



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**« Γεωφυσική έρευνα στην παράκτια ζώνη του Θορικού και
του λόφου Καβοδόκανου στο Λαύριο »**



Αντωνόπουλος Κωνσταντίνος

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Γ. ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις / /2016

Γ. Αποστολόπουλο, Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ,

Α. Καλλιώρα, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ,

Μ. Μενεγάκη, Επικ. Καθηγήτρια ΕΜΠ,

ΑΘΗΝΑ,

2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μέσα από αυτήν την διπλωματική εργασία μου δόθηκε η ευκαιρία να εμβαθύνω τις γνώσεις μου ως προς την γεωφυσική έρευνα. Το μεγαλύτερο και σημαντικότερο μέρος της εργασίας υλοποιήθηκε στην ύπαιθρο με τον απαραίτητο για τις μετρήσεις εξοπλισμό που διαθέτει η σχολή. Βλέποντας λοιπόν επί το έργο όλα όσα είχα μάθει σε θεωρητικό επίπεδο, μπόρεσα αφενός να εμπλουτίσω σε πολύ μεγάλο βαθμό τις γνώσεις μου κι αφετέρου να μάθω μικρά μυστικά τα οποία διευκολύνουν την έρευνα. Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους στάθηκαν αρωγοί για την εκπόνηση κι ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας κι ιδιαίτερα:

Τον κ. Αποστολόπουλο Γεώργιο, Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών κι επιβλέποντα της εργασίας, για το ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα το οποίο μου ανέθεσε και για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε για την ολοκλήρωσή του. Η καθοδήγησή του ήταν καθοριστικής σημασίας για την διεκπεραίωση της εργασίας. Θα ήθελα ακόμη να τον ευχαριστήσω θερμά διότι σε ένα απρόοπτο γεγονός, που συνέβη λίγο πριν την παρουσίαση της εργασίας, στάθηκε δίπλα μου.

Τον κ. Αμολοχίτη Γεώργιο, Γεωφυσικό και Ε.ΔΙ.Π. του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, για την συνεισφορά του στις μετρήσεις υπαίθρου και για την άψογη συνεργασία μας. Με την βοήθειά του και τις γνώσεις του έγινε εφικτή η γρήγορη και παράλληλα σωστή διεκπεραίωση των μετρήσεων.

Τον κ. Καλλιώρα Ανδρέα, Επίκουρο Καθηγητή της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών για την συνεισφορά του κατά την διάρκεια των μετρήσεων υπαίθρου και για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή της παρούσας εργασίας.

Την κ. Μενεγάκη Μαρία, Επίκουρη Καθηγήτρια της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών για την συμμετοχή της στην εξεταστική επιτροπή της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους μου που έλαβαν μέρος στην πραγματοποίηση των μετρήσεων, κάτω από τις αντίξοες συνθήκες του καλοκαιριού, καθώς η βοήθειά τους ήταν πολύτιμη.

Ακόμη, θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους συναδέλφους και στους προϊσταμένους μου στην δουλειά μου καθώς από την πρώτη στιγμή της ενασχόλησής μου με την παρούσα διπλωματική μου δώσανε το περιθώριο να χρησιμοποιώ τις άδειές μου όποτε χρειαζόταν και χωρίς να μου δημιουργήσουν το παραμικρό πρόβλημα.

Αφιερώνω την διπλωματική μου εργασία στην οικογένειά μου για όλη την στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Αντωνόπουλος Κωνσταντίνος

Αθήνα 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται την εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων που πραγματοποιήθηκαν στην ευρύτερη περιοχή του Θορικού στο Λαύριο Αττικής. Οι στόχοι της έρευνας που διεξήχθη ήταν δύο. Ο πρώτος στόχος ήταν η εύρεση της στρωματογραφίας και του μετώπου υφαλμύρινσης στην παράκτια ζώνη του κόλπου του Θορικού, ενώ ο δεύτερος ήταν ο προσδιορισμός της στρωματογραφίας και της έκτασης της ρύπανσης από μεταλλουργικές διεργασίες στον λόφο του Καβοδόκανου. Οι γεωφυσικές μέθοδοι που επιλέχθηκαν για την επίτευξη των παραπάνω στόχων ήταν η μέθοδοι της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης (ERT) και της επαγόμενης πολικότητας (IP) με την τεχνική της τομογραφίας.

Αρχικά γίνεται μία εισαγωγή στις έννοιες της γεωφυσικής έρευνας και παρουσιάζεται ο σκοπός εκπόνησης της εν λόγω εργασίας. Στην συνέχεια, παρατίθενται οι βασικές αρχές που διέπουν τις ηλεκτρικές μεθόδους της γεωφυσικής διασκόπησης και πιο συγκεκριμένα αυτών που χρησιμοποιήθηκαν στο Θορικό. Η επιλογή των συγκεκριμένων μεθόδων βασίστηκε σε μεγάλο βαθμό μετά από ανάλυση περιπτώσεων μελετών από την διεθνή βιβλιογραφία στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν αυτές οι μέθοδοι για την επίλυση παρόμοιων προβλημάτων, με αυτά που είχαμε να αντιμετωπίσουμε στο Θορικό, κι εξήγαγαν έγκυρα αποτελέσματα.

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας παρουσιάζεται η γεωφυσική έρευνα που έγινε στο Θορικό. Γίνεται αναφορά στα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής και μια περιγραφή όσον αφορά στο φαινόμενο της υφαλμύρινσης αλλά και της μόλυνσης που υπάρχει από την μεταλλευτική δραστηριότητα. Εν συνεχεία, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάστηκε η έρευνα καθώς επίσης κι η ερμηνεία των αποτελεσμάτων που παρήχθησαν. Εν κατακλείδι, αναλύονται τα συμπεράσματα της έρευνας σε συνδυασμό με έναν γενικό σχολιασμό για το σύνολο των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν, τόσο βιβλιογραφικά όσο και στις επί τόπου μετρήσεις που τελέστηκαν.

ABSTRACT

The present thesis deals with the application of geophysical methods that was carried out in the surrounding area of Thoriko in Lavrio Attica. The objectives of the research that were carried out were two. The first objective was the detection of stratigraphy and the salinization front in the coastal area of Thoriko bay; while the second one was the determination of stratigraphy and the extent of pollution from metallurgical activities in the hill of Kavodokanos. The geophysical methods that were selected for the achievement of the above objectives were the electrical resistivity tomography (ERT) and the induced polarization (IP).

Initially, an introduction is made to the significances of geophysical research and it is presented the purpose of preparation of this thesis. Thereinafter the basic principles of electrical methods of geophysical prospecting are set out and, more particularly those ones used in Thoriko. The selection of the particular methods was based mainly on case studies in which were used those methods for the resolution of similar issues, with what we had to face in Thoriko, and exported valid results.

In the last part of this thesis, the geophysical research that was made in Thoriko is presented. A reference is made in the geological elements of the region and a description with regard to the phenomenon of salinization but also to the pollution that exists from the metallurgical activity. Thereinafter, it is described the way in which the survey was designed as well as the interpretation of the results that was produced. In conclusion, there is an analysis of the research results in combination with a general comment for the total processes that were followed, both bibliographically and in Thoriko area.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	6
1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	15
2.1 Εισαγωγή	15
2.2 Ηλεκτρικές μέθοδοι	15
2.2.1 Ηλεκτρικά δυναμικά	17
2.2.2 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση στα πετρώματα	19
2.2.2.1 Νόμος του Ohm	19
2.2.2.2 Νόμος του Archie	19
2.2.2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρική αντίσταση	20
2.2.3 Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης	23
2.2.3.1 Ηλεκτρόδιο ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο	23
2.2.3.2 Ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια ημιάπειρου ομογενούς χώρου	25
2.2.4 Φαινόμενη ειδική αντίσταση	26
2.2.5 Διατάξεις ηλεκτροδίων	26
2.2.6 Εξοπλισμός υπαίθρου	28
2.2.7 Μέθοδος δισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας	29
2.2.8 Μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας	32
2.2.8.1 Αρχή της μεθόδου	32
2.2.8.2 Μηχανισμοί επαγόμενης πολικότητας	33
2.2.8.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την πόλωση	33
2.2.8.4 Τρόποι προσέγγισης του φαινομένου της επαγόμενης πολικότητας	34
3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗΣ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑΣ	36
3.1 Έρευνα εδαφολογικής μόλυνσης με την μέθοδο ERT (electrical resistivity tomography) και IP (induced polarization) στην περιοχή Bukow στη νότια Πολωνία.	36
3.1.1 Εισαγωγή	36
3.1.2 Περιοχή της έρευνας	37
3.1.3 Γεωλογική δομή	38
3.1.4 Γεωηλεκτρική έρευνα	39

3.1.5 Αποτελέσματα της έρευνας.....	40
3.1.6 Συμπεράσματα	45
3.2 Έρευνα για τον εντοπισμό του μετώπου υφαλμύρινσης σε παράκτια ζώνη στην Ροδόπη.....	46
3.2.1 Εισαγωγή.....	46
3.2.2 Περιοχή της έρευνας.....	47
3.2.3 Γεωλογική δομή.....	47
3.2.4 Γεωηλεκτρική έρευνα	49
3.2.5 Αποτελέσματα της έρευνας.....	50
3.2.6 Συμπεράσματα	57
3.3 Έρευνα για τον εντοπισμό του μετώπου υφαλμύρωσης σε παράκτια ζώνη κατά μήκος της Ιόνιας ακτής της περιοχής Βασιλικάτα στην Νότια Ιταλία	59
3.3.1 Εισαγωγή.....	59
3.3.2 Περιοχή μελέτης	60
3.3.3 Γεωηλεκτρική έρευνα κι αποτελέσματα.....	62
3.4 Εξερεύνηση καρστικού νερού στην περιοχή Terpal, δυτικά στο Shahrood που βρίσκεται στο Ιράν.	68
3.4.1 Εισαγωγή.....	68
3.4.2 Περιοχή της έρευνας και γεωλογική δομή	68
3.4.3 Γεωηλεκτρική έρευνα	70
4ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΜΕΤΩΠΟ ΤΗΣ ΚΟΙΛΑΔΑΣ ΤΟΥ ΘΩΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΘΕΣΗ ΚΑΒΟΔΟΚΑΝΟΣ	72
4.1 Εισαγωγή.....	72
4.2 Ιστορικά στοιχεία περιοχής	73
4.3 Γεωλογία περιοχής έρευνας	76
4.3.1 Θέση και μορφολογία.....	76
4.3.2 Γεωλογική δομή.....	76
4.3.3 Κοιτασματολογικά στοιχεία - μεταλλογένεση.....	80
4.3.4 Μεταλλοφορία	81
4.3.5 Υδρογεωλογικά στοιχεία.....	82
4.4 Μόλυνση Λαυρεωτικής από μεταλλευτική δραστηριότητα	85
4.5 Υφαλμύρινση Λαυρεωτικής	88
4.6 Γεωφυσική έρευνα.....	90
4.6.1 Εισαγωγή.....	90
4.6.2 Σχεδιασμός έρευνας.....	91
4.6.3 Εξοπλισμός και λογισμικό	93
4.6.4 Γεωηλεκτρικές τομές	99

4.6.4.1 Τομή ΚΤΗ 1-5 RES	99
4.6.4.2 Τομή ΡΤΗ RES	101
4.6.4.3 Τομή ΡΤΗ ΙΡ	102
4.6.4.4 Τομή ΚΑΥ1 RES	104
4.6.4.5 Τομή ΚΑΥ1 ΙΡ	105
4.6.4.6 Τομή ΚΑΥ2 RES	107
4.6.4.7 Τομή ΚΑΥ2 ΙΡ	108
4.6.4.9 Τομή ΚΑΥ3 ΙΡ	111
5° ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΓΕΝΙΚΟΣ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....	113
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	117
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	122

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2. 1: Πορώδες διαφόρων πετρωμάτων (Stanley H. Ward 1990)	21
Εικόνα 2. 2: Αναπαράσταση των γραμμών ροής του ρεύματος και των ισοδυναμικών επιφανειών.....	23
Εικόνα 2. 3: Ροή ρεύματος και ισοδυναμικές επιφάνειες σε ημιάπειρο ομογενή χώρο με δύο σημειακές πηγές.....	25
Εικόνα 2. 4: Διάταξη Schlumberger	26
Εικόνα 2. 5: Διάταξη Wenner	27
Εικόνα 2. 6: Διάταξη Dipole-Dipole	27
Εικόνα 2. 7: Διάταξη Pole-Pole.....	28
Εικόνα 2. 8: Διάταξη Pole-Dipole	28
Εικόνα 2. 9: Εξοπλισμός υπαίθρου.....	29
Εικόνα 2. 10: Δισδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία.....	30
Εικόνα 2. 11: Διάταξη μοντέλου κελιών σταθερών διαστάσεων	31
Εικόνα 2. 12: Απεικόνιση ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων.....	31
Εικόνα 2. 13: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της επαγόμενης πολικότητας.....	32
Εικόνα 2. 14: Μηχανισμοί πόλωσης μεμβράνης (α) και ηλεκτροδιακής πόλωσης (β)	33
Εικόνα 2. 15: Διαγράμματα φαινόμενης ικανότητας πόλωσης.....	34
Εικόνα 2. 16: Τρόπος παρουσίασης της φαινόμενης ειδικής αντίστασης και του αποτελέσματος της συχνότητας με διάταξη ηλεκτροδίων dipole-dipole.....	35
Εικόνα 3. 1: Θέση της εξεταζόμενης περιοχής. Τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση της υπόγειας ροής του νερού. (σύμφωνα με το Google Earth.com)	37
Εικόνα 3. 2: Γεωλογική απεικόνιση της περιοχής έρευνας. G: χαλίκι, G-S: χαλικώδης άμμος, Sc: χονδρόκοκκη άμμος, Sm: μέση άμμος, C: άργιλος, Cs: αμμώδης άργιλος, Cd: ιλύς, L: άμμος.....	38
Εικόνα 3. 3: Ειδική αντίσταση και φορτιστικότητα της τομής 1	42
Εικόνα 3. 4: Ειδική αντίσταση και φορτιστικότητα της τομής 2	43
Εικόνα 3. 5: Ειδική αντίσταση και φορτιστικότητα της τομής 3	44
Εικόνα 3. 6: Α) Μια θέση περιοχής μελέτης και μια θέση των γραμμών ERT, Β) θέση των φρεατίων και του κεντρικού αγωγού βαθμολόγησης γραμμών ERT και τα κύρια ρεύματα στην περιοχή	47
Εικόνα 3. 7: Α) πορείες πιεζομετρικών χαρτών και ροής για το περιορισμένο υδροφόρο στρώμα κατά τη διάρκεια της διανομής του Απριλίου 2012, Β) Διανομή των ηλεκτρικών τιμών αγωγιμότητας για το περιορισμένο υδροφόρο στρώμα κατά τη διάρκεια του Αύγουστο 2012	48
Εικόνα 3. 8: Γεωηλεκτρικές τομές ERT1, ERT2, ERT3	52
Εικόνα 3. 9: Γεωηλεκτρικές τομές ERT4, ERT5, ERT6	53
Εικόνα 3. 10: Γεωηλεκτρικές τομές ERT7, ERT8, ERT9	54
Εικόνα 3. 11: Γεωηλεκτρικές τομές ERT10, ERT11, ERT12	55
Εικόνα 3. 12: Τμήματα 2D ERT μαζί με τα κύρια περιγράμματα που περιορίζουν τον υδροφόρο ορίζοντα στην ηλεκτρική αγωγιμότητα.....	56
Εικόνα 3. 13: Ιόνια παράκτια πεδιάδα της περιοχής του Βασιλικάτα (νότια Ιταλία)	60
Εικόνα 3. 14: Σχηματικός γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης: 1) παράκτιες αποθέσεις, 2) αλλούβιες, μεταβατικές και θαλάσσιες αποθέσεις, 3) θαλάσσιες αναβαθμίσεις, 4) Σχηματισμός υπο-Απεννίνων αργίλων 5) θαλάσσια απότομη κατωφέρεια.	61

Εικόνα 3. 15: Χάρτης θέσης των γεωηλεκτρικών τομών.....	63
Εικόνα 3. 16: Δισδιάστατες ηλεκτρικές τομογραφίες ειδικής αντίστασης που λαμβάνονται στην περιοχή μελέτης. Η θέση κάθε ERT παρουσιάζεται στο σχήμα 3, a) Γεωηλεκτρική Τομή 1 • b) Γεωηλεκτρική Τομή 2• c) Γεωηλεκτρική Τομή 3 • d) Γεωηλεκτρική Τομή 4 • e) Γεωηλεκτρική Τομή 5	65
Εικόνα 3. 17: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Terpal (η περιοχή μελέτης περιβάλλεται από το λευκό ορθογώνιο) Vaziri, S.H., Majidifard, M.R. and Saidi, A. (2001).....	69
Εικόνα 3. 18: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης, όπου παρουσιάζονται οι τοποθεσίες των 10 σημείων VES κι οι 4 τομές ERT, όπου συμβολίζονται με τελείες διαφορετικών χρωμάτων	69
Εικόνα 3. 19: Δισδιάστατη απεικόνιση αποτελεσμάτων της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά μήκος των τομών P01 , P02 , P03 και P04 μετά την επεξεργασία στο λογισμικό RES2DINV . Παρουσιάζονται επίσης οι θέσεις VES με τα σημεία από S01 έως S10.....	70
Εικόνα 4. 1: Η περιοχή του Θορικού όπου διεξήχθη η γεωφυσική έρευνα	72
Εικόνα 4. 2: Αναπαράσταση της εργασίας του εμπλουτισμού του αργυρούχου μόλυβδου σ' ένα επίπεδο πλυντήριο της Λαυρεωτικής	73
Εικόνα 4. 3: Το αθηναϊκό τετράδραχμο ή αλλιώς "γλαύκα"	74
Εικόνα 4. 4: Άποψη του αρχαίου θεάτρου Θορικού	75
Εικόνα 4. 5: Η είσοδος της στοάς δίπλα στο θέατρο Θορικού. Η υποστύλωση που φαίνεται είναι σύγχρονη	75
Εικόνα 4. 6: Γεωλογικός χάρτης περιοχής Πλάκας – Καμάριζας στην Λαυρεωτική. (Σκαρπέλης 2007)	79
Εικόνα 4. 7: Συμπαγές μέταλλευμα γαληνίτη – σφαλερίτη – σιδηροπυρίτη από το Λαύριο	81
Εικόνα 4. 8: 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 υπερκάλυψης του φυλλιτικού καλύμματος 6) τεταρτοταγείς αποθέσεις.....	83
Εικόνα 4. 9: Πρότυπες θέσεις αποστράγγισης και δειγματοληψίας υπόγειων υδάτων της περιοχής μελέτης. 1) διαχωρισμός αποστράγγισης, 2) χείμαρροι και 3) τα σημεία δειγματοληψίας του νερού	84
Εικόνα 4. 10: Πάνω στον λόφο του Καβοδόκανου ο οποίος αποτελείται από σκωρίες. (φωτογραφία κατά την διάρκεια της γεωφυσικής έρευνας).....	87
Εικόνα 4. 11: Άποψη της παραλίας του κόλπου του Θορικού όπου έχει γίνει απόθεση σιδηροπυριτών και σκωριών. (φωτογραφία κατά την διάρκεια της γεωφυσικής έρευνας)	88
Εικόνα 4. 12: Το φαινόμενο της υφαλμύρινσης	89
Εικόνα 4. 13 Οι τομές που έγιναν στην περιοχή του Θορικού (Google earth).....	90
Εικόνα 4. 14: Παρουσίαση της ονομασίας των τομών	92
Εικόνα 4. 15: Το όργανο Syscal Pro που διαθέτει το εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής.....	93
Εικόνα 4. 16: Το διαφορικό GPS LEICA 1200	94
Εικόνα 4. 17: Δεδομένα από την τομογραφία KAV 1.....	95
Εικόνα 4. 18: : Εικόνα από το πρόγραμμα RES2DINV από την οποία επιλέχθηκε η παράμετρος Robust	96
Εικόνα 4. 19: Εικόνα από το πρόγραμμα RES2DINV από την οποία επιλέχθηκε η παράμετρος Model cells with widths of half the unit spacing.....	97

Εικόνα 4. 20: : Εικόνα από το πρόγραμμα RES2DINV στην οποία επιλέχθηκε η διαδοχική αναστροφή των δεδομένων της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της επαγόμενης πολικότητας.....	97
Εικόνα 4. 21: Εικόνα από το πρόγραμμα RES2DINV κατά την αποθήκευση των δεδομένων σε μορφή αρχείου ικανού να επεξεργαστεί με το πρόγραμμα SURFER.....	98
Εικόνα 4. 22: Η τομή KTH 1-5 RES με προσανατολισμό SW – NE	99
Εικόνα 4. 23: Η τομή PTH RES με προσανατολισμό SE – NW	101
Εικόνα 4. 24: Η τομή PTH IP με προσανατολισμό SE – NW	102
Εικόνα 4. 25: Η τομή KAV1 RES με προσανατολισμό NE – SW.....	104
Εικόνα 4. 26: Η τομή KAV1 IP με προσανατολισμό NE – SW	105
Εικόνα 4. 27: Η τομή KAV2 RES με προσανατολισμό SE – NW.....	107
Εικόνα 4. 28: Η τομή KAV2 IP με προσανατολισμό SE – NW	108
Εικόνα 4. 29: Η τομή KAV3 RES με προσανατολισμό NE – SW.....	110
Εικόνα 4. 30: Η τομή KAV3 IP με προσανατολισμό NE – SW	111
Εικόνα Π. 1: Θέση της τομής KTH 1-5 RES	117
Εικόνα Π. 2: Θέση της τομής PTH (RES & IP)	118
Εικόνα Π. 3: Θέση της τομής KAV1 (RES & IP).....	119
Εικόνα Π. 4: Θέση της τομής KAV2 (RES & IP).....	120
Εικόνα Π. 5: Θέση της τομής KAV3 (RES & IP).....	121

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1. Εύρος τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. (Λούης 2004)	20
Πίνακας 2.2 Επίδραση στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση από διάφορες γεωλογικές διεργασίες. (Αποστολόπουλος, 2008)	22
Πίνακας 3.1. Περιεκτικότητα σε μέταλλα του υδροφόρου, σύμφωνα με αναγνώσεις του πιεζομέτρου P-2 το 2006 (μέγιστες τιμές).....	41
Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά των 12 τομών	50
Πίνακας 3.3 Εύρος τιμών των χημικών και φυσικών στοιχείων των εδαφολογικών δειγμάτων	67
Πίνακας 4.1. Στατιστικές παράμετροι των συγκεντρώσεων των στοιχείων στα δείγματα των μεταλλουργικών απορριμμάτων, πετρώματος και εδαφικού καλύμματος του Λαυρίου. Οι διάμεσες τιμές των συγκεντρώσεων των στοιχείων στα δείγματα πετρώματος και εδαφικού καλύμματος παρατίθενται για σύγκριση (από Demetriades and Vergou-Vichou 1999b, Πίνακας 5.1, σελ. 128).....	86

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο γεωφυσική έρευνα εννοούμε την μη επεμβατική διερεύνηση των συνθηκών κάτω από την επιφάνεια της γης (γεωλογική δομή, υπόγεια ύδατα, μεταλλοφορία κ.α.) μέσα από την μέτρηση, ανάλυση κι ερμηνεία φυσικών μεγεθών.

Εφαρμοσμένη γεωφυσική είναι η εφαρμογή οποιασδήποτε γεωφυσικής μεθόδου προκειμένου να εκτελέσουμε την γεωφυσική έρευνα. Κάθε γεωφυσική μέθοδος χρησιμοποιεί κι αναλύει φυσικά φαινόμενα, όπως είναι η βαρύτητα, ο ηλεκτρισμός, η διάδοση σεισμικών κυμάτων κλπ. Εκτελούνται επί της ουσίας, μετρήσεις χαρακτηριστικών μεγεθών αυτών των φαινομένων, αποτυπώνοντας έτσι την μορφή του υπεδάφους, βάσει φυσικών ιδιοτήτων όπως είναι η πυκνότητα, η αγωγιμότητα, η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων κλπ.

Ένα σημαντικό κομμάτι της εφαρμοσμένης γεωφυσικής, αποτελεί αναμφισβήτητα η σωστή επιλογή της εκάστοτε μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί. Το καλύτερο αποτέλεσμα έρχεται πάντα με βάση την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, δηλαδή κατά πόσο μπορούμε να θεωρήσουμε τα αποτελέσματά της επαρκή ανάλογα με την έρευνα που κάνουμε, σε συνάρτηση με το κόστος.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της εργασίας είναι οι εξής:

- Μέθοδος της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης (Μέθοδος δισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας (Electrical Resistivity Tomography)).
- Μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας (Induced Polarization).

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στην ευρύτερη περιοχή του Θορικού στο Λαύριο. Το ένα σκέλος της εργασίας αφορά στην παράκτια ζώνη της περιοχής, όπου σκοπός ήταν να μπορέσουμε να εντοπίσουμε τα καρστικά κενά τα οποία ευθύνονται για τις φορτίσεις – εκφορτίσεις θαλάσσιου και γλυκού νερού αντίστοιχα προς κι από την κοιλάδα του Θορικού. Μπορούμε να πούμε ότι οι γεωφυσικές τομές που έγιναν καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της παράκτιας περιοχής του Θορικού κι έτσι έχουμε μια αρκετά μεγάλη και σαφή εικόνα για την

εισροή θαλασσινού νερού μέσω των καρστικών διαβρώσεων, όπως επίσης και για την εκροή γλυκού νερού από την κοιλάδα προς την θάλασσα. Το δεύτερο σκέλος της εργασίας αφορά στον ακριβή εντοπισμό (στρωματογραφικά) του φυσικού εδάφους πάνω από το οποίο υπάρχουν χερσαίες αποθέσεις στείρων, που περιέχουν βαρέα μέταλλα, από την εκμετάλλευση των ορυχείων στο Λαύριο στην περιοχή του Καβοδόκανου. Είναι η πρώτη γεωφυσική έρευνα που λαμβάνει χώρα στην περιοχή κι έτσι μπορέσαμε να δούμε με έγκυρα κι ακριβή στοιχεία τι ακριβώς συμβαίνει στο υπέδαφος. Η ερμηνεία κι η ανάλυση των δεδομένων που εξήχθησαν, αποτελούν το πρωταρχικό στάδιο για την περιβαλλοντική αποκατάσταση αυτής της επιβαρυσμένης περιοχής.

2° ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Εισαγωγή

Η γεωφυσική αναγνωρίστηκε σαν επιστήμη τον 19^ο αιώνα όμως οι ρίζες της χρονολογούνται από την αρχαιότητα. Η εξέλιξή της κυρίως τον 20^ο αιώνα έπαιξε σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της θεωρίας των τεκτονικών πλακών.

Η εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων είναι μία διαδικασία που αποτελείται από τα εξής βασικά βήματα τα οποία πρέπει να ακολουθούνται σε οποιαδήποτε γεωφυσική έρευνα.

- Αρχική αξιολόγηση του προβλήματος. Θα πρέπει δηλαδή να γίνει κατανοητό ποιο είναι το πιθανό πρόβλημα, ποιες πληροφορίες γνωρίζουμε ήδη για την περιοχή που υπάρχει το πρόβλημα (π.χ. γεωλογικά στοιχεία), ποιες πληροφορίες απαιτούνται ακόμη και τέλος ποια αποτελέσματα της μεθόδου μπορούμε να περιμένουμε.
- Επιλογή κατάλληλης γεωφυσικής μεθόδου. Το καλύτερο αποτέλεσμα έρχεται πάντα με βάση την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, δηλαδή κατά πόσο μπορούμε να θεωρήσουμε τα αποτελέσματά της επαρκή ανάλογα με την έρευνα που κάνουμε, σε συνάρτηση με το κόστος.
- Προσδιορισμός της περιοχής που θα υλοποιηθεί η γεωφυσική έρευνα.
- Αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο τα αποτελέσματα της έρευνας πρόκειται να ερμηνευθούν και να παρουσιαστούν ώστε να είναι πλήρως κατανοητά.

2.2 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).

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι, ανάλογα με την χρησιμοποίηση φυσικών ή τεχνητών πεδίων, διακρίνονται σε παθητικές και ενεργητικές. Στις παθητικές μεθόδους αξιοποιείται το φυσικό πεδίο ενώ στις ενεργητικές εφαρμόζεται τεχνητό πεδίο.

ΠΑΘΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ:

- 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.

ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

- 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 βάθη 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 αγωγίμων κόκκων μεταλλικών ορυκτών.

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

- Ηλεκτροκινητικό Δυναμικό.
Όταν διάλυμα ειδικής αντίστασης ρ και ιξώδους n αναγκάζεται να περάσει δια μέσου εγκοίλων ή πόρων, παρατηρείται στα άκρα τους διαφορά δυναμικού που δίνεται από την σχέση:

$$E = - \frac{\Phi \cdot \Delta P \cdot \varepsilon \cdot \rho}{4 \cdot \pi \cdot n}$$

Όπου:

Φ : δυναμικό απορρόφησης

ΔP : διαφορά πίεσης

ε : διηλεκτρική σταθερά

- Δυναμικό Διάχυσης.
Οφείλεται στη διαφορά ευκινησίας των διαφόρων ιόντων σε διαλύματα διαφορετικών συγκεντρώσεων και δίνεται από την σχέση:

$$E_d = - \frac{R \cdot \theta \cdot (I_a - I_c)}{F \cdot n \cdot (I_a + I_c)} \log\left(\frac{C_1}{C_2}\right)$$

Όπου:

C_1, C_2 : συγκεντρώσεις διαλυμάτων σε ιόντα

I_a, I_c : ευκινησία ιόντων

θ : απόλυτη θερμοκρασία

n : σθένος

F : σταθερά του Faraday (= $9.65 \cdot 10^4$ C/mol)

R : παγκόσμια σταθερά των αερίων (= $8,31$ joules/ $^{\circ}$ C)

- Δυναμικό Nernst.

Όταν δύο όμοια μεταλλικά ηλεκτρόδια βυθίζονται σε διαλύματα διαφορετικών συγκεντρώσεων προκύπτει διαφορά δυναμικού μεταξύ τους που δίνεται από την σχέση:

$$E_S = - \frac{R \cdot \theta}{F \cdot n} \log\left(\frac{C_1}{C_2}\right)$$

Όπου:

C_1, C_2 : συγκεντρώσεις διαλυμάτων σε ιόντα

θ : απόλυτη θερμοκρασία

n : σθένος

F : σταθερά του Faraday (= $9.65 \cdot 10^4$ C/mol)

R : παγκόσμια σταθερά των αερίων (= $8,31$ joules/ $^{\circ}$ C)

- 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 οξείδια των μετάλλων όπως μαγνητίτη. Οι πιο κοινές ανωμαλίες δυναμικών ορυκτογένεσης συμβαίνουν πάνω από πυρίτη, χαλκοπυρίτη, πυροτίτη, σφαλερίτη, γαληνίτη και γραφίτη.

- 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.

2.2.2 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση στα πετρώματα

2.2.2.1 Νόμος του Ohm

Ο νόμος του Ωμ, σχετίζει την πυκνότητα ρεύματος εντός αγωγού με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Για να γίνει πληρέστερα κατανοητός ο νόμος, θεωρούμε κυλινδρικό στερεό σώμα μήκους L, διατομής A και ολικής ηλεκτρικής αντίστασης R, του οποίου η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίδεται από την σχέση:

$$\rho = R \cdot \frac{L}{A}$$

Η ειδική αντίσταση μετράται σε Ωm. Η αντίσταση R δίδεται, συναρτήσει της εφαρμοζόμενης στα άκρα του κυλίνδρου εξωτερικής τάσης V (σε volt) και του διαρρέοντος τον κύλινδρο ηλεκτρικού ρεύματος I (σε Ampère) από τον νόμο του Ohm. :

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{volt/ampere})$$

Η ειδική αντίσταση και ειδική αγωγιμότητα είναι χαρακτηριστικές ιδιότητες του μέσου και ανεξάρτητες του σχήματός του.

2.2.2.2 Νόμος του Archie

Τα περισσότερα πετρώματα είναι κακοί αγωγοί, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να έχουν πολύ υψηλές τιμές αντίστασης. Όμως, στο φυσικό περιβάλλον, στους πόρους των πετρωμάτων υπάρχουν ρευστά με κυριότερο το νερό, μετατρέποντας έτσι τα πετρώματα σε ηλεκτρολυτικούς αγωγούς. Η αγωγιμότητα ενός πορώδους πετρώματος μεταβάλλεται με τον όγκο και την κατανομή των πόρων, αλλά πολύ περισσότερο με την αγωγιμότητα και το ποσό του περιεχομένου νερού. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός μέσου με βάση τον εμπειρικό τύπο του Archie (1942) είναι:

$$\rho_e = a \cdot \varphi^{-m} S^{-n} \rho_w$$

Όπου:

φ: ποσοστό όγκου των πόρων (πορώδες)

s: ποσοστό πόρων που περιέχουν νερό

ρ_w : ειδική αντίσταση του νερού

$n \approx 2$

α, m : σταθερές ($0,5 \leq \alpha \leq 2,5, 1,3 \leq m \leq 2,5$)

2.2.2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρική αντίσταση

Οι σημαντικότεροι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης πετρωμάτων κι ορυκτών είναι οι εξής:

- Είδος πετρώματος.

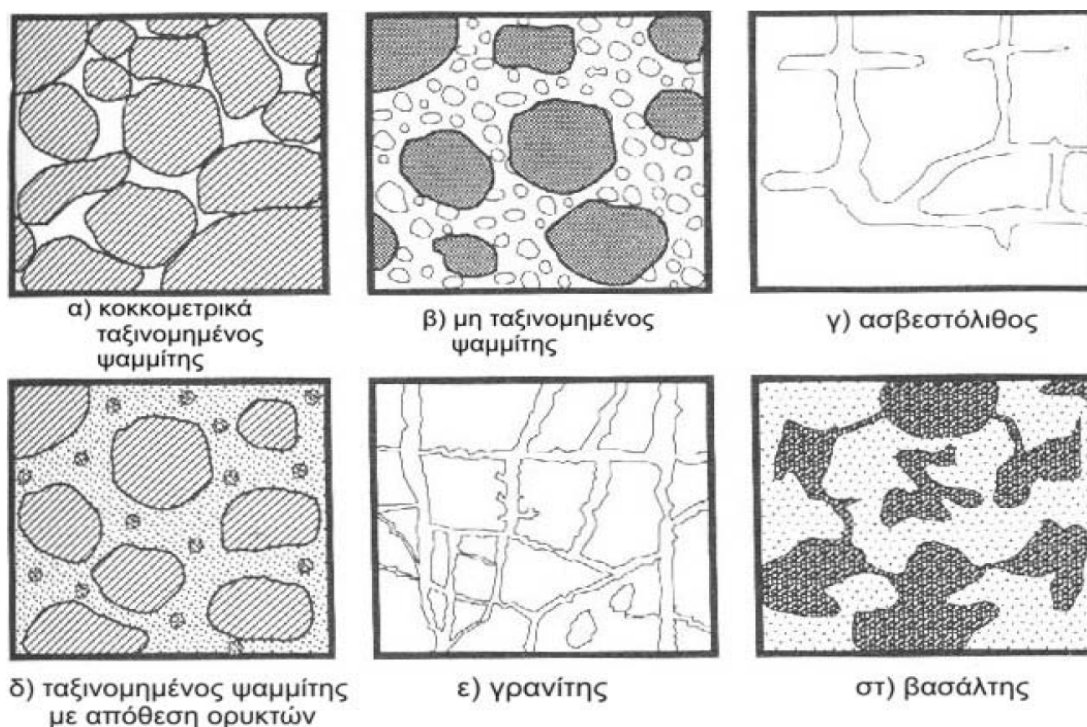
Τα πυριγενή πετρώματα παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ενώ τα ιζηματογενή πολύ χαμηλές κυρίως λόγω του ότι έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε ρευστά. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα παρουσιάζουν ενδιάμεσες τιμές με τάσεις αλληλεπικάλυψης. Παρατίθεται πίνακας στον οποίο φαίνεται ότι κάθε είδος ορυκτού, εδάφους ή πετρώματος έχει ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών ειδικής αντίστασης.

ΥΛΙΚΟ	ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ($\text{Ohm} \cdot \text{m}$)
Αέρας	∞
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	3×10^{-1}
Γαληνίτης	2×10^{-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

Πίνακας 2.1. Εύρος τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. (Λούης 2004)

- Δομή και πορώδες.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός πετρώματος είναι αντιστρόφως ανάλογη με το πορώδες του πετρώματος.



Εικόνα 2. 1: Πορώδες διαφόρων πετρωμάτων (Stanley H. Ward 1990)

Στην **Εικόνα 2.1** διακρίνονται οι δομές και το πορώδες έξι πετρωμάτων.

Ψαμμίτης (2.1α). Το χονδρό κλάσμα του κοκκομετρικά ταξινομημένου ψαμμίτη εμφανίζει μεγάλα κενά άρα έχει υψηλό πορώδες και χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης,

Ψαμμίτης (2.1β) Το χονδρό και ψιλό κλάσμα του μη ταξινομημένου ψαμμίτη έχει μικρότερο πορώδες με αποτέλεσμα οι τιμές της ειδικής του αντίστασης να είναι σαφώς μεγαλύτερες από το χονδρό κλάσμα ταξινομημένου ψαμμίτη της **Εικόνας 2.1^α**.

Ασβεστόλιθος (2.1γ) Το πορώδες αυξάνεται κατά μήκος των ρωγμών του κι άρα οι τιμές της ειδικής αντίστασης μειώνονται.

Ψαμμίτης με απόθεση ορυκτών (2.1δ) Από την απόθεση των ορυκτών το πορώδες μειώνεται κι αυξάνεται η ειδική αντίστασή του.

Γρανίτης (2.1ε) Ο γρανίτης άγει τον ηλεκτρισμό μέσω των διακλάσεων του. Έχοντας όμως μικρό πορώδες η ειδική αντίστασή του είναι υψηλή.

Βασάλτης (2.1στ) Σε αυτό το πέτρωμα παρόλο που κατά περίπτωση το πορώδες του μπορεί να είναι πολύ υψηλό, λόγω του ότι οι κενοί χώροι που έχει δεν συνδέονται συχνά μεταξύ τους τον καθιστά λίγο περατό κάτι το οποίο αυξάνει την τιμή της ειδικής του αντίστασης.

- Περιεκτικότητα σε άλατα.

Για γνωστό πορώδες ενός πετρώματος, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητά του ρευστού πληρώσεώς του σε άλατα τόσο μικρότερη είναι η ειδική αντίσταση του.

- Επιδράσεις γεωλογικών διεργασιών.

Κατά κανόνα οι γεωλογικές διεργασίες ελαττώνουν την ειδική αντίσταση με ορισμένες εξαιρέσεις. Παρατίθεται πίνακας με τις επιδράσεις γεωλογικών διεργασιών στις τιμές των ειδικών αντιστάσεων των πετρωμάτων.

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

Πίνακας 2.2 Επίδραση στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση από διάφορες γεωλογικές διεργασίες. (Αποστολόπουλος, 2008)

- Ηλικία πετρώματος.

Τα παλαιότερα πετρώματα τείνουν να παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

- Επιδράσεις αργιλικών ορυκτών.

Τα αργιλικά ορυκτά παρουσιάζουν αυξημένη αγωγιμότητα κι η ύπαρξή του μειώνει τις τιμές της ειδικής αντίστασης.

- Βαθμός κορεσμού.

Η σχέση του βαθμού κορεσμού ενός πετρώματος με την ειδική ηλεκτρική του αντίσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη.

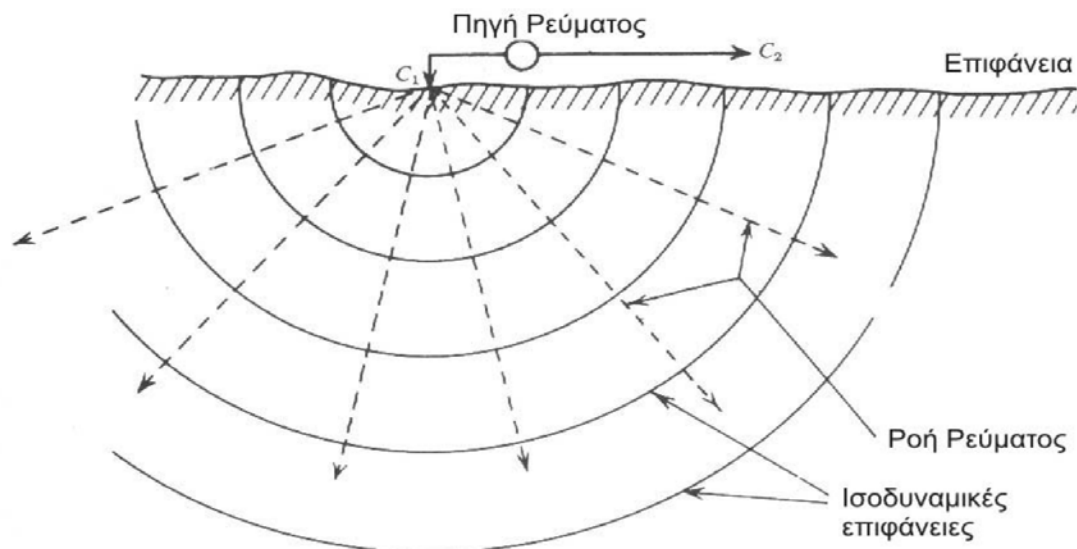
- Θερμοκρασία.

Αντιστρόφως ανάλογη είναι κι η σχέση της αύξησης της θερμοκρασίας ενός πετρώματος με την ειδική ηλεκτρική αντίστασή του. Παρόλαυτά, επειδή η επίδραση της θερμοκρασίας είναι πολύ μικρή, ο παράγοντας αυτός λαμβάνεται υπόψη μόνο σε γεωθερμικά συστήματα κι όχι σε γεωτεχνικές ή περιβαλλοντικές μελέτες.

2.2.3 Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

2.2.3.1 Ηλεκτρόδιο ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο

Εάν τοποθετήσουμε ηλεκτρόδιο C_1 (Εικόνα 2.2), σε επιφάνεια ηλεκτρικά ομογενούς μέσου, το οποίο συνδέεται με πηγή ρεύματος και κλείσουμε το κύκλωμα μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου C_2 το οποίο τοποθετείται επίσης στην επιφάνεια αλλά σε πολύ μακρινή απόσταση (προκειμένου η επίδρασή του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα), τότε οι γραμμές του ρεύματος θα είναι ακτινικές όπως φαίνεται στο κάτωθι σχήμα. Παρατηρούμε ότι οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι ομόκεντρα ημισφαίρια.



Εικόνα 2. 2: Αναπαράσταση των γραμμών ροής του ρεύματος και των ισοδυναμικών επιφανειών

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:

$$R = \frac{dV}{I}, \quad R = \rho \frac{dr}{A} \quad (2.1)$$

προκύπτει:

$$\frac{dV}{I} = \rho \frac{dr}{A} \Rightarrow \frac{dV}{dr} = \rho \frac{I}{A} = \rho \frac{I}{2\pi r^2} \Rightarrow dV = \rho \frac{I}{2\pi r^2} dr \quad (2.2)$$

όπου:

ρ : ειδική ηλεκτρική αντίσταση του μέσου

A : η επιφάνεια της ισοδυναμικής ημι-σφαίρας

Ολοκληρώνοντας θα έχουμε:

$$\int dV = \int \rho \frac{I}{2\pi r^2} dr \Rightarrow V = \frac{\rho I}{2\pi} \int \frac{1}{r^2} dr \Rightarrow V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (2.3)$$

όπου:

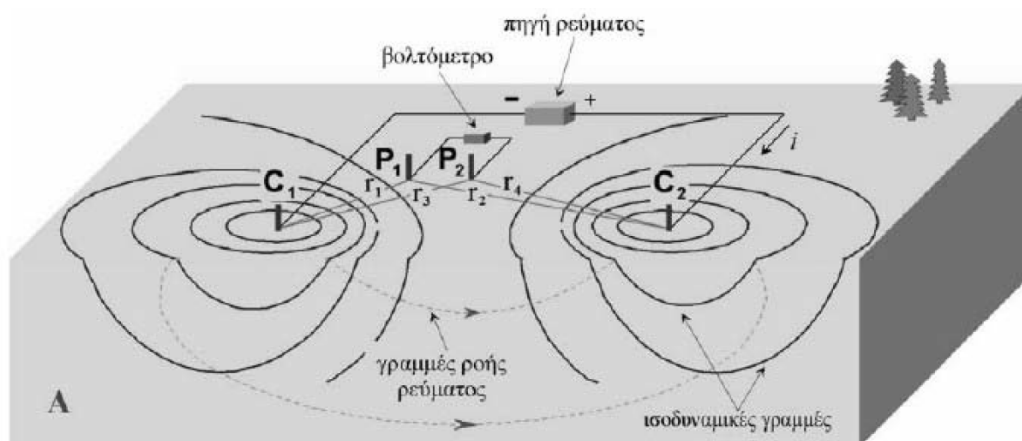
V : το δυναμικό που δημιουργείται σε σημείο του χώρου λόγω της σημειακής πηγής ρεύματος

r : η απόσταση του σημείου από την 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.

2.2.3.2 Ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια ημιάπειρου ομογενούς χώρου

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



Εικόνα 2. 3: Ροή ρεύματος και ισοδυναμικές επιφάνειες σε ημιάπειρο ομογενή χώρο με δύο σημειακές πηγές

Από την σχέση (2.3) το δυναμικό P_1 λόγω ηλεκτροδίου C_1 θα είναι:

$$V_1 = \frac{I\rho}{2\pi r_1}$$

Όμοια και το δυναμικό P_2 που οφείλεται στο ηλεκτρόδιο C_2

$$V_2 = -\frac{I\rho}{2\pi r_2}$$

Εφόσον τα ρεύματα στα δύο ηλεκτρόδια είναι ίσα κι αντίθετης πολικότητας:

$$V_1 + V_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Τελικά αν έχουμε δεύτερο ηλεκτρόδιο δυναμικού στο σημείο P_2 μπορούμε να μετρήσουμε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ P_1 και P_2 , οπότε:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\} \Rightarrow \rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{2\pi}{\left\{ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\}} = \frac{\Delta V}{I} k \quad (2.4)$$

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

2.2.4 Φαινόμενη ειδική αντίσταση

Σε ομογενές και ισότροπο μέσο, η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση από τη σχέση (2.4) θα είναι σταθερή και ανεξάρτητη των σχετικών θέσεων των τεσσάρων ηλεκτροδίων και θα ισούται με την ειδική αντίσταση του μέσου.

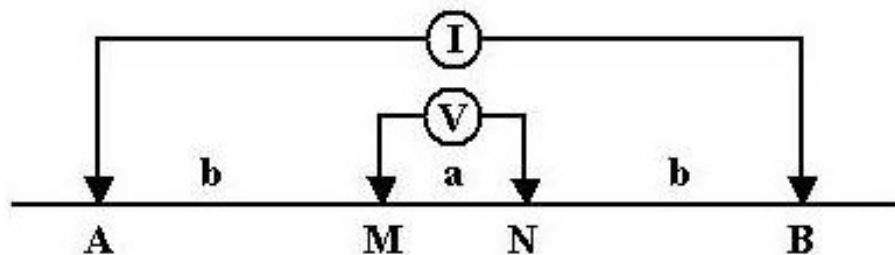
Σε ανομοιογενές όμως μέσο, η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση με τη σχέση (2.4) ποικίλει ανάλογα με τις σχετικές θέσεις των ηλεκτροδίων και λέγεται φαινόμενη ειδική αντίσταση.

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 αγωγίμων ή μη ανομοιογενειών.

2.2.5 Διατάξεις ηλεκτροδίων

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

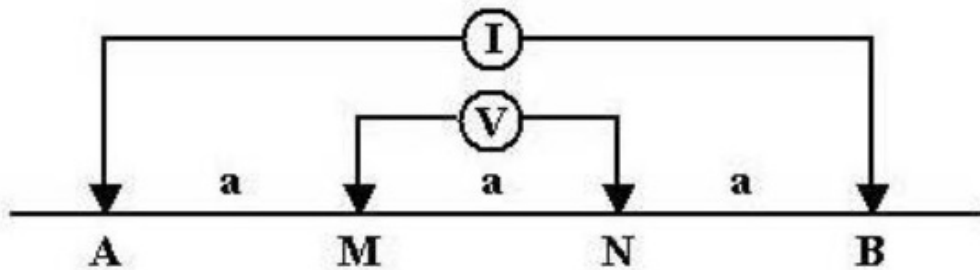
- Διάταξη Schlumberger : Τα ηλεκτρόδια ρεύματος (A,B) και δυναμικού (M,N) βρίσκονται συμμετρικά από το κέντρο της διάταξης απέχοντας αποστάσεις b και $a/2$ αντίστοιχα.



Εικόνα 2. 4: Διάταξη Schlumberger

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο : $\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{\pi(b^2 - (a/2)^2)}{a}$

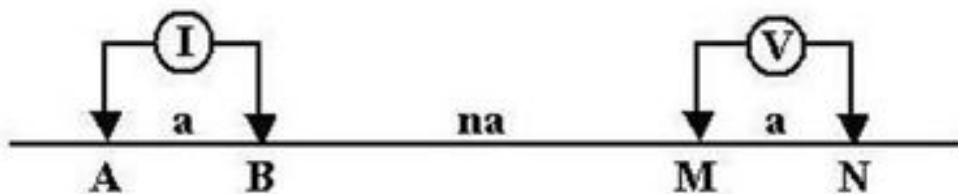
- Διάταξη Wenner : Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση a .



Εικόνα 2. 5: Διάταξη Wenner

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο : $\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} 2\pi a$

- 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).

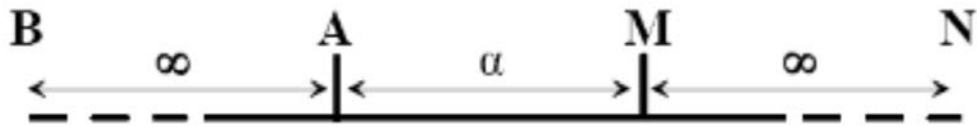


Εικόνα 2. 6: Διάταξη Dipole-Dipole

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο :

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

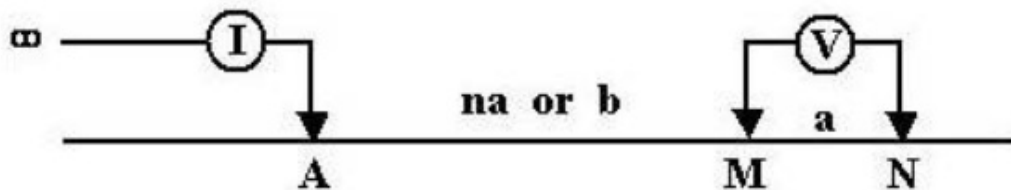
- Διάταξη Pole-Pole : Ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχουν απόσταση a , ενώ τα άλλα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού απέχουν πολύ μεγάλη απόσταση από τα δύο κοντινά ηλεκτρόδια.



Εικόνα 2. 7: Διάταξη Pole-Pole

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο : $\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} 2\pi\alpha$

- 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.



Εικόνα 2. 8: Διάταξη Pole-Dipole

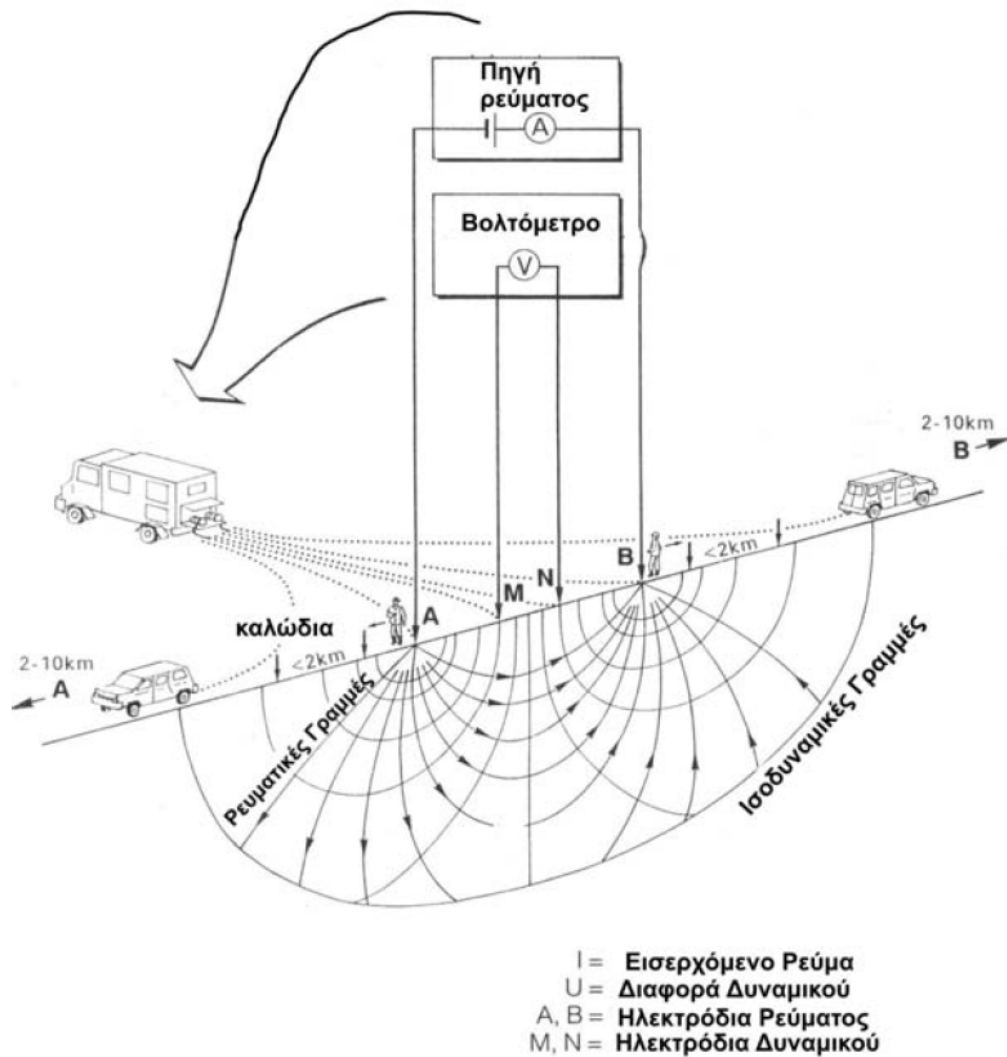
Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο : $\rho_{\alpha} = 2\pi \frac{b(a+b)}{a} \frac{V}{I}$

2.2.6 Εξοπλισμός υπαίθρου

Ο εξοπλισμός που χρειαζόμαστε για τη μέτρηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης (δηλαδή των ΔV και I) στο ύπαιθρο είναι ο ακόλουθος (Εικόνα 2.9):

- 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 μV έως 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



Εικόνα 2. 9: Εξοπλισμός υπαίθρου

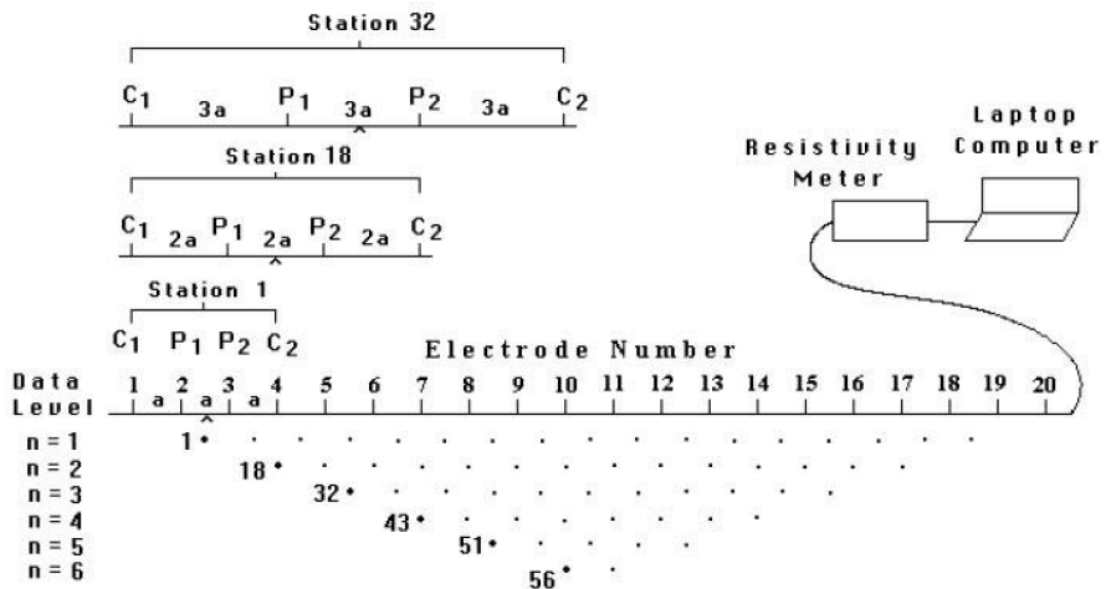
2.2.7 Μέθοδος δισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας

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.

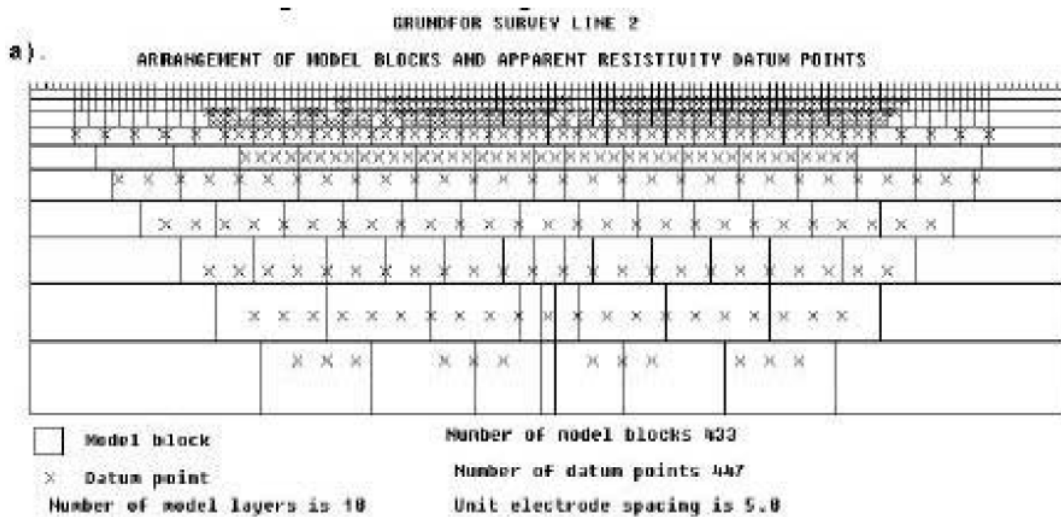
Η δισδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία απαιτεί την καταγραφή δεδομένων με πολλές διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων, κατά μήκος μιας γραμμής. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει μια αρκετά πυκνή πλευρική κάλυψη, από πλευράς λήψης δεδομένων, προκειμένου να καταστεί εφικτή η ανίχνευση πολύπλοκων δομών του υπεδάφους, γεγονός το οποίο επιβάλλει τη χρησιμοποίηση αυτοματοποιημένων πολύ – ηλεκτροδιακών συστημάτων λήψης δεδομένων.



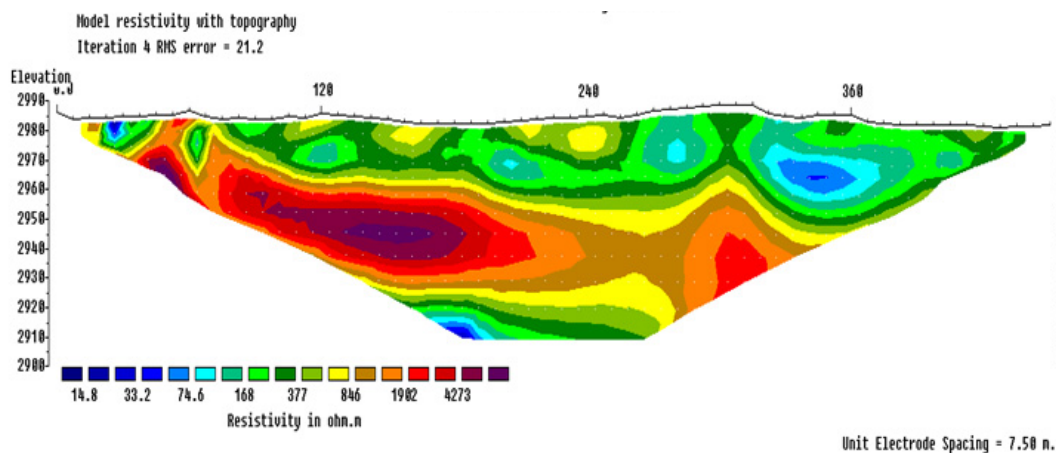
Sequence of measurements to build up a pseudosection

Εικόνα 2. 10: Δισδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία

Οι μεγάλες ποσότητες δεδομένων, που 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 (Εικόνα 2.11). 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 (Εικόνα 2.12). 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.



Εικόνα 2. 11: Διάταξη μοντέλου κελιών σταθερών διαστάσεων



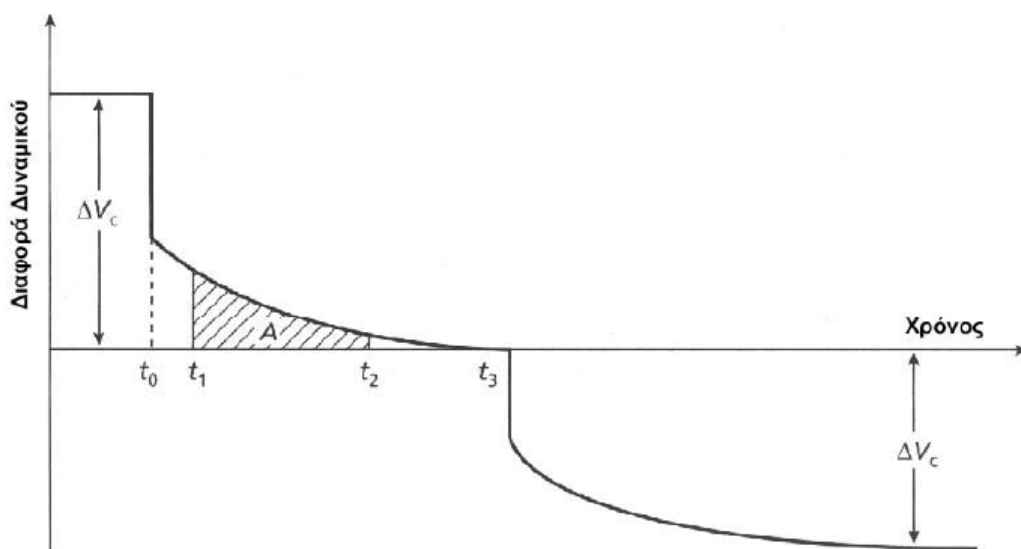
Εικόνα 2. 12: Απεικόνιση ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων

2.2.8 Μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας

2.2.8.1 Αρχή της μεθόδου

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.

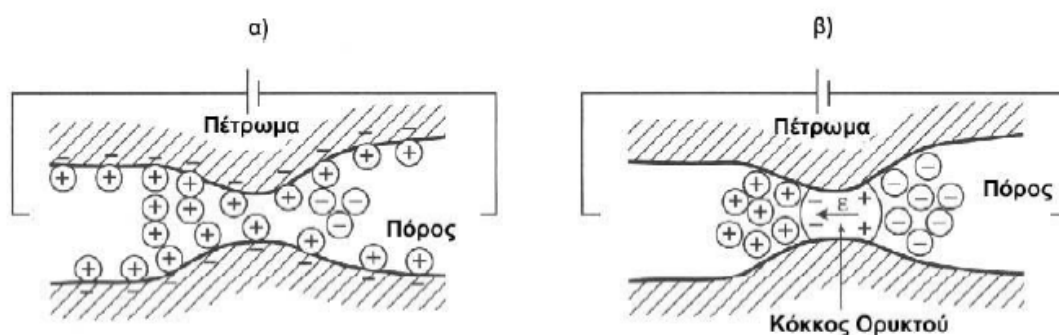
Το φαινόμενο της επαγόμενης πόλωσης φαίνεται στην **Εικόνα 2.13**, όπου σε χρόνο t_0 το ρεύμα σταματάει και η διαφορά δυναμικού μετά από μία αρχική πτώση της σταθερής τιμής ΔV_c μειώνεται σταδιακά μέχρι το μηδέν (0). Η ίδια κατάσταση συμβαίνει όταν το ρεύμα αρχίζει να ρέει σε χρόνο t_3 . Το «Α» παριστά την επιφάνεια κάτω από την καμπύλη μείωσης στο χρονικό διάστημα t_1-t_2 .



Εικόνα 2. 13: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της επαγόμενης πολικότητας

2.2.8.2 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 (**Εικόνα 2.14α**).
- Ηλεκτροδιακή πόλωση
Το ρεύμα που διαρρέει κατά μήκος πόρων με ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα, συναντά ορυκτό-αγωγό και φορτίζει αντίστροφα τις δύο πλευρές του (**Εικόνα 2.14β**). Όταν το ρεύμα σταματά, τα ιόντα διαχέονται προς τα πίσω για να φτάσουν στη φάση ισορροπίας.



Εικόνα 2. 14: Μηχανισμοί πόλωσης μεμβράνης (α) και ηλεκτροδιακής πόλωσης (β)

2.2.8.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την πόλωση

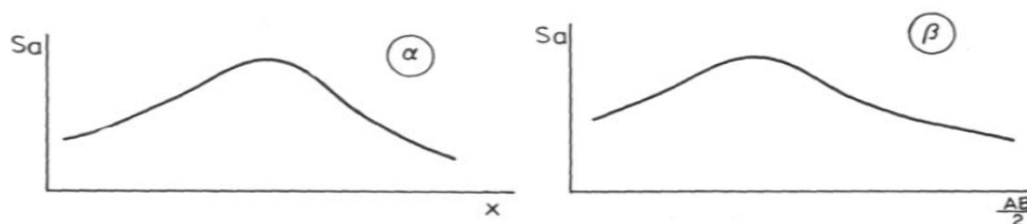
Η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας εφαρμόζεται κυρίως για τον εντοπισμό θειούχου μεταλλοφορίας. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την πόλωση είναι οι εξής :

- 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.

2.2.8.4 Τρόποι προσέγγισης του φαινομένου της επαγόμενης πολικότητας

Το φαινόμενο το προσεγγίζουμε με δύο τρόπους:

A) Στο χώρο του χρόνου (time domain), όπου παρατηρείται η μεταβολή του δυναμικού μετά την πτώση του ρεύματος. Ο λόγος $S_a = \frac{V(t)}{\Delta V_c}$ (2.5) ονομάζεται φαινόμενη ικανότητα πόλωσης, όπου t είναι ο χρόνος μετά την διακοπή του ρεύματος. Το ολοκλήρωμα χρόνου εξασθένησης είναι η επιφάνεια $A = \int_{t_1}^{t_2} V(t)dt$ (2.6). Η φορτιστικότητα είναι: $M = \frac{A}{\Delta V_c} = \frac{1}{\Delta V_c} \int_{t_1}^{t_2} V(t)dt$ (2.7) και μετράται σε milliseconds. Οι μετρήσεις αφορούν τα μεγέθη S_a και M , είτε έχοντας τα ηλεκτρόδια της διάταξης σταθερά (χαρτογράφηση) (Εικόνα 2.15α), είτε σε όλο και μεγαλύτερες αποστάσεις (βυθοσκόπηση) (Εικόνα 2.15β).



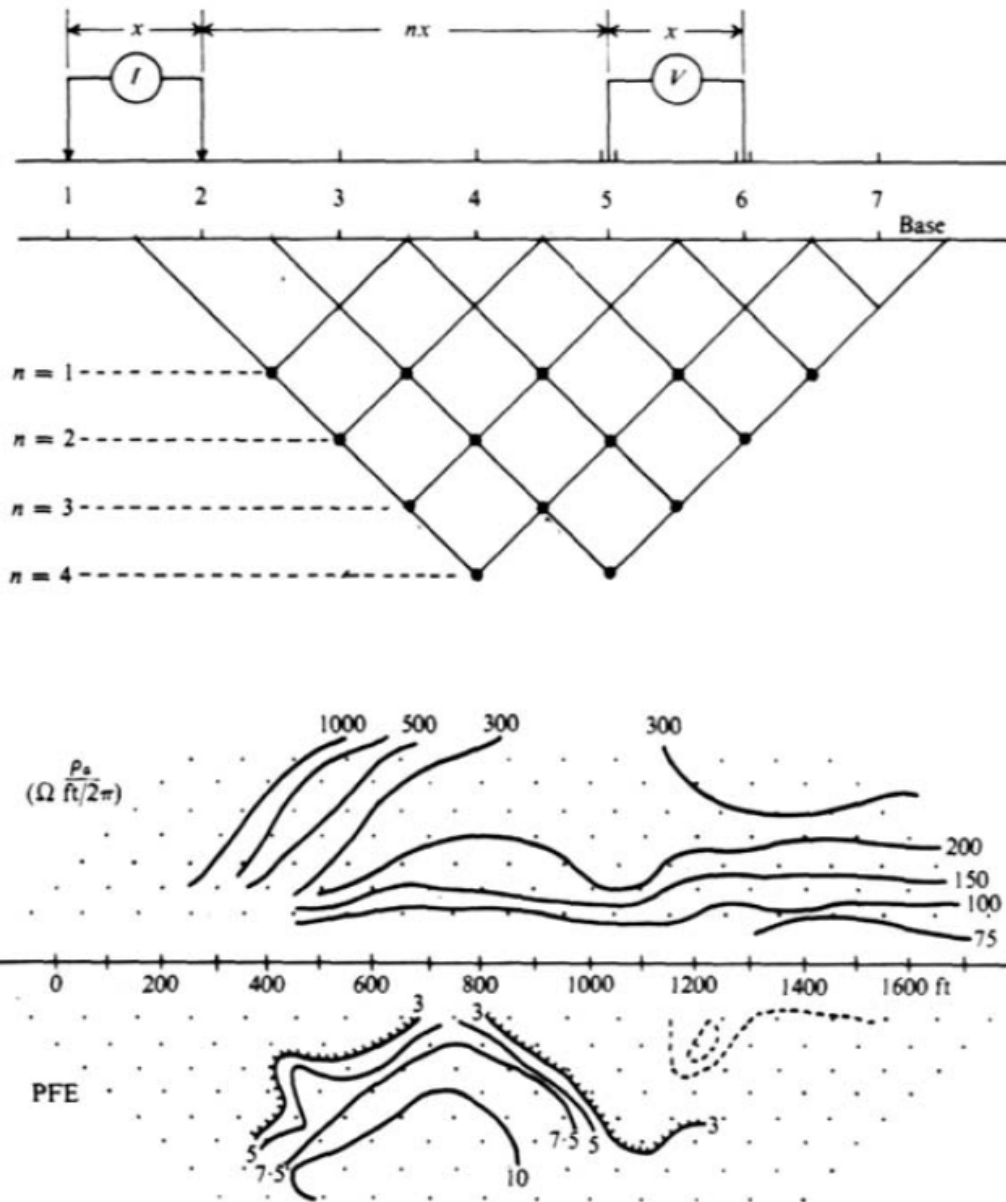
Εικόνα 2. 15: Διαγράμματα φαινόμενης ικανότητας πόλωσης

B) Στο χώρο συχνοτήτων (frequency domain), όπου μετράται το πλάτος και η φάση της διαφοράς δυναμικού σε σχέση με το ρεύμα σε διάφορες συχνότητες εκπομπής ρεύματος. 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:

$$\rho_\alpha = k \frac{\Delta V}{I} = \pi n(n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{I} \quad (2.8) \text{ κι υπολογίζουμε:}$$

$$1) \text{ Αποτέλεσμα συχνότητας (frequency effect): } f.e. = \frac{\rho_{DC} - \rho_{AC}}{\rho_{AC}} \quad (2.9)$$

$$2) \text{ Μεταλλικός παράγοντας: } m.f. = 2\pi 10^5 \frac{\rho_{AC}\rho_{DC} - \rho_{DC}}{\rho_{AC}\rho_{DC}} \quad (2.10)$$



Εικόνα 2. 16: Τρόπος παρουσίασης της φαινόμενης ειδικής αντίστασης και του αποτελέσματος της συχνότητας με διάταξη ηλεκτροδίων dipole-dipole

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗΣ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑΣ

3.1 Έρευνα εδαφολογικής μόλυνσης με την μέθοδο ERT (electrical resistivity tomography) και IP (induced polarization) στην περιοχή Bukow στη νότια Πολωνία.

(Jolanta Pierwola, Faculty of Earth Sciences, University of Silesia, Bedzinska 60, 41-200 Sosnowiec, Poland 2012)

3.1.1 Εισαγωγή

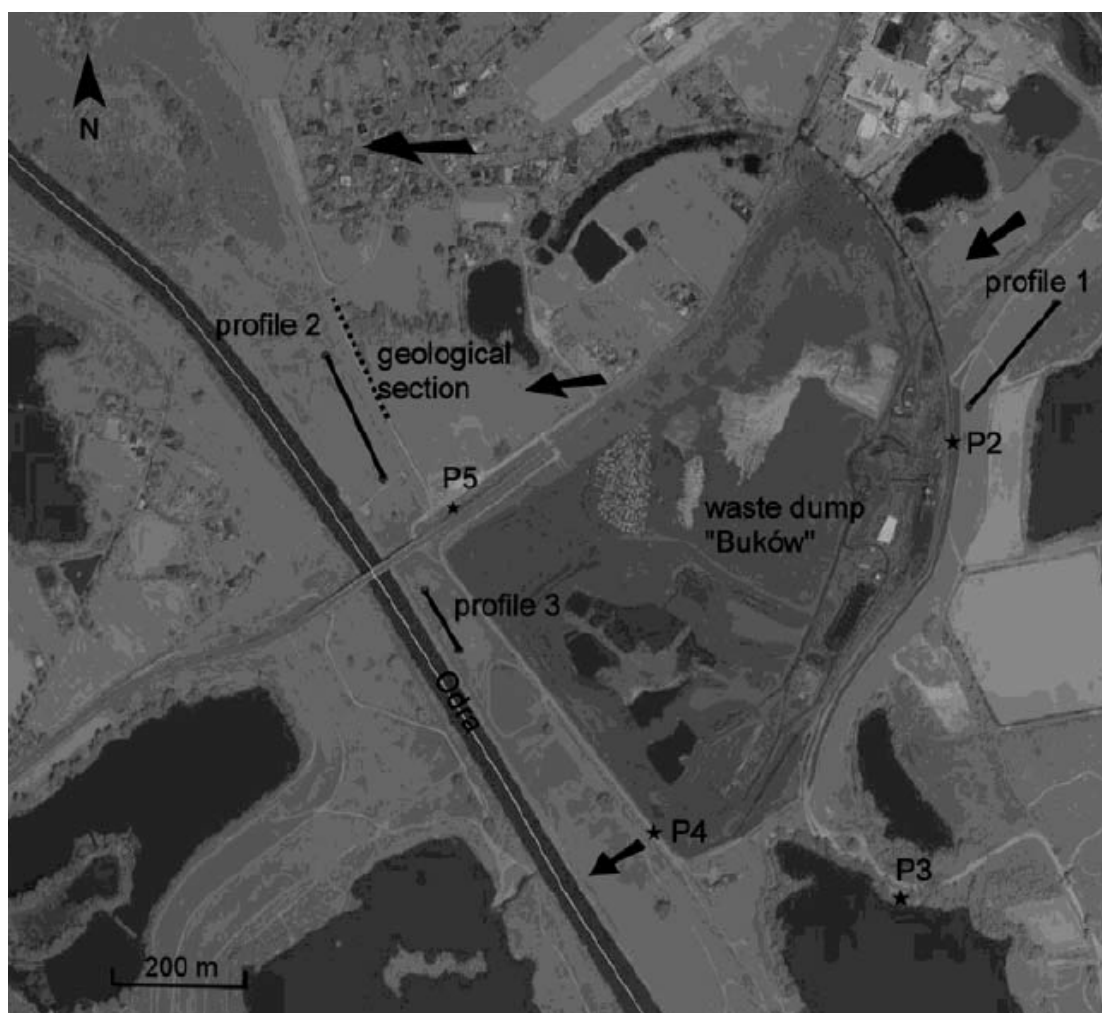
Το θέμα αυτής της μελέτης ήταν τα υλικά απόθεσης μετά από εξόρυξη, που βρίσκονταν κοντά στο χωριό Buków στη νότιο Πολωνία. Ο σωρός είναι τοποθετημένος περίπου 200 μ από τον ποταμό Odra κοντά στο ανάχωμα για τις πλημμύρες «Buków». Η μέθοδος της ειδικής αντίστασης και της επαγόμενης πολικότητας εφαρμόστηκαν με σκοπό να αναγνωρίσουν την επιρροή των αποθετημένων υλικών στο υπόγειο νερό. Στην περιοχή του σωρού, κάτω από ένα λεπτό και μη συνεχόμενο στεγανό κάλυψη, υπάρχει ένα στρώμα νερού ιδιαίτερου πάχους. Αυτό το στρώμα επιτρέπει τη μεταφορά των χλωριδίων και θειϊκών αλάτων από τα υλικά. Εφόσον το υδροφόρο στρώμα στην ερευνημένη περιοχή δεν είναι ομοιογενές, περιέχοντας πολυάριθμα στεγανά κι αργιλώδεις στρώσεις, η ερμηνεία βασισμένη μόνο στα αποτελέσματα ERT δεν θα ήταν αξιόπιστη. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο της επαγόμενης πολικότητας, μερικές από τις μολυσμένες ζώνες προσδιορίστηκαν με σαφήνεια.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα στείρα της εξόρυξης καθώς και τα τεχνικά έργα που είναι χτισμένα από αυτά, επηρεάζουν το υπόγειο νερό. Οι τομείς της μόλυνσης προσδιορίστηκαν επιτυχώς μέσω του συνδυασμού ειδικής αντίστασης και της επαγόμενης πολικότητας, ακόμη και στη σύνθετη λιθολογική δομή που διέπει την περιοχή.

3.1.2 Περιοχή της έρευνας

Η σωρός από τα στείρα του ορυχείου Buków είναι τοποθετημένος περίπου 10 χλμ. νότια από την πόλη Racibórz, περίπου 170 μ βόρεια του ποταμού Odra. Τα στείρα που παράγονταν από το ανθρακωρυχείο Rydułtowy-Anna βρίσκονται εκεί από το 1976.

Η περιοχή του τόπου αποθήκευσης είναι περίπου 450.000 τετραγωνικά μέτρα. Αρχικά, η απόθεση στείρων γινόταν κάτω από την επιφάνεια της γης. Αργότερα, τα στείρα συσσωρεύτηκαν κι έφτασαν σε ύψος 20 μέτρων. Τα στείρα προήλθαν από τις διαδικασίες θραύσης σκληρού άνθρακα. Περισσότερο από 90% των στείρων είναι χονδρόκοκκο υλικό.

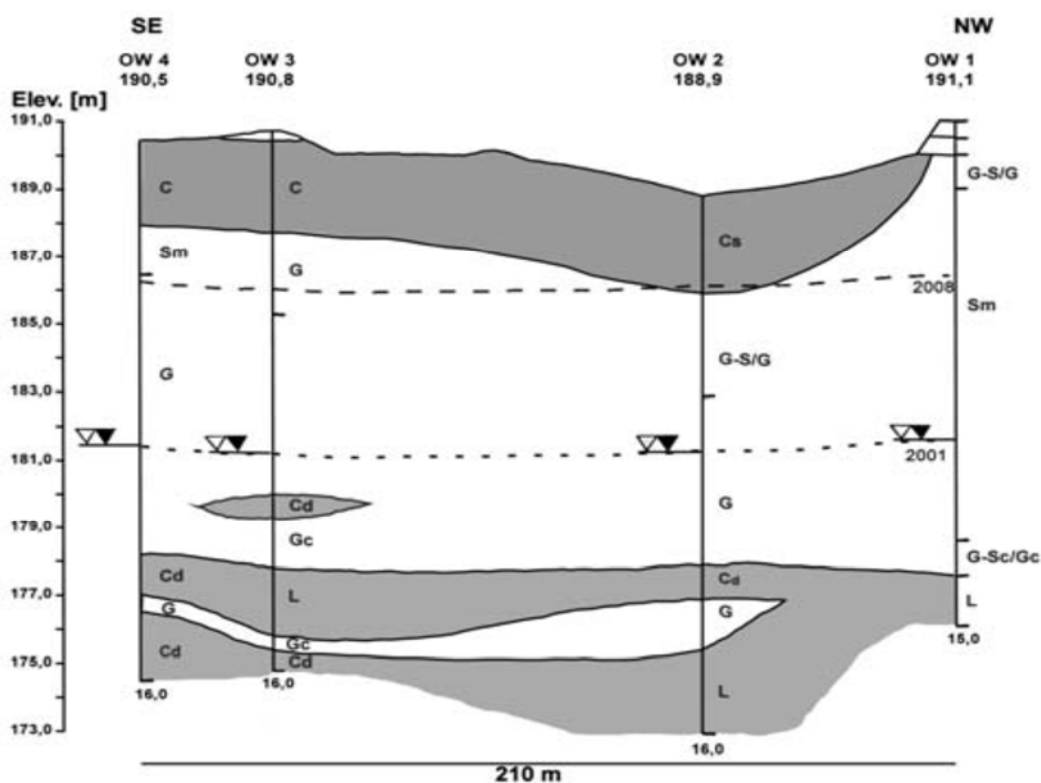


Εικόνα 3. 1: Θέση της εξεταζόμενης περιοχής. Τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση της υπόγειας ροής του νερού. (σύμφωνα με το Google Earth.com)

Λιθολογικά, αυτό το υλικό αποτελείται από συμπαγείς πηλίτες (70%) και βαθουλώματα. Τα στείρα χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλή απορροφητικότητα κι ιδιαίτερη διαπερατότητα (Marcak H. et al, 2011). Όλα τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά γνωρίσματα κάνουν πιθανή την διήθηση του νερού στο σωρό, και κατόπιν στο υπόγειο νερό. Από το 1997 ο σωρός έχει ανακυκλωθεί και ο άνθρακας ανακτάται από τα απόβλητα. Οι διαδικασίες αερισμού και άρδευσης που είναι συνδεδεμένες με την ανακύκλωση, ενισχύουν την αποσύνθεση των σουλφιδίων ενώ οι απελευθερωμένες χημικές ουσίες μεταναστεύουν ανεμπόδιστες στο υπόγειο νερό κι έτσι μπορούν να προκαλέσουν αξιόλογες αλλαγές στην ποιότητά του κοντά στην περιοχή απόθεσης.

3.1.3 Γεωλογική δομή

Τα ιζήματα που είναι τοποθετημένα στη δεξιά όχθη του ποταμού Odra χαρακτηρίζονται από σχετικά απλή γεωλογική δομή. Ένα δίκτυο πιεζομέτρων που περιβάλλουν το χώρο απόθεσης κι οι πολυάριθμες γεωτρήσεις που συνδέονται με αντιπλημμυρικά έργα του ποταμού Odra, παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες. Μια λιθολογική δομή της περιοχής παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3.2**.



Εικόνα 3. 2: Γεωλογική απεικόνιση της περιοχής έρευνας. G: χαλίκι, G-S: χαλικώδης άμμος, Sc: χονδρόκοκκη άμμος, Sm: μέση άμμος, C: άργιλος, Cs: αμμώδης άργιλος, Cd: ιλύς, L: άμμος

Συνεκτικά και στεγανά ιζήματα του Μειόκαινου έχουν βρεθεί επίσης στην περιοχή. Το πάχος αυτών των ιζημάτων είναι ιδιαίτερο και για ολόκληρη την περιοχή έρευνας υπερβαίνει τα 20 μ. Αυτό το στρώμα αποτελείται κυρίως από άργιλο κι άμμο. Η οροφή του Μειόκαινου είναι σχεδόν οριζόντια και τοποθετημένη σε ένα βάθος περίπου 10-12 μ.

Επάνω από τα προαναφερθέντα ιζήματα, έχει βρεθεί κι ένα συνεχές, αλλούβιο στρώμα που ανήκει στο Πλειστόκαινο. Το διαπερατό στρώμα αποτελείται από αμμοχάλικα, χαλικώδη άμμο, χονδρόκοκκη άμμο, και τοπικές διαστρώσεις από λεπτόκοκκη άμμο. Το μέσο πάχος του είναι μεταξύ 8-10 μ, αλλά τοπικά μπορεί να αυξηθεί μέχρι τα 20 μ ή να μειωθεί σε 4 μ (προς ΒΔ). Αυτό το στρώμα διευκολύνει την οριζόντια επέκταση της μόλυνσης από τον χώρο απόθεσης. Σύμφωνα με διαφορετικές πηγές, ο συντελεστής διήθησης για τις διαπερατές σειρές στρωμάτων εκτείνεται από $6,1 * 10^{-5}$ έως $3,6 * 10^{-4}$ m/s (Stefaniak S. et al, 2009). Το ανώτερο στρώμα του Ολόκαινου, αποτελείται από άργιλο, αμμώδη άργιλο, και εδάφη που προέρχονται από ανθρώπινη δραστηριότητα. Αυτό το στρώμα είναι μη-συνεχές με μέσο πάχος 2 μ.

Στην περιοχή, η στάθμη νερού συνδέεται με τα αλλούβια ιζήματα και χαρακτηρίζεται ως ασταθής γενικά, κι ελαφρώς σταθερή τοπικά. Ο υδροφόρος ορίζοντας συνδέεται με το επιφανειακό νερό κι άρα τροφοδοτείται από τις βροχοπτώσεις.

3.1.4 Γεωηλεκτρική έρευνα

Η περιοχή που περιβάλλει τα απορρίμματα από την επεξεργασία του άνθρακα δεν ενδείκνυται για την γεωηλεκτρική έρευνα λόγω της μορφολογίας της έκτασης, του δρόμου, των κοινοτικών έργων υποδομής, και των γεωργικών εργασιών που πραγματοποιούνταν βόρεια και δυτικά των αποθέσεων. Μερικοί από αυτούς τους παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα γεωηλεκτρικά αποτελέσματα της έρευνας, ιδιαίτερα αυτοί που δημιουργούν επαγόμενη πολικότητα των οποίων το σήμα είναι πολύ αδύνατο. Κατά συνέπεια οι τομές τοποθετήθηκαν λαμβάνοντας υπόψιν αυτούς τους ανεπιθύμητους παράγοντες.

Οι τομές της γεωηλεκτρικής έρευνας φαίνονται στην **Εικόνα 3.1**. Η πρώτη (profile 1) έγινε ΒΑ του χώρου απόθεσης όπου αναμενόταν η εισροή μη μολυσμένου

νερού. Το μήκος της τομής ήταν 200 μ. Οι επόμενες δύο τομές τοποθετήθηκαν στις περιοχές όπου αναμενόταν έντονη επίδραση από τα στείρα. Η δεύτερη τομή (profile 2), ίδιου μήκος με την πρώτη τομή, τοποθετήθηκε δυτικά του σωρού και παράλληλα του ποταμού Odra. Η τρίτη τομή (profile 3) έγινε στο νότιο τμήμα του σωρού. Το μήκος του ήταν 100 μ. Οι τομές έγιναν σε σημείο που δεν υπήρχαν ανθρωπογενείς πηγές θορύβου.

Η γεωηλεκτρική έρευνα εκτελέστηκε χρησιμοποιώντας ένα σύστημα απεικόνισης LUND (ABEM) και μη-πολούμενα ηλεκτρόδια Cu-CuSO₄. Για τις μετρήσεις, εφαρμόστηκε η διάταξη δίπολο δίπολο με διάστημα ηλεκτροδίων 5m (profiles 1 & 2) και 2.5 μ (profile 3). Η διάταξη επιλέχτηκε σε σχέση με τη χαμηλή ηλεκτρομαγνητική σύζευξη, κάτι που είναι βασικό για την έρευνα. Η εφαρμοζόμενη ένταση ήταν 10-200 mA, αλλά το ρεύμα σε σειρά ήταν 100-200 mA. Ο χρόνος έναρξης/λήξης τέθηκε σε 2" και η αρχική καθυστέρηση ανήλθε σε 10 ms. Η φορτιστικότητα μετρήθηκε σε δέκα παράθυρα των 20 ms έκαστο.

Η επεξεργασία των στοιχείων έγινε χρησιμοποιώντας το λογισμικό Res2Dinv. Αρχικά, επεξεργαστήκαν μόνο τα δεδομένα της ειδικής αντίστασης, με σκοπό να ληφθούν τμήματα με το μέγιστο βάθος και την μέγιστη ανάλυση. Εν συνεχεία τα δεδομένα IP επεξεργάστηκαν ταυτόχρονα. Για την ανάλυση της φορτιστικότητας επιλέχθηκε το χρονικό διάστημα 50-150 ms. Όλες οι μετρήσεις εκτελέστηκαν σε σύντομη διάρκεια σε παρόμοιες καιρικές συνθήκες.

3.1.5 Αποτελέσματα της έρευνας

Η πρώτη τομή (profile 1) έγινε κοντά στον χώρο απόθεσης όπου η εισροή μη μολυσμένου νερού ήταν αναμενόμενη. Ένα ανάχωμα χωρίζει την πρώτη τομή από τον σωρό. Το νότιο μέρος της τομής (ξεκινώντας από 125 μ) βρίσκεται στην κλίση του αναχώματος. Οι τιμές ειδικής αντίστασης για αυτήν την τομή κυμαίνονται από 5 έως 210 Ωm. Μπορεί να παρατηρηθεί μια δομή 3 στρωμάτων (**Εικόνα 3.3**).

Το κατώτατο στρώμα με τη χαμηλότερη ειδική αντίσταση, η οποία συσχετίζεται με την ομαλά αυξανόμενη φορτιστικότητα, μπορεί να θεωρηθεί ως αργιλώδες Μειόκαινο ίζημα. Η οροφή του εμφανίζεται σε βάθος 13-15μ. Το πιεζόμετρο P-2, που τοποθετείται μεταξύ του αναχώματος και του σωρού κοντά στο νότιο τέλος της πρώτης τομής, σε ένα βάθος 10 μ. (υψόμετρο 183 μ), δεν εντόπισε την οροφή αυτού του στρώματος.

Επάνω από τα Μειόκαινα ιζήματα, βρέθηκε ένα στρώμα υψηλότερης ειδικής αντίστασης ($> 50 \Omega\text{m}$) και χαμηλής φορτιστικότητας. Μπορεί να ερμηνευθεί ως ένα διαπερατό στρώμα από χαλικώδη άμμο. Στο χαμηλότερο μέρος των υδροφόρων στρωμάτων παρατηρείται αύξηση στις τιμές της φορτιστικότητας λόγω της αυξανόμενης περιεκτικότητας σε άργιλο, σύμφωνα και με γεωλογικές πληροφορίες από το κοντινό πιεζόμετρο.

Κοντά στην επιφάνεια οι τιμές ειδικής αντίστασης μειώνονται, κάτι το οποίο είναι πιο ενδιαφέρον αν συνυπολογίσουμε την επέκταση της μόλυνσης. Ειδικότερα, μεγαλύτερη μείωση στην ειδική αντίσταση παρατηρείται στο νότιο μέρος της τομής.

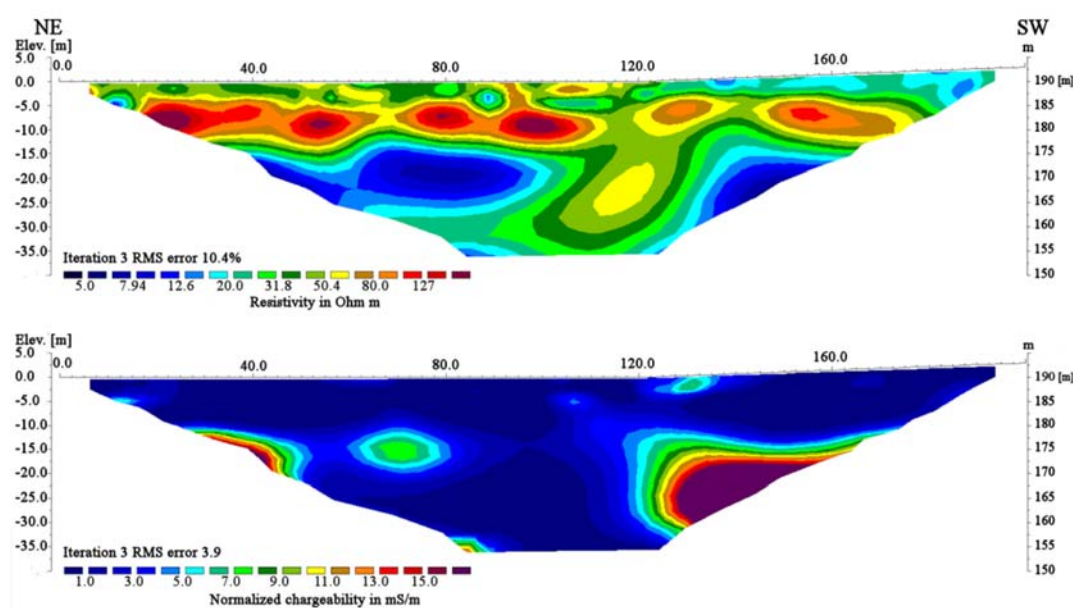
Οι τιμές της φορτιστικότητας σε αυτήν την περιοχή είναι πολύ χαμηλές τιμές ($< 2 \text{ mS/m}$) σε βάθος 10 μ . Στο ανώτατο στρώμα, η φορτιστικότητα αυξάνεται ελαφρώς σε 3-4 mS/m μόνο τοπικά (20-25 μ , 55-70 μ). Αυτό συσχετίζεται με την μέτρια ειδική αντίσταση (20-30 Ωm) και μπορεί να ερμηνευθεί ως ασυνεχής αργιλώδης κάλυψη. Η βόρεια περιοχή της πρώτης τομής, απεικονίζει τη λιθολογία των μη μολυσμένων ιζημάτων.

Στο μέρος της τομής 1, που ανήκει το ανάχωμα, το ανώτατο στρώμα χαρακτηρίζεται από τις χαμηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης. Σύμφωνα με τις μετρήσεις, ο όγκος από το ερευνημένο ανάχωμα μπορεί να θεωρηθεί ως ομοιόμορφος. Αύξηση στην τιμή της φορτιστικότητας, παρατηρούμε στο χαμηλότερο μέρος του αναχώματος, μεταξύ 120 και 145 μ .

Piezometer P-2	
γ_{25}	5,740-7,310 $\mu\text{S/cm}$
SO_4	2,208-2,939 mg/dm^3
Cl	594-637 mg/dm^3
Na	554-901 mg/dm^3
Mn	1.57-1.9 mg/dm^3
Fe	19-22 mg/dm^3
Cr_{org}	$> 0.2 \text{ mg/dm}^3$
Ni	$> 0.25 \text{ mg/dm}^3$

Πίνακας 3.1. Περιεκτικότητα σε μέταλλα του υδροφόρου, σύμφωνα με αναγνώσεις του πιεζομέτρου P-2 το 2006 (μέγιστες τιμές)

Η χαμηλή ειδική αντίσταση και οι χαμηλές τιμές φορτιστικότητας υποδηλώνουν την ύπαρξη μόλυνσης μέσα στον πυρήνα και στη βάση του αναχώματος. Φαίνεται να είναι πιθανό πως το ανάχωμα έγινε η τοπική πηγή μόλυνσης. Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώνεται από τις υδρογεωλογικές πληροφορίες. Δεδομένου ότι το ανάχωμα ήταν διαμορφωμένο το 2002, το πιεζόμετρο P-2 έδειξε πως υπάρχει μια μείωση της ποιότητας νερού (πίνακας 3.1). Η αύξηση θεικών και χλωριούχων ιόντων παρατηρείται από την κατεύθυνση της εισροής του καθαρού νερού. Η διήθηση, από τις βροχοπτώσεις, μέσω του υλικού του αναχώματος, μπορεί να προκαλέσει έκπλυση των διαλυτών ενώσεων από τις αποθέσεις.



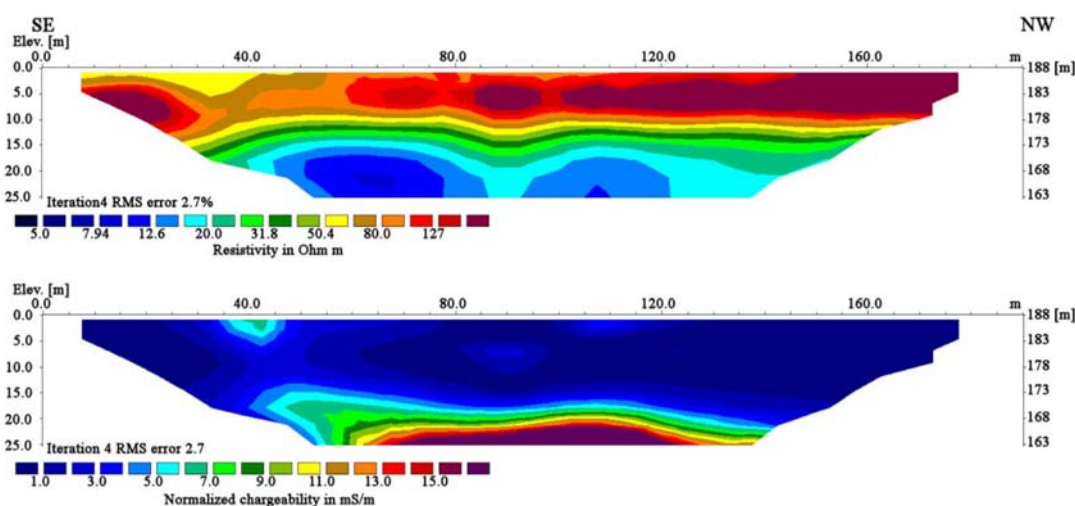
Εικόνα 3. 3: Ειδική αντίσταση και φορτιστικότητα της τομής 1

Οι τομές 2 και 3 έγιναν στην κοίτη του ποταμού. Η τομή 2 είναι κοντά στην περιοχή που παρουσιάζεται η γεωλογική διατομή (Εικόνα 3.2). Το πάτωμα του διαπερατού στρώματος βρίσκεται σε ένα βάθος περίπου 12 μ. Για το στρώμα αυτό, οι τιμές ειδικής αντίστασης κυμαίνονται από 50 έως 300 Ωm (Εικόνα 3.4). Αυτές οι τιμές είναι αρκετά υψηλότερες από εκείνες που λήφθηκαν για την τομή 1. Αυτό δείχνει την εντονότερη κοκκοποίηση των ιζημάτων.

Οι τιμές φορτιστικότητας για σχεδόν ολόκληρο το στρώμα είναι πολύ χαμηλές (< 2 mS/m). Στις δύο θέσεις ακριβώς κάτω από την επιφάνεια (25-80 μ και 100-125 μ), η ελαφρώς χαμηλότερη ειδική αντίσταση συσχετίζεται με υψηλότερη φορτιστικότητα. Η πιθανή αιτία είναι η ακόμα μικρότερη κοκκομετρία. Παρόλο που η τομή 2 είναι στην περιοχή του πιεζομέτρου P-5, κι από τις γεωτρήσεις βρέθηκε

άργυλος στο ανώτατο στρώμα, δεν βρέθηκε να υπάρχει στεγανότητα. Σύμφωνα με γεωλογικά στοιχεία αυτή η κάλυψη εξαφανίζεται κοντά στην κοίτη του ποταμού Odra. Η εναλλαγή, η οποία παρατηρείται σε βάθος 25-75 μ. και για την ειδική αντίσταση (μείωση) και για την φορτιστικότητα (αύξηση), φαίνεται να οφείλεται σε ζημιές από πλημμύρες, όπου στην συνέχεια, με τις εργασίες αποκατάστασης, τα κενά καλύφθηκαν με λεπτόκκοκο και μικρής διαπερατότητας υλικό.

Στην ειδική αντίσταση και στην φορτιστικότητα, δεν φαίνεται να υπάρχει ρύπανση. Οι τιμές ειδικής αντίστασης που μετρήθηκαν επάνω από την οροφή του Μειόκαινου για όλο το τμήμα παραμένει στο ίδιο υψηλό επίπεδο. Αυτό φαίνεται κάπως να εκπλήσσει, λόγω των χημικών αναλύσεων των δειγματοληψιών ύδατος από το πιεζόμετρο P-5 (Εικόνα 3.1), όπου γίνονται αντιληπτές οι αυξήσεις των συγκεντρώσεων σε μέταλλα, η αυξημένη τιμή της αγωγιμότητας, και μια παρουσία ουσιών που προέρχονται από τον χώρο απόθεσης.



Εικόνα 3. 4: Ειδική αντίσταση και φορτιστικότητα της τομής 2

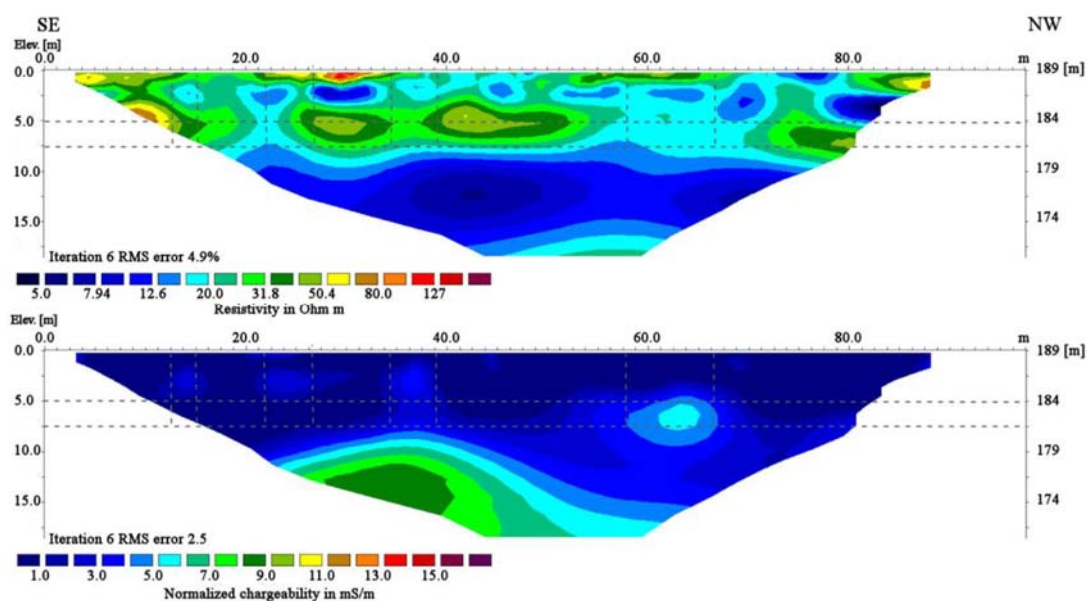
Από ηλεκτρική τομογραφία που διενεργήθηκε πάνω από τα αντιπλημμυρικά έργα (δεν αποτελεί μέρος της παρούσας μελέτης), κοντά στο πιεζόμετρο P-5, φάνηκε η ύπαρξη μιας ζώνης χαμηλής ειδικής αντίστασης (5-20 Ωm) ακριβώς κάτω από την επιφάνεια, με μήκος 105 μ και πάχος 5 μ. Το προαναφερθέν στρώμα από τους ερευνητές ήταν ερμηνευμένο ως μολυσμένο υδροφόρο στρώμα. Τα αποτελέσματα όμως των εργαστηριακών ηλεκτρικών δοκιμών των δειγματοληψιών ύδατος σε βάθος 3μ. έδειξαν ότι η τιμή της ειδικής αντίστασης κυμαινόταν στα 305 Ωm (Marcak H. et al, 2011).

Κατά συνέπεια, μπορούμε να πούμε ότι η μέθοδος ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης και μόνο στην περιοχή ήταν αρκετά αναξιόπιστη. Ο συνδυασμός όμως με

την μέθοδο της επαγόμενης πολικότητας θα μπορούσε να εξηγήσει γιατί υπάρχει αυτή η απόκλιση στις μετρήσεις, επειδή θα επιβεβαίωνε ή θα απέκλειε την ύπαρξη των αργιλωδών ιζημάτων.

Η απουσία της ζώνης που χαρακτηρίζεται από την χαμηλή ειδική αντίσταση στην τομή 2 μπορεί να εξηγηθεί με την πολύ μεγάλη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, σε σχέση με το πάχος των παραπάνω στρωμάτων, που οδήγησε στην ανεπαρκή ανάλυση (τις πολύ χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης) από τη μέτρηση ειδικής αντίστασης.

Η τομή 3, έγινε κοντά στον ποταμό Odra μεταξύ της κοίτης του ποταμού και της όχθης του αντιπλημμυρικού αναχώματος. Μέχρι και το βάθος των 8-9m. παρατηρούνται πολύ χαμηλές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης. Το στρώμα αυτό της τομής 3 διαφέρει χαρακτηριστικά σε σύγκριση με το αντίστοιχο των δύο τομών που είδαμε με εξαίρεση το νότιο τμήμα της τομής 1 όπου οι τιμές της ειδικής αντίστασης είναι παραπλήσιες.



Εικόνα 3. 5: Ειδική αντίσταση και φορτιστικότητα της τομής 3

Η ειδική αντίσταση για το στρώμα που βρίσκεται επάνω από την οροφή του Μειόκαινου δεν υπερβαίνει τα 100 Ωm, ενώ στο μεγαλύτερο μέρος της τομής οι τιμές της ειδικής αντίστασης κυμαίνονται μεταξύ 13 – 40 Ωm. Το πιο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτής της τομής είναι μια ακολουθία από ανωμαλίες χαμηλών τιμών αντίστασης (< 15 Ωm) που μπορούν να παρατηρηθούν σε βάθος 2-4 m. Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα μπορεί να υποδεικνύει μόλυνση ή την παρουσία αδιαπέραστης ζώνης. Και οι δύο περιπτώσεις είναι ίσων πιθανοτήτων και

χωρίς την μέθοδο επαγόμενης πολικότητας δεν μπορούμε να αποκλείσουμε καμία από τις δύο.

Για τις περισσότερες από αυτές τις προαναφερθείσες ανωμαλίες κυρίως στο νοτιοανατολικό τμήμα της τομής, οι μικρότερες τιμές της ειδικής αντίστασης συσχετίζονται με μια αύξηση της φορτιστικότητας και έτσι καταλαβαίνουμε πως οφείλονται στα αργιλώδη εσωτερικά στρώματα και τις άμμους. Τα χαμηλής αντίστασης τμήματα της τομής προς βορειοδυτικά, (ξεκινώντας από τα 40 μ) δεν συσχετίζονται με αύξηση φορτιστικότητας. Επομένως, μπορούμε να πούμε ότι πρόκειται για μόλυνση. Το κοντινότερο πιεζόμετρο (P-5), το οποίο είναι σε μικρή απόσταση βόρεια της τομής, παρουσιάζουν αυξανόμενες τιμές Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} και Mn^{2+} , το οποίο επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της γεωηλεκτρικής έρευνας. Το πιεζόμετρο P-4 που τοποθετήθηκε κοντά στη γωνία νοτιοανατολικά του σωρού δείχνει επίσης την παρουσία ανεπιθύμητης διαρροής προς τον ποταμό.

3.1.6 Συμπεράσματα

Οι γεωηλεκτρικές έρευνες βόρεια και νότια του χώρου απόθεσης «Buków», επέτρεψαν να δείξουμε μερικές από τις διαπερατές ζώνες που εμφανίζεται η μόλυνση. Στη βόρεια πλευρά του σωρού η περιοχή χαρακτηρίζεται από χαμηλή ειδική αντίσταση και χαμηλή φορτιστικότητα καθώς βρίσκεται επάνω από την οροφή χονδρόκοκκου στρώματος, μέσα στο ανάχωμα. Το ανάχωμα που είναι χτισμένο από τα στείρα της εκμετάλλευσης, εμφανίστηκε να είναι πηγή της μόλυνσης. Στη νότια πλευρά του σωρού, όπου εμφανίζεται εντατικά η διήθηση της μόλυνσης προς τον ποταμό Odra, οι ζώνες διήθησης εξακριβώθηκαν σε ένα βάθος περίπου 2-4 μ. Η μόλυνση που εμφανίζεται στο νότιο σημείο από τον χώρο απόθεσης, φαίνεται να εμποδίζεται μερικώς από το φίλτρο που έχει τοποθετηθεί μεταξύ του αντιπλημμυρικού αναχώματος και του ποταμού. Τα συμπεράσματα της γεωηλεκτρικής μελέτης αντιστοιχούν με τα αποτελέσματα από τις υδρογεωλογικές μελέτες.

Εν κατακλείδι, η απόθεση από τα στείρα της εκμετάλλευσης του άνθρακα, έχει αντίκτυπο στην ποιότητα νερού τόσο στο έδαφος όσο και υπογείως. Ο συνδυασμός ειδικής αντίστασης και επαγόμενης πολικότητας μπορεί να θεωρηθεί ένα πολύτιμο όργανο στις περιβαλλοντικές μελέτες, ειδικότερα σε περιοχές με περίπλοκη λιθολογική δομή.

3.2 Έρευνα για τον εντοπισμό του μετώπου υφαλμύρισης σε παράκτια ζώνη στην Ροδόπη

(Evangelos C. Galazoulas & Yannis C. Mertzanides & Christos P. Petalas & Evangelos K. Kargiotis, February 2015)

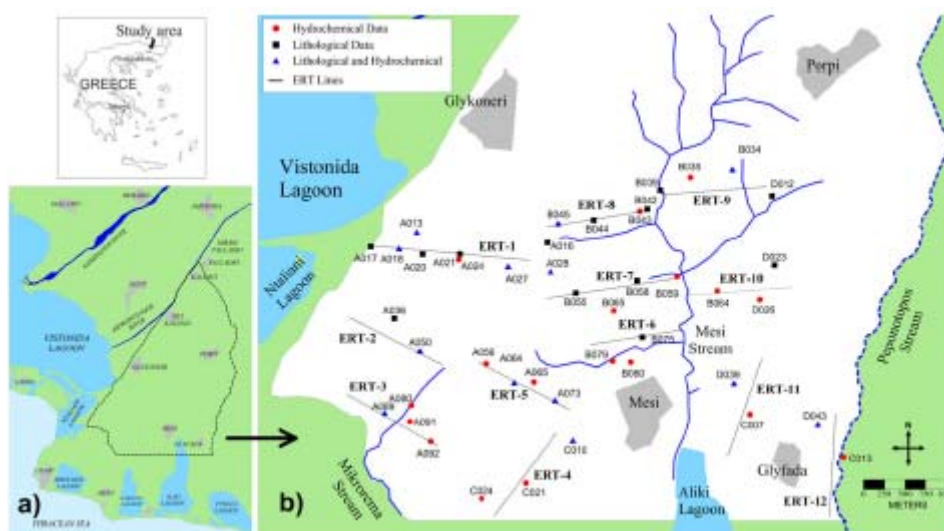
3.2.1 Εισαγωγή

Η υπερεκμετάλλευση των υπόγειων γλυκών νερών κοντά στην παράκτια περιοχή της Ροδόπης σε συνδυασμό με την επακόλουθη παρείσφρηση αλμυρού νερού, έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση των φυσικών οικοσυστημάτων (Ranjana et al, 2006), Τα κοινωνικοοικονομικά αντίκτυπα στις τοπικές κοινότητες εκφράζονται μέσω της πτώσης της διαθεσιμότητας του γλυκού νερού και την μείωση της γεωργικής παραγωγικότητας (Beltran, 1999 Tuong et al, 2003, Pisinaras et al, 2010). Επομένως, η ανάγκη για μια λεπτομερή περιγραφή των υδροφόρων στρωμάτων και ο συνεχής ποιοτικός έλεγχος, είναι κρίσιμοι σε κάθε παράκτια ζώνη, προκειμένου να εφαρμοστούν κατάλληλες ρυθμιστικές πολιτικές.

Ο στόχος αυτής της μελέτης ήταν να ερευνηθούν τα φαινόμενα υφαλμύρισης υπόγειων νερών ενός παράκτιου υδροφόρου στρώματος στο νότια περιοχή της Ροδόπης, βορειοανατολικά της Ελλάδας. Για την εξαγωγή των ηλεκτρικών τομογραφιών λήφθηκαν υπόψη τα λιθολογικά και φυσικοχημικά δεδομένα της περιοχής (η οποία υπόκειται σε υπερεκμετάλλευση τα τελευταία 35 έτη) για να οριοθετηθεί έτσι με σαφήνεια η γεωμετρία του συστήματος των υπόγειων νερών όπως επίσης κι η έκταση της διεπαφής μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού. Η έρευνα αυτή περιλαμβάνει συνολικά 12 βαθιές τομές, που καλύπτουν μια απόσταση περίπου 15 χλμ. Για την λιθολογία της περιοχής αντλήθηκαν στοιχεία κι από ένα σύνολο 45 γεωτρήσεων. Ακόμη, υπήρχαν 31 ποιοτικά δείγματα υπόγειων νερών και δεδομένα γεωφυσικών διαγραφιών με ακτίνες γάμμα. Η χρήση των γεωηλεκτρικών τομών σε συνδυασμό με ένα μεγάλο αριθμό υδρογεωλογικών στοιχείων, μπορούν επιτυχώς να σκιαγραφήσουν τη γεωμετρία των υδροφόρων στρωμάτων, όπως επίσης και να προσδιορίσουν τα όρια των υδραυλικών τάσεων.

3.2.2 Περιοχή της έρευνας

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο νότιο τμήμα της ανατολικής περιοχής της Μακεδονίας και της Θράκης στην βόρεια Ελλάδα, και συνίσταται μέρος ενός ευρύτερου συστήματος υδροφόρων στρωμάτων που επεκτείνεται στην περιφερειακή παράκτια ζώνη της Ροδόπης (**Εικόνα 3.6α**). Τα γεωγραφικά όρια, που διαγράφονται με τη διαστιγμένη γραμμή στην **Εικόνα 3.6**, επιλέχθηκαν βασισμένα σε υδρογεωλογικά και υδροχημικά δεδομένα προκειμένου να εσωκλείσουν την περιοχή όπου έχει παρατηρηθεί παρείσφρηση αλμυρού νερού στο υδροφόρο στρώμα και για να αντιπροσωπεύσουν τα φυσικά ή τεχνητά όρια ροής υπόγειων νερών. Τα σημαντικά υδρολογικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της επιφάνειας περιλαμβάνουν τις πολυάριθμες λιμνοθάλασσες που υπάρχουν στην παράκτια ζώνη και στους δύο ποταμούς, Κομψάτος και Ασπροπόταμος, που βρίσκονται στη λίμνη Βιστωνίδα.

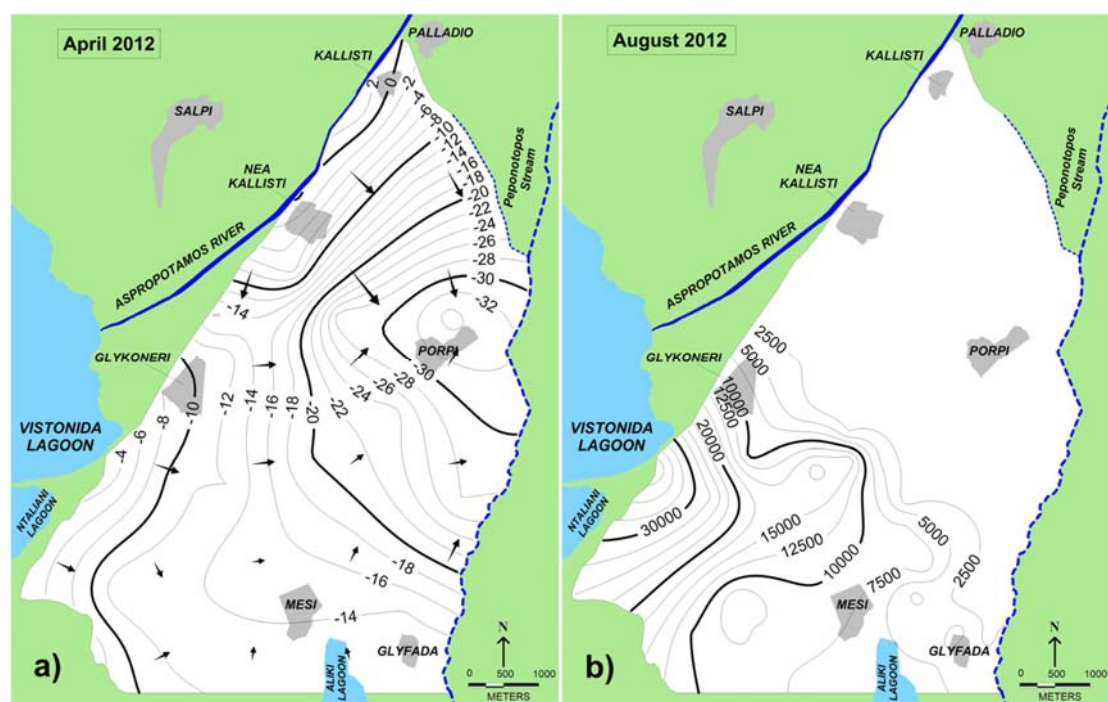


Εικόνα 3. 6: Α) Μια θέση περιοχής μελέτης και μια θέση των γραμμών ERT, Β) θέση των φρεατίων και του κεντρικού αγωγού βαθμολόγησης γραμμών ERT και τα κύρια ρεύματα στην περιοχή

3.2.3 Γεωλογική δομή

Ένα ρήγμα κατά μήκος του άξονα Γλυκονέρι-Παλλάδιο, χωρίζει τα Πλειοπλειστοκαινικά αλλούβια ιζήματα του ποταμού Κομψάτου βορειοανατολικά, και τις αποθέσεις του ανώτερου Μειόκαινου νοτιοδυτικά. Οι αποθέσεις του ανώτερου Μειόκαινου αποτελούνται από χονδρόκοκκα αλλούβια μη σταθεροποιημένα ιζήματα (άμμοι, αμμοχάλικα και κροκάλες) μέσα σε περιβάλλον όπου υπάρχουν άργιλοι. Δύο

κύρια υδροφόρα στρώματα μπορούν να εντοπιστούν στο ανώτερο Μειόκαινο. Το πρώτο έχει μέσο πάχος 35 μέτρων, ενώ το δεύτερο έχει πάχος 50-100 μέτρων. Η **Εικόνα 3.7a** παρουσιάζει την υδραυλική διανομή και τις κατευθύνσεις ροής των υπόγειων νερών, όπως έχουν καταγραφεί από ένα δίκτυο 25 γεωτρήσεων, κατά τη διάρκεια του Απριλίου του 2012. Η πιεζομετρική επιφάνεια είναι αρκετά κάτω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας, με τις υψηλότερες τιμές να εμφανίζονται παράλληλα με το ρήγμα και τις χαμηλότερες ανατολικά. Στην **Εικόνα 3.7b**, παρουσιάζεται η χωρική διανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για το υδροφόρο στρώμα. Είναι εμφανές, πως ο νότιος άξονας στο Γλυκονέρι, επιτρέπει στο αλμυρό νερό να διεισδύσει στο σύστημα των υπόγειων νερών το οποίο συνεχίζει προς τα ανατολικά. Η προέλευση του αλμυρού νερού είναι από ένα υδροφόρο στρώμα το οποίο βρίσκεται κάτω από τη Βιστωνίδα και τροφοδοτείται κάθετα από αυτήν (Petalas, 1997). Οι μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας υπερβαίνουν το 1 mS/cm στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης, επιτυγχάνοντας μέγιστα 45 mS/cm κοντά στον κολπίσκο της λίμνης.



Εικόνα 3. 7: Α) πορείες πιεζομετρικών χαρτών και ροής για το περιορισμένο υδροφόρο στρώμα κατά τη διάρκεια της διανομής του Απριλίου 2012, Β) Διανομή των ηλεκτρικών τιμών αγωγιμότητας για το περιορισμένο υδροφόρο στρώμα κατά τη διάρκεια του Αύγουστο 2012

3.2.4 Γεωηλεκτρική έρευνα

Η ηλεκτρική γεωφυσική έρευνα ειδικής αντίστασης σχεδιάστηκε λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα που προϋπήρχαν από τις γεωτρήσεις, τα φυσικοχημικά και πιεζομετρικά στοιχεία, και πραγματοποιήθηκε μεταξύ του Δεκεμβρίου 2011 και του Μαΐου 2013. Οι θέσεις γραμμών ERT παρουσιάζονται στην **Εικόνα 3.6b**. Οι πρώτες τομές ήταν είτε σε θέσεις όπου υπήρχε μεγάλος όγκος υδρογεωλογικών πληροφοριών ή σε θέσεις όπου ήταν γνωστά ελάχιστα στοιχεία. Η σημαντική υφαλμύριση που πραγματοποιείται στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής ευνοεί την επιλογή της γεωηλεκτρικής μεθόδου, η οποία είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις υψηλές αντιθέσεις υφαλμύρισης υπόγειων νερών.

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες της περιοχής, όπως οι γεωτρήσεις κι η έλλειψη κατάλληλης διαχείρισης και εποπτείας, ενίσχυσαν την πολυπλοκότητα των υδροφόρων στρωμάτων. Με τις λεπτομερείς τομές ERT κατέστη δυνατό να χαρτογραφηθούν οι υπόγειες δομές κι οι διαδικασίες που πραγματοποιούνται στο σύστημα, όπως είναι οι φυσικές ζώνες επαναφορτίσεων, του γλυκού/αλμυρού νερού κι η σκιαγράφηση των ορίων. Γι' αυτό τον λόγο, σε αυτήν την μελέτη τα γεωφυσικά περάσματα δεν στρέφονται απλώς στα όρια του γλυκού/αλμυρού νερού, αλλά καλύπτουν πλήρως το υποβιβασμένο μέρος του υδροφόρου στρώματος σε οριζόντιους και κάθετους άξονες, δείχνοντας έτσι όλες τις υδρογεωλογικές διαδικασίες που πραγματοποιούνται στο σύνθετο παράκτιο σύστημα υδροφόρων στρωμάτων.

Οι τομές 1, 2, 3, 4, 11 και 12 τοποθετήθηκαν κάθετα στο δυτικό και νότιο όριο υδροφόρων στρωμάτων για να ερευνηθούν οι πλευρικές επαναφορτίσεις κι η γεωμετρία των υδροφόρων στρωμάτων. Οι τομές 5, 6, 7 και 8 τοποθετήθηκαν εσωτερικά της περιοχής μελέτης για να καλύψουν πλήρως την περιοχή και για να εξηγήσουν τις διαφορούμενες μετρήσεις που προϋπήρχαν. Τέλος, οι τομές 9 και 10 επεκτάθηκαν στην ανατολική άκρη της περιοχής για να ερευνήσουν την διεπαφή του αλμυρού/γλυκού νερού και για να σκιαγραφήσουν το βαθμό παρείσφρησης του αλμυρού νερού. Οι μετρήσεις έγιναν χρησιμοποιώντας το όργανο ABEM TERRAMETER LS, όπου είναι ένα σύστημα 4 καναλιών με τη δυνατότητα τοποθέτησης 64 ηλεκτροδίων, μια συσκευή ρεύματος 250 W, 2.5 A και 600 V, και τέσσερα καλώδια που χρησιμοποιήθηκαν στην επιτόπια έρευνα. Η διάταξη που

επιλέχθηκε ήταν δίπολο-δίπολο, λόγω του επαρκούς βάθους της έρευνας και της ευαισθησίας στις οριζόντιες αλλαγές στην ειδική αντίσταση που προκαλείται από την πλευρική παρείσφρηση αλμυρού νερού. (Reynolds, 2011).

Το διάστημα ηλεκτροδίων ήταν 15 μέτρα. Τα δεδομένα αναλύθηκαν με την χρήση του προγράμματος RES2DINV.

3.2.5 Αποτελέσματα της έρευνας

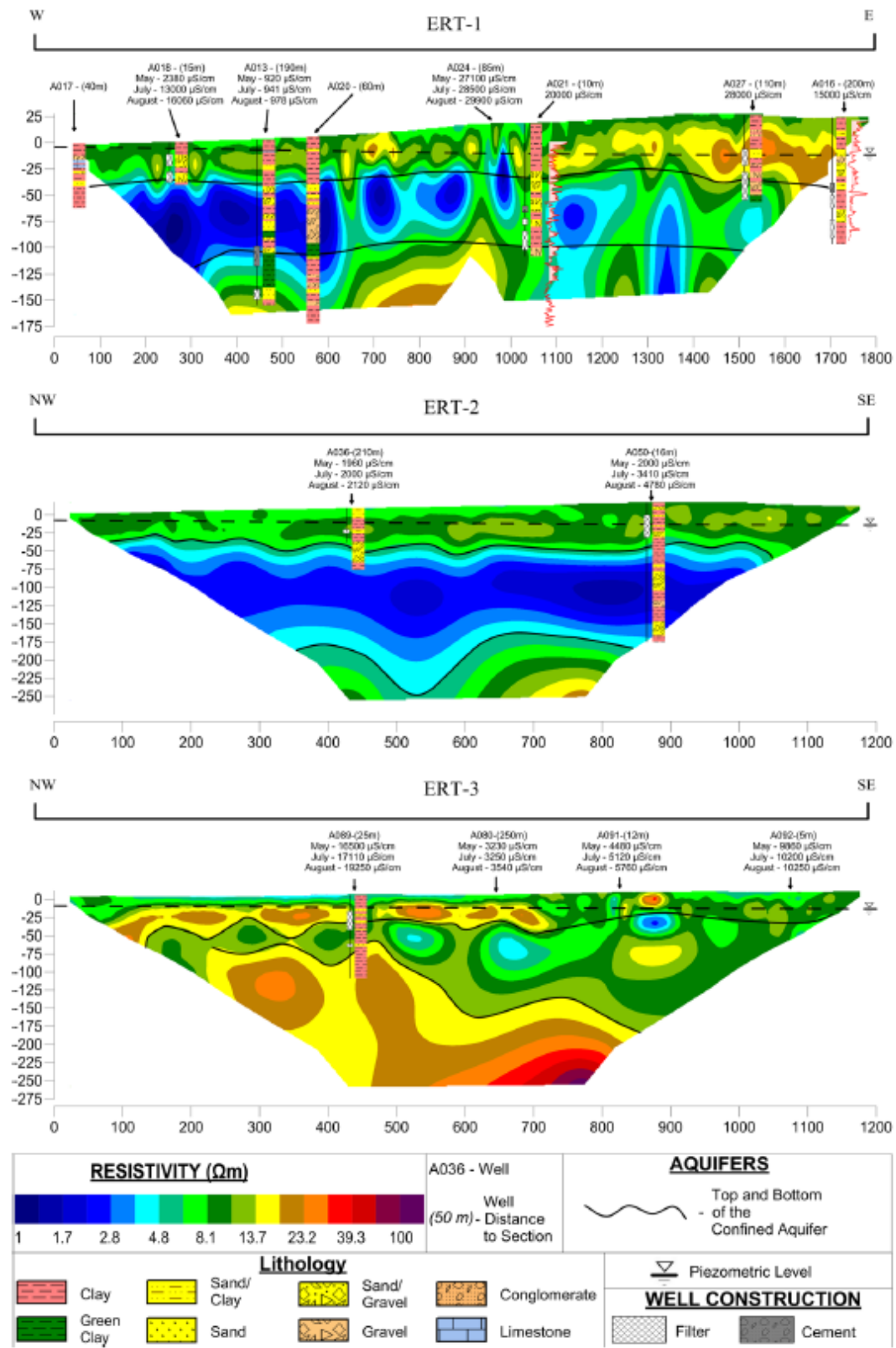
Στον πίνακα 3.2 φαίνονται τα χαρακτηριστικά των τομών ERT που παρουσιάζονται σε αυτήν την μελέτη. Η προ-επεξεργασία του αρχικού συνόλου δεδομένων οδήγησε στον αποκλεισμό των μη ρεαλιστικών υψηλών ή χαμηλών μετρήσεων ειδικής αντίστασης από τη διαδικασία αναστροφής. Οι αποκλεισμένες τιμές αποτελούσαν λιγότερα από το 1% του συνολικού αρχικού συνόλου δεδομένων για όλες τις τομές. Οι τιμές σφάλματος κυμαίνονται μεταξύ 2.6 και 13.8% σε όλες τις τομές ERT, υποδηλώνοντας την καλή ποιότητα των μετρήσεων. Οι υψηλότερες τιμές σφάλματος εμφανίστηκαν στις τομές που πραγματοποιήθηκαν το καλοκαίρι, όπου το έδαφος ήταν πολύ ξηρό, ενώ οι χαμηλότερες κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου και του χειμώνα. Η υψηλότερη τιμή σφάλματος (13.8%) προήλθε από μέτρηση που διεξήχθη στις 11 Αυγούστου (η ξηρότερη ημέρα του έτους).

Γραμμή έρευνας	Ημερομηνία μέτρησης	Σχηματισμός παράταξης	Απόσταση ηλεκτροδίου (μέτρα)	Αριθμός ηλεκτροδίων	Μήκος (μέτρα)	Αριθμός σημείων δεδομένων	Αριθμός Επαναλήψεων	Λάθος RMS
ERT-1	Αύγουστος 2012	Δίπολο-Δίπολο	15	121	1800	1641	5	13,8%
ERT-2	Μάρτιος 2013	Δίπολο-Δίπολο	15	81	1200	1460	5	5,4%
ERT-3	Απρίλιος 2013	Δίπολο-Δίπολο	15	81	1200	1469	5	3,9%
ERT-4	Απρίλιος 2013	Δίπολο-Δίπολο	15	81	1200	1469	5	3,2%
ERT-5	Μάρτιος 2013	Δίπολο-Δίπολο	15	80	1185	1423	5	2,6%
ERT-6	Απρίλιος 2013	Δίπολο-Δίπολο	15	71	1050	1122	5	7,1%
ERT-7	Απρίλιος 2013	Δίπολο-Δίπολο	15	101	1500	1763	5	4,7%
ERT-8	Δεκέμβριος 2011	Δίπολο-Δίπολο	15	81	1200	1090	5	9,5%
ERT-9	Φεβρουάριος 2013	Δίπολο-Δίπολο	15	81	1200	1349	5	5,2%
ERT-10	Απρίλιος 2013	Δίπολο-Δίπολο	15	81	1200	1314	4	9,6%
ERT-11	Απρίλιος 2013	Δίπολο-Δίπολο	15	81	1200	1332	5	5,2%
ERT-12	Μάιος 2013	Δίπολο-Δίπολο	15	81	1200	1305	4	10,1%

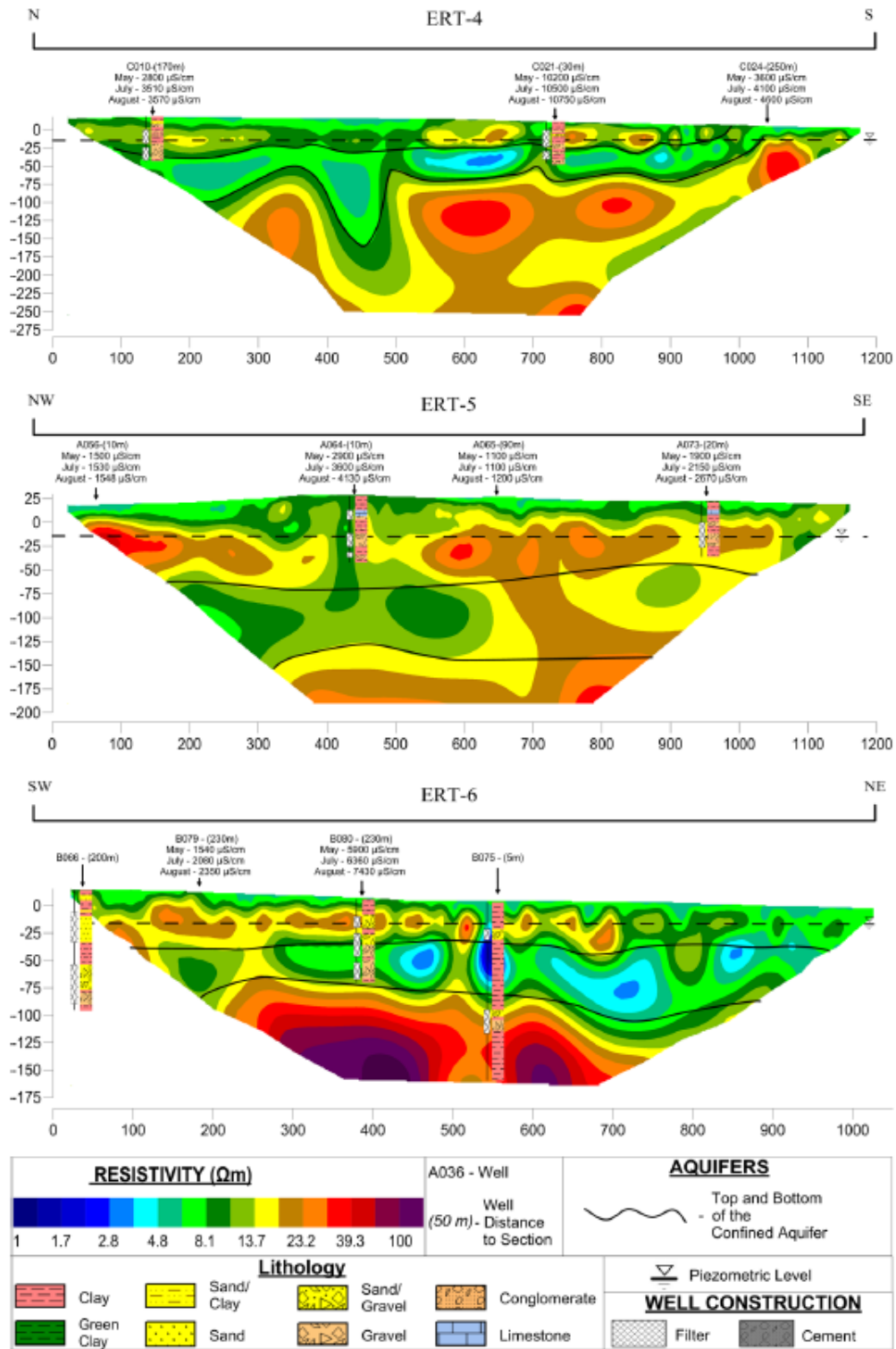
Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά των 12 τομών

Οι εικόνες 3.8, 3.9, 3.10 και 3.11, παρουσιάζουν δισδιάστατα τις τομές της ειδικής αντίστασης, μαζί με όλα τα διαθέσιμα υδρογεωλογικά στοιχεία. Τα δεδομένα των τομών συγκρίθηκαν με τα στοιχεία από τις γεωτρήσεις και τα στοιχεία ηλεκτρικής αγωγιμότητας υπόγειων νερών, προκειμένου να βαθμολογηθεί η δισδιάστατη παρουσίασή τους και να δημιουργήσουν έτσι ένα λεπτομερές εννοιολογικό πρότυπο για την μελέτη.

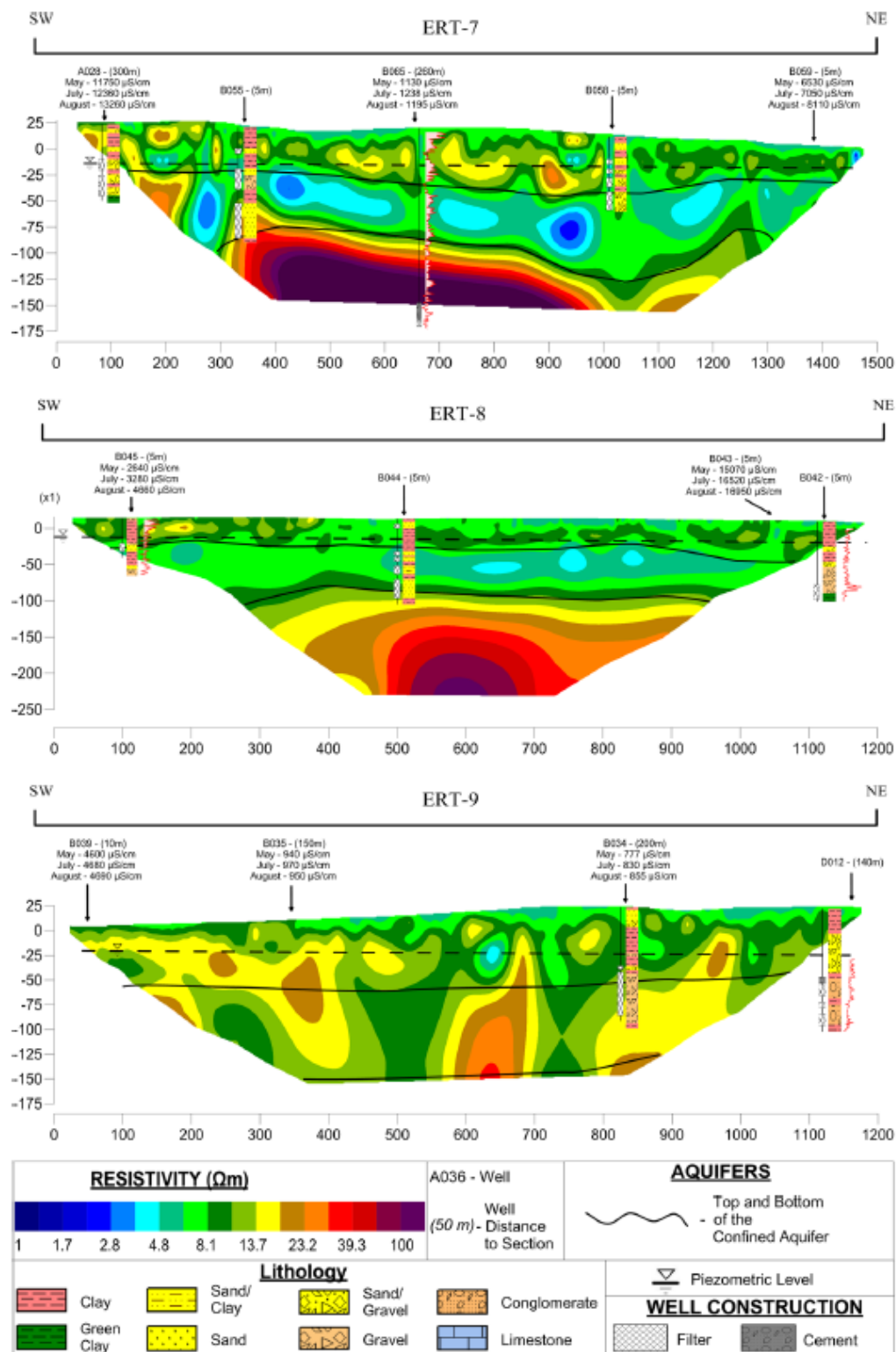
Οι τιμές ειδικής αντίστασης στην περιοχή που εξερευνήθηκε κυμαίνονται μεταξύ 1 και 150 Ωm , και εξαπλώνονται σε τρεις ζώνες ειδικής αντίστασης. Η ανώτατη ζώνη αποτελείται από τις χαμηλές έως τις μέσες τιμές ειδικής αντίστασης μεταξύ 7 και 40 Ωm , η ενδιάμεση ζώνη αποτελείται από τις πολύ χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης (<1 έως 7 Ωm), και η κατώτατη ζώνη με μέσες έως υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης που κυμαίνονται μεταξύ 12 και 150 Ωm . Κάθε στρώμα αντιστοιχεί σε μία μονάδα χωριστού υδροφόρου στρώματος, σε σχέση με την υδρογεωλογική ρύθμιση που περιγράφεται. Πιο συγκεκριμένα, το ανώτατο στρώμα αντιπροσωπεύει το ρηχό υδροφόρο στρώμα, η ενδιάμεση ζώνη αντιπροσωπεύει τον κεντρικό αγωγό του κλειστού συστήματος υδροφόρων στρωμάτων, και το χαμηλότερο στρώμα αντιπροσωπεύει το βαθύ κλειστό υδροφόρο στρώμα. Το ανώτατο στρώμα ειδικής αντίστασης μπορεί να χωριστεί σε δύο μεγάλες ομάδες: τη χαμηλή ομάδα ειδικής αντίστασης (<12 Ωm), που αντιπροσωπεύει κυρίως τα ιζήματα αργίλου με εναλλαγές από λεπτόκοκκη άμμο, και την υψηλή ομάδα ειδικής αντίστασης (12-40 Ωm), που αποδίδεται σε πιο χονδρόκοκκα ιζήματα που είναι γεμάτα με γλυκό νερό.



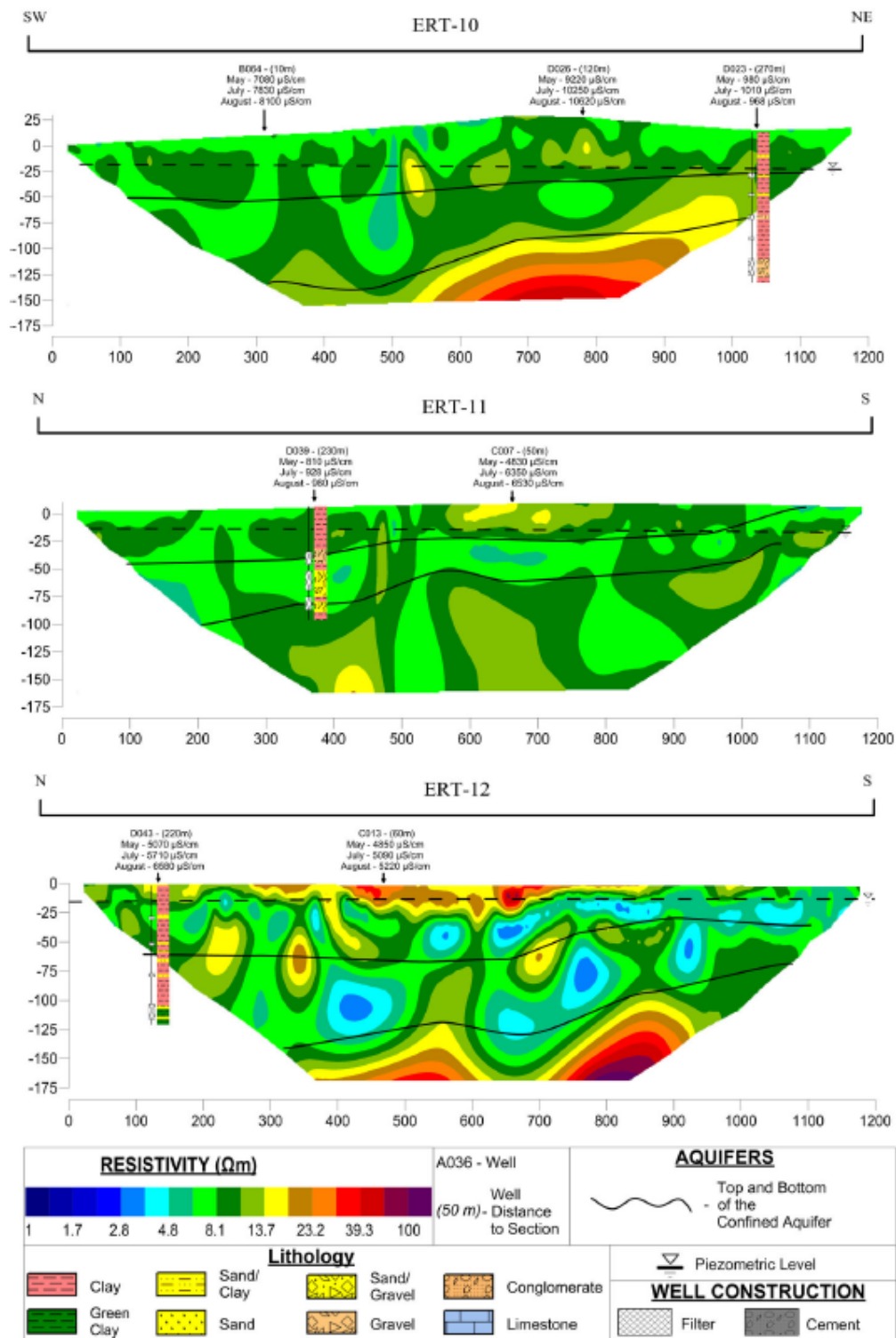
Εικόνα 3. 8: Γεωηλεκτρικές τομές ERT1, ERT2, ERT3



Εικόνα 3. 9: Γεωηλεκτρικές τομές ERT4, ERT5, ERT6

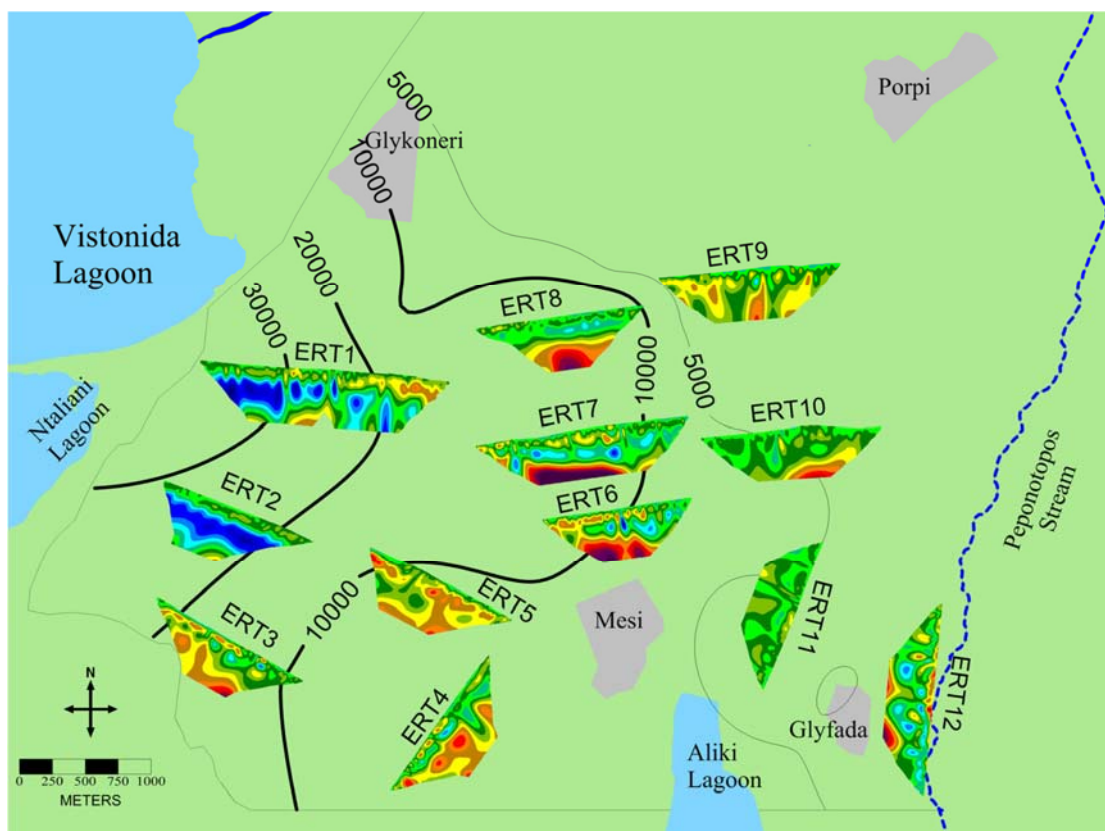


Εικόνα 3. 10: Γεωηλεκτρικές τομές ERT7, ERT8, ERT9



Εικόνα 3. 11: Γεωηλεκτρικές τομές ERT10, ERT11, ERT12

Στην **Εικόνα 3.12**, οι δισδιάστατες τομές ERT προβάλλονται πάνω από το χάρτη της περιοχής μελέτης. Είναι ευκρινές πως το αλμυρό νερό παρεισφρεί κατά μήκος ενός άξονα κοντά στη λιμνοθάλασσα των κολπίσκων της Βιστωνίδας (τομές ERT1 και ERT2) και συνεχίζει ανατολικά όπως φαίνεται στα σχεδιαγράμματα ERT6, ERT7 και ERT8. Στα νοτιοδυτικά, η άνοδος των υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων σε συνδυασμό με την παρουσία μιας κάθετης επαναφόρτισης της ζώνης του γλυκού νερού εμποδίζει την μετακίνηση του αλμυρού νερού με τη δημιουργία ενός υδραυλικού φράγματος. Περιορισμένη παρεισφρηση αλμυρού νερού παρατηρείται στα νότια εκτός από την περιοχή κοντά στην Γλυφάδα, όπου εκεί εμφανίστηκαν πολύ χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης (ERT12). Η τομή ERT10 καλύπτει την περιοχή όπου το αλμυρό νερό επεκτείνεται προς τα αποθέματα του γλυκού νερού κοντά στο χωριό Πόρπη. Η πλευρική απότομη αλλαγή στην ειδική αντίσταση μεταξύ των συνεχόμενων τομών ERT8 και ERT9 δείχνει ότι υπάρχει μία έντονη διεπαφή μεταξύ του αλμυρού νερού και του γλυκού νερού στο κύριο υδροφόρο στρώμα.



Εικόνα 3. 12: Τμήματα 2D ERT μαζί με τα κύρια περιγράμματα που περιορίζουν τον υδροφόρο ορίζοντα στην ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η κάθετη επαναφόρτιση μεταξύ των τριών υδροφόρων στρωμάτων είναι εφικτή στα σημεία όπου τα στρώματα του στεγανού αργίλου αποδυναμώνονται, επιτρέποντας έτσι στα υπόγεια νερά να ρεύσουν σύμφωνα με την διαφορά της υδραυλικής κλίσης. Οι πιεζομετρικές μετρήσεις έχουν δείξει πως η στάθμη νερού στο ρηχό υδροφόρο στρώμα είναι περίπου 10 μέτρα υψηλότερη έναντι του κεντρικού υδροφόρου στρώματος.

Κατά συνέπεια, τα υπόγεια νερά από το ρηχό υδροφόρο στρώμα επαναφορτίζουν το κεντρικό υδροφόρο στρώμα, μια διαδικασία που φαίνεται στις τομές 1,7,6, και 5, λόγω της διαφοράς ποιότητας των υπόγειων νερών μεταξύ των δύο υδροφόρων στρωμάτων. Στην τομή ERT5, μεταξύ 600 και 800 μέτρων, μια κάθετη δομή υψηλής ειδικής αντίστασης διακόπτει τη ζώνη χαμηλής ειδικής αντίστασης και ενώνει το ρηχό υδροφόρο στρώμα με το χαμηλότερο στρώμα υπογείων. Κάτι ανάλογο παρατηρείται και στο αρχικό τμήμα της τομής 6.

Στο τέλος της περιόδου άρδευσης, αυξάνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα των υπόγειων νερών, λόγω της μείωσης των ρηχών υδροφόρων στρωμάτων και την ακατάλληλη διάνοιξη γεωτρήσεων από τους κατοίκους. Η γεώτρηση A018, στην αρχή της περιόδου άρδευσης έδινε τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας 2380 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ενώ στο πέρας της περιόδου η τιμή ήταν περίπου 16.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Τα υδρογεωλογικά όρια μεταξύ των τριών υδροφόρων στρωμάτων είναι εμφανή από τη συνεχή γραμμή που αντιπροσωπεύει την αντίθεση στις τιμές ειδικής αντίστασης μεταξύ τους. Τα βάθη υδροφόρων στρωμάτων είναι τοποθετημένα μεταξύ -100 και -150 μέτρων με τα υψηλότερα βάθη να παρουσιάζονται στην τομή ERT2. Στις τομές ERT3, ERT4 και ERT11, τα βάθη υπογείων υδροφόρων στρωμάτων μειώνονται σημαντικά. Αυτό αποδίδεται σε ένα σημαντικό ρήγμα παράλληλο στο νότιο όριο της περιοχής, ακολουθώντας έτσι την στρωματογραφία που υπάρχει. Η κάθετη αλλαγή μεταξύ 400 και 500 μέτρων που παρατηρείται στην τομή ERT4 μπορεί να οφείλεται σε μια ανωμαλία που επιτρέπει στο υφάλμυρο νερό να διηθηθεί μέσω των ιζημάτων.

3.2.6 Συμπεράσματα

Η υφαλμύριση ενός παράκτιου υδροφόρου στρώματος στη Ροδόπη μελετήθηκε συνδυαστικά από γεωφυσικές και υδρογεωλογικές έρευνες. Τα φαινόμενα υφαλμύρισης περιγράφηκαν από τις φυσικοχημικές μετρήσεις και τις

πιεζομετρικές παρατηρήσεις από τις ήδη υπάρχουσες γεωτρήσεις και από τομές ERT προκειμένου να ληφθεί μια σαφής εικόνα. Τα στοιχεία των τομών με το χαμηλό σφάλμα RMS, συγκρίθηκαν με τα φυσικοχημικά, τα λιθολογικά και με τα στοιχεία των γεωτρήσεων και παρατηρήθηκε ένας καλός συσχετισμός, ο οποίος μείωσε σημαντικά την αβεβαιότητα ερμηνείας. Οι δισδιάστατες τομές ειδικής αντίστασης αποκάλυψαν την παρουσία τριών σημαντικών ζωνών ειδικής αντίστασης: την ανώτατη, την από χαμηλή σε μεσαία ζώνη ειδικής αντίστασης, που είναι συσχετισμένη με το υδροφόρο στρώμα του γλυκού νερού (ιδιαίτερα το αγωγίμο ενδιάμεσο στρώμα που αντιστοιχεί στον κεντρικό σύστημα περιόρισε το υδροφόρο στρώμα και το κυρίως μέρος του αλμυρού νερού) και το από μέση σε υψηλή ζώνη ειδικής αντίστασης. Υπολογίστηκε επίσης κι η γεωμετρία του συστήματος υδροφόρων στρωμάτων, τα υδραυλικά όρια κι η έκταση της ζώνης μετάβασης. Η μελέτη περίπτωσης που παρουσιάζεται σε αυτό το έγγραφο διαφωτίζει τον μηχανισμό της υφαλμύρισης των παράκτιων υδροφόρων στρωμάτων στη νότια Ροδόπη, συνδυάζοντας την χρήση τομών ERT και των υδρογεωλογικών στοιχείων. Η προτεινόμενη διεπιστημονική προσέγγιση φαίνεται να παρέχει αξιόπιστες πληροφορίες για να υπάρξει ένα ρεαλιστικό εννοιολογικό πρότυπο για τα ζητήματα διαχείρισης των υδάτων καθώς επίσης και για να συμβάλει προς μια βιώσιμη διαχείριση των πόρων των υπόγειων νερών μέσα στις περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές.

3.3 Έρευνα για τον εντοπισμό του μετώπου υφαλμύρωσης σε παράκτια ζώνη κατά μήκος της Ιόνιας ακτής της περιοχής Βασιλικάτα στην Νότια Ιταλία

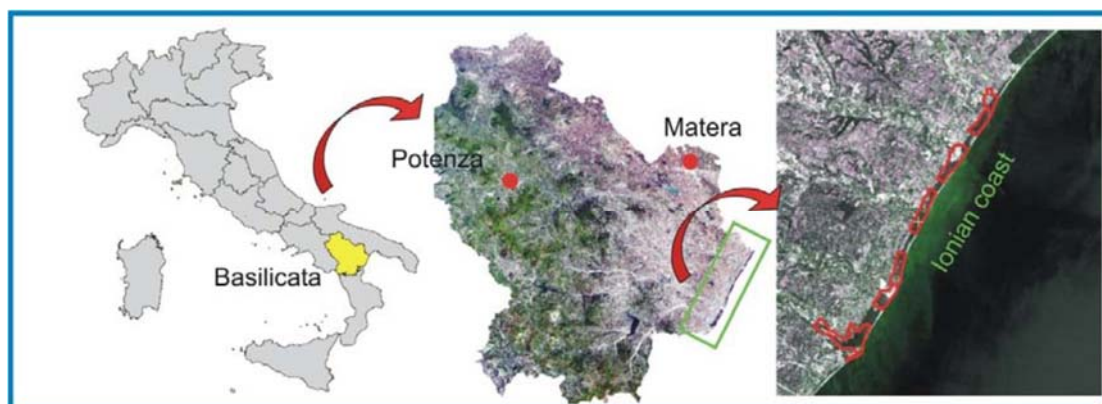
(A. Satriani, A. Loperte, M. Proto , Fifteenth International Water Technology Conference, IWTC-15 2011, Alexandria, Egypt)

3.3.1 Εισαγωγή

Κατά μήκος της ακτής υπάρχουν περιοχές κοινοτικού ενδιαφέροντος όπου οι ανθρώπινες δραστηριότητες (όπως η γεωργία κι ο τουρισμός) δημιουργούν επιπτώσεις. Σύμφωνα με τη σύσταση, σχετικά με την παράκτια ζώνη, της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, οι παραλιακές περιοχές είναι μεγάλης περιβαλλοντικής, οικονομικής, κοινωνικής και πολιτιστικής σημασίας. Επομένως, η εφαρμογή κατάλληλων ενεργειών ελέγχου και προστασίας, είναι θεμελιώδεις για τη συντήρησή τους και για την μελλοντική χρήση. Τέτοιες ενέργειες πρέπει να βασίζονται σε ένα οικοσύστημα για τη συντήρηση της παράκτιας ακεραιότητας του περιβάλλοντος και στον προγραμματισμό βιώσιμης διαχείρισης τόσο των θαλάσσιων πόρων όσο και των επίγειων.

Δυστυχώς, στις παράκτιες πεδιάδες, παρεισφρέει συχνά θαλάσσιο νερό, με αποτέλεσμα να προσβάλλει το υποκείμενο υδροφόρο στρώμα. Η έκταση της παρείσφρησης υφάλμυρου νερού στη παραλιακή περιοχή επηρεάζεται από τη φύση των γεωλογικών σχηματισμών, από την υδραυλική κλίση, το ποσοστό απόσυρσης των υπόγειων νερών και την επαναφόρτισή τους (Freeze & Cherry, 1979). Πολλές μελέτες έχουν στραφεί στο πρόβλημα παρείσφρησης του θαλάσσιου νερού, κι η εκτίμηση γίνεται με τις κλασσικές χημικές μεθόδους. Πολλοί ερευνητές, ως εναλλακτική λύση των παραδοσιακών μεθόδων έχουν εφαρμόσει τις γεωφυσικές τεχνικές και ιδίως τις γεωηλεκτρικές έρευνες σε διαφορετικές παραλιακές περιοχές σε όλο τον κόσμο, για να χαρακτηρίσουν την υδρογεωλογία ενός παράκτιου υδροφόρου στρώματος και, ιδίως, για να αξιολογήσουν την παρείσφρηση του θαλάσσιου νερού (Demirel Z., 2004, Duque et al, 2008, Frohlich et al, 2008, Petalas et al, 2006, Polemio et al, 2003, Somay et al, 2009).

Σε αυτή τη μελέτη παρουσιάζονται τα πρώτα αποτελέσματα μιας μελέτης βασισμένη στις γεωηλεκτρικές τομογραφίες για τον χαρακτηρισμό μιας παραλιακής περιοχής κατά μήκος της περιοχής Βασιλικάτα (**Εικόνα 3.13**).



Εικόνα 3. 13: Ιόνια παράκτια πεδιάδα της περιοχής του Βασιλικάτα (νότια Ιταλία)

Αυτή η περιοχή είναι ενδιαφέρουσα κυρίως από τα φαινόμενα παρείσφρησης θαλάσσιου νερού που προκαλεί σημαντικά οικολογικά και περιβαλλοντικά προβλήματα. Στην πραγματικότητα, η μόλυνση του γλυκού νερού μειώνει τη διαθεσιμότητα του νερού για την αστική και γεωργική χρήση και καθορίζει το ποσοστό αλατιού του εδάφους μειώνοντας έτσι την γονιμότητά του. Η θαλάσσια παρείσφρηση, επομένως, καθορίζει την αύξηση του όγκου του υπόγειου θαλασσινού νερού και την μείωση του όγκου του υπόγειου γλυκού νερού. Αυτό το φαινόμενο όχι μόνο προκαλείται από τη φυσική ισορροπία αλλά επιδεινώνεται από άνευ διακρίσεως χρήση γης από τον άνθρωπο. Το αποτέλεσμα είναι μια μείωση των αποθεμάτων του γλυκού νερού κατά μήκος της ακτής και ταυτόχρονα μια διαδικασία εδαφολογικής υποβάθμισης. Η κατάλληλη διαχείριση του προβλήματος απαιτεί αρχικά την γνώση του φαινομένου κι αυτή η μελέτη έχει σαν πρώτο στόχο, μέσω των τομών ERT, να καθορίσει την παρείσφρηση θαλάσσιου νερού που πηγαίνει εσωτερικά κατά μήκος της ακτής. Συγκεκριμένα, ερευνήθηκαν οι περιοχές κοντά στις εκβολές των ποταμών Bradano, Basento, Cavone και Agri, της περιοχής Βασιλικάτα, η οποία με τις περιβαλλόμενες δασικές περιοχές, προστατεύεται από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα.

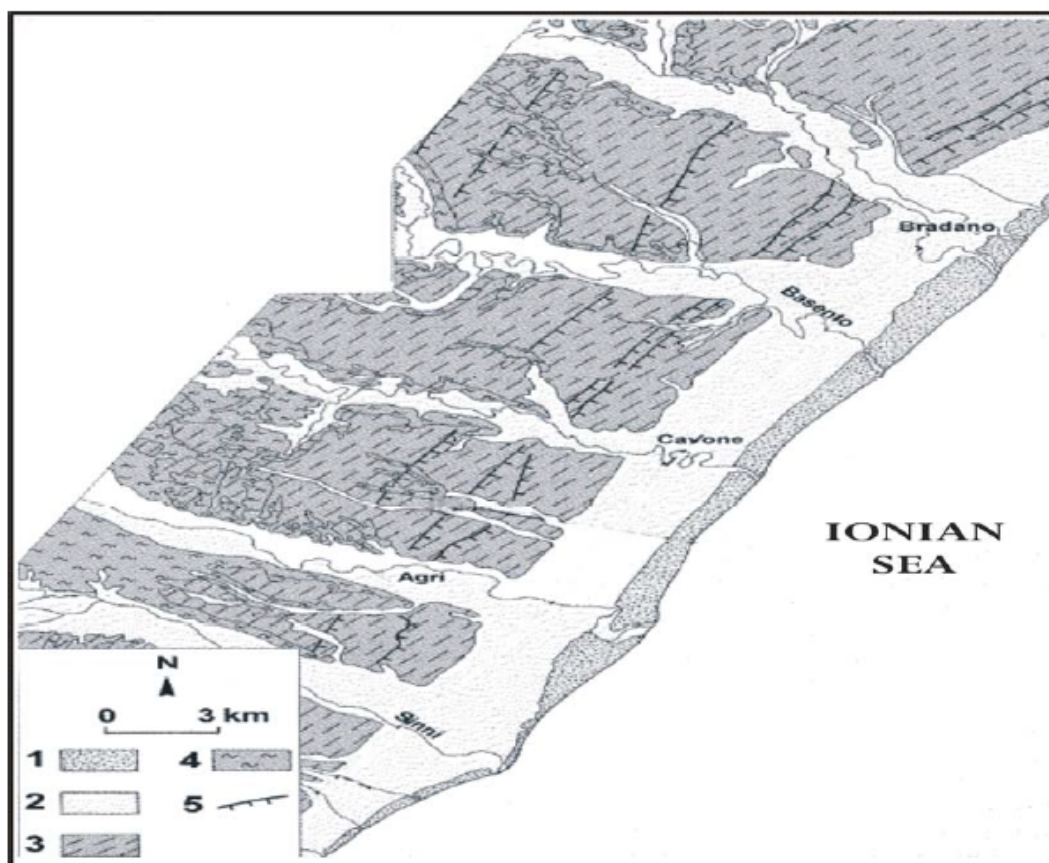
3.3.2 Περιοχή μελέτης

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στην πεδιάδα της περιοχής Βασιλικάτα, στη Νότια Ιταλία, οριακά μεταξύ των εκβολών του ποταμού Sinni δυτικά και των

εκβολών του ποταμού Bradano ανατολικά (Εικόνα 3.14). Το κλίμα της περιοχής είναι ημί - ξηρό με πολύ ζεστά καλοκαίρια.

Όσον αφορά στο γεωλογικό υπόβαθρο, η περιοχή βρίσκεται στο Bradanic Graben, οριοθετημένο ΒΑ από τους ασβεστόλιθους του ακρωτηρίου Murgian και ΝΔ από τα κλαστικά ιζήματα των Απεννινών (Ciaranfi et al, 1979, Tropeano et al, 2002). Το έδαφος πληρώνεται από μια ιζηματώδη ακολουθία (μέχρι 2-3 χλμ.) στην οποία, από την κορυφή έως το κατώτατο σημείο, συντίθεται από τους ακόλουθους γεωλογικούς σχηματισμούς (σχήμα 3.14):

- Θαλάσσιο Έδαφος (αποτελούνται από άμμο, συσσωματώματα κι ιλύες του Μέσου Πλειστόκαινου)
- Σχηματισμός υπο-Απεννίνων αργίλων (αργιλώδεις – ιλώδεις εναλλαγές του Πλειόκαινου - Μέσου Πλειστόκαινου.



Εικόνα 3. 14: Σχηματικός γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης: 1) παράκτιες αποθέσεις, 2) αλλούβιες, μεταβατικές και θαλάσσιες αποθέσεις, 3) θαλάσσιες αναβαθμίδες, 4) Σχηματισμός υπο-Απεννίνων αργίλων 5) θαλάσσια απότομη κατοφέρεια.

Όσον αφορά στα επίπεδα θαλάσσιων αποθέσεων, αυτά χωρίζονται σε 8 κατηγορίες ανάλογα με τα μορφολογικά τους χαρακτηριστικά. Οι επιφάνειες αυτών των επιπέδων διακόπτονται και από τις κοιλάδες και από τις μορφολογικές βαθμίδες που είναι στην ουσία οι θαλάσσιοι γκρεμοί. Αυτοί οι γκρεμοί είναι κατά προσέγγιση παράλληλοι στην ακτή και είναι στην ουσία η αρχαία ακτογραμμή (Paga, 1986). Οι αλλούβιες, παράκτιες και θαλάσσιες αποθέσεις που περιλαμβάνουν τις εκβολές και τα δελταϊκά συστήματα των ποταμών Sinni, Agri, Cavone, Basento και του Bradano, εμφανίζονται στις Απεννίνες. Οι αλλούβιες και θαλάσσιες αποθέσεις των ιζημάτων με το χαμηλότερο βάθος είναι μεγάλες σε πάχος, πιθανώς περισσότερο από 60μ, κι αποτελούνται κυρίως από τα ιλυώδη-αργιλώδη στρώματα και τα αμμώδη στρώματα. Τέλος, οι παράκτιες αποθέσεις αποτελούνται κυρίως από αμμώδεις παραλίες, πλάτους από 10 μέχρι 100μ, αλλά πηγαίνοντας προς την περιοχή Sinni, οι ιόνιες παραλίες γίνονται ακόμα πιο αμμώδεις (Cocco et al, 1975). Οι παραλίες εσωτερικά είναι περιορισμένες από τις ελώδεις περιοχές και από τους παράκτιους αμμόλοφους, με τους τελευταίους, οι οποίοι βρίσκονται παράλληλα στην ακτή, να έχουν μια ελαφριά επικάλυψη με σκυρόδεμα και να φτάνουν έτσι σε ύψος περίπου 10m (Polemio et al, 2003).

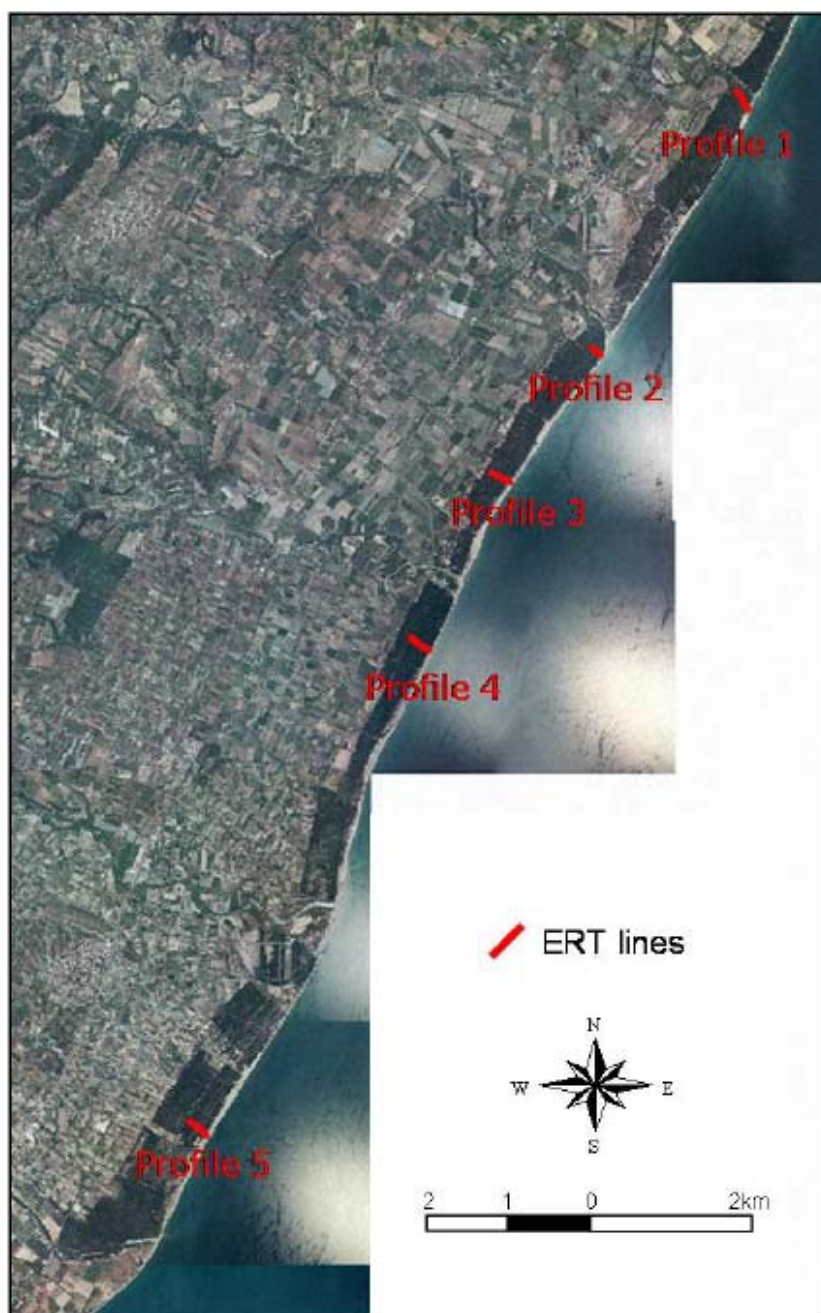
3.3.3 Γεωηλεκτρική έρευνα κι αποτελέσματα

Οι ηλεκτρικές τομογραφίες ειδικής αντίστασης είναι ένα χρήσιμο εργαλείο στον καθορισμό παρείσφρησης θαλάσσιου νερού στις παραλιακές περιοχές για την ικανότητά του να κάνει διακρίσεις σε μεγάλες αντιθέσεις ειδικής αντίστασης μεταξύ της παρουσίας θαλάσσιου νερού που μειώνει έντονα τις τιμές ειδικής αντίστασης και στα διαποτισμένα στρώματα γλυκού νερού. Επιπλέον, προκειμένου να αξιολογηθεί εάν αυτή η αντίθεση είναι σημαντική και δεν εξαρτάται από το γεωλογικό στρώμα, έχει γίνει και μια επιβεβαίωση των γεωηλεκτρικών μετρήσεων με κάποια χημική και φυσική ανάλυση των δειγμάτων εδάφους.

Η χρήση πολλών ηλεκτροδίων ειδικής αντίστασης, κατά την έρευνα, έχει επιτρέψει την απόκτηση στοιχείων με ελάχιστο κόστος και προσπάθεια. Οι ηλεκτρικές τομογραφίες ειδικής αντίστασης (ERT) πραγματοποιήθηκαν σε διάταξη Wenner-Schlumberger. Χρησιμοποιήθηκαν 48 ηλεκτρόδια τοποθετημένα ανά 10

μέτρα έτσι ώστε να διασαφηνιστεί η γεωμετρία του μετώπου παρείσφρησης θαλάσσιου νερού.

Η σειρά Wenner-Schlumberger παρέχει οριζόντια και κάθετη ανάλυση ενώ τα στοιχεία ερμηνεύτηκαν μέσω του προγράμματος RES2DINV (Loke, 1999). Οι γεωηλεκτρικές έρευνες πραγματοποιήθηκαν μεταξύ των εκβολών των ποταμών Agri και Bradano. Για να αξιολογηθεί το επίπεδο υφαλμύρωσης σε τέτοιες περιοχές, εκτελέστηκαν πέντε τομές ERT στην ακτογραμμή κατά τη διάρκεια της περιόδου Ιούνιος-Ιούλιος 2010 (**Εικόνα 3.15**).



Εικόνα 3. 15: Χάρτης θέσης των γεωηλεκτρικών τομών

Από τη βιβλιογραφία γνωρίζουμε ότι το θαλασσινό νερό έχει μια ειδική αντίσταση κάτω από 1Ωμ, ιδίως το θαλασσινό νερό έχει μια μέση ειδική αντίσταση 0.2 Ωμ (Bauer et al, 2006, Nowroozi et al, 1999), ενώ ένα στρώμα διαποτισμένο από το υφάλμυρο νερό και τα διαλυμένα στερεά έχει μια ειδική αντίσταση από 8Ωμ έως 50Ωμ (De Breuk et al, 2009, Nowroozi et al, 1999, Bauer et al, 2006). Επομένως, βασισμένοι σε αυτές τις τιμές της ειδικής αντίστασης των στρωμάτων που διαποτίζονται από το υφάλμυρο νερό όπως επίσης και σε βιβλιογραφικές τιμές ειδικής αντίστασης διαλυμένων στερεών, διακρίνονται σε αυτή τη μελέτη στρώματα που διαποτίζονται με το υφάλμυρο νερό.

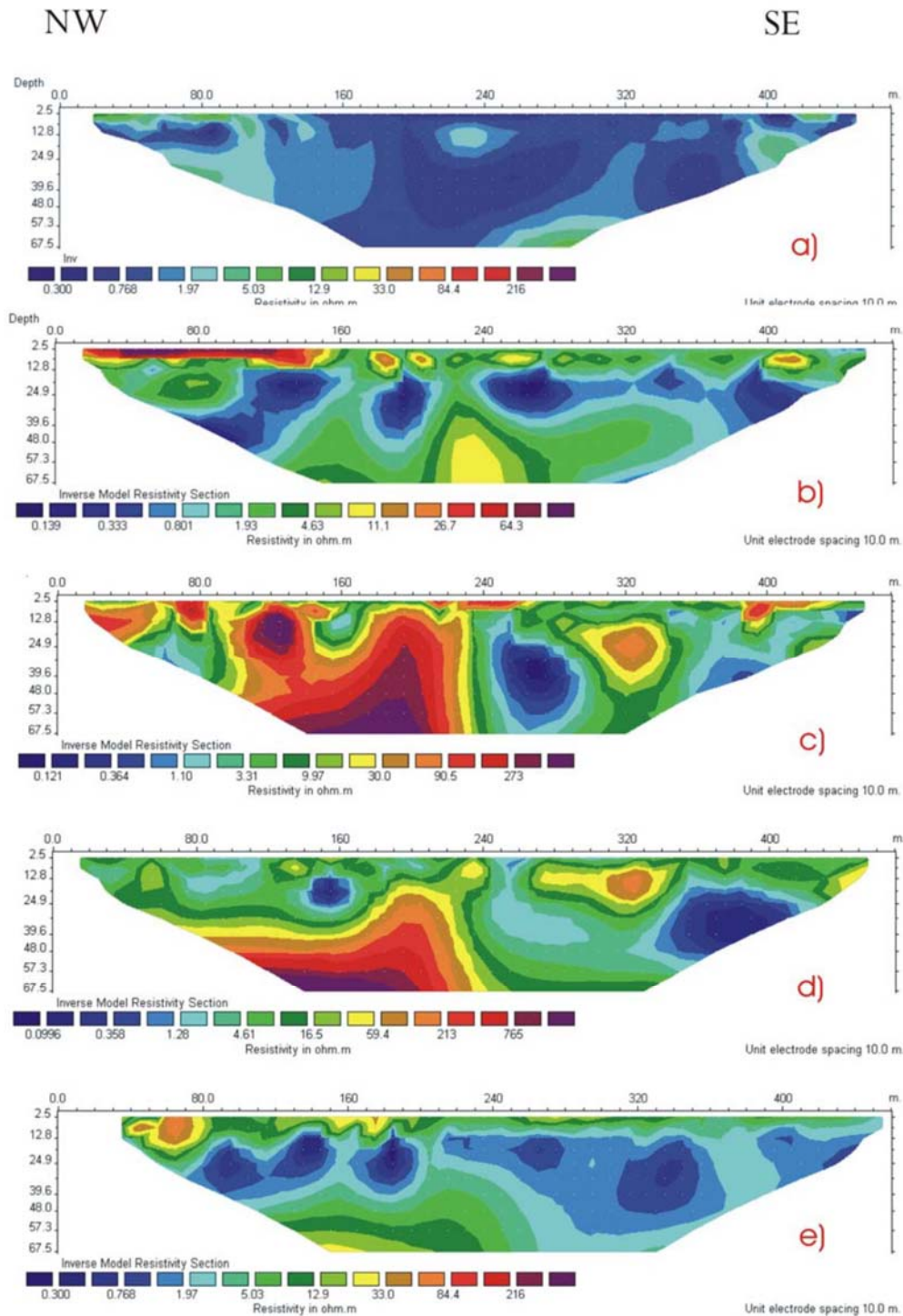
Τα δισδιάστατα μοντέλα ειδικής αντίστασης που προέκυψαν χρησιμοποιώντας τις σειρές Wenner-Schlumberger, παρουσίασαν σημαντικές διαφορές στις τιμές ειδικής αντίστασης μεταξύ των πέντε τομογραφιών (**Εικόνα 3.16**).

Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.16**, η πρώτη τομή (**Εικόνα 3.16a**), που έγινε κοντά στις εκβολές του ποταμού Bradano κι είναι από ΝΑ προς ΒΔ παρουσιάζει τιμές ειδικής αντίστασης από περίπου 1-10 Ωm (μεταξύ 0 και 110 μ). Οι χαμηλότερες τιμές (λιγότερο από 1 Ωm), παρατηρήθηκαν προς την πλευρά της παραλίας και μειώνονται ίσως λόγω των διαποτισμένων στρωμάτων από την επιφανειακή ζώνη ροής θαλασσινού νερού.

Η δεύτερη τομή (**Εικόνα 3.16b**) έγινε στις εκβολές του ποταμού Basento. Τα αποτελέσματα αυτής της τομής δείχνουν την παρουσία ενός στρώματος με υψηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης. Κάτω από αυτό το στρώμα οι τιμές ειδικής αντίστασης είναι χαμηλότερες, και καταδεικνύουν την παρείσφρηση υφάλμυρου νερού που προέρχεται από την ακτή. Όπως στην τομή 1το υφάλμυρο νερό είναι αξιοπρόσεκτο.

Η τρίτη τομή (**Εικόνα 3.16c**), μεταξύ των ποταμών Basento και Cavone, είναι παράλληλη στην δεύτερη. Συγκριτικά με τις δύο πρώτες τομές, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η παρείσφρηση του θαλασσινού νερού είναι λιγότερο εκτενής, στην πραγματικότητα οι τιμές ειδικής αντίστασης είναι σημαντικά υψηλότερες και μόνο προς την παραλία είναι χαμηλότερες. Ακόμη, είναι διακριτή μια μειωμένη παρείσφρηση στον υδροφόρο.

Η τέταρτη τομή, (Εικόνα 3.16d) πραγματοποιήθηκε κοντά στις εκβολές του ποταμού Cavone. Όπως στην τομή 3, η παρείσφρηση νερού της θάλασσας είναι λιγότερο εκτενής, κι οι τιμές ειδικής αντίστασης είναι παρόμοιες.



Εικόνα 3. 16: Δισδιάστατες ηλεκτρικές τομογραφίες ειδικής αντίστασης που λαμβάνονται στην περιοχή μελέτης. Η θέση κάθε ERT παρουσιάζεται στο σχήμα 3, a) Γεωηλεκτρική Τομή 1 • b) Γεωηλεκτρική Τομή 2• c) Γεωηλεκτρική Τομή 3 • d) Γεωηλεκτρική Τομή 4 • e) Γεωηλεκτρική Τομή 5

Η πέμπτη τομή (**Εικόνα 3.16ε**), που τοποθετείται μεταξύ Agri και Sinni, και κλείνει προς τις εκβολές του ποταμού Agri, δείχνει πάλι την παρείσφρηση θαλασσινού νερού σε αυτήν την ακτογραμμή. Στην πραγματικότητα, οι τιμές ειδικής αντίστασης είναι χαμηλότερες από τις τομές 3 και 4 και μοιάζουν περισσότερο με τις τιμές ειδικής αντίστασης των δύο πρώτων τομών (**Εικόνα 3.16**).

Η **Εικόνα 3.16** δείχνει ότι η περιεκτικότητα του εδάφους σε αλάτι λόγω της παρείσφρησης του θαλασσινού νερού αυξάνεται κυρίως μέσα στην ακτή που βρίσκεται μεταξύ των ποταμών Bradano και Basento. Η αλατότητα στο επόμενο τμήμα της ακτογραμμής της μειώνεται, ενώ η παρείσφρηση νερού της θάλασσας εντείνεται και πάλι στο υπόλοιπο τελευταίο τμήμα της ακτής που ερευνήθηκε, κοντά στις εκβολές του ποταμού Agri.

Πιθανώς αυτή η διαφορά να οφείλεται και στις μεταβολές της ακτής. Στην πραγματικότητα, αυτές οι μεταβολές, που έγιναν μεταξύ του 1949 και 2006, δείχνουν την οπισθοδρόμηση των εκβολών των κύριων ποταμών και την προχώρηση, κατά μήκος, των περιοχών που βρίσκονται ανάμεσα στους ποταμούς, με εξαίρεση την ακτή μεταξύ των ποταμών Bradano και Basento (Simoniello et.al, 2009).

Στην περιοχή ανάμεσα στους ποταμούς Bradano και Basento, λήφθηκαν μερικά εδαφολογικά δείγματα και εκτελέστηκαν χημικές αναλύσεις (Official Gazette of Italy N° 248 of 21 October 1999). Τα εδαφολογικά δείγματα αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας τυποποιημένες αναλυτικές διαδικασίες για κατιόντα (νάτριο (Na), κάλιο (K), ασβέστιο (Ca) και μαγνήσιο (Mg)), για χλωρίδια, και για την ηλεκτρική αγωγιμότητα (Πίνακας 3.3).

Υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην ηλεκτρική αγωγιμότητα (εκφράζεται σε Siemens) ή αλλιώς στην αντίστροφη ηλεκτρική ειδική αντίστασή, που εκφράζεται σε Ohm m. Η μέση τιμή (για την Ευρώπη) στα εδαφικά δείγματα είναι ίση με 0.613 Siemens, ή αλλιώς 1.631 Ωm σε εύρος από 0.153 έως 1.484 Siemens, ή από 6.536 έως 0.674 Ωm. Τα σημαντικότερα ιόντα είναι το νάτριο (Na⁺) και το χλώριο (Cl⁻). Η ανάλυση χημικών στοιχείων που φαίνεται παραπάνω έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα ERT της παρούσας μελέτης, επιβεβαιώνοντας έτσι ότι η περιοχή μεταξύ των ποταμών Bradano και Basento επηρεάζεται κατά ένα μεγάλο μέρος από την εδαφολογική αλατότητα.

Parameters	Range Values
Na (mg kg ⁻¹)	626 - 3425
K (mg kg ⁻¹)	162 - 960
Ca (mg kg ⁻¹)	917 - 2830
Mg (mg kg ⁻¹)	203 - 905
Electrical Conductivity (Siemens m ⁻¹)	0.153 – 1.484
Electrical resistivity (Ω m)	6.536 – 0.674
Chlorurs (mg kg ⁻¹)	162 - 5894
Sand %	33.3 - 85.2
Silt %	7.1 - 35.7
Clay %	7.5 - 38.2

Πίνακας 3.3 Εύρος τιμών των χημικών και φυσικών στοιχείων των εδαφολογικών δειγμάτων

3.4 Εξερεύνηση καρστικού νερού στην περιοχή Terpal, δυτικά στο Shahrood που βρίσκεται στο Ιράν.

(F. Sharifi, A. R. Arab-Amiri, A. Kamkar-Rouhani, Journal of Mining & Environment, Vol.5, No.1, 2014, 1-12)

3.4.1 Εισαγωγή

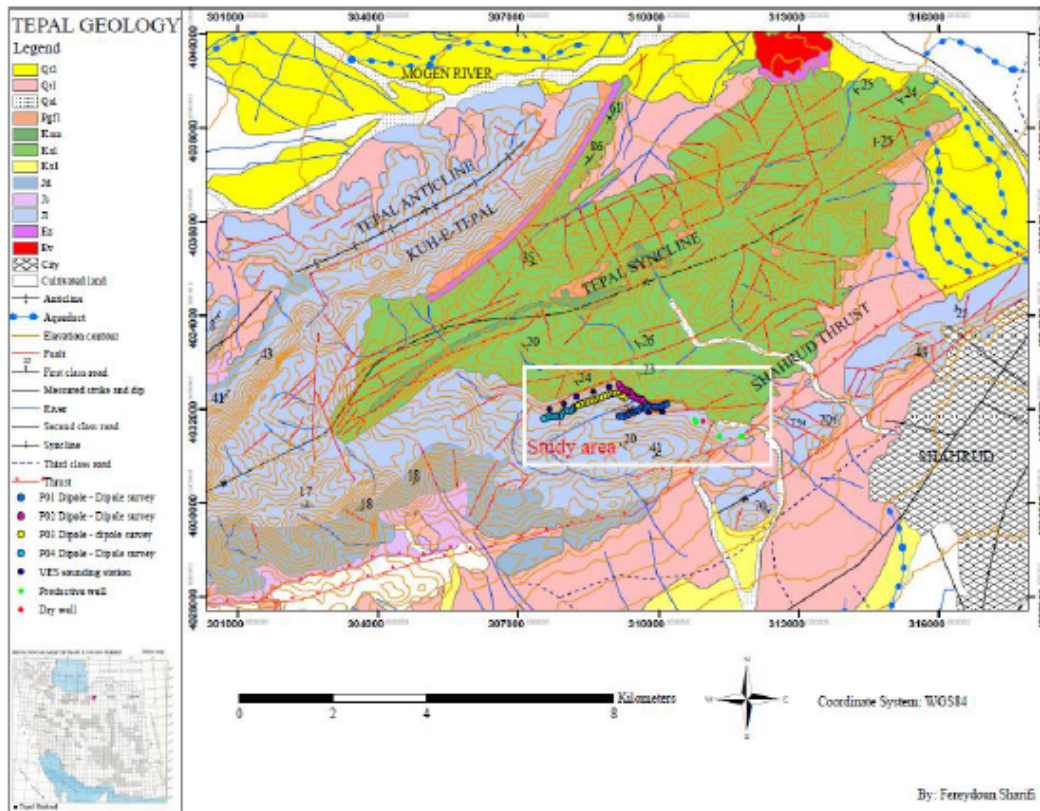
Για την ανάπτυξη μιας χώρας, η ανάγκη για τους καθαρούς πόρους υπόγειων νερών είναι απαραίτητη. Τα καρστικά νερά στο Ιράν είναι πολύ καλής ποιότητας. Στόχος της παρούσας μελέτης που διεξήχθη στην πόλη Shahrood, ήταν να αναγνωριστούν και να εξερευνηθούν τα καρστικά νερά στα σημεία της περιοχής Terpal. Για το σκοπό αυτό, στην μελέτη χρησιμοποιήθηκαν οι γεωφυσικές μέθοδοι της βυθοσκόπησης (VES) και της ειδικής αντίστασης (ERT). Οι έρευνες VES εκτελέστηκαν σε 10 σημεία χρησιμοποιώντας τη διάταξη Schlumberger. Οι έρευνες ειδικής αντίστασης πραγματοποιήθηκαν με τέσσερις τομές με συνολικό μήκος περισσότερο των τεσσάρων χιλιομέτρων, χρησιμοποιώντας τη διάταξη ηλεκτροδίων δίπολο-δίπολο με απόσταση ανά ηλεκτρόδιο τα 75m. Για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων στην μέθοδο VES χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό IX1D, ενώ για την μέθοδο της ειδικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Res2DINV. Κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων στην περιοχή μελέτης, αναγνωρίστηκαν οι καρστικές ζώνες νερού κι εν συνεχεία επιλέχθηκαν οι κατάλληλες θέσεις για γεωτρήσεις, προκειμένου να παραληφθεί δείγμα των υπόγειων νερών.

3.4.2 Περιοχή της έρευνας και γεωλογική δομή

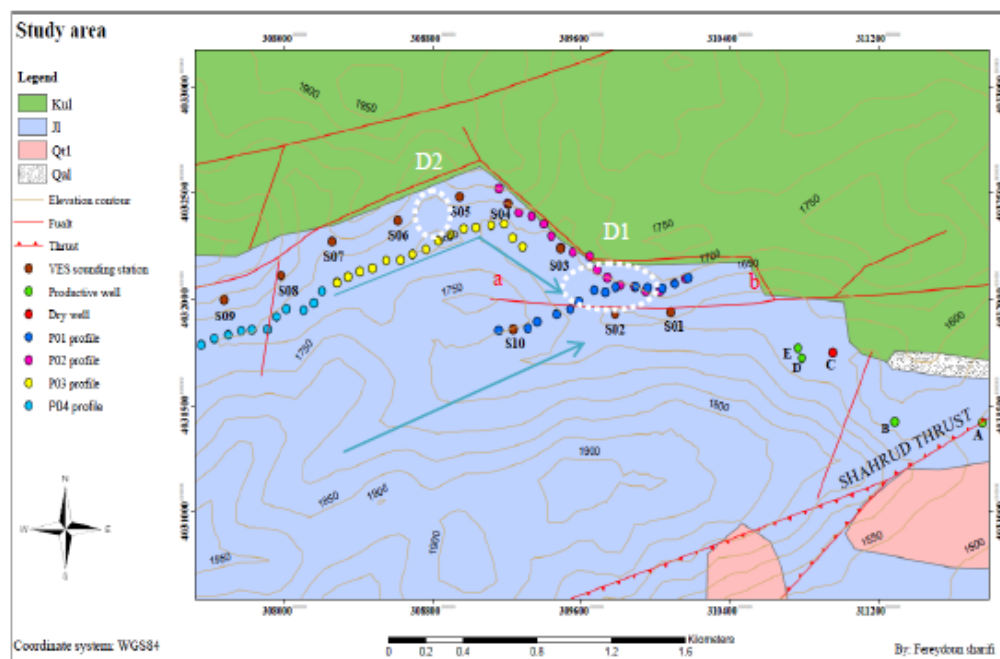
Η πόλη Shahrood βρίσκεται βόρειο-ανατολικά του Ιράν, κι η γεωλογία της αντιπροσωπεύει την ανατολική ζώνη του Alborz. Τα βουνά Alborz είναι μια συνέχεια των αλπικών βουνών, τα οποία είναι μια σύνθετη ασύμμετρη ζώνη ρηγματωδών βράχων. Τα βουνά Terpal, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.17**, βρίσκονται στα βορειοδυτικά της πόλης Shahrood.

Σε αυτήν την περιοχή, η επιρροή του έντονου συστήματος ρηγμάτων, οι κατακερματισμένες ζώνες και το πορώδες δημιουργούν τις κατάλληλες προϋποθέσεις για τον καρστικό σχηματισμό υδροφόρων στρωμάτων. Σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη της περιοχής Terpal (**Εικόνα 3.17**), η περιοχή μελέτης βρίσκεται στη μέση του ανώτερου Ιουρασικού σχηματισμού, που χαρακτηρίζεται από ανοικτό γκρι όπου υπάρχει ασβεστόλιθος. Στην περιοχή μελέτης έχουν γίνει πέντε γεωτρήσεις με

συμβολισμό A, B, C, D και E. Οι θέσεις αυτών των γεωτρήσεων παρουσιάζονται στην **Εικόνα 3.18**. Επίσης, στην **Εικόνα 3.18**, παρουσιάζονται οι θέσεις των γεωηλεκτρικών τομών όπως επίσης κι οι θέσεις των βυθοσκοπήσεων.



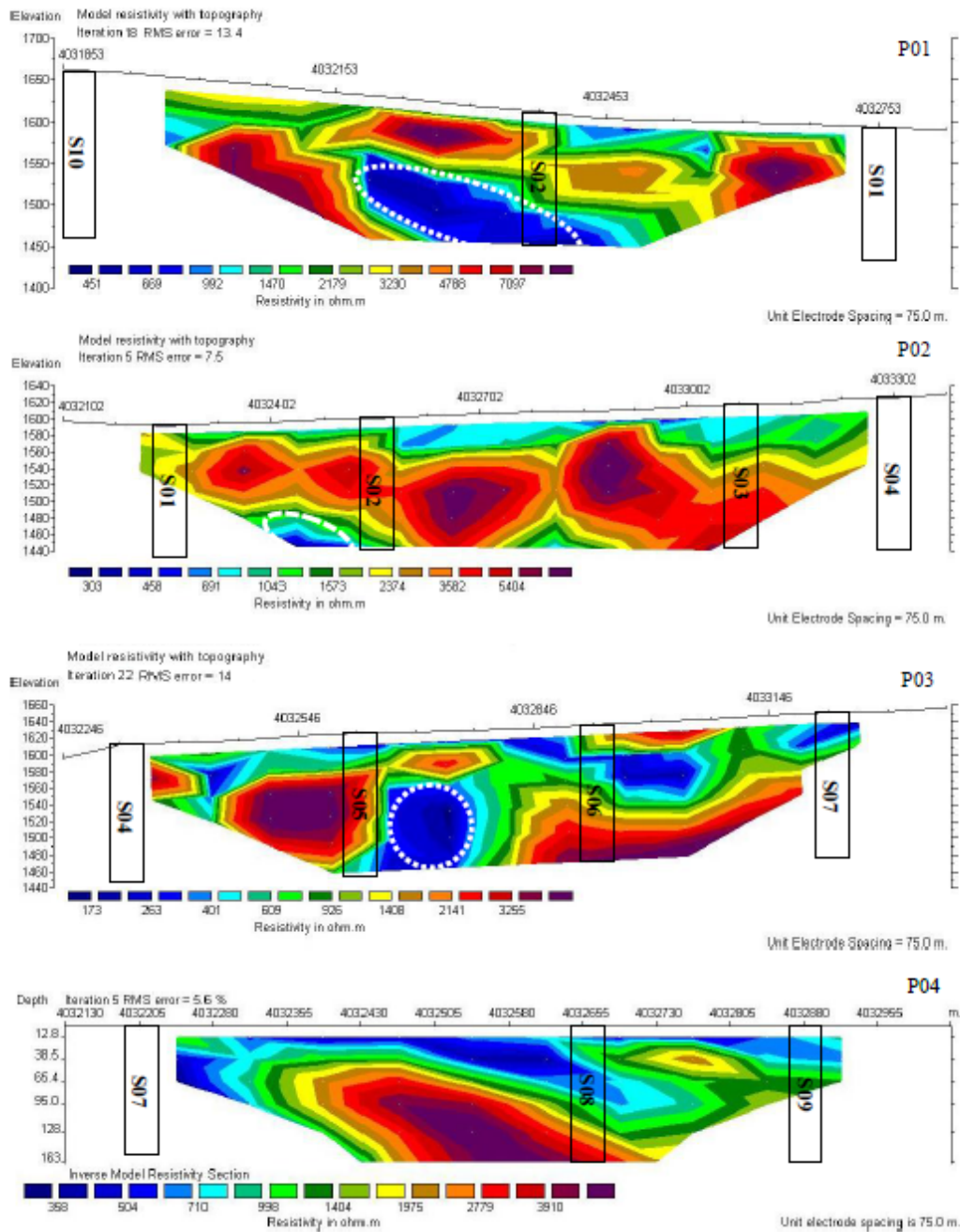
Εικόνα 3. 17: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Teral (η περιοχή μελέτης περιβάλλεται από το λευκό ορθογώνιο) Vaziri, S.H., Majidifard, M.R. and Saidi, A. (2001)



Εικόνα 3. 18: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης, όπου παρουσιάζονται οι τοποθεσίες των 10 σημείων VES κι οι 4 τομές ERT, όπου συμβολίζονται με τελείες διαφορετικών χρωμάτων

3.4.3 Γεωηλεκτρική έρευνα

Τα αποτελέσματα της ειδικής αντίστασης που επιτεύχθηκαν από τις 4 τομές P01, P02, P03 και P04 (Εικόνα 3.19), δείχνουν τις αγώγιμες ζώνες. Οι αγώγιμες ζώνες εμφανίζονται στις περιοχές που περικλείονται από άσπρες διακεκομμένες γραμμές στις τομές P01, P02 και P03 κι αντιπροσωπεύουν τις κυριότερες καρστικές ζώνες νερού.



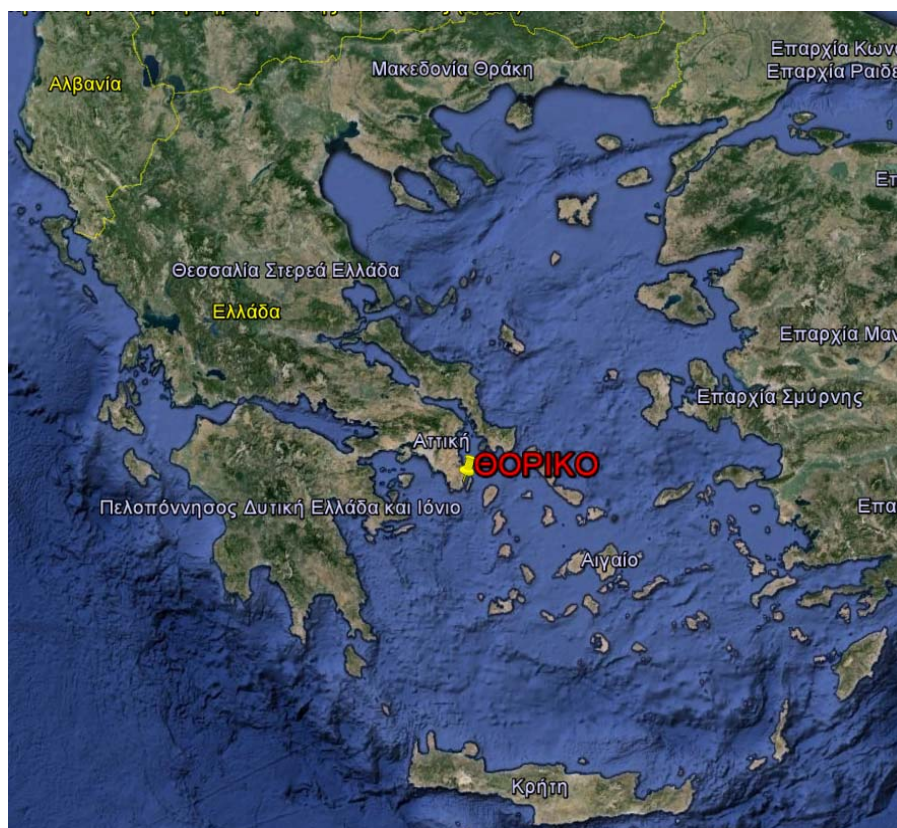
Εικόνα 3. 19: Δισδιάστατη απεικόνιση αποτελεσμάτων της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά μήκος των τομών P01 , P02 , P03 και P04 μετά την επεξεργασία στο λογισμικό RES2DINV . Παρουσιάζονται επίσης οι θέσεις VES με τα σημεία από S01 έως S10

Το τμήμα του ρήγματος ab, που παρουσιάζεται στο **Εικόνα 3.18**, τέμνει την τομή της ειδικής αντίστασης P01, δημιουργώντας έτσι μια κατακερματισμένη ζώνη με χαμηλή ειδική αντίσταση (η περιοχή που περιβάλλεται από την άσπρη διακεκομμένη γραμμή στην **Εικόνα 3.19**) με κατεύθυνση εμβάθυνσής προς το Βορρά. Η άσπρη διακεκομμένη γραμμή που σχηματίζει έλλειψη στην τομή P01 κι η άσπρη διακεκομμένη κυκλική γραμμή στην τομή P03 θεωρούνται τα καλύτερα σημεία προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι γεωτρήσεις προκειμένου να υπάρξει πρόσβαση στα καρστικά νερά.

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΜΕΤΩΠΙΟ ΤΗΣ ΚΟΙΛΑΔΑΣ ΤΟΥ ΘΟΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΘΕΣΗ ΚΑΒΟΔΟΚΑΝΟΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η παρουσίαση της γεωφυσικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή του Θορικού Λαυρίου. Αρχικά δίνονται ιστορικά στοιχεία της περιοχής η οποία κατά τους αρχαίους χρόνους γνώρισε μεγάλη ακμή κυρίως λόγω της πλούσιας μεταλλοφορίας που είχε. Αποτέλεσε στήριγμα κι έδωσε μεγάλη ώθηση στην ανάπτυξη της Αθηναϊκής ηγεμονίας. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται στοιχεία για την γεωλογική δομή της περιοχής όπως επίσης και στοιχεία κοιτασματολογικά κι υδρογεωλογικά. Η γνώση της γεωλογίας της περιοχής ήταν απαραίτητη προκειμένου να σχεδιαστεί σωστά η έρευνα και να επιλεγούν οι κατάλληλες μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης. Ακόμη, παρατίθενται στοιχεία για την μόλυνση της περιοχής από την μεταλλευτική δραστηριότητα καθώς επίσης και για την υφαλμύριση της περιοχής από θαλάσσια διείσδυση νερού. Η επίλυση αυτών των προβλημάτων αποτέλεσε το κύριο έναυσμα της παρούσας έρευνας.

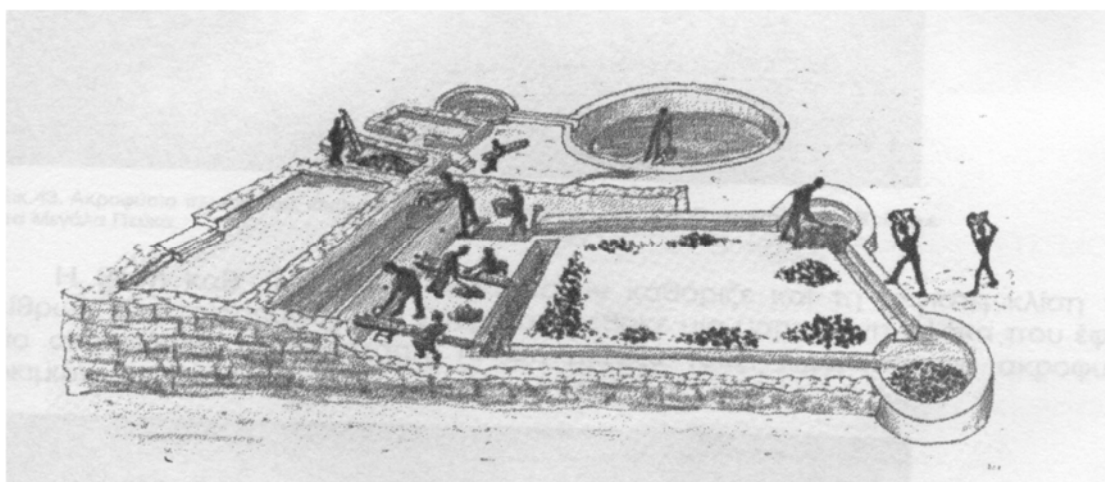


Εικόνα 4. 1: Η περιοχή του Θορικού όπου διεξήχθη η γεωφυσική έρευνα

Η επόμενη ενότητα πραγματεύεται τα κριτήρια με τα οποία επελέγησαν οι μέθοδοι γεωφυσικής έρευνας κι οι θέσεις που τοποθετήθηκαν οι γεωηλεκτρικές τομές. Εν συνεχεία, γίνεται αναφορά στον εξοπλισμό υπαίθρου που χρησιμοποιήθηκε, όπως επίσης και στο απαραίτητο λογισμικό με το οποίο ερμηνεύθηκαν τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ενότητας αποτελεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων κι η ερμηνεία τους μαζί με τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

4.2 Ιστορικά στοιχεία περιοχής

Είναι γνωστό ότι ένα σημαντικό κομμάτι της ιστορίας της Αθήνας κι ιδιαίτερα της ανάπτυξης και της ευημερίας της κατά τους αρχαίους χρόνους είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την ιστορία του Λαυρίου και των μεταλλείων του. Οι αρχαίοι Αθηναίοι εκμεταλλεύονταν τα μεταλλεία της Λαυρεωτικής και τους θησαυρούς που τους προσέφερε αναπτύσσοντας παράλληλα την τέχνη της εξόρυξης και της μεταλλουργίας.



Εικόνα 4. 2: Αναπαράσταση της εργασίας του εμπλουτισμού του αργυρούχου μόλυβδου σ' ένα επίπεδο πλυντήριο της Λαυρεωτικής

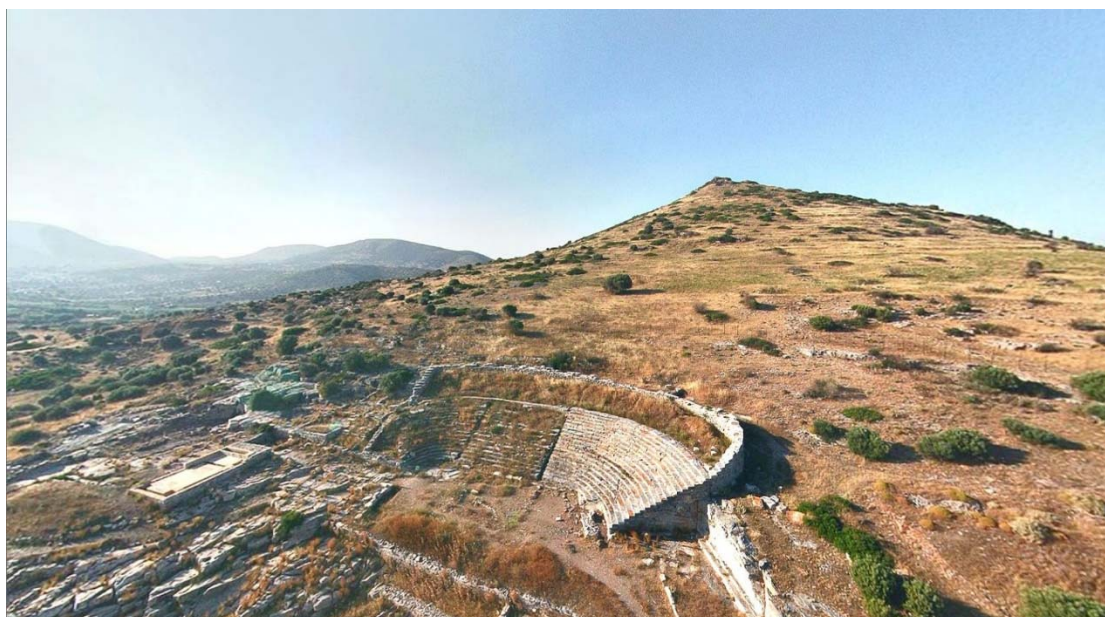
Ενδεικτικά αξίζει να αναφερθεί ότι σε 7 περίπου αιώνες λειτουργίας των μεταλλείων παρήχθησαν 3.500 τόνοι αργύρου, το γνωστό ασήμι, και 1.400.000 τόνοι μόλυβδου. Μπορεί να πει κανείς, λαμβάνοντας υπόψη την τεχνογνωσία και τις δυνατότητες που υπήρχαν τότε, ότι αυτές οι ποσότητες μπορούν να χαρακτηρισθούν ως κάτι παραπάνω από σημαντικές. Ας μην ξεχνάμε ότι σε αυτήν την παραγωγή στηρίχθηκε η δημιουργία της Αθηναϊκής Ηγεμονίας.

Το αργυρό Αθηναϊκό τετράδραχμο ή αλλιώς "γλαύκα" υπήρξε από τον 6^ο π.Χ. μέχρι και τον 1^ο π.Χ. αιώνα το κορυφαίο μέσο συναλλαγής στον τότε γνωστό κόσμο. Η γλαύκα αποτελούσε εγγύηση σε κάθε συναλλαγή και θα μπορούσε κανείς να πει ότι η δυναμική του ήταν αντίστοιχη με το σημερινό δολλάριο. Το αργυρό τετράδραχμο απεικόνιζε στην μια όψη του την θεά Αθηνά, προστάτιδα της πόλης των Αθηναίων, και στην άλλη το ιερό πουλί της θεάς που ήταν η γλαύκα, κοινώς γνωστή κι ως κουκουβάγια, καθώς επίσης και την επιγραφή "ΑΘΕ" που ήταν η συντομογραφία της πόλης.



Εικόνα 4. 3: Το αθηναϊκό τετράδραχμο ή αλλιώς "γλαύκα"

Ανασκαφές που πραγματοποιήθηκαν από Βέλγους επιστήμονες στο Θορικό Λαυρίου καταδεικνύουν ότι η παραγωγή αργύρου είχε ξεκινήσει πριν την ακμή του Μυκηναϊκού Πολιτισμού. Το Θορικό ανήκε στην Ακαμαντίδα φυλή κι ήταν μια από τις 12 πόλεις που ίδρυσε ο μυθικός βασιλιάς Κέκρωψ. Υπήρξε από τους πιο σημαντικούς οικισμούς της Λαυρεωτικής κι ένα από τα Μυκηναϊκά βασίλεια της Αττικής. Αξίζει στο σημείο αυτό να γίνει και μια αναφορά για το αρχαίο θέατρο του Θορικού, στους πρόποδες του λόφου Βελατούρι, το οποίο χτίστηκε κατά τον 6^ο αιώνα π.Χ. κι αποτελεί το αρχαιότερο θέατρο στην Αττική. Το θέατρο του Θορικού μπορούσε να δεχθεί έως και 5.000 άτομα.



Εικόνα 4. 4: Άποψη του αρχαίου θεάτρου Θορικού

Λίγα μέτρα δυτικά του θεάτρου υπάρχει η είσοδος της πρώτης μεταλλευτικής στοάς της οποίας η όρυξη χρονολογείται στο 3.000 π.Χ. και χρησιμοποιήθηκε μέχρι και τον 4^ο αιώνα π.Χ. Στην είσοδο της στοάς υπάρχει χάρτης με τις στροφές οι οποίες υπάρχουν κατά μήκος.



Εικόνα 4. 5: Η είσοδος της στοάς δίπλα στο θέατρο Θορικού. Η υποστήλωση που φαίνεται είναι σύγχρονη

4.3 Γεωλογία περιοχής έρευνας

Η Αττική δομείται από δύο διακριτά συστήματα, το δομικό υπόβαθρο το οποίο αποτελείται από πετρώματα ηλικίας Παλαιozoικού μέχρι ανώτατου Κρητιδικού και το κλαστικό κάλυμμα το οποίο αποτελείται από Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις. Το γεωλογικό υπόβαθρο της Αττικής (προ-μειόκαινο) συνίσταται από δύο τεκτονικές ενότητες. Η πρώτη ενότητα είναι τα υψηλών πιέσεων μεταμορφωμένα πετρώματα της Αττικοκυκλαδικής ζώνης από τα οποία δομείται η ανατολική και νότια Αττική. Η δεύτερη ενότητα είναι η κυρίως αμεταμόρφωτη Υποπελαγονική ζώνη κι εκτείνεται στο βόρειο και δυτικό τμήμα της Αττικής. Η Υποπελαγονική ζώνη υπέρκειται τεκτονικά της Αττικοκυκλαδικής κι αποτελείται κυρίως από ιζηματογενή πετρώματα ηλικίας περμοτριάδικης έως και παλαιοκαίνου όπως επίσης κι από οφιολιθικά πετρώματα ιουρασικής ηλικίας.

4.3.1 Θέση και μορφολογία

Η Λαυρεωτική βρίσκεται σε απόσταση 55 χιλιομέτρων από την Αθήνα ΝΑ του νομού Αττικής καταλαμβάνοντας έκταση 200 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Η μορφολογία της χαρακτηρίζεται ως λοφώδης κι ημιορεινή με μεγαλύτερο υψόμετρο στην θέση Μεγάλο Ριμπάρι (372 μ.). Η περιοχή είναι άνυδρη κι εν μέρει πευκόφυτη ενώ διασχίζεται από κοιλάδες. Η προσπέλαση γίνεται κατά κανόνα από ασφαλτοστρωμένους δρόμους. Περιλαμβάνει 41 κτηριακές μονάδες (συνολικού εμβαδού 25.000 τετραγωνικών μέτρων) που έχουν κυρηχθεί από το Υπουργείο Πολιτισμού ως διατηρητέα μνημεία.

4.3.2 Γεωλογική δομή

Η περιοχή της Λαυρεωτικής ανήκει στην Αττικοκυκλαδική κρυσταλλική ζώνη κι η γεωλογία και μεταλλοφορία της οφείλεται σε πολύ υψηλής πίεσης μεταμορφώσεις σε χαμηλή θερμοκρασία. Ανήκει στην ενδιάμεση μεταμορφική ζώνη των Ελληνίδων και δομείται από τρεις κύριες τεκτονικές ενότητες αλπικής ηλικίας την Κατώτερη, την Ενδιάμεση και την Ανώτερη.

A) Κατώτερη Τεκτονική Ενότητα (Σειρά Καμάριζας)

Θεωρείται αυτόχθονη. Χαρακτηρίζεται από μεταμορφικές διαδικασίες πρασινοσχιστολιθικής και αμφιβολιτικής φάσης. Ηλικία τριαδική-κάτω ιουρασική. Αποτελείται από τους εξής 4 σχηματισμούς:

- 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.
- Σχιστόλιθος Καμάριζας: Επικρατούν μαύροι ως καστανόχρωμοι μαρμαρυγικοί, χαλαζιακοί και χλωριτικοί σχιστόλιθοι με μεταμόρφωση κατώτερης-μέσης πρασινοσχιστολιθικής φάσης. Στην περιοχή Πλάκα, λόγω γειτνίασης με γρανοδιοριτική διείσδυση, 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.
- Ανώτερο Μάρμαρο Καμάριζας: Λευκό-λευκότεφρο μάρμαρο μεσολεπτοπλακώδες, πλούσιο σε κονδυλοειδείς δομές μεταπυριτολίθων και δολομιτών. Πάχος 0-150 μ. Ηλικία ιουρασική.
- Επικλυσιγενής Ασβεστόλιθος (ή Κατώτερος Ασβεστόλιθος Πλάκας): Συνήθως άστρωτος, χαοτικής μορφής, έντονα καρστικοποιημένος 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. Αποτελείται από τους εξής 2 σχηματισμούς:

- Σχιστόλιθοι Πλάκας: Καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση στη Λαυρεωτική. Πρόκειται για φυλλίτες με χαλαζία, σερικήτη ως μοσχοβίτη, ασβεστίτη και χλωρίτη. Κατά θέσεις, παρεμβάλλονται πρασινοσχιστόλιθοι (πρασινίτες, μεταοφιόλιθοι) με γλαυκοφανή καθώς και ανθρακικοί σχηματισμοί. Πάχος 50-180 μ. Πιθανή ηλικία ιουρασική.
- 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 αγκεριτιωμένοι 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-άνωτερη κρητιδική.

Δ) 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 Ι-τύπου, μειοκαινικής ηλικίας, με πλέον χαρακτηριστικό εκείνο της Πλάκας. Ο γρανοδιορίτης της Πλάκας είναι μορφής

σωρού, περιορισμένης επιφανειακής έκτασης (περίπου 0,5 χλμ²) 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 γρανοδιόριτη της περιοχής Πλάκας.



Εικόνα 4. 6: Γεωλογικός χάρτης περιοχής Πλάκας – Καμάριζας στην Λαυρεωτική. (Σκαρπέλης 2007)

4.3.3 Κοιτασματολογικά στοιχεία - μεταλλογένεση

Στο υπέδαφος της Λαυρεωτικής εντοπίζονται δύο κυρίως τύποι μεταλλοφορίας: μία μικτών θειούχων μεταλλευμάτων βασικών μετάλλων, όπως μόλυβδου (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 (FeS₂). 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», «επικλυσιγενής 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 οξειδωσης 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» (ZnCO₃), αργυρούχο ανθρακικό μόλυβδο ή κερουσίτη (PbCO₃), που υπέστησαν έντονη εκμετάλλευση. Τέλος, στην περιοχή Πλάκα Κερατέας εντοπίστηκε σημαντικό κοίτασμα σιδηρούχου μεταλλεύματος (μαγνητίτης, μαγνητοπυρίτης) μετασωματικού τύπου (skarn).



Εικόνα 4. 7: Συμπαγές μετάλλευμα γαληνίτη – σφαλερίτη – σιδηροπυρίτη από το Λαύριο

4.3.4 Μεταλλοφορία

Υπάρχουν τουλάχιστον 5 τύποι θειούχων κοιτασμάτων στην περιοχή του Λαυρίου, ορισμένες από τις οποίες συναντώνται και σε άλλα σημεία της Αττικοκυκλαδικής ζώνης.

- Πορφυριτικού τύπου : Φτώχη, ως προς οικονομική εκμετάλλευση, μεταλλοφορία πορφυριτικού τύπου εντοπίζεται στον γρανοδιוריτή που βρίσκεται στην περιοχή Πλάκα και σε έκταση περίπου 120.000 τετραγωνικά μέτρα. Το κοιτάσμα χαλαζία στην περιοχή αυτή εμφανίζεται μέχρι και με 40 εκατοστά πλάτος. Η μεταλλοφορία της περιοχής περιλαμβάνει λεπτόκοκκο σιδηροπυρίτη, μολυβδαινίτη, χαλκοπυρίτη και μαγνητοπυρίτη.
- Τύπου skarn : Ένας ακανόνιστος σχηματισμός skarn ασβεστίου – σιδήρου που υπάρχει στους σχιστόλιθους της Καισαριανής, όπως επίσης κι ανώτερο μάρμαρο, έχει εντοπισθεί στους γρανοδιוריτές της Πλάκας Λαυρίου. Το skarn αποτελείται από πυρόξενο, επίδοτο, γρανάτη, αμφιβολίτη, αστρίους, χλωρίτη, ασβεστίτη, τιτανίτη, σκαπόλιθο, μαγνητίτη, πυρίτη και μαγνητοπυρίτη που σχηματίστηκαν σε θερμοκρασία 440° – 600°C και πίεση 1,0 – 1,5 bars (Baltatzias, 1981). Τα μεταλλεύματα αυτά περιέχουν επίσης σε πολύ μικρές ποσότητες αρσενοπυρίτη, βισμούτιτη, χαλκοπυρίτη, σχεελίτη και τετραδυμίτη (Leleu et al., 1973).
- Λατυποπαγή: Στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις της Πλάκας έχει περιγραφεί ένα λατυποπαγές ανάχωμα γρανοδιוריτή – πορφυρίτη (Οικονόμου και Σιδέρης, 1976). Αποτελείται από ετερογενή κομμάτια γρανοδιוריτή μήκους έως και 15

εκατοστά. Φαινοκρύσταλλοι κ-αστρίων και βιοτίτη έχουν αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από χλωρίτη, σερικήτη, χαλαζία, καολινίτη, επίδοτο και τιτανίτη (Οικονόμου και Σιδέρης, 1976).

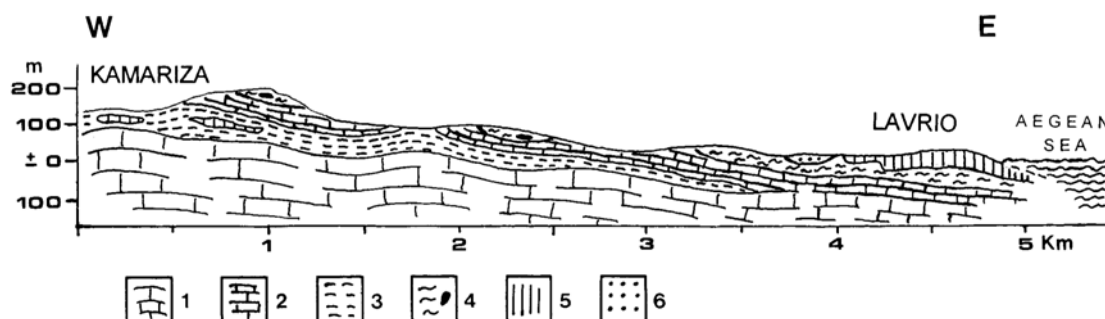
- Αντικατάσταση ανθρακικών πετρωμάτων: Μεταξύ των διαφόρων τύπων θειούχων μεταλλευμάτων, η ανθρακική αντικατάσταση μολύβδου, ψευδαργύρου, αργύρου Pb-Zn-Ag (mantos), ήταν η πιο σημαντική από οικονομικής άποψης για την Λαυρεωτική. Η ανθρακική αντικατάσταση Pb-Zn-Ag, εντοπίζεται ανάμεσα στο κατώτερο και στο ανώτερο μάρμαρο. Πολλά από αυτά τα κοιτάσματα βυθίζονται απότομα με κατεύθυνση από Βορρά προς Νότο και από Βορειοδυτικά προς Νοτιοανατολικά ακολουθώντας την κατεύθυνση του ρήγματος που υπάρχει στην περιοχή του Λαυρίου.
- Φλεβική μεταλλοφορία θειούχων Pb-Zn-Ag: Τα κοιτάσματα αποτελούνται κυρίως από πυρίτη, σφαλερίτη και γαληνίτη. Οι πιο πλούσιες φλέβες βρίσκονται στην Καμάριζα όπως επίσης και στο Σούνιο και στα Μεγάλα Πεύκα. Η πιο χαρακτηριστική φλέβα της Λαυρεωτικής η οποία μάλιστα συγκαταλέγεται στις παγκοσμίου κλάσεως του είδους της είναι η φλέβα 80 ή αλλιώς "Φιλόνι 80". Η φλέβα αναπτύχθηκε με ίδιους ρυθμούς με συνεχή ανάπτυξη σε πλάτος και προς τις δύο μεριές.

4.3.5 Υδρογεωλογικά στοιχεία

Η υδρογεωλογία της περιοχής του Λαυρίου σχετίζεται με τους λιθολογικούς και γεωλογικούς σχηματισμούς της, όπως επίσης και με τον έντονο τεκτονισμό της. Ο κύριος υδροφόρος αναπτύσσεται στην αυτόχθονη ενότητα, στο ανώτερο και κατώτερο μάρμαρο. Πρόκειται για ένα σύστημα έντονα κατακερματισμένο και καρστικοποιημένο, με μεγάλη υδροπερατότητα.

Το κατώτερο μάρμαρο εμφανίζεται σε ευρεία κλίμακα δυτικά του Λαυρίου, συμπεριλαμβάνοντας και τη παράκτια ζώνη. Η έλλειψη αδιαπέρατου στρώματος και η επικοινωνία του καρστικού υδροφορέα με την ακτή, έχει σαν αποτέλεσμα την εκφόρτισή του στη θάλασσα. Το κατώτερο μάρμαρο εμφανίζεται σε περιορισμένη κλίμακα στο νοτιοδυτικό Λαύριο και νότια της Καμάριζας. Το ανώτερο μάρμαρο εμφανίζεται εκτεταμένα στη περιοχή του Λαυρίου με μέγιστο πάχος τα 100 m. Το νερό που κατεισδύει στο σχηματιζόμενο καρστικό υδροφορέα, ακολουθεί τη γενική ανατολική κλίση των στρωμάτων, απορρέοντας πλευρικά προς τις τεταρτογενείς

αποθέσεις ή βρίσκει υπόγεια διέξοδο προς τη θάλασσα, δημιουργώντας υποθαλάσσιες ή παράκτιες πηγές. Το νερό του καρστικού υδροφόρου αντλείται μέσω γεωτρήσεων για την άρδευση γεωργικών εκτάσεων.

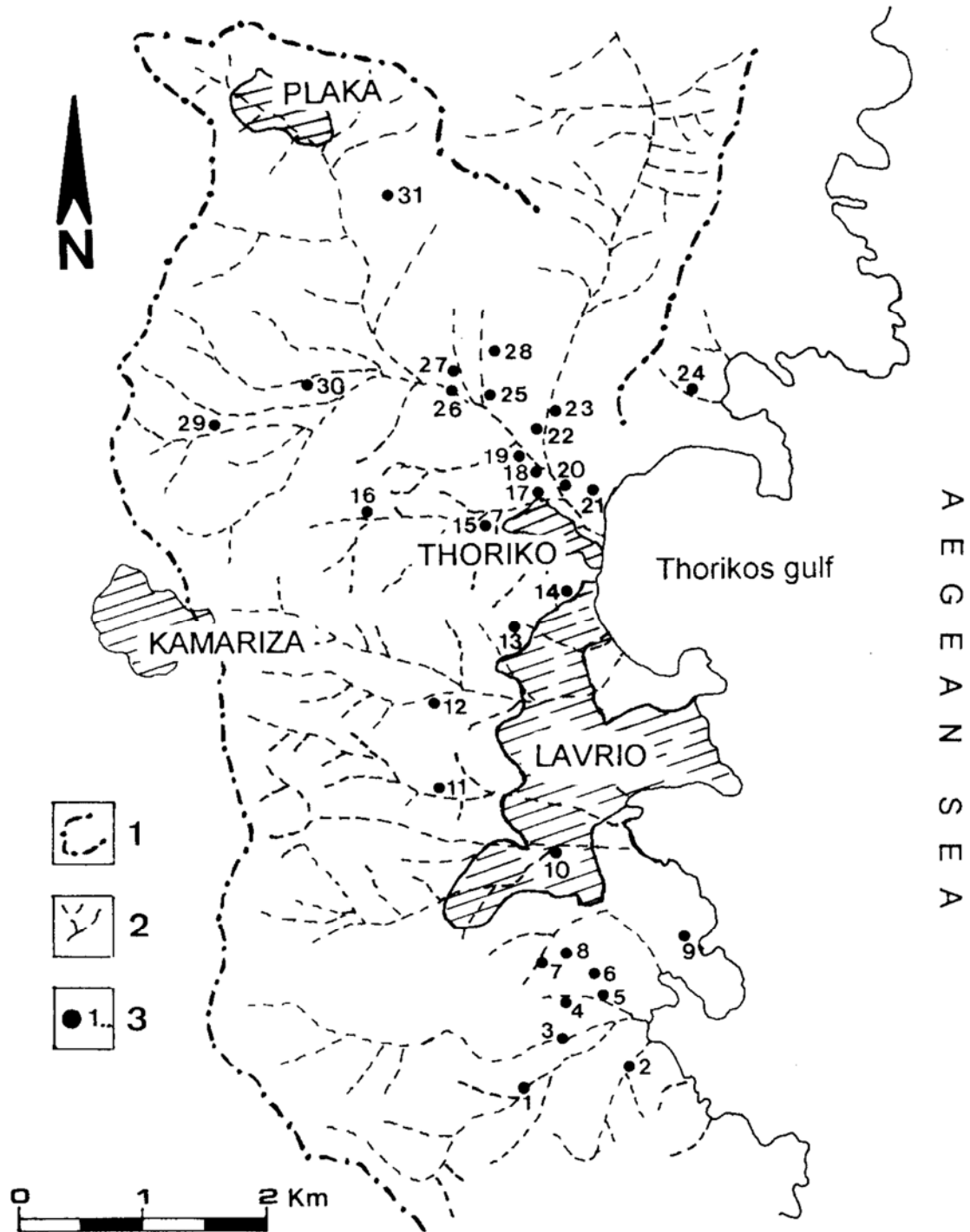


Εικόνα 4. 8: Απλοποιημένη γεωλογική τομή της περιοχής Καμάριζα-Λαύριο. 1)Κατώτερο μάρμαρο, 2) ανώτερο μάρμαρο, 3) μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι, 4) φυλλιτικό κάλυμμα με μάρμαρα και πρασινίτες, 5) μάρμαρα υπερέκλυσης του φυλλιτικού καλύμματος 6) τεταρτογενείς αποθέσεις

Μεγάλες ομοιότητες στις υδρογεωλογικές ιδιότητες παρουσιάζουν ο σχιστόλιθος με τον φυλλίτη. Πρόκειται για δύο αδιαπέρατα πετρώματα στην αποσαθρωμένη μάζα των οποίων όμως μπορούν να δημιουργηθούν υπόγειοι κι υπό πίεση υδροφόροι ορίζοντες ιδιαίτερα στο νότιο Λαύριο και την Καμάριζα. Οι κάτοικοι της περιοχής εκμεταλλεύονται τους υδροφόρους ορίζοντες με ρηγά πηγάδια. Η περιορισμένη υδροπερατότητα των στρωμάτων (που σημαίνει μειωμένη κατεισδυση και επομένως ελλιπή πλήρωση του υδροφορέα), σε συνδυασμό με την εκτεταμένη άντληση των πηγαδιών, έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των αποθεμάτων ή και ακόμα τη στέρευση των πηγαδιών. Το υδρογραφικό δίκτυο που αναπτύσσεται στους φυλλίτες και τους σχιστόλιθους έχει δενδροειδή μορφή.

Στη λεκάνη του Θορικού και σε κάποιες εκτάσεις της λεκάνης του Λαυρίου, αναπτύσσονται αλλουβιακοί, ελεύθεροι υδροφορείς στις τεταρτογενείς (αλλουβιακές) αποθέσεις. Οι υδροφόροι αυτοί χαρακτηρίζονται από μικρή υδραυλική αγωγιμότητα και περιορισμένα υδραυλικά χαρακτηριστικά, αφού απαρτίζονται από αποθέσεις μικρής κοκκομετρίας. Στο Θορικό, το αδιαπέρατο δάπεδο του αλλουβιακού υδροφόρου είναι σχιστόλιθος Καισαριανής (της αυτόχθονης ενότητας), ενώ στο Λαύριο περιέχει φυλλίτες και σχιστόλιθους του Φυλλιτικού καλύμματος. Οι δύο κύριες πηγές τροφοδοσίας είναι το νερό της βροχής που κατεισδύει και η πλευρική τροφοδοσία από τους καρστικούς υδροφόρους των μαρμάρων και από το νερό των

σχιστόλιθων. Στους αλλουβιακούς υδροφόρους έχουν επίσης κατασκευαστεί ρηγά πηγάδια, που χρησιμοποιούνται για άρδευση μικρών γεωργικών μονάδων.



Εικόνα 4. 9: Πρότυπες θέσεις αποστράγγισης και δειγματοληψίας υπόγειων υδάτων της περιοχής μελέτης. 1) διαχωρισμός αποστράγγισης, 2) χείμαρροι και 3) τα σημεία δειγματοληψίας του νερού

4.4 Μόλυνση Λαυρεωτικής από μεταλλευτική δραστηριότητα

Η Λαυρεωτική όπως είπαμε είναι μια ιδιαίτερα πλούσια σε μέταλλα περιοχή. Αποτελεί πόλο έλξης πολλών ερευνητών και φυσικά είναι το λίκνο των Ελλήνων Μεταλλειολόγων. Ωστόσο, παρά την οικονομική δύναμη που έδωσε στην περιοχή δεν μπορεί κανείς να μην σκεφτεί και την τεράστια ρύπανση που υπάρχει, τόσο την ορατή όσο και την μη ορατή. Αναφερόμαστε στα κατάλοιπα από την εξόρυξη κι επεξεργασία των μεταλλευτικών ορυκτών.

Από την αρχαιότητα ήδη οι άνθρωποι γνώριζαν την καταστροφική επίδραση των εξορύξεων στα ζώα και στον άνθρωπο από τις αναθυμιάσεις των αρσενικούχων και μολυβδούχων καπνών. Σήμερα, υπάρχουν τρεις κατηγορίες απορριμμάτων στην ευρύτερη περιοχή, τα απορρίμματα επίπλευσης (εμπλουτισμού), οι σκωρίες κι οι πυρίτες ή σιδηροπυρίτες.

- Τα απορρίμματα επίπλευσης του μεταλλεύματος ονομάζονται από τους κατοίκους 'σαβούρα' και καταλαμβάνουν την μεγαλύτερη έκταση. Βρίσκονται στη βόρεια πλευρά στη θέση Καβοδόκανος, και στη νότια ακτή του κόλπου του Θορικού. Είναι στείρα θρυμματισμένα και λειοτριβημένα πετρώματα (άμμος και κροκάλες) τα οποία κατά την διαδικασία του εμπλουτισμού είχαν απομακρυνθεί από το μέταλλευμα. Περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις τοξικών στοιχείων, όπως μόλυβδος, κάδμιο, αρσενικό, αντιμόνιο κ.ά. Η «σαβούρα» θεωρείται το πλέον επικίνδυνο μεταλλουργικό απόρριμμα, εφ' όσον ένα μεγάλο τμήμα της πόλης του Λαυρίου είναι κτισμένο πάνω σ' αυτή και ο τοπικός πληθυσμός και κυρίως τα παιδιά, έρχονται σε άμεση επαφή με το ρυπασμένο αυτό υλικό. Επίσης, η «σαβούρα» αποτελεί κηπευτικό έδαφος, δεδομένου ότι οι κάτοικοι φυτεύουν λαχανικά, αμπέλια, ελαιόδενδρα κ.ά. Επί πλέον χρησιμοποιείται και ως δομικό υλικό. Η πρώτη εφαρμογή αποκατάστασης του μολυσμένου εδάφους έγινε την περίοδο 1995-1996 από το Ε.Μ.Π. σε 25 στρέμματα απόθεσης θειούχων απορριμμάτων, μέσα στην πρώην γαλλική εταιρεία, με άριστα μέχρι σήμερα αποτελέσματα αποκατάστασης του εδάφους, το οποίο είναι πλήρως αδρανοποιημένο και δεν παρουσιάζει κανένα περιβαλλοντικό πρόβλημα στην περιοχή. Ανάλογη περιβαλλοντική αποκατάσταση μολυσμένου εδάφους από θειούχα απορρίμματα με την συνεργασία του Ι.Γ.Μ.Ε. και του Ε.Μ.Π. έγινε

το 1996 σε ένα τριετές πρόγραμμα (1994-1997) στην περιοχή Καβοδόκανος χωρίς έχει υπάρξει κάποια πρόοδος με το πρόβλημα της περιοχής.

Χημικό στοιχείο		Όλα τα δείγματα των μεταλλουργικών απορριμμάτων (n=62) (τιμές σε χιλιοστόγραμμα μέταλλου ανά κιλό εδάφους, mg/kg)					Πέτρωμα (n=140)*	Έδαφος (n=224)**	
		Ελάχιστη τιμή.	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής διακύμανσης (%)	Διάμεση τιμή	Διάμεση τιμή (mg/kg)	Διάμεση τιμή (mg/kg)
Άργυρος	Ag	3,2	96,0	33,8	28,2	83,5	18,9	0,5	12,1
Αρσενικό	As	283,0	26.063,0	4.593,0	5.383,0	117,2	2.492,0	15,6	1.290,0
Βόριο	B	<5,0	667,1	61,8	102,8	166,4	43,0	0,3	136,0
Βάριο	Ba	27,7	2.059,0	368,2	419,0	113,8	243,0	210,0	479,0
Βηρύλλιο	Be	<1,0	1,3	0,6	0,3	40,6	0,5	-	1,0
Βισμούθιο	Bi	<5,0	56,9	6,8	10,8	158,3	2,5	-	11,0
Κάδμιο	Cd	116,6	580,8	74,8	116,6	155,9	20,6	0,5	38,0
Κοβάλτιο	Co	3,0	84,0	26,4	16,0	60,6	23,8	20,5	16,0
Χρόμιο	Cr	8,1	299,2	83,5	60,0	71,9	73,2	20,0	183,0
Χαλκός	Cu	184,0	8.700,0	1.172,9	1.362,6	116,2	630,5	25,0	186,0
Σίδηρος	Fe	35.000,0	380.000,0	217.081,0	89.238,0	41,1	234.500,0	19.515,0	44.771,0
Υδράργυρος	Hg	<1,0	10,2	2,6	1,7	67,1	2,4	0,5	0,1
Λανθάνιο	La	<2,0	47,3	25,1	11,6	46,3	27,3	8,9	22,7
Λίθιο	Li	<1,0	25,8	12,2	7,2	58,9	14,5	5,0	17,4
Μαγγάνιο	Mn	182,0	35.354,0	11.913,0	9.925,0	83,3	9.398,0	1.200,0	2.189,0
Μολυβδαίνιο	Mo	<1,0	111,1	9,3	19,0	205,5	3,6	0,5	4,9
Νικέλιο	Ni	5,5	205,2	51,4	40,4	78,6	38,5	54,5	127,0
Μόλυβδος	Pb	3.800,0	85.200,0	24.451,0	18.085,4	74,0	20.750,0	22,0	7.305,0
Θείο	S	1.972,1	341.731,7	48.394,6	73.380,1	151,6	20.581,2	1.200,0	12.690,0
Αντιμόνιο	Sb	183,3	851,0	229,5	183,3	79,9	189,0	2,5	121,0
Κασσίτερος	Sn	5,7	332,3	37,5	43,7	116,4	27,7	-	18,5
Τιτάνιο	Ti	<10,0	2.031,0	799,8	682,5	85,3	737,7	300,0	2.162,0
Ουράνιο	U	<5,0	12,5	3,2	1,9	57,6	2,5	2,5	3,0
Βανάδιο	V	<2,0	104,2	44,4	23,8	53,7	46,3	9,0	75,0
Ψευδάργυρος	Zn	1.500,0	98.000,0	41.194,0	25.332,0	61,5	39.800,0	57,0	6.668,0

*Πέτρωμα: Ag, Mo (n=155). B, Be, Bi, Hg, La, S, Sb, Sn, U (n=48)

**Έδαφος: B, Bi, Hg, S, Sn, U (n=50). Sb (n=90)

Πίνακας 4.1. Στατιστικές παράμετροι των συγκεντρώσεων των στοιχείων στα δείγματα των μεταλλουργικών απορριμμάτων, πετρώματος και εδαφικού καλύμματος του Λαυρίου. Οι διάμεσες τιμές των συγκεντρώσεων των στοιχείων στα δείγματα πετρώματος και εδαφικού καλύμματος παρατίθενται για σύγκριση (από Demetriades and Vergou-Vichou 1999b, Πίνακας 5.1, σελ. 128)

- Οι σκωρίες ή κοινώς σκουριές είναι τα απορρίμματα από τη τήξη του μεταλλεύματος για την εξαγωγή του αργυρούχου μολύβδου. Βρίσκονται γύρω από φυσικούς λόφους στο νότιο και βόρειο τμήμα του Λαυρίου και στις παραλίες. Έχουν λανθασμένα χρησιμοποιηθεί ως υλικό αμμοβολής, υπόστρωμα σε δρόμους και αυλές σχολείων ως υλικό πλήρωσης στα θεμέλια κτιρίων, στην κατασκευή του νέου λιμανιού κ.ά. Το υλικό αμμοβολής δημιουργείται από τη θραύση των σκουριών σε σπαστήρες. Χρησιμοποιείται ως λειαντικό υλικό για τον καθαρισμό λεβήτων κ.λπ. Στο Λαύριο χρησιμοποιείται επίσης για την επιστροφή δρόμων, υπόστρωμα σε αγωγούς και ως υλικό μόνωσης στα θεμέλια κτιρίων. Το γαιώδες ή χωματίνο υλικό εντός των σκουριών δημιουργήθηκε από την επί τόπου θραύση και τριβή των σκουριών καθώς και τη συσσώρευση χώματος μέσω αιολικής μεταφοράς. Η ποσότητα αυτών των σκουριών, πριν την εκμετάλλευσή τους στα προαναφερθέντα έργα, ανερχόταν σε περίπου 500.000 τόνους. Σήμερα στην

περιοχή Καβοδόκανος υπάρχει σκωρία ποσότητας 400.000 τόνων με περιεκτικότητα 1-2% μόλυβδο, 7% ψευδάργυρο και 21-25% σίδηρο. Οι απόψεις των ερευνητών δίστανται σχετικά με το πόσο επιβλαβείς είναι οι σκωρίες της περιοχής. Το μόνο σίγουρο είναι ότι όσο οι σκωρίες δεν μετακινούνται και παραμένουν στην θέση τους ως έχουν και δεδομένου ότι κάτω από τον λόφο Καβοδόκανου δεν διέρχεται υδροφόρος ορίζοντας το περιβαλλοντικό πρόβλημα είναι σαφώς περιορισμένο.



Εικόνα 4. 10: Πάνω στον λόφο του Καβοδόκανου ο οποίος αποτελείται από σκωρίες. (φωτογραφία κατά την διάρκεια της γεωφυσικής έρευνας)

- Οι σιδηροπυρίτες ή πυρίτες είναι απορρίμματα του εμπλουτισμού του μεταλλεύματος. Ο σιδηροπυρίτης, εκτός από τις συγκεντρώσεις των τοξικών στοιχείων που περιέχει, οξειδώνεται με την επίδραση του αέρα και της βροχής και δημιουργεί όξινη απορροή, δηλαδή τα νερά που έρχονται σε επαφή μαζί του είναι όξινα (έχουν χαμηλό $\text{pH} < 3$) και ιδιαίτερα ρυπασμένα. Οι σιδηροπυρίτες βρίσκονται κυρίως στην παραλία του κόλπου του Θορικού και στον Καβοδόκανο. Οι πυριτούχοι άμμοι είναι απορρίμματα του εμπλουτισμού του μεταλλεύματος με μικρό ποσοστό σιδηροπυρίτη.



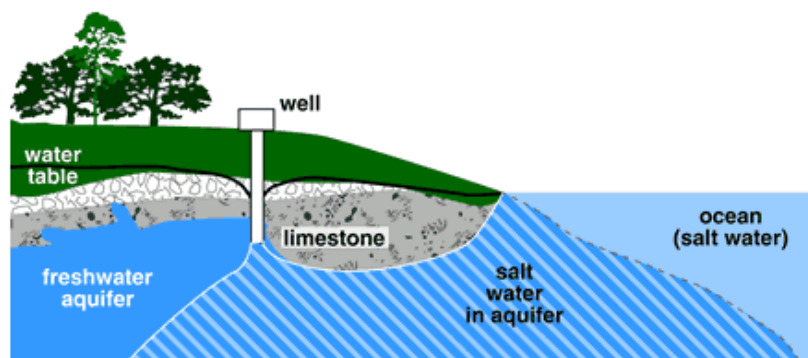
Εικόνα 4. 11: Άποψη της παραλίας του κόλπου του Θορικού όπου έχει γίνει απόθεση σιδηροπυριτών και σκωριών. (φωτογραφία κατά την διάρκεια της γεωφυσικής έρευνας)

Το ένα μέρος της γεωφυσικής έρευνας που αφορά στην περιοχή του Καβοδόκανου είχε ως σκοπό τον εντοπισμό της στρωματογραφίας έτσι ώστε σε πρώτο στάδιο να οριστούν τα στρώματα λιθολογικά και σε δεύτερο στάδιο να βρεθεί το περιεχόμενο τους σε μεταλλικό φορτίο βρίσκοντας έτσι που υπάρχει μόλυνση από τις μεταλλευτικές δραστηριότητες.

4.5 Υφαλμύριση Λαυρεωτικής

Η έρευνα των παράκτιων καρστικών υδροφορέων και η εκμετάλλευση-αξιοποίηση των υπόγειων νερών τους, έχουν πολύ μεγάλο παγκόσμιο ενδιαφέρον, κυρίως για χώρες που δομούνται κατά ένα υψηλό ποσοστό από ανθρακικά πετρώματα ιδιαίτερα στις παράκτιες περιοχές. Η Ελλάδα είναι μια από αυτές τις χώρες αφενός γιατί το 35% της έκτασής της αποτελεί χώρο ανάπτυξης ανθρακικών πετρωμάτων, αφετέρου γιατί έχει πολύ μεγάλη ακτογραμμή.

Η εκμετάλλευση και διαχείριση των υπόγειων νερών παράκτιων υδροφορέων είναι άμεσα συνδεδεμένη με το φαινόμενο της διείσδυσης της θάλασσας σε αυτούς, δηλαδή της εισροής θαλάσσιου νερού στο σύστημα των εν λόγω υδροφορέων. Έτσι το αλμυρό νερό αντικαθιστά ίσες ποσότητες γλυκού νερού. Αποτέλεσμα της διείσδυσης αυτής της θάλασσας είναι η υφαλμύριση των υδροφορέων αυτών.



Εικόνα 4. 12: Το φαινόμενο της υφαλμύρισης

Στη Λαυρεωτική, παρατηρείται η εισχώρηση της θάλασσας στον παράκτιο υδροφορέα και μάλιστα με αυξανόμενο ρυθμό. Το φαινόμενο αποδίδεται στην υδραυλική επικοινωνία της θάλασσας με τους υδροφόρους σε συνδυασμό με την συνεχόμενη άντληση των γεωτρήσεων και των πηγαδιών.

Η υφαλμύριση των υπόγειων νερών συνδέεται άμεσα με τις γεωλογικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε γεωφυσική έρευνα στην παράκτια ζώνη του κόλπου του Θορικού για τον εντοπισμό της στρωματογραφίας της περιοχής μελέτης και τον υφαλμυρισμένων δομών.

4.6 Γεωφυσική έρευνα

4.6.1 Εισαγωγή

Η γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή του Θορικού Λαυρίου έγινε με γνώμονα τον προσδιορισμό του μετώπου υφαλμύρισης στον κόλπο του Θορικού και τον εντοπισμό της στρωματογραφίας του λόφου που υπάρχει στην περιοχή Καβοδόκανος, προκειμένου να βρεθεί η ρύπανση του λόφου από κατάλοιπα μεταλλευτικών δραστηριοτήτων. Έτσι λοιπόν, μπορούμε να χωρίσουμε την έρευνα σε δύο περιοχές μελέτης. Η πρώτη (τμήμα Α) καλύπτει όλη την παράκτια ζώνη της κοιλάδας του Θορικού κι ένα τμήμα που επιλέχθηκε πιλοτικά στον νότιο μέρος του κόλπου του Θορικού. Στο τμήμα Α έγιναν έξι γεωηλεκτρικές τομές εκ των οποίων οι πέντε αφορούν στην παράκτια ζώνη της κοιλάδας κι η μία αφορά στο κομμάτι στον νότιο κόλπο. Η δεύτερη (τμήμα Β) καλύπτει τον λόφο της περιοχής Καβοδόκανος στην οποία έγιναν τρεις γεωηλεκτρικές τομογραφίες.



Εικόνα 4. 13 Οι τομές που έγιναν στην περιοχή του Θορικού (Google earth)

4.6.2 Σχεδιασμός έρευνας

ΤΜΗΜΑ Α

Στο τμήμα Α έγιναν συνολικά έξι γεωηλεκτρικές τομές. Οι πέντε αφορούν στον προσδιορισμό του μετώπου υφαλμύρισης και περιλαμβάνουν μετρήσεις ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ERT), στο βόρειο μέρος του κόλπου του Θορικού καλύπτοντας συνολικά την παράκτια ζώνη της κοιλάδας του Θορικού. Η ανάλυσή τους στο λογισμικό RES2DINV έγινε σαν να πρόκειται για μια μεγάλη συνεχόμενη τομή με μήκος 1.450m. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε είναι η Wenner – Schlumberger. Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν 358 ηλεκτρόδια με απόσταση 5m μεταξύ τους. Αθροιστικά το μήκος των τομών θα έπρεπε να είναι 1.785m. Ωστόσο, λόγω της αλληλεπικάλυψης των τομών το μήκος είναι όπως αναφέραμε 1.450m. Η αλληλεπικάλυψη των τομών έγινε προκειμένου να μην υπάρξει κάποιο τμήμα στο μέτωπο το οποίο να μην μετρηθεί επαρκώς. Το σύνολο των μετρήσεων που πάρθηκαν από το Syscal ανέρχεται σε 5.255. Η ονομασία της γεωηλεκτρικής τομής όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω είναι: KTH 1-5 RES.

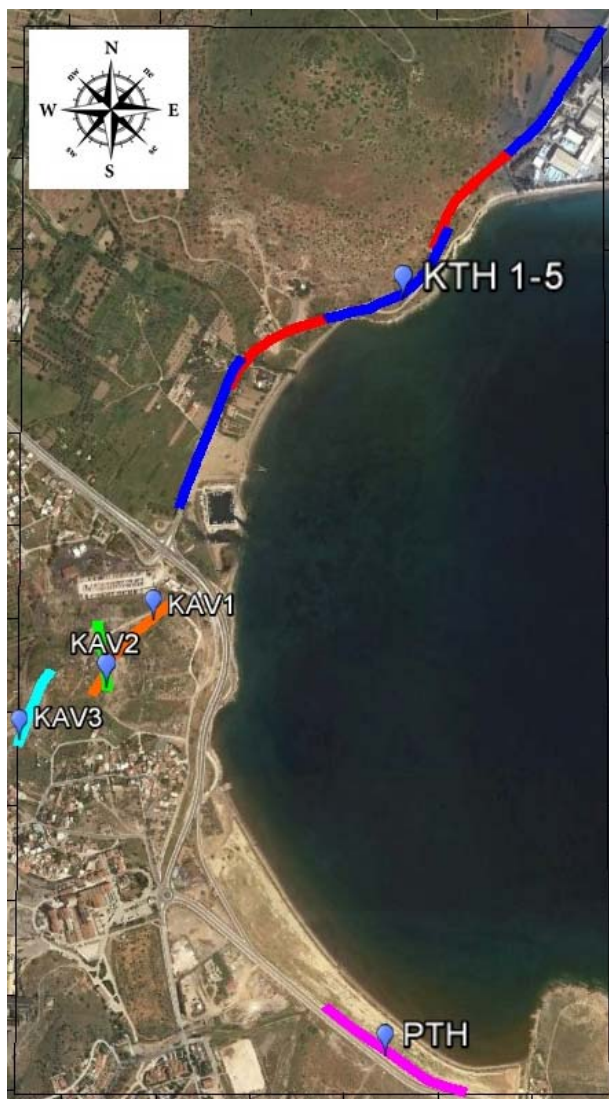
Για το τμήμα που επιλέχθηκε πιλοτικά στο νότιο μέρος του κόλπου του Θορικού έγινε μία γεωηλεκτρική τομή κι αφορά επίσης στον προσδιορισμό του μετώπου υφαλμύρισης. Σ' αυτήν την τομή έγιναν μετρήσεις ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ERT) κι επαγόμενης πολικότητας (IP). Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε είναι η Pole-Dipole. Το συνολικό μήκος της τομής ανέρχεται σε 350m ενώ χρησιμοποιήθηκαν 72 ηλεκτρόδια με απόσταση 5m μεταξύ τους. Το σύνολο των μετρήσεων ανέρχεται σε 845. Η ονομασία των γεωηλεκτρικών τομών όπως θα παρουσιαστούν παρακάτω είναι: PTH RES (τομογραφία ειδικής αντίστασης) και PTH IP (επαγόμενη πόλωση).

ΤΜΗΜΑ Β

Στο τμήμα Β έγιναν συνολικά 3 γεωηλεκτρικές τομές. Οι θέσεις των γεωηλεκτρικών τομών επιλέχθηκαν με σκοπό να καλυφθεί με τον καλύτερο τρόπο η περιοχή αλλά και να υπάρχει χώρος στην ευθεία της ανάπτυξης των ηλεκτροδίων. Και στις τρεις τομές έγιναν μετρήσεις ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ERT) με διάταξη Pole – Dipole κι επαγόμενης πολικότητας (IP). Το μήκος της πρώτης τομής είναι 250m και χρησιμοποιήθηκαν 54 ηλεκτρόδια με απόσταση 5m μεταξύ τους. Για

την πρώτη τομή το Syscal κατέγραψε 1.271 μετρήσεις. Το μήκος της δεύτερης τομής είναι 155m και χρησιμοποιήθηκαν 62 ηλεκτρόδια με απόσταση 2,5m μεταξύ τους. Στην δεύτερη τομή πάρθηκαν 1.207 μετρήσεις. Το μήκος της τρίτης τομής είναι 175m και χρησιμοποιήθηκαν 72 ηλεκτρόδια με απόσταση 2,5m μεταξύ τους. Για την τρίτη τομή το σύνολο των μετρήσεων ανέρχεται σε 1.622. Οι ονομασίες των τομών όπως θα παρουσιαστούν παρακάτω είναι:

- Πρώτη τομή: KAV1 RES (τομογραφία ειδικής αντίστασης) και KAV1 IP (επαγόμενη πόλωση).
- Δεύτερη τομή: KAV2 RES (τομογραφία ειδικής αντίστασης) και KAV2 IP (επαγόμενη πόλωση).
- Τρίτη τομή: KAV3 RES (τομογραφία ειδικής αντίστασης) και KAV3 IP (επαγόμενη πόλωση).



Εικόνα 4. 14: Παρουσίαση της ονομασίας των τομών

4.6.3 Εξοπλισμός και λογισμικό

ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις υπαίθρου στο Θορικό Λαυρίου περιλαμβάνει το όργανο SYSCAL PRO της εταιρείας IRIS INSTRUMENTS, τα καρούλια με τα καλώδια, τα ηλεκτρόδια και το διαφορικό GPS LEICA 1200.

SYSCAL PRO

Πρόκειται όργανο μέτρησης πολλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και επαγόμενης πολικότητας το οποίο περιλαμβάνει έναν εσωτερικό πολυπλέκτη (switch) δίνοντας έτσι την δυνατότητα σύνδεσης 72 ηλεκτροδίων με την βοήθεια δύο υποδοχών. Τα τεχνικά του χαρακτηριστικά είναι:

- Ταυτόχρονη λήψη από 10 κανάλια για υψηλής ταχύτητας απόκτηση δεδομένων.
- Μέγιστο δυναμικό στην πηγή 800V (switch mode) και 1000V (manual mode)
- Μέγιστο ρεύμα εξόδου 2,5A
- Μέγιστη ισχύς 250W
- Δυνατότητα σύνδεσης από 24 έως και πάνω από 1.300 ηλεκτρόδια.
- Δυνατότητα αποθήκευσης έως και 40.000 μετρήσεων
- Μπαταρία 12V με δυνατότητα προσθήκης κι εξωτερικής πηγής ενέργειας



Εικόνα 4. 15: Το όργανο Syscal Pro που διαθέτει το εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Οι μετρήσεις γίνονται αυτόματα, εφόσον ο χρήστης έχει τροφοδοτήσει το Syscal Pro με ένα αρχείο που καθορίζει ποιες μετρήσεις θα ληφθούν κι έχει καθορίσει τις παραμέτρους λειτουργίας του (μέγιστες τιμές ρεύματος ή διαφοράς δυναμικού, πλήθος επαναλήψεων σε κάθε μετρητή κλπ.). Στη συνέχεια το Syscal διαβάζει την σειρά των μετρήσεων που θα υλοποιηθούν από το αρχείο. Στην ουσία πρόκειται για ένα αρχείο κειμένου με πολύ απλή δομή στην αρχή του οποίου υπάρχουν γενικές πληροφορίες όπως όνομα κι ημερομηνία. Στη συνέχεια αναγράφονται οι τιμές των παραμέτρων που έχει ορίσει ο χρήστης (τύπος δεδομένων, τύπος διάταξης, πλήθος δεδομένων που θα ληφθούν). Ακολουθούν διαδοχικές σειρές σε κάθε μία από τις οποίες περιέχονται, σε διαδοχικές στήλες, οι αριθμοί – ταυτότητα των ηλεκτροδίων που θα χρησιμοποιηθούν για ηλεκτρόδια ρεύματος (A&B) κι ηλεκτρόδια δυναμικού (M&N). Η κατασκευάστρια εταιρεία συνοδεύει το όργανο με μια εφαρμογή (ELECTRE Pro) που δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργήσει ένα τέτοιο αρχείο, το οποίο συνήθως αναφέρεται ως πρωτόκολλο, προσφέροντας την δυνατότητα οπτικοποίησης του αρχείου αυτού.

GPS LEICA 1200

Το διαφορικό GPS LEICA 1200 χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να βρεθεί η ακριβής θέση των ηλεκτροδίων σε κάθε τομή όπως επίσης και το απόλυτο υψόμετρο.

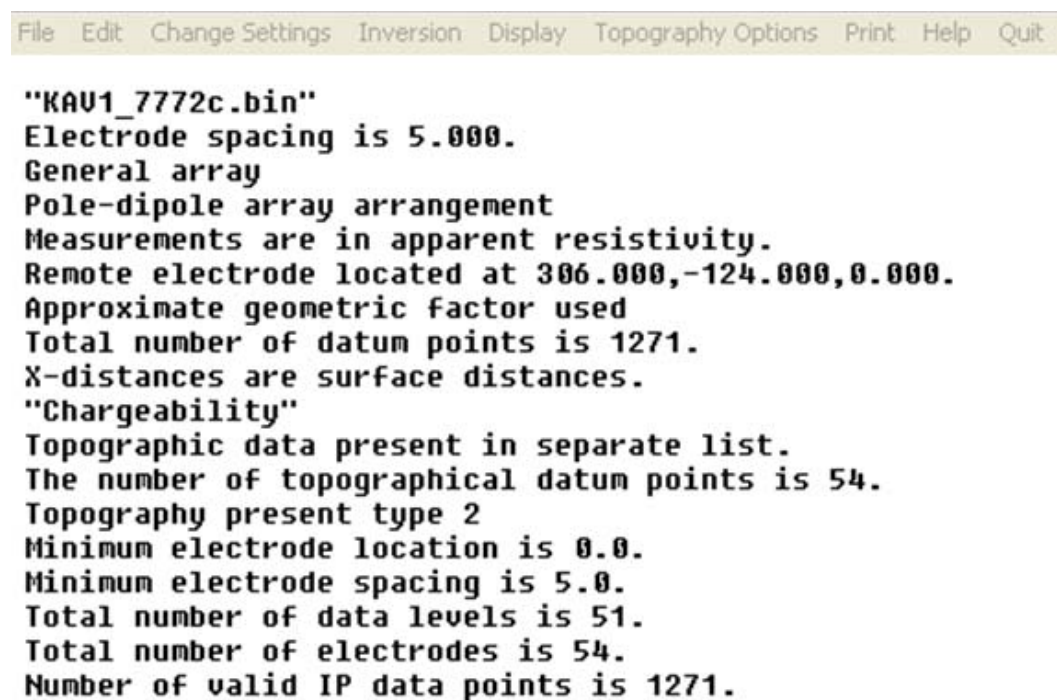


Εικόνα 4. 16: Το διαφορικό GPS LEICA 1200

ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

RES2DINV

Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των ηλεκτρικών τομογραφιών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RES2DINV. Το πρόγραμμα χωρίζει το υπέδαφος σε έναν αριθμό ορθογώνιων παραλληλόγραμμων και θεωρεί σταθερή την πραγματική ειδική αντίσταση σε κάθε ορθογώνιο. Ξεκινώντας από αρχικό μοντέλο το οποίο προκύπτει θέτοντας κάποια τιμή για την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση, υπολογίζει τις τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που αντιστοιχούν στο μοντέλο αυτό και τις συγκρίνει με τις μετρημένες τιμές της φαινόμενης αντίστασης. Με διαδοχικές επαναλήψεις μειώνεται συνεχώς το σφάλμα. Τελικά επιλέγεται ένα μοντέλο με μικρό σφάλμα, όταν οι επόμενες επαναλήψεις δεν μειώνουν σημαντικά την τιμή του σφάλματος, δηλαδή όταν η επαναληπτική διαδικασία παρουσιάζει σύγκλιση. Τα δεδομένα που έχουν παρθεί από τις μετρήσεις τα εμφανίζει συγκεντρωτικά όπως φαίνονται στην **Εικόνα 4.17**.



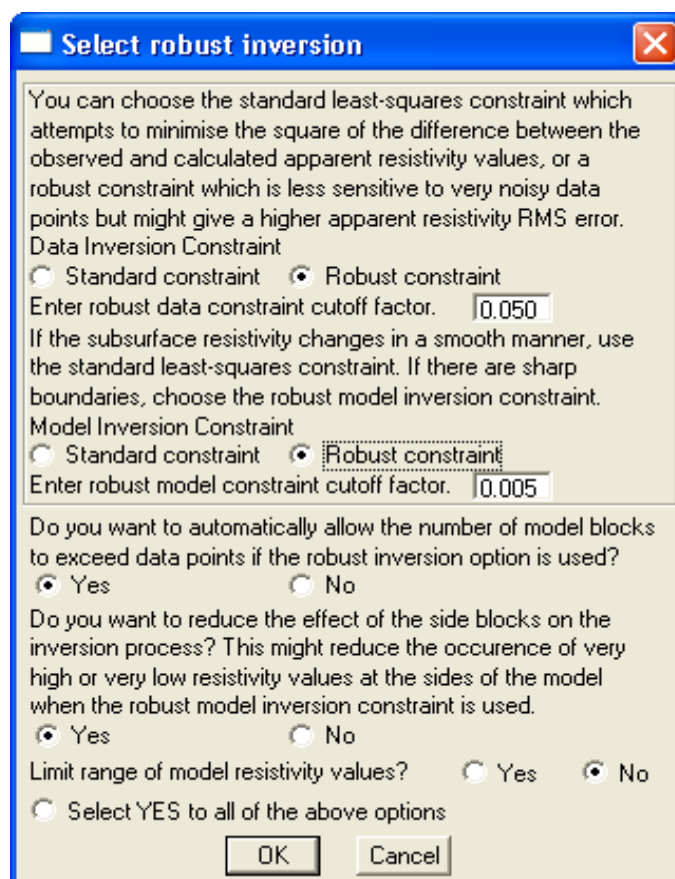
```
File Edit Change Settings Inversion Display Topography Options Print Help Quit

"KAU1_7772c.bin"
Electrode spacing is 5.000.
General array
Pole-dipole array arrangement
Measurements are in apparent resistivity.
Remote electrode located at 306.000,-124.000,0.000.
Approximate geometric factor used
Total number of datum points is 1271.
X-distances are surface distances.
"Chargeability"
Topographic data present in separate list.
The number of topographical datum points is 54.
Topography present type 2
Minimum electrode location is 0.0.
Minimum electrode spacing is 5.0.
Total number of data levels is 51.
Total number of electrodes is 54.
Number of valid IP data points is 1271.
```

Εικόνα 4. 17: Δεδομένα από την τομογραφία KAV 1

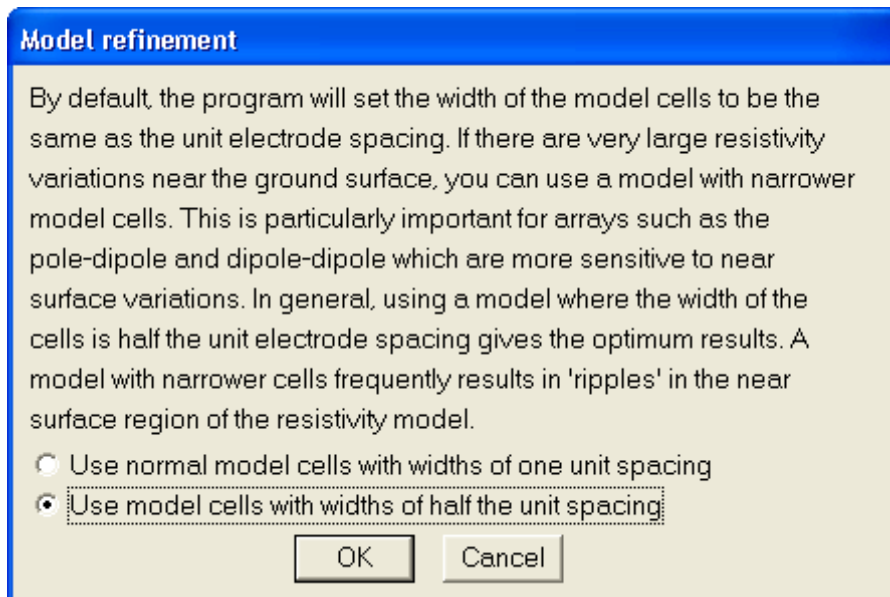
Το RES2DINV διαθέτει δύο διαφορετικές μεθόδους αντιστροφής. Η πρώτη (Standard least-squares constraint) υπαγορεύει ότι οι τιμές της ειδικής αντίστασης του μοντέλου αλλάζουν με ομαλό ή σταδιακό τρόπο. Η συγκεκριμένη μέθοδος

εξασφαλίζει ένα μοντέλο με ομαλή κατανομή της ειδικής αντίστασης. Αυτή η προσέγγιση είναι αποδεκτή μόνο σε περιπτώσεις που οι πραγματικές τιμές της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους αλλάζουν με ομαλό ή σταδιακό τρόπο. Η δεύτερη μέθοδος (Robust model inversion constraint) χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το υπέδαφος είναι έντονα ανομοιογενές. Το υπέδαφος στην περιοχή της έρευνας στο Θορικό είναι ανομοιογενές και γι' αυτόν τον λόγο επιλέχθηκε η δεύτερη μέθοδος (Robust).



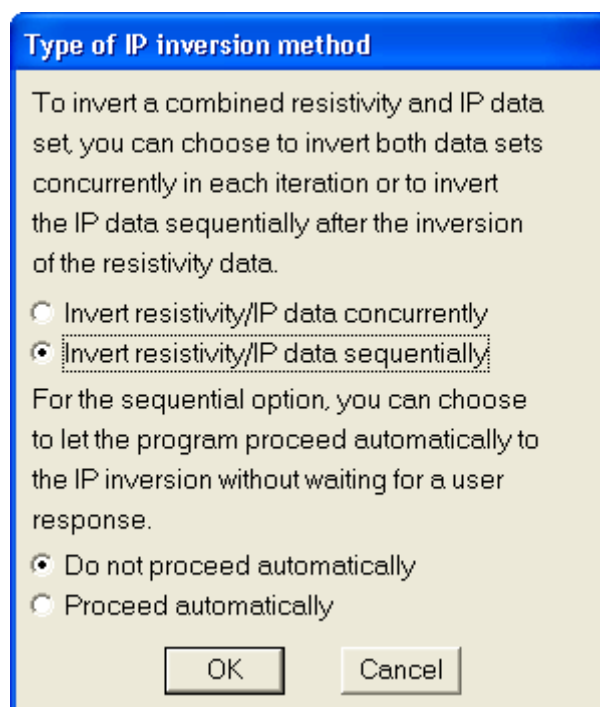
Εικόνα 4. 18: : Εικόνα από το πρόγραμμα RES2DINV από την οποία επιλέχθηκε η παράμετρος Robust

Το RES2DINV έχει την δυνατότητα να δημιουργήσει επιπρόσθετες μετρήσεις λαμβάνοντας υπόψη το μισό της απόστασης των ηλεκτροδίων που τοποθετήθηκαν (model cells with widths of half the unit spacing). Το αποτέλεσμα είναι η διάκριση με μεγαλύτερη λεπτομέρεια του υπεδάφους στο τελικό μοντέλο. Η επιλογή αυτής της παραμέτρου (Model Refinement) φαίνεται στην **Εικόνα 4.19**.



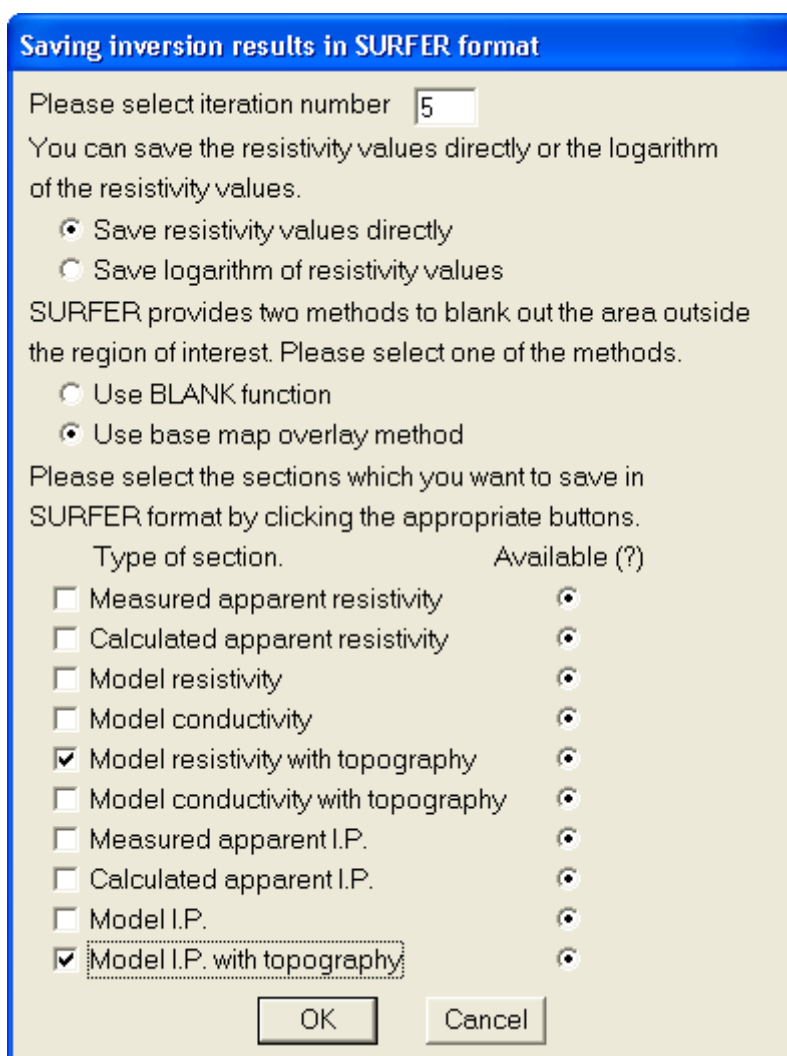
Εικόνα 4. 19: Εικόνα από το πρόγραμμα RES2DINV από την οποία επιλέχθηκε η παράμετρος Model cells with widths of half the unit spacing

Στην συνέχεια, στις τομές που χρησιμοποιήθηκε η επαγόμενη πολικότητα, επιλέχθηκε η παράμετρος Invert resistivity/IP data sequentially έτσι ώστε η αναστροφή των δεδομένων της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της επαγόμενης πολικότητας να μην γίνονται ταυτόχρονα αλλά διαδοχικά.



Εικόνα 4. 20: Εικόνα από το πρόγραμμα RES2DINV στην οποία επιλέχθηκε η διαδοχική αναστροφή των δεδομένων της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της επαγόμενης πολικότητας

Τελικά, μετά την επεξεργασία των δεδομένων επιλέχθηκε η αποθήκευσή τους με τρόπο τέτοιο ώστε η τελική τους διαμόρφωση και παρουσίαση να γίνει με το πρόγραμμα SURFER 11 (Saving inversion results in SURFER format).



Εικόνα 4. 21: Εικόνα από το πρόγραμμα RES2DINV κατά την αποθήκευση των δεδομένων σε μορφή αρχείου ικανού να επεξεργαστεί με το πρόγραμμα SURFER

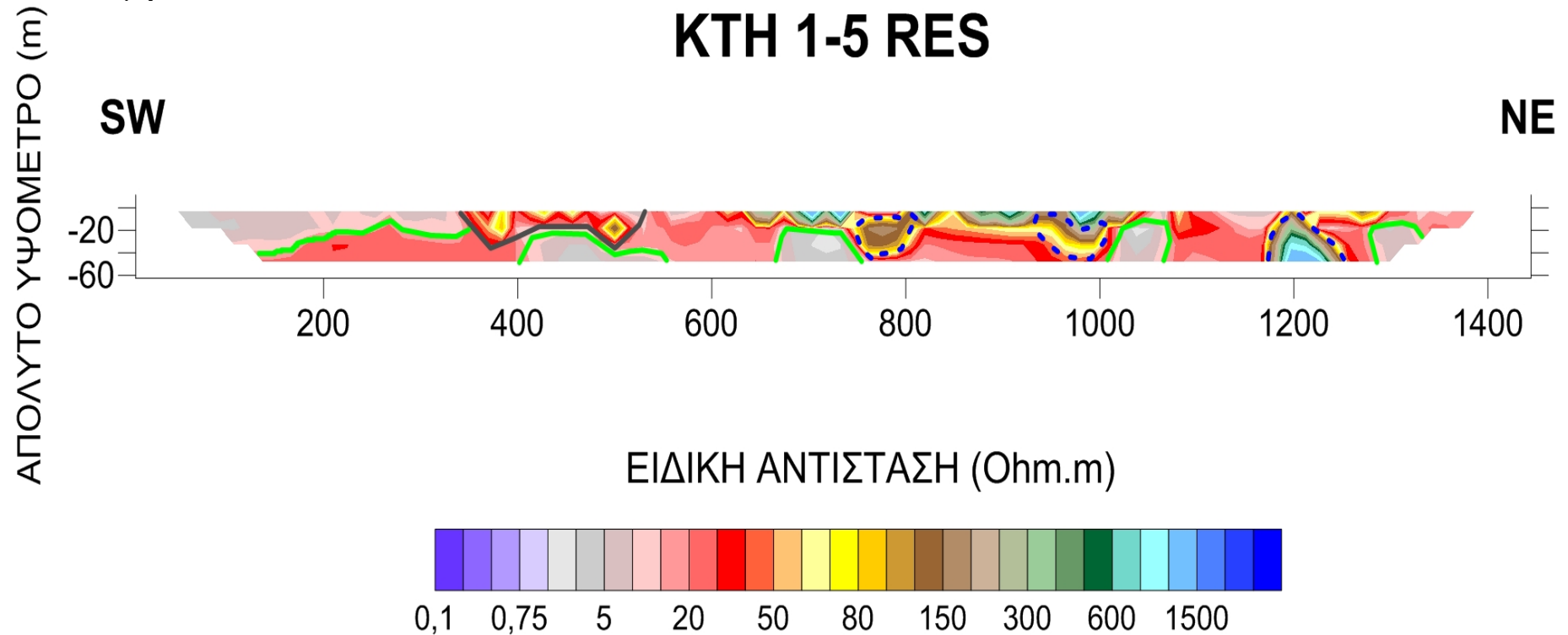
SURFER 11

Η τελική διαμόρφωση και παρουσίαση των αναστροφών που παρήχθησαν από το πρόγραμμα RES2DINV πραγματοποιήθηκε με την χρήση του προγράμματος SURFER 11.

4.6.4 Γεωηλεκτρικές τομές

ΤΜΗΜΑ Α

4.6.4.1 Τομή ΚΤΗ 1-5 RES

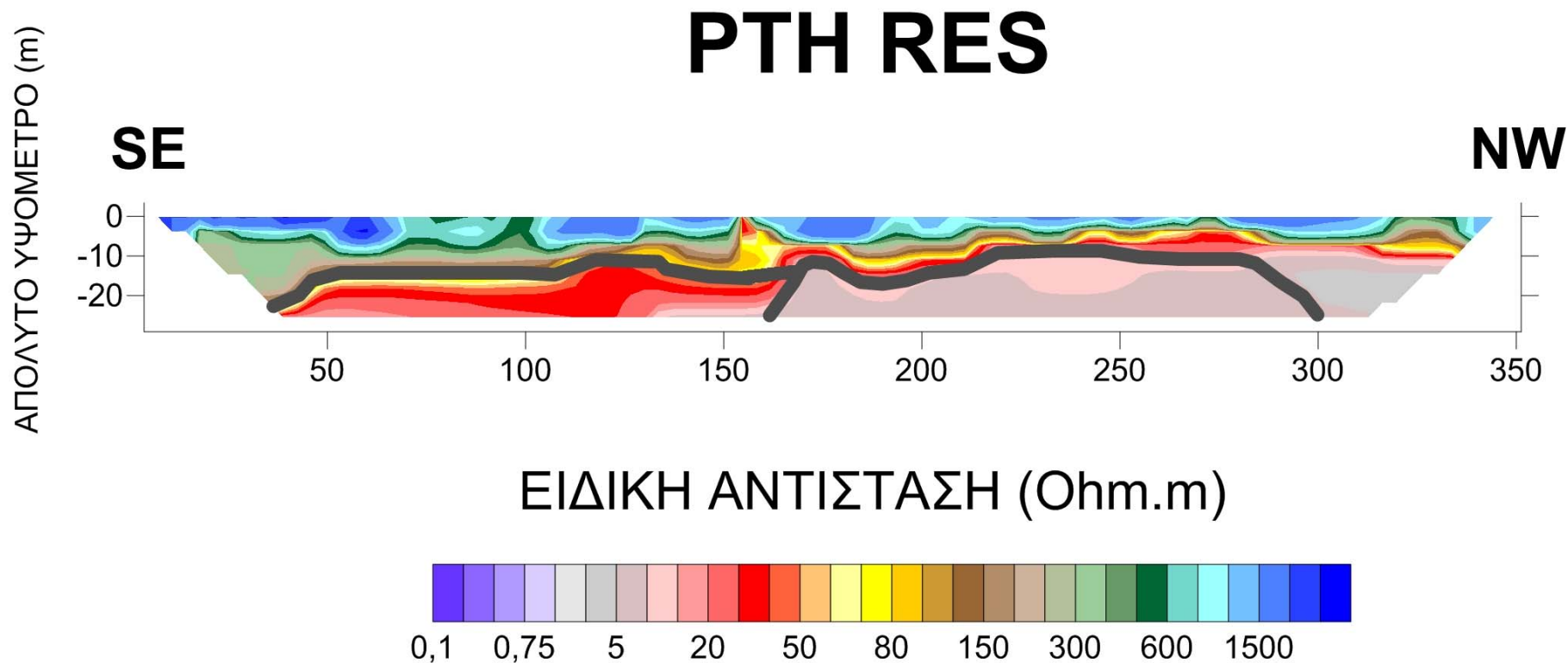


Εικόνα 4. 22: Η τομή ΚΤΗ 1-5 RES με προσανατολισμό SW – NE

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

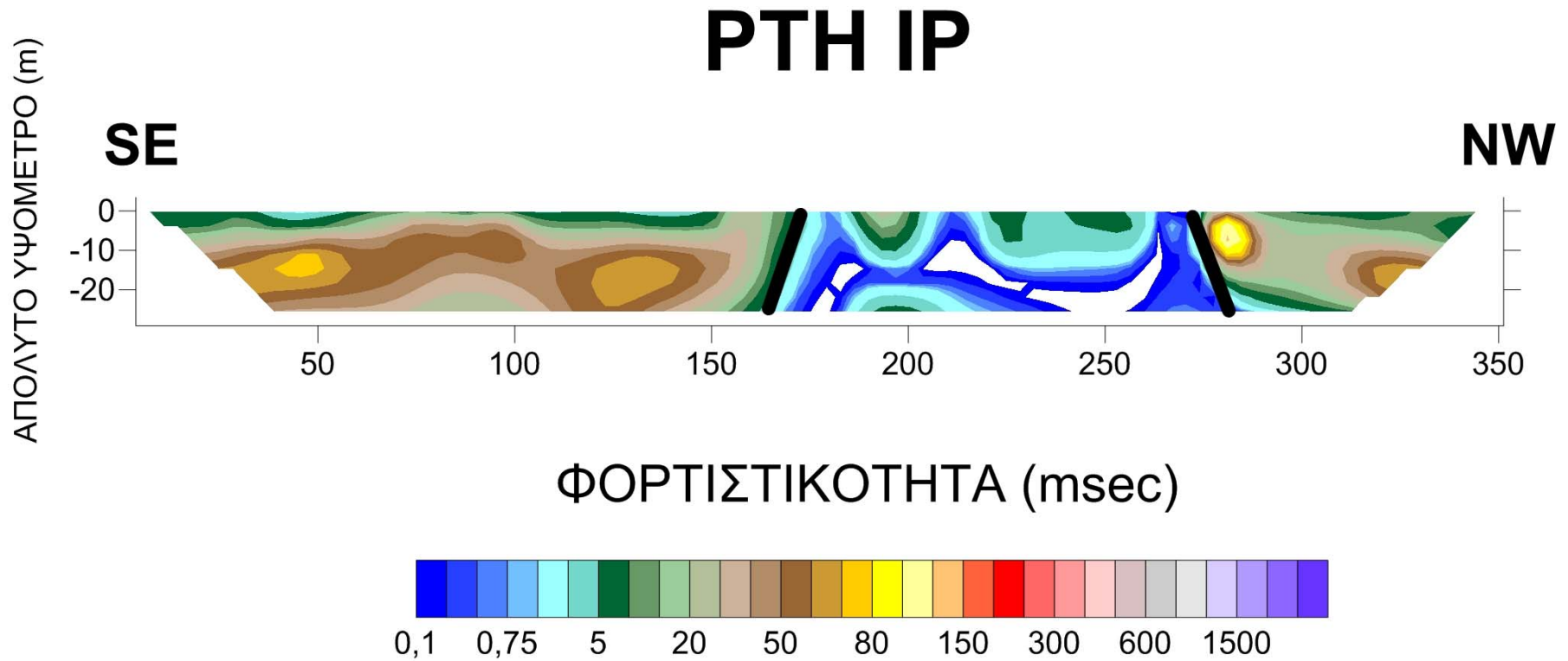
- Στα σημεία της τομής ΚΤΗ 1-5 RES όπου οι τιμές της ειδικής αντίστασης είναι πολύ χαμηλές (περίπου 5 Ohm.m) και περικλείονται με πράσινη γραμμή υπάρχει διείσδυση θαλασσινού νερού. Δεδομένου ότι, από γεωλογικά στοιχεία γνωρίζουμε ότι το στρώμα των αποθέσεων δεν εκτείνεται σε τόσο μεγάλο βάθος, πρόκειται για ασβεστόλιθο του φυλλιτικού καλύμματος που υδροφορεί. Το σημείο το οποίο περιβάλλεται με γκρι γραμμή αποτελεί συνδυασμό αδρομερών υλικών καθώς επίσης κι υλικών τα οποία οφείλονται στο ρέμα που καταλήγει εκεί κι έρχεται από την κοιλάδα.
- Οι περιοχές που έχουν υψηλές τιμές αντιστάσεων (από 750m – 1.000m και 1.200m) αφορούν σε ασβεστόλιθο ο οποίος είναι προστατευμένος από το αδιαπέρατο φυλλιτικό κάλυμμα κι έτσι δεν επιτρέπεται η εισροή θαλασσινού νερού. Στους χώρους δε, που περικλείονται από μπλε διακεκομμένη γραμμή, είναι οι εκφορτίσεις γλυκού νερού που τροφοδοτούν την θάλασσα.

4.6.4.2 Τομή PTH RES



Εικόνα 4. 23: Η τομή PTH RES με προσανατολισμό SE – NW

4.6.4.3 Τομή ΡΤΗ ΙΡ



Εικόνα 4. 24: Η τομή ΡΤΗ ΙΡ με προσανατολισμό SE – NW

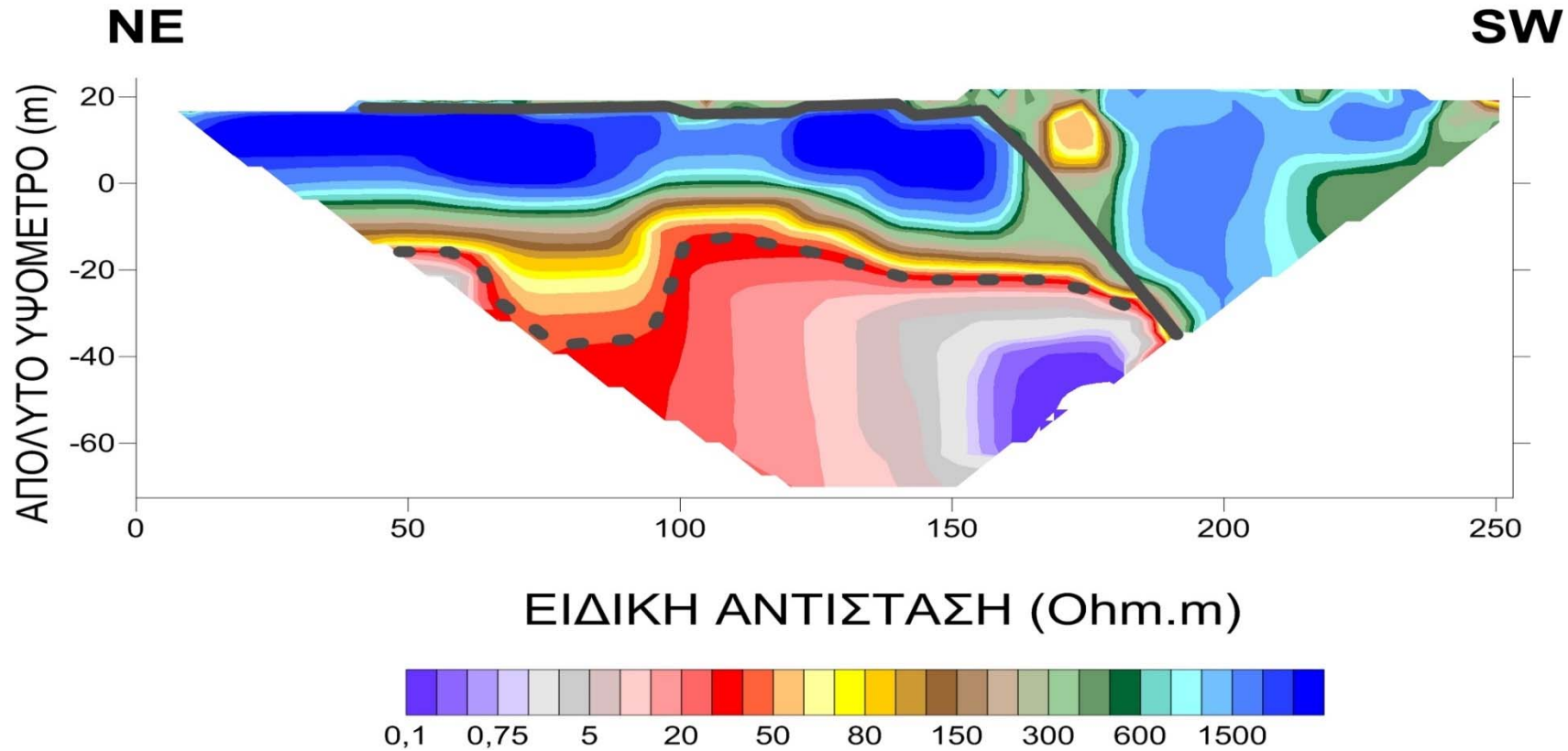
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Στην τομή PTH RES και μέχρι βάθος περίπου 7m έχουμε υψηλές τιμές οι οποίες αντιπροσωπεύουν αδρομερή υλικά. Κάτω από τα αδρομερή υπάρχει ασβεστόλιθος. Στο νοτιοανατολικό μέρος της τομής φαίνεται ότι υπάρχει φυλλίτης ο οποίος είναι μη περατός και προστατεύει τον ασβεστόλιθο από την διείσδυση του θαλασσινού νερού. Στα βορειοδυτικά της τομής όπου δεν υπάρχει φυλλιτικό κάλυμμα έχουμε εισροή θαλασσινού νερού κάτι που γίνεται αντιληπτό από τις χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης.
- Παρατηρώντας την τομή PTH IP καταλαβαίνουμε ότι νοτιοανατολικά (αριστερά από την 1^η μαύρη γραμμή) και βορειοδυτικά (δεξιά από την 2^η μαύρη γραμμή), υπάρχει μεταλλοφορία λόγω των υψηλών τιμών φορτιστικότητας.

ΤΜΗΜΑ Β

4.6.4.4 Τομή KAV1 RES

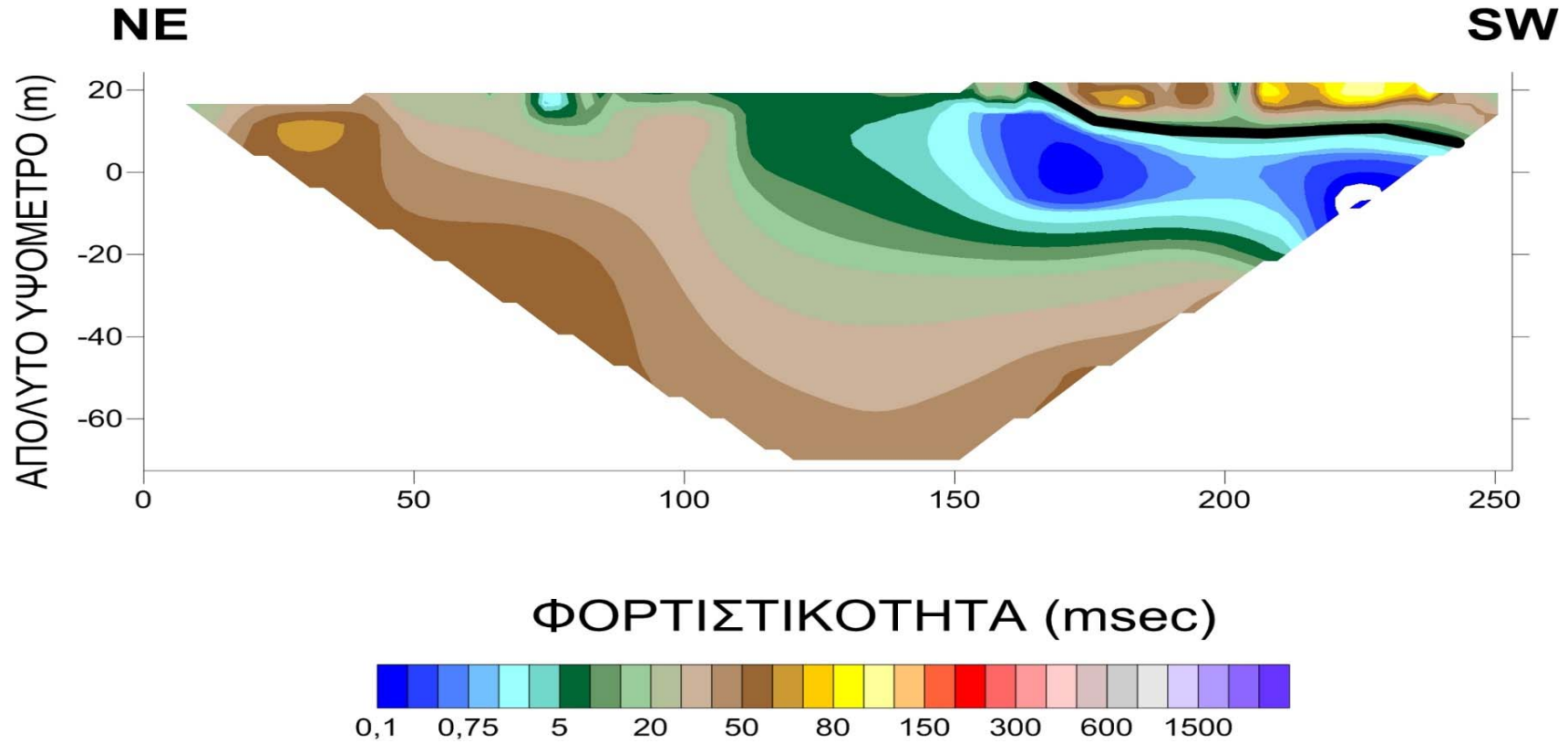
KAV1 RES



Εικόνα 4. 25: Η τομή KAV1 RES με προσανατολισμό NE – SW

4.6.4.5 Τομή ΚΑV1 IP

ΚΑV1 IP



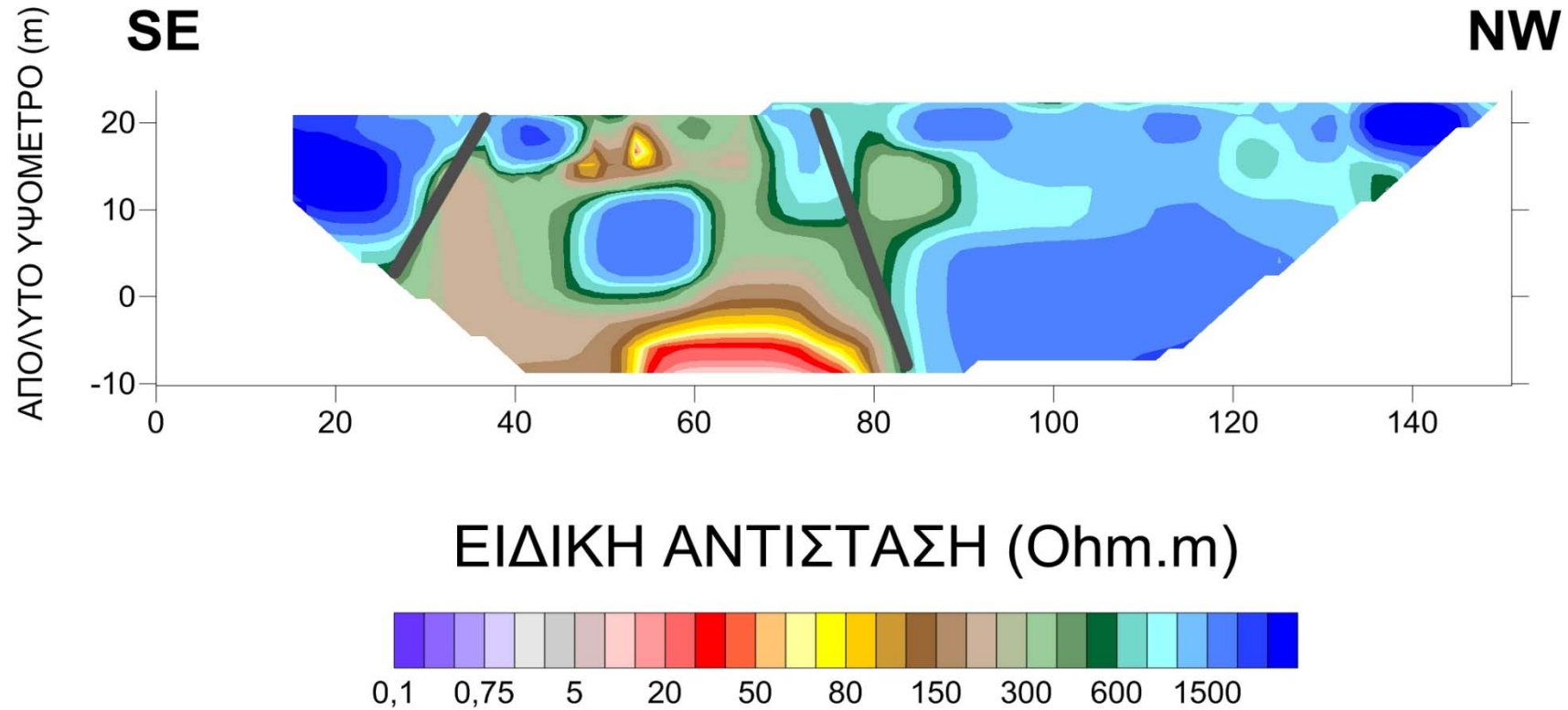
Εικόνα 4. 26: Η τομή ΚΑV1 IP με προσανατολισμό NE – SW

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Η γεωηλεκτρική τομή ειδικής αντίστασης KAV1 RES δείχνει στο βορειοανατολικό μέρος της σχεδόν από την επιφάνεια την παρουσία στρώματος υψηλής ειδικής αντίστασης (ασβεστόλιθος) που κάτω από τα -20μ απόλυτο υψόμετρο έχει θαλασσινό νερό που κατεβάζει τις ειδικές αντιστάσεις. Στο νοτιοδυτικό μέρος έχουμε έναν χώρο αδρομερών υλικών σχετικά υψηλών ειδικών αντιστάσεων.
- Η γεωηλεκτρική τομή φορτιστικότητας δείχνει ότι στο νοτιοδυτικό μέρος τα αδρομερή υλικά από την επιφάνεια έως απόλυτο υψόμετρο 5μ (πάχος 10-15μ) παρουσιάζουν μεγαλύτερη φορτιστικότητα λόγω του μεταλλικού τους φορτίου.

4.6.4.6 Τομή KAV2 RES

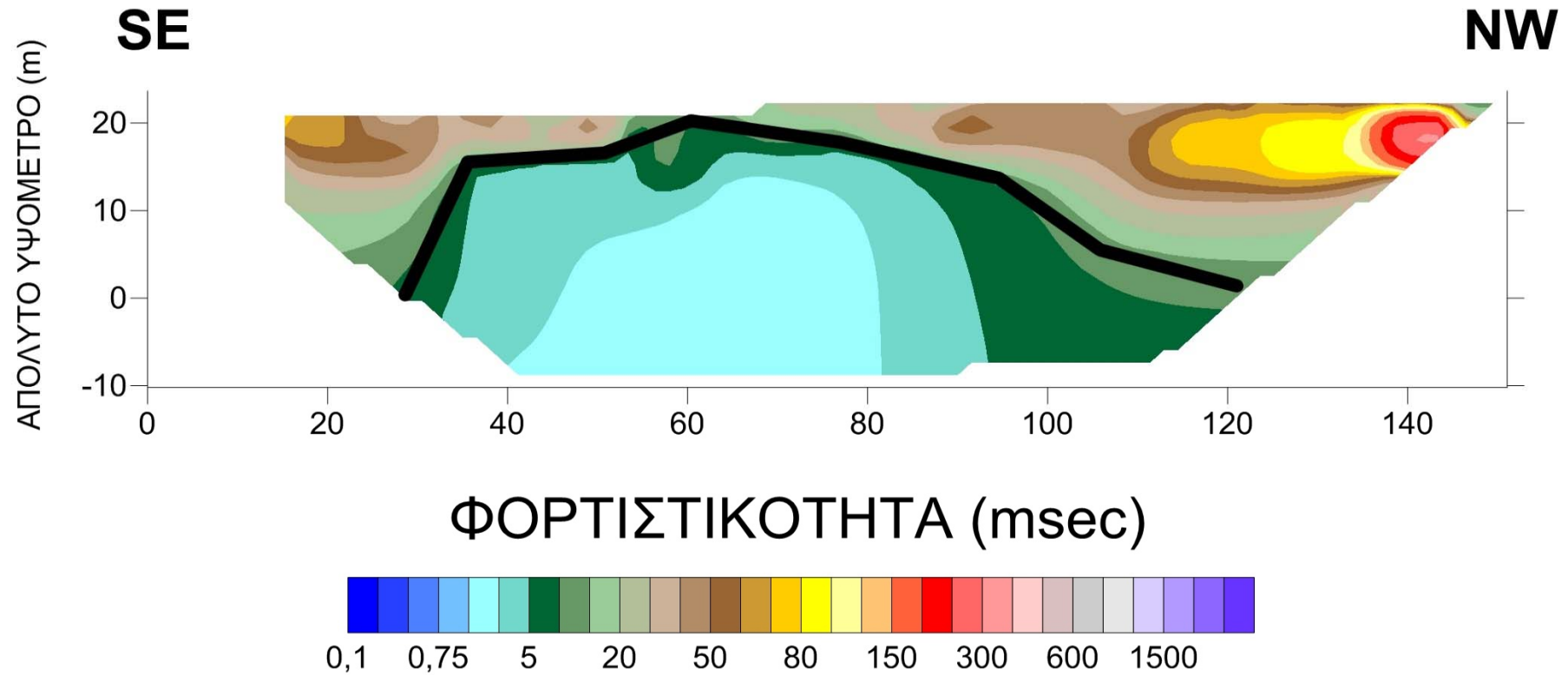
KAV2 RES



Εικόνα 4. 27: Η τομή KAV2 RES με προσανατολισμό SE – NW

4.6.4.7 Τομή ΚΑΥ2 ΙΡ

ΚΑΥ2 ΙΡ



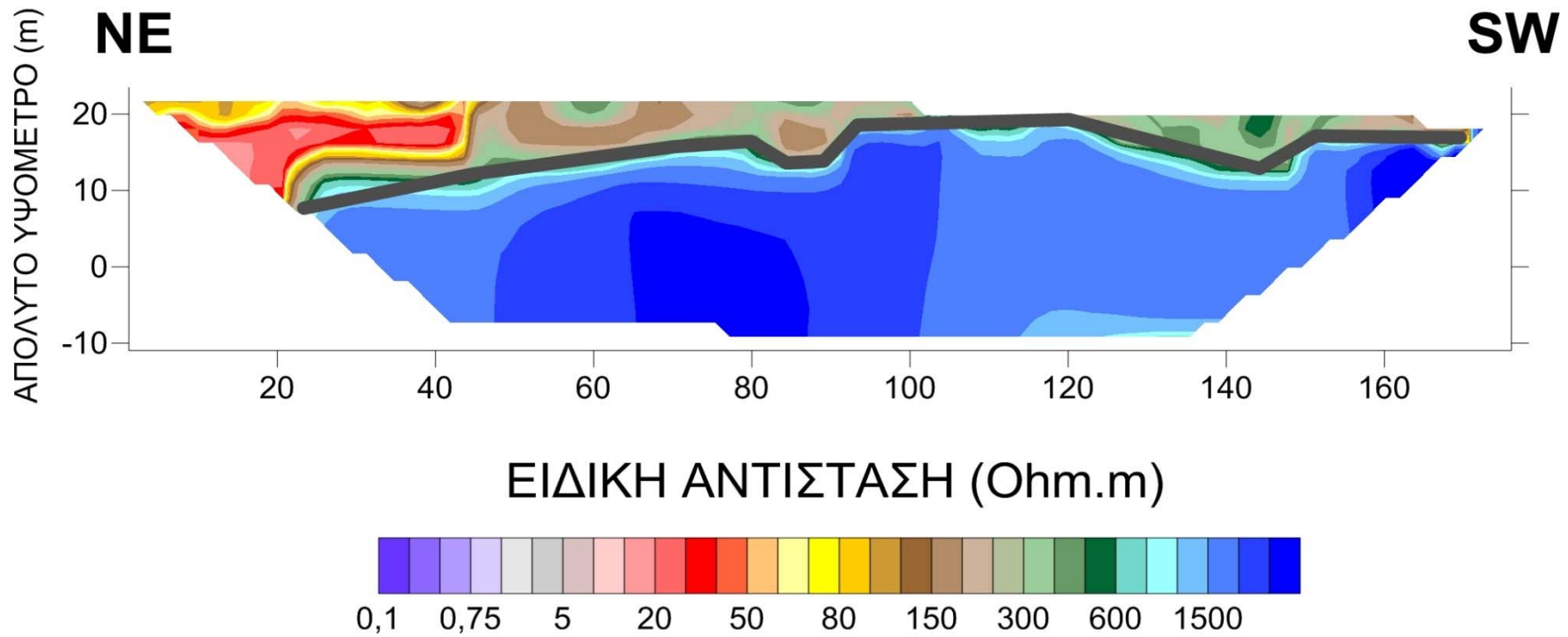
Εικόνα 4. 28: Η τομή ΚΑΥ2 ΙΡ με προσανατολισμό SE – NW

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Η γεωηλεκτρική τομή ειδικής αντίστασης KAV2 RES δείχνει τρεις παράπλευρες ενότητες στρωμάτων διαφορετικής, σχετικά υψηλής ειδικής αντίστασης που μπορούν να αποδοθούν σε διαφορετικής αδρομέρειας ή υφής σχηματισμούς. Ο μεσαίος σχηματισμός φαίνεται ως ο πιο χαλαρός.
- Η γεωηλεκτρική τομή φορτιστικότητας KAV2 IP δείχνει πάνω από την μαύρη γραμμή αδρομερή υλικά από την επιφάνεια έως διάφορα απόλυτα υψόμετρα που παρουσιάζουν μεγαλύτερη φορτιστικότητα λόγω του μεταλλικού τους φορτίου.

4.6.4.8 Τομή KAV3 RES

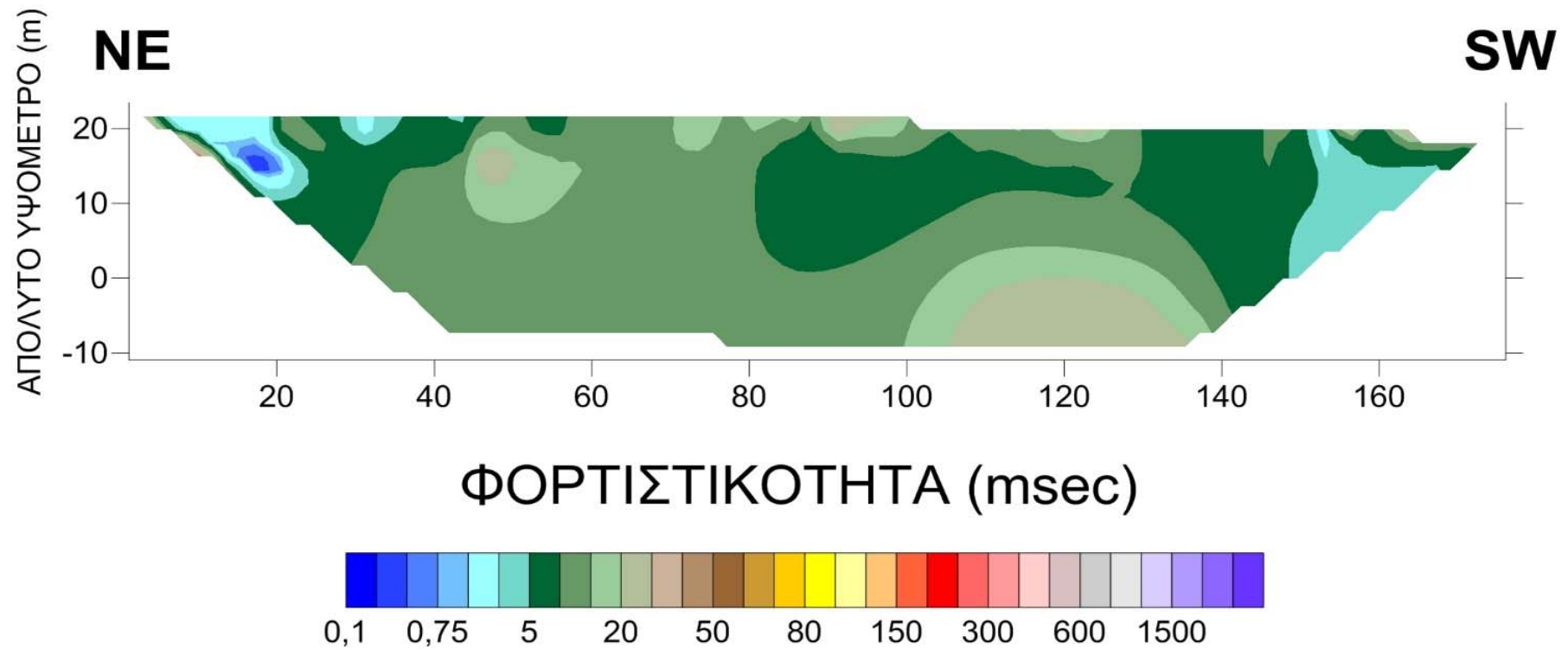
KAV3 RES



Εικόνα 4. 29: Η τομή KAV3 RES με προσανατολισμό NE – SW

4.6.4.9 Τομή ΚΑΥ3 ΙΡ

ΚΑΥ3 ΙΡ



Εικόνα 4. 30: Η τομή ΚΑΥ3 ΙΡ με προσανατολισμό NE – SW

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Η γεωηλεκτρική τομή ειδικής αντίστασης KAV3 RES δείχνει στο βορειοανατολικό μέρος ένα παχύ επιφανειακό στρώμα χαμηλής ειδικής αντίστασης αργλικής υφής το οποίο γίνεται πιο λεπτό προς νότο αποκτώντας περισσότερη αδρομέρεια. Κάτω από το επιφανειακό στρώμα υπάρχει στρώμα μεγάλης ειδικής αντίστασης (ασβεστόλιθος).
- Η γεωηλεκτρική τομή φορτιστικότητας KAV3 IP δείχνει σε όλο το εύρος της χαμηλή φορτιστικότητα κάτι που σημαίνει ότι δεν υπάρχει μεταλλικό φορτίο.

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΓΕΝΙΚΟΣ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Η έρευνα στο Θορικό έγινε προκειμένου να επιλυθούν δύο βασικά ζητήματα χρησιμοποιώντας μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης. Το ένα ζήτημα ήταν ο προσδιορισμός της στρωματογραφίας και του μετώπου υφαλμύρισης στην παράκτια ζώνη του κόλπου του Θορικού και το άλλο ήταν ο εντοπισμός της ρύπανσης από τις μεταλλουργικές διεργασίες που γίνονταν παλαιότερα στον λόφο του Καβοδόκανου.

Το πρώτο πράγμα που έπρεπε να γίνει ήταν ο προσδιορισμός κι η κατανόηση του γεωλογικού υποβάθρου της περιοχής. Κατόπιν, έπρεπε να γίνει ο σχεδιασμός της έρευνας στον οποίο περιλαμβάνονται οι μέθοδοι της γεωφυσικής διασκόπησης που θα χρησιμοποιούνταν. Ανατρέχοντας στην διεθνή βιβλιογραφία, βρέθηκαν μελέτες περιπτώσεων αντίστοιχες με αυτήν που έπρεπε να γίνει στο Θορικό. Από το σύνολο των ευρημάτων, επιλέχθηκαν οι τέσσερις πιο αντιπροσωπευτικές (3^ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας).

Η πρώτη μελέτη περίπτωσης είναι στην περιοχή Bukow στην νότια Πολωνία. Στόχος της εν λόγω έρευνας ήταν να βρεθεί η επιρροή των στείρων υλικών, που τοποθετούνταν στην περιοχή από την εξόρυξη άνθρακα, στο υπόγειο νερό. Τα υλικά απόθεσης περιέχουν χλωριούχα ιόντα και θειικά ιόντα τα οποία με την σειρά τους παρεισφύουν στον υδροφόρο. Η γεωφυσική διασκόπηση μόνο με την μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ERT) δεν θα παρείχε αξιόπιστα αποτελέσματα λόγω του ότι το υδροφόρο στρώμα δεν είναι ομοιογενές και περιέχει πολυάριθμα στεγανά κι αργιλώδεις στρώσεις. Ακόμη ένας λόγος για τον οποίο δεν θα επαρκούσαν τα αποτελέσματα μόνο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι η σύνθετη λιθολογική δομή και γεωμορφολογία του προς διερεύνηση χώρου. Συνδυάζοντας όμως τις τομογραφίες (ERT) με την μέθοδο της επαγόμενης πολικότητας (IP) έγινε εφικτός ο σαφής προσδιορισμός των ρυπασμένων ζωνών. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής δείχνουν ότι η απόθεση από τα σείρα της εκμετάλλευσης του άνθρακα έχει αντίκτυπο στην ποιότητα του υπογείου νερού, συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουν κι οι υδρογεωλογικές έρευνες που έχουν γίνει στην περιοχή.

Η δεύτερη μελέτη αποσκοπούσε στην διερεύνηση του φαινομένου υφαλμύρισης υπόγειων νερών σε παράκτιο υδροφόρο στρώμα στην νότια Ροδόπη.

Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Τα αποτελέσματα των τομογραφιών που προέκυψαν συγκρίθηκαν με υδρογεωλογικές έρευνες που έχουν γίνει στην περιοχή και συνδυαστικά αποκάλυψαν την παρουσία τριών σημαντικών ζωνών ειδικής αντίστασης: την ανώτατη, την από χαμηλή σε μεσαία ζώνη ειδικής αντίστασης, που είναι συσχετισμένη με το υδροφόρο στρώμα του γλυκού νερού και το από μέση σε υψηλή ζώνη ειδικής αντίστασης. Υπολογίστηκε επίσης κι η γεωμετρία του συστήματος υδροφόρων στρωμάτων, τα υδραυλικά όρια κι η έκταση της ζώνης μετάβασης αλμυρού/γλυκού νερού. Η συγκεκριμένη έρευνα διαφωτίζει τον μηχανισμό υφαλμύρισης των παράκτιων υδροφόρων στρωμάτων της Ροδόπης.

Στην τρίτη μελέτη παρουσιάζονται τα πρώτα αποτελέσματα που είναι βασισμένα στις γεωηλεκτρικές τομογραφίες για τον χαρακτηρισμό μιας παραλιακής περιοχής κατά μήκος της περιοχής Βασιλικάτα στην νότια Ιταλία. Βασική επιδίωξη των ερευνητών ήταν ο καθορισμός της διείσδυσης θαλασσινού νερού προς το εσωτερικό της ακτογραμμής. Συνέπεια της διείσδυσης αλμυρού νερού είναι η μείωση των αποθεμάτων του γλυκού νερού κατά μήκος της ακτής και ταυτόχρονα μια διαδικασία εδαφολογικής υποβάθμισης. Τα αποτελέσματα της εν λόγω έρευνας συμφωνούν με ανάλυση χημικών στοιχείων που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή, επιβεβαιώνοντας έτσι την ακριβή τοποθεσία η οποία επηρεάζεται κατά ένα μεγάλο μέρος από το φαινόμενο της υφαλμύρισης.

Η τελευταία μελέτη περίπτωσης έγινε με στόχο να αναγνωριστούν και να εξερευνηθούν τα καρστικά νερά της περιοχής Terpal στο Ιραν προκειμένου να βρεθούν οι κατάλληλες θέσεις για γεωτρήσεις, έτσι ώστε να παραληφθεί δείγμα των υπόγειων νερών . Οι μέθοδοι που επιλέχθηκαν γι' αυτό το εγχείρημα ήταν η μέθοδος της βυθοσκόπησης (VES) και της ειδικής αντίστασης (ERT). Τα αποτελέσματα της ειδικής αντίστασης που επιτεύχθηκαν, έδειξαν τις αγωγίμες ζώνες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις κυριότερες καρστικές ζώνες νερού και κατά συνέπεια τα καλύτερα σημεία προκειμένου να γίνουν οι γεωτρήσεις.

Η έρευνα που υλοποιήθηκε στο Θορικό χωρίζεται σε δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα (τμήμα Α) περιλαμβάνει την παράκτια ζώνη του κόλπου του Θορικού. Συγκεκριμένα, έγιναν έξι τομές. Οι πέντε τομές κάλυψαν την παράκτια περιοχή της κοιλάδας στην βόρεια πλευρά του κόλπου ενώ επιλέχθηκε πιλοτικά να γίνει και μία

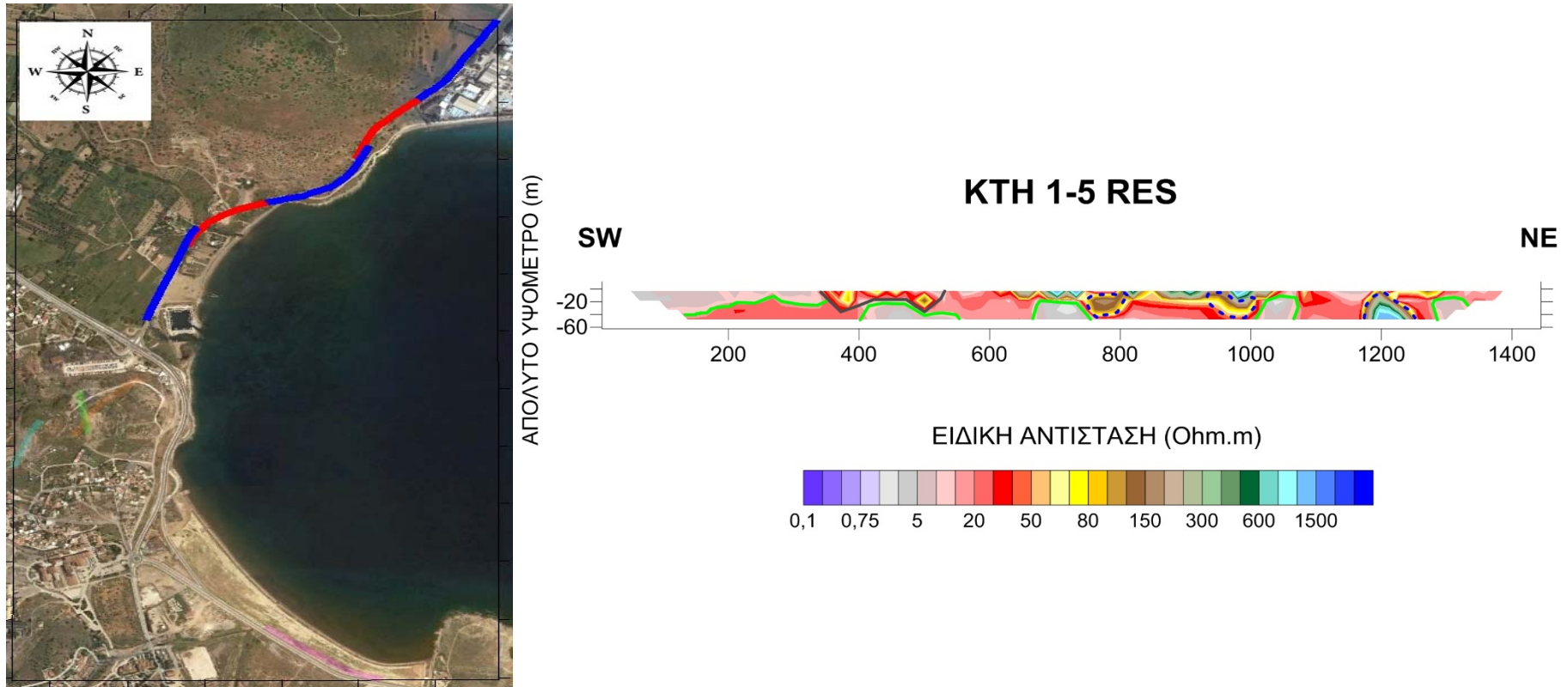
τομή στα νότια του κόλπου. Λαμβάνοντας υπόψη τόσο την ικανότητα της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης ως προς την λεπτομερή αποτύπωση της στρωματογραφίας, όσο και την ορθότητα των αποτελεσμάτων της στις προαναφερθείσες περιπτώσεις μελετών αποφασίστηκε η χρήση αυτής της μεθόδου και στις έξι τομές. Στην τομή που έγινε στο νότιο μέρος του κόλπου, η ηλεκτρική ειδική αντίσταση (ERT) συνδυάστηκε με την χρήση της μεθόδου της επαγόμενης πολικότητας (IP) λόγω του σε εκείνη την πλευρά υπάρχουν πολλές αποθέσεις κι άρα πιθανή ρύπανση. Η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης μπορεί να μας δείξει με σαφήνεια της φορτιστικότητα του υπεδάφους κι άρα την ενδεχόμενη ρύπανση από μεταλλικές αποθέσεις. Ο συνδυασμός των γεωηλεκτρικών τομογραφιών ERT με τις τομογραφίες IP ενισχύθηκε από τα επίσης ορθά αποτελέσματα που εξήγαγαν οι δύο μέθοδοι στην περίπτωση της Πολωνίας όπου υπήρχε ρύπανση. Οι πέντε τομές στην παράκτια ζώνη του Θορικού ερμηνεύθηκαν σαν μία ενιαία λόγω του ότι τοποθετήθηκαν σε σειρά. Αναλύοντας λοιπόν την ενιαία τομή KTH RES (παράρτημα, **Εικόνα Π.1**), φαίνονται ξεκάθαρα τα σημεία όπου υπάρχει ασβεστόλιθος από τον οποίο εισρέει θαλασσινό νερό. Από γεωλογικά δεδομένα της περιοχής γνωρίζαμε ότι εκεί όπου η ειδική αντίσταση είναι πολύ χαμηλή σε μεγάλο βάθος δεν υπήρχε περίπτωση να βρίσκονται υλικά απόθεσης κι επομένως πρόκειται για ασβεστόλιθο που υδροφορεί. Ακόμη, από την τομογραφία KTH RES (παράρτημα, **Εικόνα Π.1**) αντιληφθήκαμε και την παρουσία ενός φυλλιτικού καλύμματος το οποίο προστατεύει σε κάποια σημεία τον ασβεστόλιθο από την διείσδυση θαλασσινού νερού. Σ' αυτά ακριβώς τα σημεία υπάρχει εκφόρτιση γλυκού νερού προς την θάλασσα. Στον νότιο κόλπο η γεωηλεκτρική τομογραφία PTH RES (παράρτημα, **Εικόνα Π.2**) αποκάλυψε επίσης εισροή αλμυρού νερού από τον ασβεστόλιθο. Επιπλέον, στο νοτιοανατολικό μέρος της τομής και βλέποντας τις υψηλές τιμές φορτιστικότητας από την τομογραφία KTH IP (παράρτημα, **Εικόνα Π.2**), γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει μεταλλοφορία όπως και στο βορειοδυτικό μέρος της τομής. Ως εκ τούτου, στο νοτιοανατολικό μέρος της τομής δεν έχουμε ασβεστόλιθο αλλά φυλλίτη όπου από πάνω του βρίσκονται αδρομερή υλικά απόθεσης που προέρχονται από μεταλλευτική δραστηριότητα.

Το δεύτερο τμήμα (τμήμα Β) αποτελεί ο λόφος του Καβοδόκανου. Κρίνεται σκόπιμο στο σημείο αυτό, να πούμε ότι η γεωφυσική έρευνα που έλαβε χώρα στον λόφο αποτελεί το πρωταρχικό στάδιο και πλαίσιο στήριξης της μελέτης περιβαλλοντικής αποκατάστασης στον Καβοδόκανο. Πράγματι, πριν την εν λόγω

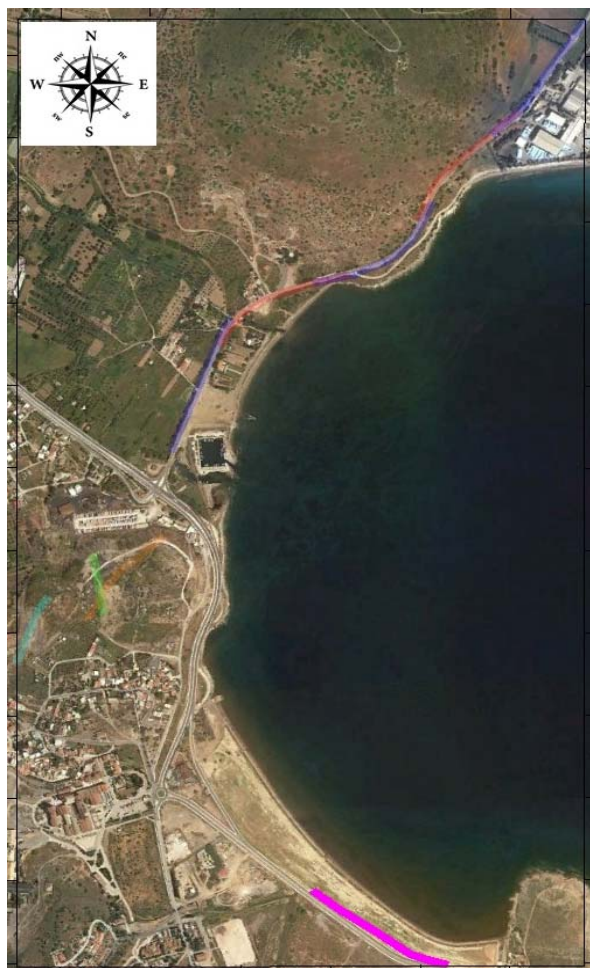
έρευνα δεν ήταν εφικτός ο ακριβής προσδιορισμός της στρωματογραφίας και της ενδεχόμενης ρύπανσης, στοιχεία απαραίτητα για τον σχεδιασμό και την εκτέλεση της περιβαλλοντικής αποκατάστασης. Γνωρίζοντας λοιπόν ότι στην περιοχή υπάρχουν υλικά απόθεσης από μεταλλουργικές κατεργασίες του παρελθόντος κι ορμώμενοι από την μελέτη περίπτωσης που διεξήχθη στην Πολωνία επιλέχθηκε και πάλι η χρήση των μεθόδων της γεωηλεκτρικής τομογραφίας και της επαγόμενης πόλωσης. Συνολικά, έγιναν τρεις γεωηλεκτρικές τομές οι οποίες επιλέχθηκαν με σκοπό να καλυφθεί με τον καλύτερο τρόπο η περιοχή αλλά και να υπάρχει χώρος στην ευθεία της ανάπτυξης των ηλεκτροδίων. Κοιτώντας συνδυαστικά τις τομές KAV1 RES, KAV2 RES και KAV3 RES και την τοποθεσία που αυτές βρίσκονται (παράρτημα, **Εικόνες Π.3, Π.4, Π.5**) παρατηρούμε τον ασβεστόλιθο στις δύο πλευρές της περιοχής έρευνας και ενδιάμεσα κάλυψη του χώρου με αδρομερή υλικά χαλαρά και μικρής αδρομέρειας (πρασινό και κίτρινο χρώμα) κι υψηλής αδρομέρειας και συνεκτικότητας (με γκριζοπράσινο χρώμα). Στην Δυτική πλευρά και την μία τομή το νότιο μέρος της έχει στην επιφάνεια αργιλικά υλικά. Με τον ίδιο τρόπο αναλύοντας τις τομές KAV1 IP, KAV2 IP και KAV3 IP (παράρτημα, **Εικόνες Π.3, Π.4, Π.5**) φαίνεται στο κεντρικό τμήμα της περιοχής έρευνας ότι υπάρχουν αδρομερή υλικά (κυρίως στο νότιο μέρος) και κοντά στην επιφάνεια υλικά με μεταλλικό περιεχόμενο το οποίο αποτελεί ρύπανση.

Με την εφαρμογή των μεθόδων της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης και της επαγόμενης πολικότητας έγινε εφικτός ο εντοπισμός της στρωματογραφίας καθώς κι οι περιοχές στις οποίες υπάρχουν υλικά με μεταλλικό περιεχόμενο. Κατά συνέπεια, εκπληρώθηκαν οι δύο στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας οι οποίοι ήταν η εύρεση του μετώπου υφαλμύρινσης στην παράκτια ζώνη του Θορικού κι ο εντοπισμός της ρύπανσης από μεταλλικά υλικά στον λόφο του Καβοδόκανου. Η γεωμορφολογία μιας περιοχής όσον αφορά στην ακριβή αλληλουχία των γεωλογικών σχηματισμών μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση της γεωηλεκτρικής τομογραφίας ERT, ενώ η συνδυαστική ερμηνεία των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων μπορεί να θεωρηθεί ένα πολύτιμο όργανο για τις περιβαλλοντικές μελέτες, ειδικότερα σε περιοχές με περίπλοκη λιθολογική δομή.

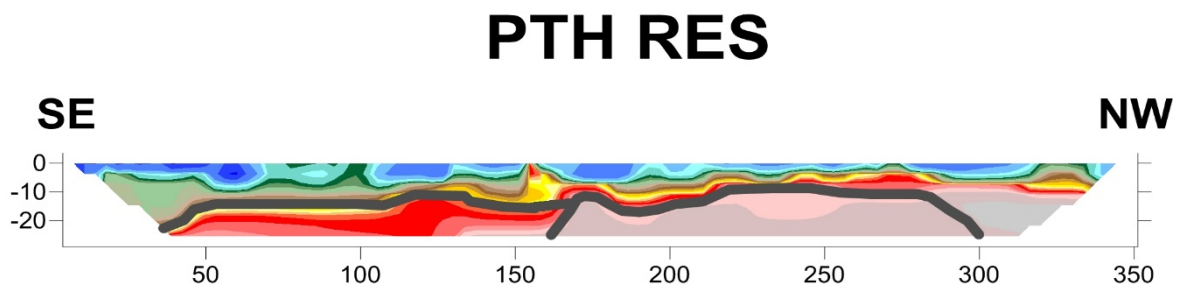
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



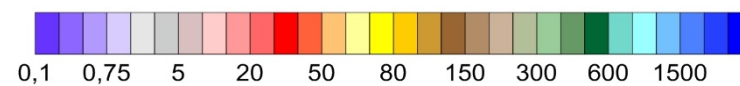
Εικόνα Π. 1: Θέση της τομής ΚΤΗ 1-5 RES



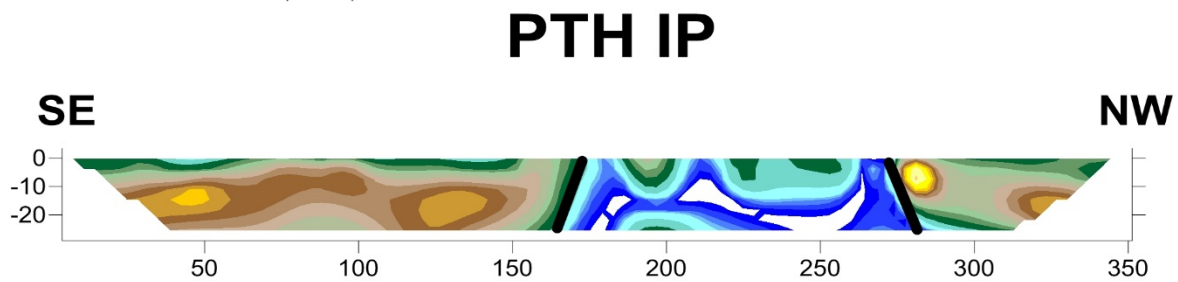
ΑΠΟΛΥΤΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)



ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ohm.m)



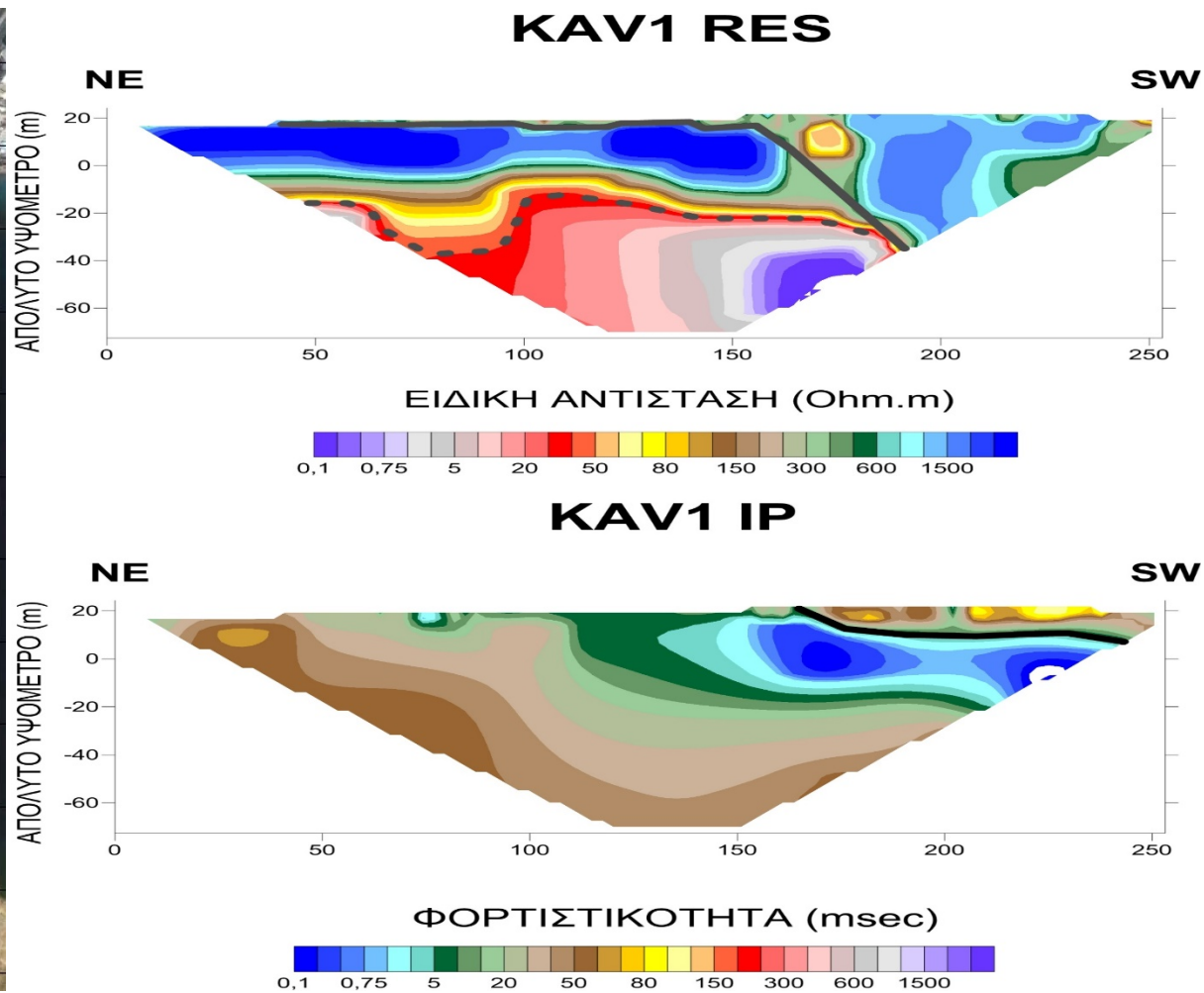
ΑΠΟΛΥΤΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)



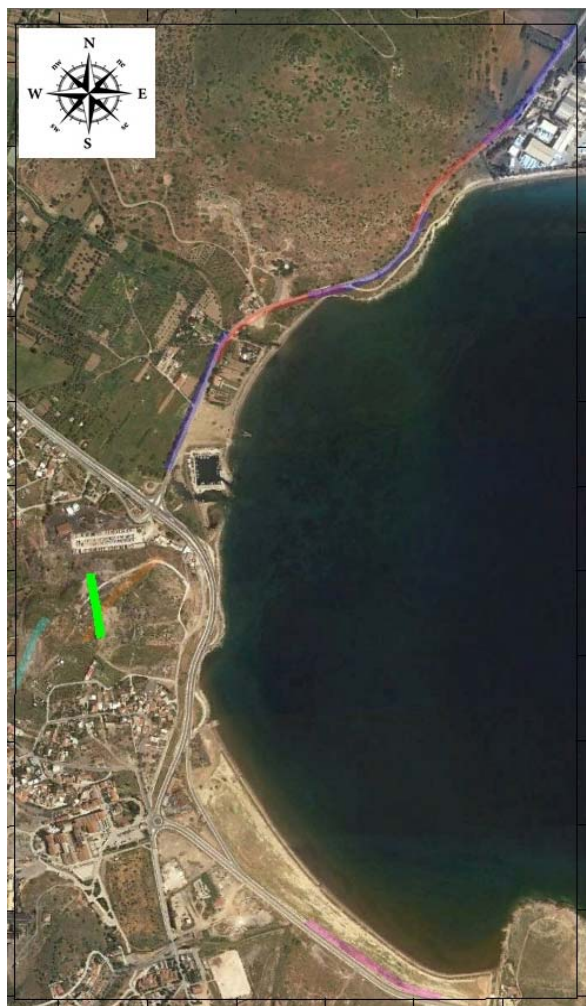
ΦΟΡΤΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ (msec)



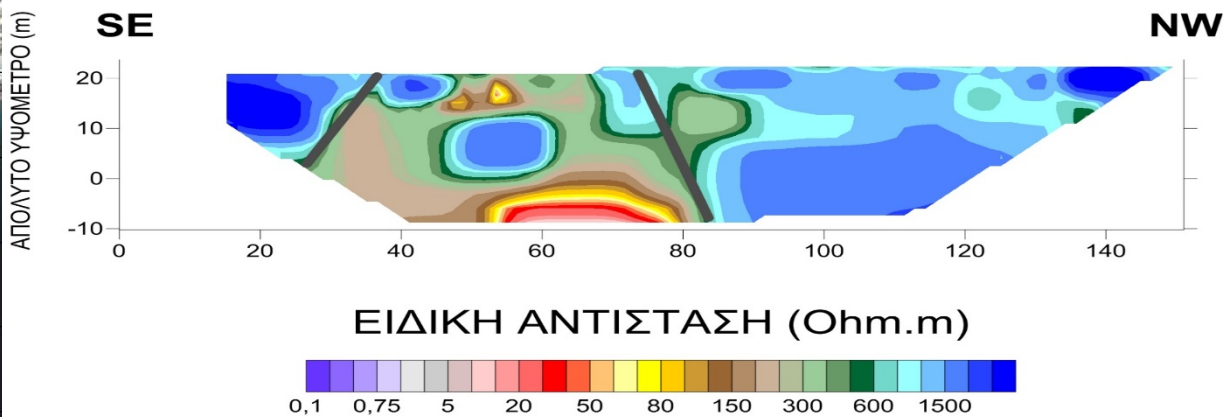
Εικόνα Π. 2: Θέση της τομής PTH (RES & IP)



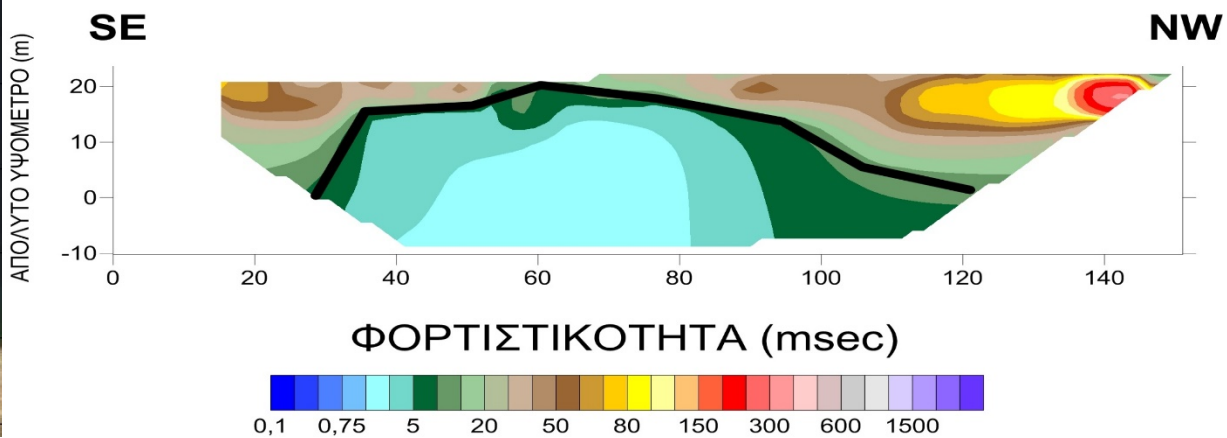
Εικόνα Π. 3: Θέση της τομής KAV1 (RES & IP)



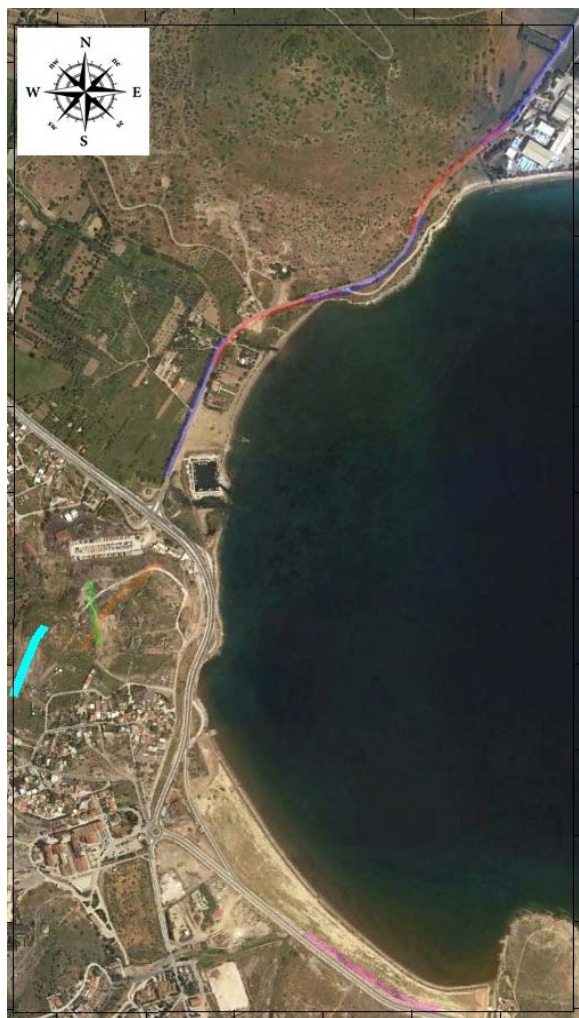
KAV2 RES



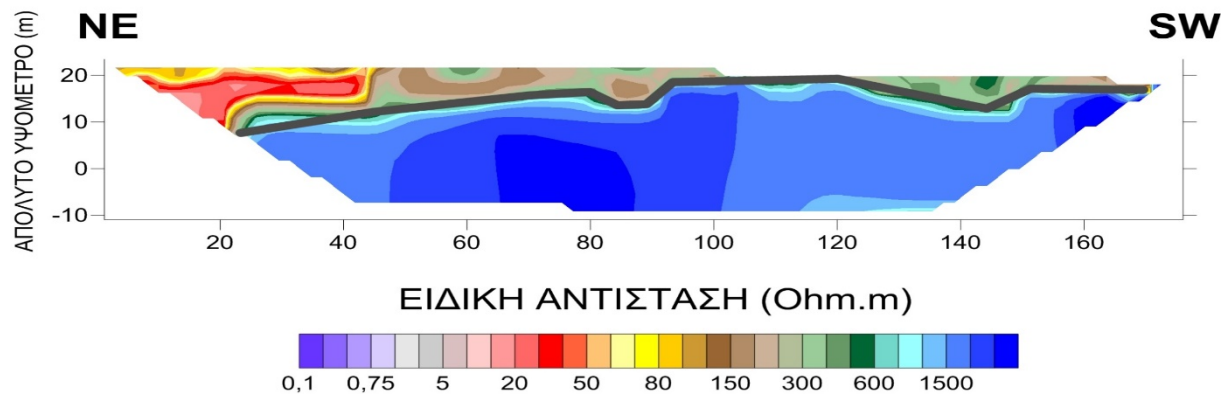
KAV2 IP



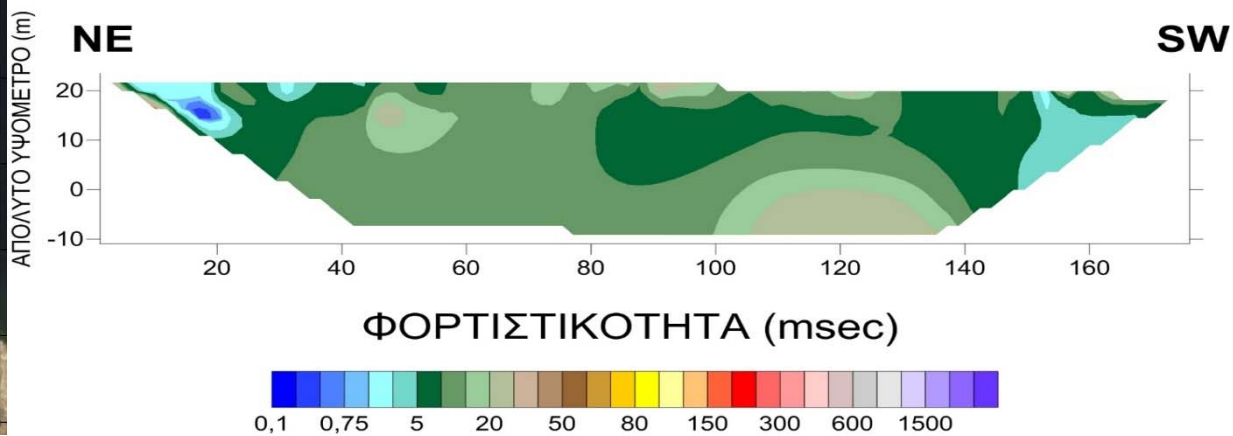
Εικόνα Π. 4: Θέση της τομής KAV2 (RES & IP)



KAV3 RES



KAV3 IP



Εικόνα Π. 5: Θέση της τομής KAV3 (RES & IP)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αποστολόπουλος, Γ. (2008) «Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής», Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα.
2. Βέργου, Α. & Βλαχογιάννης, Ν. & Δημητριάδης, Α. (2000) «Η ρύπανση της λαυρεωτικής χερσονήσου και του αστικού περιβάλλοντος του Λαυρίου από τα μεταλλευτικά - μεταλλουργικά απορρίμματα και οι επιπτώσεις στην υγεία του τοπικού πληθυσμού» Θ' Επιστημονική Συνάντηση Νοτιοανατολικής Αττικής, Λαύριον.
3. Βλασσοπούλου, Α. & Σταθοπούλου, Κ. (2014). «Γεωφυσική έρευνα στην κοιλάδα του Θορικού, για τον εντοπισμό στρωματογραφίας και του μετώπου της υφαλμύρισης», Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
4. Δερμάτης, Γ. (2005) «Οι επιπτώσεις από την λειτουργία των μεταλλείων στο περιβάλλον του Λαυρίου», Θεματικό Σεμινάριο Εκπαιδευτικών του Εθνικού Δικτύου Σχολείων : «Βιομηχανική κληρονομιά – Αξίες από το παρελθόν παρακαταθήκη για το μέλλον».
5. Νάνου-Γιάνναρου, Α. (2001) «Υφαλμύρωση Παράκτιων Υδροφορέων», Συμπόσιο «Αιγαίο-Νερό-Βιώσιμη Ανάπτυξη»
6. Παγκράτης, Π. (2012) «Συμβολή της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας και της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων στον σχεδιασμό λιμνοδεξαμενής στο οροπέδιο του Ομαλού Χανίων», Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
7. Περδικάκη, Μ. (2014) «Εκτίμηση ρυπαντικής επικινδυνότητας παράκτιων υδροφορέων με τη χρήση του πολυκριτηριακού δείκτη GALDIT», Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
8. Τζάνης, Α. (2005) «Εισαγωγή στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης» Σημειώσεις τμήματος Γεωλογίας Ε.Κ.Π.Α..
9. Τσάιμου, Κ. (1997) «Αρχαιογνωσία των μετάλλων αρχαία μεταλλευτική και μεταλλουργική τεχνική», Εκδόσεις Συμεών.
10. Φίκος, Η. (2010) «Αντιστροφή γεωηλεκτρικών τομογραφικών δεδομένων : Εφαρμογή στην λεκάνη Ανθεμούντα», Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

11. Bauer, P. & Supper, R. & Zimmermann, S. & Kinzelbach, W. (2006) «Geoelectrical imaging of groundwater salinization in the Okavango Delta, Botswana», *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 60.
12. Beltran, J. (1999) «Irrigation with saline water: benefits and environmental impact», *Agricultural Water Management* Vol. 40.
13. Ciaranfi, N. & Maggiore, M. & Pieri, P. & Rapisardi, L. & Ricchetti, G. & Walsh, N. (1979) « Considerazioni sulla neotettonica della Fossa bradanica», *Progetto Finalizzato Geodinamica del CNR*, Vol. 251.
14. Cocco, E. & Cravero, E. & Di Geronimo, S. & Mezzadri, G. & Parea, G. & Pescatore, T. & Valloni, R. & Vinci, A. (1975) « Lineamenti geomorfologici e sedimentologici del litorale alto ionico (Golfo di Taranto) (Geomorphological and sedimentological features of the Ionian littoral, Taranto Gulf)», *Bollettino Società Geologica Italiana*, Vol. 94.
15. Demirel, Z. (2004) «The history and evaluation of saltwater intrusion into a coastal aquifer in Mersin, Turkey», *Journal of Environmental Management*, Vol. 70.
16. Duque, C. & Calvache, M. & Pedrera, A. & Martin-Rosales, W. & López-Chicano, M. (2008) « Combined time domain electromagnetic soundings and gravimetry to determin marine intrusion in a detrital coastal aquifer», *Journal of Hydrology*, Vol. 349.
17. Freeze, A. & Cherry, J. (1979) «Groundwater», Prentice Hall Inc., New Jersey.
18. Frohlich, R. & Barosh, P. & Boving, T. (2008) « Investigating changes of electrical characteristics of the saturated zone affected by hazardous organic waste», *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 64.
19. Guariglia, A. & Buonamassa, A. & Losurdo, A. & Saladino, R. & Trivigno, M. & Zaccagnino, A. & Colangelo, A. (2006) « A multisource approach for coastline mapping and identification of shoreline changes», *Annals of Geophysics*, Vol. 49.
20. Marcak, H. & Szczepańska-Plewa, J. & Tomeckasuchoń, S. & Zdechlik, R. & Zuberek, W. & Zogala, B. (2011) «Geophysical and hydrogeological studies on pollution of soil-water environment in the surroundings of the mine waste deposits», *Oficyna drukarska – Jacek Chmielewski*.

21. Nowroozi, A. & Horrocks, S. & Henderson, P. (1999) «Saltwater intrusion into the freshwater aquifer in the eastern shore of Virginia: a reconnaissance electrical resistivity survey», *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 42.
22. Parea, G. (1986) «I terrazzi marini tardo-pleistocenici del fronte della catena appenninica in relazione alla geologia dell'avanfossa adriatica (The Late Pleistocene marine terraces in front of the Apennines in relation to the geology of Adriatic Foredeep)», *Memorie Società Geologica Italiana*, Vol. 35.
23. Petalas, C. (1997) «Analysis of aquifer systems in the heterogeneous coastal part of prefecture of Rhodope», PhD Dissertation. Department of Civil Engineering, Democritus University of Thrace.
24. Petalas, C. & Lambrakis, N. (2006) «Simulation of intense salinization phenomena in coastal aquifers—the case of the coastal aquifers of Thrace», *Journal of Hydrology*, Vol. 324.
25. Pinaras, V. & Tsihrintzis, V. & Petalas, C. & Ouzounis, K. (2010) « Soil salinization in the agricultural lands of Rhodope District, northeastern Greece», *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 166.
26. Polemio, M. & Limoni, P. & Mitolo, D. & Santaloia, F. (2003) « Characterisation of the Ionian-lucanian coastal plain aquifer (Italy)», *Boletín Geológico y Minero*, Vol. 114.
27. Ranjan, S. & Kazama, S. & Sawamoto, M. (2006) « Effects of climate and land use changes on groundwater resources in coastal aquifers», *Journal of Environmental Management* Vol. 80.
28. Reynolds, J. (2011) «An introduction to Applied Geophysics», *Hydrogeophysics*, Springer, Netherlands.
29. RES2DINV, 2D Resistivity and IP Inversion, (1995 – 2001), *Εγχειρίδιο Χρήσης Λογισμικού*, Version 3.4, Geotomo Software, Malaysia.
30. Simoniello, T. & Carone, M. & Satriani, A. & Loperte, A. & Imbrenda, V. & D'emilio, M. & Guariglia, A. (2009) «Integration of remote sensing and geophysical techniques for coastal monitoring», *Geophysical Research Abstracts* Vol. 11.
31. Somay, M. & Gemici, U. (2009) «Assessment of the Salinization Process at the Coastal Area with Hydrogeochemical Tools and Geographical Information Systems (GIS): Selçuk Plain, Izmir, Turkey», *Water, Air, & Soil Pollution*, Vol. 20.

32. Stamatis G. & Voudouris K. & Karefilakis F. (2000) «Groundwater Pollution by Heavy metals in Historical Mining Area of Lavrio», Attica, Greece.
33. Stefaniak, S. & Twardowska, I. (2009) «Alteration of ground- and surface water quality resulted from the contact of infiltration and flood waters with the embankment made of re-disposed coal-mining wastes», Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego.
34. Syscal Pro, Iris Instruments, user manual.
35. Tropeano, M. & Sabato, L. & Pieri, P. (2002) « The Quaternary “Post-turbidite” sedimentation in the South-Apennines Foredeep (Bradanic Trough-Southern Italy)», Italian Journal of Geosciences Bull, Vol. 1.
36. Tuong, T. & Kam, S. & Hoanh. C. & Dung, L. & Khiem, N. & Barr, J. & Ben, D. (2003) « Impact of seawater intrusion control on the environment, land use and household incomes in a coastal area», Paddy and Water Environment, Vol. 1.

Διαδικτυακές Αναφορές

<http://www.eegs.org>

http://www.environ-develop.ntua.gr/uploads/pant_k1.pdf

http://www.eie.gr/archaeologia/gr/02_DELTIA/Thorikos.aspx

<http://www.oryktosploutos.net/2015/10/blog-post.html#.VwaP8vmLSUk>

http://www.bbem.edu.gr/lavreotiki/arxaia_lavreot.html

<http://refeel.gr/>

http://www.lavrio-yachts.gr/images/stories/lavrio/lavrio_history_gr.pdf

http://art-hellas.blogspot.gr/2012/12/blog-post_22.html

<http://www.metal.ntua.gr/uploads/4529/1020/146-2009.pdf>

<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=177dbb3eea55488d84c8d73a23bf611>

<http://www.orykta.gr/geologia-oryktologia/oryktoi-poroi-koitasmatologia>

<http://www.oryktosploutos.net/2015/11/80.html#.VwksHvmLSUk>

<http://www.parsan.biz/electrical-resistivity-imaging.aspx>

<http://www.personal.psu.edu/afr3/blogs/siowfa13/2013/12/earths-finest-water--the-artesian-aquifer.html>

