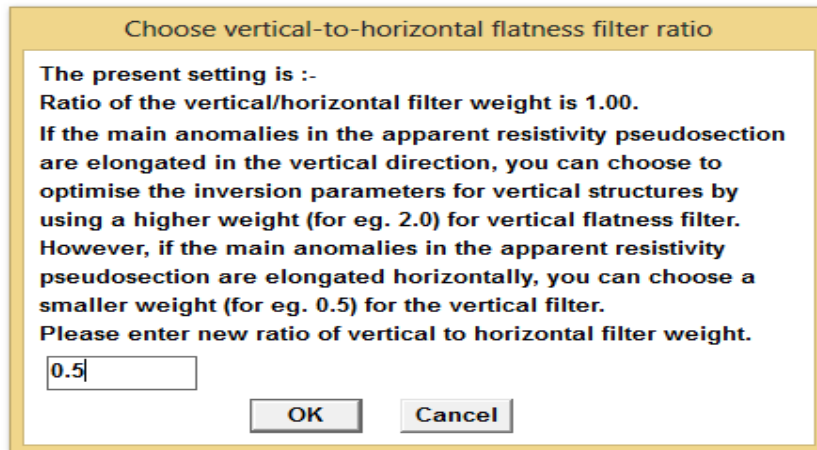
Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των ηλεκτρικών τομογραφιών και για να έχουμε την εξαγωγή του τελικού προφίλ της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα RES2DINV. Το πρόγραμμα αυτό, μας δίνει τη δυνατότητα επιλογής διαφόρων παραμέτρων ερμηνείας.

1. Επιλέξαμε τη ρύθμιση «Model Refinement», διότι με αυτό τον τρόπο το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει περισσότερες μετρήσεις με το μισό της απόστασης των ηλεκτροδίων, μέσω της επεξεργασίας των ήδη υπαρχόντων μετρήσεων. Ως αποτέλεσμα, το τελικό μοντέλο μπορεί να διακρίνει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το υπέδαφος. **(Εικόνα 5.9)**



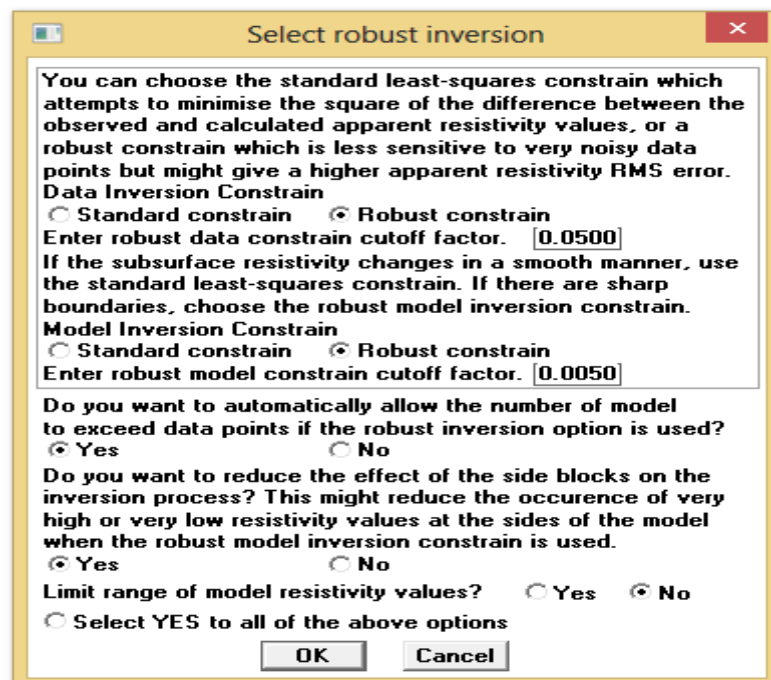
*Εικόνα 5.9 : Εικόνα από το πρόγραμμα επεξεργασίας RES2DINV για την επιλογή της παραμέτρου Model Refinement*

2. Στη συνέχεια, επιλέξαμε την παραμέτρο «Horizontal» με συντελεστή 0,5 προκειμένου να τονώσουμε τη στρωματογραφία, δίνοντας έμφαση στις οριζόντιες μεταβολές.



*Εικόνα 5.10:* : Εικόνα από το πρόγραμμα επεξεργασίας RES2DINV για την επιλογή της ρύθμισης για έμφραση στην οριζόντια στρωματογραφία.

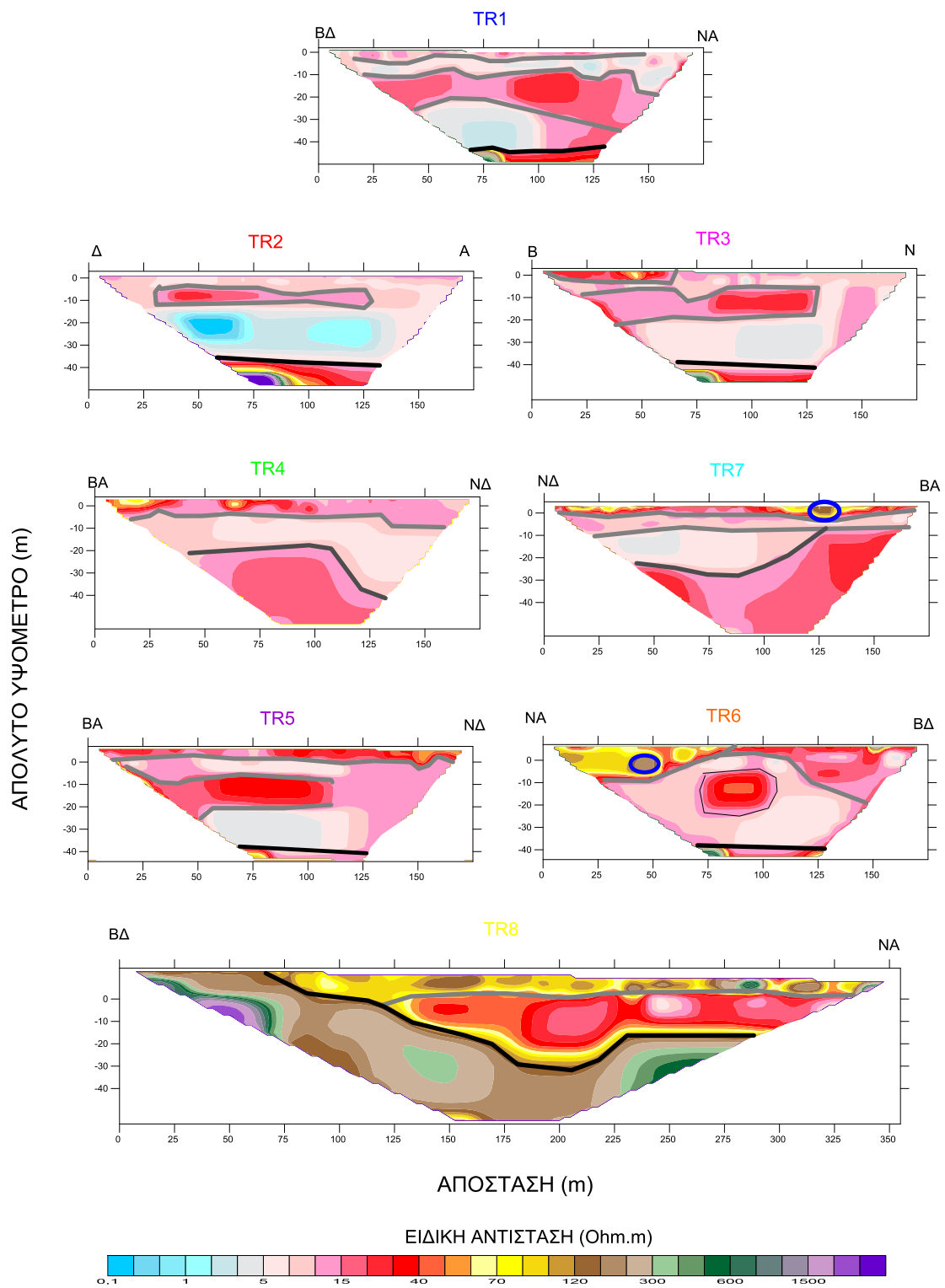
3. Τέλος, επιλέξαμε την παράμετρο «Robust – Robust» προκειμένου να αφαιρέσουμε τον «θόρυβο» και να μπορέσουμε να έχουμε ερμηνεία των μετρήσεων όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται απότομα. Η επιλογή «Robust – Robust» παρέχει την καλύτερη ερμηνεία των μετρήσεων, δεδομένου ότι τα επιφανειακά υλικά παρουσιάζουν μεγάλη ανομοιογένεια και ως εκ τούτου ο παραγόμενος «θόρυβος» εξαλείφεται.



*Εικόνα 5.11:* Εικόνα από το πρόγραμμα επεξεργασίας RES2DINV για την επιλογή της παραμέτρου «Robust – Robust».

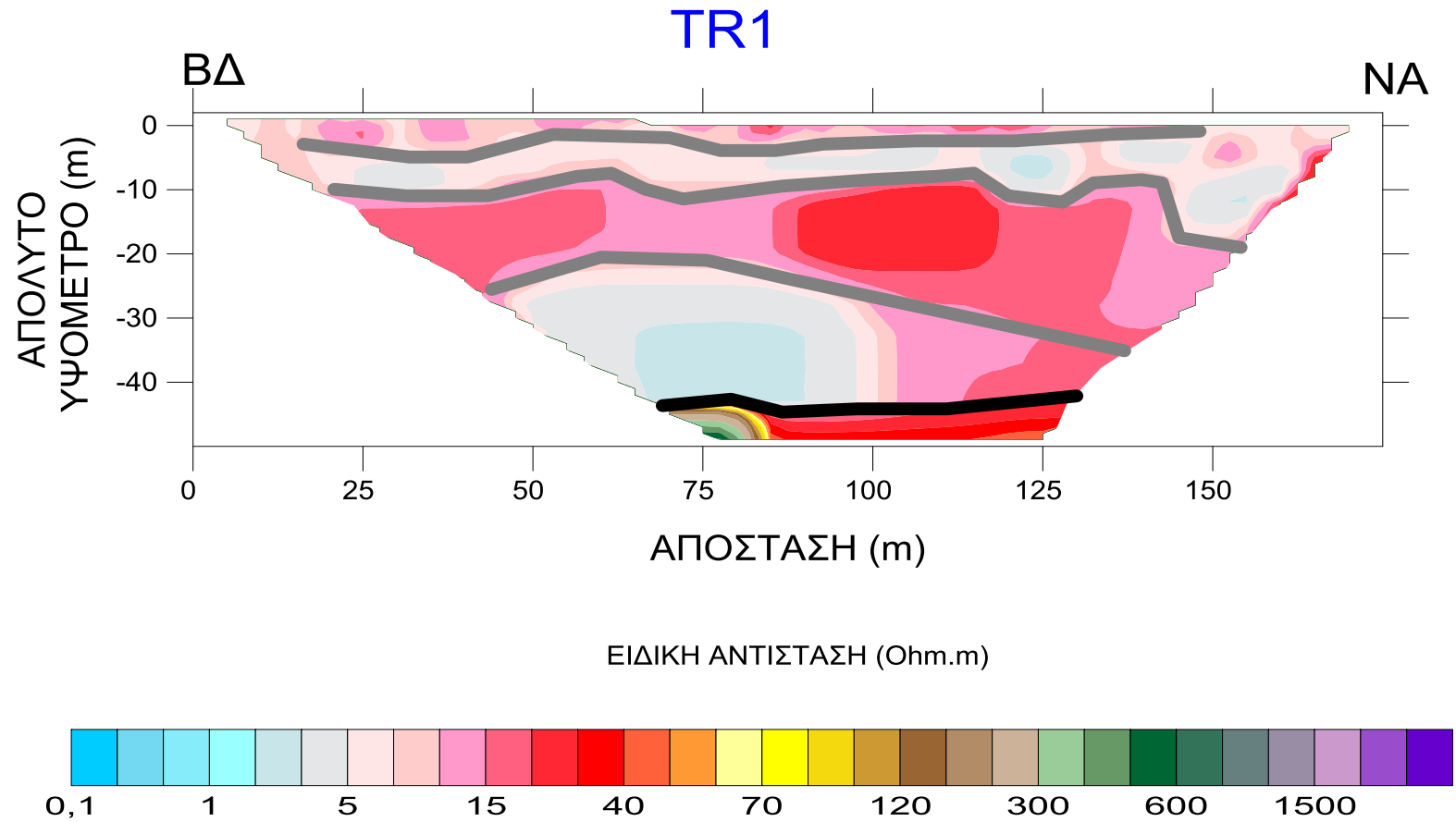
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τομογραφίες ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, οι οποίες έχουν ερμηνευτεί με τη χρήση του προγράμματος RES2DINV (*Loke and Barker, 1996*). Με βάση την ερμηνεία των μετρήσεων, μπορούμε και έχουμε σαφή εικόνα για την ευρύτερη στρωματογραφία της περιοχής, αλλά και σαφή εντοπισμό του μετώπου της υφαλμύρισης, το οποίο και αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο **Σχήμα 5.19** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ερμηνείας των μετρήσεων, μέσω των γεωηλεκτρικών τομών του υπεδάφους, στις διάφορες θέσεις που έγιναν οι μετρήσεις. Η γενικότερη στρωματογραφία φαίνεται να συσχετίζεται. Ακολουθεί η ανάλυση κάθε τομής, τόσο ως προς τη στρωματογραφία, όσο και ως προς τη γεωλογική ερμηνεία.



Σχήμα 5.19: Ηλεκτρικές τομογραφίες με την μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή του Θορικού.

### 5.5.3.2 Τομή TR1

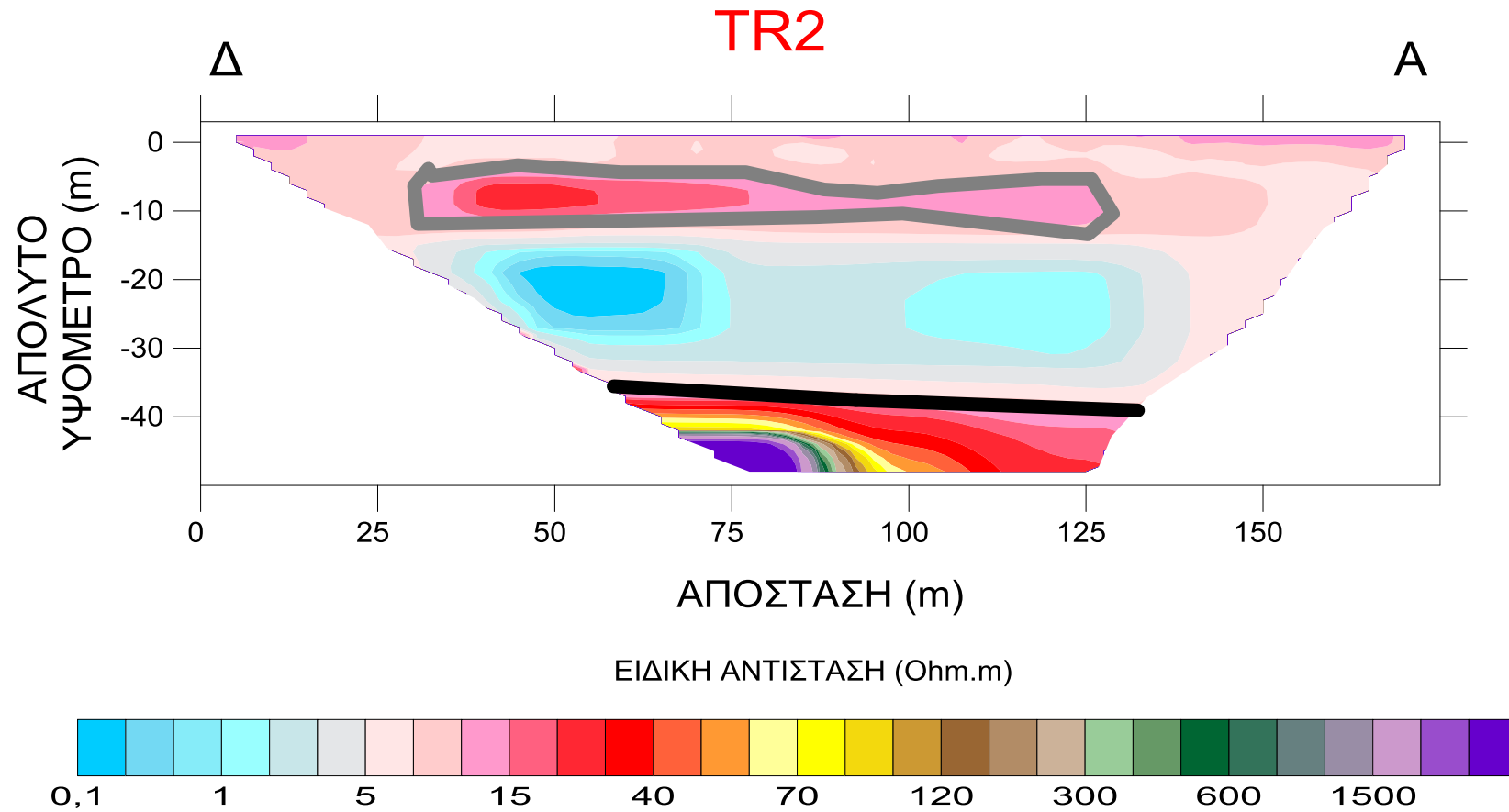


Σχήμα 5.20: Η γεωηλεκτρική τομή TR1, με προσανατολισμό ΒΔ – ΝΑ

## Σχολιασμός της γεωηλεκτρικής τομής TR1

- Παρατηρούμε ότι από τα 15 μέτρα ΒΔ της τομής έως τα 150 μέτρα, εμφανίζεται ένα στρώμα με πάχος περίπου 5 μέτρα από την επιφάνεια, το οποίο παρουσιάζει χαμηλές σχετικά τιμές ειδικής αντίστασης. Όπως φαίνεται και από τα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής, το επιφανειακό αυτό στρώμα αποτελείται από αδρομερείς αποθέσεις εδαφικών υλικών. Ο αλλουβιακός αυτός σχηματισμός παρουσιάζει σχετικά μέσες τιμές ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης.
- Έπειτα, από τα 5 έως τα 10 μέτρα βάθος και κατά μήκος όλης της τομής, παρατηρούμε ένα δεύτερο στρώμα με ακόμα χαμηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης. Οι τιμές αυτές, πιθανότατα να οφείλονται στη διείσδυση θαλασσινού νερού σε αμμώδεις ή διακλασμένους σχηματισμούς. Παρατηρούμε επίσης, ότι στην ΝΑ πλευρά της τομής, στην πλευρά δηλαδή που βρίσκεται πιο κοντά στην ακτογραμμή, η διείσδυση του θαλασσινού νερού είναι μεγαλύτερη, και γι' αυτό το λόγο στο σημείο αυτό, το πάχος του στρώματος είναι μεγαλύτερο.
- Ακόμη βαθύτερα, σχετικά αυξημένες τιμές ειδικής αντίστασης εντοπίζονται στο τρίτο στρώμα της γεωηλεκτρικής τομής από τα 10 έως τα 25 μέτρα βάθος. Οι τιμές αυτές, βάσει των γεωλογικών δεδομένων, οφείλονται στην παρουσία του φυλλιτικού καλύμματος.
- Από τα 25 μέτρα έως τα 40 μέτρα βάθος, εντοπίζεται ένα στρώμα με πολύ χαμηλές τιμές ειδικών αντιστάσεων. Το στρώμα αυτό αποτελείται από ασβεστόλιθο. Είναι το λεγόμενο γεωλογικά ανώτερο μάρμαρο, το οποίο παρουσιάζει διακλάσεις, μέσα στις οποίες εντοπίζεται ένα δευτερογενές υδροφόρο σύστημα. Παρουσιάζεται δηλαδή υφαλμύριση, στον καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο.
- Από τα 40 μέτρα βάθος και κάτω, εμφανίζεται ένα στρώμα με υψηλές τιμές ειδικών αντιστάσεων. Από εκεί και κάτω δηλαδή, ξεκινά βάσει και γεωλογικών στοιχείων ο σχιστόλιθος

### 5.5.3.3 Τομή TR2



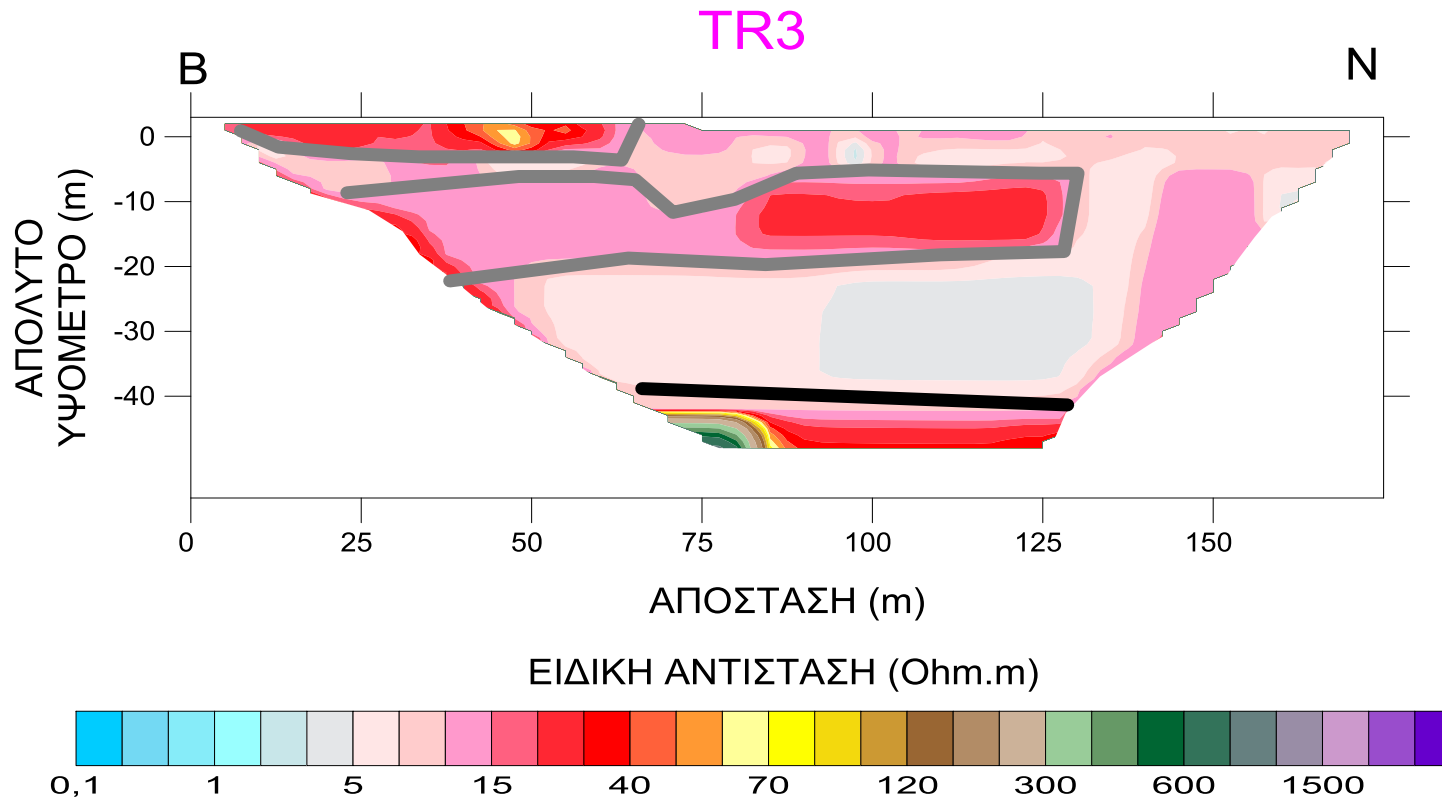
*Σχήμα 5.21: Η γεωηλεκτρική τομή TR2 με προσανατολισμό Δ – Α.*

## Σχολιασμός της γεωηλεκτρικής τομής TR2

- Στην τομή της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης και καθ'όλο το μήκος της, επιφανειακά και μέχρι τα 5 μέτρα βάθος, παρατηρούμε ένα στρώμα χαμηλών ειδικών αντιστάσεων. Όπως φαίνεται και από τα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής, το στρώμα αυτό αφορά αλλουβιακούς σχηματισμούς και αποτελείται από αδρομερή υλικά. Οι χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης οφείλονται στη διείσδυση θαλασσινού νερού.
- Έπειτα, από τα 5 έως τα 10 μέτρα βάθος, παρατηρούμε ένα στρώμα μεγαλύτερων ειδικών αντιστάσεων από το προηγούμενο, το οποίο εκτείνεται από τα 35 μέτρα Α έως τα 130 μέτρα της τομής. Με βάση τα γεωλογικά στοιχεία που διαθέτουμε, το στρώμα αυτό πιθανότατα να οφείλεται στο φυλλιτικό κάλυμμα.
- Βαθύτερα, από τα 10 μέτρα έως τα 35 μέτρα και σχεδόν κατά μήκος ολόκληρης της τομής, παρατηρείται μια περιοχή με πολύ χαμηλές τιμές ειδικών αντιστάσεων. Οι χαμηλές αυτές τιμές οφείλονται στην ύπαρξη υφάλμυρου νερού στον καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο, ο οποίος λόγω των διακλάσεων παρουσιάζει δευτερογενές πορώδες.
- Τέλος, σε βάθος από τα 40 μέτρα και κάτω, παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές ειδικών αντιστάσεων. Οι αυξημένες αυτές τιμές οφείλονται στη συνεκτικότητα των πετρωμάτων στο βάθος αυτό και υποδηλώνουν την ύπαρξη του σχιστολίθου.



### 5.5.3.4 Τομή TR3

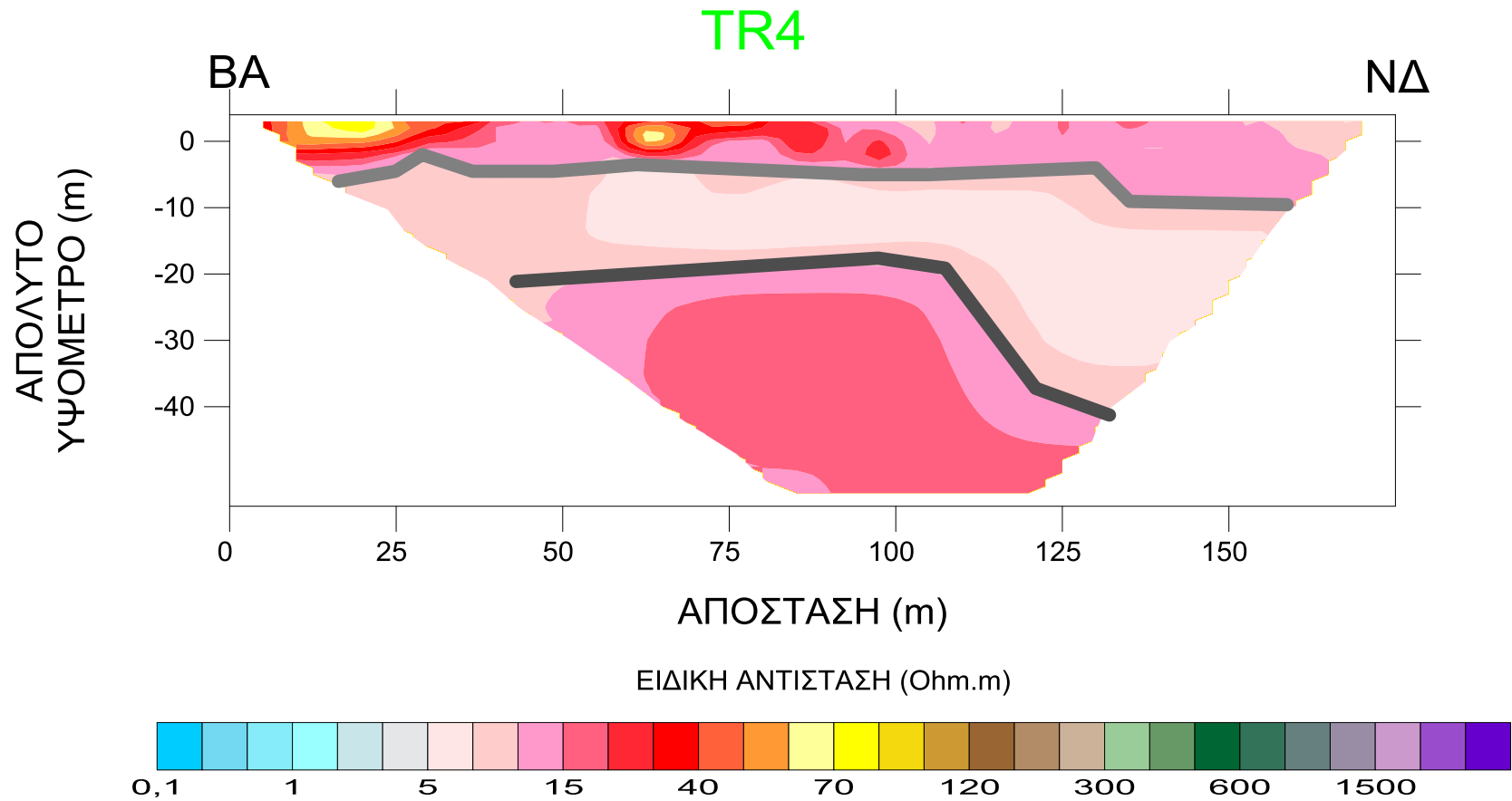


Σχήμα 5.22: Η γεωηλεκτρική τομή TR3 με προσανατολισμό B – N

### Σχολιασμός της γεωηλεκτρικής τομής TR3

- Αρχικά, παρατηρούμε ότι επιφανειακά, με περίπου 5 μέτρα βάθος και για τα πρώτα 70 μέτρα της τομής, παρουσιάζεται μια περιοχή με αυξημένες τιμές ειδικών αντιστάσεων. Βάσει όλων των γεωλογικών στοιχείων της περιοχής, οι τιμές αυτές οφείλονται στην ύπαρξη αδρομερών υλικών.
- Σε όλο το μήκος της τομής, σε βάθος περίπου 10 μέτρων μέχρι τα πρώτα 70 μέτρα της τομής και στη συνέχεια επιφανειακά, εμφανίζεται ένα στρώμα με πολύ χαμηλές τιμές ειδικών αντιστάσεων, οι οποίες πιθανά να οφείλονται στην διείσδυση υφάλμυρου νερού στους αδρομερείς επιφανειακούς σχηματισμούς.
- Βαθύτερα, από τα 10 έως τα 20 μέτρα βάθος, παρατηρούμε ένα στρώμα με μέσες τιμές ειδικής αντίστασης. Το στρώμα αυτό είναι αργιλικής σύστασης και γεωλογικά ερμηνεύεται ως φυλλιτικό κάλυμμα.
- Στη συνέχεια, ακόμα βαθύτερα και μέχρι τα 40 μέτρα, στην γεωηλεκτρική τομή παρουσιάζονται πολύ χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης. Πιθανότατα, οι χαμηλές αυτές τιμές να οφείλονται στην ύπαρξη υφάλμυρου νερού στον καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο, ο οποίος λόγω των διακλάσεων παρουσιάζει δευτερογενές πορώδες.
- Τέλος, από τα 40 μέτρα και βαθύτερα, εμφανίζονται πολύ αυξημένες τιμές ειδικών αντιστάσεων. Οι αυξημένες αυτές τιμές οφείλονται στη συνεκτικότητα των πετρωμάτων στο βάθος αυτό και υποδηλώνουν την ύπαρξη του σχιστολίθου βάσει των γεωλογικών δεδομένων.

### 5.5.3.5 Τομή TR4

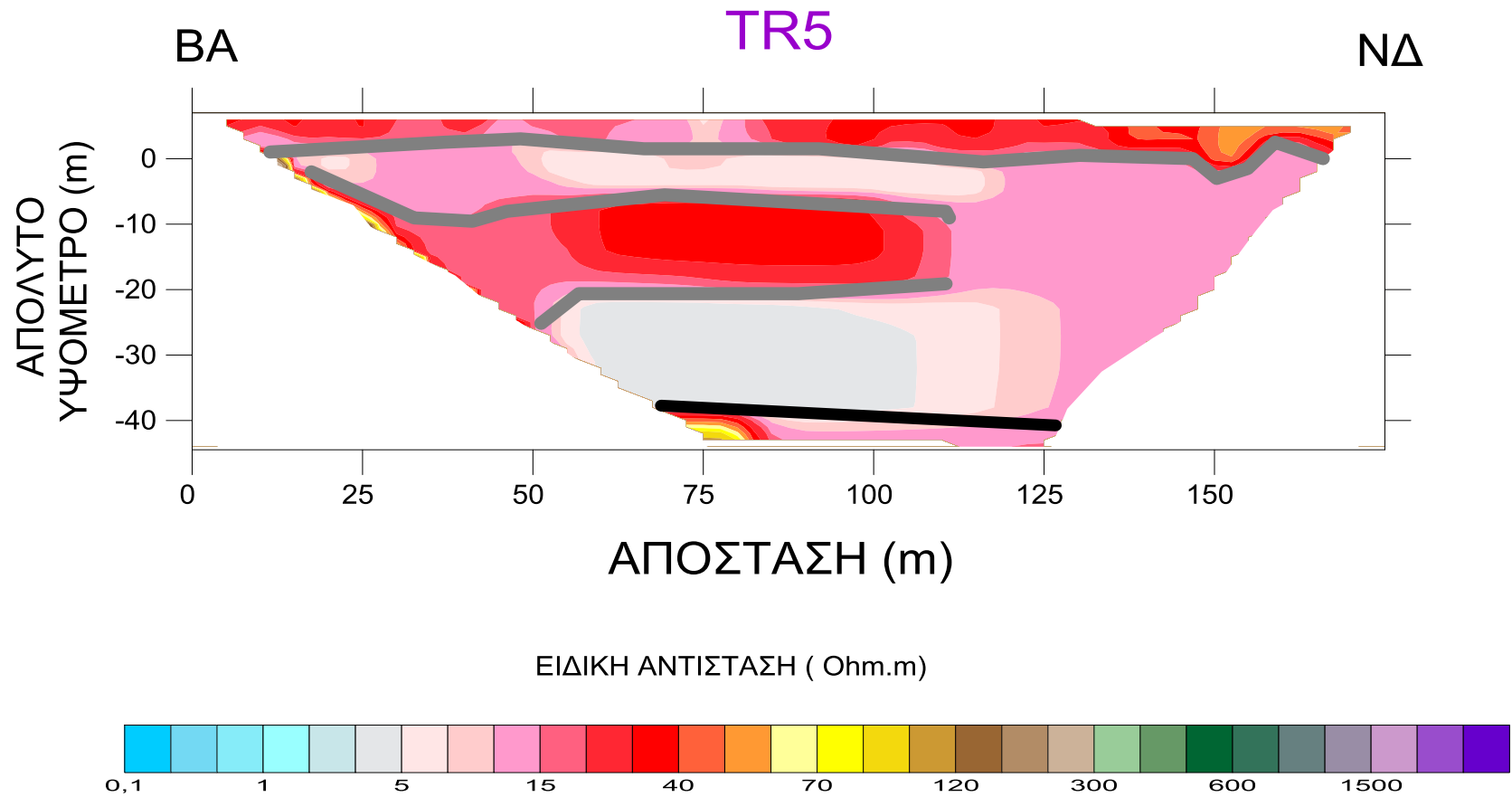


Σχήμα 5.23: Η γεωηλεκτρική τομή TR4 με προσανατολισμό ΒΑ – ΝΔ

#### Σχολιασμός της γεωηλεκτρικής τομής TR4

- Στην τομή αυτή της γεωηλεκτρικής αντίστασης, καθ'όλο το μήκος της και σε βάθος 10 περίπου μέτρων, παρατηρούμε ένα στρώμα μέσωσων σχετικά ειδικών αντιστάσεων. Επιφανειακά του στρώματος αυτού και προς τη ΒΑ πλευρά της τομής, εμφανίζονται δύο υποπεριοχές με αισθητά αυξημένες τιμές ειδικών αντιστάσεων. Βάσει γεωλογικών και γεωμορφολογικών στοιχείων της περιοχής, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι αυτές οι τιμές οφείλονται σε αδρομερή φερτά υλικά της παλαιοκοίτης της περιοχής.
- Στη συνέχεια, από τα 10 έως τα 20 μέτρα περίπου σε βάθος, παρατηρούμε ένα στρώμα πολύ χαμηλότερων ειδικών αντιστάσεων. Οι χαμηλές τιμές ειδικών αντιστάσεων, πιθανά οφείλονται στην ύπαρξη υφάλμυρου νερού μέσα στον καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο. Επιπλέον, παρατηρείται μια αύξηση του πάχους του στρώματος αυτού, προς τη ΝΔ πλευρά της τομής, λόγω μεγαλύτερης διείσδυσης του υφάλμυρου νερού στον σχηματισμό αυτό.
- Βαθύτερα, παρατηρούνται μέσες σχετικά τιμές ειδικής αντίστασης. Με βάση τα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής, ο σχηματισμός αυτός πιθανά σχετίζεται με σχιστόλιθο.

### 5.5.3.6 Τομή TR5

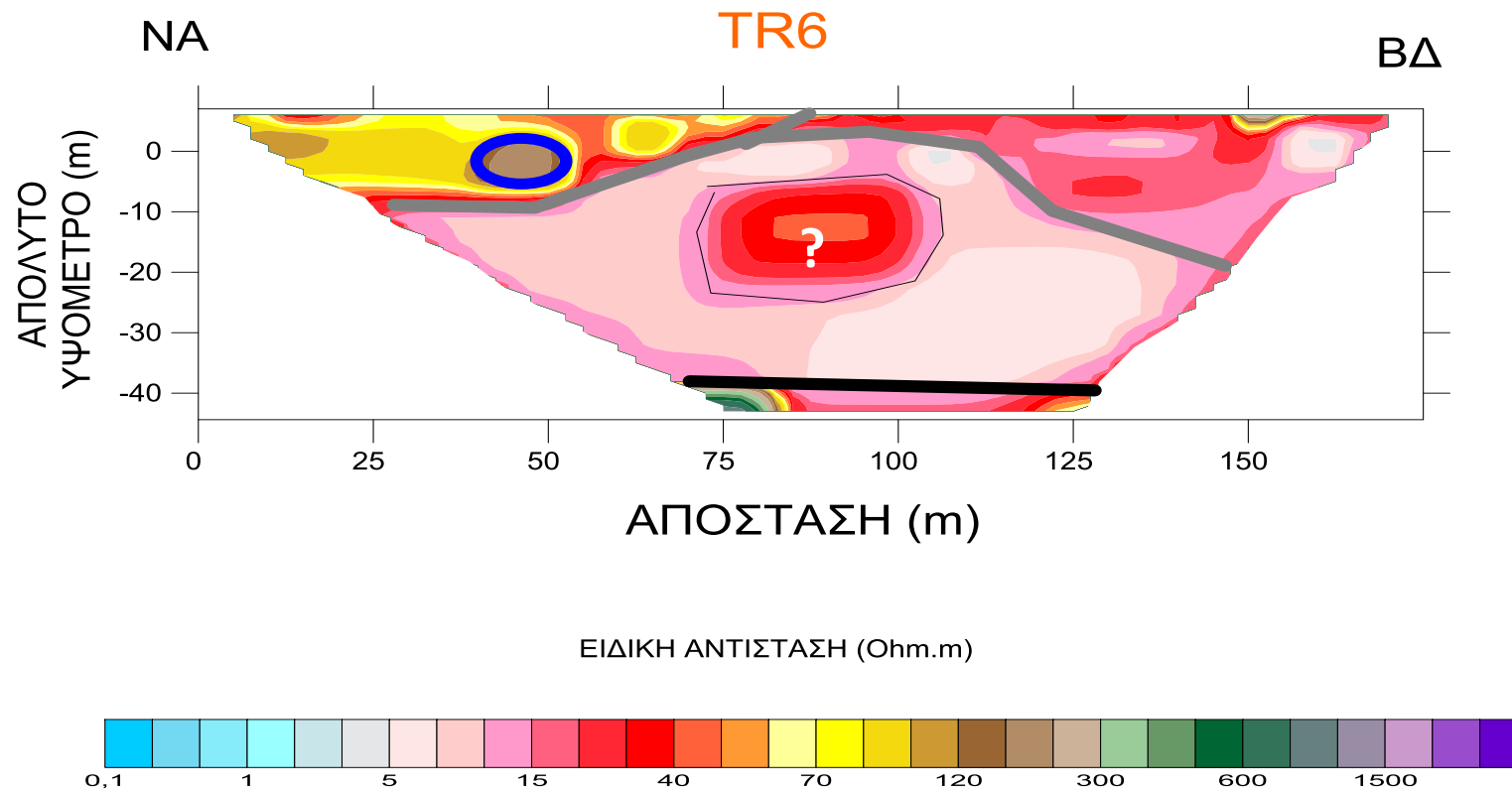


Σχήμα 5.24: Η γεωηλεκτρική τομή TR5 με προσανατολισμό ΒΑ – ΝΔ

## Σχολιασμός της γεωηλεκτρικής τομής TR5

- Κατά μήκος της τομής αυτής, παρατηρούμε ένα επιφανειακό στρώμα υψηλών ειδικών αντιστάσεων. Βάσει γεωλογικών και γεωμορφολογικών στοιχείων που διαθέτουμε για την περιοχή, οι υψηλές τιμές αυτές οφείλονται στα αδρομερή επιφανειακά υλικά, ως αποτέλεσμα ποταμοχειμάρριων αποθέσεων.
- Βαθύτερα, παρουσιάζονται γενικά χαμηλότερες τιμές ειδικών αντιστάσεων, οι οποίες πιθανά οφείλονται στην ύπαρξη υφάλμυρου νερού σε αλλουβιακό σχηματισμό. Στο ευρύτερο αυτό στρώμα, εντοπίζονται και περιοχές με ακόμη χαμηλότερες τιμές ειδικών αντιστάσεων. Τέτοιες περιοχές εντοπίζονται κυρίως προς τη ΒΑ πλευρά της συγκεκριμένης τομής, και στα βάθη από τα 0 μέτρα έως τα 10 μέτρα και από τα 20 μέτρα έως τα 40μέτρα.
- Από τα 10 μέτρα έως τα 20 μέτρα σε βάθος και μέχρι τα 110 μέτρα ΝΔ της τομής, εντοπίζεται ένα στρώμα με σχετικά χαμηλές τιμές ειδικών αντιστάσεων οι οποίες οφείλονται στο φυλλιτικό κάλυμμα.
- Από τα 20 μέτρα μέχρι και τα 40 μέτρα βάθος, παρουσιάζεται ένα στρώμα με πολύ χαμηλές τιμές ειδικών αντιστάσεων. Οι τιμές αυτές πιθανά να οφείλονται στην ύπαρξη υφάλμυρου νερού μέσα στον καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο, δημιουργώντας έτσι ένα δευτερογενές υδροφόρο σύστημα.
- Ακόμη βαθύτερα, από τα 40 μέτρα και κάτω, παρουσιάζονται πολύ υψηλές τιμές ειδικών αντιστάσεων. Οι αυξημένες αυτές τιμές οφείλονται στη συνεκτικότητα των πετρωμάτων στο βάθος αυτό και υποδηλώνουν την ύπαρξη του σχιστολίθου.

### 5.5.3.7 Τομή TR6



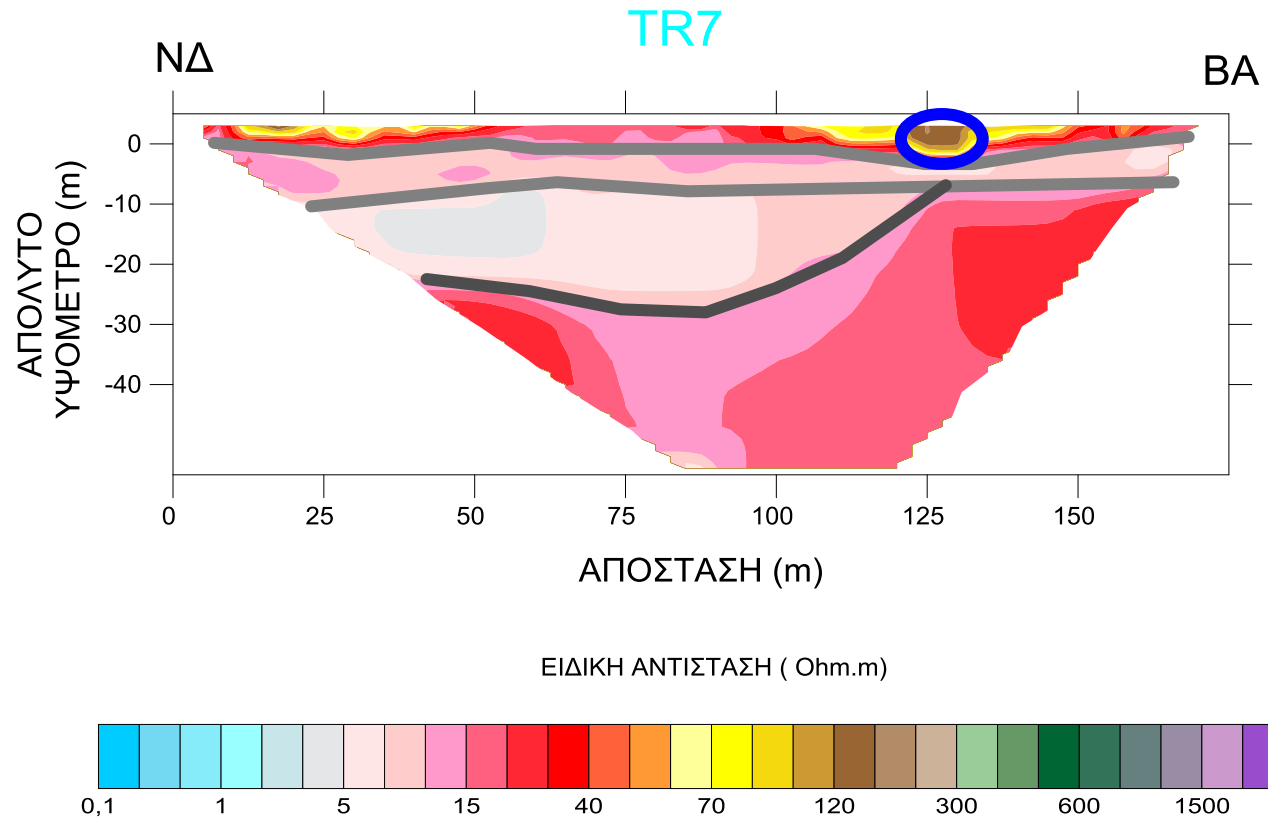
Σχήμα 5.25: Η γεωηλεκτρική τομή TR6 με προσανατολισμό ΝΑ – ΒΔ

## Σχολιασμός της γεωηλεκτρικής τομής TR6

- Αριστερά της τομής αυτής, μέχρι τα 90 μέτρα και σε βάθος περίπου 10 μέτρων από την επιφάνεια, παρατηρείται ένα στρώμα με μεγάλες ειδικές αντιστάσεις και μέσα σε αυτό το στρώμα παρουσιάζεται και μια περιοχή με ακόμα μεγαλύτερες τιμές ειδικών αντιστάσεων. Σύμφωνα με τα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής αυτής, οι χαμηλές αυτές τιμές οφείλονται στην ύπαρξη αδρομερών υλικών ως ποταμοχειμάρριες αποθέσεις της παλαιοκοίτης του ποταμού. Πιθανότατα, η περιοχή με τις ακόμα μεγαλύτερες τιμές ειδικών αντιστάσεων να οφείλεται στην ύπαρξη κάποιων αρχαίων τοιχίων, όπως αντίστοιχα έχουν εντοπιστεί στην ευρύτερη περιοχή. Από τα 80 μέτρα της τομής, μέχρι και το τέλος της παρουσιάζονται χαμηλότερες ειδικές αντιστάσεις. Αυτή η περιοχή, επίσης αποτελείται από επιφανειακούς αλλουβιακούς σχηματισμούς, αδρομερούς σύστασης.
- Από τα 10 μέτρα έως και τα 40 μέτρα βάθος, παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές ειδικών αντιστάσεων. Ο σχηματισμός αυτός, βάσει των γεωλογικών δεδομένων, πιθανά να είναι ασβεστόλιθος. Οι χαμηλές αυτές τιμές που εντοπίζονται, οφείλονται στην ύπαρξη δευτερογενούς υδροφόρου συστήματος με τη διείσδυση υφάλμυρου νερού, το οποίο φιλοξενείται στις διακλάσεις του ασβεστόλιθου.
- Στο κέντρο περίπου της τομής και σε βάθος 10 με 25 μέτρα, εντοπίζεται μια περιοχή σχετικά υψηλών τιμών ειδικής αντίστασης, η οποία πιθανά να αποτελεί άνοιγμα αρχαίας μεταλλευτικής στοάς, πληρωμένης με αργιλικό υλικό.
- Βαθύτερα, από τα 40 μέτρα και μέχρι το τέλος της τομής παρατηρούμε μεγάλες τιμές ειδικών αντιστάσεων. Οι αυξημένες αυτές τιμές οφείλονται στη συνεκτικότητα των πετρωμάτων στο βάθος αυτό και υποδηλώνουν την ύπαρξη σχιστολίθου.



### 5.5.3.8 Τομή TR7

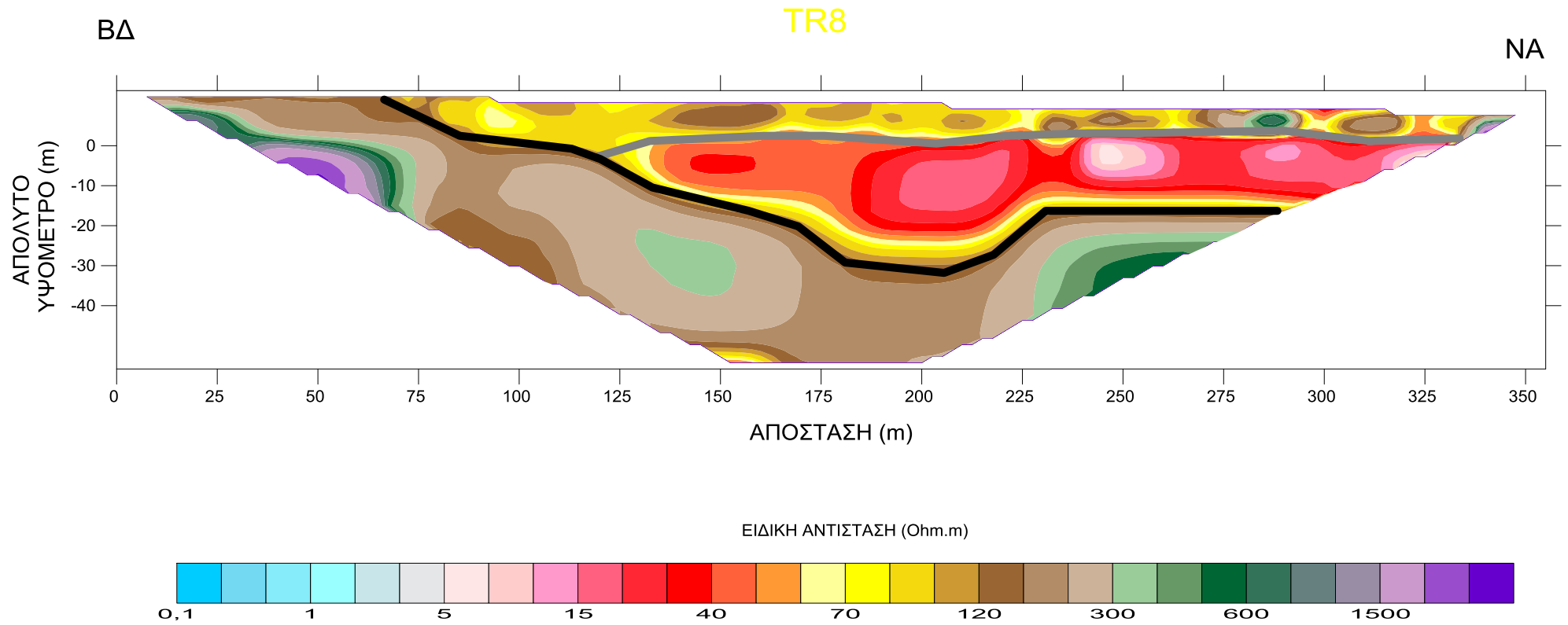


Σχήμα 5.26: Η γεωηλεκτρική τομή TR7 με προσανατολισμό ΝΔ – ΒΑ

## Σχολιασμός της γεωηλεκτρικής τομής TR7

- Αρχικά, παρατηρούμε ότι το επιφανειακό στρώμα, το οποίο παρουσιάζει αυξημένες τιμές ειδικών αντιστάσεων, εκτείνεται σε όλο το μήκος της γεωηλεκτρικής τομής. Βάσει γεωλογικών στοιχείων της συγκεκριμένης περιοχής, οι τιμές αυτές οφείλονται στην ύπαρξη αδρομερών υλικών, τα οποία αποτελούν έναν αλλουβιακό σχηματισμό. Στο επιφανειακό αυτό στρώμα και προς την ΒΑ πλευρά της τομής, εντοπίζεται μια περιοχή με ακόμα μεγαλύτερες τιμές ειδικών αντιστάσεων. Πιθανότατα, η υποπεριοχή αυτή να οφείλεται στην ύπαρξη κάποιων αρχαίων τοιχείων, όπως αντίστοιχα έχουν εντοπιστεί στην ευρύτερη περιοχή.
- Στη συνέχεια, από τα 0 μέτρα έως τα 10 μέτρα βάθος παρατηρούμε χαμηλές τιμές ειδικών αντιστάσεων. Σύμφωνα με τα γεωλογικά στοιχεία, ο σχηματισμός αυτός είναι σχετικά αδρομερής, με πιθανή παρουσία υφάλμυρου νερού. Ο συγκεκριμένος σχηματισμός εκτείνεται σε όλο το μήκος της τομής.
- Βαθύτερα, μέχρι τα 25 μέτρα βάθος και μέχρι τα πρώτα 125 μέτρα της γεωηλεκτρικής τομής, εντοπίζεται ένας σχηματισμός με επίσης χαμηλές τιμές ειδικών αντιστάσεων. Οι χαμηλές αυτές τιμές, πιθανά να οφείλονται στη διείσδυση υφάλμυρου νερού μέσα στις διακλάσεις του ασβεστόλιθου, δημιουργώντας έτσι ένα δευτερογενές υδροφόρο σύστημα.
- Το τελευταίο στρώμα που εμφανίζεται στην τομή, παρατηρούμε ότι παρουσιάζει μέσες ειδικές αντιστάσεις. Σύμφωνα με τα διαθέσιμα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής, ο σχηματισμός αυτός είναι πιθανά σχιστόλιθος.

### 5.5.3.9 Τομή TR8



Σχήμα 5.27: Η γεωηλεκτρική τομή TR8 με προσανατολισμό ΒΔ – ΝΑ

### Σχολιασμός της γεωηλεκτρικής τομής TR8

- Αρχικά, από τα 70 μέτρα της τομής μέχρι και το τέλος της, παρουσιάζεται ένα επιφανειακό στρώμα με πολύ υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης, με πάχος περίπου 10 μέτρα. Σύμφωνα με γεωλογικά στοιχεία, το στρώμα αυτό αποτελείται από αδρομερή υλικά ποταμοχειμάρριας προέλευσης.
- Βαθύτερα, παρατηρείται ένα στρώμα χαμηλότερων ειδικών αντιστάσεων. Ο σχηματισμός αυτός εντοπίζεται από τα 125 μέτρα της τομής μέχρι και το τέλος της και σε βάθος από έως τα 30 μέτρα από το 0 απόλυτο υψόμετρο. Σύμφωνα με τα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής, ο σχηματισμός αυτός είναι αργιλικής σύστασης και αποτελεί το φυλλιτικό κάλυμμα.
- Το τελευταίο στρώμα που εντοπίζεται βαθύτερα στην περιοχή αλλά και επιφανειακά προς τη ΒΔ πλευρά της τομής, παρουσιάζει πολύ υψηλές τιμές ειδικών αντιστάσεων. Βάσει γεωλογικών στοιχείων, ο σχηματισμός αυτός είναι συμπαγής, πιθανά σχιστόλιθος ή ανώτερο μάρμαρο.

#### 5.5.4 Συμπεράσματα

Από την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο, μπορούμε να προσδιορίσουμε την κατανομή της αγωγιμότητας στα επιφανειακά χαλαρά ιζήματα της περιοχής έρευνας, καθώς το μέγιστο συνολικό βάθος που μπορούμε να διασκοπήσουμε με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι τα 6 μέτρα από την επιφάνεια της γης. Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος, δεν επικεντρώνεται στον εντοπισμό συγκεκριμένων δομών, αλλά αποτυπώνει με ευκολία την ευρύτερη στρωματογραφία της περιοχής.

Με τη βοήθεια του ρυμουλκούμενου οχήματος, που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, με τα ηλεκτρομαγνητικά όργανα CMD4 και CMD2, πραγματοποιήθηκε η κάλυψη του μεγαλύτερου μέρους της κοιλάδας του Θορικού, σε χρονικό διάστημα δύο μόνο ημερών. Πρόκειται δηλαδή, για την κάλυψη μιας πολύ μεγάλης περιοχής με φυσικό ανάγλυφο και απουσία ασφαλτόστρωτων δρόμων, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Το γεγονός αυτό καθιστά ανέφικτη την πραγματοποίηση των μετρήσεων από έναν χειριστή του οργάνου, χωρίς την συμβολή του ρυμουλκούμενου καροτσιού.

Οι ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για δύο βάθη συνολικής διασκόπησης, ένα πιο επιφανειακό (3 μέτρα) και ένα σχετικά μεγαλύτερο (6 μέτρα συνολικό βάθος διασκόπησης). Με την πραγματοποίηση των μετρήσεων στα δύο αυτά διαφορετικά βάθη, μπορούμε να οδηγηθούμε πιο εύκολα σε συμπεράσματα σχετικά με την μεταβολή της κοκκομετρίας αλλά και την ύπαρξη υφαλμύρισης, καθώς αυτά τα στοιχεία αποτελούν τις κύριες παραμέτρους για την μεταβολή της αγωγιμότητας στην συγκεκριμένη περίπτωση.

Για την ακριβέστερη αποτύπωση των αγωγιμοτήτων, δημιουργήθηκαν χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας, με περιορισμό των τιμών της μαγνητικής επιδεκτικότητας. Με αυτό τον τρόπο, όσο αυξάνεται ο περιορισμός, τόσο περιορίζονται στο ελάχιστο οι αυξημένες τιμές αγωγιμότητας που οφείλονται σε ανθρωπογενή δραστηριότητα και αποτυπώνονται μόνο όσες οφείλονται στην υφαλμύριση και τη μεταβολή της κοκκομετρίας των σχηματισμών.

Καλύτερα αποτελέσματα εμφανίζει ο χάρτης που προκύπτει από την διαφορά των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, βάσει και του περιορισμού των τιμών της

μαγνητικής επιδεκτικότητας να είναι μικρότερες των 5 ppt (**Σχήμα 5.16γ**). Σε αυτόν τον χάρτη παρουσιάζονται με ακρίβεια οι αυξημένες τιμές αγωγιμότητας, εντοπίζοντας με αυτό τον τρόπο το μέτωπο της υφαλμύρισης. Διακρίνονται δύο περιοχές με αυξημένες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η περιοχή με τις μεγαλύτερες τιμές βρίσκεται ΝΔ του χάρτη, ενώ μια δεύτερη περιοχή εντοπίζεται πιο κεντρικά και νότια. Οι σχετικά αυξημένες αυτές τιμές αγωγιμοτήτων σε αυτή την περιοχή, οφείλονται σε υφαλμύριση του αλλουβιακού σχηματισμού, ο οποίος τροφοδοτείται με υφάλμυρο νερό που προκύπτει από τα νερά χειμάρρου που διασχίζουν επιφανειακά μάρμαρα βορειότερα στο χάρτη, δίπλα από το λόφο Βελατούρι. Η πληροφορία αυτή, προκύπτει από την ανάλυση των υδρογεωλογικών δεδομένων της περιοχής, από την κατανομή των υδραυλικών φορτίων του πιεζομετρικού χάρτη (**Σχήμα 5.6**).

Στη συνέχεια, με την ηλεκτρική μέθοδο της ειδικής αντίστασης, είναι εφικτή η αποτύπωση της στρωματογραφίας, η λεπτομερής δηλαδή εναλλαγή των σχηματισμών. Όπως έχει προαναφερθεί, ένας από τους στόχους της συγκεκριμένης έρευνας, είναι και ο εντοπισμός του μετώπου της υφαλμύρισης. Για το λόγο αυτό, επιχειρήθηκε η εφαρμογή τόσο της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, όσο και της μεθόδου της επαγόμενης πολικότητας. Ως αποτέλεσμα της εφαρμογής και των δύο αυτών μεθόδων, θα ήταν ο διαχωρισμός των χαμηλών τιμών της ειδικής αντίστασης που οφείλονται στο φαινόμενο της υφαλμύρισης, από τις μειωμένες τιμές λόγω ύπαρξης αγωγίμων σχηματισμών. Ωστόσο, η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας δεν κρίθηκε επιτυχής. Αυτό πιθανά οφείλεται στους υφιστάμενους γεωλογικούς σχηματισμούς ή ακόμη σε ελλειπείς παραμέτρους μετρήσεων που τέθηκαν κατά τη διάρκεια των τομογραφιών.

Με τη βοήθεια της συγκεκριμένης μεθόδου, έχουμε τη δυνατότητα για λήψη δεδομένων σε πολύ μεγαλύτερα βάθη διασκόπησης, σε σύγκριση με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο. Λαμβάνοντας υπόψιν τα γεωλογικά δεδομένα που διαθέτουμε για την περιοχή και βάσει των γεωηλεκτρικών τομογραφιών, είμαστε σε θέση να προτείνουμε την αποτύπωση της στρωματογραφίας της συγκεκριμένης περιοχής.

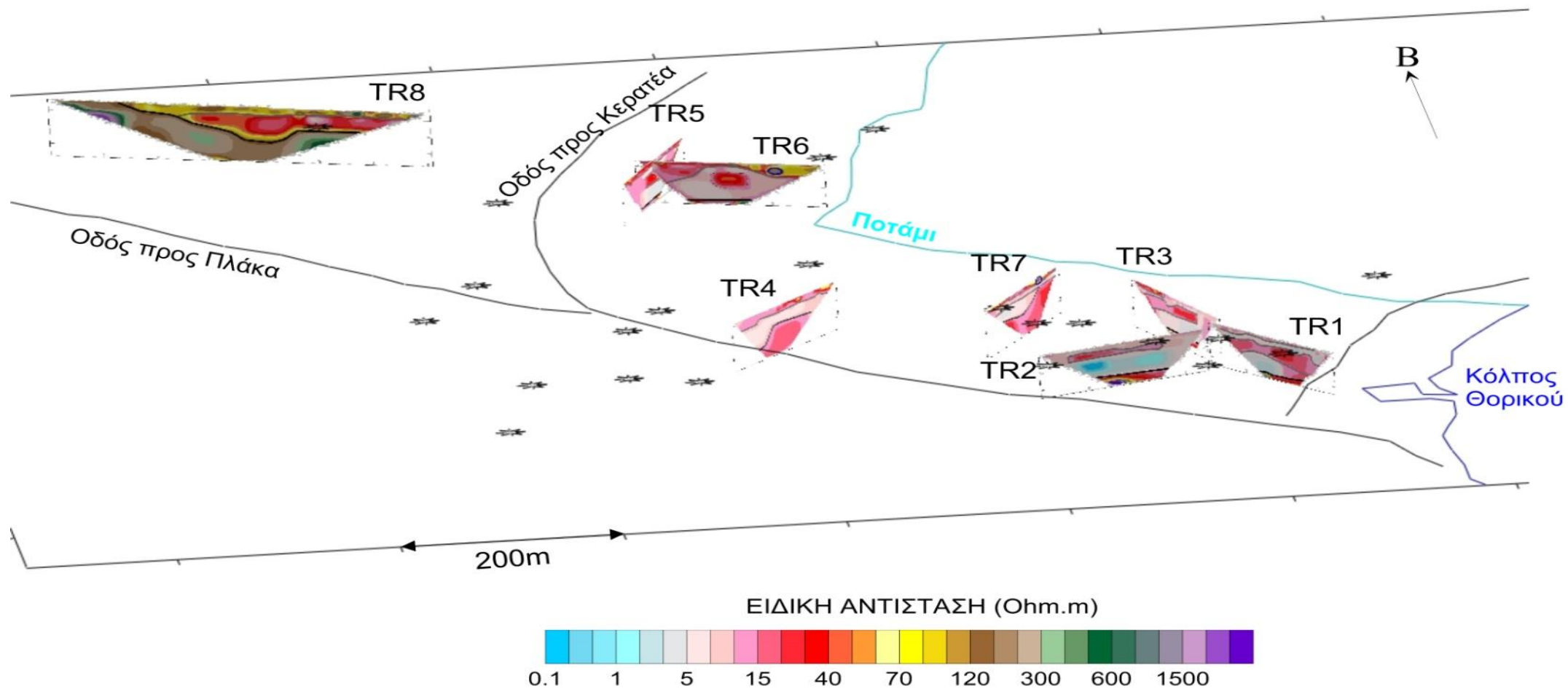
Ο σχηματισμός που συναντάται επιφανειακά σε όλες τις τομές είναι ένας αλλουβιακός σχηματισμός (μέσο πάχος περίπου 10 μέτρα), ο οποίος παρουσιάζει

μέσες έως και υψηλές ειδικές αντιστάσεις, λόγω της αδρομερούς του σύστασης. Σε κάποιες τομές, στον αλλουβιακό αυτό σχηματισμό «φιλοξενείται» ένα πρώτο υδροφόρο σύστημα, το οποίο και παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές ειδικών αντιστάσεων, ως πιο αγώγιμο στρώμα λόγω της ύπαρξης υφάλμυρου νερού. Βαθύτερα, εντοπίζεται το λεγόμενο φυλλιτικό κάλυμμα (μέσο πάχος 10 – 25 μέτρα), το οποίο παρουσιάζει χαμηλές έως μέσες τιμές ειδικής αντίστασης. Το φυλλιτικό κάλυμμα αποτελεί ένα αποσαθρωμένο στρώμα, το οποίο παρουσιάζει ενστρώσεις ασβεστολίθου, σχιστολίθου και αργίλου. Αμέσως μετά, σε μεγαλύτερο συνήθως βάθος, εντοπίζεται το ανώτερο μάρμαρο, το οποίο είναι επίσης ένα αποσαθρωμένο στρώμα όπως και το προηγούμενο, αλλά ασβεστολίθου. Λόγω των διακλάσεων του σχηματισμού αυτού, δημιουργείται ένα δεύτερο υδροφόρο σύστημα. Τέλος, σε βάθος συνήθως περίπου από τα 40 μέτρα και κάτω, αποτυπώνεται η ύπαρξη συμπαγούς σχιστολίθου.

Παρατηρούμε ότι οι τομογραφίες που πραγματοποιήθηκαν πιο κοντά στην ακτογραμμή (**Σχήμα 5.28**), παρουσιάζουν μια πρώτη υφαλμύριση μέσα στον αλλουβιακό σχηματισμό, ενώ οι υπόλοιπες τομές που είναι τοποθετημένες πιο βόρεια στην κοιλάδα του Θορικού παρουσιάζουν υφαλμύριση κυρίως στο διακλασμένο στρώμα του ανώτερου μαρμάρου. Η ανύψωση του ασβεστολίθου προς το δυτικό μέρος της κοιλάδας τροφοδοτεί, επομένως, τους ανώτερους σχηματισμούς, δηλαδή τα αλλουβιακά, με υφαλμύριση. Το φαινόμενο αυτό εντείνεται κυρίως λόγω της υπεράντλησης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, που βρίσκεται μέσα στον ασβεστολιθικό σχηματισμό.

Διαπιστώνεται ότι η ανάλυση της στρωματογραφίας αποτελεί πολύ δύσκολο κομμάτι, καθώς η ανύψωση ή η βύθιση κάποιων στρωμάτων, δεν επιτρέπει τον εντοπισμό σχηματισμών που σε άλλες περιοχές εντοπίζονταν ξεκάθαρα. Στο γεγονός αυτό και συγκεκριμένα στην ανύψωση του ασβεστολιθικού στρώματος, οφείλεται ότι στις τομές TR4, TR6, TR7 δεν φαίνεται η ύπαρξη του φυλλιτικού καλύμματος.

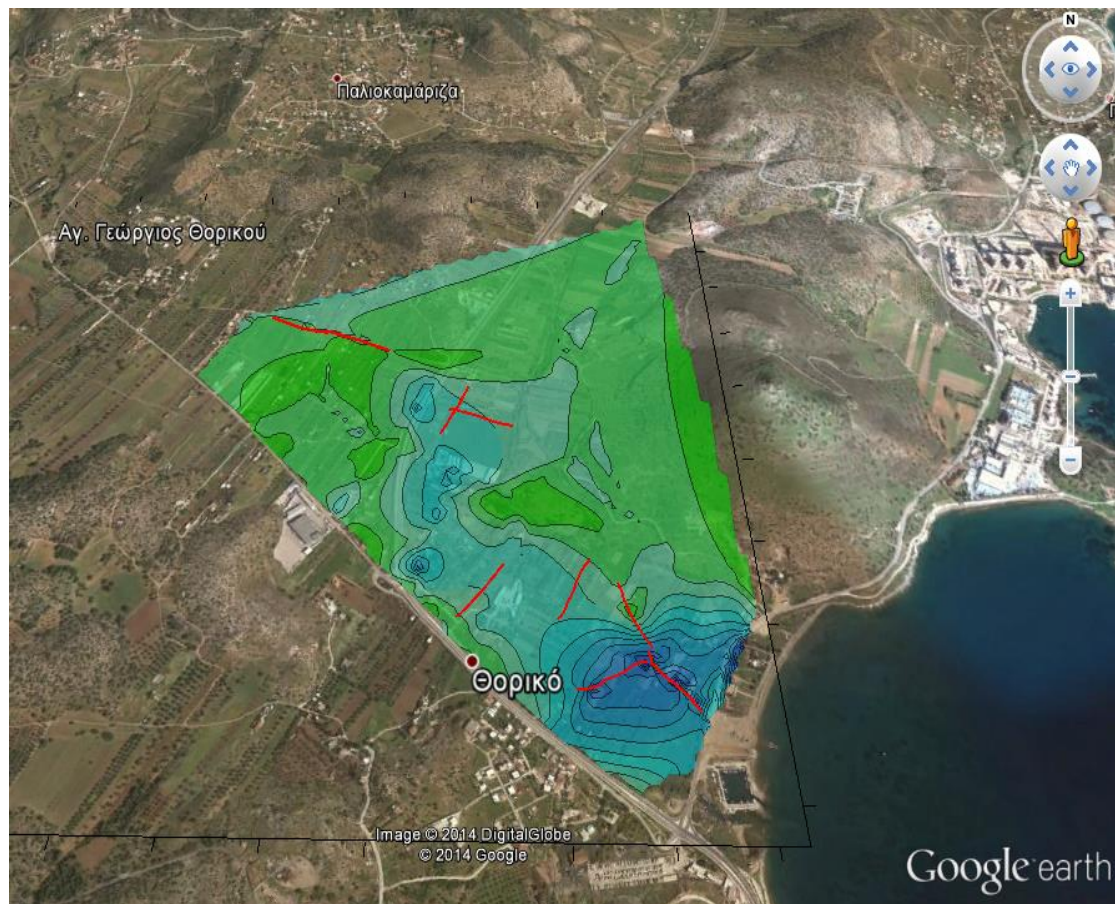
Στο **Σχήμα 5.29** φαίνονται ξεκάθαρα οι περιοχές της κοιλάδας του Θορικού, που είναι επηρεασμένες από την υφαλμύριση. Εκτός από την παράκτια περιοχή υφαλμύρισης, διακρίνεται και μια δευτερεύουσα περιοχή, με εξίσου αυξημένες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας.



Σχήμα 5.28: Τρισδιάστατη απεικόνιση (3D) των 8 γεηλεκτρικών τομών που πραγματοποιήθηκαν στην κοιλάδα του Θορικού



Όπως προέκυψε και από την ανάλυση των γεωηλεκτρικών τομών, στις περιοχές όπου διαπιστώνεται ανύψωση του στρώματος του ασβεστολίθου, διευκολύνεται η τροφοδοσία των αλλουβιακών σχηματισμών με υφάλμυρο νερό. Επομένως, η περιοχή δευτερογενούς υφαλμύρινης, που προκύπτει από τον ηλεκτρομαγνητικό χάρτη, ταυτίζεται με την ανύψωση του ασβεστολίθου στην περιοχή αυτή, που προκύπτει από τις γεωηλεκτρικές τομογραφίες.



*Σχήμα 5.29 : Χάρτης διαφοράς της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τα δύο βάθη διασκόπησης όπου φαίνονται η τοποθεσία των γεωηλεκτρικών τομών που πραγματοποιήθηκαν.*

Ο συνδυασμός της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου και της ηλεκτρικής με τη μέθοδο της ειδικής αντίστασης, σχηματίζουν βασίμη πληροφορία για την ευρύτερη στρωματογραφία, το μέτωπο της υφαλμύρινης, αλλά και τα για τα επίπεδα στα οποία αυτή εμφανίζεται.

### 5.5.5 Γενικός Σχολιασμός

Η έρευνα στην περιοχή του Θορικού, για τον εντοπισμό στρωματογραφίας και του μετώπου της υφαλμύρισης, μέσα από την εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων προϋπόθετε την αρχική μελέτη της γεωλογίας και αρχαιολογίας της περιοχής. Σε αρχικό στάδιο, έπρεπε να κατανοήσουμε τους γεωλογικούς σχηματισμούς από τους οποίους αποτελείται το υπόβαθρο της ευρύτερης περιοχής. Η γνώση της ιστορίας της και τα αρχαιολογικά ευρήματα που διασώζονται μας βοήθησαν στη διαμόρφωση μιας πρώτης εικόνας της υπό μελέτη περιοχής.

Στη συνέχεια, έπρεπε να προχωρήσουμε στο σχεδιασμό της έρευνας και στην επιλογή των κατάλληλων μεθόδων για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Γνωρίζοντας το πρόβλημα που θέλαμε να επιλύσουμε και τη μεγάλη έκταση της περιοχής μας, ανατρέξαμε στη διεθνή βιβλιογραφία για τη μελέτη αντίστοιχων περιπτώσεων έρευνας. Στο κεφάλαιο 3 του παρόντος πονήματος, αναφέρουμε τις οκτώ πιο αντιπροσωπευτικές μελέτες εντοπισμού υφαλμύρισης και στρωματογραφίας.

Η περιοχή Στύλος, στο φαράγγι Αποκορώνου στα Χανιά, αποτελεί μια μελέτη περίπτωσης με έντονο ενδιαφέρον υφαλμύρισης, γι' αυτό και πολλές έρευνες έχουν γίνει με την εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων. Η ηλεκτρική τομογραφία με διάταξη Wenner, Schlumberger και Dipole-Dipole είναι αυτή που έχει δώσει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Η διάταξη Wenner-Schlumberger παρουσιάζει ευαισθησία σε μεταβολές της ειδικής αντίστασης με το βάθος και δίνει πολύτιμες πληροφορίες για τη στρωματογραφία του υπεδάφους. Από την άλλη, με τη Dipole-Dipole διάταξη, εντοπίζονται καρστικές δομές που επιτρέπουν τη διείσδυση θαλασσινού νερού, εξαιτίας της μεγάλης ευαισθησίας της στις πλευρικές μεταβολές της ειδικής αντίστασης.

Επιπρόσθετα, στην περιοχή έχει γίνει δοκιμαστική άντληση σε υδρογεώτρηση και παράλληλη εφαρμογή ηλεκτρικής τομογραφίας για τη μελέτη της υφαλμύρισης, η οποία δεν έχει δώσει αποτελέσματα μεταβολής του υπεδάφους έπειτα από την εκτέλεση της αντλητικής δοκιμής. Παρουσιάστηκε, παρ'όλα αυτά, μείωση των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κοντά στη θέση της υδρογεώτρησης.

Τέλος, η εφαρμογή της σεισμικής τομογραφίας στην περιοχή Στύλος, δίνει μια ευρύτερη εικόνα της στρωματογραφίας, αλλά όχι τόσο λεπτομερή παρουσίαση των δομών όπως η ηλεκτρική τομογραφία, η οποία διακρίνει σχηματισμούς σε μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης.

Η διασκόπηση της κοιλάδας Oued Laou στο Μαρόκο, με την ηλεκτρομαγνητική γεωφυσική μέθοδο και την ηλεκτρική τομογραφία, είναι ακόμη μία μελέτη περίπτωσης, όπου η ηλεκτρική τομογραφία δίνει πολύ καλά αποτελέσματα. Διακρίνονται τρία στρώματα με έντονη εναλλαγή τιμών ειδικής αντίστασης, τα οποία καθιστούν εύκολο το γεωλογικό προσδιορισμό τους και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους. Το στρώμα με την πολύ μικρή τιμή ειδικής αντίστασης, αποδίδεται σε αργιλοαμμώδη σύσταση κορεσμένο με υφάλμυρο νερό. Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος διασκόπησης, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό ποιοτικών χαρτών εναλλαγής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Στις μελέτες στη Βόρεια Ουαλία και στην Ουάσινγκτον των ΗΠΑ, πραγματοποιείται ηλεκτρομαγνητική μέθοδος διασκόπησης για χαρτογράφηση και οριοθέτηση της διεπιφάνειας του καθαρού νερού και της αλατότητας αντίστοιχα. Τα ηλεκτρομαγνητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα EM-38 και EM-31 για βάθη διασκόπησης επιφανειακά αλλά και βαθύτερα.

Όπως διαπιστώνουμε, σχεδόν στην πλειοψηφία των περιπτώσεων που έχει εφαρμοστεί ηλεκτρομαγνητική μέθοδος διασκόπησης, γίνεται χρήση δύο οργάνων για έρευνα σε διαφορετικά βάθη. Την ιδέα για το τροχήλατο ρυμουλκούμενο όχημα που χρησιμοποιήσαμε στην κοιλάδα του Θορικού, προήλθε από την εξέταση της μελέτης που έγινε στη Kamarooka, στην Αυστραλία, για τη χαρτογράφηση της κατανομής της υφαλμύρινης. Χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία η σάρωση της περιοχής με 4τροχο αυτοκινούμενο όχημα. Επίσης, στο Shelford του Ηνωμένου Βασιλείου χρησιμοποιήθηκε κινούμενη πλατφόρμα για τον εντοπισμό σημείων πιθανής εξόρυξης αδρανών υλικών. Και στις δύο περιπτώσεις, τα οχήματα έφεραν τον εξοπλισμό μέτρησης.

Επομένως, ύστερα από μελέτη διαφόρων περιπτώσεων σε συνδυασμό με τη δυνατότητα εφαρμογής των μεθόδων στην περιοχή του Θορικού, καταλήξαμε στις γεωφυσικές μεθόδους που θα εφαρμόζαμε στην παρούσα έρευνα για τον εντοπισμό της υφαλμύρινης και της στρωματογραφίας. Καταλληλότερες κρίθηκαν, η

ηλεκτρομαγνητική μέθοδος και η εφαρμογή ηλεκτρικής τομογραφίας με τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της επαγόμενης πόλωσης.

Στόχος μας ήταν, μια γρήγορη κάλυψη της περιοχής, η οποία καταλάμβανε έκταση 3.500 στρεμμάτων περίπου, για μια ευρύτερη εικόνα του μετώπου της υφαλμύρισης και της κατανομής των αγωγιμοτήτων. Για την πραγματοποίηση τέτοιων μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε ένα αυτοσχέδιο καρότσι που έφερε το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης. Δεδομένου όμως του γεγονότος ότι τέτοια εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου δεν είχε υπάρξει στο παρελθόν από το εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της σχολής μας, έπρεπε πρώτα να ελεγχθεί ότι λαμβάνονται σωστά οι μετρήσεις με τη διάταξη αυτή, πριν προχωρήσουμε σε εφαρμογή της στην ύπαιθρο.

Για το λόγο αυτό, δοκιμάσαμε το καρότσι σε ένα ήπιο αστικό περιβάλλον με ανθρωπογενή δραστηριότητα, όπως αυτό της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Τα αποτελέσματα τα οποία λήφθηκαν ήταν πολύ καλά για μια πρώτη προσπάθεια λειτουργίας του οχήματος. Οι μετρήσεις εμφάνιζαν τοπικά αυξημένες τιμές, λόγω της παρεμβολής της ανθρωπογενούς δραστηριότητας, αλλά ήταν εύκολα διακριτές στην επεξεργασία τους στο πρόγραμμα Grapher, και οι μεταβολές αυτές μπορούσαν να εξαλειφθούν με μια απλή διαδικασία.

Επομένως, προχωρήσαμε στην εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρομαγνητικής διασκόπησης με τη βοήθεια του καροτσιού στην κοιλάδα του Θορικού. Εδώ, το περιβάλλον ήταν πιο δύσκολο λόγω των ανωμαλιών του εδάφους. Η προσπέλαση καθορίστηκε από τη δυνατότητα πρόσβασης του μηχανήματος σε δρόμους που υπήρχαν στην αγροτική περιοχή. Εκπληκτικό αποτελεί το γεγονός, ότι ο αρχικός σχεδιασμός του μεταφερόμενου οχήματος ήταν για εφαρμογή του σε αστικό περιβάλλον και απέδωσε πάρα πολύ καλά στην ύπαιθρο.

Τα αποτελέσματα τα οποία λήφθηκαν και από τα δύο ηλεκτρομαγνητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν (CMD4 και CMD2), για συνολικά βάθη διασκόπησης 6 και 3 μέτρων, μας έδωσαν την ευρύτερη κατανομή των αγωγιμοτήτων και της πιθανής υφαλμύρισης. Διακρίθηκαν δύο περιοχές επηρεασμένες από την υφαλμύριση. Η πρώτη, η οποία εμφάνιζε πολύ υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας, εντοπίστηκε σχετικά παράκτια, ενώ η δεύτερη περιοχή εντοπίστηκε βορειότερα της κοιλάδας. Σε αυτήν, παρουσιάστηκαν εξίσου υψηλές τιμές

ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Για να εξακριβώσουμε τα αποτελέσματα, να γίνει μια καλή αποτύπωση της στρωματογραφίας και των υφαλμυρισμένων δομών, προχωρήσαμε σε ηλεκτρικές τομογραφίες με τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της επαγόμενης πόλωσης.

Τα σημεία όπου εφαρμόστηκαν οι τομογραφίες αυτές, καθορίστηκαν σε μεγάλο βαθμό από τα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, καθώς και της δυνατότητας εφαρμογής στην ύπαιθρο. Σε γενικό βαθμό, έγινε προσπάθεια να καλύψουμε όσο το δυνατόν περισσότερη έκταση από την περιοχή, από την πλευρά της ακτογραμμής του κόλπου του Θορικού έως και τη βορειοδυτική πλευρά του λόφου Βελατούρι. Η διάταξη που εφαρμόστηκε ήταν η Pole-Dipole, με εξαίρεση τη μία τομή, όπου εφαρμόστηκε η διάταξη Schlumberger. Στην επιλογή αυτή, καταλήξαμε θέλοντας να εντοπίσουμε τις πλευρικές ανομοιογένειες του καρστικοποιημένου ασβεστόλιθου, ενώ στην 8<sup>η</sup> τομή, που τοποθετείται μακριά από την ακτογραμμή, όπου η υφαλμύριση δεν έχει προχωρήσει, θέλαμε να διερευνήσουμε τη στρωματογραφία.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, μας έδειξαν σε πολύ καλό βαθμό την κατανομή των στρωμάτων, με διαφοροποίηση των τιμών της ειδικής αντίστασης. Η γεωλογική ερμηνεία των σχηματισμών, αποτέλεσε το πιο δύσκολο κομμάτι της έρευνας, για την οποία χρειάστηκε η συνεργασία των κλάδων της γεωλογίας, της υδρογεωλογίας και της γεωφυσικής για την κατανόηση των δομών του υπεδάφους που παρουσιάζονται στην περιοχή.

Η συνολική απεικόνιση των γεωηλεκτρικών τομών σε τρισδιάστατο χάρτη, συνέβαλε στην ευρύτερη κατανόηση και ερμηνεία της αλληλουχίας των στρωμάτων της περιοχής. Τα αποτελέσματα της γεωηλεκτρικής μεθόδου, τα οποία λήφθηκαν, συμβάδιζαν με τα αποτελέσματα των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων, που αφορούν την υφαλμύριση στους επιφανειακούς αλλουβιακούς σχηματισμούς. Επιπλέον, έδωσαν περαιτέρω πληροφόρηση για την ύπαρξη δευτερογενούς υφαλμυρισμένου υδροφόρου ορίζοντα στον καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο.

Παράλληλα με τις μετρήσεις ειδικής αντίστασης, έγιναν σε όλες τις τομές μετρήσεις επαγόμενης πολικότητας, με σκοπό να διαχωρίσουμε τους σχηματισμούς αργιλικής σύστασης από εκείνους που βρίσκεται το υφάλμυρο νερό. Δυστυχώς, οι

μετρήσεις αυτές δεν απέδωσαν όπως περιμέναμε και για αυτό δεν παρουσιάστηκαν στα αποτελέσματα της έρευνας.

Συγκριτικά αποτελέσματα των δύο γεωφυσικών μεθόδων που εφαρμόστηκαν, μπορούν να αναφερθούν μόνο μέχρι τα 6 μέτρα συνολικού βάθους διασκόπησης, καθώς αυτό είναι το μέγιστο βάθος που μπορεί να διασκοπήσει η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος στην περίπτωση μας. Ο ηλεκτρομαγνητικός χάρτης, ο οποίος παρουσιάζει με μεγαλύτερη ευκρίνεια το φαινόμενο της υφαλμύρινσης στην κοιλάδα του Θορικού, είναι αυτός της διαφοράς των αγωγιμοτήτων των 6 και 3 μέτρων συνολικού βάθους διασκόπησης. Ο χάρτης αυτός, ο οποίος εκφράζει τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας, παρουσιάζει κοινά σημεία με τις γεωηλεκτρικές τομογραφίες. Παρατηρείται δηλαδή ότι η περιοχή που βρίσκεται πιο κοντά στην ακτογραμμή παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας στον ηλεκτρομαγνητικό χάρτη και αντίστοιχα χαμηλότερες τιμές ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης στις τομογραφίες που εφαρμόστηκαν στην περιοχή αυτή. Στις περιοχές που βρίσκονται ΒΔ από την ακτογραμμή, συνεχίζει να παρουσιάζεται στον ηλεκτρομαγνητικό χάρτη, αλλά και στις γεωηλεκτρικές τομογραφίες, το φαινόμενο της υφαλμύρινσης, αλλά παρατηρείται μια αποκλιμάκωση των τιμών.

Κυρίως από τις γεωηλεκτρικές τομογραφίες, λόγω μεγαλύτερου βάθους διασκόπησης, σε συνδυασμό με τα υδρογεωλογικά και γεωμορφολογικά στοιχεία που διαθέτουμε για την περιοχή της έρευνάς μας, συμπεραίνουμε ότι υφίστανται δύο ξεχωριστοί υδροφόροι ορίζοντες. Ο πρώτος υδροφόρος ορίζοντας εντοπίζεται σχετικά επιφανειακά, σε βάθος μέχρι τα 15 μέτρα περίπου και αφορά υφαλμύριση σε πιο αδρομερείς σχηματισμούς. Ο δεύτερος υδροφόρος ορίζοντας εντοπίζεται σε μεγαλύτερο βάθος και αποτελεί υφαλμύριση καρστικοποιημένων δομών και πιο συγκεκριμένα του ανώτερου μαρμάρου. Το φαινόμενο των υφαλμυρισμένων σχηματισμών, οφείλεται είτε στη θαλάσσια διείσδυση, είτε στη τροφοδοσία των αλλουβιακών σχηματισμών από υφάλμυρα νερά που προέρχονται από τη διεπαφή τους με το επιφανειακά ανώτερο μάρμαρο.

Πιθανά, ένας σχεδιασμός με πιο πυκνό κάνναβο γεωηλεκτρικών τομών, να ήταν ικανός να δώσει πληρέστερη και ακριβέστερη αποτύπωση της ευρύτερης στρωματογραφίας, γεγονός το οποίο θα μπορούσε να θεωρηθεί ως το επόμενο βήμα ως προς της συνέχιση της δεδομένης έρευνας.

## Βιβλιογραφία

1. Αποστολόπουλος, Γ. (2008) «Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής», Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα.
2. Antonio Abel Gonzalez Carrasquilla and Emin Ulugergerli, (2006) «Evaluation of the Transient Electromagnetic Geophysical Method for Stratigraphic Mapping and Hydrogeological Delineation in Campos Basin, Brasil».
3. Βερβερέλης, Ε. (2008) «Εφαρμογή της Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας στον Αστικό Ιστό για τον Εντοπισμό Στρωματογραφίας και Πεπερασμένων Δομών», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
4. Hamdan, H. (2010) «Ανάπτυξη Τεχνικών Συνδυασμένης Επεξεργασίας Γεωφυσικών Δεδομένων (Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης και Ταχύτητας Διάδοσης των Σεισμικών Κυμάτων) για την Απεικόνιση της Υφαλμύρισης σε Παράκτιους Υδροφορείς», Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
5. Καραλής, Π. (2010) «Εφαρμογή Γεωφυσικών Μεθόδων για τον Εντοπισμό Ενταφιασμένων Αρχαιοτήτων στην Περιοχή της Κερατέας Αττικής», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
6. Κουμαντάκης, Ι. «Εμπειρίες από την αξιοποίηση παράκτιων καρστικών υδροφορέων, παραθαλάσσιων και υποθαλάσσιων πηγών», Μέρος του μαθηματος “Αξιοποίηση-Διαχείριση-Προστασία υπόγειων υδροφορέων”, Αθήνα 2007.
7. Κωσταρέλης, Κ. (2008) «Γεωηλεκτρική Διασκόπηση στην Περιοχή Στύλου Αποκορώνου Χανίων», Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
8. Λεονταράκης, Κ. (2011) «Γεωφυσικές Διασκοπήσεις Εντός Γεωτρήσεων και Σηράγγων», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
9. Λούης, Ι. (2003) «Εισαγωγή στη Γεωφυσική Έρευνα – Ηλεκτρικές Μέθοδοι Διασκόπησης», Σημειώσεις Πανεπιστημίου Αθηνών, Αθήνα.
10. Leech, C., (2008) «Development of a Multi-Sensor Exploration Equipment Platform for Shallow Geophysical Applications».
11. Μιχαλάκης, Ι. (2007) «Συμβολή της Ηλεκτρικής Τομογραφίας στην Παρακολούθηση της Υφαλμύρισης πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την

- Δοκιμή άντλησης στον Οικισμό Φαράγγι Αποκορώνου», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
12. Νάνου-Γιάνναρου, Α. «Υφαλμύρωση Παράκτιων Υδροφορέων», Πολιτικός Μηχανικός, Λέκτορας ΕΜΠ
  13. Παυλόπουλος, Κ. (1997) «Γεωμορφολογική Εξέλιξη της Νότιας Αττικής», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
  14. Πολυχρονοπούλου, Κ. (2005) «Αποτύπωση των Στρωμάτων του Υπεδάφους με τις Μεθόδους της Σεισμικής Διάθλασης και της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
  15. Stamatis G., Voudouris K. and Karefilakis F., (2000) «Groundwater Pollution by Heavymetals in Historical Mining Area of Lavrio, Attica, Greece».
  16. Syscal Pro, Iris Instruments, user manual.
  17. CMD Electromagnetic conductivity meter, GF Instruments, user manual vl.3.1.
  18. RES2DINV, 2D Resistivity and IP Inversion, (1995 – 2001), Εγχειρίδιο Χρήσης Λογισμικού, Version 3.4, Geotomo Software, Malaysia.
  19. Richard G. and Don Bennett, « Salinity Mapping Using Ground EM Systems in High Rainfall Agricultural Areas of Southwest WA».