Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΟΡΔΑΤΟΣ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΜΕΛΕΤΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥΧΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΙΑΒΙΤΣΑΣ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
'ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ'
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2019

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΟΡΔΑΤΟΣ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΜΕΛΕΤΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥΧΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΙΑΒΙΤΣΑΣ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών 'Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία', Κατεύθυνση 'Εφαρμοσμένη Γεωφυσική'

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 19/04/2019

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Αναπληρωτής Καθηγητής Γεώργιος Βαργεμέζης, Επιβλέπων

Καθηγητής Παναγιώτης Τσούρλος, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Καθηγητής Γρηγόριος Τσόκας, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

© Νικόλαος Κορδάτος, Γεωλόγος, 2019
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΜΕΛΕΤΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥΧΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΙΑΒΙΤΣΑΣ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ – *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

© Nikolaos Kordatos, Geologist, 2019
All rights reserved.

GEOPHYSICAL PROPERTIES OF MANGANESE DEPOSITS IN PIAVITSA AREA (CHALKIDIKI) – *Master Thesis*

Citation:

Κορδάτος Ν., 2019. – Μελέτη γεωφυσικών χαρακτηριστικών μαγγανιούχων κοιτασμάτων στην περιοχή Πιάβιτσας Χαλκιδικής. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Kordatos N., 2019. – Geophysical properties of manganese deposits in Piavitsa area (Chalkidiki). Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Ευχαριστίες

Με το πέρας της παρούσας εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον κ. Γεώργιο Βαργεμέζη, Αναπληρωτή Καθηγητή Α.Π.Θ. και επιβλέπων της διατριβής αυτής, αφενός για τις γνώσεις που μου μετέδωσε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, και αφετέρου για τη συνεχή στήριξη και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής αυτής. Οι συμβουλές και η σφαιρική αντίληψή του πάνω σε διάφορα προβλήματα στην έρευνα με έκαναν να κατανοήσω και να αγαπήσω περαιτέρω την επιστήμη της γεωλογίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Παναγιώτη Τσούρλο, Καθηγητή Α.Π.Θ., για τις πολύτιμες γνώσεις και συμβουλές που μου παρείχε τόσο στα πλαίσια της παρούσας διατριβής όσο και στην επιστήμη της γεωφυσικής γενικότερα, καθώς και για τις ευκαιρίες που μου έδωσε να συμμετέχω σε πολλά ερευνητικά προγράμματα.

Ευχαριστώ ακόμη τον κ. Γρηγόριο Τσόκα, Καθηγητή Α.Π.Θ., για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου δίνοντας μου την ευκαιρία από πολύ νωρίς να συμμετέχω σε πληθώρα ερευνητικών προγραμμάτων, και κατ'επέκταση εισάγοντάς με στην επιστήμη της γεωφυσικής.

Επίσης ευχαριστώ τους Δρ. Ηλία Φίκο και Δρ. Αλέξανδρο Σταμπολίδη, Ε.ΔΙ.Π. Α.Π.Θ., για τη συνεργασία μας στο ύπαιθρο και τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχαν.

Επιπλέον, ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου Αλμπάνη Άγγελο, Αμανατίδου Ευτυχία, Γρούμπα Μυρτώ, Φιλιππάκο Γιώργο και Χριστοφόρου Χρίστο, τόσο για την άρτια συνεργασία μας κατά τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος, όσο και για την βοήθειά τους στην συλλογή των δεδομένων υπαίθρου για την παρούσα εργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, για τη συνεχή τους στήριξη στις επιλογές μου.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων στην περιοχή της Πιάβιτσας Χαλκιδικής, στην οποία παρατηρούνται επιφανειακές εμφανίσεις μεταλλοφοριών. Σκοπός της διατριβής είναι ο εντοπισμός τέτοιων δομών ενδιαφέροντος και ο χαρακτηρισμός τους τόσο από φυσική όσο και από γεωφυσική άποψη μέσα από την συνδυαστική ερμηνεία γεωλογικών, γεωτρητικών και γεωφυσικών δεδομένων από διαφορετικές εφαρμοσμένες μεθόδους.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν στην περιοχή μελέτης είναι η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και επαγόμενης πόλωσης, η μέθοδος του φυσικού δυναμικού, καθώς και η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος VLF. Σε πρώτο στάδιο εφαρμόστηκε η μέθοδος του φυσικού δυναμικού σε πλήθος περιοχών όπου προηγούμενες μελέτες γεωλογικής χαρτογράφησης αποκάλυψαν επιφανειακές ζώνες ενδιαφέροντος, ενώ στην συνέχεια εφαρμόστηκαν και οι υπόλοιπες μέθοδοι σε περιοχές που παρουσίασαν ενδιαφέρον μέσω των αποτελεσμάτων του φυσικού δυναμικού.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έρχονται σε μεγάλο ποσοστό σε καλή συμφωνία με το ευρύτερο γεωλογικό μοντέλο της περιοχής, καθώς και με το μικρότερης κλίμακας γεωλογικό μοντέλο που προκύπτει από τα δεδομένα γεωλογικών χαρτογραφήσεων. Η συνδυαστική ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων αποδείχθηκε ιδιαίτερα ωφέλιμη σε πολλές περιπτώσεις, ξεκαθαρίζοντας ασάφειες που δημιούργησε τόσο το σύνθετο γεωλογικό μοντέλο της περιοχής, όσο και το είδος της μεταλλοφορίας και η σχέση αυτής με τα πετρώματα στα οποία φιλοξενείται.

Η εκτίμηση δεδομένων γεωτρήσεων αποτέλεσε επίσης σημαντικό οδηγό για την καλύτερη ερμηνεία των γεωφυσικών αποτελεσμάτων καθώς και την σύνδεση των τιμών που προέκυψαν από αυτά με τους γεωλογικούς σχηματισμούς που απαρτίζουν την περιοχή, καθώς και της μεταλλοφορίας που φιλοξενείται σε αυτά.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Abstract

The subject of this thesis is the application of geophysical methods in Piavitsa area, Chalkidiki, where surficial mineralization occurrences appear. The aim of this study is the identification of such zones of interest and their characterization both from a physical as well as geophysical perspective, through the combined interpretation of geological, drilling and geophysical data from multiple applied methods.

The geophysical methods applied in this study are the Electrical Resistivity Tomography (ERT) with both direct current (DC) and induced polarization (IP) data, the Self-Potential (SP) method, as well as the VLF electromagnetic method. In the first part of the study, the self-potential method was applied in a number of areas where previous geological mapping studies revealed surficial zones of interest, while the other geophysical methods were subsequently applied in areas where the self-potential results suggested existence of possible deposits.

The results obtained are generally in good agreement with the wider geological model of the area, as well as the smaller scale geological model resulting from geological mapping data. The combined interpretation of the geophysical data proved to be particularly useful in many cases, clarifying ambiguities created by both the complex geological model of the area as well as the type of mineralization and its relation to the rocks which is hosted.

The drilling data assessment has also been an important guide for improving the interpretation of the geophysical results and linking the resulting values to the geological formations of the area, as well as the mineralization hosted within them.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες ... iii
Περίληψη ... iv
Abstract ... v
Περιεχόμενα ... vi
Λίστα σχημάτων ... ix
Λίστα πινάκων ... xiii
1 Εισαγωγή ... 1
1.1 Αντικείμενο της διατριβής ... 1
1.2 Δομή κεφαλαίων ... 2
2 Περιοχή μελέτης ... 3
2.1 Πιάβιτσα ... 3
2.2 Ιστορική αναδρομή ... 4
2.3 Γεωλογία της περιοχής ... 5
2.4 Ρήγμα Στρατωνίου και κοιτασματολογικό ενδιαφέρον ... 7
3 Θεωρία γεωφυσικών μεθόδων ... 10
3.1 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης ... 12
3.1.1 Βασικές αρχές ... 12
3.1.2 Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ... 15
3.1.3 Διατάξεις ηλεκτροδίων ... 16
3.1.4 Βάθος διασκόπησης και διακριτική ικανότητα ... 19
3.1.5 Ευθύ πρόβλημα και Αντιστροφή ... 20
3.2 Μέθοδος Επαγόμενης Πόλωσης ... 23
3.2.1 Βασικές αρχές ... 23
3.2.2 Μηχανισμοί γένεσης ... 25
3.3 Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού ... 27
3.3.1 Βασικές αρχές ... 27
3.3.2 Μηχανισμοί γένεσης ... 28
3.3.3 Εξοπλισμός ... 32
3.3.4 Διατάξεις ηλεκτροδίων ... 33
3.4 Μέθοδος VLF-EM ... 36
3.4.1 Βασικές αρχές ... 36
3.4.2 Ηλεκτρομαγνητική θεωρία ... 38
3.4.3 Πομπός και δέκτης VLF ... 40

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

3.4.4 Βάθος διείσδυσης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου 41
3.4.5 Ερμηνεία μετρήσεων VLF 42
3.5 Γεωφυσικά χαρακτηριστικά μεταλλικών αποθέσεων 45
3.5.1 Ηλεκτρικά και ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά 45
3.5.2 Ηλεκτρικές ιδιότητες σημαντικών ορυκτών 47
4 Λήψη, επεξεργασία και μοντελοποίηση δεδομένων 48
4.1 Ηλεκτρική Τομογραφία 48
4.1.1 Λήψη δεδομένων 48
4.1.2 Επεξεργασία δεδομένων 49
4.1.3 Αντιστροφή δεδομένων 50
4.1.4 Μοντελοποίηση δεδομένων 51
4.2 Φυσικό Δυναμικό 54
4.2.1 Λήψη δεδομένων 54
4.2.2 Επεξεργασία δεδομένων 54
4.2.3 Μοντελοποίηση δεδομένων 56
4.3 VLF 58
4.3.1 Λήψη δεδομένων 58
4.3.2 Επεξεργασία δεδομένων 58
4.3.3 Αντιστροφή δεδομένων 60
4.3.4 Μοντελοποίηση δεδομένων 62
5 Αποτελέσματα και ερμηνεία δεδομένων 63
5.1 Περιοχή 1η 65
5.2 Περιοχή 2η 73
5.3 Περιοχή 3η 77
5.4 Περιοχή 4η 81
5.5 Περιοχή 5η 85
5.6 Περιοχή 6η 89
5.7 Περιοχή 7η 93
5.8 Περιοχή 8η 97
5.9 Περιοχή 9η 101
5.10 Περιοχή 10η & 12η 108
5.11 Περιοχή 11η 115
5.12 Περιοχή 13η 119
5.13 Περιοχή 14η 123
5.14 Περιοχή 15η 129

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

5.15 Περιοχή 16η 135
5.16 Περιοχή 19η 139
5.17 Περιοχή 20η 144
5.18 Περιοχή 21η 148
5.19 Σύνοψη 154
6 Συμπεράσματα 157
6.1 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα 160
Βιβλιογραφία 161

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Λίστα σχημάτων

Σχήμα 2.1 Η ευρύτερη περιοχή της Πιάβιτσας και η περιοχή μελέτης (Google Earth) 3
Σχήμα 2.2 Γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας (Μουντράκης, 2010) 6
Σχήμα 2.3 Σκαρίφημα Σερβομακεδονικής μάζας (τροποποιημένο από Μουντράκης, 2010) 6
Σχήμα 2.4 Ρήγμα Στρατωνίου και εμφανισθείσες μεταλλοφορίες στην περιοχή της Β.Α. Χαλκιδικής (τροποποιημένο από Galanopoulos & Theodoroudis, 1994) 8
Σχήμα 3.1 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση κυλινδρικού αγωγού (Αποστολόπουλος, 2013) 12
Σχήμα 3.2 Κατεύθυνση ροής ρεύματος και ισοδυναμικές γραμμές για πηγή ενός ηλεκτροδίου (τροποποιημένο από Tsourlos, 1995) 13
Σχήμα 3.3 Βασική διάταξη μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 14
Σχήμα 3.4 Βασικές διατάξεις ηλεκτροδίων 18
Σχήμα 3.5 Καμπύλη DIC για τη διάταξη Wenner, Dipole-Dipole και Pole-Pole (Tsourlos, 1995) 20
Σχήμα 3.6 Διαδικασία λύσης ευθέος και αντιστρόφου προβλήματος 21
Σχήμα 3.7 Συνοπτικό διάγραμμα της διαδικασίας αντιστροφής 22
Σχήμα 3.8 Μεταδιδόμενο ρεύμα ως τετραγωνικό κύμα στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση και την επαγόμενη πόλωση 24
Σχήμα 3.9 Καμπύλη δυναμικού κατά τη διάρκεια ενεργού και ανενεργού ρεύματος 24
Σχήμα 3.10 Μηχανισμοί γένεσης επαγόμενης πόλωσης. α) πόλωση μεμβράνης, β) πόλωση ηλεκτροδίου (τροποποιημένο από Kearey et al., 2002) 25
Σχήμα 3.11 Ο μηχανισμός δημιουργίας φυσικών ηλεκτρικών δυναμικών (τροποποιημένο από Sato & Mooney, 1960) 28
Σχήμα 3.12 Τομή και κάτοψη ανωμαλιών φυσικού δυναμικού από ροή ηλεκτρολύτη μεταξύ στρωμάτων με διαφορετικούς συντελεστές δυναμικού ροής.Τα βέλη αναπαριστούν τη διεύθυνση ροής σε: α) πλευρικό όριο, β) άντληση πηγής, γ) οριζόντιο όριο (Schiavone & Quarto, 1984) 30
Σχήμα 3.13 Δομή μη πολούμενου ηλεκτροδίου 32
Σχήμα 3.14 Διατάξεις ηλεκτροδίων για την μέτρηση φυσικού δυναμικού. α) διάταξη σταθερής βάσης, β) διάταξη βαθμίδας (τροποποιημένο από Kirsch, 2006) 34
Σχήμα 3.15 Σχέσεις κυκλοφορίας ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου σύμφωνα με το νόμο του Faraday και του Ampere (Grant & West, 1965) 37
Σχήμα 3.16 Αρχή της μεθόδου VLF. Οι διακεκομμένες γραμμές εμφανίζουν αγώγιμο στόχο με παράταξη παράλληλη στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, με το μαγνητικό διάνυσμα να κόβει κάθετα το στόχο (τροποποιημένο από Kearey et al., 2002) 38
Σχήμα 3.17 Ελλειπτικότητα, b/a, και γωνία κλίσης, θ, που παράγεται από δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Τα διανύσματα Hp και Hs αντιπροσωπεύουν το πρωτογενές και δευτερογενές πεδίο, αντίστοιχα (Kearey et al., 2002) 39
Σχήμα 3.18 Διπολική μορφή μετρήσεων VLF πάνω από αγώγιμη ζώνη 39
Σχήμα 3.19 Φιλτραρισμένες τιμές πραγματικής συνιστώσας σε συνθετική όδευση VLF 43
Σχήμα 3.20 Γεωμετρία αγωγού σε σχέση με την μορφή της ανωμαλίας VLF 44
Σχήμα 3.21 Εύρος αντίστασης (και αγωγιμότητας) υλικών και πετρωμάτων (Oldenburg & Jones, 2007) 46
Σχήμα 4.1 Όργανο Syscal Pro από την εταιρεία IRIS Instruments 48
Σχήμα 4.2 Σχηματική αναπαράσταση μετρήσεων με επάλληλες γραμμές (roll-along) 49
Σχήμα 4.3 Περιβάλλον του προγράμματος Prosys II 49
Σχήμα 4.4 Αφαίρεση ακραίων τιμών (α) και δεδομένων μεγάλης απόκλισης (β) στο Prosys II 50
Σχήμα 4.5 Ορισμός παραμέτρων μοντέλου στο λογισμικό DC_2DPro 50
Σχήμα 4.6 Αφαίρεση σφαλματικών τιμών στο λογισμικό DC_2DPro 51
Σχήμα 4.7 Μοντέλο ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά τη διαδικασία της αντιστροφής 51
Σχήμα 4.8 Συνθετικά μοντέλα για την ειδική ηλεκτρική αντίσταση και επαγόμενη πόλωση 52
Σχήμα 4.9 Διαφορετικές εικόνες αντιστροφής του μοντέλου ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 52
Σχήμα 4.10 Διαφορετικές εικόνες αντιστροφής του μοντέλου επαγόμενης πόλωσης 53
Σχήμα 4.11 Χρήση μη πολούμενων ηλεκτροδίων για την πραγματοποίηση μετρήσεων φυσικού δυναμικού 54
Σχήμα 4.12 Χάρτης μετρηθέντων προφίλ φυσικού δυναμικού 55

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Σχήμα 4.13 Φυσικό δυναμικό του 1ου προφίλ με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια 56
Σχήμα 4.14 Συνδυαστική εικόνα του 1ου προφίλ μετά την βαθμονόμηση των παλαιών μετρήσεων 56
Σχήμα 4.15 Περιβάλλον λογισμικού SPinv 57
Σχήμα 4.16 Όργανο VLF Wadi από την εταιρεία ABEM Instruments 58
Σχήμα 4.17 Παράδειγμα πρωτογενών δεδομένων (α), φιλτραρισμένων δεδομένων (β) και προφίλ πυκνότητας ρεύματος (γ) με την χρήση του λογισμικού SECTOR 59
Σχήμα 4.18 Παραμετροποίηση μοντέλου για την αντιστροφή των δεδομένων VLF 60
Σχήμα 4.19 Αντιστροφή δεδομένων VLF με το λογισμικό Inv2DVLF 61
Σχήμα 4.20 Μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων που προκύπτει από την αντιστροφή των δεδομένων VLF 61
Σχήμα 4.21 Περιβάλλον λογισμικού VLFMOD 62
Σχήμα 4.22 Σύγκριση συνθετικής με μετρημένη καμπύλη πραγματικής συνιστώσας στο VLFMOD 62
Σχήμα 5.1 Δομή και γεωλογία της 1ης περιοχής 65
Σχήμα 5.2 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για την 1η περιοχή 66
Σχήμα 5.3 Μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (α) και επαγόμενης πόλωσης (β) για την περιοχή 1 67
Σχήμα 5.4 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 1 67
Σχήμα 5.5 Παράμετροι που χαρακτηρίζουν την ανωμαλία φυσικού δυναμικού στην περιοχή 1 68
Σχήμα 5.6 Συνθετική καμπύλη φυσικού δυναμικού σε σχέση με την μετρημένη για την περιοχή 1 68
Σχήμα 5.7 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 1 69
Σχήμα 5.8 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 1 70
Σχήμα 5.9 Συνθετικό μοντέλο αντιστάσεων για την περιοχή 1 70
Σχήμα 5.10 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 1 72
Σχήμα 5.11 Δομή και γεωλογία της 2ης περιοχής 73
Σχήμα 5.12 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 2 73
Σχήμα 5.13 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 2 74
Σχήμα 5.14 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 2 75
Σχήμα 5.15 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 2 76
Σχήμα 5.16 Δομή και γεωλογία της 3ης περιοχής 77
Σχήμα 5.17 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 3 77
Σχήμα 5.18 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 3 78
Σχήμα 5.19 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 3 79
Σχήμα 5.20 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 3 80
Σχήμα 5.21 Δομή και γεωλογία της 4ης περιοχής 81
Σχήμα 5.22 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 4 82
Σχήμα 5.23 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 4 82
Σχήμα 5.24 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 4 83
Σχήμα 5.25 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 4 84
Σχήμα 5.26 Δομή και γεωλογία της 5ης περιοχής 85
Σχήμα 5.27 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 5 85
Σχήμα 5.28 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 5 86
Σχήμα 5.29 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 5 87
Σχήμα 5.30 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 5 88
Σχήμα 5.31 Δομή και γεωλογία της 6ης περιοχής 89
Σχήμα 5.32 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 6 90
Σχήμα 5.33 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 6 90
Σχήμα 5.34 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 6 91
Σχήμα 5.35 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 6 92
Σχήμα 5.36 Δομή και γεωλογία της 7ης περιοχής 93
Σχήμα 5.37 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 7 93

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Σχήμα 5.38 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 7 94
Σχήμα 5.39 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 7 95
Σχήμα 5.40 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 7 96
Σχήμα 5.41 Δομή και γεωλογία της 8ης περιοχής 97
Σχήμα 5.42 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 8 98
Σχήμα 5.43 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 8 99
Σχήμα 5.44 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 8 99
Σχήμα 5.45 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 8 100
Σχήμα 5.46 Δομή και γεωλογία της 9ης περιοχής 101
Σχήμα 5.47 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για την 9η περιοχή 102
Σχήμα 5.48 Μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (α) και επαγόμενης πόλωσης (β) για την περιοχή 9 103
Σχήμα 5.49 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 9 103
Σχήμα 5.50 Παράμετροι που χαρακτηρίζουν την ανωμαλία φυσικού δυναμικού στην περιοχή 9 104
Σχήμα 5.51 Συνθετική καμπύλη φυσικού δυναμικού σε σχέση με την μετρημένη για την περιοχή 9 . 104
Σχήμα 5.52 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 9 105
Σχήμα 5.53 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 9 105
Σχήμα 5.54 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 9 107
Σχήμα 5.55 Δομή και γεωλογία της 10ης και 12ης περιοχής 108
Σχήμα 5.56 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για το 10ο και 12ο προφίλ 109
Σχήμα 5.57 Σχηματική απεικόνιση γεωτρήσεων κοντά στα προφίλ της περιοχής 10 και 12 109
Σχήμα 5.58 Μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (α) και επαγόμενης πόλωσης (β) για την περιοχή 10 και 12 110
Σχήμα 5.59 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 10 και 12 111
Σχήμα 5.60 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 10 και 12 111
Σχήμα 5.61 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 10 και 12 112
Σχήμα 5.62 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 10 και 12 113
Σχήμα 5.63 Σχηματική απεικόνιση γεωτρήσεων σε σχέση με το μοντέλο αντιστάσεων και φορτιστικότητας, αντίστοιχα, στην περιοχή 10 και 12 114
Σχήμα 5.64 Δομή και γεωλογία της 11ης περιοχής 115
Σχήμα 5.65 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για το 11ο προφίλ 115
Σχήμα 5.66 Μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (α) και επαγόμενης πόλωσης (β) για την περιοχή 11 116
Σχήμα 5.67 Καμπύλη φυσικού δυναμικού στην περιοχή 11 117
Σχήμα 5.68 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 11 118
Σχήμα 5.69 Δομή και γεωλογία της 13ης περιοχής 119
Σχήμα 5.70 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για την 13η περιοχή 119
Σχήμα 5.71 Μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (α) και επαγόμενης πόλωσης (β) για την περιοχή 13 120
Σχήμα 5.72 Καμπύλη φυσικού δυναμικού στην περιοχή 13 121
Σχήμα 5.73 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 13 122
Σχήμα 5.74 Δομή και γεωλογία της 14ης περιοχής 123
Σχήμα 5.75 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για την 14η περιοχή 123
Σχήμα 5.76 Μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (α) και επαγόμενης πόλωσης (β) για την περιοχή 14 124
Σχήμα 5.77 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 14 125
Σχήμα 5.78 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 14 126
Σχήμα 5.79 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 14 126
Σχήμα 5.80 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 14 127
Σχήμα 5.81 Δομή και γεωλογία της 15ης περιοχής 129

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Σχήμα 5.82 Σχηματική απεικόνιση γεωτρήσεων κοντά στα προφίλ της περιοχής 15 130
Σχήμα 5.83 Μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (α) και επαγόμενης πόλωσης (β) για την περιοχή 15 130
Σχήμα 5.84 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 15 131
Σχήμα 5.85 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 15 132
Σχήμα 5.86 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 15 132
Σχήμα 5.87 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 15 133
Σχήμα 5.88 Σχηματική απεικόνιση γεωτρήσεων σε σχέση με το μοντέλο αντιστάσεων και φορτιστικότητας, αντίστοιχα, στην περιοχή 15 134
Σχήμα 5.89 Δομή και γεωλογία της 16ης περιοχής 135
Σχήμα 5.90 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για την 16η περιοχή 135
Σχήμα 5.91 Καμπύλη φυσικού δυναμικού για την (α) Δυτική και (β) Ανατολική όδευση στην περιοχή 16 136
Σχήμα 5.92 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 16 137
Σχήμα 5.93 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για το προφίλ 16 137
Σχήμα 5.94 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 16 138
Σχήμα 5.95 Δομή και γεωλογία της 19ης περιοχής 139
Σχήμα 5.96 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για την 19η περιοχή 139
Σχήμα 5.97 Καμπύλη φυσικού δυναμικού στην περιοχή 19 140
Σχήμα 5.98 Παράμετροι που χαρακτηρίζουν την ανωμαλία φυσικού δυναμικού στην περιοχή 19 141
Σχήμα 5.99 Συνθετική καμπύλη φυσικού δυναμικού σε σχέση με την μετρημένη για την περιοχή 19 141
Σχήμα 5.100 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 19 142
Σχήμα 5.101 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 19 142
Σχήμα 5.102 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 19 143
Σχήμα 5.103 Δομή και γεωλογία της 20ης περιοχής 144
Σχήμα 5.104 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για την 20η περιοχή 144
Σχήμα 5.105 Καμπύλη φυσικού δυναμικού στην περιοχή 20 145
Σχήμα 5.106 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 20 146
Σχήμα 5.107 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 20 146
Σχήμα 5.108 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 20 147
Σχήμα 5.109 Δομή και γεωλογία της 21ης περιοχής 148
Σχήμα 5.110 Μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (α) και επαγόμενης πόλωσης (β) για την περιοχή 21 149
Σχήμα 5.111 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) αρχική και (β) δεύτερη μέτρηση στην περιοχή 21 149
Σχήμα 5.112 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 21 150
Σχήμα 5.113 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 21 151
Σχήμα 5.114 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 21 152
Σχήμα 5.115 Σχηματική απεικόνιση γεώτρησης σε σχέση με το μοντέλο αντιστάσεων και φορτιστικότητας, αντίστοιχα, στην περιοχή 21 153
Σχήμα 6.1 Σχηματική αναπαράσταση της ερμηνείας των γεωφυσικών ιδιοτήτων που προέκυψαν για την περιοχή μελέτης σε σχέση με χαρακτηριστικές γεωλογικές δομές (αναλυτική εξήγηση στο κείμενο). Εύρος τιμών Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (0 έως 1000 Ohm.m), Φορτιστικότητας (0 έως 100 mV/V) και Φυσικού Δυναμικού (-150 έως +150 mV). 159

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Λίστα πινάκων

Πίνακας 1 Αξιολόγηση βασικών διατάξεων ηλεκτρικής τομογραφίας (Ward, 1990) 19
Πίνακας 2 Βάθη διασκόπησης και διακριτική ικανότητα διαφόρων διατάξεων ηλεκτρικής τομογραφίας 20
Πίνακας 3 Βασικότεροι ραδιοπομποί VLF και συχνότητες που εκπέμπουν (ABEM, 1989) 40
Πίνακας 4 Κωδικοί και θέσεις βασικότερων ραδιοπομπών VLF (ABEM, 1989) 41
Πίνακας 5 Ποιοτικός χαρακτηρισμός αγωγού σύμφωνα με τις φιλτραρισμένες καμπύλες VLF 43
Πίνακας 6 Τιμές ηλεκτρικής αντίστασης, αγωγιμότητας και φορτιστικότητας σουλφιδίων και σχετικών ορυκτών (τροποποιημένο από Ford et al. (2007), King (2007), Morgan (2010) και Airo (2015)) 47
Πίνακας 7 Μετρηθέντα προφίλ φυσικού δυναμικού με παλαιά και νέα ηλεκτρόδια 55
Πίνακας 8 Πίνακας συνολικών μετρήσεων στις αντίστοιχα μετρηθέντες περιοχές 63
Πίνακας 9 Ίχνος της ζώνης ενδιαφέροντος στην 1η περιοχή 71
Πίνακας 10 Ίχνος της ζώνης ενδιαφέροντος στην 9η περιοχή 106
Πίνακας 11 Ίχνος των ζωνών ενδιαφέροντος στην 10η και 12η περιοχή 114
Πίνακας 12 Ίχνος των ζωνών ενδιαφέροντος στην 14η περιοχή 128
Πίνακας 13 Ίχνος της ζώνης ενδιαφέροντος στην 15η περιοχή 134

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της διατριβής

Η επιστήμη της γεωφυσικής αποτέλεσε από τις αρχές ακόμη του 19ου αιώνα ένα σημαντικό εργαλείο για την εξερεύνηση αρχικά, και την εκμετάλλευση στην συνέχεια, μεταλλοφόρων κοιτασμάτων. Ο κύριος λόγος για τον οποίο αποτελεί ολοένα και πιο σημαντικό εργαλείο στον τομέα της μεταλλευτικής έρευνας είναι ότι μελετά κάποιες φυσικές ιδιότητες των μεταλλευμάτων, οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλες αντιθέσεις σε σχέση με αυτές των πετρωμάτων στα οποία φιλοξενούνται, διευκολύνοντας έτσι τόσο τον εντοπισμό τους, όσο και την χωροθέτησή τους. Η εφαρμογή των κατάλληλων μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης που μελετούν αυτές τις ιδιότητες, ο συνδυασμός της ερμηνείας τους, καθώς και η ταυτοποίηση των αποτελεσμάτων με γεωλογικά ή και γεωτρητικά ακόμη στοιχεία, μπορεί να μεγιστοποιήσει την επιτυχία μίας μεταλλευτικής έρευνας.

Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή της μεθόδου του φυσικού δυναμικού στην περιοχή Πιάβιτσα Χαλκιδικής σε αρχικό στάδιο, σε περιοχές όπου γεωλογικές και χαρτογραφικές μελέτες εμφάνισαν επιφανειακή μεταλλοφορία μαγγανίων και σουλφιδίων. Σε επόμενο στάδιο εφαρμόστηκαν η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τόσο με δεδομένα συνεχούς ρεύματος, όπου μετράται η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών, όσο και με δεδομένα επαγόμενης πόλωσης, όπου μετράται η φορτιστικότητα των σχηματισμών, δηλαδή η ικανότητά τους να συμπεριφέρονται ως πυκνωτές, και παρουσιάζεται ένα δισδιάστατο μοντέλο του εδάφους το οποίο παρέχει περισσότερη πληροφορία. Τέλος εφαρμόστηκε και η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος VLF, η οποία εντοπίζει ρηξιγενείς ζώνες μέσα στις οποίες αναπτύσσονται μεταλλοφόρα σώματα, ενώ παράλληλα με την αντιστροφή των δεδομένων VLF προκύπτει ένα γεωηλεκτρικό μοντέλο της περιοχής μέτρησης, το οποίο παρουσιάζει αυξομειώσεις στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι ο εντοπισμός δομών ενδιαφέροντος και η ταυτοποίησή τους σε σχέση με τα στοιχεία των χαρτογραφικών μελετών, η μελέτη των φυσικών και γεωφυσικών τους χαρακτηριστικών, η σύγκριση τους τόσο με γεωλογικά όσο και με γεωτρητικά δεδομένα της περιοχής, καθώς και ο συνδυασμός της ερμηνείας των μεθόδων που εφαρμόστηκαν σε κάθε περιοχή, για την εξαγωγή πιο αξιόπιστων συμπερασμάτων.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

1.2 Δομή κεφαλαίων

Η δομή κάθε κεφαλαίου για την παρούσα εργασία παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω:

Στο **2ο Κεφάλαιο** παρατίθενται στοιχεία για την περιοχή μελέτης. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται η θέση της Πιάβιτσας καθώς και περίγραμμα που οριοθετεί τον χώρο των μετρήσεων που έλαβαν μέρος σε αυτή, γίνεται μία ιστορική αναδρομή για την εκμετάλλευση των κοιτασμάτων και των μεταλλοφοριών που υπάρχουν στην περιοχή από την Ελληνιστική περίοδο μέχρι Σήμερα, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζεται η ευρύτερη γεωλογία που απαρτίζει την περιοχή. Τέλος, παρατίθενται περισσότερα στοιχεία για την δράση του ρήγματος του Στρατωνίου, καθώς και των κοιτασμάτων που σχηματίστηκαν λόγω της δράσης αυτού.

Στο **3ο Κεφάλαιο** αναπτύσσεται η βασική θεωρία των γεωφυσικών μεθόδων που εφαρμόστηκαν στην εργασία αυτή, καθώς και η σύνδεσή τους με την μεταλλοφορία που συναντάται στην περιοχή. Πιο συγκεκριμένα περιγράφεται η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης, η μέθοδος του φυσικού δυναμικού, καθώς και η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος VLF, ενώ παράλληλα γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά και το είδος της απόκρισης που έχουν σημαντικά ορυκτά, μεταλλικά και μη σε αυτές τις μεθόδους.

Στο **4ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται στοιχεία για τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη των μετρήσεων, καθώς και για την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία και αντιστροφή των δεδομένων που προέκυψαν από αυτές.

Στο **5ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων, για κάθε περιοχή που μετρήθηκε ξεχωριστά. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται αρχικά οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαρτίζουν την κάθε θέση μέσω χαρτών και στοιχείων γεωλογικής χαρτογράφησης, και παρατίθενται στοιχεία από δεδομένα κοντινών γεωτρήσεων, όπου αυτές υπάρχουν. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται σε ξεχωριστά υποκεφάλαια τα αποτελέσματα που προκύπτουν από κάθε μέθοδο και σχολιάζονται, ενώ γίνεται και μία συνολική παρουσίαση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων από όλες τις μεθόδους μαζί, με βάση τη θέση που έχουν αυτές στον χώρο. Τέλος, παρουσιάζεται μία σύνοψη των αποτελεσμάτων από όλες τις περιοχές.

Στο **6ο Κεφάλαιο** παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διατριβή αυτή καθώς και κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

2 Περιοχή μελέτης

Το κεφάλαιο αυτό αφορά την περιοχή στην οποία έλαβε μέρος η συγκεκριμένη εργασία. Αρχικά παρουσιάζεται η περιοχή της Πιάβιτσας καθώς και μερικά ιστορικά στοιχεία που αφορούν την εκμετάλλευση των κοιτασμάτων στην περιοχή μέχρι σήμερα, ενώ στη συνέχεια παρατίθεται η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής. Τέλος, παρατίθενται στοιχεία για τη δράση του ρήγματος του Στρατωνίου, καθώς και για το κοιτασματολογικό ενδιαφέρον που έχει προκύψει από τη δράση αυτή.

2.1 Πιάβιτσα

Η περιοχή Πιάβιτσα ανήκει στον Δήμο Αριστοτέλη, πρώην Δήμων Αρναίας, Παναγίας και Σταγείρων-Ακάνθου στην Ανατολική Χαλκιδική, στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας. Η περιοχή οριοθετείται στα Βορειοδυτικά από το χωριό Βαρβάρα, στα Ανατολικά από το χωριό Στρατονίκη και στα Νοτιοδυτικά από το χωριό Νεοχώρι.

Σχήμα 2.1 Η ευρύτερη περιοχή της Πιάβιτσας και η περιοχή μελέτης (Google Earth)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 2.1) παρουσιάζεται η ευρύτερη περιοχή που αποτελεί την Πιάβιτσα, καθώς και ειδικότερα το τμήμα όπου έλαβαν μέρος οι μετρήσεις για την εργασία αυτή.

2.2 Ιστορική αναδρομή

Η περιοχή της Βορειοανατολικής Χαλκιδικής έχει αξιοσημείωτο ιστορικό και πολιτιστικό πλούτο, ο οποίος συνδέεται με τις μεταλλευτικές δραστηριότητες που έχουν λάβει μέρος στην περιοχή. Κατά τον Davies (1935) υπήρξε δραστηριότητα στα μεταλλεία της περιοχής, και πιο συγκεκριμένα στην θέση Νεοχώρι, η οποία χρονολογείται στην ελληνιστική περίοδο (323-146 π.Χ.), ενώ σύμφωνα με τον Παπάγγελο (1991), ο οποίος ερεύνησε επιφανειακά την περιοχή, υπάρχουν μόνο ενδείξεις για την εκμετάλλευση κατά τη Ρωμαϊκή περίοδο (146 π.Χ. – 330 μ.Χ.) της περιοχής των Σκουριών στην Μεγάλη Παναγία, η οποία μπορεί να αναχθεί σε ακόμη παλαιότερα χρόνια. Με την έναρξη της Ρωμαϊκής περιόδου, η περιοχή της ΒΑ Χαλκιδικής γνώρισε παρακμή και οι μεταλλευτικές δραστηριότητες ελαττώθηκαν, έως τα τέλη της Βυζαντινής περιόδου (330-1453 μ.Χ.) και ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της Οθωμανικής περιόδου, όπου άνθισαν.

Οι πρώτες σαφείς μαρτυρίες στη Βυζαντινή περίοδο χρονολογούνται το 1346 (Bompaire, 1964), με κύριο μεταλλευτικό κέντρο της περιοχής να είναι τα «Σιδηροκαύσια» στην σημερινή περιοχή της Στρατονίκης, παρότι αναφορές για το κέντρο αυτό συναντώνται ήδη από το 866 μ.Χ.. Με το τέλος της Βυζαντινής περιόδου και την κατάκτηση της περιοχής από τους Οθωμανούς στις αρχές του 15^{ου} αιώνα, η περιοχή γνώρισε ξανά ακμή· πραγματοποιούνταν κατεργασία μολύβδου και ψευδαργύρου, και λειτουργούσαν συνολικά 500 με 600 καμίνια.

Στις αρχές του 18^{ου} αιώνα, τα χωριά της περιοχής, τα λεγόμενα «Μαδεμοχώρια», απέκτησαν την αυτονομία τους, και οι κάτοικοι της περιοχής απέκτησαν επίσης το δικαίωμα εκμετάλλευσης των μεταλλείων αργύρου. Η αυτονομία αυτή διήρκησε έως την ανεπιτυχή επανάσταση του 1822 από τους κατοίκους των Μαδεμοχωρίων, που είχε ως αντίκτυπο την καταστροφή των χωριών από τους Τούρκους.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Κατά τη σύγχρονη εποχή (1821-) η εκμετάλλευση περιήλθε στα χέρια της Οθωμανικής μεταλλευτικής εταιρείας «Κασσάνδρα» το 1893, ενώ την ίδια χρονιά τα μεταλλευτικά δικαιώματα παραχωρήθηκαν στην Γάλλο-Οθωμανική εταιρεία «Μεταλλεία Κασσάνδρας» με έδρα στο Παρίσι. Το ενδιαφέρον της εταιρείας συγκεντρώθηκε στην περιοχή Στρατονίκη, όπου το 1901 ξεκίνησε η επιφανειακή εκμετάλλευση του κοιτάσματος σιδηροπυρίτη στο μεταλλείο του «Μαδέμ Λάκκου».

Το 1927 την εκμετάλλευση διαδέχθηκε η Ανώνυμη Ελληνική Εταιρεία Χημικών Προϊόντων & Λιπασμάτων *(ΑΕΕΧΠ&Λ)*, ενώ το 1952 ξεκίνησε η λειτουργία του πρώτου εκ των τριών σημερινών εργοστασίων εμπλουτισμού μεταλλευμάτων στο Στρατώνι, αξιοποιώντας και τα φτωχά μεικτά θειούχα μεταλλεύματα της Ανατολικής Χαλκιδικής, από τα οποία παράγονταν συμπυκνωμένα μεταλλεύματα σφαλερίτη και γαληνίτη. Το 1972 ξεκίνησε η εκμετάλλευση του μεταλλείου μεικτών θειούχων της Ολυμπιάδας και το 1976 κατασκευάστηκε το νέο εργοστάσιο εμπλουτισμού στην Ολυμπιάδα, όπου τα μεταλλεύματα μεταφέρονταν στο Στρατώνι έτοιμα για την εξαγωγή τους.

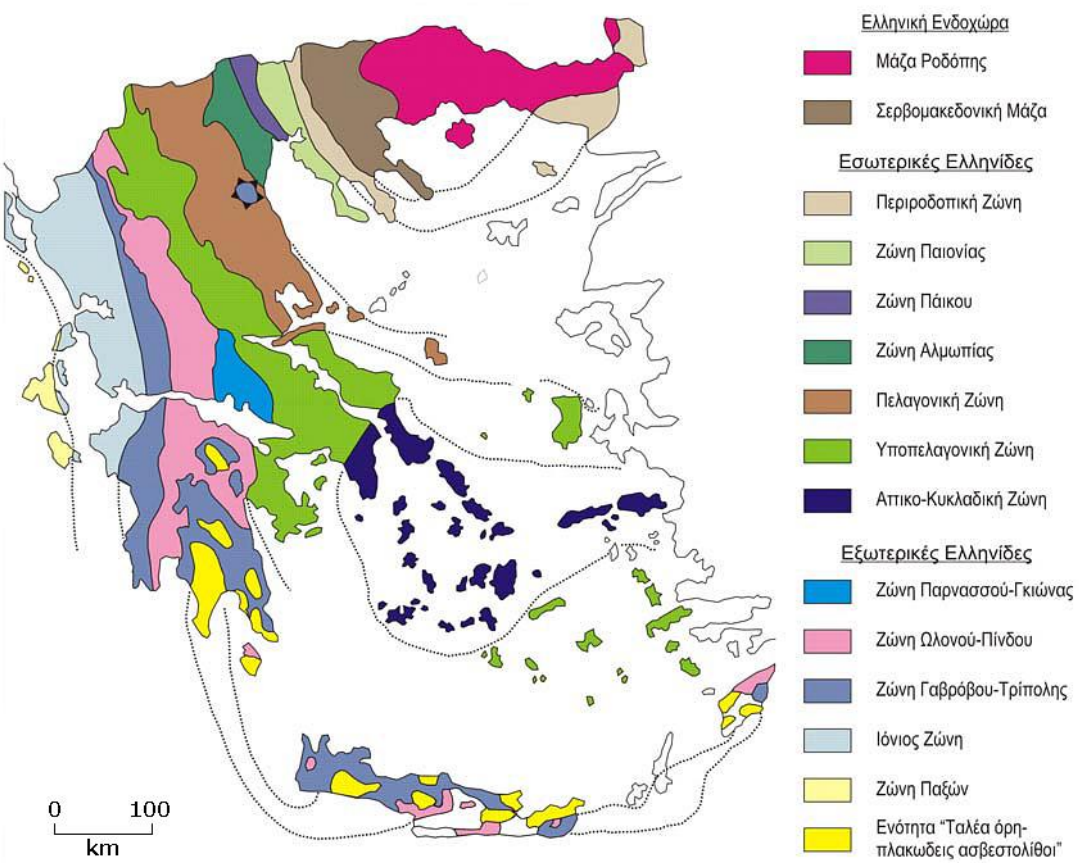
Τον Δεκέμβρη του 1995 τα δικαιώματα και το σύνολο των μεταλλευτικών εγκαταστάσεων των «Μεταλλείων Κασσάνδρας» περιήλθαν στην TVX Hellas, θυγατρική εταιρεία της καναδικής TVX Gold, με κύριο σκοπό την δημιουργία μεταλλουργίας χρυσού στην περιοχή της Ολυμπιάδας. Οι αντιδράσεις της τοπικής κοινωνίας στην κίνηση αυτή πάγωσε την υλοποίηση του σχεδίου, ενώ σε βάθος χρόνου διακόπηκαν οι εργασίες και στο μεταλλείο εκμετάλλευσης μεικτών θειούχων των Μαύρων Πετρών.

Τον Ιανουάριο του 2004 όλα τα δικαιώματα παραχωρήθηκαν στην εταιρεία Ελληνικός Χρυσός Α.Ε., η δραστηριότητα της οποίας συνεχίζεται έως και σήμερα.

2.3 Γεωλογία της περιοχής

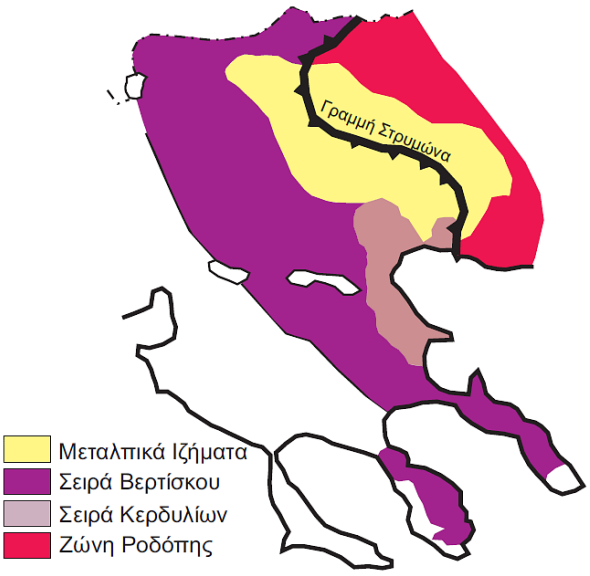
Από γεωλογική σκοπιά, η Πιάβιτσα ανήκει στην Σερβομακεδονική γεωτεκτονική ζώνη (Σχήμα 2.2), η οποία αποτελείται κυρίως από κρυσταλλοσχιστώδη και πυριγενή πετρώματα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 2.2 Γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας (Μουντράκης, 2010)

Η ζώνη αυτή χωρίζεται σε δύο ενότητες με βάση τα πετρώματά της· στην αρχαιότερη σε ηλικία, κατώτερη στρωματογραφικά ενότητα των Κερδυλίων και στην νεότερη σε ηλικία, ανώτερη ενότητα του Βερτίσκου (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3 Σκαρίφημα Σερβομακεδονικής μάζας (τροποποιημένο από Μουντράκης, 2010)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Η ενότητα των Κερδυλίων συναντάται στο Ανατολικό κομμάτι της Χαλκιδικής από τις εκβολές του Στρυμώνα μέχρι το χωριό Στρατώνι, ενώ τα πετρώματα από τα οποία αποτελείται είναι οι βιοτιτικοί γνεύσιοι (μιγματιτικοί), οι διμαρμαρυγιακοί γνεύσιοι (γρανατούχοι), οι αμφιβολίτες, οι εκλογίτες (αμφιβολιτιωμένοι) καθώς και τα μάρμαρα, η έκταση των οποίων είναι εκτενής στην ενότητα αυτή. Τα πετρώματα αυτά εκτείνονται περί τα 3000 μέτρα σε βάθος, γεγονός που τα καθιστά τους βαθύτερους σχηματισμούς της Σερβομακεδονικής μάζας, και πιθανά ολόκληρης της Ελλάδας.

Η ενότητα του Βερτίσκου συναντάται δυτικά της ενότητας των Κερδυλίων και εκτείνεται Βόρεια έως τα σύνορα, ενώ τα πετρώματα από τα οποία αποτελείται είναι οι οφθαλμοειδείς ορθογνεύσιοι (μιγματιτικοί), οι μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι, τα λεπτά στρώματα μαρμάρων και οι μεταγάββροι και ορθοαμφιβολίτες στα ανώτερα κυρίως στρώματα, τα οποία προήλθαν από μεταμόρφωση βασικών πυριγενών σωμάτων και συναντώνται ως φακοειδή σώματα μέσα στους γνευσίους.

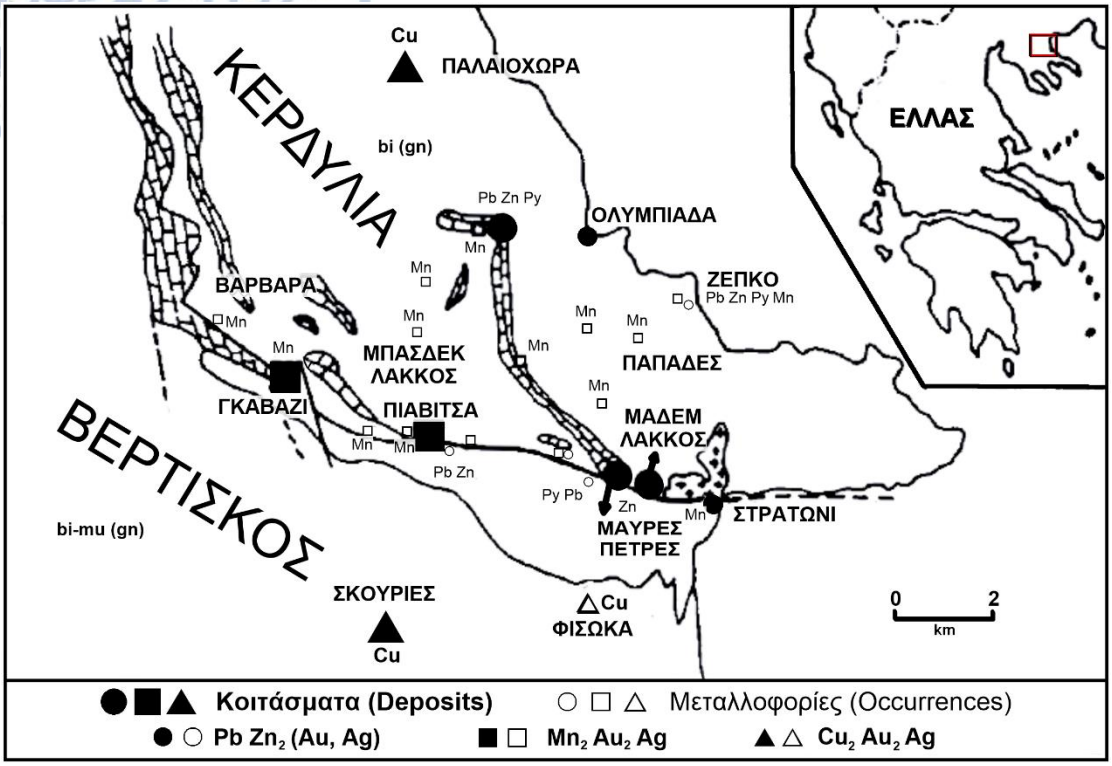
2.4 Ρήγμα Στρατωνίου και κοιτασματολογικό ενδιαφέρον

Ένα από τα κυριότερα αίτια για την εμφάνιση μεταλλοφορίας στην περιοχή είναι η δράση τεκτονικά ενεργών ρηγμάτων και κυρίως του ρήγματος του Στρατωνίου.

Τα ρήγματα εμφανίζουν τριών ειδών προσανατολισμό· Ανατολή-Δύση, Βορειοδυτικό-Νοτιοανατολικό και Βορειοανατολικό-Νοτιοδυτικό. Το ρήγμα του Στρατωνίου είναι ένα κανονικό ρήγμα μήκους περίπου 15 χιλιομέτρων, με κύριο προσανατολισμό Ανατολή-Δύση, το οποίο χωρίζει την ενότητα των Κερδυλίων στον Βορρά από την ενότητα του Βερτίσκου στον Νότο (Σχήμα 2.4). Από την δράση του υπάρχει μία πολύ μεγάλη βύθιση του Βερτίσκου, της οροφής δηλαδή του ρήγματος, προς τον Νότο σε σχέση με τα Κερδύλια, την βάση του ρήγματος, γεγονός που χαρακτηρίζει την εφελκυστική δράση του στην περιοχή. Τα ρήγματα Βορειοδυτικού-Νοτιοανατολικού προσανατολισμού είναι πλαγιοκανονικά ρήγματα αριστερόστροφης συνιστώσας (Pavlides & Tranos, 1991), συνδυάζουν δηλαδή την κίνηση ρηγμάτων κατά την παράταξη (οριζόντιας μετατόπισης) αλλά και κατά την κλίση (κανονικά/ανάστροφα), και είναι αυτά τα οποία κυριαρχούν στην περιοχή.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 2.4 Ρήγμα Στρατωνίου και εμφανισθείσες μεταλλοφορίες στην περιοχή της Β.Α. Χαλκιδικής (τροποποιημένο από Galanopoulos & Theodoroudis, 1994)

Από κοιτασματολογική άποψη, η Βορειοανατολική Χαλκιδική είναι πλούσια σε μαγγανιούχο μεταλλοφορία, ιδιαίτερα στα όρια της τεκτονικής ασυνέχειας Στρατωνίου και Βαρβάρας, με σημαντικές μεταλλοφορίες να αναπτύσσονται επίσης περιθωριακά των κοιτασμάτων με θειούχα βασικά μέταλλα του Μαδέμ Λάκκου και της Ολυμπιάδας (Galanopoulos & Theodoroudis, 1994). Τα βασικότερα πολύτιμα μέταλλα που συναντώνται στα κοιτάσματα αυτού του τύπου είναι ο χρυσός (Au) και ο άργυρος (Ag), ενώ ιδιαίτερη σημασία έχουν επίσης οι περιεκτικότητες σε μόλυβδο (Pb) και ψευδάργυρο (Zn), τα οποία συναντώνται κυρίως στα περιθώρια των θειούχων κοιτασμάτων. Τέλος, συναντάται ο σίδηρος (Fe), ιδιαίτερα στον Μαδέμ Λάκκο, καθώς και ο χαλκός (Cu) στον Μπασδέκ Λάκκο και στο πορφυρικού τύπου κοίτασμα στις Σκουριές. Η ύπαρξη των μετάλλων αυτών στην περιοχή αυτή αποτελεί ένδειξη για την στενή γενετική σχέση που έχουν τα κοιτάσματα θείου και μαγγανίου.

Όσο αφορά τη μεταλλοφορία στην Πιάβιτσα, αποτελεί κυρίως μία αντικατάσταση ανθρακικών πετρωμάτων από ημισυμπαγή προς συμπαγή σουλφίδια, με εκτεταμένες χαλαζιακές-ροδοχρωσιτικές φλέβες πλούσιες σε χρυσό. Οι φλέβες αυτές περιέχουν κατά κύριο λόγο διάσπαρτο σιδηροπυρίτη, σφαλερίτη, γαληνίτη, αρσενοπυρίτη και βουλανζερίτη.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

Η επιφανειακή έκφραση της μεταλλοφορίας αφορά πυριτικά σώματα και οξείδια μαγγανίων, τα οποία αποτελούν προϊόντα οξείδωσης μαγγανιούχων ορυκτών, ενώ σε μεγαλύτερα βάθη συναντώνται διακεκομμένες ζώνες σουλφιδίων. Οι ζώνες αυτές εμφανίζονται κατά κύριο λόγο σε φακούς μαρμάρων οι οποίοι παρασύρονται στην ζώνη του ρήγματος Στρατωνίου με τρόπο παραπλήσιο με αυτόν που συναντάται στο κοίτασμα των Μαύρων Πετρών (Siron et al., 2018). Τα αποθέματα εκτιμώνται περί τα 10.5 εκατομμύρια τόνους, με περιεκτικότητες σε μαγγάνιο έως 34% και σε χρυσό από 0.84 έως 5.7 γραμμάρια ανά τόνο.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

3 Θεωρία γεωφυσικών μεθόδων

Η γεωφυσική στην έρευνα ξεκίνησε ήδη από το πρώτο μισό του 19ου αιώνα, με την εφαρμογή της ηλεκτρικής μεθόδου του φυσικού δυναμικού στην Αγγλία από τον Fox (1830), ενώ στην έρευνα σουλφιδίων το πρώτο σώμα βρέθηκε το 1907 στο Λαπλάντ της Σουηδίας, επίσης με την μέθοδο του φυσικού δυναμικού (Lundberg, 1929). Η μέθοδος αυτή, όντας ανέξοδη και εύκολη στην εφαρμογή, χρησιμοποιήθηκε εκτενώς αρχικά, συμπληρώθηκε όμως στην συνέχεια με την ανάπτυξη της ηλεκτρικής τομογραφίας, τον συνδυασμό δηλαδή της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης και οριζοντιογραφίας. Με την ηλεκτρική τομογραφία μετράται η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υπεδάφους καθώς και η φορτιστικότητά του, ενώ εφαρμογές της στην έρευνα σουλφιδίων έγιναν από τους Bleil (1953), Parasnis (1956), Šumi (1959), Pridmore & Shuey (1976) και πολλούς άλλους.

Πέρα από τις ηλεκτρικές μεθόδους, σημαντικό ρόλο στην έρευνα σουλφιδίων έχουν παίξει και οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι, όπως η μέθοδος AFMAG (Audio-Frequency MAGnetic method) (Ward, 1959· Labson et al., 1985), η μέθοδος TURAM (Gunn & Brook, 1978· Langore et al., 1989), η μέθοδος της μαγνητικής επαγόμενης πόλωσης (Magnetic Induced Polarization, MIP) (Seigel, 1974· Gunn & Brook, 1978), της ακουστικής μαγνητοτελλουρικής μεθόδου (Audio-frequency MagnetoTellurics, AMT) (Strangway et al., 1973· Kellett et al., 1993) η μέθοδος των παροδικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων (Transient ElectroMagnetic, TEM) (Swidinsky, Hölz, & Jegen, 2012), καθώς και η μέθοδος του VLF (Paál, 1965).

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναπτυχθούν βασικές έννοιες και θεωρίες που αφορούν τις ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους γενικότερα, με έμφαση όμως σε αυτές που εφαρμόστηκαν στην εργασία αυτή. Το κεφάλαιο αυτό δεν αποτελεί σε καμία περίπτωση μια εκτενή επισκόπηση ολόκληρης της θεωρίας που διέπει τις ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους, οι πληροφορίες όμως που θα παρατεθούν θα βοηθήσουν στη σφαιρικότερη κατανόηση όσων θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια.

Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ERT, Electrical Resistivity Tomography) καθώς και κάποιες βασικές έννοιες που τη

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

διέπουν, όπως η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση, οι διατάξεις των ηλεκτροδίων, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στην μέτρηση καθώς και η διαδικασία αντιστροφής των δεδομένων. Στη συνέχεια περιγράφεται η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης (IP, Induced Polarization method) και του φυσικού δυναμικού (SP, Self-Potential method), οι οποίες ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης μαζί με την μέθοδο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Επιπλέον, περιγράφεται η μέθοδος VLF-EM (Very Low Frequency Electro-Magnetic method), η οποία εντάσσεται στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και είναι η μόνη ηλεκτρομαγνητική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε, κυρίως λόγω του μικρού βάθους διασκόπησης που ερευνάται στην παρούσα εργασία. Τέλος, παρουσιάζονται στοιχεία για τα γεωφυσικά χαρακτηριστικά που έχουν κάποια βασικά ορυκτά, όσο αφορά τις ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές τους ιδιότητες, καθώς και για την απόκριση που έχουν στην εφαρμογή αυτών των μεθόδων.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

3.1 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

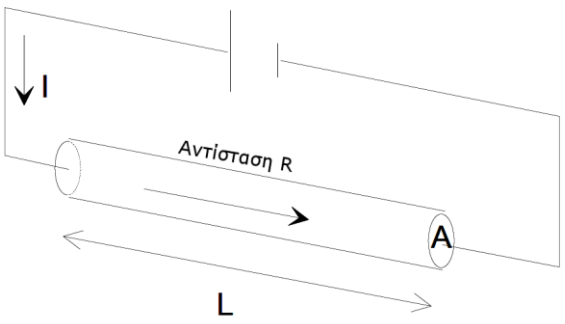
Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης *(Electrical Resistivity)* είναι μία από τις πιο διαδεδομένες και κοινώς εφαρμοσμένες γεωφυσικές μεθόδους παγκοσμίως, καθώς έχει εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος γεωλογικών ζητημάτων, όπως ο εντοπισμός μεταλλοφοριών, η εύρεση υδροφορίας, η χαρτογράφηση ρηγμάτων καθώς και γενικότερα στην κοιτασματολογική, υδρογεωλογική, γεωλογική, γεωθερμική, γεωτεχνική αλλά και αρχαιολογική έρευνα. Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μελετά την ιδιότητα του υπεδάφους ή του μέσου που εφαρμόζεται να αντιστέκεται στην ροή του ρεύματος μέσα από αυτό, δηλαδή μελετά την ηλεκτρική του αντίσταση.

3.1.1 Βασικές αρχές

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η αντίσταση έχει να κάνει με την δυσκολία του ηλεκτρικού ρεύματος να διασχίσει ένα μέσο. Σύμφωνα με τον νόμο του Ohm, η αντίσταση, *R*, ορίζεται ως το πηλίκο της διαφοράς δυναμικού, *V*, με το ρεύμα, *I*, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$R = \frac{V}{I} \qquad (1)$$

Η αντίσταση, όμως, εξαρτάται και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μέσου.



Σχήμα 3.1 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση κυλινδρικού αγωγού (Αποστολόπουλος, 2013)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

Έτσι, στην περίπτωση ενός κυλινδρικού αγωγού (Σχήμα 3.1) Ωμικής αντίστασης *R*, διατομής *A*, και μήκους *L*, η ειδική, πλέον, ηλεκτρική αντίσταση του ορίζεται ως:

$$\rho = R\frac{A}{L} \tag{2}$$

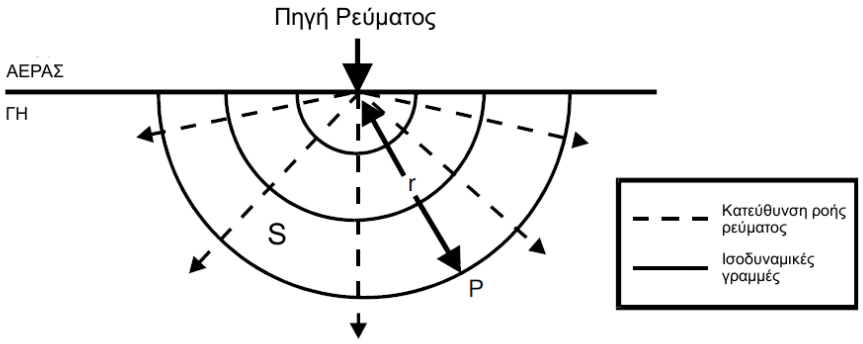
και έχει ως μονάδα μέτρησης το Ohm.m.

Μια εξίσου σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει ένα μέσο και συνδέεται άμεσα με την ειδική ηλεκτρική αντίσταση, είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα, *σ*, η οποία είναι το αντίστροφο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{3}$$

και έχει ως μονάδα μέτρησης το Siemens/m.

Οι ισοδυναμικές γραμμές ενός ηλεκτροδίου σημειακής πηγής σε ένα ομογενές χώρο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 Κατεύθυνση ροής ρεύματος και ισοδυναμικές γραμμές για πηγή ενός ηλεκτροδίου (τροποποιημένο από Tsourlos, 1995)

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η επιφάνεια των ισοδυναμικών γραμμών, *S*, είναι ένα ημισφαίριο, η περιοχή του ισούται με:

$$S = 2\pi r^2 \tag{4}$$

Από τις εξισώσεις (1), (2) και (4), το δυναμικό σε κάθε σημείο *P* απόστασης *r* από την πηγή δίνεται από τη σχέση:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \tag{5}$$

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

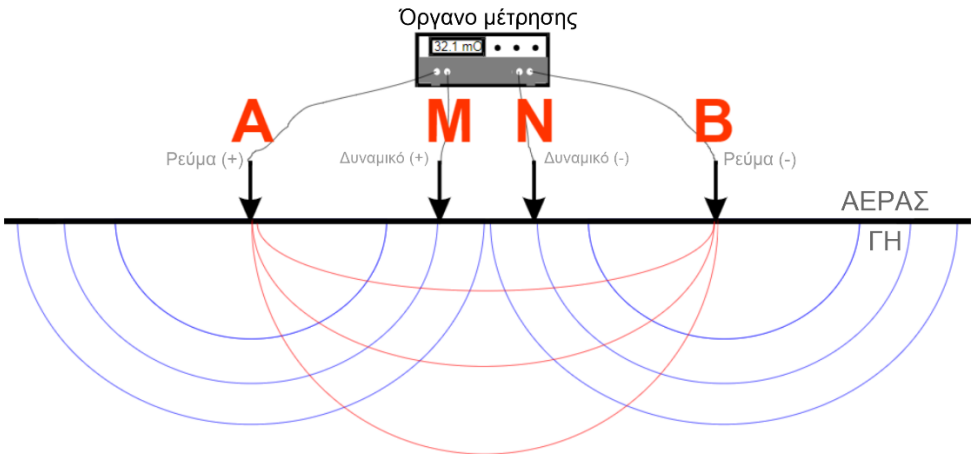
Στην περίπτωση δύο σημειακών ηλεκτροδίων ρεύματος, A με θετικό φορτίο (+) και B με αρνητικό (-), το δυναμικό σε ένα σημείο P απόστασης r_A και r_B από τις πηγές Α και Β αντίστοιχα θα είναι σύμφωνα με την εξίσωση (5):

$$V_P = \frac{I\rho}{2\pi r_A} + \frac{-I\rho}{2\pi r_B} \tag{6}$$

δηλαδή

$$V_P = \frac{I\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right) \tag{7}$$

Για τη μέτρηση της αντίστασης του υπεδάφους, χρειάζονται δύο ζεύγη ηλεκτροδίων, τα δύο εκ των οποίων (Α και Β) χρησιμοποιούνται για την διάδοση ρεύματος στην Γη, και τα άλλα δύο (Μ και Ν) μετρούν την διαφορά δυναμικού εξαιτίας της διάδοσης του ρεύματος (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 Βασική διάταξη μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Το δυναμικό στο σημείο Μ και Ν εξαιτίας των ηλεκτροδίων ρεύματος Α και Β στη βασική διάταξη μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί εύκολα να βρεθεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση (7):

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) \tag{8}$$

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right) \tag{9}$$

Έτσι, η διαφορά δυναμικού, ΔV, θα είναι:

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right) = \frac{I\rho}{2\pi}G \tag{10}$$

Λύνοντας ως προς ρ έχουμε:

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I}\left(\frac{1}{\frac{1}{AM}-\frac{1}{BM}-\frac{1}{AN}+\frac{1}{BN}}\right) = 2\pi \frac{\Delta V}{I}\frac{1}{G} \qquad (11)$$

3.1.2 Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Τα παραπάνω ισχύουν στην περίπτωση όπου η Γη συμπεριφέρεται ως ένα ομογενές μέσο. Βέβαια, αυτό απέχει πολύ από την πραγματικότητα, καθώς η Γη είναι εξ' ορισμού ανομοιογενής. Στην περίπτωση αυτή, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται επιπρόσθετα από τη γεωηλεκτρική δομή του μέσου, καθώς και τη γεωμετρία των μετρήσεων, δηλαδή της θέσης των ηλεκτροδίων στον χώρο.

Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση (11) εκφράζει την φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση, κάθε μέτρηση της οποίας εξαρτάται από τον γεωμετρικό παράγοντα, τη θέση δηλαδή των ηλεκτροδίων στον χώρο, και μπορεί να γραφτεί πιο απλοποιημένα ως:

$$\rho_\alpha = 2\pi \frac{\Delta V}{I}\frac{1}{G} = 2\pi \frac{R}{G} \qquad (12)$$

όπου

ρ_α: η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση

ΔV: η διαφορά δυναμικού

I: η ένταση του ρεύματος

R: η Ωμική αντίσταση $\left(R = \frac{\Delta V}{I}\right)$

G: ο γεωμετρικός παράγοντας $\left(G = \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)$

Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δεν αποτελεί την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υπεδάφους, αλλά την αντίσταση που θα είχε το υπέδαφος, εάν ήταν ομογενές. Κατά τους Robinson & Coruh (1988), η φαινόμενη αντίσταση είναι ένας σταθμισμένος μέσος της πραγματικής αντίστασης του υπεδάφους, ενώ ο Clark (1990) την χαρακτηρίζει ως τον μέσο όρο της αντίστασης του όγκου που επηρεάζεται από το ρεύμα που εισάγεται στο υπέδαφος. Μαθηματικά, αυτό δεν αντιστοιχεί στην

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

πραγματικότητα (Telford et al., 1990), όμως η παραδοχή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ερμηνεία πολλών απλών προβλημάτων.

Καθώς η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δεν αποδίδει την ρεαλιστική κατανομή της αντίστασης στο υπέδαφος, μια πολύπλοκη μαθηματική διαδικασία μετατροπής των φαινόμενων αντιστάσεων σε πραγματικές αντιστάσεις που ονομάζεται αντιστροφή είναι απαραίτητη, ώστε να ληφθεί η καλύτερη δυνατή εικόνα του υπεδάφους μέσα από την ερμηνεία των πραγματικών αντιστάσεων. Για την εφαρμογή της διαδικασίας της αντιστροφής, είναι απαραίτητο να λυθεί πρώτα το ευθύ πρόβλημα, η αντίστροφη δηλαδή διαδικασία, όπου υπολογίζονται οι φαινόμενες αντιστάσεις από ένα γεωηλεκτρικό μοντέλο με γνωστές πραγματικές αντιστάσεις, με την χρήση μιας γνωστής διάταξης ηλεκτροδίων, μέσα από την εφαρμογή αναλυτικών ή αριθμητικών μεθόδων.

3.1.3 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Ο τρόπος με τον οποίο διατάσσονται τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ονομάζεται διάταξη των ηλεκτροδίων. Η επιλογή της κατάλληλης διάταξης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το είδος της έρευνας, το επιθυμητό βάθος διασκόπησης και το μέγεθος του στόχου. Θεωρητικά, υπάρχουν άπειροι τρόποι που μπορούν να τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια στο έδαφος, εφόσον ληφθεί υπόψη η γεωμετρία τους για τον υπολογισμό του γεωμετρικού παράγοντα, στην πράξη όμως μόνο μερικές από αυτές εφαρμόζονται.

Ο λόγος που χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες διατάξεις στην έρευνα οφείλεται σε παράγοντες όπως η ευαισθησία τους σε πλευρικές ή κατακόρυφες αλλαγές, η διακριτική τους ικανότητα, η ευαισθησία από τοπογραφικούς παράγοντες καθώς και για πιο πρακτικούς παράγοντες, όπως είναι η γεωμετρία τους στον χώρο, που επηρεάζει άμεσα την εφαρμοσιμότητά τους στο πεδίο.

Μερικές από τις πιο ευρέως γνωστές και χρησιμοποιούμενες διατάξεις ηλεκτροδίων (Σχήμα 3.4) μαζί με τις φαινόμενες αντιστάσεις τους παρουσιάζονται στην συνέχεια.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

Διάταξη Wenner: Τα ηλεκτρόδια δυναμικού (M και N) είναι τοποθετημένα μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος (A και B) ενώ η απόσταση μεταξύ των παρακείμενων ηλεκτροδίων είναι ίση (a). Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (10) έχουμε:

$$G = \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a}\right) = \frac{1}{a} \quad (13)$$

δηλαδή η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ισούται με:

$$\rho_\alpha = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (14)$$

Διάταξη Διπόλου-Διπόλου (Dipole-Dipole): Τα ηλεκτρόδια ρεύματος είναι διαχωρισμένα από τα ηλεκτρόδια δυναμικού. Οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος είναι σταθερές, a, όπως είναι και οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού. Η απόσταση μεταξύ των δύο διπόλων είναι ανάλογη της a (na). Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ισούται με:

$$\rho_\alpha = -\pi n(n+1)(n+2)a\frac{\Delta V}{I} \quad (15)$$

Διάταξη Schlumberger: Παραπλήσια με τη διάταξη Wenner, όμως όλα τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα συμμετρικά σε σχέση με ένα κεντρικό σημείο, O, στη διάταξη. Εάν η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος ισούται με 2L και η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού με 2l, με $L \geq 10\,l$, τότε η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ισούται με:

$$\rho_\alpha = \frac{\pi L^2}{2l}\frac{\Delta V}{I} \quad (16)$$

Διάταξη Βαθμίδας (Gradient): Είναι παραπλήσια με την διάταξη Schlumberger, με τη διαφορά ότι το κέντρο των ηλεκτροδίων δυναμικού απέχει απόσταση x από το σημείο συμμετρίας O. Εάν $L \geq 10\,l$ τότε η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ισούται με:

$$\rho_\alpha = \frac{\pi}{2l}\frac{(L^2 - x^2)^2}{(L^2 + x^2)}\frac{\Delta V}{I} \quad (17)$$

Διάταξη Πόλου-Διπόλου (Pole-Dipole): Τα ηλεκτρόδια δυναμικού είναι τοποθετημένα μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος, με το ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος, π.χ. το A, να βρίσκεται σε πολύ μεγάλη απόσταση από τα υπόλοιπα τρία ηλεκτρόδια. Έτσι οι αποστάσεις AM και AN θεωρούνται άπειρες, δηλαδή ο λόγος $1\,/\,AM$ και $1\,/\,AN$ του γεωμετρικού παράγοντα είναι ίσος με μηδέν. Εάν η απόσταση BN ισούται με

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

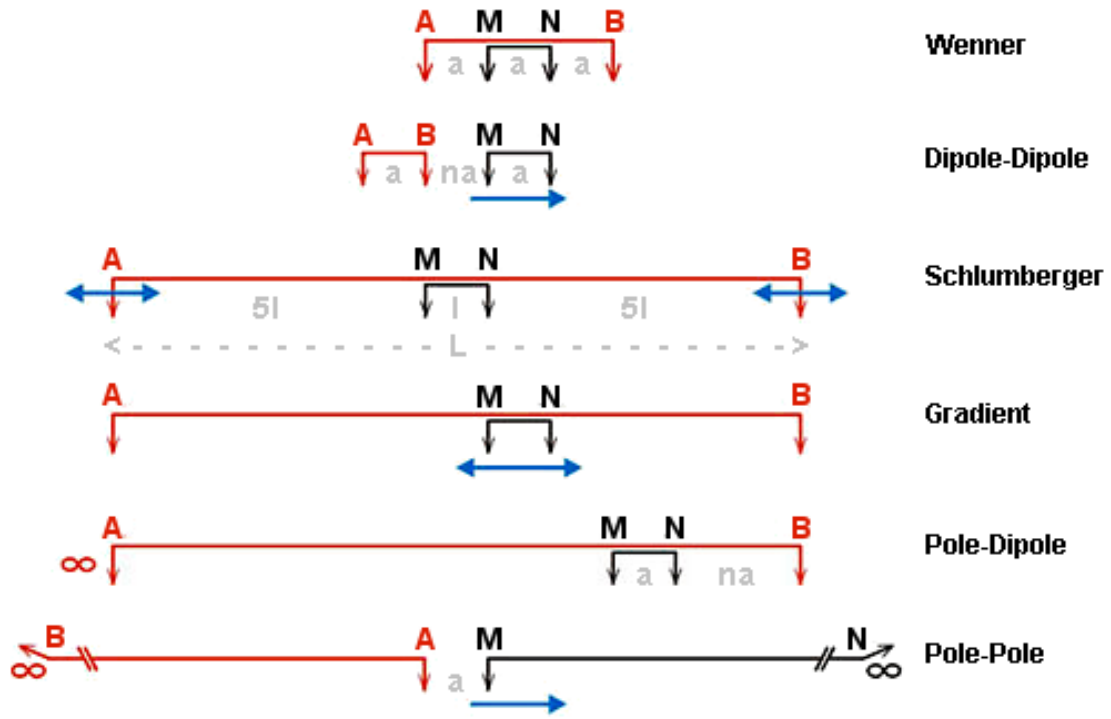
na και η απόσταση BM με a, τότε η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ισούται με:

$$\rho_\alpha = 2\pi \frac{na(na+a)}{a} \frac{\Delta V}{I} \quad (18)$$

Διάταξη Πόλου-Πόλου (Pole-Pole): Είναι παραπλήσια με την διάταξη Pole-Dipole, μόνο που σε αυτήν μετακινείται σε πολύ μεγάλη απόσταση και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού, π.χ. το N, μαζί με ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος, π.χ. το B. Εάν η απόσταση AM ισούται με a και οι αποστάσεις BM, BN, AN είναι άπειρες, τότε η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ισούται με:

$$\rho_\alpha = 2\pi\alpha \frac{\Delta V}{I} \quad (19)$$

δηλαδή η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση στη διάταξη αυτή είναι ίδια με αυτή στην διάταξη Wenner.



Σχήμα 3.4 Βασικές διατάξεις ηλεκτροδίων

Όσον αφορά τις διατάξεις, ο Ward (1990) παρουσίασε μια ανασκόπηση για την αξιολόγηση των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων διατάξεων, με βάση δεκατέσσερα κριτήρια, τα σημαντικότερα των οποίων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Διάταξη	Λόγος Σήματος-Θορύβου	Πλευρική Ανάλυση	Κατακόρυφη Ανάλυση	Ευαισθησία σε Βάθος
Wenner	1	5	1	1
Dipole-Dipole	5	2	2	2
Schlumberger	2	4	1	1
Gradient	3	1	5	5
Pole-Dipole	4	3	2	3
1 = καλύτερη, 5 = χειρότερη				

Πίνακας 1 Αξιολόγηση βασικών διατάξεων ηλεκτρικής τομογραφίας (Ward, 1990)

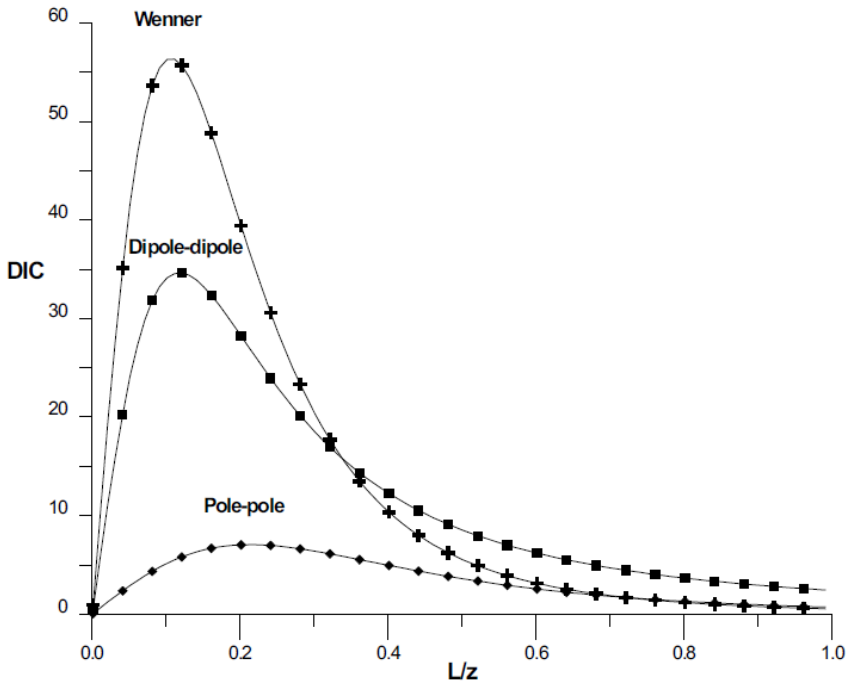
3.1.4 Βάθος διασκόπησης και διακριτική ικανότητα

Ένας από τους πιο βασικούς παράγοντες για την επιλογή της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων στην έρευνα είναι το βάθος διασκόπησης, το μέγιστο δηλαδή βάθος στο οποίο μια διάταξη μπορεί να εντοπίσει ένα σώμα, αλλά και η διακριτική της ικανότητα, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη με την αύξηση του βάθους διασκόπησης.

Σύμφωνα με τους Roy & Apparao (1971) μία θεωρητική προσέγγιση για το βάθος διείσδυσης είναι το ‘χαρακτηριστικό του βάθους έρευνας’ *(Depth of Investigation Characteristic, DIC)*, το οποίο υπολογίζει τη συμβολή κάθε στοιχειώδους όγκου του εδάφους στο σήμα που παρατηρείται στην επιφάνεια. Χαρτογραφώντας την καμπύλη DIC με τον λόγο L / z (Σχήμα 3.5), δηλαδή το μέγιστο άνοιγμα δύο εξωτερικών ενεργών ηλεκτροδίων μίας διάταξης τεσσάρων ηλεκτροδίων προς το βάθος, στο σημείο όπου η καμπύλη DIC είναι μέγιστη συναντάται το μέγιστο βάθος διασκόπησης. Επιπλέον, το εύρος της καμπύλης DIC συνδέεται με την διακριτική ικανότητα της διάταξης, όντας το αντίστροφο του εύρους της καμπύλης DIC όταν αυτό βρίσκεται στα μισά της μέγιστης τιμής της.

Η θεώρηση αυτή δε βρήκε σύμφωνες πολλές μεταγενέστερες εργασίες, καθώς αναφέρεται σε μοντέλο ομογενούς εδάφους. Ο Edwards (1977) σύγκρινε τα αποτελέσματα αυτά με εμπειρικά, καταλήγοντας σε διαφορετικές τιμές για το βάθος διασκόπησης των διατάξεων, ενώ και τα μεταγενέστερα αποτελέσματα του Barker (1989) φαίνεται να συμφωνούν με αυτά του Edwards.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 3.5 Καμπύλη DIC για τη διάταξη Wenner, Dipole-Dipole και Pole-Pole (Tsourlos, 1995)

Μία σύνοψη με τα βάθη διείσδυσης σε σχέση με το μέγιστο άνοιγμα δύο εξωτερικών ενεργών ηλεκτροδίων και την διακριτική ικανότητα για διάφορες γνωστές διατάξεις από τους Roy & Apparao (1971), Edwards (1977) και Barker (1989) παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2):

Διάταξη	Βάθος Διασκόπησης			Διακριτική Ικανότητα
	Roy (1971)	Edwards (1977)	Barker (1989)	
Wenner	0.11 L	0.17 L	0.17 L	1/2.25
Dipole-Dipole	0.195 L	0.25 L	0.25 L	1/3.1
Schlumberger	0.125 L	0.195 L	0.19 L	1/2.45
Pole-Dipole	-	0.52 L	-	-
Pole-Pole	0.35 L	0.77 L	-	1/8.4

Πίνακας 2 Βάθη διασκόπησης και διακριτική ικανότητα διαφόρων διατάξεων ηλεκτρικής τομογραφίας

3.1.5 Ευθύ πρόβλημα και Αντιστροφή

Η διαδικασία υπολογισμού των φαινόμενων αντιστάσεων μέσα από ένα γεωηλεκτρικό μοντέλο γνωστών αντιστάσεων με την εφαρμογή μίας γνωστής διάταξης, στην περίπτωση της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ονομάζεται

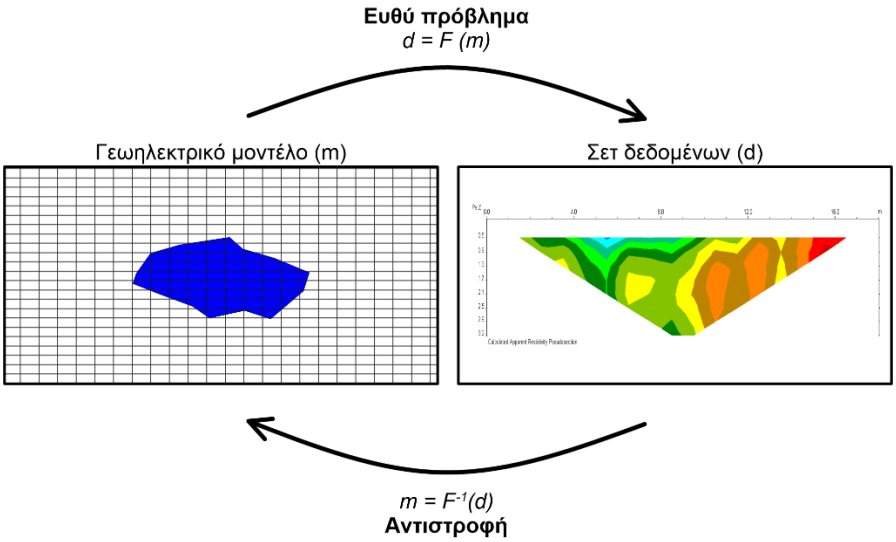
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

λύση του ευθέος προβλήματος. Στην γεωφυσική, αυτό είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, καθώς λαμβάνεται πληροφορία για το είδος των μετρήσεων που θα συλλέγονταν από την μελέτη μίας περιοχής με γνωστές αντιστάσεις.

Η λύση αυτή γίνεται είτε με αναλυτικές μεθόδους, οι οποίες αφορούν απλά γεωμετρικά μοντέλα υπεδάφους, όπως είναι αυτό μιας θαμμένης σφαίρας (Cook & Van Nostrand, 1954), είτε με αριθμητικές μεθόδους, όπως είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Pain et al. (2002), Pridmore et al. (1981), Sasaki (1994), Tsourlos & Ogilvy (1999), Yi et al. (2001)) στις οποίες επιλύονται πολυπλοκότερα μοντέλα εδάφους σύνθετων γεωμετρικών και γεωλογικών χαρακτηριστικών, μιας και το έδαφος διακριτοποιείται σε πολλά ομογενή τριγωνικά στοιχεία, καθένα εκ των οποίων έχει διαφορετική ηλεκτρική αντίσταση.

Στην πραγματικότητα, συνήθως, συμβαίνει η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή διεξάγεται έρευνα σε μία περιοχή άγνωστων αντιστάσεων και λαμβάνεται ένα σετ δεδομένων με φαινόμενες αντιστάσεις, όπου μέσα από σύνθετες υπολογιστικές διαδικασίες μετατρέπονται σε πραγματικές αντιστάσεις. Η αντίστροφη αυτή διαδικασία της λύσης του ευθέος προβλήματος έδωσε το όνομα αντιστροφή στη διαδικασία (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6 Διαδικασία λύσης ευθέος και αντιστρόφου προβλήματος

Στην περίπτωση απλών γεωηλεκτρικών μοντέλων, η επίλυση του αντίστροφου προβλήματος είναι εύκολη και είναι γραμμικής φύσης. Στα περισσότερα όμως γεωφυσικά προβλήματα, οι γεωηλεκτρικές παράμετροι με τα σετ δεδομένων δεν συνδέονται με γραμμικό τρόπο. Γι αυτό το λόγο η διαδικασία επίλυσής τους ανάγεται

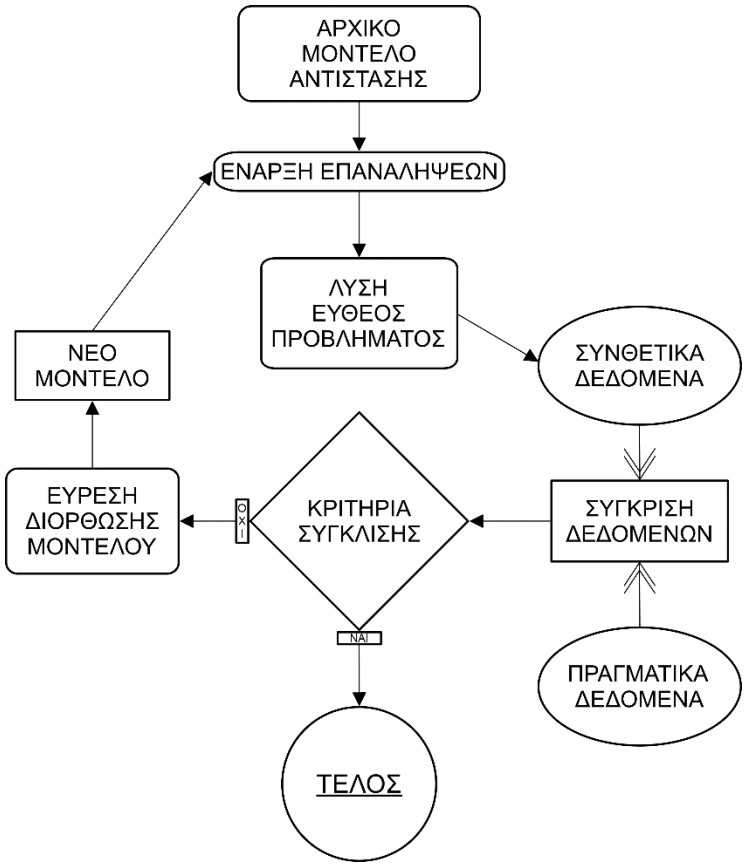
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

σε επαναληπτική, επιλύοντας έτσι πολλά μικρότερα γραμμικά προβλήματα, έως ότου οι παράμετροι του μοντέλου να σχετίζονται με το σετ δεδομένων με το μικρότερο δυνατό σφάλμα.

Η διαδικασία αντιστροφής συνοπτικά πραγματοποιείται ως εξής (Σχήμα 3.7):

Ένα αρχικό μοντέλο αντίστασης υιοθετείται, συνήθως ομογενούς μέσου, το οποίο διακριτοποιείται μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, δίνοντας τιμές αντίστασης σε κάθε ένα από τα στοιχεία. Με την εκκίνηση της επαναληπτικής διαδικασίας και αφού έχει οριστεί ο αριθμός των επαναλήψεων, λύνεται το ευθύ πρόβλημα και δημιουργούνται κάποια συνθετικά δεδομένα. Αυτά συγκρίνονται με τα δεδομένα που μετρήθηκαν και ελέγχονται με βάση το σφάλμα τους. Εφόσον το σφάλμα είναι μεγαλύτερο από ένα κατώφλι που ορίζεται, η διαδικασία επαναλαμβάνεται, αφού πρώτα γίνουν υπολογισμοί για την διόρθωση των παραμέτρων (αντιστάσεων) που δόθηκαν στο αρχικό μοντέλο. Όταν το σφάλμα περάσει το κατώφλι που έχει οριστεί ή πραγματοποιηθεί ο αριθμός όλων των επαναλήψεων, η διαδικασία τερματίζεται.



Σχήμα 3.7 Συνοπτικό διάγραμμα της διαδικασίας αντιστροφής

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

3.2 Μέθοδος Επαγόμενης Πόλωσης

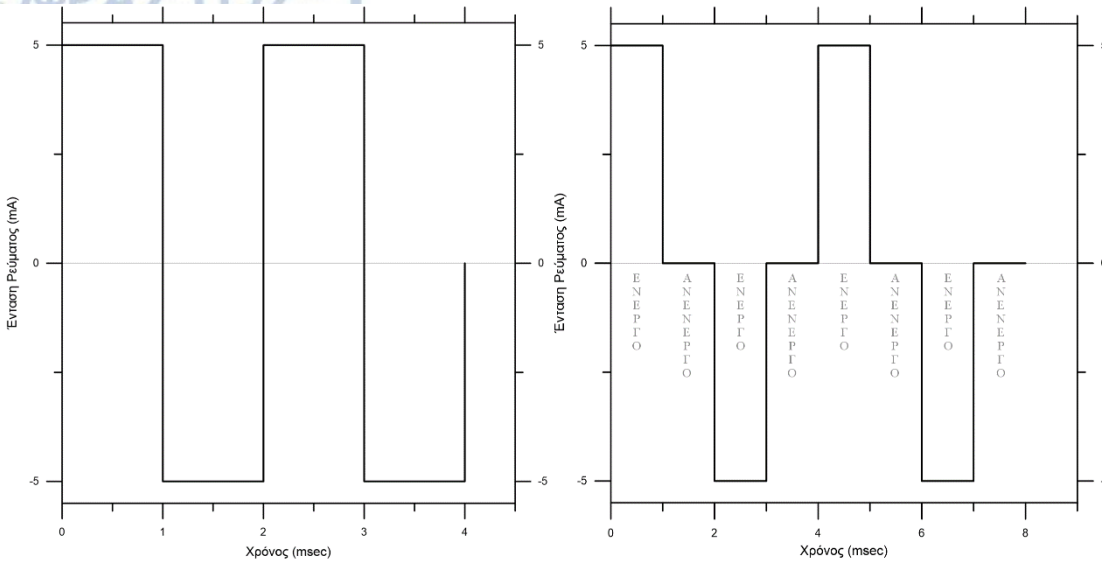
Η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης *(Induced Polarization, IP)* μελετά την φορτιστικότητα της Γης, μια παράμετρο που συνδέεται με την ιδιότητα του υπεδάφους να λειτουργεί ως πυκνωτής, συσσωρεύοντας ηλεκτρικά φορτία κατά τη διάρκεια της διάδοσης ηλεκτρικού ρεύματος σε αυτό. Η μέθοδος αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως συμπλήρωση και επέκταση της ηλεκτρικής τομογραφίας, καθώς ο τρόπος λήψης μετρήσεων, η διάταξη των ηλεκτροδίων και ο εξοπλισμός μέτρησης είναι ο ίδιος, ενώ τα δεδομένα που λαμβάνονται αποθηκεύουν παράλληλα πληροφορία και για την φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υπεδάφους.

3.2.1 Βασικές αρχές

Όπως ήδη αναφέρθηκε, φορτιστικότητα είναι η ιδιότητα του εδάφους να λειτουργεί ως πυκνωτής. Έτσι, κατά τη διάρκεια της εφαρμογής μιας ηλεκτρικής τομογραφίας για την μελέτη του υπεδάφους, εκτός από την ειδική ηλεκτρική αντίσταση αυτού, μετράται και η φορτιστικότητά του, ιδιότητα η οποία συνδέεται άμεσα με την ύπαρξη μεταλλικών ορυκτών στο υπέδαφος.

Ένα βασικό φαινόμενο που αφορά άμεσα την ηλεκτρική τομογραφία, και κατ' επέκταση τις μετρήσεις επαγόμενης πόλωσης, είναι η πόλωση των ηλεκτροδίων ρεύματος. Κατά το φαινόμενο αυτό, με την διάδοση ρεύματος στο υπέδαφος, ιόντα συγκεντρώνονται στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων που έχουν εισαχθεί στο υπέδαφος, αποτρέποντας την ομαλή ροή του ρεύματος, γεγονός που έχει άμεσο αντίκτυπο στην ποιότητα των μετρήσεων. Για την αποφυγή της πόλωσης των ηλεκτροδίων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, η πολικότητα του ρεύματος που διαδίδεται αλλάζει περιοδικά (από 0.25 έως 4 δευτερόλεπτα), παίρνοντας την μορφή τετραγωνικού παλμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8. Στην περίπτωση της επαγόμενης πόλωσης υπάρχει και μια ισόχρονη με την διάδοση παύση του ρεύματος προτού αλλάξει η πολικότητα του, διάστημα στο οποίο καταγράφεται η αποφόρτιση των γεωλογικών σχηματισμών που πιθανά έχουν λειτουργήσει ως πυκνωτές.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

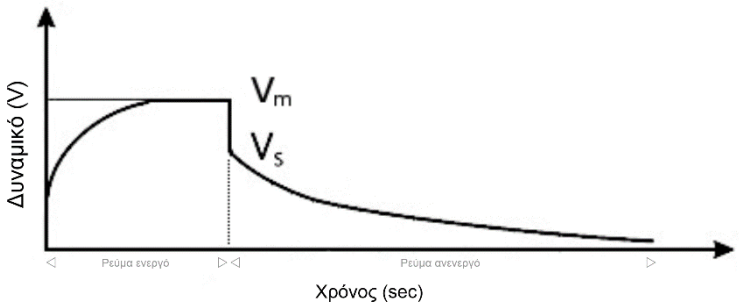


Σχήμα 3.8 Μεταδιδόμενο ρεύμα ως τετραγωνικό κύμα στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση και την επαγόμενη πόλωση

Σύμφωνα με τον Seigel (1959), η φορτιστικότητα, m, είναι ο λόγος του δευτερογενούς δυναμικού (V_s) όταν απενεργοποιείται το ρεύμα, προς την τιμή του πρωτογενούς δυναμικού (V_m) όσο το ρεύμα είναι ακόμα ενεργοποιημένο.

$$m = \frac{V_s}{V_m} \tag{20}$$

Όσο το ρεύμα είναι ανενεργό, η ενέργεια που έχει συσσωρευθεί στα σώματα που βρίσκονται στο υπέδαφος απελευθερώνεται, με αποτέλεσμα τα σώματα αυτά να δρουν ως δευτερογενείς πηγές ρεύματος. Το δυναμικό σε αυτή τη χρονική περίοδο καταγράφεται από το όργανο μέτρησης σε διαφορετικά χρονικά παράθυρα έως ότου μηδενιστεί (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9 Καμπύλη δυναμικού κατά τη διάρκεια ενεργού και ανενεργού ρεύματος

Από το Σχήμα 3.9 είναι εύκολο κανείς να αντιληφθεί ότι η τιμή της φορτιστικότητας δεν είναι δυνατό να είναι πάνω από 1 V/V, καθώς το δευτερογενές δυναμικό είναι πάντοτε μικρότερο του πρωτογενούς. Για λόγους ευκολίας η παραπάνω

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

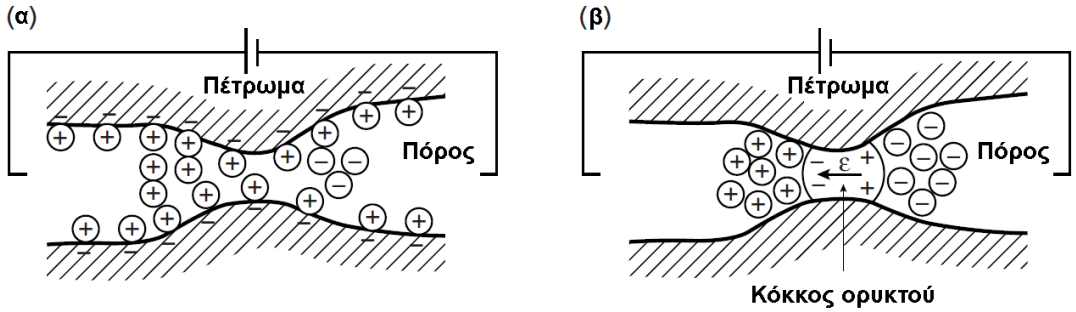
τιμή εκφράζεται και ως 1000 mV/V και είναι και ο τρόπος που θα χρησιμοποιηθεί και εκφραστεί σε αυτή την εργασία.

3.2.2 Μηχανισμοί γένεσης

Οι μηχανισμοί που προκαλούν φαινόμενα επαγόμενης πόλωσης είναι δύο· η πόλωση μεμβράνης και η πόλωση ηλεκτροδίου.

Πόλωση μεμβράνης: Ονομάζεται επίσης και ηλεκτρολυτική πόλωση. Στην περίπτωση αυτή, όταν το ρεύμα διαχέεται στο έδαφος, ο τρόπος που κινείται μέσα στα πετρώματα είναι κυρίως μέσω ηλεκτρολυτών που βρίσκονται στους πόρους αυτών. Τα πετρώματα αυτά έχουν συνήθως αρνητικό φορτίο στην επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη (Σχήμα 3.10^{α}), προσελκύοντας με τη σειρά τους θετικά φορτία στο σημείο αυτό. Όταν η πηγή του ρεύματος σταματά, τα συγκεντρωμένα αυτά αρνητικά και θετικά φορτία τείνουν να επιστρέψουν στην αρχική τους κατάσταση, δημιουργώντας τάση η οποία μειώνεται σταδιακά.

Η πόλωση μεμβράνης εμφανίζεται κυρίως σε πολύ λεπτόκοκκα πετρώματα, γεγονός που τη συνδέει άμεσα με την παρουσία αργιλικών πετρωμάτων, ενώ η παρουσία αλατότητας στον ηλεκτρολύτη μειώνει το φαινόμενο.



Σχήμα 3.10 Μηχανισμοί γένεσης επαγόμενης πόλωσης. α) πόλωση μεμβράνης, β) πόλωση ηλεκτροδίου
(τροποποιημένο από Kearey et al., 2002)

Πόλωση ηλεκτροδίου: Ονομάζεται επίσης και υπέρταση. Στην περίπτωση αυτή, όταν το ρεύμα που διαχέεται στο έδαφος συναντήσει κόκκους μεταλλικών ορυκτών στο πέτρωμα, σχηματίζεται μια ηλεκτρική διαδρομή για τη ροή του. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.10^{β}, όταν το ρεύμα συναντά ένα κόκκο μεταλλικού

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

ορυκτού που εμποδίζει την κυκλοφορία στον πόρο, συγκεντρώνονται αντίθετα φορτία στις άκρες του κόκκου, με αποτέλεσμα να προκαλείται συσσώρευση τάσης στο σημείο. Όταν η πηγή του ρεύματος σταματά, τα ιόντα αυτά διαχέονται σταδιακά στην αρχική τους θέση, δημιουργώντας μία φθίνουσα τάση.

Σύμφωνα με τους Kearey et al. (2002), το μέγεθος της πόλωσης ηλεκτροδίου εξαρτάται όχι μόνο από το μέγεθος του ρεύματος που διαδίδεται στο έδαφος, αλλά και από τη συγκέντρωση των μετάλλων στο έδαφος, ενώ ο Milsom (2003) αναφέρει πως εξαρτάται κυρίως από την επιφάνεια του μετάλλου που λαμβάνει μέρος το γεγονός, παρά από τον συνολικό όγκο του. Η αύξηση των πόρων στο πέτρωμα μειώνει την ηλεκτρική διαδρομή της πόλωσης ηλεκτροδίου, καθώς το ρεύμα βρίσκει ευκολότερους τρόπους για τη διάδοσή του.

Κατά την έρευνα ο κύριος μηχανισμός ενδιαφέροντος είναι αυτός της πόλωσης ηλεκτροδίου, ο οποίος και αναμένεται να δημιουργεί μεγαλύτερες ανωμαλίες από ότι η πόλωση μεμβράνης εάν εφαρμόζονταν σε ίδιο μέγεθος επιφάνειας. Παρ' όλα αυτά, λόγω της σημαντικής πιθανότητας να βρίσκονται σε μεγαλύτερη αφθονία αργιλικές περιοχές από αυτές με μεταλλικά ορυκτά, γεγονός που τα καθιστά ικανά να δώσουν ίδια ανωμαλία, αργιλικές συγκεντρώσεις μπορούν να λειτουργήσουν ως θόρυβος και να οδηγήσουν σε λάθος συμπεράσματα για την περιοχή ενδιαφέροντος.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

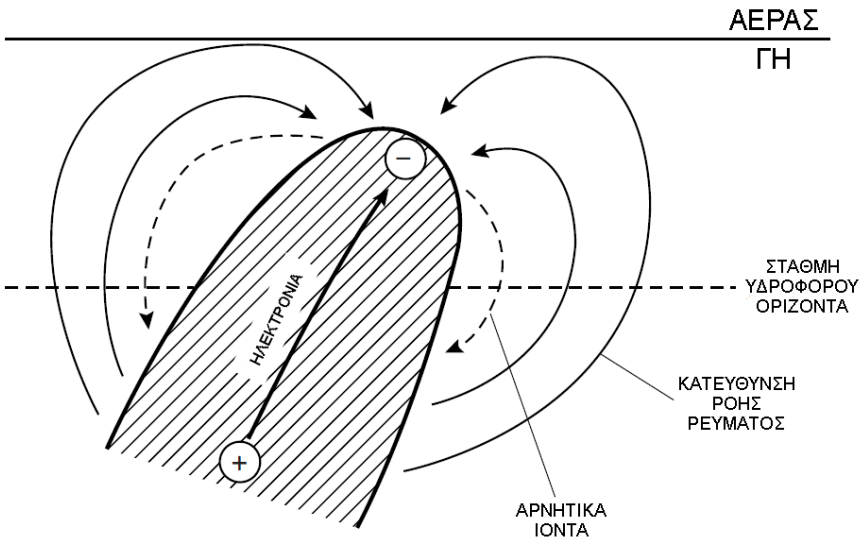
3.3 Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού

Η μέθοδος του φυσικού δυναμικού *(Spontaneous or Self-Potential, SP)* αποτελεί την παλαιότερη γεωφυσική μέθοδο διασκόπησης, η οποία αναπτύχθηκε αρχικά για τον εντοπισμό θαμμένων μεταλλοφοριών και κυρίως σουλφιδίων. Η μέθοδος αυτή μελετά φυσικά ηλεκτρικά δυναμικά που παρατηρούνται στο υπέδαφος, γεγονός που οφείλεται στην αποσάθρωση κοιτασμάτων σουλφιδίων, στη δράση διαλυμάτων, στην κίνηση υπόγειων νερών ή λόγω ορισμένων βιολογικών διεργασιών. Η χρήση της ήταν εκτενής τις περασμένες δεκαετίες, λόγω της γρήγορης συλλογής δεδομένων στο πεδίο και της ανέξοδης εξοπλιστικής απαίτησής της, ενώ τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται στον εντοπισμό εγκοίλων (Quarto & Schiavone, 1996), στην γεωτεχνική έρευνα (Markiewicz et al., 1984), στην γεωθερμική έρευνα (Fitterman & Corwin, 1982) και στον εντοπισμό σουλφιδίων (Yüngül, 1950; Corry, 1985).

3.3.1 Βασικές αρχές

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο κύριος λόγος εμφάνισης αυτών των φυσικών ηλεκτρικών ρευμάτων είναι η αποσάθρωση μεταλλοφορίας σουλφιδίων. Έτσι, όταν ένα κοίτασμα βρίσκεται κατά το ήμισυ μέσα στον υπόγειο υδροφορέα, ξεκινά να οξειδώνεται με διαφορετικούς ρυθμούς εκατέρωθεν της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, με την οξείδωση στο τμήμα που είναι πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους να είναι εντονότερη. Έτσι, παράγονται θειϊκά οξέα και άλατα του μεταλλεύματος, τα οποία αποτελούν ηλεκτρολύτες. Λόγω της διαφοράς στον βαθμό οξείδωσης των άκρων του μεταλλεύματος, δημιουργείται διαφορά δυναμικού μεταξύ τους, όπου το πιο οξειδωμένο πάνω άκρο δρα ως αρνητικός πόλος, ενώ το λιγότερο οξειδωμένο κάτω άκρο ως θετικός πόλος (Σχήμα 3.11). Έτσι, ηλεκτρικά ρεύματα διαρρέουν τον χώρο γύρω από το μετάλλευμα, και στην περίπτωση που αυτό βρίσκεται σε μικρό βάθος, τα ρεύματα αυτά διαρρέουν την επιφάνεια της Γης, δημιουργώντας διαφορά δυναμικού μεταξύ διαφορετικών σημείων πάνω σε αυτή. Το δυναμικό αυτό όταν μετράται, δημιουργεί ανωμαλίες που είναι της τάξης από μερικές δεκάδες mV έως και περίπου 1.5 V.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 3.11 Ο μηχανισμός δημιουργίας φυσικών ηλεκτρικών δυναμικών (τροποποιημένο από Sato & Mooney, 1960)

Αυτή η διεργασία αποτελεί την κυριότερη για την εμφάνιση φυσικών δυναμικών στην επιφάνεια του εδάφους, αλλά δεν είναι η μοναδική.

3.3.2 Μηχανισμοί γένεσης

Τα φυσικά δυναμικά, ανάλογα με τους μηχανισμούς γένεσής τους, διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

Δυναμικά ροής (streaming potential): Τα δυναμικά ροής, ή αλλιώς ηλεκτροκινητικά δυναμικά, οφείλουν τη γένεσή τους στην κίνηση ενός ηλεκτρολύτη μέσα από τους πόρους των πετρωμάτων. Έτσι, όταν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές (υψηλά ποσοστά βροχόπτωσης, απότομο ανάγλυφο, ύπαρξη πορώδους πετρώματος), οι ανωμαλίες του φυσικού δυναμικού εντείνονται. Το φαινόμενο αυτό μελετήθηκε πρώτη φορά από τον Helmholtz τον 19ο αιώνα, όπου παρατήρησε πως δημιουργείται διαφορά δυναμικού στα άκρα ενός τριχοειδούς σωλήνα, όταν αυτός διαρρέεται από ηλεκτρολύτη. Το δυναμικό ροής, ΔV, που παράγεται ορίζεται ως:

$$\Delta V = -\frac{\varepsilon\zeta}{\eta\sigma}\,\Delta P \qquad (21)$$

όπου ΔV: το δυναμικό ροής

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

ε: η διηλεκτρική σταθερά του ηλεκτρολύτη

ζ: παράμετρος η οποία εξαρτάται από το υλικό του τριχοειδούς σωλήνα και του ηλεκτρολύτη

η: το ιξώδες του ηλεκτρολύτη

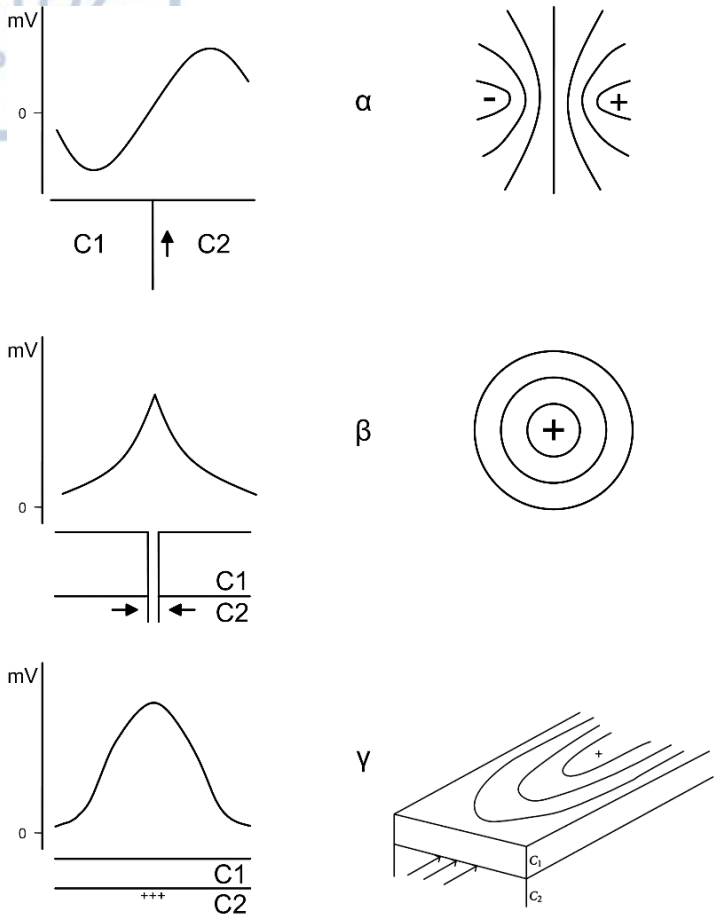
σ: η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη

ΔP: το μέγεθος της διαφοράς της πίεσης των πόρων η οποία ωθεί τη ροή

Ο λόγος $\Delta V / \Delta P$ ονομάζεται συντελεστής διασταυρούμενης σύζευξης δυναμικού ροής, C, ή πιο απλά συντελεστής δυναμικού ροής, και χαρακτηρίζει τους σχηματισμούς μέσα στους οποίους ρέει ο ηλεκτρολύτης. Απαραίτητη προϋπόθεση για την δημιουργία δυναμικών ροής είναι όχι μόνο να υπάρχει κίνηση ηλεκτρολύτη μέσα σε ένα σχηματισμό, αλλά σε όριο όπου οι συντελεστές του δυναμικού ροής των σχηματισμών να είναι διαφορετικοί. Μερικά παραδείγματα δυναμικών ροής σε διαφορετικά μοντέλα εδάφους φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.12).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλο Α.Π.Θ



Σχήμα 3.12 Τομή και κάτοψη ανωμαλιών φυσικού δυναμικού από ροή ηλεκτρολύτη μεταξύ στρωμάτων με διαφορετικούς συντελεστές δυναμικού ροής.Τα βέλη αναπαριστούν τη διεύθυνση ροής σε: α) πλευρικό όριο, β) άντληση πηγής, γ) οριζόντιο όριο (Schiavone & Quarto, 1984)

Δυναμικά διάχυσης: Διαβαθμίσεις της συγκέντρωσης των ιόντων στο έδαφος μπορούν να δημιουργήσουν δυναμικά διάχυσης. Όταν αυτά τα ιόντα, ανιόντα και κατιόντα, έχουν διαφορετικές ταχύτητες, τα δυναμικά διάχυσης που δημιουργούν παράγουν ηλεκτρικό πεδίο, επειδή τα ταχύτερα κινούμενα ιόντα του ενός φορτίου ξεπερνούν τα πιο αργά του αντίθετου φορτίου (Nyquist & Corry, 2002). Το δυναμικό που παράγεται εξαναγκάζει τα πιο αργά ιόντα σε γρηγορότερη κίνηση, ώστε να διατηρηθεί η ηλεκτρική ουδετερότητα του συστήματος. Όντας σε ηλεκτρική ουδετερότητα, το δυναμικό διάχυσης, V_d, δίνεται από τη σχέση:

$$V_d = \frac{RT(u_a - u_b)}{nF} ln \frac{C_1}{C_2} \qquad (22)$$

όπου R: η παγκόσμια σταθερά των αερίων

T: η απόλυτη θερμοκρασία

u_a και u_b: οι ταχύτητες των ανιόντων και κατιόντων αντίστοιχα

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ

n: το σθένος των ιόντων

F: η σταθερά του Faraday

C_1 και C_2: οι συγκεντρώσεις του διαλύματος που δημιουργούν τις βαθμίδες διάχυσης

Σε γενικές γραμμές, ο μηχανισμός διάχυσης δημιουργεί ανωμαλίες της τάξης των δεκάδων mV, αποτελεί όμως κυρίως πηγή θορύβου.

Βιοηλεκτρικά δυναμικά: Συνδέονται άμεσα με τη δράση των φυτών. Η δυνατότητα των φυτών να αντλούν ιόντα και νερό από το έδαφος, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ανωμαλιών φυσικού δυναμικού, καθώς οι ρίζες τους λειτουργούν ως μεμβράνες απορρόφησης. Οι μεταβολές στο φυσικό δυναμικό μπορεί πολλές φορές να είναι απότομες, όταν αλλάξει απότομα η βλάστηση σε μια περιοχή ή αλλάξει η σύσταση των υποκείμενων πετρωμάτων. Αυτός ο μηχανισμός γένεσης δημιουργεί ανωμαλίες που μπορούν να φτάσουν την τάξη των εκατοντάδων έως χιλιάδων mV.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

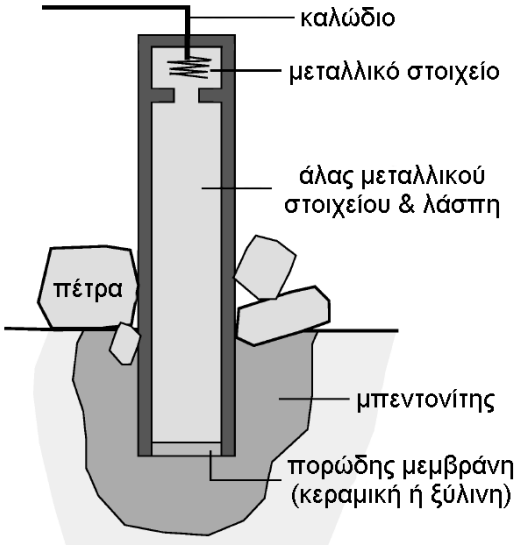
Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

3.3.3 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που απαιτείται για την πραγματοποίηση μετρήσεων φυσικού δυναμικού είναι, συγκριτικά με τις περισσότερες γεωφυσικές μεθόδους, πολύ απλός και περιλαμβάνει δύο ή και περισσότερα μη πολούμενα ηλεκτρόδια, καλώδια σύνδεσης, βολτόμετρο, καθώς και συνοδευτικό εξοπλισμό, όπως στροφείο για την περιτύλιξη του καλωδίου και εργαλεία σκαψίματος για την καλύτερη επαφή του ηλεκτροδίου με το έδαφος.

Βολτόμετρο: Το βολτόμετρο που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση μετρήσεων φυσικού δυναμικού μπορεί να αποτελεί και ένα πολύμετρο ακριβείας που διατίθενται στο εμπόριο, είναι απαραίτητο όμως να έχει υψηλή εσωτερική αντίσταση της τάξης των 10 MOhm τουλάχιστον, ενώ ανάλυση της τάξης των 0.1mV θεωρείται ικανοποιητική.

Μη πολούμενα ηλεκτρόδια: Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται συνήθως στις μετρήσεις φυσικού δυναμικού αποτελούνται από ένα μεταλλικό στοιχείο το οποίο βρίσκεται σε επαφή με το άλας του, όπως είναι τα ηλεκτρόδια αργύρου σε διάλυμα χλωριούχου αργύρου ($Ag - AgCl$), χαλκού σε διάλυμα θειϊκού χαλκού ($Cu - CuSO_4$) ή μολύβδου σε διάλυμα χλωριούχου μολύβδου ($Pb - PbCl_2$), τα οποία με τη σειρά τους έρχονται σε επαφή με το έδαφος μέσω μίας πορώδους μεμβράνης στην βάση του ηλεκτροδίου (Σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13 Δομή μη πολούμενου ηλεκτροδίου

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Καλώδιο σύνδεσης: Το καλώδιο που χρησιμοποιείται σε μετρήσεις φυσικού δυναμικού οφείλει να είναι μικρής διαμέτρου αλλά ανθεκτικό, γεγονός που έχει μεγάλη πρακτική ουσία, τόσο για το μάζεμά του στο καρούλι, όσο και για την αποφυγή κοψίματός του κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Όσο αφορά την αντίστασή του, μιας και το μεγαλύτερο μέρος της αντίστασης του συστήματος συγκεντρώνεται στην επαφή του ηλεκτροδίου με το έδαφος, δεν είναι απαραίτητη η χρήση ειδικών καλωδίων.

3.3.4 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Στη μέθοδο του φυσικού δυναμικού, οι κύριες διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή των δεδομένων είναι δύο· η διάταξη σταθερής βάσης και η διάταξη βαθμίδας.

Διάταξη σταθερής βάσης: Ονομάζεται επίσης και διάταξη ολικού πεδίου. Σε αυτήν, χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρόδιο βάσης, το οποίο μένει σταθερό σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων και, ιδανικά, διατηρείται σε οπή γεμάτη με λάσπη μπεντονίτη, ενώ το δεύτερο ηλεκτρόδιο κινείται με σταθερό βήμα (Σχήμα 3.14^{A}). Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων, ενώνουμε τη μία άκρη του καλωδίου στο ηλεκτρόδιο βάσης και την άλλη στο κινούμενο ηλεκτρόδιο και κινούμαστε μαζί με το καλώδιο. Ο θετικός πόλος του βολτόμετρου συνδέεται στο κινούμενο ηλεκτρόδιο, ενώ ο αρνητικός στο καλώδιο, ενώ οι μετρήσεις γίνονται σε προκαθορισμένα σημεία που έχουμε επιλέξει, ή σε σημεία που επιλέγουμε εκείνη τη στιγμή. Το γεγονός ότι το καλώδιο δε σέρνεται καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων, σε αντίθεση με τη διάταξη βαθμίδας, μειώνει την πιθανότητα πρόκλησης φθορών σε αυτό. Αναφορικά με την τιμή του φυσικού δυναμικού στη διάταξη αυτή, εάν P_i είναι το ολικό δυναμικό και V_i το δυναμικό που μετράμε, ισχύει:

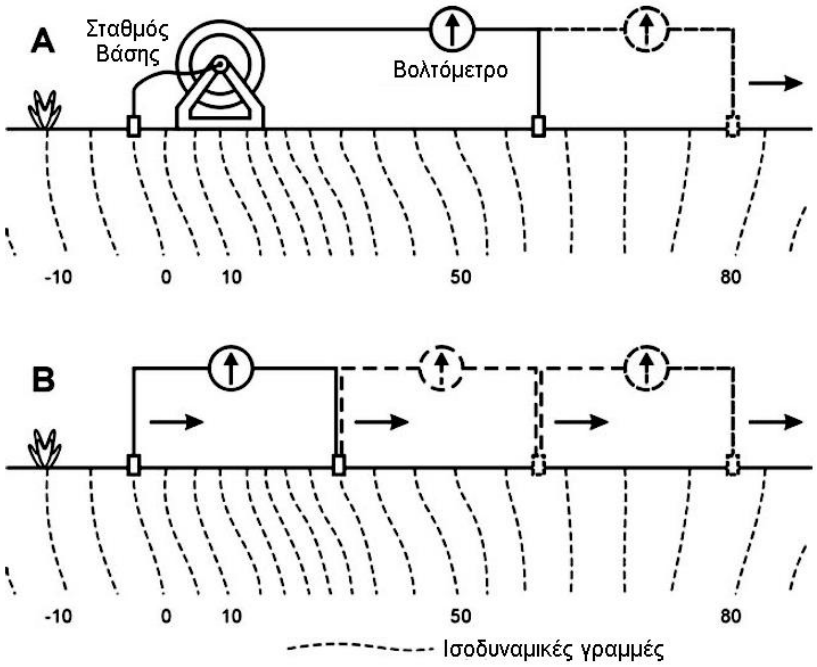
$$\begin{aligned} P_i &= V_i \\ P_{i+1} &= V_{i+1} \\ &\dots \\ P_n &= V_n \end{aligned} \tag{23}$$

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

Βασικό πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι το γεγονός πως έχουμε μια σταθερή βάση σε κάθε μέτρηση, γεγονός που μειώνει σημαντικά τις πιθανότητες συσσώρευσης σφαλμάτων στις μετρήσεις, λόγω προβλημάτων πόλωσης, επαφής ή χρονικά μεταβαλλόμενων δυναμικών. Μάλιστα, η αναγνώριση τέτοιων σφαλμάτων είναι πολύ ευκολότερη σε αυτή τη διάταξη, όπως είναι και η αφαίρεσή τους. Τέλος, οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν με ένα μόνο άτομο, ακόμη και σε δύσκολα πεδία, με μεγάλη ταχύτητα.

Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται το γεγονός ότι η μεταφορά είναι δύσκολη, μιας και το καλώδιο είναι μαζεμένο σε καρούλι, πολλές φορές μεγάλου βάρους, καθώς επίσης και το γεγονός ότι το καλώδιο είναι επιρρεπές στη φθορά, από φυσικά ή ανθρωπογενή αίτια, με τον εντοπισμό της να είναι ιδιαίτερα χρονοβόρος. Επιπλέον, ο χρόνος που απαιτείται για το στήσιμο και το μάζεμα της διάταξης είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με τη διάταξη βαθμίδας.



Σχήμα 3.14 Διατάξεις ηλεκτροδίων για την μέτρηση φυσικού δυναμικού. α) διάταξη σταθερής βάσης, β) διάταξη βαθμίδας (τροποποιημένο από Kirsch, 2006)

Διάταξη βαθμίδας: Ονομάζεται επίσης και διάταξη διπόλου, διάταξη σταθερών ηλεκτροδίων ή leapfrog. Σε αυτήν, χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρόδια που συνδέονται με καλώδιο σταθερού μήκους, δηλαδή η απόσταση δύο διαδοχικών σταθμών μέτρησης είναι σταθερή και ίση με το μήκος αυτό, ενώ συνδέονται και τα δύο σε ένα βολτόμετρο (Σχήμα 3.14^{B}). Για την πραγματοποίηση των

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

μετρήσεων, η διάταξη αυτή μετακινείται έτσι, ώστε το πρώτο ηλεκτρόδιο να πάρει τη θέση του δεύτερου και το δεύτερο την θέση του πρώτου της επόμενης μέτρησης. Με την τεχνική αυτή, που έδωσε και το όνομα leapfrog στην διάταξη, μειώνεται η πιθανότητα σφάλματος λόγω πόλωσης των ηλεκτροδίων. Αναφορικά με την τιμή του φυσικού δυναμικού στη διάταξη αυτή, εάν P_i είναι το ολικό δυναμικό και V_i το δυναμικό που μετράμε, ισχύει:

$$\begin{aligned} P_i &= V_i \\ P_{i+1} &= V_i + V_{i+1} \\ &\dots \\ P_n &= V_i + V_{i+1} + \cdots + V_n \end{aligned} \tag{24}$$

Βασικό πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι το μικρό μήκος καλωδίου, γεγονός που παρέχει μεγάλη ευκολία συλλογής δεδομένων σε δύσκολα πεδία, όπως είναι και ο έλεγχος αυτού σε πιθανές βλάβες. Επιπλέον, ο χρόνος που απαιτείται για το στήσιμο και το μάζεμα της διάταξης είναι πολύ λίγος.

Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται το γεγονός ότι χρειάζονται δύο άτομα για τη συλλογή δεδομένων, η μετακίνηση της διάταξης σε κάθε μέτρηση μπορεί να φθείρει το καλώδιο, και το σημαντικότερο μειονέκτημα είναι ότι η διάταξη είναι επιρρεπής σε σφάλματα. Τα σφάλματα αυτά μπορούν να φτάσουν σε μεγέθη της ανωμαλίας υπό έρευνα, καθώς συσσωρεύονται κατά τη διαδικασία άθροισης των μετρήσεων.

Συμπερασματικά, η διάταξη σταθερής βάσης δίνει πολύ υψηλότερης ποιότητας μετρήσεις σε σχέση με τη διάταξη βαθμίδας, και για το λόγο αυτό είναι η διάταξη που εφαρμόστηκε και στην παρούσα εργασία.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

3.4 Μέθοδος VLF-EM

Η μέθοδος VLF-EM *(Very Low Frequency ElectroMagnetic method)* εντάσσεται στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και χρησιμοποιεί ως πηγή τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που παράγονται από πολύ ισχυρούς ραδιοπομπούς στο εύρος συχνοτήτων από 15 έως 30 kHz, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές επικοινωνίες μεγάλης εμβέλειας καθώς και σε συστήματα πλοήγησης. Δέκτης αυτού του σήματος είναι δύο πηνία, κάθετα μεταξύ τους, τα οποία συντονίζονται στον εκάστοτε πομπό που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση των μετρήσεων και καταγράφουν το σήμα αυτό. Η μέθοδος του VLF εφαρμόζεται κυρίως στον εντοπισμό ρηξιγενών ζωνών, καθώς και στην αναζήτηση υδροφορίας σε αυτές, σε σχετικά μικρά βάθη ($< 100\text{m}$), χωρίς βέβαια να είναι αυτή η μοναδική εφαρμογή της μεθόδου.

3.4.1 Βασικές αρχές

Προτού αναλυθεί περαιτέρω η μέθοδος του VLF, είναι απαραίτητο να αναφερθούν κάποιες βασικές έννοιες για την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, η οποία διέπει όλες τις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους.

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι διασκόπησης στην γεωφυσική έχουν την βάση τους στο φαινόμενο της επαγωγής, το οποίο μελετήθηκε από τον Faraday to 1832. Το φαινόμενο της επαγωγής μπορεί να εκφραστεί μέσω δύο αλληλένδετων νόμων που μελετούν τις μεταβολές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου στον χώρο· τον νόμο του Faraday και τον νόμο του Ampere. Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, *'η μεταβολή ενός μαγνητικού πεδίου σε σχέση με τον χρόνο σε έναν χώρο, προκαλεί τη γένεση ηλεκτρικού πεδίου στον χώρο αυτό, με τρόπο τέτοιο, ώστε η ηλεκτρεγερτική δύναμη που παράγεται να είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής, αλλά αντίθετης φοράς'*. Ο νόμος αυτός μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με την εξίσωση του Maxwell:

$$\nabla x\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{25}$$

όπου Ε: η ένταση του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου ($Volt/m$)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

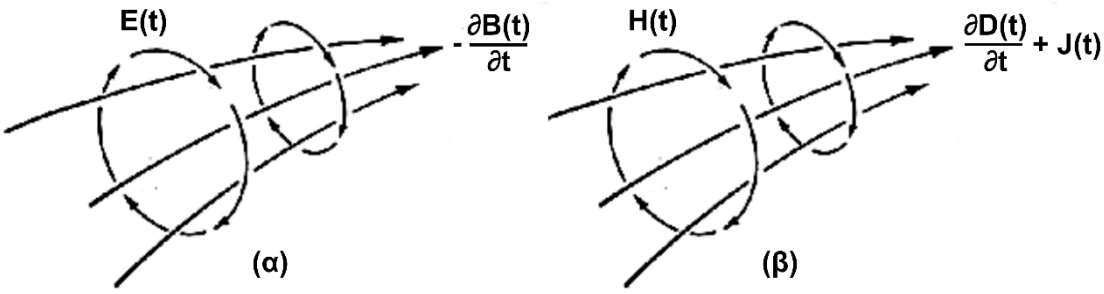
B: η μαγνητική επαγωγή $(Tesla)$

t: ο χρόνος (sec)

Λαμβάνοντας υπόψη τον νόμο του Ohm, ο οποίος λέει πως η πυκνότητα του ρεύματος, *J*, που ρέει σε ένα μέσο ως αποτέλεσμα του ηλεκτρικού πεδίου, *E*, οφείλεται συνήθως στην ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος σύμφωνα με την σχέση:

$$J = \sigma E \tag{26}$$

όπου σ είναι η αγωγιμότητα του υλικού, καθώς και την παραπάνω εξίσωση του Maxwell, προκύπτει ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που επάγεται μέσα σε πηνίο από την μεταβολή της μαγνητικής ροής κάθετα προς το επίπεδο του πηνίου αυτού αποκτά τη μέγιστη τιμή της, δηλαδή το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το πηνίο είναι μέγιστο (Σχήμα 3.15^{α})· αντίθετα το ηλεκτρικό ρεύμα μηδενίζεται στο πηνίο όταν η μεταβολή της μαγνητικής ροής γίνεται παράλληλα προς το επίπεδο του πηνίου αυτού.



Σχήμα 3.15 Σχέσεις κυκλοφορίας ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου σύμφωνα με το νόμο του Faraday και του Ampere (Grant & West, 1965)

Ο δεύτερος νόμος που περιγράφει τις μεταβολές των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στον χώρο είναι ο νόμος του Ampere, σύμφωνα με τον οποίο *'όταν ένα μέσο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, τότε παράγεται μαγνητικό πεδίο έντασης ανάλογης της έντασης του ολικού ηλεκτρικού ρεύματος, και φοράς κάθετης προς τη διεύθυνση της ροής του ρεύματος'*. Ο νόμος αυτός μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με την εξίσωση του Maxwell:

$$\nabla x\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{27}$$

όπου H: η ένταση του μαγνητικού πεδίου $(Ampere/m)$

J: η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος $(Ampere/m^2)$

D: η διηλεκτρική μετατόπιση $(Coulomb/m^2)$ για ομογενές και ισότροπο μέσο $(D = \varepsilon E)$, ε διηλεκτρική σταθερά του μέσου και E το ηλεκτρικό πεδίο

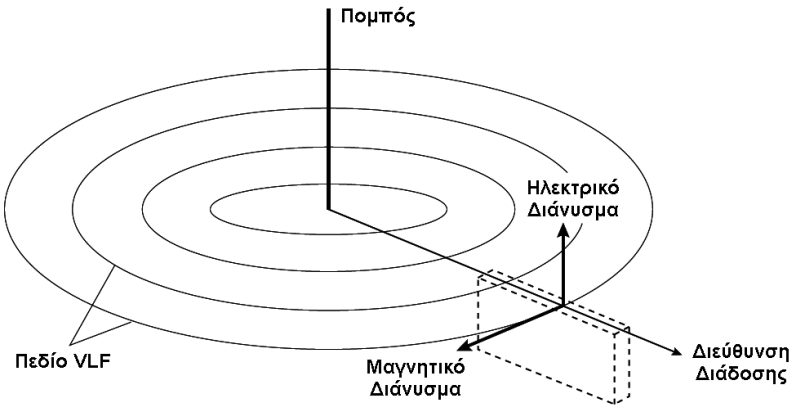
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι όταν ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει έναν αγωγό, οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου που παράγονται στον χώρο γύρω από τον αγωγό, βρίσκονται σε επίπεδο κάθετο στην διεύθυνση του αγωγού (Σχήμα 3.15$^{\beta}$).

3.4.2 Ηλεκτρομαγνητική θεωρία

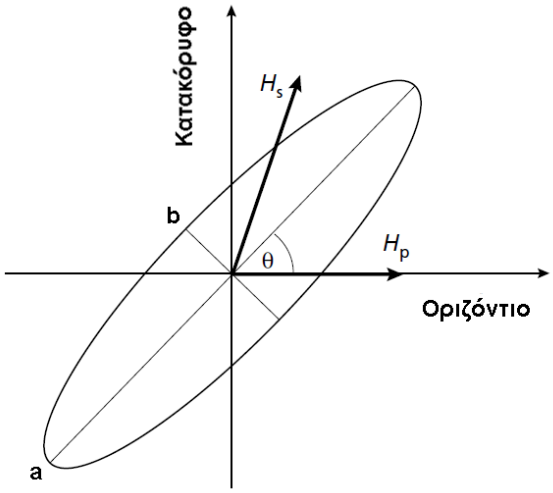
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μέθοδος VLF χρησιμοποιεί τα κύματα που μεταδίδουν στρατιωτικοί πομποί ανά την υφήλιο. Σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 100 χιλιόμετρα από τον πομπό, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι ουσιαστικά επίπεδο και οριζόντιο (Σχήμα 3.16). Η ηλεκτρική συνιστώσα, Ε, βρίσκεται σε κατακόρυφο επίπεδο, ενώ η μαγνητική συνιστώσα, Η, είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης και την ηλεκτρική συνιστώσα και βρίσκεται σε οριζόντιο επίπεδο.



Σχήμα 3.16 Αρχή της μεθόδου VLF. Οι διακεκομμένες γραμμές εμφανίζουν αγώγιμο στόχο με παράταξη παράλληλη στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, με το μαγνητικό διάνυσμα να κόβει κάθετα το στόχο (τροποποιημένο από Kearey et al., 2002)

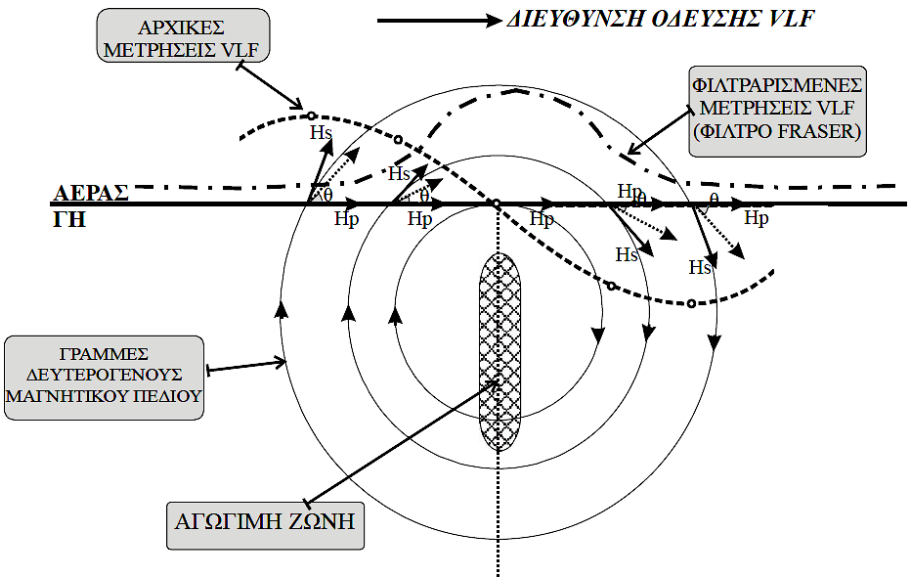
Όταν ένας αγωγός με παράταξη παράλληλη στη διεύθυνση διάδοσης του πομπού κόβεται από το μαγνητικό διάνυσμα, επαγόμενο ρεύμα ρέει μέσω του αγωγού και παράγει δευτερογενές μαγνητικό πεδίου το οποίο βρίσκεται εκτός φάσης σε σχέση με το πρωτεύον μαγνητικό πεδίο. Το διάνυσμα των δύο αυτών πεδίων, πρωτογενούς και δευτερογενούς, σχηματίζει μία έλλειψη η οποία ονομάζεται έλλειψη πόλωσης (Σχήμα 3.17), όπου η γωνία κλίσης, θ, είναι ανάλογη της οριζόντιας συνιστώσας του συνισταμένου μαγνητικού πεδίου (πραγματική συνιστώσα), ενώ η ελλειπτικότητα, b/a, είναι ανάλογη της κατακόρυφης συνιστώσας του συνισταμένου μαγνητικού πεδίου (φανταστική συνιστώσα).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 3.17 Ελλειπτικότητα, b/a, και γωνία κλίσης, θ, που παράγεται από δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Τα διανύσματα H_p και H_s αντιπροσωπεύουν το πρωτογενές και δευτερογενές πεδίο, αντίστοιχα (Kearey et al., 2002)

Η πραγματική και η φανταστική αυτή συνιστώσα, έχουν διπολική μορφή (Σχήμα 3.18), καθώς η γωνία κλίσης μεταβάλλεται καθόλη τη διάρκεια της όδευσης, παίρνοντας θετικές τιμές σε περιοχές πριν την αγώγιμη ζώνη και αρνητικές μετά από αυτήν. Η ερμηνεία της διπολικής αυτής μορφής είναι δύσκολη, γι'αυτό τον λόγο οι τιμές φιλτράρονται κατάλληλα και μετατρέπονται σε μονοπολική μορφή με κατάλληλα φίλτρα, τα οποία αναπτύσσονται περαιτέρω στο Κεφάλαιο 4.3.2.



Σχήμα 3.18 Διπολική μορφή μετρήσεων VLF πάνω από αγώγιμη ζώνη

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

3.4.3 Πομπός και δέκτης VLF

Οι ραδιοπομποί που αποτελούν την πηγή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που καταγράφεται, βρίσκονται σκορπισμένοι ανά την υφήλιο και εκπέμπουν σε διαφορετικές συχνότητες. Μία λίστα με τους βασικότερους από αυτούς (Πίνακας 3), καθώς και των περιοχών που αυτοί βρίσκονται (Πίνακας 4) παρουσιάζεται παρακάτω.

(kHz)	Κωδικός Σταθμού	(kHz)	Κωδικός Σταθμού
15.1	FUO HWU VTI	19.9	JJI
15.3	NHB NPN NPM NLK NEJ	20.2	JJI ICV
15.5	NWC NPM NAA NSS	20.3	JJI
15.6	EWB	20.5	3SA 3SB
15.7	NPM NSS NAK NPL NPG	20.8	ICV
16.0	GBR	21.0	3SA
16.2	UGK JAP	21.2	JJI
16.3	VTX	21.4	NPM NAA NSS
16.4	JXN	21.6	3SB
16.6	NPM NSS NAK	21.8	TBA
16.8	FTA	21.9	JJI
17.0	VTX	22.2	JJI
17.1	UMS	22.3	NWC NAA NLK NPC NSS NPM
17.4	NDT	22.6	GBR
17.6	JXZ	22.8	NWC
17.8	NPM NAA NSS	22.9	JJI
17.9	UBE	23.3	JJI
18.0	NBA NPL NPG NLK	23.4	NPM
18.1	UPD	24.0	NPM NBA NSS NLK
18.2	VTX NSS JJH	24.8	NLK
18.3	HWU	25.3	NAA
18.5	DHO NAA	25.5	3SB
18.6	NHB NPN NPM NAA NLK NPG NEJ	25.8	NSS NAA
18.7	JJI	26.1	NPM NLK NPG NEJ
18.9	UMB	27.0	RCV NAU
19.0	GQD NPM NSS	27.5	NAU
19.1	JJI	27.7	3SB
19.2	VTX	28.0	DHO, 3SB
19.4	NHB NPN NPM NEJ NLK	28.5	NAU NPL
19.5	3SA	28.6	RAM
19.6	GBZ	29.0	3SA
19.8	NWC NPM NLK NPL NPG TBA	30.0	UNW

Πίνακας 3 Βασικότεροι ραδιοπομποί VLF και συχνότητες που εκπέμπουν (ABEM, 1989)

Σταθμός	Περιοχή	Σταθμός	Περιοχή	Σταθμός	Περιοχή
3SA	Chande, China	JXN	Helgeland, Norway	NPN	Guam, Guatemala
3SB	Datong, China	JXZ	Helgeland, Norway	NSS	Washington, USA
DHO	Burlage, Germany	NAA	Cutler ME, USA	NWC	NW Cape, Australia

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

EWB	Odessa, Ukraine	NAK	Annapolis, USA	RAM	Moscow, Russia
FTA	Assise, France	NAU	Aguada, Puerto Rico	RCV	Rostov, Russia
FUO	Croix, France	NBA	Balboa, Panama	TBA	Antalya, Turkey
GBR	Rugby, UK	NDT	Yokosukaichi, Japan	UBE	Petrolovsk, Russia
GBZ	Rugby, UK	NEJ	Seattle, USA	UGK	Kaliningrad. Russia
GQD	Rugby, UK	NHB	Kodiak, Alaska	UMB	Rostov, Russia
HWU	Le Blanc, France	NLK	Oso Wash, USA	UMS	Moscow, Russia
ICV	Tavolara, Italy	NPC	Seattle, USA	UNW	Kaliningrad, Russia
JAP	Yosami, Japan	NPG	S. Francisco, USA	UPD	Murmansk, Russia
JJH	Kure, Japan	NPL	S. Diego, USA	VTI	Bombay, India
JJI	Ebino, Japan	NPM	Pearl Harbor, Hawaii	VTX	Vijayanarayanam, India

Πίνακας 4 Κωδικοί και θέσεις βασικότερων ραδιοπομπών VLF (ABEM, 1989)

Δέκτης του σήματος είναι δύο πηνία, κάθετα μεταξύ τους, όπου το οριζόντιο προσανατολίζεται στη διεύθυνση διάδοσης του σήματος, και κατ' επέκταση στη διεύθυνση της οριζόντιας συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου, ενώ το κάθετο πηνίο προσανατολίζεται σε σχέση με τη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου.

3.4.4 Βάθος διείσδυσης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου

Το βάθος διείσδυσης ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου εξαρτάται άμεσα από την συχνότητά του και από την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους που διαδίδεται. Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται στο υπέδαφος, το πλάτος αυτού μειώνεται εκθετικά κατά $e^{-i\omega\sigma}$ σε σχέση με το βάθος σύμφωνα με τη σχέση:

$$A_d = A_0 e^{-i\omega\sigma} \quad (28)$$

όπου A_d: το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε βάθος d

A_0: το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στην επιφάνεια

Στην περίπτωση αυτή, το βάθος d μπορεί να οριστεί ως:

$$d = \frac{503.8}{\sqrt{\sigma f}} \quad (29)$$

όπου d: το βάθος διείσδυσης (m)

σ: η ηλεκτρική αγωγιμότητα (S/m)

f: η συχνότητα του πεδίου (Hz)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Από την παραπάνω σχέση, μπορεί εύκολα κανείς να συμπεράνει πως το βάθος διείσδυσης αυξάνεται όσο η συχνότητα του πεδίου και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους μειώνονται. Αντίθετα, έχοντας ως γνώση αυτή τη σχέση, μπορεί κάποιος να ορίσει την κατάλληλη συχνότητα για να διεισδύσει στο επιθυμητό βάθος διασκόπησης.

Σε ένα ομογενές μέσο, το βάθος διείσδυσης μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$z = \sqrt{\frac{\kappa}{\sigma f}} \qquad (30)$$

όπου σ και f η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η συχνότητα του πεδίου, αντίστοιχα

κ: σταθερά που ορίζεται ως $\kappa = -\frac{1}{\sqrt{\pi\mu}} \ln \frac{H_y}{H_0}$

μ: η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου

H_y: η ένταση του μαγνητικού πεδίου σε απόσταση y

H_0: η ένταση του μαγνητικού πεδίου στην πηγή

Για πρακτικούς λόγους και για μια πληθώρα επιφανειακών σχηματισμών, η σταθερά παίρνει εμπειρικά την τιμή $\kappa \simeq 350$.

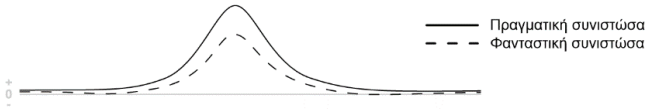
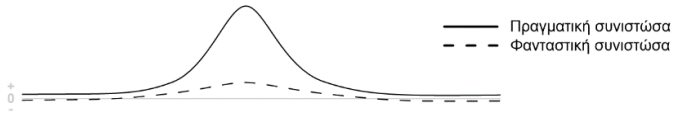
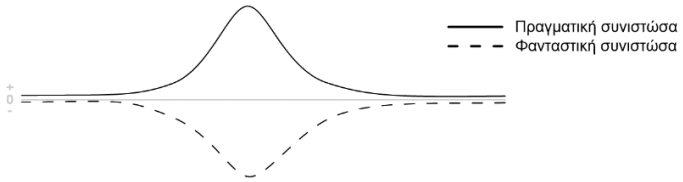
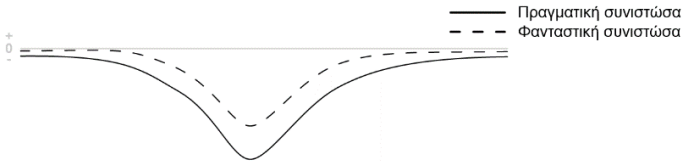
3.4.5 Ερμηνεία μετρήσεων VLF

Κατά την ερμηνεία των μετρήσεων της μεθόδου VLF επιδιώκεται ο χαρακτηρισμός τριών κυρίως παραμέτρων: η ποιότητα του αγωγού, το βάθος που αυτός συναντάται και η γεωμετρία του.

Όσο αφορά την ποιότητα του αγωγού, μπορούν να βγουν κάποια συμπεράσματα μέσα από τις φιλτραρισμένες καμπύλες του VLF, όπως το πόσο καλός ή κακός αγωγός είναι, ή το τι μπορεί αυτός να αντιπροσωπεύει, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την πραγματική όσο και την φανταστική συνιστώσα (Πίνακας 5).

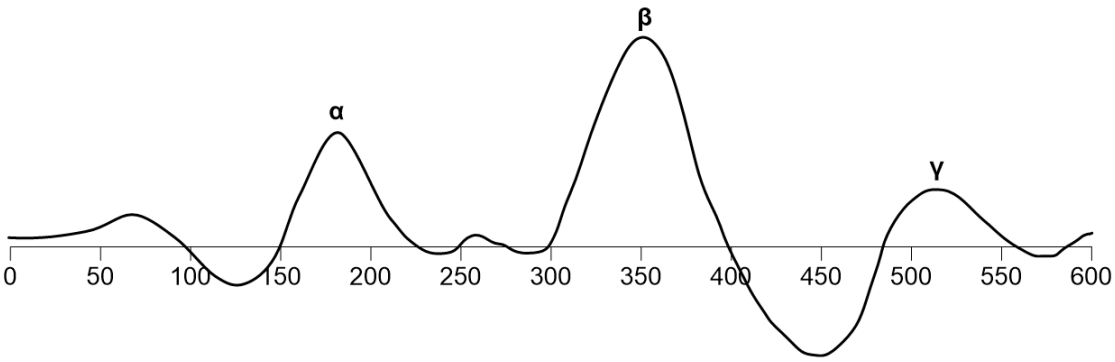
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Πραγματική συνιστώσα θετική		
Φανταστική Συνιστώσα	Ποιότητα αγωγού	Ερμηνεία
		
Θετική, μεγάλο πλάτος	Κακός-Μέτριος	Μικρή πιθανότητα υδροφορίας, πιθανή διείσδυση
		
Μηδενικό πλάτος	Καλός-Μέτριος	Μεγάλη πιθανότητα υδροφορίας
		
Αρνητική, μεγάλο πλάτος	Πολύ καλός	Αργιλική πλήρωση, μεταλλοφορία, υφαλμύρωση
Πραγματική συνιστώσα αρνητική		
		
Αρνητική	Κακός	Σώμα μεγαλύτερης αντίστασης, επαφή γεωλογικών σχηματισμών

Πίνακας 5 Ποιοτικός χαρακτηρισμός αγωγού σύμφωνα με τις φιλτραρισμένες καμπύλες VLF

Για τον χαρακτηρισμό του βάθους του στόχου, υπάρχει ένας εμπειρικός κανόνας που έχει να κάνει με το πλάτος της ανωμαλίας της πραγματικής συνιστώσας, που ορίζει το βάθος ως το μισό του μήκους της ανωμαλίας αυτής.



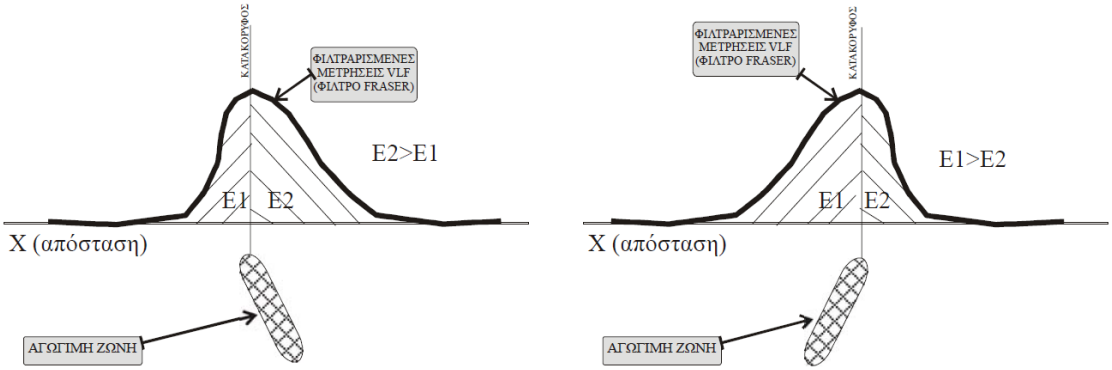
Σχήμα 3.19 Φιλτραρισμένες τιμές πραγματικής συνιστώσας σε συνθετική όδευση VLF

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

Στο Σχήμα 3.19 διακρίνονται τρεις ανωμαλίες (α,β,γ). Με βάση τον κανόνα αυτό, στην πρώτη περίπτωση το βάθος του αγωγού βρίσκεται περίπου στα $\frac{225-150}{2} = 37.5$ μέτρα, στην δεύτερη περίπτωση στα $\frac{400-300}{2} = 75$ μέτρα, ενώ στην τρίτη περίπτωση στα $560 - \frac{480}{2} = 40$ μέτρα. Ο παραπάνω κανόνας είναι εντελώς προσεγγιστικός για τον χαρακτηρισμό του βάθους ενός στόχου και συχνά μπορεί να μην δίνει το σωστό βάθος, είναι όμως χρήσιμος για τον ποιοτικό χαρακτηρισμό του βάθους στόχων που εμφανίζονται στο ίδιο προφίλ μέτρησης.

Τέλος, για τον χαρακτηρισμό της γεωμετρίας του αγωγού, δηλαδή της κλίσης του, λαμβάνεται υπόψη η μορφή της φιλτραρισμένης καμπύλης της πραγματικής συνιστώσας (Σχήμα 3.20), όπου φέρνοντας την κατακόρυφο που περνάει από το κέντρο της ανωμαλίας, δηλαδή της μέγιστης τιμής της πραγματικής συνιστώσας, ορίζεται περιοχή με εμβαδά E_1 και E_2 αντίστοιχα. Η κλίση του στόχου ορίζεται στο σκέλος που έχει το μεγαλύτερο εμβαδό.



Σχήμα 3.20 Γεωμετρία αγωγού σε σχέση με την μορφή της ανωμαλίας VLF

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

3.5 Γεωφυσικά χαρακτηριστικά μεταλλικών αποθέσεων

Τα μεταλλικά ορυκτά και οι μεταλλικές αποθέσεις παρουσιάζουν σε γενικές γραμμές ισχυρές γεωφυσικές αντιθέσεις με τα πετρώματα όπου φιλοξενούνται, κυρίως λόγω των σημαντικών διαφορών που έχουν οι φυσικές και οι χημικές τους ιδιότητες. Τέτοιες ιδιότητες είναι, μεταξύ άλλων, η βαρύτητα, η μαγνητική ένταση και επιδεκτικότητα, η ηλεκτρική αντίσταση (ή αγωγιμότητα), η ραδιενέργεια, η ειδική πυκνότητα, η ακουστική ταχύτητα και η ανακλαστικότητα.

Σημαντικό, επίσης, ρόλο στην αντίθεση αυτή παίζει η δομή και η μορφή της απόθεσης, το οποίο έχει να κάνει με το μέγεθος, το βάθος σχηματισμού, τον προσανατολισμό, την υφή, καθώς και την διασπορά ή συγκέντρωση μεταλλικών ορυκτών σε αυτήν. Όσο αφορά την δομή, οι αποθέσεις αυτές έχουν πολλές φορές έναν χωρικό περιορισμό κατά τον σχηματισμό τους, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται σε ζώνες διάτμησης, σε ρηξιγενείς ζώνες, σε στρωματογραφικές ασυνέχειες ή σε πιο ευρεία κλίμακα, στα όρια μεταξύ των λιθοσφαιρικών πλακών (Airo, 2015). Μελετώντας τη σύσταση των ιζηματογενών πετρωμάτων που σχηματίζονται στις περιοχές αυτές μπορεί να παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τον τρόπο και το είδος της μεταλλογένεσης.

3.5.1 Ηλεκτρικά και ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά

Οι ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης μελετούν την κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης (ή αγωγιμότητας) του υπεδάφους. Η ηλεκτρική αντίσταση, συγκριτικά με τις προαναφερθείσες γεωφυσικές ιδιότητες των ορυκτών, αποτελεί με διαφορά την πιο ευμετάβλητη ιδιότητα των ορυκτών και πετρωμάτων, καθώς εξαρτώνται άμεσα από πολλές παραμέτρους, όπως είναι το πορώδες του σχηματισμού, το μέγεθος των κόκκων που το απαρτίζουν, ο τύπος του πετρώματος, το είδος του υλεκτρολύτη μέσα σε αυτό, η θερμοκρασία του, η συμμετοχή μεταλλικών ορυκτών σε αυτό καθώς και ο τρόπος που πραγματοποιείται η γεωφυσική διασκόπηση, μεταξύ πολλών άλλων.

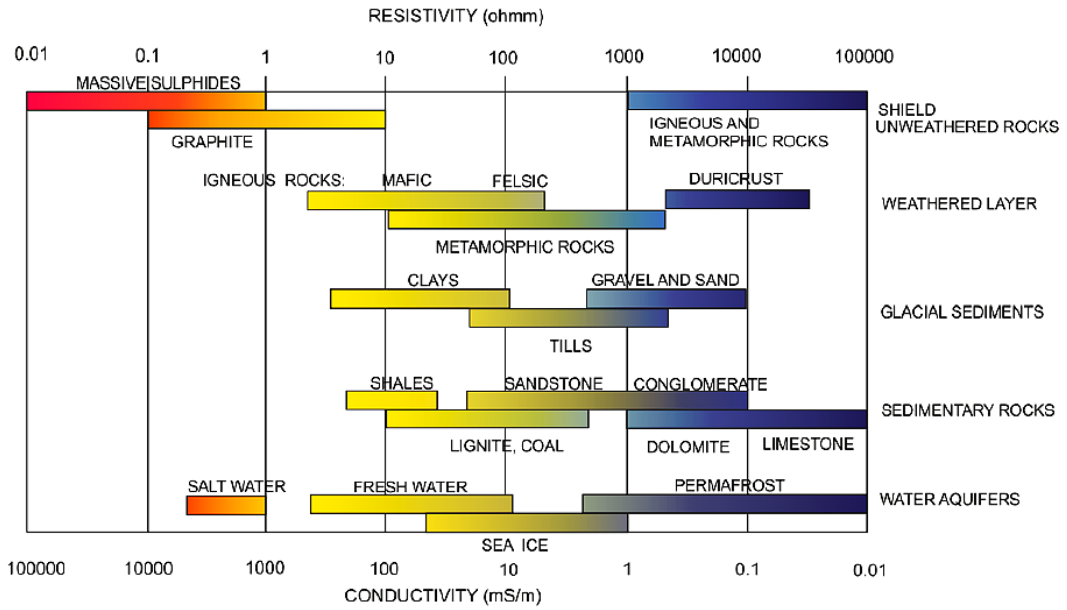
Στα πετρώματα, το ρεύμα μεταδίδεται κατά κύριο λόγο με ιονική (ηλεκτρολυτική) αγωγιμότητα μέσω των ρευστών που υπάρχει στους πόρους τους. Σε πετρώματα, όμως, που συμμετέχουν μεταλλικά στοιχεία, το ρεύμα μεταδίδεται με ηλεκτρονιακή (ωμική) αγωγιμότητα, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται σημαντικά η συνολική ηλεκτρική αγωγιμότητα του πετρώματος, ακόμη και με τη μικρή συμμετοχή μετάλλων στο πέτρωμα. Η ηλεκτρονιακή αγωγιμότητα συμβαίνει με την συμμετοχή των περισσότερων μετάλλων (όπως είναι τα σουλφίδια, εκτός του σφαλερίτη), αλλά και με την συμμετοχή του γραφίτη, του λιγνίτη, του μαγνητίτη, του πυρολουσίτη και πολλών άλλων ορυκτών με μεταλλική λάμψη.

Τα περισσότερα μεταλλεύματα είναι ημιαγωγοί του ρεύματος. Η ηλεκτρική τους, όμως, αντίσταση είναι εξαιρετικά ευμετάβλητη και συχνά χαμηλότερη από αυτή των μετάλλων, λόγω της συμμετοχής ιόντων που έχουν υποστεί προσμείξεις στο πλέγμα

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

τους, γεγονός που επιδρά σε μεγάλο βαθμό στην αποτύπωση της ειδικής ηλεκτρικής τους αντίστασης (Palacky, 1988). Στο Σχήμα 3.21 παρουσιάζονται κάποια τυπικά εύρη τιμών των ηλεκτρικών αντιστάσεων για διάφορα πετρώματα και υλικά της Γης, με ιδιαίτερο ενδιαφέρον να παρατηρείται στην διαφορά του εύρους σε αυτά, η οποία μπορεί να φτάσει αρκετές τάξεις μεγέθους.



Σχήμα 3.21 Εύρος αντίστασης (και αγωγιμότητας) υλικών και πετρωμάτων (Oldenburg & Jones, 2007)

Τα σουλφίδια, πιο συγκεκριμένα, συναντώνται στην φύση σε δύο μορφές· ως διάσπαρτη και ως συμπαγής μεταλλοφορία. Στην διάσπαρτη μεταλλοφορία, τα μεταλλικά ορυκτά βρίσκονται διασκορπισμένα σε ολόκληρη την έκταση ενός πετρώματος και ως αποτέλεσμα οι τιμές της συνολικής αντίστασης που μετράται είναι είτε χαμηλές είτε υψηλές. Στην συμπαγή μεταλλοφορία, τα μεταλλικά ορυκτά βρίσκονται σε πιο ομοιογενή μορφή και είναι ικανά να δημιουργήσουν μεγάλες εκτάσεις μεταλλεύματος, το οποίο είναι πιθανό να παρουσιάσει χαμηλότερες τιμές αντιστάσεων. Στις δύο αυτές περιπτώσεις, είναι δυνατό οι αντιστάσεις να αυξηθούν, σε περίπτωση που λάβουν χώρα χημικές διεργασίες ή θερμικές μεταβολές, οι οποίες μπορούν να μετατρέψουν τα μεταλλικά ορυκτά σε οξείδια ή άλλα, λιγότερο αγώγιμα, ορυκτά. Η απόκριση, από την άλλη πλευρά, της διάσπαρτης μεταλλοφορίας στην μέθοδο της επαγόμενης πόλωσης μπορεί να θεωρηθεί πολύ ικανοποιητική, ενώ στη συμπαγή μεταλλοφορία σουλφιδίων, παρότι θα αναμένονταν μικρότερες αποκρίσεις, στην πράξη είναι πολύ καλές, γεγονός που οφείλεται στην δημιουργία ενός στρώματος μεταλλοφορίας γύρω από τα μεγάλα αυτά σώματα.

Παρά την καλή απόκριση των σουλφιδίων στις ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους, υπάρχουν περιπτώσεις που η γεωφυσική συμπεριφορά τους δεν είχε το αναμενόμενο αποτέλεσμα. Ο Palacky (1988), εφαρμόζοντας ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους, παρατήρησε σε διάφορες περιπτώσεις πως ακόμη και σε μεταλλοφορία συμπαγών σουλφιδίων, όπου αναμένονταν υψηλές τιμές αγωγιμότητας, η απόκριση της μεθόδου δεν είχε αποτελέσματα. Η εξήγηση που έδωσε, με πιο προσεκτική παρατήρηση και εργαστηριακές δοκιμές, ήταν πως τα σουλφίδια, παρότι

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

συμπαγή στην όψη, ήταν καλυμμένα από λεπτό πυριτικό στρώμα, σε μακροσκοπικό ή ακόμη και σε μικροσκοπικό επίπεδο. Επιπλέον, σε περιπτώσεις με μεγάλο πάχος αγώγιμων, υπερκείμενων στρωμάτων, είναι δυνατόν το σήμα των μεταλλοφόρων σωμάτων να επικαλυφθεί.

3.5.2 Ηλεκτρικές ιδιότητες σημαντικών ορυκτών

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται μερικές ενδεικτικές τιμές της αντίστασης, αγωγιμότητας και φορτιστικότητας μερικών σημαντικών μεταλλικών ορυκτών και μη, τα οποία συναντώνται και στην περιοχή μελέτης της εργασίας αυτής.

	Ηλεκτρική Αντίσταση (Ohm.m)	*Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (mS/m)*	*Φορτιστι-κότητα (msec)*
Σουλφίδια			
Σιδηροπυρίτης	$3 * 10^{-5} - 1.5$	$10^3 - 10^8$	13.4
Χαλκοπυρίτης	$1.2 * 10^{-5} - 0.3$	$10^4 - 10^7$	13.2
Γαληνίτης	$3 * 10^{-5} - 300$	$1.11 * 10^4 - 1.47 * 10^8$	3.7
Σφαλερίτης	$2.7 * 10^{-3} - 12500$	$0.08 - 3.7 * 10^5$	
Πεντλανδίτης	$11 * 10^{-6} - 1$	$10^3 - 9 * 10^8$	10
Πυροτίτης	$160 * 10^{-6} - 6$	$6.25 * 10^5 - 5 * 10^8$	10
Άλλα			
Μαγνητίτης	$5 * 10^{-4} - 5 * 10^4$	$0.1 - 10^8$	2.2
Αιματίτης	$3 * 10^{-3} - 10^7$		0.0
Γραφίτης	$10^{-6} - 10^{-2}$	$10^5 - 10^9$	11.2
Άργιλος	$3.3 - 100$	$10 - 300$	
Μαρμαρυγίας	$10^3 - 10^{15}$	$10^{-12} - 1$	
Χαλαζίας	$10^{10} - 10^{15}$	$10^{-12} - 10^{-7}$	
Χρυσός	$2 * 10^{-8}$	$5 * 10^{10}$	
Χαλκός	$1.25 * 10^{-8} - 0.3$	$3 * 10^3 - 8 * 10^{10}$	12.3

Πίνακας 6 Τιμές ηλεκτρικής αντίστασης, αγωγιμότητας και φορτιστικότητας σουλφιδίων και σχετικών ορυκτών (τροποποιημένο από Ford et al. (2007), King (2007), Morgan (2010) και Airo (2015))

Για την μετατροπή της φορτιστικότητας από msec σε mV/V που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή, ισχύει ο παρακάτω εμπειρικός κανόνας (Oldenburg & Jones, 2007), με απαραίτητη προϋπόθεση ότι η φορτιστικότητα που μετράται δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την αρχική όταν κλείνει το ρεύμα [$0 < \mathrm{M} < 1$ δηλαδή $0 < \mathrm{mV/V} < 1000$]:

$$\text{Φορτιστικότητα } \mathrm{M} = 0.1 \text{ αντιστοιχεί σε τιμή } 70 \text{ msec}$$

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

4 Λήψη, επεξεργασία και μοντελοποίηση δεδομένων

Το κεφάλαιο αυτό αφορά τις διεργασίες που έλαβαν μέρος καθώς και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την απόκτηση, την επεξεργασία και την αντιστροφή των δεδομένων από την εφαρμογή των προαναφερθέντων μεθόδων.

4.1 Ηλεκτρική Τομογραφία

Παρακάτω αναλύονται τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την λήψη, την επεξεργασία και την αντιστροφή των τομογραφικών δεδομένων.

4.1.1 Λήψη δεδομένων

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της επαγόμενης πόλωσης χρησιμοποιήθηκε το όργανο Syscal Pro από την IRIS Instruments (Σχήμα 4.1), το οποίο αποτελεί ένα πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα που περιέχει έναν δέκτη 10 καναλιών, ο οποίος μπορεί να μετρήσει αντίστοιχο αριθμό δυναμικών με μία έγχυση ρεύματος.

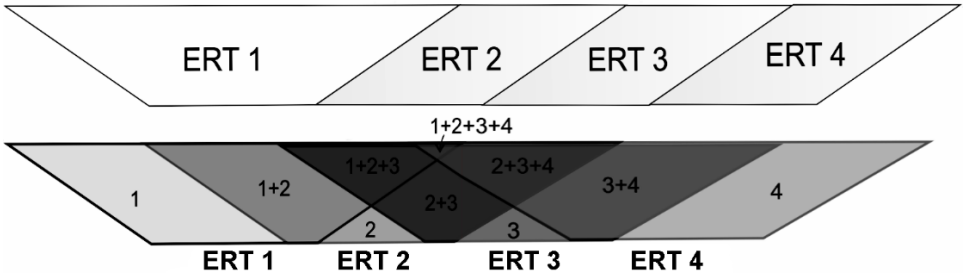
Σχήμα 4.1 Όργανο Syscal Pro από την εταιρεία IRIS Instruments

Η μέγιστη ένταση του ρεύματος που εγχύεται μπορεί να φτάσει τα 2.5 A, με μέγιστη τάση τα 1000 V και ακρίβεια 1 μV, ενώ η ακρίβεια του οργάνου είναι 0.2 %.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν χάλκινα πολύκλωνα καλώδια, μπαταρία 12V ως επιπλέον πηγή, καθώς και ηλεκτρόδια από ανοξείδωτο χάλυβα. Τα προφίλ που μετρήθηκαν αποτελούνταν από 24 ηλεκτρόδια με μεταξύ τους απόσταση 10 μέτρα, φτάνοντας μέγιστο βάθος διασκόπησης τα 65 μέτρα, ενώ οι διατάξεις των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η διπόλου-διπόλου και η διάταξη πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient).

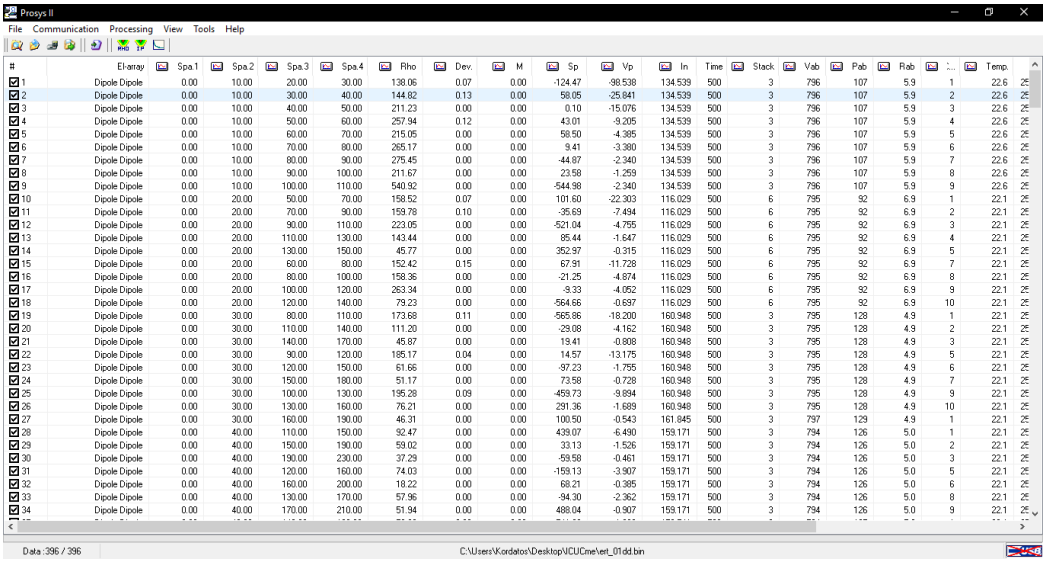
Για την κάλυψη περιοχών ενδιαφέροντος με μεγάλο μήκος (> 230m) διεξήχθησαν συνεχόμενες και επάλληλες τομογραφίες των 230 μέτρων. Καθώς η περιοχή ευαισθησίας κάθε τομογραφίας φτάνει στο μέγιστο βάθος στο κεντρικό της τμήμα ενώ στα άκρα αυτής μειώνεται το βάθος διασκόπησης, είναι απαραίτητο οι αλλεπάλληλες γραμμές να έχουν έναν βαθμό αλληλεπικάλυψης για την κάλυψη μίας περιοχής στο μέγιστο δυνατό βάθος. Η σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας αυτής σε παράδειγμα τεσσάρων τομογραφιών παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 Σχηματική αναπαράσταση μετρήσεων με επάλληλες γραμμές (roll-along)

4.1.2 Επεξεργασία δεδομένων

Για την προεπεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Prosys II (Σχήμα 4.3), το οποίο επιτρέπει την μεταφορά δεδομένων, το φιλτράρισμα και την εξαγωγή των δεδομένων ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και φορτιστικότητας.

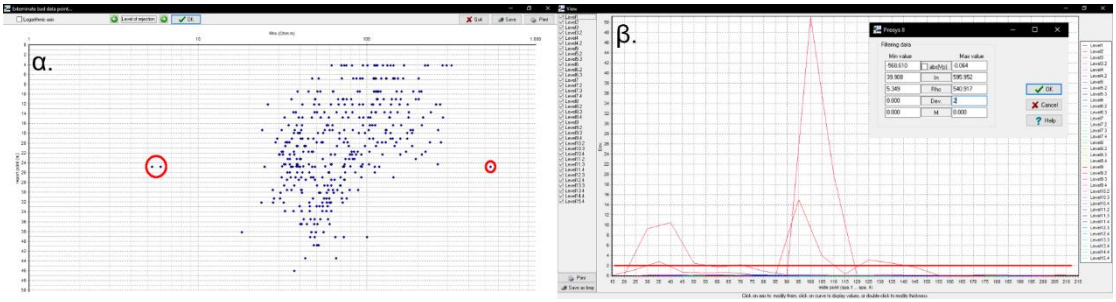


Σχήμα 4.3 Περιβάλλον του προγράμματος Prosys II

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ

Με αυτό, πραγματοποιήθηκε ένα αρχικό φιλτράρισμα των δεδομένων με την αφαίρεση αρνητικών και ακραίων τιμών (Σχήμα 4.4$^{\alpha}$) καθώς και την αφαίρεση δεδομένων μεγάλης τυπικής απόκλισης (Σχήμα 4.4$^{\beta}$). Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή των δεδομένων σε μορφή συμβατή με προγράμματα αντιστροφής.

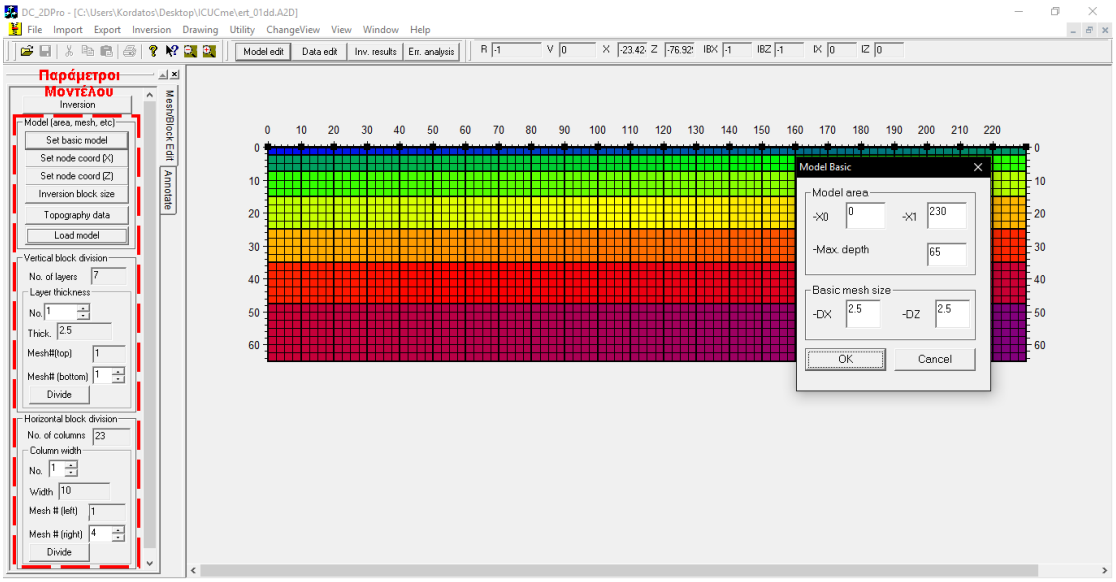


Σχήμα 4.4 Αφαίρεση ακραίων τιμών (α) και δεδομένων μεγάλης απόκλισης (β) στο Prosys II

4.1.3 Αντιστροφή δεδομένων

Το λογισμικό DC_2DPro (Kim, 2010) χρησιμοποιήθηκε για την αντιστροφή των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιεί τη μέθοδο του Occam (Constable et al., 1987) για την εκτέλεση μη γραμμικής δισδιάστατης αντιστροφής, ενώ για την λύση του ευθέος προβλήματος χρησιμοποιεί επαναληπτικά την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Αρχικά, ορίστηκαν οι παράμετροι του μοντέλου, όπως είναι το βάθος διασκόπησης, το μήκος του προφίλ και ορίστηκε το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων (Σχήμα 4.5), ενώ στη συνέχεια ακολουθήθηκε η διαδικασία της αντιστροφής.

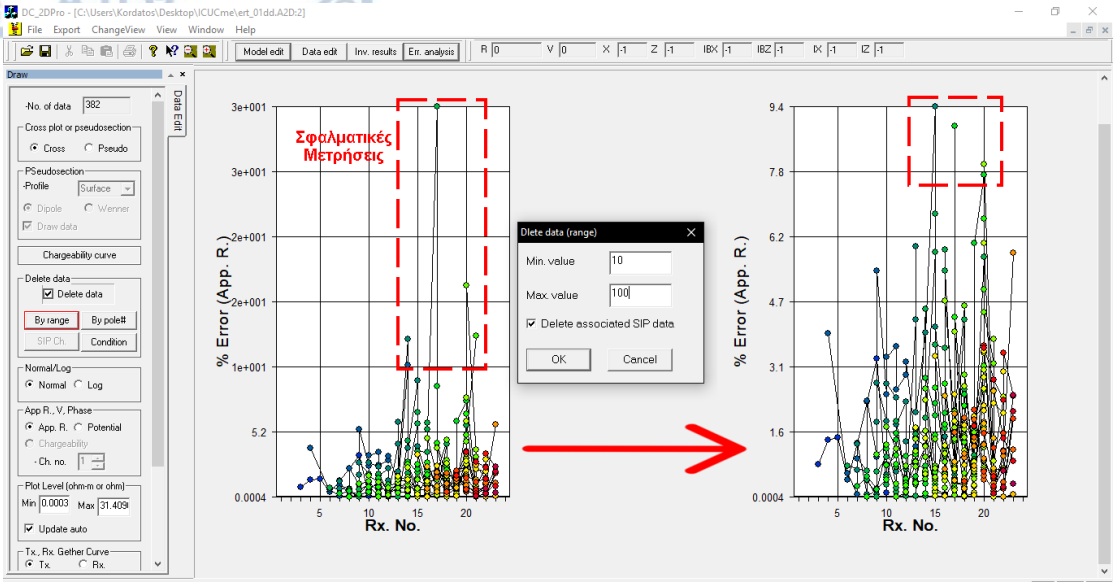


Σχήμα 4.5 Ορισμός παραμέτρων μοντέλου στο λογισμικό DC_2DPro

Για την καλύτερη αποτύπωση των πραγματικών αντιστάσεων του υπεδάφους, αφαιρέθηκαν σφαλματικές τιμές (Σχήμα 4.6) και επαναλήφθηκε η διαδικασία της

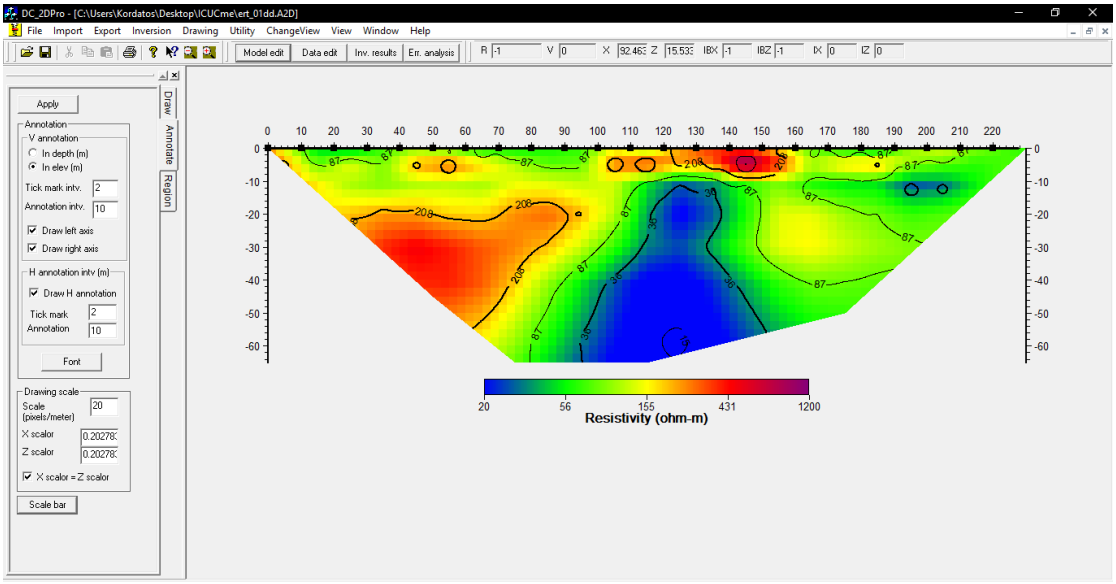
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

αντιστροφής, έως ότου το ποσοστιαίο σφάλμα μεταξύ πραγματικών και συνθετικών δεδομένων να φτάσει σε ικανοποιητικό επίπεδο (< 10 %).



Σχήμα 4.6 Αφαίρεση σφαλματικών τιμών στο λογισμικό DC_2DPro

Το τελικό μοντέλο αντιστάσεων που προκύπτει παρουσιάζεται με χρώματα του ουράνιου τόξου, όπου τα ψυχρότερα χρώματα αντικατοπτρίζουν χαμηλότερες αντιστάσεις, ενώ τα θερμότερα υψηλότερες αντιστάσεις (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7 Μοντέλο ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά τη διαδικασία της αντιστροφής

4.1.4 Μοντελοποίηση δεδομένων

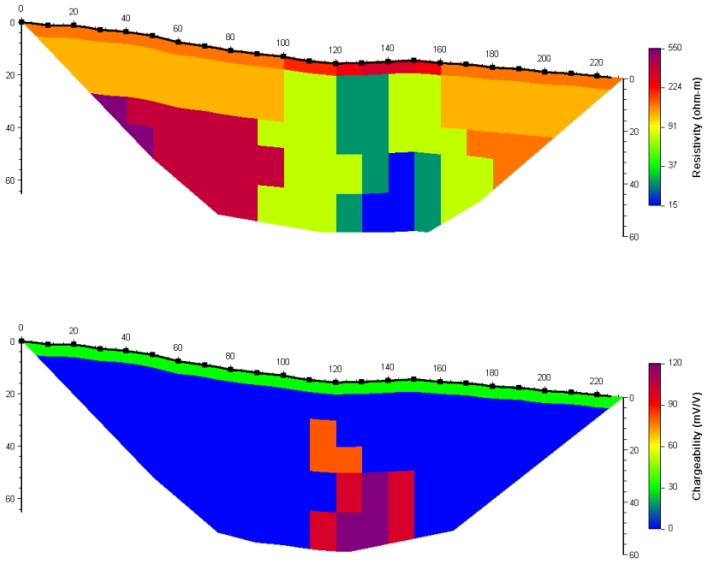
Για την αξιολόγηση της καλύτερης εικόνας αντιστροφής των δεδομένων, δημιουργήθηκαν συνθετικά δεδομένα και δοκιμάστηκαν οι βασικότεροι τρόποι αντιστροφής τους, τόσο για τα δεδομένα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, όσο και για

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ

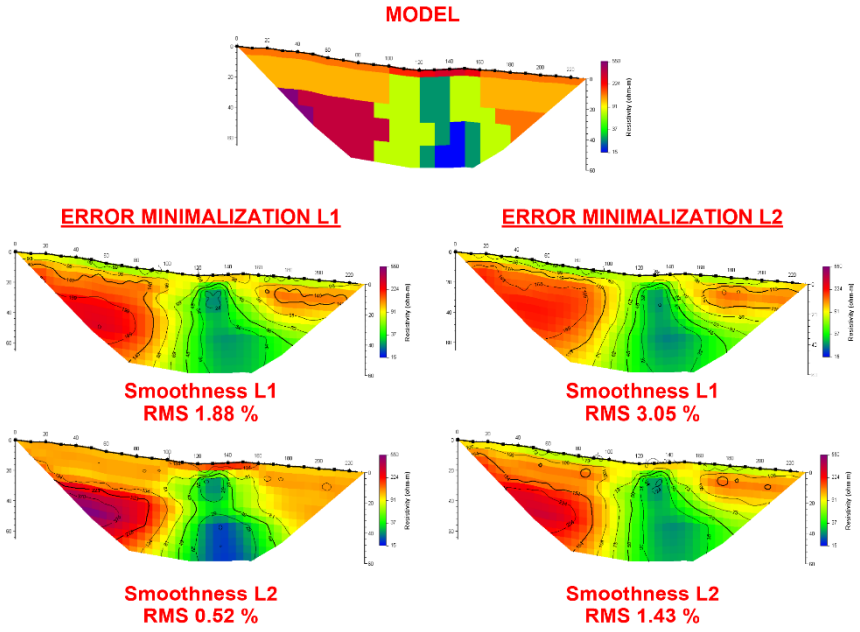
τα δεδομένα επαγόμενης πόλωσης, με τις παραμέτρους που δοκιμάστηκαν να αφορούν την L1 και L2 επιλογή για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος, καθώς και για την εξομάλυνση του τελικού μοντέλου.

Τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν για την ειδική ηλεκτρική αντίσταση και την επαγόμενη πόλωση, αντίστοιχα, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8 Συνθετικά μοντέλα για την ειδική ηλεκτρική αντίσταση και επαγόμενη πόλωση

Οι εικόνες που προκύπτουν από τους διαφορετικούς τρόπους αντιστροφής για τα δεδομένα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.9, ενώ για τα δεδομένα επαγόμενης πόλωσης στο Σχήμα 4.10.

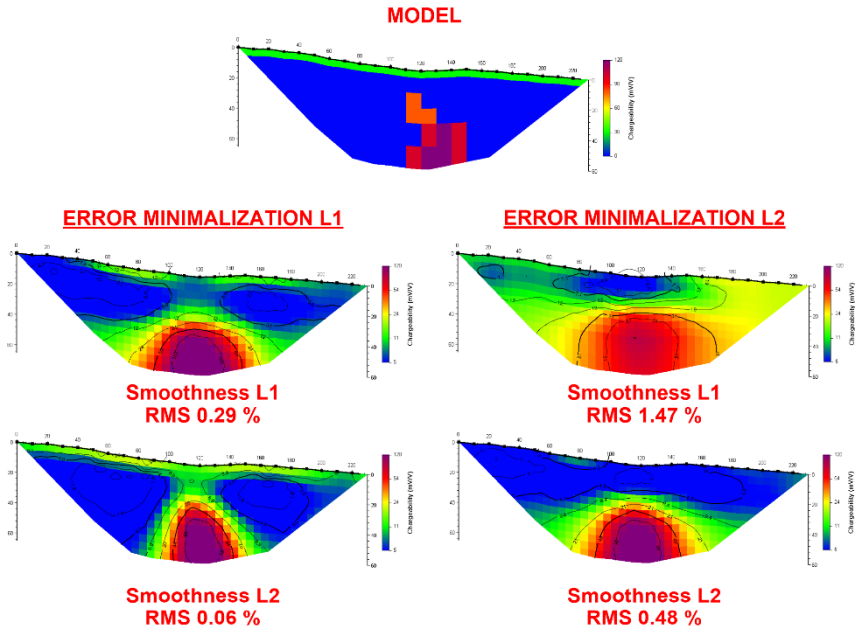


Σχήμα 4.9 Διαφορετικές εικόνες αντιστροφής του μοντέλου ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Με βάση τις εικόνες που προκύπτουν, φαίνεται πως η αντιστροφή με επιλογή L2 για την εξομάλυνση (smoothness) του μοντέλου, και τόσο με L1 όσο και L2 επιλογή

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος (error minimalization), παρουσιάζουν τις πιο αντιπροσωπευτικές εικόνες, γεγονός που ενισχύεται και από το χαμηλότερο ποσοστιαίο σφάλμα τους (RMS). Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και για τις εικόνες του μοντέλου της επαγόμενης πόλωσης.



Σχήμα 4.10 Διαφορετικές εικόνες αντιστροφής του μοντέλου επαγόμενης πόλωσης

Εφαρμόζοντας τους δύο αυτούς τρόπους αντιστροφής σε όλα τα δεδομένα των ηλεκτρικών τομογραφιών, επιλέχθηκε ο αλγόριθμος αντιστροφής L2 τόσο για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος, όσο και για την εξομάλυνση του μοντέλου, και είναι ο τρόπος με τον οποίο παρουσιάζονται όλα τα δεδομένα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και επαγόμενης πόλωσης σε παρακάτω κεφάλαια.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

4.2 Φυσικό Δυναμικό

Παρακάτω αναλύονται τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την λήψη και την επεξεργασία των δεδομένων φυσικού δυναμικού.

4.2.1 Λήψη δεδομένων

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων φυσικού δυναμικού χρησιμοποιήθηκαν δύο μη πολούμενα ηλεκτρόδια $Pb - PbCl_2$ (Σχήμα 4.11), καλώδιο με καρούλι, βολτόμετρο (Protek 506 Digital Multimeter) καθώς και εργαλείο σκαψίματος (σκεπάρνι) για την καλύτερη επαφή του ηλεκτροδίου με το έδαφος.

Σχήμα 4.11 Χρήση μη πολούμενων ηλεκτροδίων για την πραγματοποίηση μετρήσεων φυσικού δυναμικού

4.2.2 Επεξεργασία δεδομένων

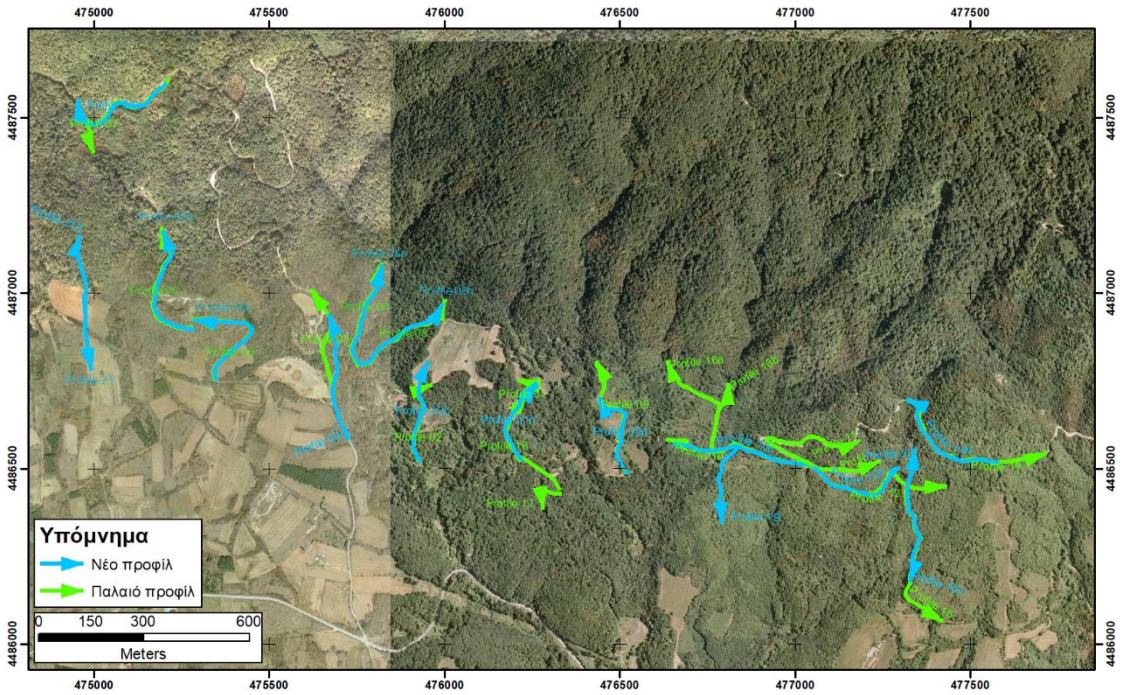
Έχοντας πραγματοποιηθεί σε πρότερη φάση μετρήσεις στην περιοχή μελέτης, με ίδιου τύπου ηλεκτρόδια, θεωρήθηκε σκόπιμο να βαθμονομηθούν οι παλαιότερες μετρήσεις σε σχέση με τις καινούριες, καθώς ο εξοπλισμός ανανεώθηκε στο διάστημα που μεσολάβησε. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7) παρουσιάζεται το σύνολο των πραγματοποιηθέντων μετρήσεων φυσικού δυναμικού, παλαιών και καινούριων, καθώς και η θέση τους στον χάρτη (Σχήμα 4.12).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

Προφίλ	Παλαιά Ηλεκτρόδια	Νέα Ηλεκτρόδια
01	✓	✓
02	✓	✓
03	✓	✓
04	✓	✓
05	✓	✓
06	✓	✓
07	✓	✓
08	✓	✓
09	✓	✓
10	✓	✓
11	✓	✕
12	✓	✓
13	✓	✕
14	✓	✓
15	✓	✓
16a	✓	✕
16b	✓	✕
17	✓	✕
18	✓	✕
19	✕	✓
20	✕	✓
21	✕	✓

Πίνακας 7 Μετρηθέντα προφίλ φυσικού δυναμικού με παλαιά και νέα ηλεκτρόδια

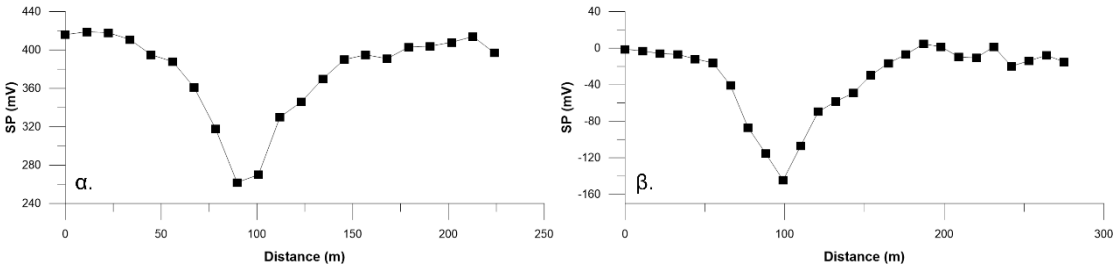


Σχήμα 4.12 Χάρτης μετρηθέντων προφίλ φυσικού δυναμικού

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

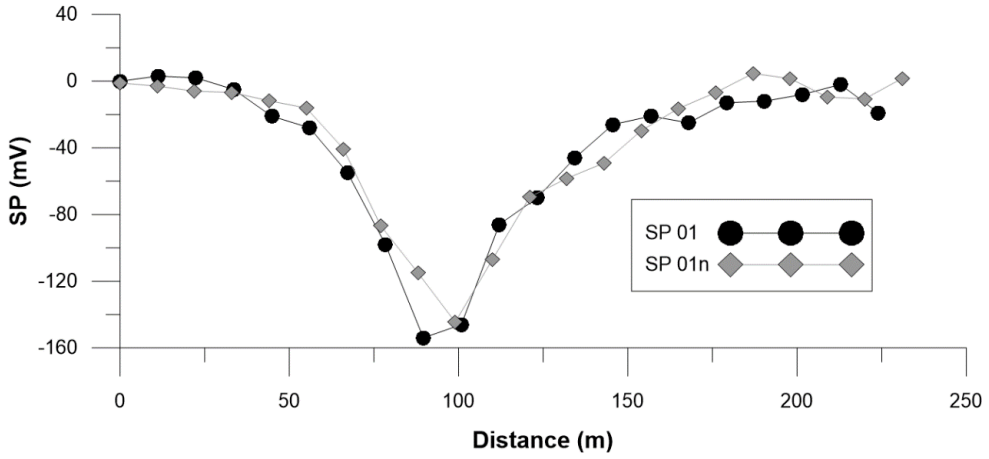
Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ

Σε γενικές γραμμές, οι καμπύλες φυσικού δυναμικού με βάση τα παλιά και τα νέα ηλεκτρόδια παρουσίασαν παραπλήσιες εικόνες στα κοινά μετρημένα προφίλ, εμφανίζοντας όμως μία μεγάλη διαφορά στάθμης. Η βαθμονόμηση έγινε κυρίως με βάση το 1ο προφίλ (Σχήμα 4.13), καθώς παρουσίασε τις μεγαλύτερες ομοιότητες σε σχέση με τη θέση των ηλεκτροδίων στον χώρο, καθώς και με την ποιότητα και τις κοινές εικόνες των ανωμαλιών του φυσικού δυναμικού.



Σχήμα 4.13 Φυσικό δυναμικό του 1ου προφίλ με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια

Με βάση τις τιμές με τα νέα ηλεκτρόδια, αφαιρέθηκε μια στάθμη 416 mV από όλες τις τιμές του μετρημένου με τα παλαιά ηλεκτρόδια προφίλ, με αποτέλεσμα να παρουσιάσουν παρόμοιες εικόνες (Σχήμα 4.14)



Σχήμα 4.14 Συνδυαστική εικόνα του 1ου προφίλ μετά την βαθμονόμηση των παλαιών μετρήσεων

Η στάθμη των 416 mV αφαιρέθηκε, στη συνέχεια, από όλα τα προφίλ που μετρήθηκαν με τα παλαιά μη πολούμενα ηλεκτρόδια, και είναι ο τρόπος με τον οποίο θα παρουσιαστούν σε επόμενα κεφάλαια. Επιπλέον, σε περιοχές που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και με τα δύο σετ ηλεκτροδίων, η ερμηνεία θα γίνει με βάση τις μετρήσεις των νέων ηλεκτροδίων, καθώς θεωρήθηκαν περισσότερο αξιόπιστες.

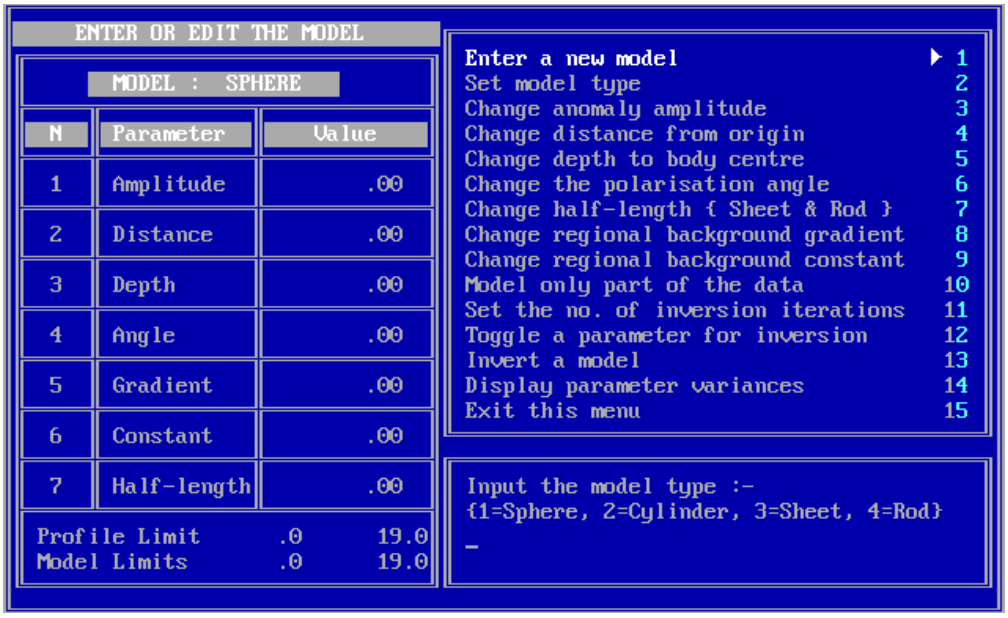
4.2.3 Μοντελοποίηση δεδομένων

Συνθετικά δεδομένα δημιουργήθηκαν και για την μέθοδο του φυσικού δυναμικού, με την χρήση του λογισμικού SPINV (Cooper, 1997). Σε αυτό, διαβάζονται τα πραγματικά δεδομένα από κατάλληλα διαμορφωμένο αρχείο, επιλέγεται το είδος του στόχου που δημιουργεί την ανωμαλία φυσικού δυναμικού μεταξύ τεσσάρων

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ

επιλογών γεωμετρίας (σφαίρας, κυλίνδρου, επιπέδου και ράβδου), και μπορούν να εισαχθούν επίσης πληροφορίες για το μέγεθος της ανωμαλίας, την απόσταση του στόχου από την αρχή του προφίλ και του βάθους που συναντάται ο στόχος, μεταξύ άλλων (Σχήμα 4.15).



Σχήμα 4.15 Περιβάλλον λογισμικού SPinv

Στη συνέχεια, επιλέγονται οι παράμετροι που θα λάβουν μέρος στην διαδικασία της αντιστροφής, καθώς και ο αριθμός των επαναλήψεων για την αντιστροφή. Με την εκκίνηση της επαναληπτικής διαδικασίας, υπολογίζονται οι παραπάνω παράμετροι και δημιουργείται ένα μοντέλο το οποίο προσομοιάζει με τον καλύτερο τρόπο τα αρχικά δεδομένα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

4.3 VLF

Παρακάτω αναλύονται τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την λήψη, την επεξεργασία και την αντιστροφή των δεδομένων της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου του VLF.

4.3.1 Λήψη δεδομένων

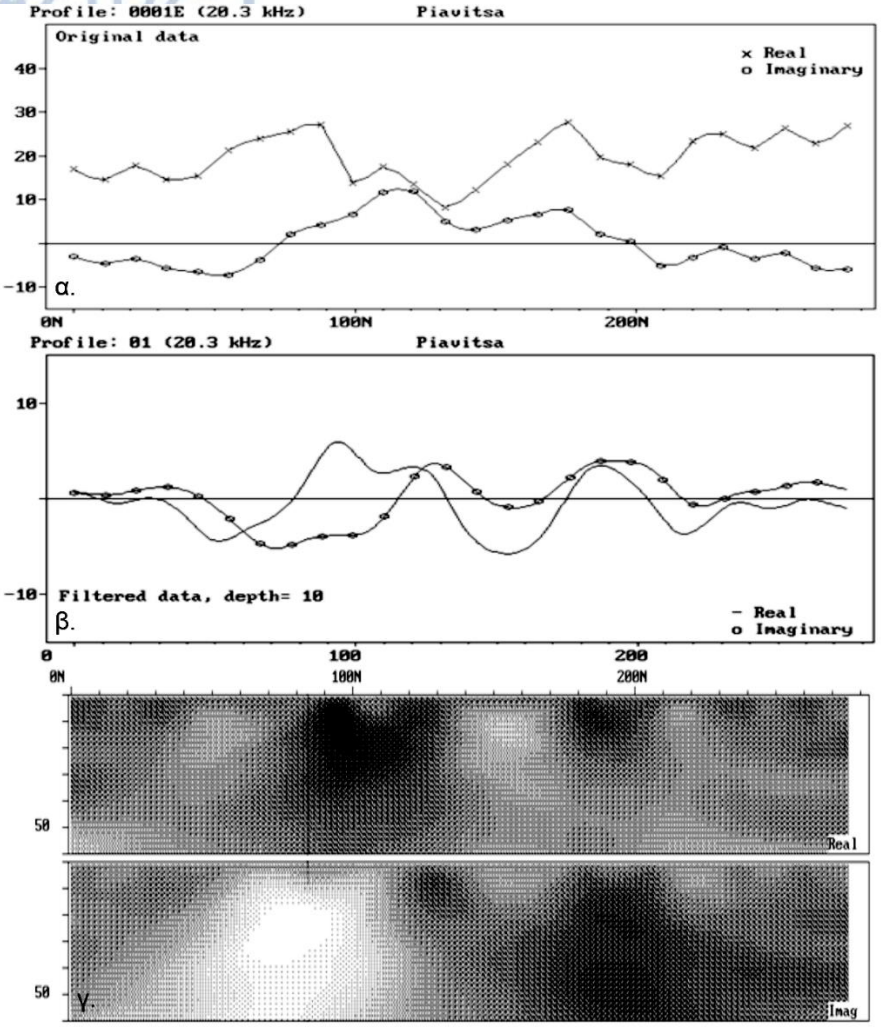
Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων VLF χρησιμοποιήθηκε το όργανο Wadi της εταιρείας ABEM Instruments (Σχήμα 4.16), καθώς και GPS χειρός της εταιρείας Garmin για την παράλληλη αποτύπωση της θέσης σε κάθε μέτρηση.

Σχήμα 4.16 Όργανο VLF Wadi από την εταιρεία ABEM Instruments

4.3.2 Επεξεργασία δεδομένων

Για την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SECTOR (ABEM, 1989), στο οποίο εισήχθησαν σε κατάλληλη μορφή αρχείου τα δεδομένα του σταθμού-πομπού του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, της απόστασης της κάθε μέτρησης από την αρχή του προφίλ, καθώς και οι τιμές της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου. Με τον τρόπο αυτό, το λογισμικό έδωσε την ικανότητα αποτύπωσης των πρωτογενών δεδομένων, των φιλτραρισμένων δεδομένων, καθώς και την δημιουργία των τομών της πυκνότητας του ρεύματος σε κάθε προφίλ (Σχήμα 4.17).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 4.17 Παράδειγμα πρωτογενών δεδομένων (α), φιλτραρισμένων δεδομένων (β) και προφίλ πυκνότητας ρεύματος (γ) με την χρήση του λογισμικού SECTOR

Το φιλτράρισμα των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή του διαφορικού φίλτρου Fraser (Fraser, 1969), το οποίο μετατρέπει τη διπολική μορφή των ανωμαλιών σε μονοπολική και έχει την παρακάτω μορφή (Telford et al., 1990):

$$f_{2,3} = (M_1 + M_2) - (M_3 + M_4) \quad (31)$$

Το προφίλ της πυκνότητας ρεύματος, αντίστοιχα, είναι μία πιο γενικευμένη και ενδελεχής μορφή του φίλτρου Fraser (Ogilvy & Lee, 1991), όπου εφαρμόζοντας ένα διακριτό φίλτρο στα δεδομένα της πραγματικής συνιστώσας του VLF αποκτώνται οι πυκνότητες ρεύματος σε σταθερά βάθη που θα προκαλούσε ένα μαγνητικό πεδίο ίσο με την μέτρηση. Το συμμετρικό αυτό φίλτρο σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε πρώτα από τους Karous & Hjelt (1983) και έχει την μορφή:

$$\frac{\Delta z}{2\pi} I_a(0) = 0.102H_{-3} - 0.059H_{-2} + 0.561H_{-1} - 0.561H_1 + 0.059H_2 - 0.102H_3 \quad (32)$$

όπου I_a η φαινόμενη τιμή της πυκνότητας ρεύματος και $I_a(0) = \frac{1}{2}[I\left(\frac{\Delta x}{2}\right) + I\left(-\frac{\Delta x}{2}\right)]$

$H_{-3}, H_{-2} \ldots H_3$ τα μετρημένα δεδομένα σε διαδοχικούς σταθμούς

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Δx η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών σημείων

Δz τα βάθη που εισάγονται για τον υπολογισμό

4.3.3 Αντιστροφή δεδομένων

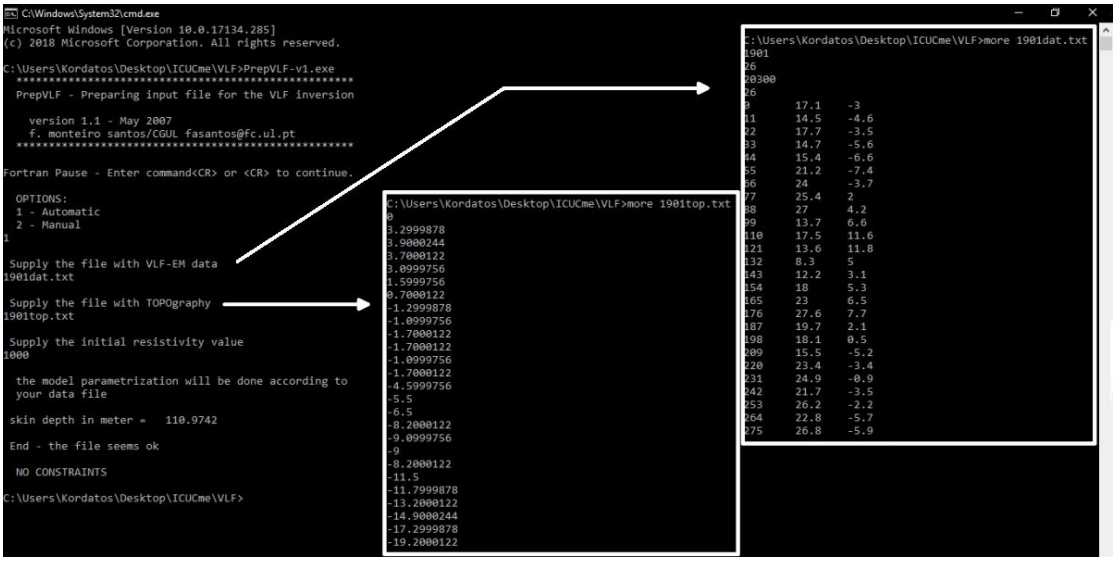
Για την αντιστροφή των δεδομένων VLF χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Inv2DVLF (Santos et al., 2006), το οποίο λύνει το ευθύ πρόβλημα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιεί μία σύνθετη ποσότητα, έναν τανυστή στην ουσία, ο οποίος αποτελείται από πραγματική και φανταστική συνιστώσα, και οφείλεται στο γεγονός ότι σε μία δεδομένη συχνότητα δημιουργείται χρονική καθυστέρηση μεταξύ των οριζόντιων και κατακόρυφων πεδίων εξαιτίας της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής που λαμβάνει μέρος στο υπέδαφος.

Καθώς τα όργανα VLF μετρούν την οριζόντια (H_y) και την κατακόρυφη (H_z) συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου, σε κάθε θέση μέτρησης, ο βαθμωτός αυτός τανυστής (B) δίνεται από τη σχέση:

$$H_z = B\, H_y \tag{33}$$

ενώ η πραγματική και φανταστική συνιστώσα του εκφράζονται συνήθως ως ποσοστά.

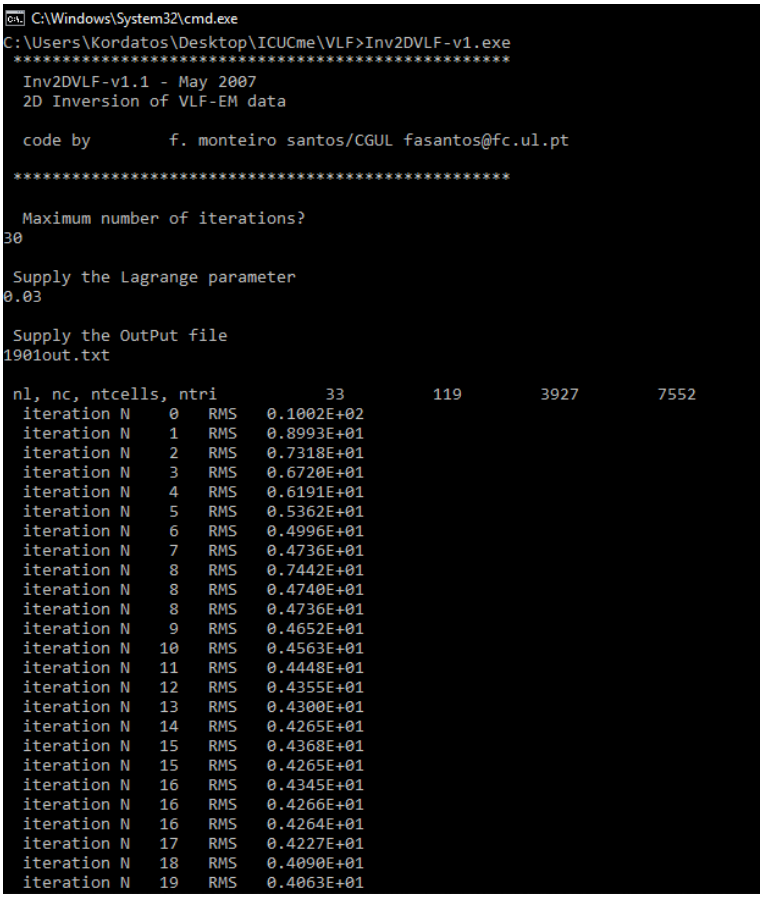
Το λογισμικό χρησιμοποιεί περιβάλλον DOS (disk operating system), το οποίο είναι χωρισμένο σε δύο φάσεις. Στην πρώτη δίδονται τα δεδομένα της συχνότητας του πομπού που χρησιμοποιήθηκε, του αριθμού των μετρήσεων, της απόστασης μεταξύ κάθε μέτρησης καθώς και των τιμών της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας σε κατάλληλα διαμορφωμένο αρχείο, τα στοιχεία για την τοπογραφία σε κάθε θέση καθώς και μία τιμή ημιχώρου σε Ohm.m (Σχήμα 4.18), με αποτέλεσμα να δημιουργείται αρχείο με τις παραμέτρους του μοντέλου σύμφωνα με τα δεδομένα που δόθηκαν, το οποίο είναι απαραίτητο για την αντιστροφή.



Σχήμα 4.18 Παραμετροποίηση μοντέλου για την αντιστροφή των δεδομένων VLF

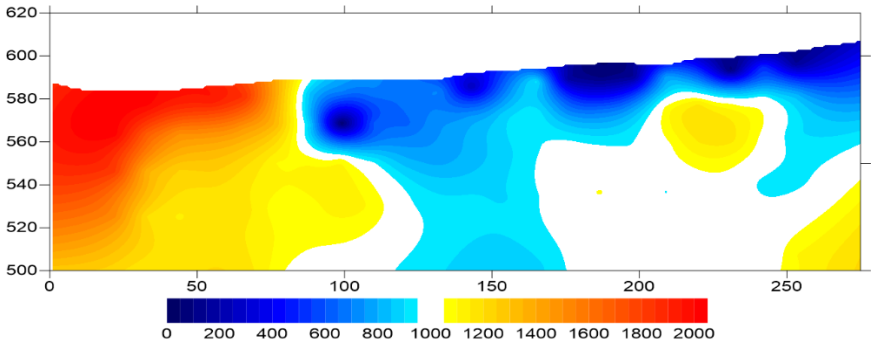
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Στη δεύτερη φάση, εισάγεται ο αριθμός των επαναλήψεων που θα λάβουν μέρος στην διαδικασία της αντιστροφής, η τιμή του πολλαπλασιαστή Lagrange καθώς και το όνομα του τελικού αρχείου που θα εξαχθεί (Σχήμα 4.19), με αποτέλεσμα να ξεκινήσει η επαναληπτική διαδικασία.



Σχήμα 4.19 Αντιστροφή δεδομένων VLF με το λογισμικό Inv2DVLF

Τέλος, το τελικό αρχείο εισάγεται σε οποιοδήποτε σχεδιαστικό πρόγραμμα, και δημιουργείται ένα μοντέλο αντιστάσεων με το βάθος (Σχήμα 4.20), όπου με ψυχρά χρώματα επισημαίνονται περιοχές με μικρότερες αντιστάσεις και με θερμά χρώματα περιοχές με ψηλότερες αντιστάσεις από την τιμή του ημιχώρου (λευκό χρώμα) που ορίστηκε στην πρώτη φάση.



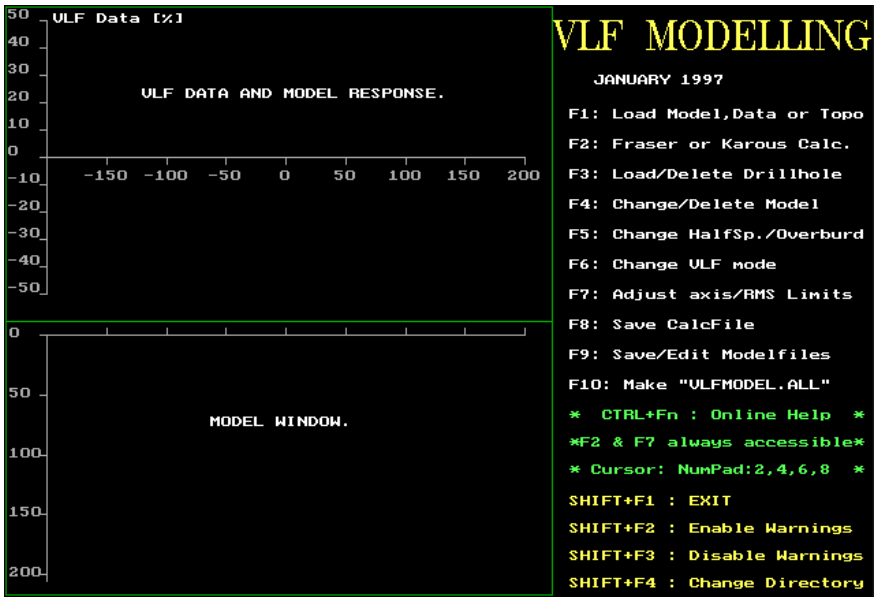
Σχήμα 4.20 Μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων που προκύπτει από την αντιστροφή των δεδομένων VLF

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

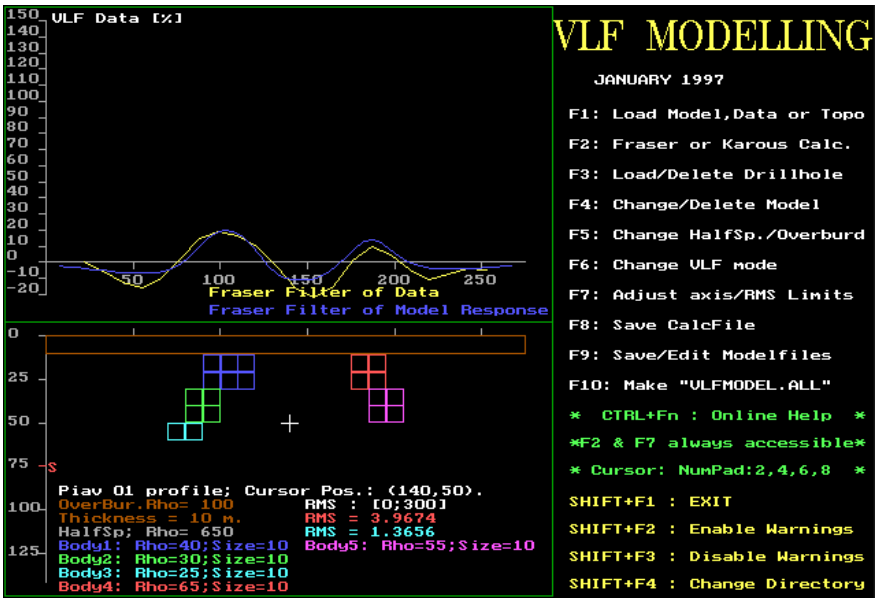
4.3.4 Μοντελοποίηση δεδομένων

Για τη δημιουργία συνθετικών δεδομένων VLF χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό VLFMOD (Edsen & Nissen, 1997). Σε αυτό, διαβάζονται τα δεδομένα από κατάλληλα διαμορφωμένα αρχεία, ενώ μπορούν να εισαχθούν επίσης στοιχεία για την τοπογραφία και να πραγματοποιηθούν διορθώσεις των δεδομένων με βάση αυτήν, καθώς και να διαβαστούν από αρχείο ή να δημιουργηθούν μέσα στο λογισμικό μοντέλα ηλεκτρικών αντιστάσεων ως κελιά με κυβική γεωμετρία (Σχήμα 4.21).



Σχήμα 4.21 Περιβάλλον λογισμικού VLFMOD

Με την δημιουργία του μοντέλου, μπορεί να γίνει σύγκριση της φιλτραρισμένης, πραγματικής συνιστώσας που θα μετρούνταν πάνω από περιοχή με τις αντίστοιχες ηλεκτρικές αντιστάσεις του μοντέλου, σε σχέση με την φιλτραρισμένη καμπύλη της πραγματικής συνιστώσας των δεδομένων που μετρήθηκαν στο ύπαιθρο (Σχήμα 4.22).



Σχήμα 4.22 Σύγκριση συνθετικής με μετρημένη καμπύλη πραγματικής συνιστώσας στο VLFMOD

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

5 Αποτελέσματα και ερμηνεία δεδομένων

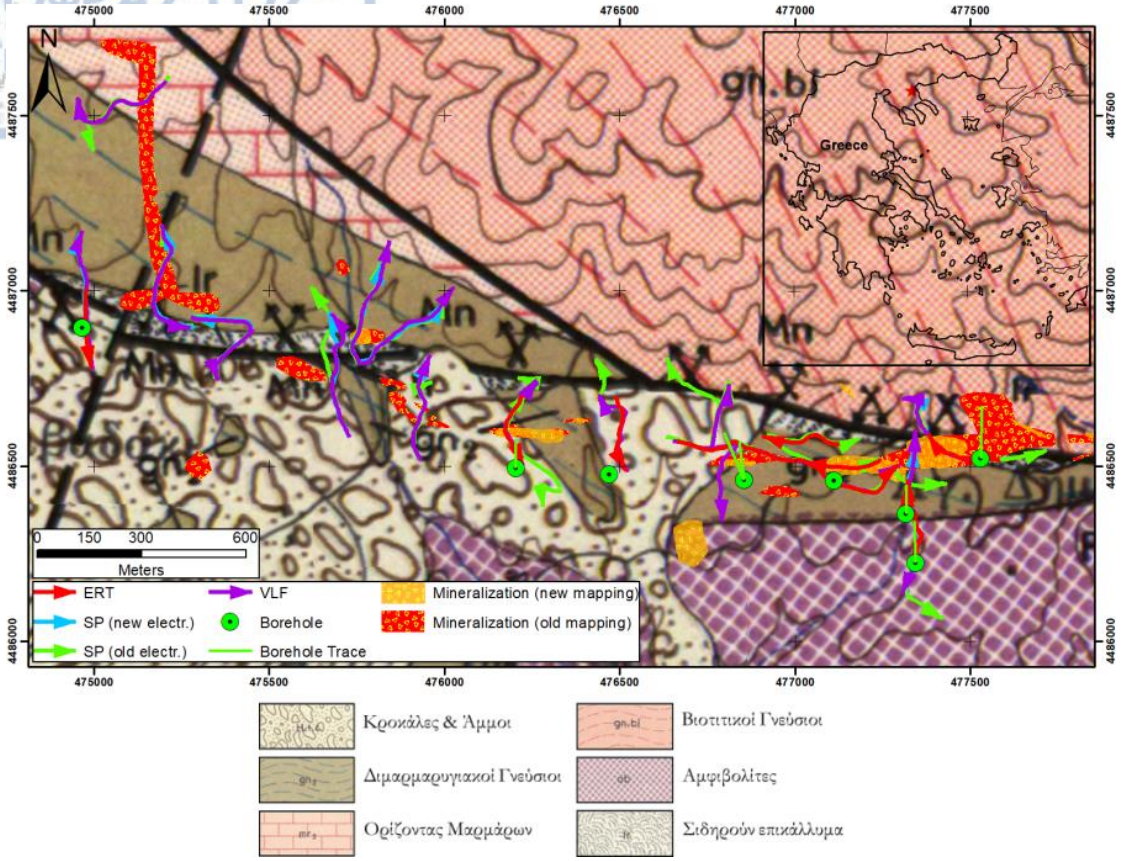
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την επεξεργασία των δεδομένων της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, επαγόμενης πόλωσης, φυσικού δυναμικού και της μεθόδου VLF σε όλες τις μετρηθέντες περιοχές. Επιπλέον, παρουσιάζονται πρόσθετα στοιχεία για την κάθε περιοχή μέτρησης, όπως είναι η γεωλογία καθώς και στοιχεία γεωτρήσεων, όπου αυτά υπάρχουν.

Ένας συνοπτικός πίνακας όλων των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στις αντίστοιχες περιοχές παρουσιάζεται παρακάτω (Πίνακας 8), ενώ παρουσιάζεται επιπλέον ο χάρτης της περιοχής μελέτης (Ι.Γ.Μ.Ε., 1978) με το σύνολο των προφίλ που μετρήθηκαν, των θέσεων των γεωτρήσεων καθώς και των επιφανειακών εμφανίσεων μεταλλοφορίας που προέκυψε από προηγούμενες έρευνες γεωλογικής χαρτογράφησης στην περιοχή.

Περιοχή	*Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση*	*Επαγόμενη Πόλωση*	*Φυσικό Δυναμικό (Παλαιά Ηλεκτρόδια)*	*Φυσικό Δυναμικό (Νέα Ηλεκτρόδια)*	*VLF*
01	✓	✓	✓	✓	✓
02	✗	✗	✓	✓	✓
03	✗	✗	✓	✓	✓
04	✗	✗	✓	✓	✓
05	✗	✗	✓	✓	✓
06	✗	✗	✓	✓	✓
07	✗	✗	✓	✓	✓
08	✗	✗	✓	✓	✓
09	✓	✓	✓	✓	✓
10	✓	✓	✓	✓	✓
11	✓	✓	✓	✗	✗
12	✓	✓	✓	✓	✓
13	✓	✓	✓	✗	✗
14	✓	✓	✓	✓	✓
15	✓	✓	✓	✓	✓
16a	✗	✗	✓	✗	✗
16b	✗	✗	✓	✗	✓
19	✗	✗	✗	✓	✓
20	✗	✗	✗	✓	✓
21	✓	✓	✗	✓	✓

Πίνακας 8 Πίνακας συνολικών μετρήσεων στις αντίστοιχα μετρηθέντες περιοχές

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Χάρτης και γεωλογία της περιοχής μελέτης

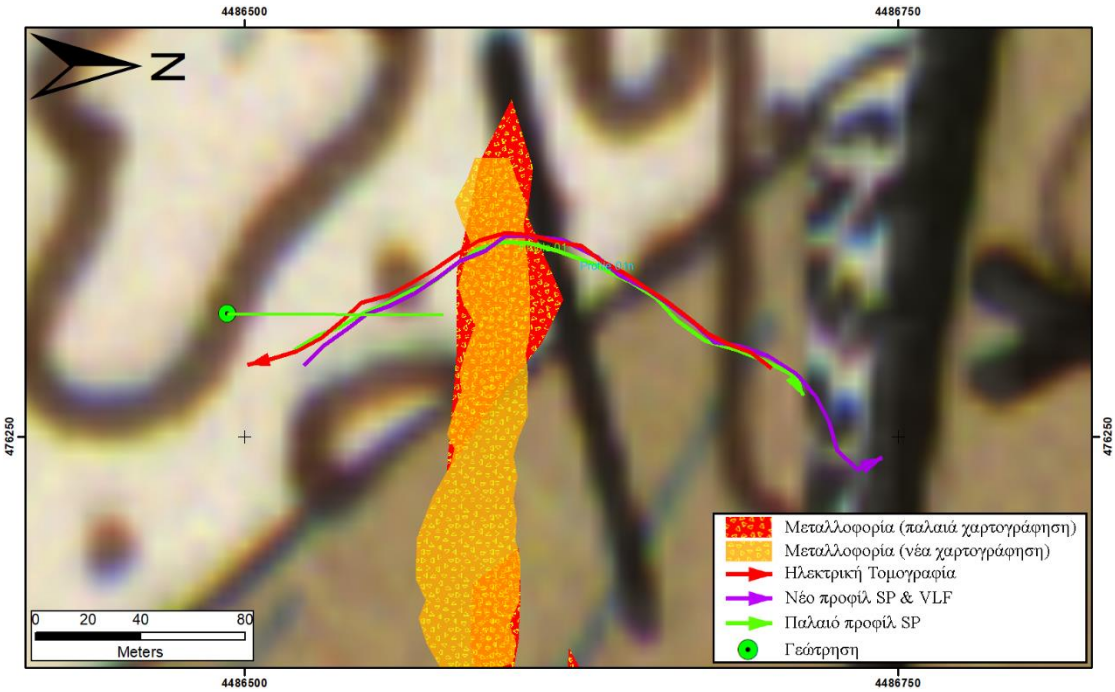
Η τελική ερμηνεία που προκύπτει είναι αποτέλεσμα της ερμηνείας κάθε γεωφυσικής μεθόδου που εφαρμόστηκε στην εκάστοτε περιοχή, της γεωλογίας σε αυτήν, καθώς και των στοιχείων από τις γεωτρήσεις, όπου αυτά υπάρχουν.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

5.1 Περιοχή 1η

Παρακάτω παρουσιάζεται η γεωλογία της περιοχής όπως προέκυψε από τον χάρτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε., 1978), όπου έχουν εισαχθεί πληροφορίες για την δομή των προφίλ, της θέσης της γεώτρησης, καθώς και των επιφανειακών εμφανίσεων μεταλλοφορίας, σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες γεωλογικής χαρτογράφησης.



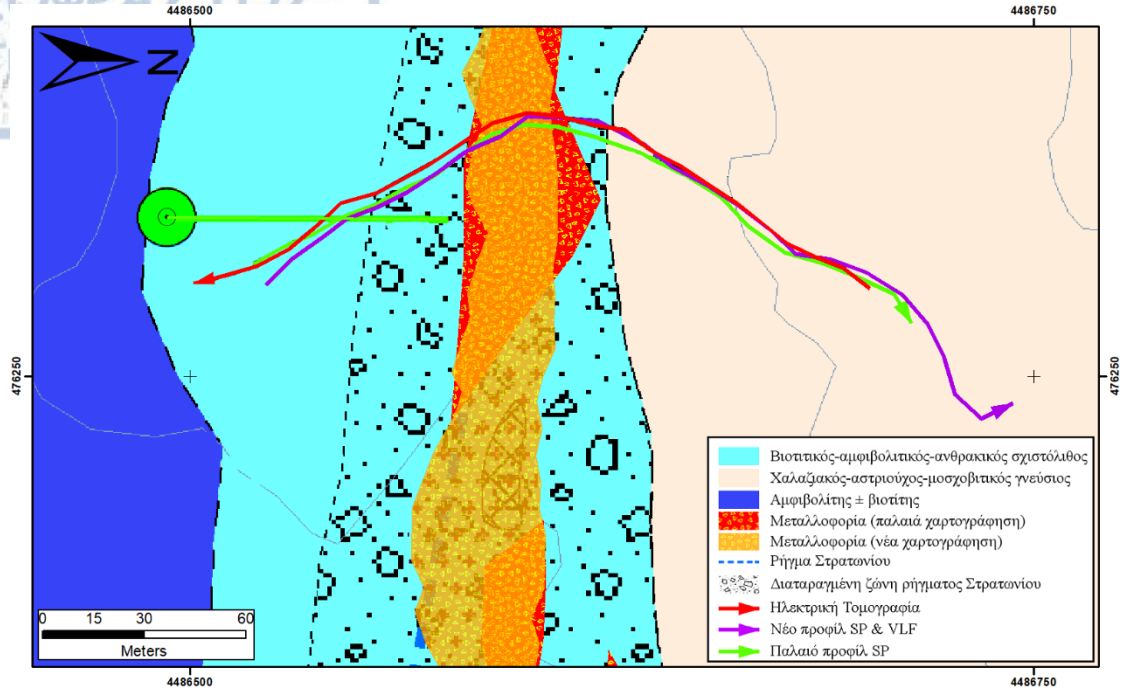
Σχήμα 5.1 Δομή και γεωλογία της 1ης περιοχής

Το προφίλ της ηλεκτρικής τομογραφίας έχει φορά από Βορρά προς Νότο, ενώ τα προφίλ του φυσικού δυναμικού και του VLF έχουν αντίθετη φορά, με διεύθυνση προς τον Βορρά. Οι σχηματισμοί που συναντώνται είναι οι κροκάλες και οι άμμοι στο Νότο, που έρχονται σε επαφή με τον διμαρμαρυγιακό γνεύσιο στο Βορρά, ενώ στο τέλος των οδεύσεων του φυσικού δυναμικού και VLF, συναντάται το σιδηρούν επικάλυμμα.

Σε περιοχές όπου έχουν γίνει μετρήσεις με ηλεκτρικές τομογραφίες υπάρχει επιπλέον πληροφορία μέσω γεωλογικού χάρτη που προέκυψε από δεδομένα γεωλογικής χαρτογράφησης προηγούμενων ερευνών, σε κλίμακα μικρότερη από αυτή του χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε.. Ένας τέτοιος χάρτης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2, ο οποίος δίνει αντίστοιχα στοιχεία για την δομή των προφίλ στον χώρο, καθώς και τους γεωλογικούς σχηματισμούς που απαρτίζουν την περιοχή που μελετάται.

Τα προφίλ παρουσιάζονται με την ίδια φορά όπως στον προηγούμενο χάρτη, με τον σχηματισμό που βρίσκεται στο Νότο να χαρακτηρίζεται ως βιοτιτικός-αμφιβολιτικός-ανθρακικός σχιστόλιθος, συνεχίζοντας πιο Βόρεια υπάρχει μία διαβρωμένη ζώνη αυτού του σχιστολίθου λόγω της δράσης του ρήγματος του Στρατωνίου, ενώ στο Βορειότερο κομμάτι στο τέλος των μετρήσεων φυσικού δυναμικού και VLF συναντάται ο σχηματισμός του γνευσίου, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως χαλαζιακός-αστριούχος-μοσχοβιτικός.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.2 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για την 1η περιοχή

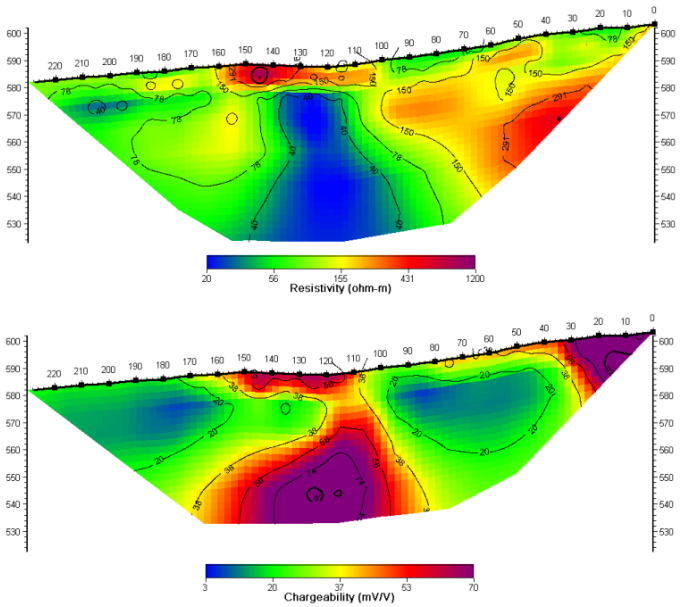
Η γεώτρηση, στην θέση που φαίνεται στον χάρτη, δίνει στοιχεία για μία επιφανειακή διαβρωμένη ζώνη έως το βάθος των 30 περίπου μέτρων, στα επόμενα 20 περίπου μέτρα συναντάται σχιστόλιθος που έχει χαρακτηριστεί ως αμφιβολιτικός-βιοτιτικός-ανθρακικός, ενώ βαθύτερα, κάτω από το βάθος των 50 μέτρων, συναντάται ο σχηματισμός των αμφιβολιτών που περιέχει ανθρακικές φλέβες με ασβεστίτη ($CaCO_3$) και ροδοχρωσίτη ($MnCO_3$) έως το μέγιστο βάθος που μελετάται από τις γεωφυσικές μεθόδους (~65m).

5.1.1 Ηλεκτρική Τομογραφία

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία και αντιστροφή των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας (της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της επαγόμενης πόλωσης αντίστοιχα) με βάση τη θέση τους στο χώρο (Σχήμα 5.1), παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.3.

Το μοντέλο των αντιστάσεων έρχεται σε συμφωνία με το γεωλογικό μοντέλο, καθώς στα πρώτα μέτρα ($0 - 100$m) συναντάται ο σχηματισμός του διμαρμαρυγιακού γνεύσιου ο οποίος εμφανίζει μεγάλες αντιστάσεις (> 400 Ohm. m) σε σχέση με αυτές του υπόλοιπου μοντέλου, ενώ στη συνέχεια οι αντιστάσεις μειώνονται, καθώς συναντάται ο σχηματισμός των κροκαλών και των άμμων.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

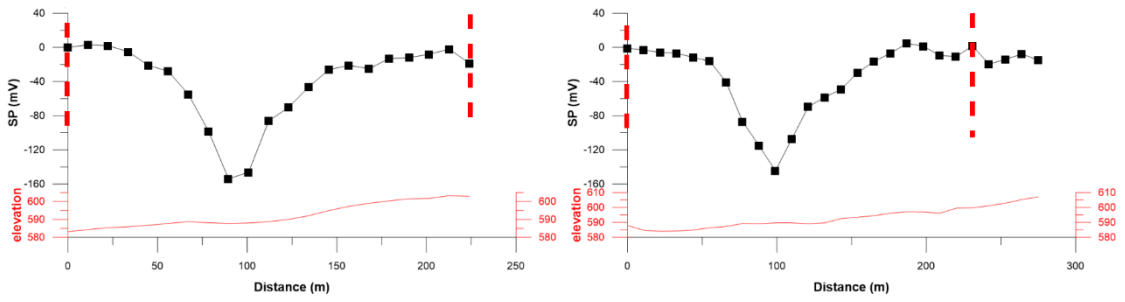


Σχήμα 5.3 Μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (α) και επαγόμενης πόλωσης (β) για την περιοχή 1

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή στο κέντρο των μοντέλων, με πολύ χαμηλές αντιστάσεις (< 40 Ohm. m) και υψηλή φορτιστικότητα (> 60 mV/V), η οποία ταυτίζεται με την θέση της χαρτογραφημένης μεταλλοφόρας ζώνης. Τόσο η θέση της ζώνης, όσο και οι τιμές της αντίστασης και φορτιστικότητας είναι ενδεικτικές του είδους της μεταλλοφορίας, καθώς συναντώνται πάνω στη θέση του ρήγματος του Στρατωνίου, με βάση τον χάρτη που προέκυψε από τη γεωλογική χαρτογράφηση.

5.1.2 Φυσικό Δυναμικό

Οι καμπύλες του φυσικού δυναμικού, τόσο για τα παλιά όσο και για τα καινούρια ηλεκτρόδια, στην περιοχή που οι μετρήσεις είναι κοινές (κόκκινες παύλες) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.4.



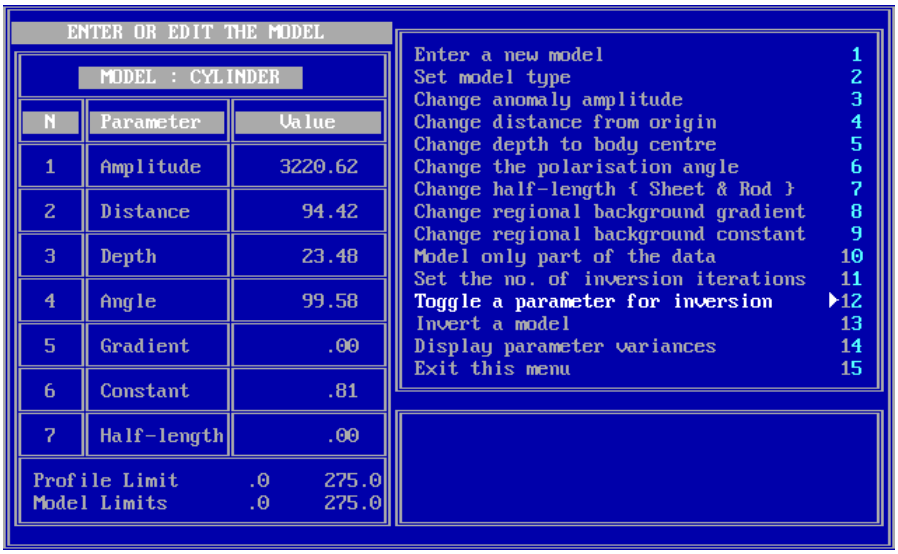
Σχήμα 5.4 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 1

Μία μεγάλη αρνητική ανωμαλία της τάξης των -140 mV εμφανίζεται και στις δύο περιπτώσεις, στην περιοχή της χαρτογραφημένης μεταλλοφορίας, γεγονός που προσδίδει επιπλέον στοιχεία για την εξάπλωση της ζώνης και επιτρέπει την βαθμονόμηση των τιμών φυσικού δυναμικού.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

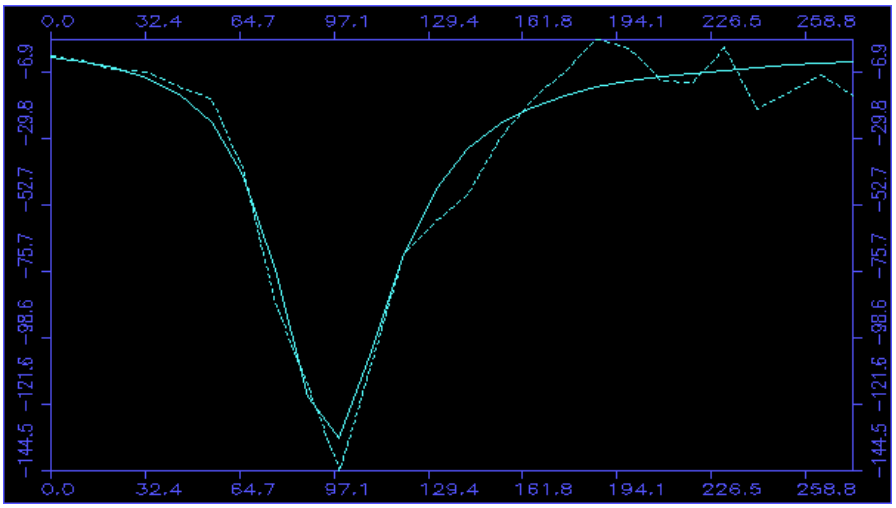
Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ

Με βάση την εικόνα που προέκυψε από την ηλεκτρική τομογραφία, παρατηρείται πως η ανωμαλία που παρουσιάζει το φυσικό δυναμικό δημιουργείται από έναν κυλινδρικό στόχο. Έτσι, επιλέγοντας αυτό ως γεωμετρικό σχήμα και γνωρίζοντας πως η ανωμαλία σχηματίζεται περίπου στα 100 μέτρα της όδευσης, καθώς και το βάθος που συναντάται ο στόχος είναι περίπου τα 20 μέτρα, το μοντέλο που προκύπτει μέσω του λογισμικού SPINV είναι το ακόλουθο (Σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5 Παράμετροι που χαρακτηρίζουν την ανωμαλία φυσικού δυναμικού στην περιοχή 1

Αντίστοιχα, η εικόνα που προκύπτει από τα συνθετικά δεδομένα με αυτές τις παραμέτρους (συνεχής καμπύλη) σε σχέση με την καμπύλη των πραγματικών δεδομένων (διακεκομμένη καμπύλη) παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6 Συνθετική καμπύλη φυσικού δυναμικού σε σχέση με την μετρημένη για την περιοχή 1

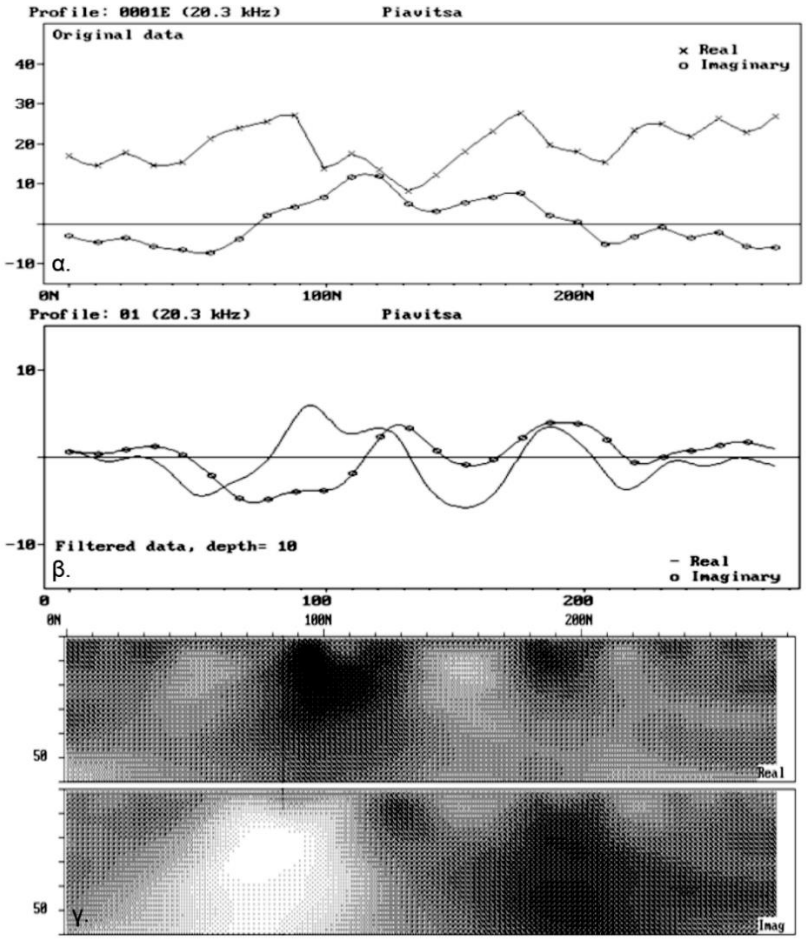
Σε αυτές παρατηρείται η καλή συμφωνία μεταξύ των συνθετικών και των πραγματικών δεδομένων, με την καμπύλη των συνθετικών δεδομένων να προσομοιάζει σε ικανοποιητικό βαθμό την καμπύλη των πραγματικών δεδομένων.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

5.1.3 VLF

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το φιλτράρισμα των δεδομένων VLF παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.7, ενώ τα αποτελέσματα της αντιστροφής των δεδομένων στο Σχήμα 5.8.

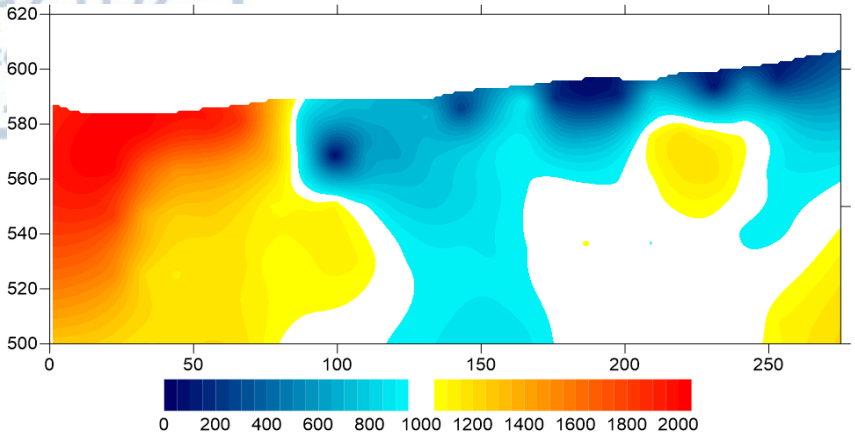


Σχήμα 5.7 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 1

Με βάση τα φιλτραρισμένα δεδομένα, διακρίνεται μία πολύ αγώγιμη ζώνη με κέντρο τα 100 μέτρα η οποία δηλώνει πολύ αγώγιμη ζώνη (αργιλική πλήρωση, μεταλλοφορία) και αντιστοιχεί χωρικά στην χαρτογραφημένη μεταλλοφορία. Επιπλέον, διακρίνεται μια ανωμαλία από τα 160 έως τα 220 μέτρα, η οποία χαρακτηρίζεται ως διείσδυση σχηματισμού, και έρχεται σε καλή συμφωνία με την επαφή των άμμων με το διμαρμαρυγιακό γνεύσιο.

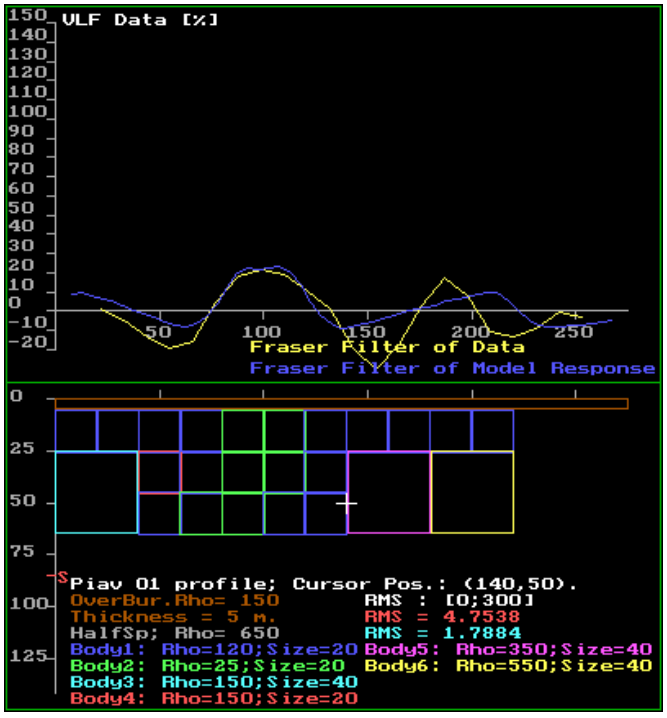
Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει μία πολύ πιο αγώγιμη ζώνη από την τιμή περιβάλλοντος που επιλέχθηκε (1000 Ohm. m), στο 100ο μέτρο του προφίλ και σε ενδεικτικό βάθος περίπου 20 μέτρων, ενώ παρουσιάζει επίσης παραπλήσια εικόνα με το μοντέλο των αντιστάσεων που προέκυψε από την αντιστροφή των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.8 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 1

Με βάση το γεωηλεκτρικό μοντέλο της περιοχής, όπως αυτό προέκυψε από τα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας, δημιουργήθηκε το παρακάτω μοντέλο (Σχήμα 5.9) για την παραγωγή συνθετικών δεδομένων VLF, το οποίο έρχεται σε καλή συμφωνία με τα πραγματικά δεδομένα, λαμβάνοντας υπόψη την εικόνα των φιλτραρισμένων πραγματικών συνιστωσών μεταξύ των συνθετικών και των πραγματικών δεδομένων.



Σχήμα 5.9 Συνθετικό μοντέλο αντιστάσεων για την περιοχή 1

5.1.4 Συνδυαστική ερμηνεία

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας των μέσων τιμών αντίστασης, φορτιστικότητας και φυσικού δυναμικού που δημιούργησε η ζώνη

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

ενδιαφέροντος στην περιοχή (Πίνακας 9), καθώς και η συνδυαστική εικόνα όλων των αποτελεσμάτων των μεθόδων για την 1η περιοχή (Σχήμα 5.10).

	Ηλεκτρική Αντίσταση (Ohm.m)	Φορτιστικότητα (mV/V)	Φυσικό Δυναμικό (mV)
Περιοχή 1η	25	87	-113

Πίνακας 9 Ίχνος της ζώνης ενδιαφέροντος στην 1η περιοχή

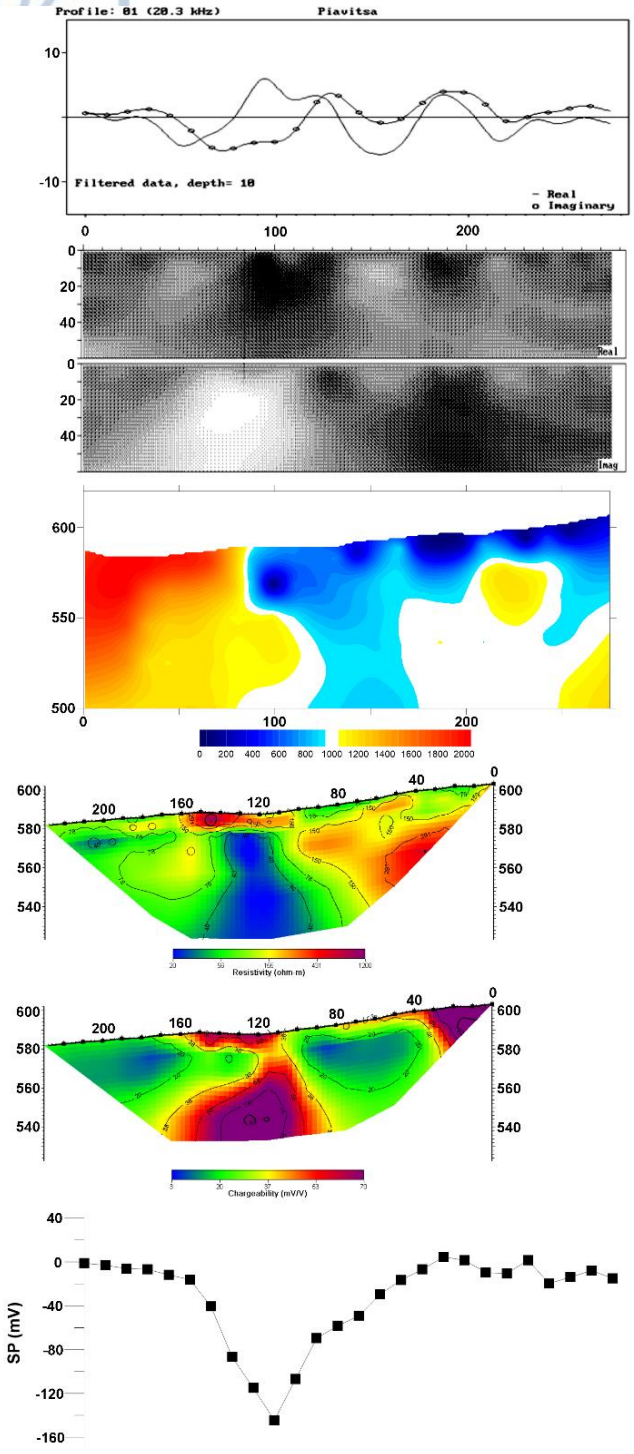
Στο τελευταίο διακρίνονται με την σειρά τα φιλτραρισμένα δεδομένα VLF, το μοντέλο της πυκνότητας ρεύματος, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των δεδομένων VLF, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των τομογραφικών δεδομένων, το μοντέλο της φορτιστικότητας καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση που έχουν αυτά στον χώρο.

Οι ενδείξεις της ύπαρξης μεταλλοφορίας στην περιοχή αυτή είναι μεγάλες, καθώς όλες οι γεωφυσικές μέθοδοι παρουσιάζουν πολύ ισχυρές ανωμαλίες πάνω ακριβώς από την ζώνη που ορίζει η γεωλογική χαρτογράφηση. Λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη γεωλογία της περιοχής, όσο και τα στοιχεία της γεώτρησης για το είδος της μεταλλοφορίας (φλέβες ασβεστίτη με ροδοχρωσίτη· μη συμπαγής μεταλλοφορία), θεωρείται απίθανο οι υψηλές ανωμαλίες που εμφανίζονται σε όλες τις γεωφυσικές μεθόδους να οφείλονται μόνο στην ύπαρξη του ροδοχρωσίτη.

Μία πιθανή εξήγηση για τις πολύ υψηλές υπογραφές των γεωφυσικών στο σημείο αυτό είναι η παρουσία του γραφίτη (C), ο οποίος συναντάται σε μεγαλύτερα βάθη της γεώτρησης (~150m), έχει δηλαδή παρουσία στην περιοχή, λαμβάνοντας υπόψη ότι η γεώτρηση βρίσκεται σε απόσταση περίπου 50 μέτρων από τα μετρηθέντα προφίλ.

Ο γραφίτης, ως ορυκτή πολυμορφική μορφή του άνθρακα, εμφανίζεται σε μεταμορφωμένα πετρώματα και κυρίως στους σχιστολίθους και συμπεριφέρεται ως πολύ καλός αγωγός, ακόμη και σε μικρές περιεκτικότητες (Airo, 2015· Morgan, 2010), αλλά και ως πυκνωτής, με αποτέλεσμα να είναι πολύ δύσκολη η διάκρισή του από άλλα μεταλλικά ορυκτά που έχουν χαρακτηριστική γεωφυσική υπογραφή, όπως είναι τα περισσότερα σουλφίδια.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



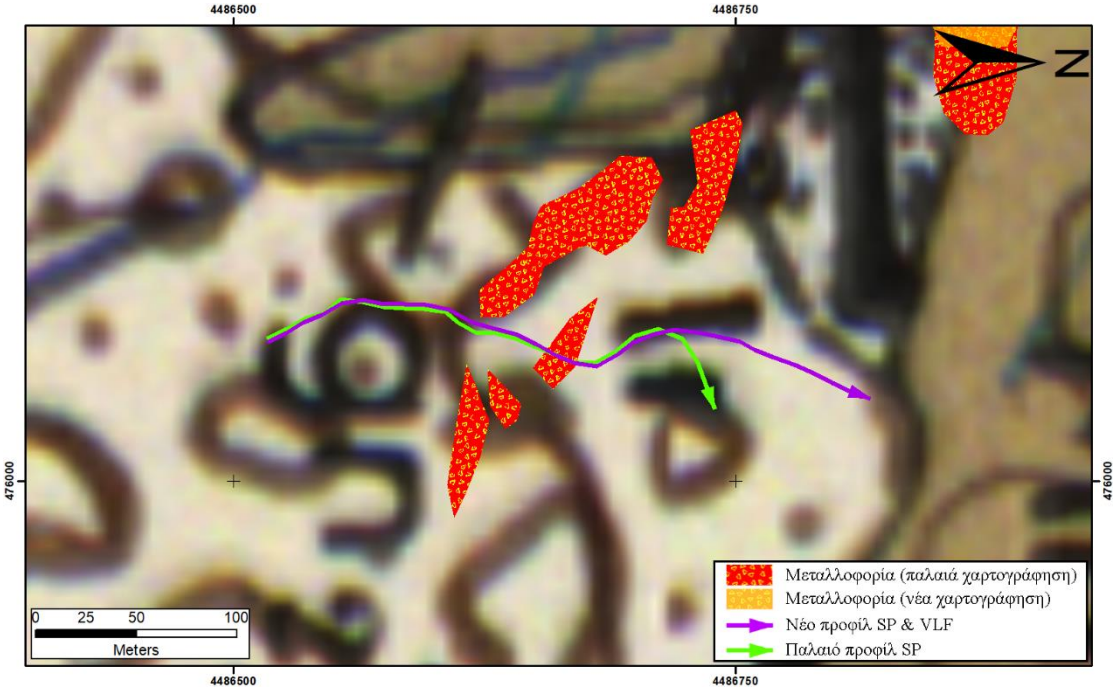
Σχήμα 5.10 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 1

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

5.2 Περιοχή 2η

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στην 2η περιοχή, καθώς και η γεωλογία σε αυτήν (Σχήμα 5.11).

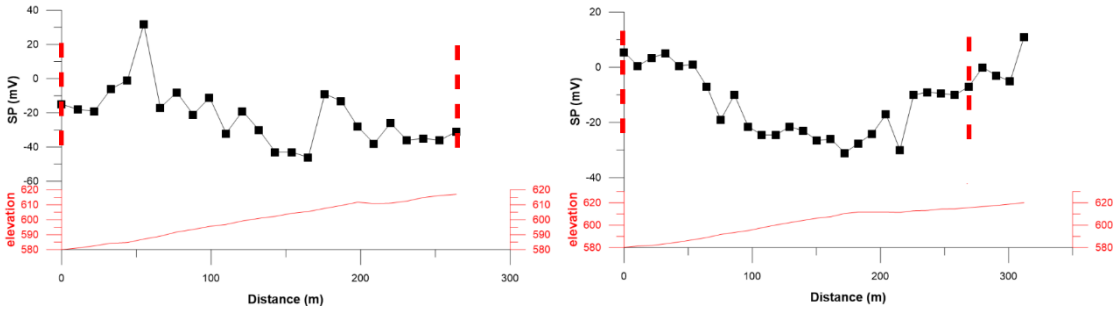


Σχήμα 5.11 Δομή και γεωλογία της 2ης περιοχής

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φυσικού δυναμικού τόσο με τα παλιά όσο και με τα νέα ηλεκτρόδια, καθώς και μέτρηση VLF με φορά από το Νότο προς το Βορρά. Ο σχηματισμός που κυριαρχεί σε ολόκληρη την έκταση των οδεύσεων είναι αυτός των κροκαλών και των άμμων, με τον διμαρμαρυγιακό γνεύσιο να είναι υποκείμενος.

5.2.1 Φυσικό Δυναμικό

Οι καμπύλες του φυσικού δυναμικού, τόσο για τα παλιά όσο και για τα καινούρια ηλεκτρόδια, στην περιοχή που οι μετρήσεις είναι κοινές (κόκκινες παύλες) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.12.



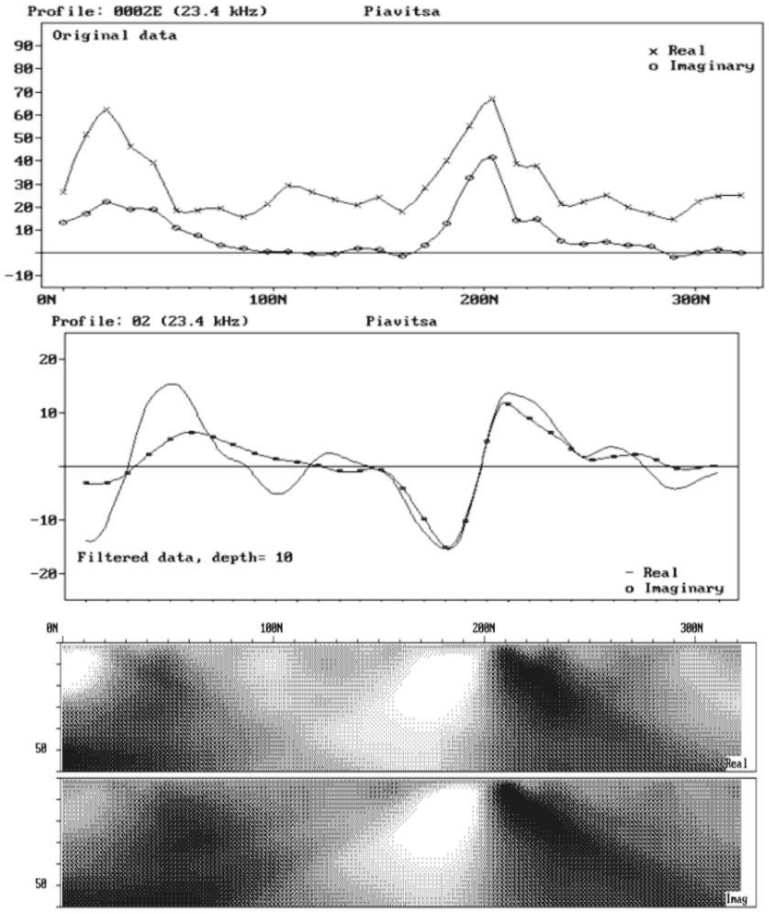
Σχήμα 5.12 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 2

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν παραπλήσια εικόνα, καθώς και στις δύο εμφανίζεται μία μείωση των τιμών στο κέντρο της όδευσης. Μία ανωμαλία της τάξης των -30 mV εμφανίζεται στον χώρο μεταξύ του 90ου και του 210ου περίπου μέτρου στο προφίλ που μετρήθηκε με τα νέα ηλεκτρόδια, που αντιστοιχεί στην χαρτογραφημένη μεταλλοφόρα περιοχή στον χάρτη.

5.2.2 VLF

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το φιλτράρισμα των δεδομένων VLF παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.13, ενώ τα αποτελέσματα της αντιστροφής των δεδομένων στο Σχήμα 5.14.

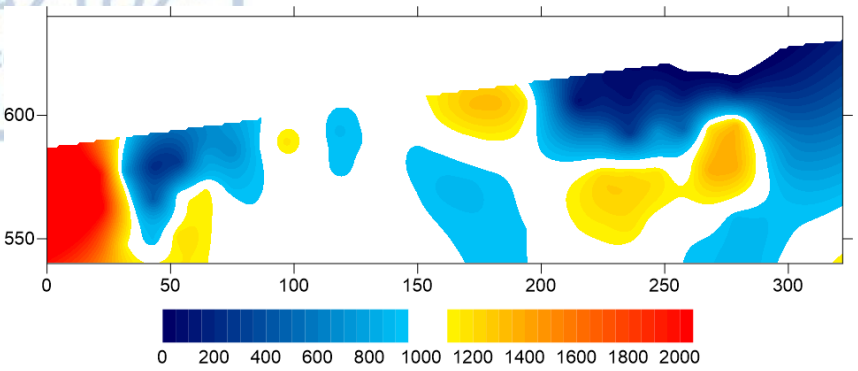


Σχήμα 5.13 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 2

Με βάση τα φιλτραρισμένα δεδομένα παρατηρείται μία αγώγιμη ζώνη στα 50 μέτρα του προφίλ, ενώ στα 90 και 210 μέτρα εμφανίζονται ανωμαλίες που παραπέμπουν σε επαφή γεωλογικών σχηματισμών, με το τμήμα αυτό να οριοθετεί την επιφανειακή χαρτογραφημένη ζώνη μεταλλοφορίας.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γε
Α.Π



Σχήμα 5.14 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 2

Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει αγώγιμες ζώνες πριν και μετά τα 90 και 210 μέτρα, αντίστοιχα, με την ενδιάμεση αυτή ζώνη που οριοθετεί την χαρτογραφημένη μεταλλοφορία να παρουσιάζει αγώγιμες αλλά και αντιστατικές περιοχές.

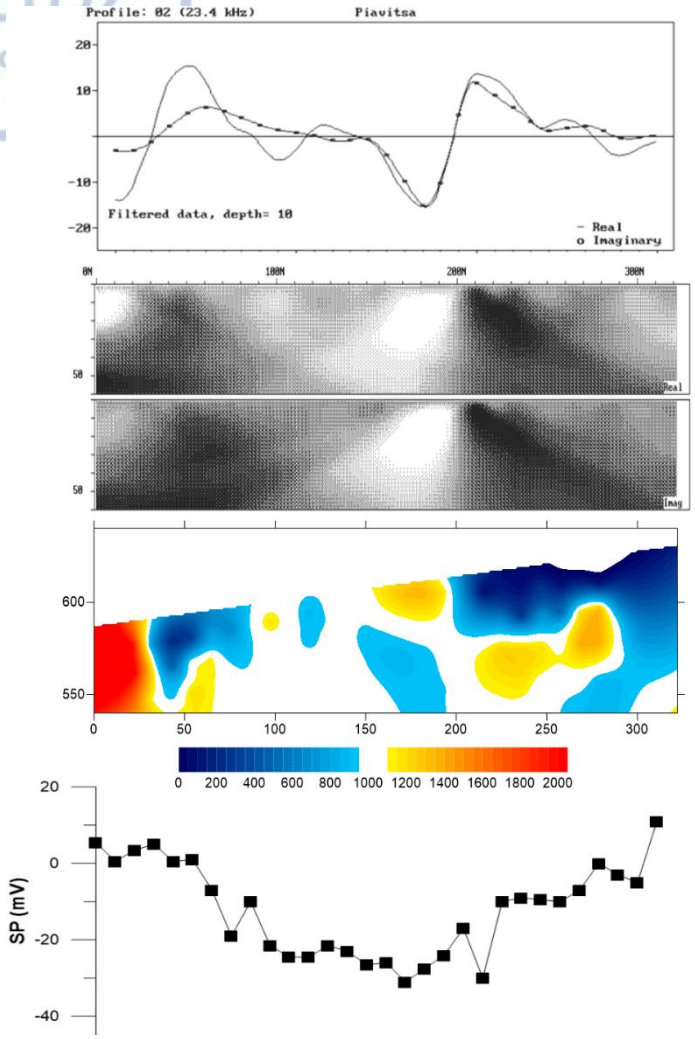
5.2.3 Συνδυαστική ερμηνεία

Η συνδυαστική εικόνα όλων των παραπάνω για την $2^{η}$ περιοχή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.15. Σε αυτήν διακρίνονται με την σειρά τα φιλτραρισμένα δεδομένα VLF, το μοντέλο της πυκνότητας ρεύματος, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των δεδομένων VLF καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση που έχουν αυτά στον χώρο.

Παρατηρείται η συμφωνία των δεδομένων VLF, στα οποία εμφανίζεται αλλαγή γεωλογικού σχηματισμού στα 90 και 210 μέτρα της όδευσης, γεγονός το οποίο συνδέεται με την μείωση των τιμών του φυσικού δυναμικού μεταξύ της ζώνης αυτής. Η μείωση αυτή, η οποία είναι της τάξης των -30 mV, παρότι δεν χαρακτηρίζεται ως μεγάλη σε πλάτος, είναι αξιοσημείωτη σε σχέση με το εύρος του προφίλ μέτρησης, με αποτέλεσμα να αποτελεί ένδειξη διάσπαρτης μεταλλοφορίας στο τμήμα αυτό.

Η ζώνη αυτή συμπίπτει χωρικά με τις επιφανειακές εμφανίσεις μεταλλοφορίας που προέκυψαν από την γεωλογική χαρτογράφηση, οι οποίες φαίνεται να συνδέονται και με την ζώνη του σιδηρούν καλύμματος που συναντάται Βορειοδυτικά των οδεύσεων.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



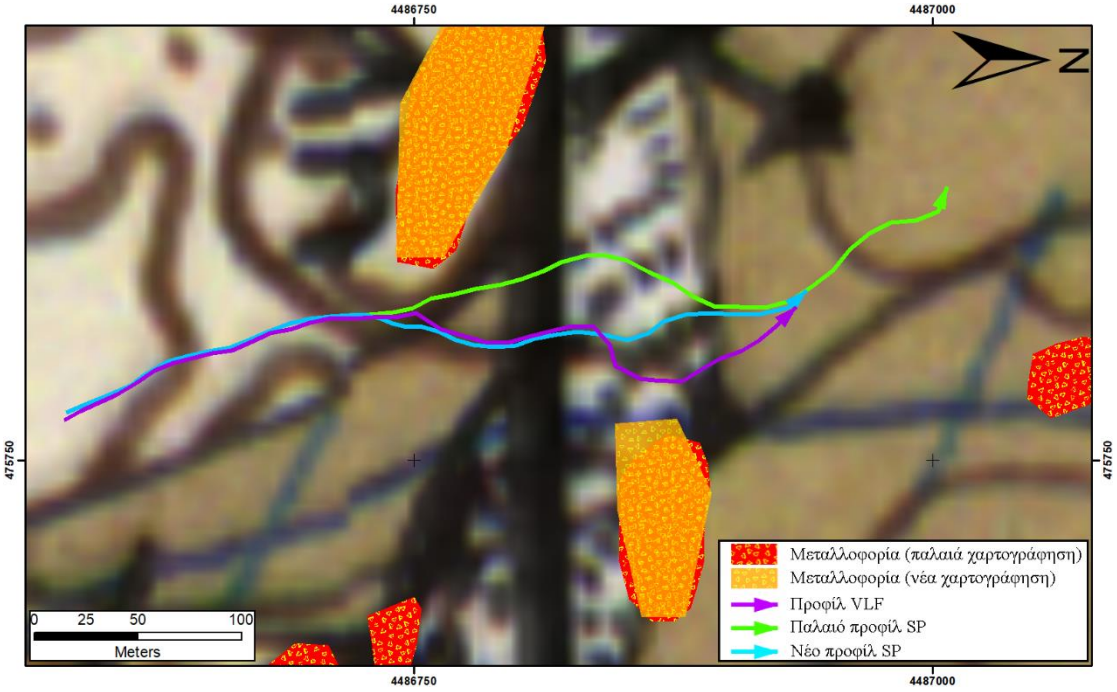
Σχήμα 5.15 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 2

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

5.3 Περιοχή 3η

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στην 3η περιοχή, καθώς και η γεωλογία σε αυτήν (Σχήμα 5.16).

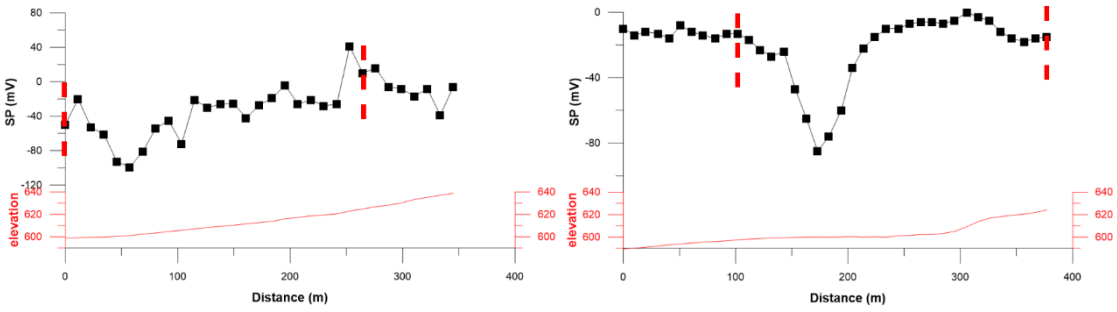


Σχήμα 5.16 Δομή και γεωλογία της 3ης περιοχής

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φυσικού δυναμικού τόσο με τα παλαιά όσο και με τα νέα ηλεκτρόδια καθώς και μέτρηση VLF με φορά προς τον Βορρά. Στα πρώτα μέτρα των οδεύσεων συναντώνται οι κροκάλες με τις άμμους, ενώ στη συνέχεια κυριαρχεί ο σχηματισμός του διμαρμαρυγιακού γνεύσιου, με το σχηματισμό του σιδηρούν καλύμματος να παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο αυτών σχηματισμών.

5.3.1 Φυσικό Δυναμικό

Οι καμπύλες του φυσικού δυναμικού, τόσο για τα παλιά όσο και για τα καινούρια ηλεκτρόδια, στην περιοχή που οι μετρήσεις είναι κοινές (κόκκινες παύλες) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.17.



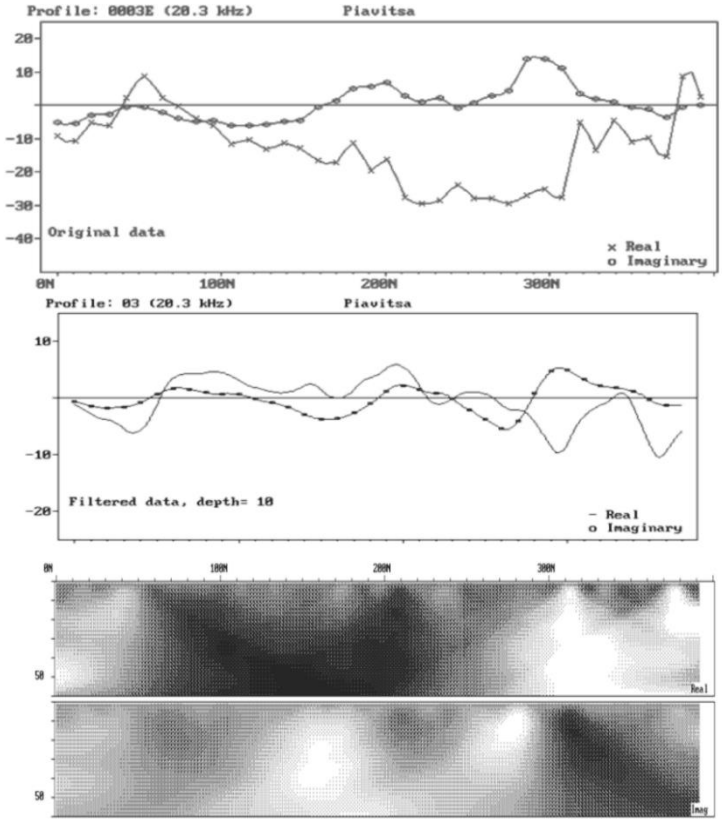
Σχήμα 5.17 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 3

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Οι δύο εικόνες παρουσιάζουν παραπλήσια εικόνα, με μία μεγάλη αρνητική ανωμαλία της τάξης των περίπου -60 mV να εμφανίζεται με κέντρο τα 50 μέτρα στην παλαιά και τα 170 μέτρα στην νέα όδευση, η οποία συμπίπτει με την χαρτογραφημένη ζώνη Δυτικά της όδευσης, γεγονός που υποδεικνύει την συνέχεια της και προς τα Ανατολικά.

5.3.2 VLF

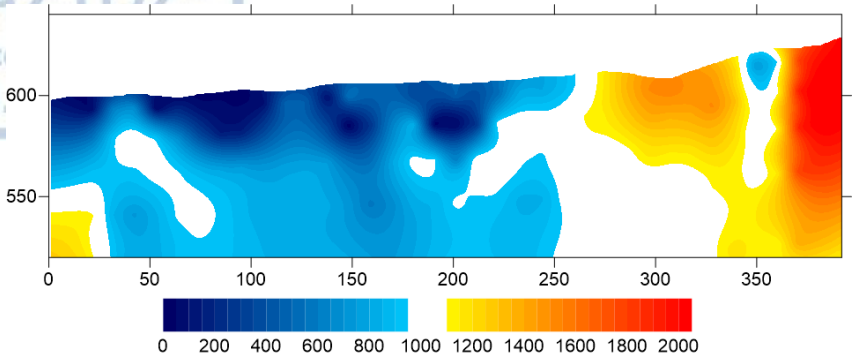
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το φιλτράρισμα των δεδομένων VLF παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.18, ενώ τα αποτελέσματα της αντιστροφής των δεδομένων στο Σχήμα 5.19.



Σχήμα 5.18 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 3

Με βάση τα φιλτραρισμένα δεδομένα παρατηρείται μία αγώγιμη περιοχή από το 60° έως το 210° περίπου μέτρο, με την ζώνη των 130 έως 180 μέτρων να χαρακτηρίζεται ως πολύ αγώγιμη, η οποία αντιστοιχεί στην προέκταση της χαρτογραφημένης μεταλλοφόρας ζώνης προς τα Ανατολικά, στη θέση της όδευσης.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.19 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 3

Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει τα πρώτα μέτρα με χαμηλές αντιστάσεις σε βάθη έως περίπου τα 30 μέτρα, με περιοχές στα 20, 90, 150 και 200 μέτρα να παρουσιάζουν πολύ χαμηλές αντιστάσεις. Από τα 250 μέτρα του προφίλ έως τα 350, όπου εμφανίζονται υψηλότερες αντιστάσεις, συναντάται η ζώνη που είναι χαρτογραφημένο το ρήγμα του Στρατωνίου και η επαφή με τον σχηματισμό του σιδηρούν καλύμματος. Το γεγονός ότι το σιδηρούν κάλυμμα εμφανίζει υψηλές αντιστάσεις, οφείλεται κατά βάση στην οξείδωση που αυτό υφίσταται λόγω των επιφανειακών συνθηκών. Τέλος, από τα 350 μέτρα έως το τέλος της όδευσης συναντάται ο σχηματισμός του διμαρμαρυγιακού γνεύσιου, ο οποίος εμφανίζεται στο μοντέλο με πολύ υψηλές αντιστάσεις.

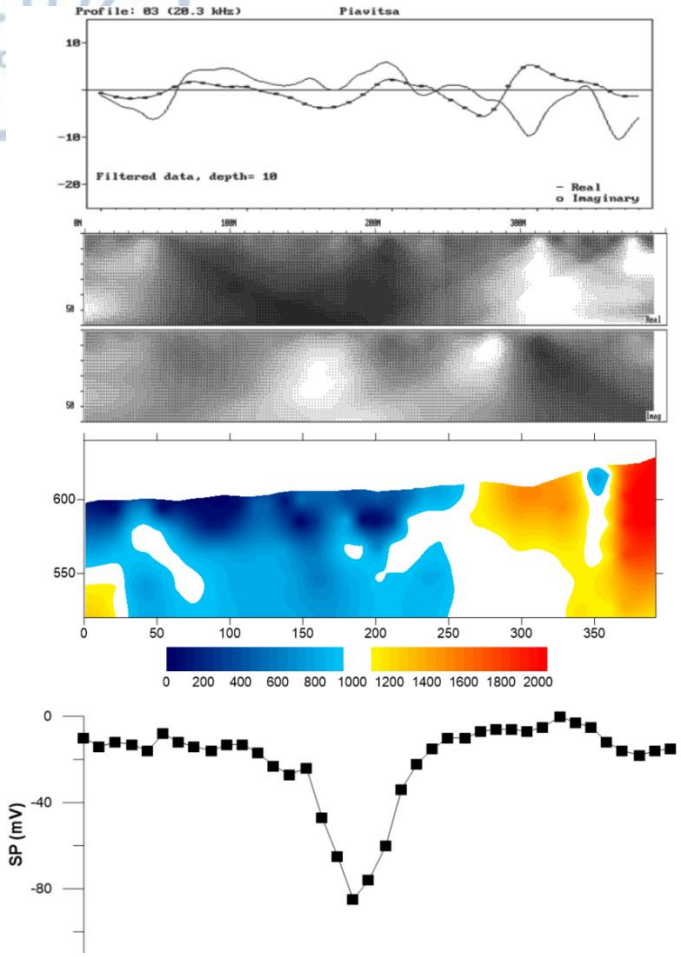
5.3.3 Συνδυαστική ερμηνεία

Η συνδυαστική εικόνα όλων των παραπάνω για την 3η περιοχή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.20. Σε αυτήν διακρίνονται με την σειρά τα φιλτραρισμένα δεδομένα VLF, το μοντέλο της πυκνότητας ρεύματος, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των δεδομένων VLF καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση που έχουν αυτά στον χώρο.

Τόσο τα φιλτραρισμένα όσο και τα δεδομένα αντιστροφής του VLF, καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού εμφανίζουν ισχυρές ανωμαλίες στη ζώνη από τα 150 έως τα 220 μέτρα των οδεύσεων, με την ανωμαλία του φυσικού δυναμικού να είναι της τάξης των -60 mV, γεγονός που ενισχύει τις ενδείξεις για την ύπαρξη μεταλλοφορίας στην περιοχή αυτή.

Χωρικά, οι ανωμαλίες εμφανίζονται στην προέκταση της υπάρχουσας χαρτογραφημένης ζώνης που βρίσκεται δυτικά των οδεύσεων, υποδεικνύοντας την συνέχισή της προς τα Ανατολικά.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



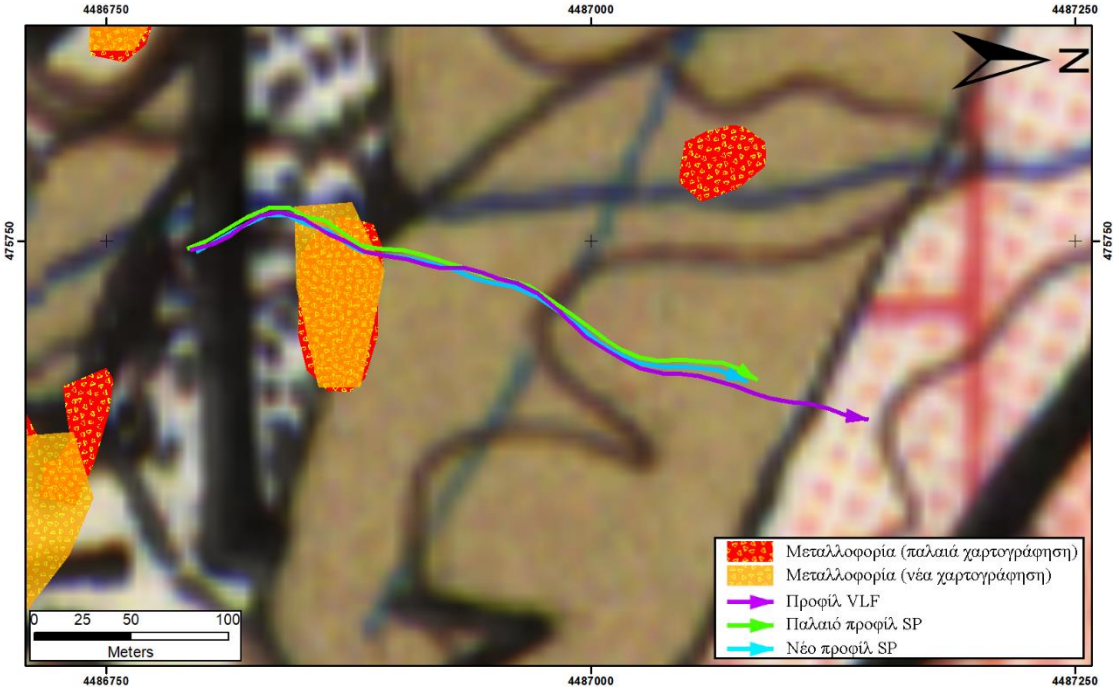
Σχήμα 5.20 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 3

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

5.4 Περιοχή 4η

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στην 4η περιοχή, καθώς και η γεωλογία σε αυτήν (Σχήμα 5.21).



Σχήμα 5.21 Δομή και γεωλογία της 4ης περιοχής

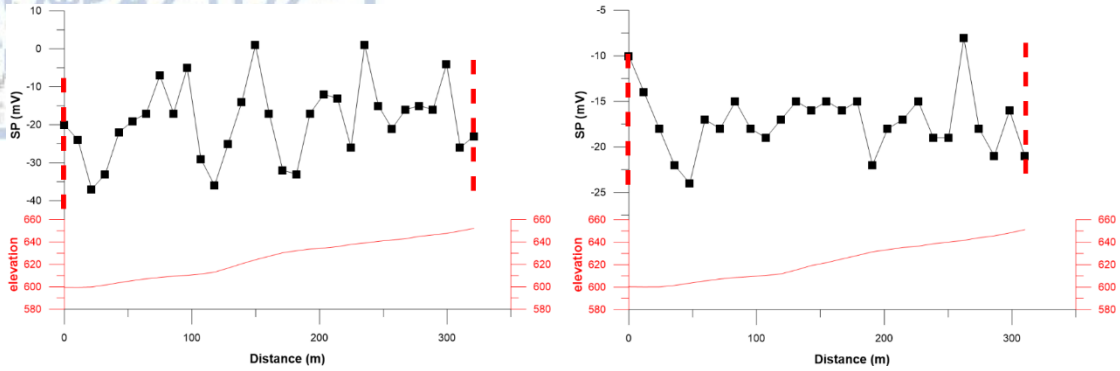
Σε αυτό πραγματοποιήθηκε μέτρηση φυσικού δυναμικού με τα παλαιά και τα νέα ηλεκτρόδια, καθώς και μέτρηση VLF με φορά προς τον Βορρά. Στα πρώτα μέτρα της όδευσης βρίσκεται το ρήγμα του Στρατωνίου και ο σχηματισμός που συναντάται είναι το σιδηρούν κάλυμμα, ενώ στη συνέχεια και έως το τέλος της όδευσης κυριαρχεί ο σχηματισμός του διμαρμαρυγιακού γνεύσιου. Η ζώνη μεταλλοφορίας, όπως προέκυψε από τα δεδομένα γεωλογικής χαρτογράφησης, συναντάται στην επαφή των δύο αυτών σχηματισμών, δηλαδή στα 100 περίπου μέτρα των οδεύσεων.

5.4.1 Φυσικό Δυναμικό

Οι καμπύλες του φυσικού δυναμικού, τόσο για τα παλιά όσο και για τα καινούρια ηλεκτρόδια, στην περιοχή που οι μετρήσεις είναι κοινές (κόκκινες παύλες) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.22.

Οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν παραπλήσια εικόνα σε γενικές γραμμές, καθώς εμφανίζονται αρνητικές ανωμαλίες στα πρώτα 120 περίπου μέτρα των οδεύσεων, δηλαδή στις περιοχές εκείνες που οριοθετούνται από το σχηματισμό του σιδηρούν καλύμματος καθώς και της χαρτογραφημένης μεταλλοφόρας ζώνης.

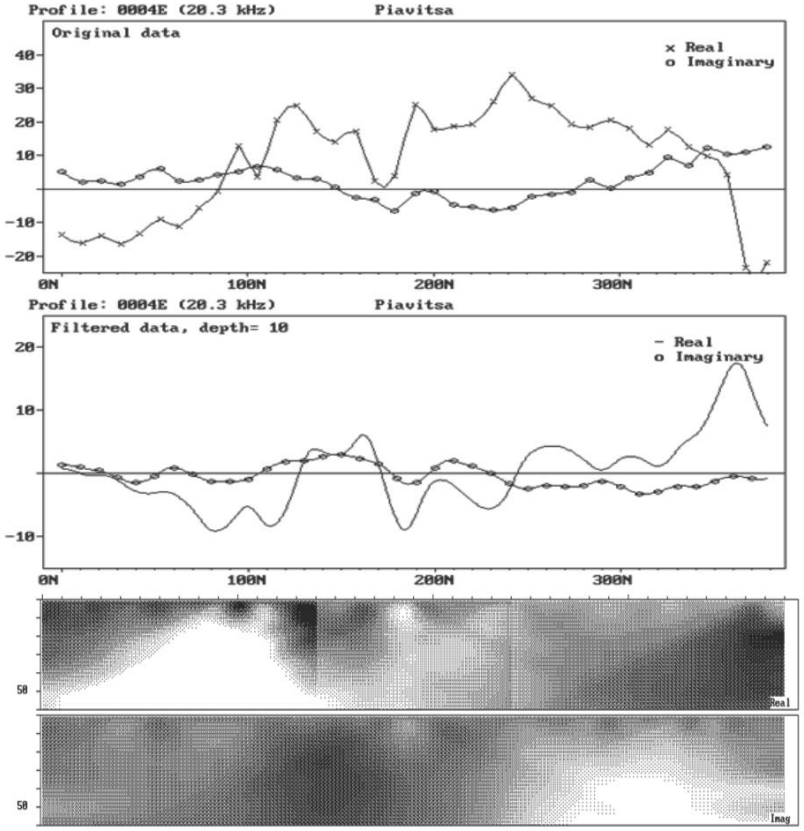
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.22 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 4

5.4.2 VLF

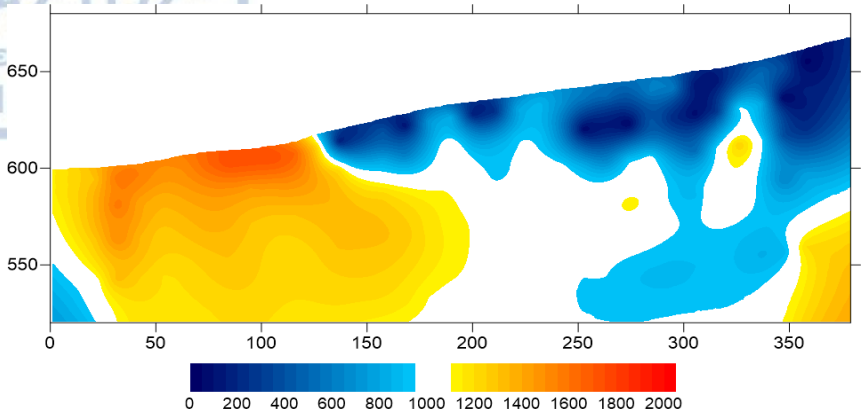
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το φιλτράρισμα των δεδομένων VLF παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.23, ενώ τα αποτελέσματα της αντιστροφής των δεδομένων στο Σχήμα 5.24.



Σχήμα 5.23 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 4

Με βάση τα φιλτραρισμένα δεδομένα παρατηρούνται αγώγιμες περιοχές με κέντρο τα 270 μέτρα και τα 360 μέτρα της όδευσης, ενώ στα 100 περίπου μέτρα παρατηρείται ανωμαλία που παραπέμπει σε επαφή σχηματισμών, το οποίο έρχεται σε συμφωνία με το γεωλογικό μοντέλο, δηλαδή την επαφή του σιδηρούν καλύμματος με τον γνεύσιο.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.24 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 4

Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει τα πρώτα μέτρα ως αντιστατικά, με μία αλλαγή σε χαμηλότερες αντιστάσεις να λαμβάνει χώρα στα 125 περίπου μέτρα, ενώ παρουσιάζει ιδιαίτερα αγώγιμες ζώνες στα 270 και 360 περίπου, γεγονός το οποίο έρχεται σε καλή συμφωνία με τα φιλτραρισμένα δεδομένα.

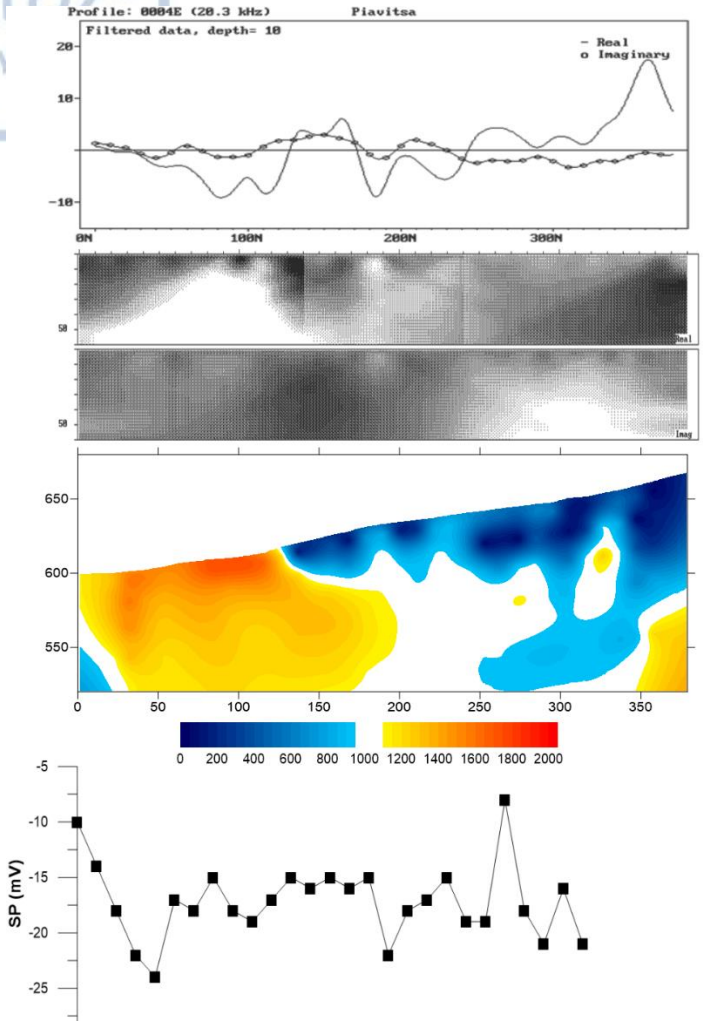
5.4.3 Συνδυαστική ερμηνεία

Η συνδυαστική εικόνα όλων των παραπάνω για την 4η περιοχή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.25. Σε αυτήν διακρίνονται με την σειρά τα φιλτραρισμένα δεδομένα VLF, το μοντέλο της πυκνότητας ρεύματος, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των δεδομένων VLF καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση που έχουν αυτά στον χώρο.

Σε γενικές γραμμές παρατηρείται ένα ιδιαίτερα διαταραγμένο περιβάλλον, τόσο με βάση τα δεδομένα φυσικού δυναμικού όσο και με τα δεδομένα VLF. Με βάση τα δεδομένα φυσικού δυναμικού παρατηρείται μία αρνητική ανωμαλία με μικρό πλάτος και κέντρο τα 50 μέτρα, καθώς και μία μικρότερη με κέντρο τα 100 μέτρα, οι οποίες θα μπορούσαν να υποδείξουν ύπαρξη μεταλλοφορίας, δεν έχουν όμως αντίστοιχο αντίκρυσμα στα δεδομένα του VLF. Τα δεδομένα VLF, από την άλλη, παρουσιάζουν ενδιαφέρον στα 270 μέτρα πρωτίστως και στα 360 μέτρα δευτερευόντως, τα οποία όμως δεν έχουν αντίκρυσμα στα δεδομένα φυσικού δυναμικού στις περιοχές αυτές.

Με βάση τα δεδομένα γεωλογικής χαρτογράφησης και, κατά βάση, του φυσικού δυναμικού, η ζώνη των 120 πρώτων μέτρων της όδευσης μπορεί να χαρακτηριστεί ως ζώνη διάσπαρτης μεταλλοφορίας, στην οποία όμως συμμετέχουν πολύ μικρές περιεκτικότητες μεταλλικών ορυκτών.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



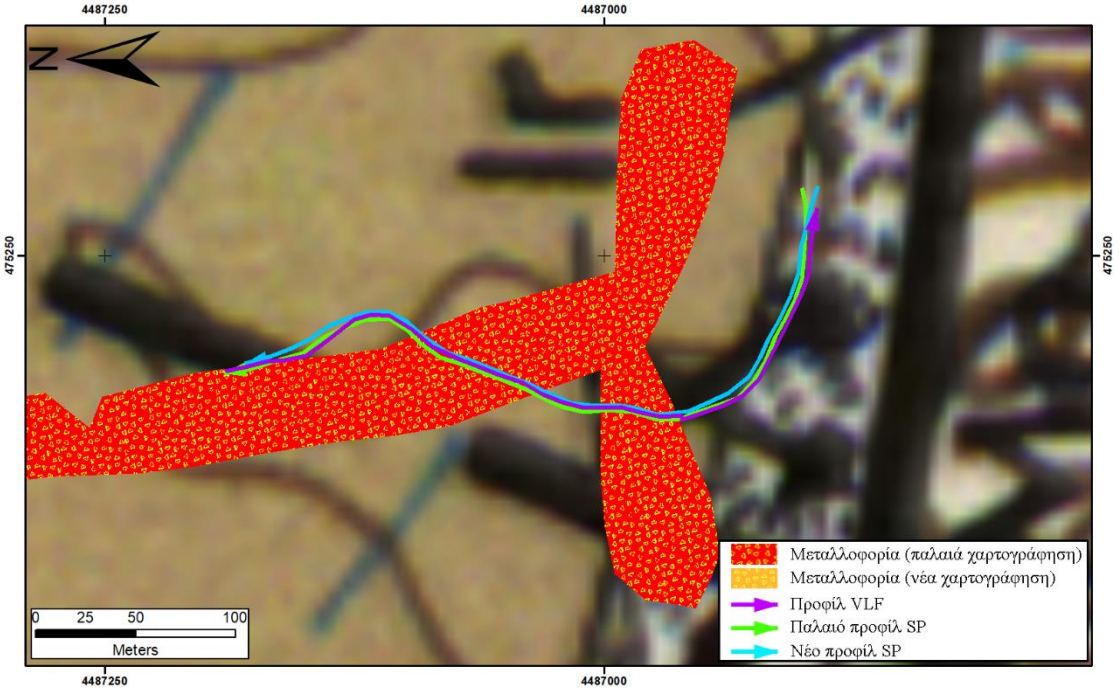
Σχήμα 5.25 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 4

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

5.5 Περιοχή 5η

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στην 5η περιοχή, καθώς και η γεωλογία σε αυτήν (Σχήμα 5.26).

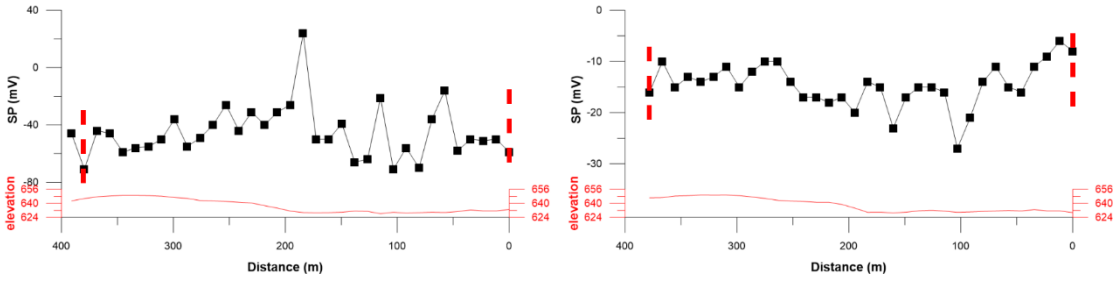


Σχήμα 5.26 Δομή και γεωλογία της 5ης περιοχής

Πραγματοποιήθηκε μέτρηση φυσικού δυναμικού με τα παλαιά και τα νέα ηλεκτρόδια με φορά προς τον Βορρά, καθώς και μέτρηση VLF με φορά προς το Νότο. Στα πρώτα 120 περίπου μέτρα των οδεύσεων φυσικού δυναμικού συναντάται ο σχηματισμός του σιδηρούν καλύμματος, ενώ στη συνέχεια και μέχρι το τέλος τους κυριαρχεί ο σχηματισμός του διμαρμαρυγιακού γνεύσιου.

5.5.1 Φυσικό Δυναμικό

Οι καμπύλες του φυσικού δυναμικού, τόσο για τα παλιά όσο και για τα καινούρια ηλεκτρόδια, στην περιοχή που οι μετρήσεις είναι κοινές (κόκκινες παύλες) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.27.



Σχήμα 5.27 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 5

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

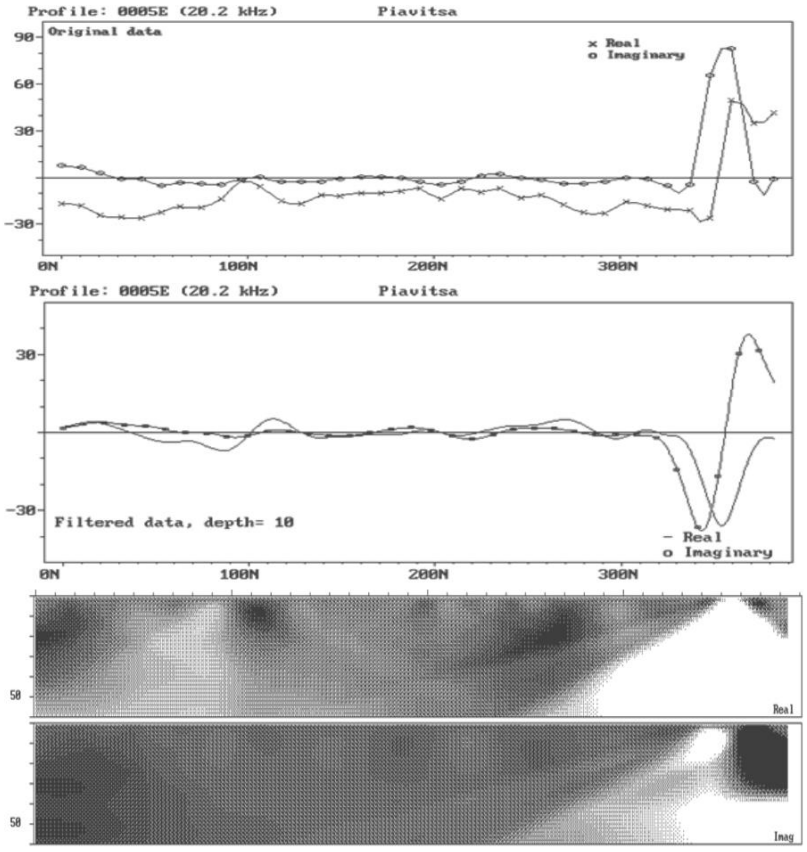
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν διαφορετική εικόνα στα πρώτα μέτρα της όδευσης όπου επικρατεί ο σχηματισμός του σιδηρούν καλύμματος, στην οποία όδευση με τα παλαιά ηλεκτρόδια παρουσιάζονται αυξομειώσεις τιμών που παραπέμπουν σε μετρήσεις με σημαντικό θόρυβο, ενώ με τα νέα ηλεκτρόδια παρουσιάζονται ζώνες χαμηλών τιμών φυσικού δυναμικού, από τα 50 έως και τα 250 μέτρα της όδευσης, περιοχή η οποία αντιστοιχεί τόσο στον σχηματισμό του σιδηρούν καλύμματος, όσο και στην χαρτογραφημένη μεταλλοφόρα ζώνη στην περιοχή.

Η μορφή της καμπύλης του φυσικού δυναμικού με τα νέα ηλεκτρόδια παραπέμπει σε διάσπαρτη μεταλλοφορία από την αρχή του προφίλ έως τα 260 περίπου μέτρα, με περιοχές στα 100 και τα 220 μέτρα να υποδεικνύουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις μεταλλευμάτων, λόγω των μεγαλύτερων ανωμαλιών φυσικού δυναμικού.

5.5.2 VLF

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το φιλτράρισμα των δεδομένων VLF παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.28, ενώ τα αποτελέσματα της αντιστροφής των δεδομένων στο Σχήμα 5.29. Η εικόνα που παρουσιάζεται, αξίζει να σημειωθεί, πως είναι προϊόν ένωσης δύο οδεύσεων με διαφορετικούς προσανατολισμούς σε μία, η οποία ένωση λαμβάνει χώρα στα 250 μέτρα του προφίλ.

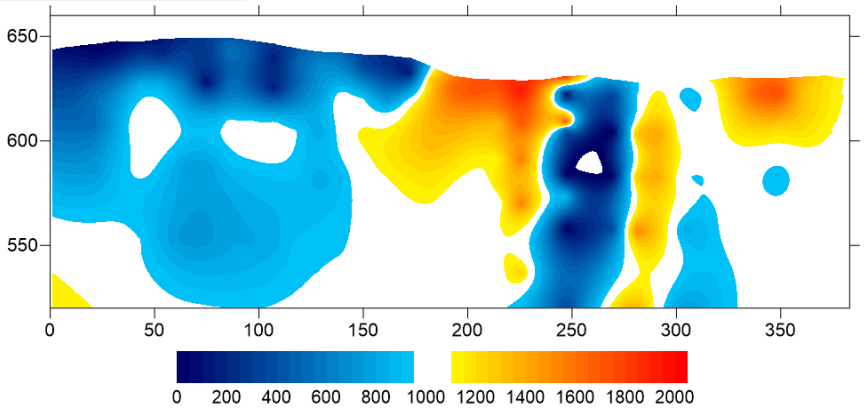


Σχήμα 5.28 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 5

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ

Με βάση τα φιλτραρισμένα δεδομένα παρατηρούνται αγώγιμες περιοχές στα 110 και τα 270 μέτρα, ενώ στα 330 περίπου μέτρα παρατηρείται ανωμαλία που παραπέμπει σε επαφή γεωλογικών σχηματισμών.



Σχήμα 5.29 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 5

Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει τα πρώτα μέτρα ως αγώγιμα, με εναλλαγές στις τιμές των αντιστάσεων να λαμβάνουν χώρα στα 170, 230 και 270 περίπου μέτρα, με μία ζώνη με κέντρο τα 250 μέτρα να εμφανίζεται ως πολύ αγώγιμη, η οποία χωρικά συμπίπτει με την επαφή του σχηματισμού του διμαρμαρυγιακού γνευσίου με το σιδηρούν κάλυμμα, αποτελεί όμως παράλληλα και προϊόν της ένωσης των δύο οδεύσεων, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται ως πολύ αγώγιμη ζώνη.

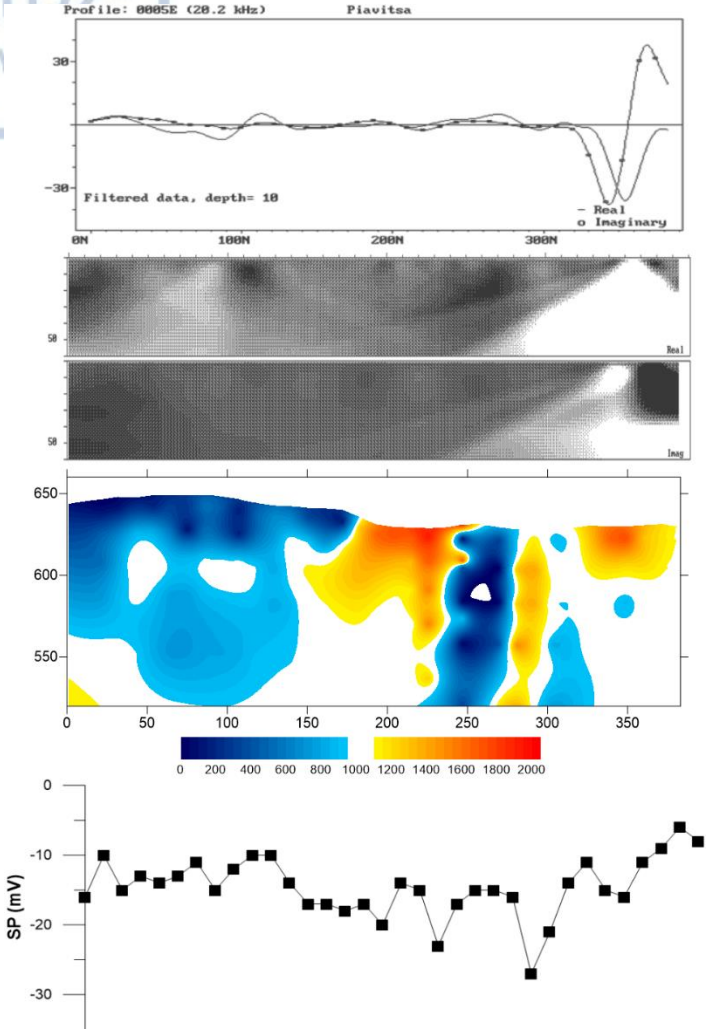
5.5.3 Συνδυαστική ερμηνεία

Η συνδυαστική εικόνα όλων των παραπάνω για την 5^{η} περιοχή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.30. Σε αυτήν διακρίνονται με την σειρά τα φιλτραρισμένα δεδομένα VLF, το μοντέλο της πυκνότητας ρεύματος, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των δεδομένων VLF καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση που έχουν αυτά στον χώρο.

Τα δεδομένα του φυσικού δυναμικού σε σχέση με αυτά του VLF δε συγκλίνουν στην ένδειξη καθαρής μεταλλοφορίας, γεγονός το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι το VLF επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το διαταραγμένο περιβάλλον στο οποίο λαμβάνουν χώρα οι μετρήσεις.

Με βάση τα δεδομένα φυσικού δυναμικού, και των αρνητικών ανωμαλιών που παρατηρούνται, η ζώνη από τα 50 έως τα 250 μέτρα της όδευσης (350 έως 150 μέτρα της όδευσης VLF, αντίστοιχα), η οποία αντιστοιχεί χωρικά στο σχηματισμό του σιδηρούν καλύμματος, μπορεί να χαρακτηριστεί ως ζώνη διάσπαρτης μεταλλοφορίας στην οποία όμως συμμετέχουν λίγα μεταλλικά ορυκτά, καθώς τόσο τα δεδομένα φυσικού δυναμικού, όσο και τα δεδομένα VLF δεν παρουσιάζουν αξιοσημείωτες ανωμαλίες.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



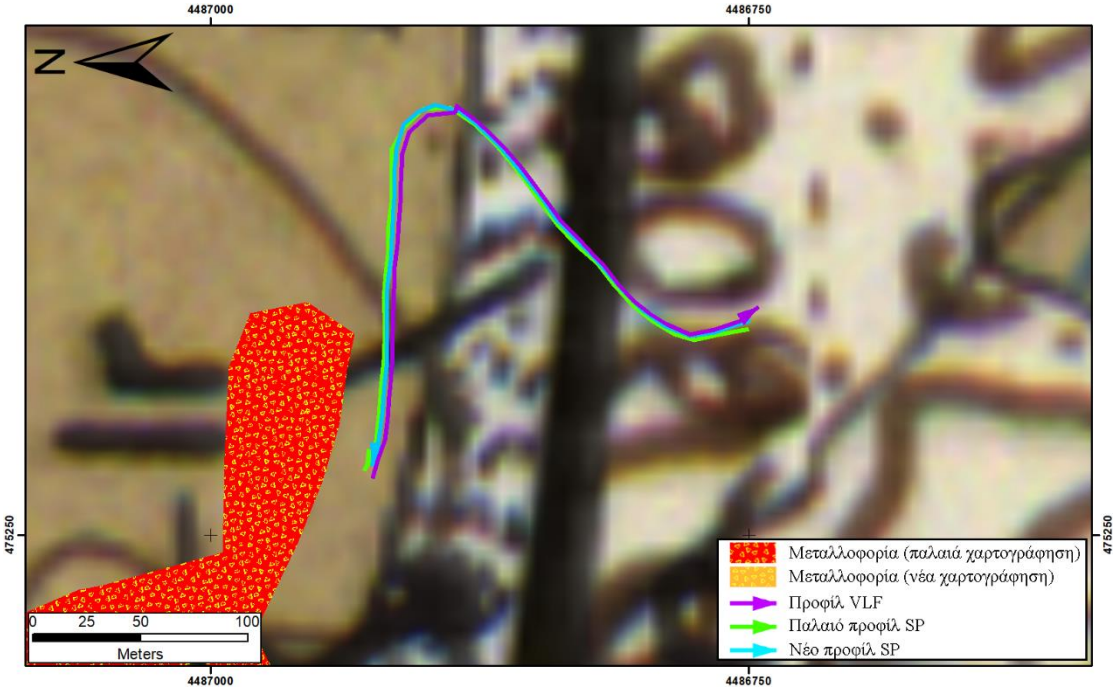
Σχήμα 5.30 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 5

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

5.6 Περιοχή 6η

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στην 6η περιοχή, καθώς και η γεωλογία σε αυτήν (Σχήμα 5.31).



Σχήμα 5.31 Δομή και γεωλογία της 6ης περιοχής

Πραγματοποιήθηκε μέτρηση φυσικού δυναμικού με τα παλαιά και τα νέα ηλεκτρόδια κατά μήκος ενός δρόμου, καθώς και μέτρηση VLF με την αντίθετη φορά. Οι σχηματισμοί που συναντώνται είναι οι άμμοι με τις κροκάλες στα πρώτα 90 περίπου μέτρα των οδεύσεων φυσικού δυναμικού, όπου το ρήγμα του Στρατωνίου τις φέρνει σε επαφή με το σιδηρούν κάλυμμα το οποίο συνεχίζει έως τα 180 μέτρα, ενώ στη συνέχεια επικρατεί ο σχηματισμός του διμαρμαρυγιακού γνεύσιου.

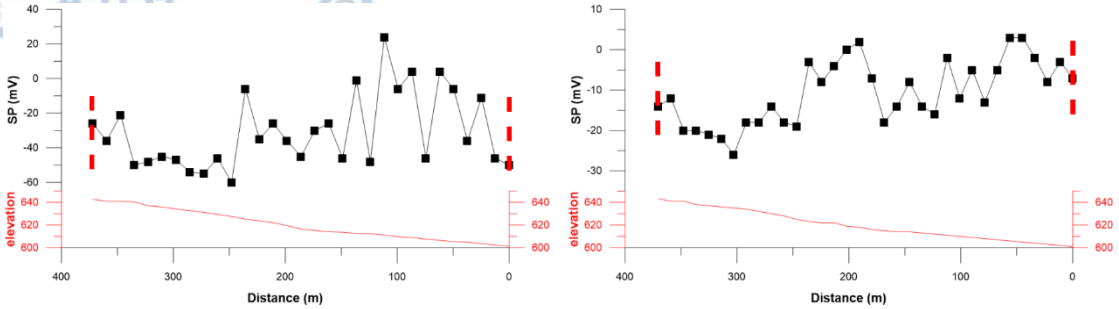
5.6.1 Φυσικό Δυναμικό

Οι καμπύλες του φυσικού δυναμικού, τόσο για τα παλιά όσο και για τα καινούρια ηλεκτρόδια, στην περιοχή που οι μετρήσεις είναι κοινές (κόκκινες παύλες) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.32.

Οι καμπύλες αυτές παρουσιάζουν μία αρκετά παρόμοια εικόνα, ιδιαίτερα στα τελευταία μέτρα της όδευσης, με σημαντικές αυξομειώσεις τιμών στα πρώτα 150 περίπου μέτρα, γεγονός που πιθανά οφείλεται στο ρήγμα του Στρατωνίου που συναντάται στα 80 μέτρα της όδευσης, δημιουργώντας μία ευρεία διαταραγμένη ζώνη. Στη συνέχεια της όδευσης, όπου συναντάται ο σχηματισμός του διμαρμαρυγιακού γνεύσιου, παρουσιάζεται μία μείωση των τιμών του φυσικού δυναμικού, γεγονός που μπορεί να οφείλεται τόσο από την συνέχεια της μεταλλοφόρας ζώνης έως το σημείο

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

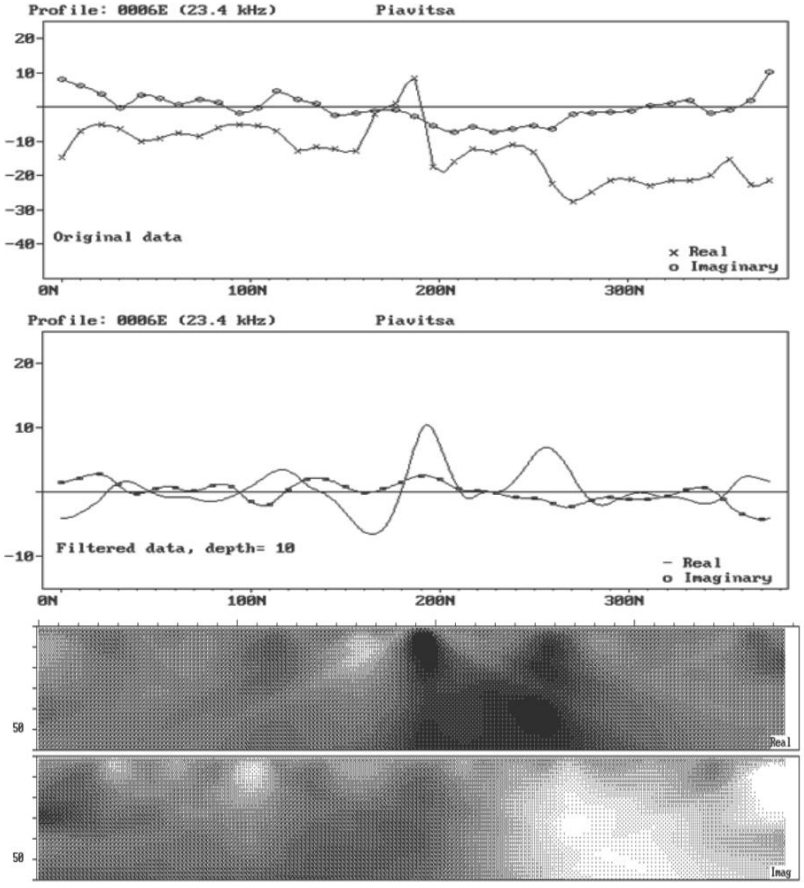
της όδευσης, όσο και από την συνέχιση της μεταλλοφορίας του σχηματισμού του σιδηρούν καλύμματος στον σχηματισμό του γνευσίου.



Σχήμα 5.32 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 6

5.6.2 VLF

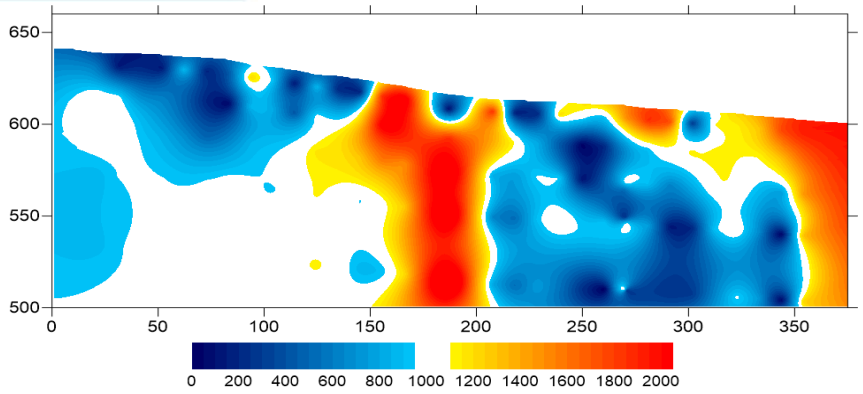
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το φιλτράρισμα των δεδομένων VLF παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.33, ενώ τα αποτελέσματα της αντιστροφής των δεδομένων στο Σχήμα 5.34. Η εικόνα που παρουσιάζεται, αξίζει να σημειωθεί, πως είναι προϊόν ένωσης δύο οδεύσεων με διαφορετικούς προσανατολισμούς σε μία, η οποία ένωση λαμβάνει χώρα στα 190 μέτρα του προφίλ.



Σχήμα 5.33 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 6

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Με βάση τα φιλτραρισμένα δεδομένα παρατηρούνται αγώγιμες ζώνες στα 120, 190, 250 και 350 μέτρα της όδευσης, από τις οποίες η πρώτη και η τελευταία μπορούν να θεωρηθούν ως ιδιαίτερα αγώγιμες.



Σχήμα 5.34 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 6

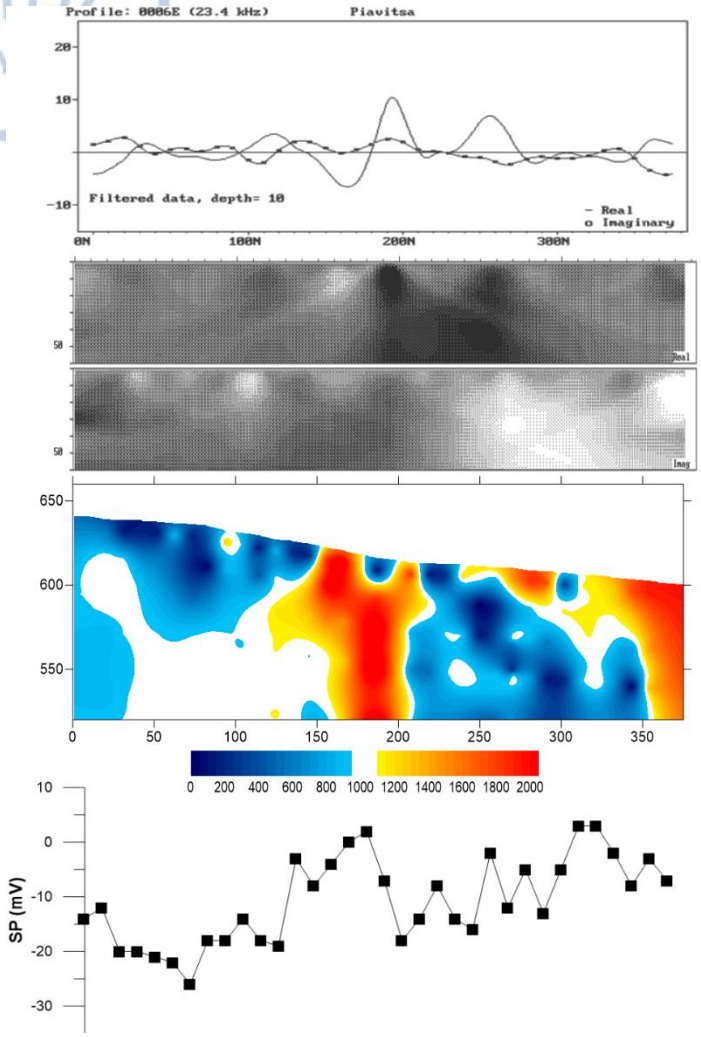
Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει υψηλές αντιστάσεις στα 175 περίπου μέτρα, τα οποία συμπίπτουν χωρικά στη ζώνη που ο διμαρμαρυγιακός γνεύσιος συναντά το σιδηρούν κάλυμμα, όμως οι ιδιαίτερα ψηλές αυτές αντιστάσεις αποτελούν προϊόν της ένωσης των δύο οδεύσεων και δεν έχουν κάποιο γεωλογικό αντίκρυσμα.

5.6.3 Συνδυαστική ερμηνεία

Η συνδυαστική εικόνα όλων των παραπάνω για την 6η περιοχή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.35. Σε αυτήν διακρίνονται με την σειρά τα φιλτραρισμένα δεδομένα VLF, το μοντέλο της πυκνότητας ρεύματος, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των δεδομένων VLF καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση που έχουν αυτά στον χώρο.

Με βάση τα δεδομένα του φυσικού δυναμικού τα τελευταία 130 μέτρα (10ο έως 140ο μέτρο της όδευσης VLF) παρουσιάζουν μία πτώση τιμών, δημιουργώντας αρνητική ανωμαλία φυσικού δυναμικού, η οποία μπορεί να έχει σχηματιστεί από διάσπαρτη μεταλλοφορία στην περιοχή. Χωρικά η ζώνη αυτή παρουσιάζεται στον σχηματισμό του γνευσίου, μεταξύ του σχηματισμού του σιδηρούν καλύμματος και της χαρτογραφημένης μεταλλοφόρας ζώνης, με αποτέλεσμα να υποδεικνύει τη συνέχεια της και Νοτιότερα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



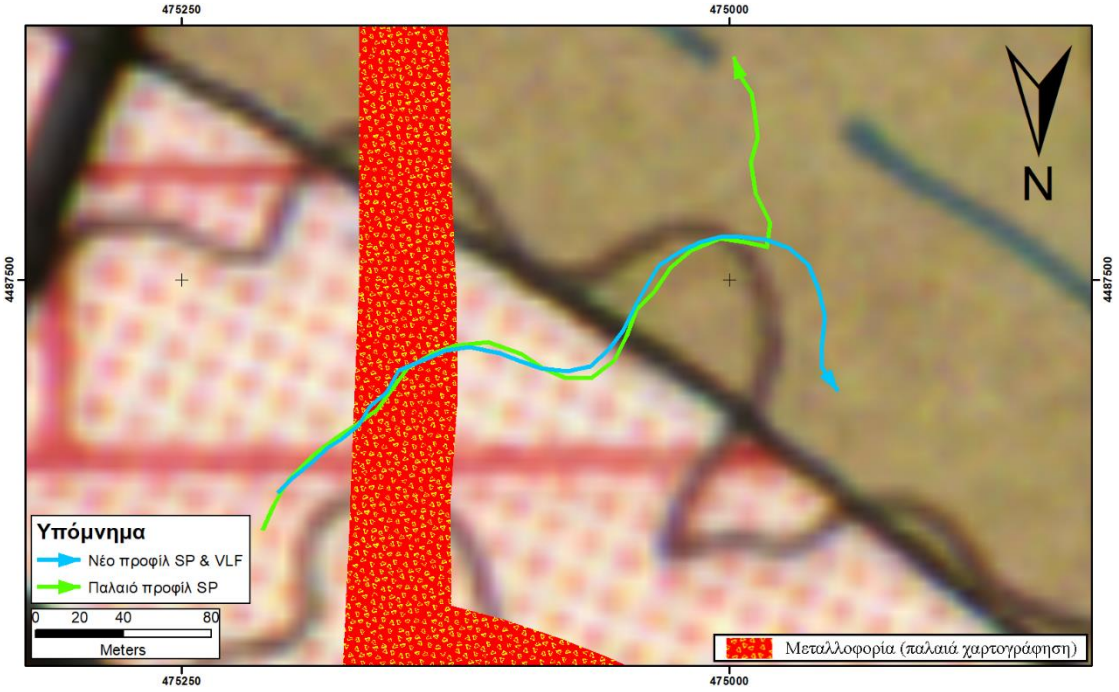
Σχήμα 5.35 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 6

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

5.7 Περιοχή 7η

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στην 7η περιοχή, καθώς και η γεωλογία σε αυτήν (Σχήμα 5.36).

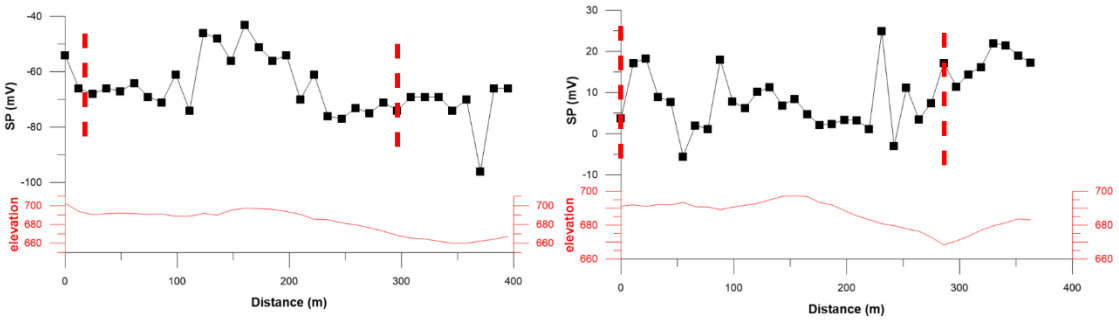


Σχήμα 5.36 Δομή και γεωλογία της 7ης περιοχής

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φυσικού δυναμικού τόσο με τα παλιά όσο και με τα νέα ηλεκτρόδια, καθώς και μέτρηση VLF κατά μήκος ενός δρόμου, με φορά προς τα Δυτικά. Αρχικά συναντάται ο σχηματισμός των μαρμάρων, τα οποία στη συνέχεια των οδεύσεων έρχονται σε επαφή με τον διμαρμαρυγιακό γνεύσιο.

5.7.1 Φυσικό Δυναμικό

Οι καμπύλες του φυσικού δυναμικού, τόσο για τα παλιά όσο και για τα καινούρια ηλεκτρόδια, στην περιοχή που οι μετρήσεις είναι κοινές (κόκκινες παύλες) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.37.



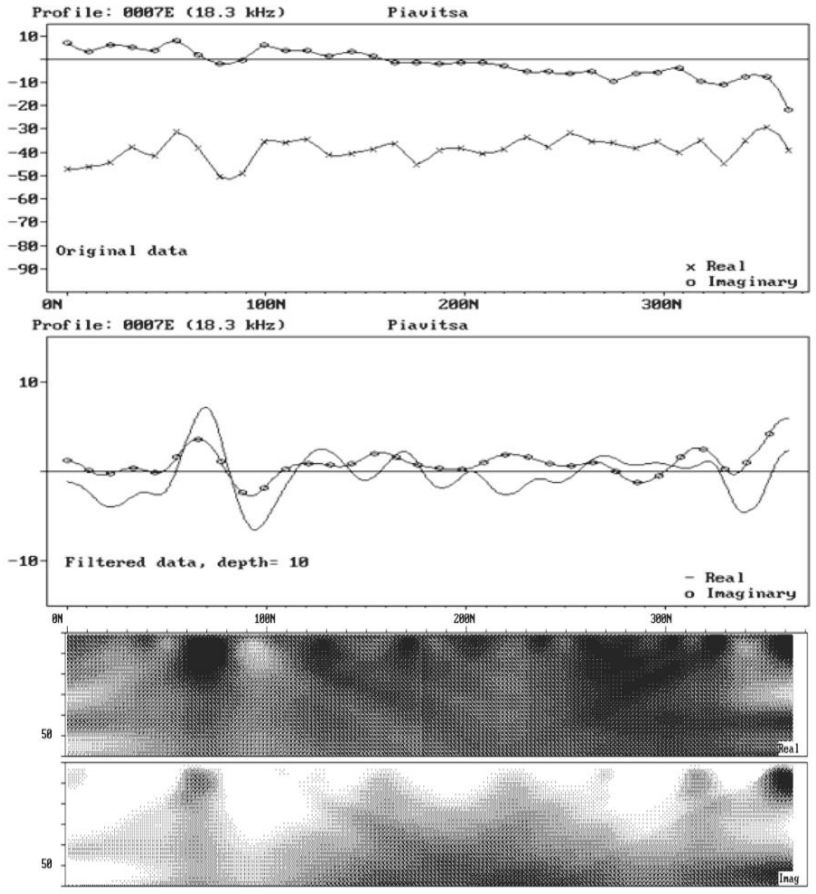
Σχήμα 5.37 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 7

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Οι δύο καμπύλες φαίνεται να παρουσιάζουν διαφορετικές εικόνες στο κέντρο των οδεύσεων. Η χαρτογραφημένη ζώνη μεταλλοφορίας, η οποία εμφανίζεται από τα 65 έως τα 125 μέτρα της όδευσης με τα παλαιά ηλεκτρόδια, και από τα 45 έως τα 105 μέτρα με τα καινούρια, παρουσιάζει διαφορετική υπογραφή στις δύο οδεύσεις, με την πρώτη να παρουσιάζει μία αύξηση των τιμών, ενώ στην δεύτερη μείωση. Παρότι η χαρτογράφηση οριοθετεί την μεταλλοφορία σε αυτά τα μέτρα, η μορφή του φυσικού δυναμικού στην καμπύλη με τα νέα ηλεκτρόδια, η οποία παρουσιάζει μειωμένες τιμές έως τα 210 περίπου μέτρα υποδεικνύει την περαιτέρω συνέχιση της προς τα Δυτικά.

5.7.2 VLF

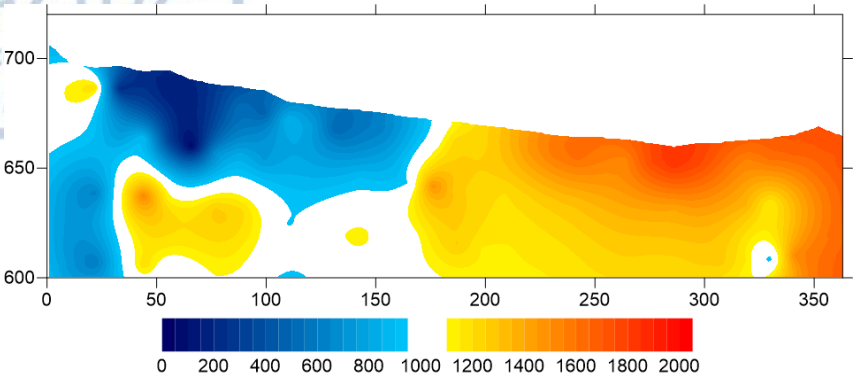
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το φιλτράρισμα των δεδομένων VLF παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.38, ενώ τα αποτελέσματα της αντιστροφής των δεδομένων στο Σχήμα 5.39.



Σχήμα 5.38 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 7

Με βάση τα φιλτραρισμένα δεδομένα, διακρίνεται μία αγώγιμη ζώνη στα 75 περίπου μέτρα του προφίλ, ενώ εκατέρωθεν αυτής παρατηρούνται ανωμαλίες που παραπέμπουν σε επαφή γεωλογικών σχηματισμών, οι οποίες αντιστοιχούν χωρικά με τα χαρτογραφημένα όρια της ζώνης μεταλλοφορίας, η οποία συναντάται από τα 45 έως τα 105 μέτρα της όδευσης.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.39 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 7

Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει τα πρώτα μέτρα, στο οποίο κυριαρχεί ο σχηματισμός του μαρμάρου, με χαμηλότερες αντιστάσεις, ενώ αποδίδεται πολύ καλά η επαφή του με τον διμαρμαρυγιακό γνεύσιο στα 185 μέτρα, καθώς και οι πολύ υψηλές αντιστάσεις του τελευταίου. Η χαρτογραφημένη μεταλλοφόρα ζώνη αποδίδεται ως μία ζώνη με χαμηλές αντιστάσεις, και πιο συγκεκριμένα με πολύ χαμηλές με κέντρο στα 70 μέτρα.

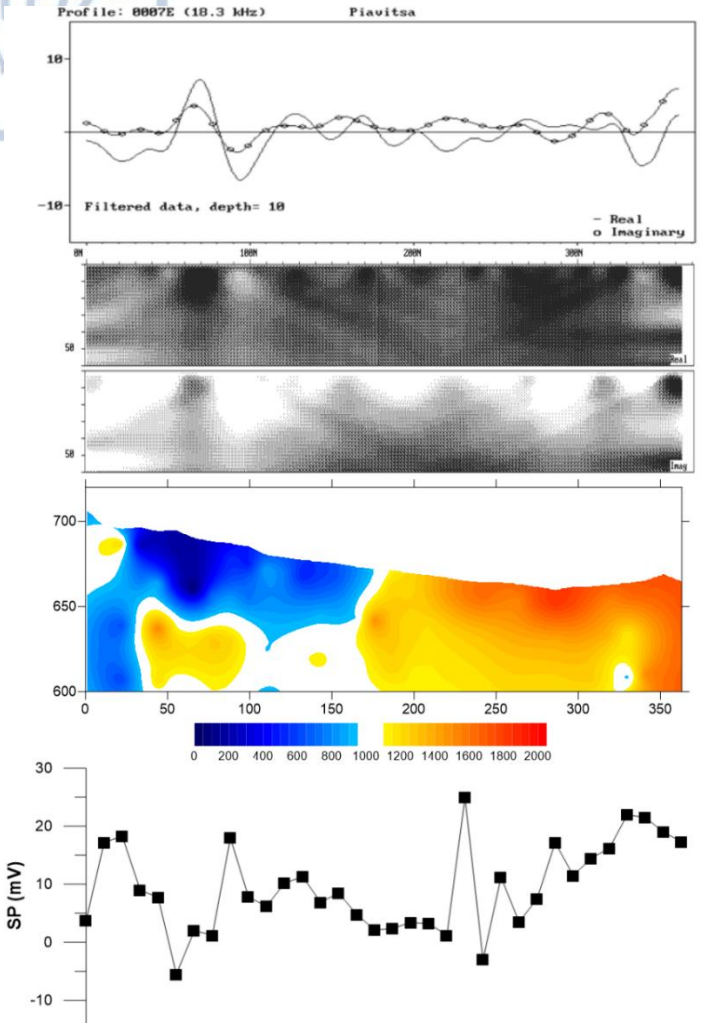
5.7.3 Συνδυαστική ερμηνεία

Η συνδυαστική εικόνα όλων των παραπάνω για την 7η περιοχή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.40. Σε αυτήν διακρίνονται με την σειρά τα φιλτραρισμένα δεδομένα VLF, το μοντέλο της πυκνότητας ρεύματος, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των δεδομένων VLF καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση που έχουν αυτά στον χώρο.

Παρατηρείται η ύπαρξη μίας αγώγιμης ζώνης με κέντρο τα 70 μέτρα στο προφίλ VLF, η οποία συμπίπτει με μία μείωση των τιμών του φυσικού δυναμικού στο ίδιο σημείο, με τα στοιχεία του VLF και του φυσικού δυναμικού να υποδεικνύουν την πιθανή συνέχεια της έως την επαφή του σχηματισμού των μαρμάρων με τον γνεύσιο.

Επιπρόσθετα, από γεωλογική σκοπιά, παρατηρείται η πολύ καλή συμφωνία του μοντέλου των αντιστάσεων από την αντιστροφή των δεδομένων VLF με τον χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε., όπου διακρίνεται εμφανώς η επαφή του σχηματισμού του μαρμάρου, το οποίο παρουσιάζεται με χαμηλότερες αντιστάσεις, σε σχέση με τον σχηματισμό του διμαρμαρυγιακού γνεύσιου, ο οποίος εμφανίζει υψηλότερες τιμές. Η επαφή αυτή σημειώνεται στον χάρτη στα 185 μέτρα της όδευσης, ακριβώς στο σημείο που εμφανίζεται και στο μοντέλο του VLF.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



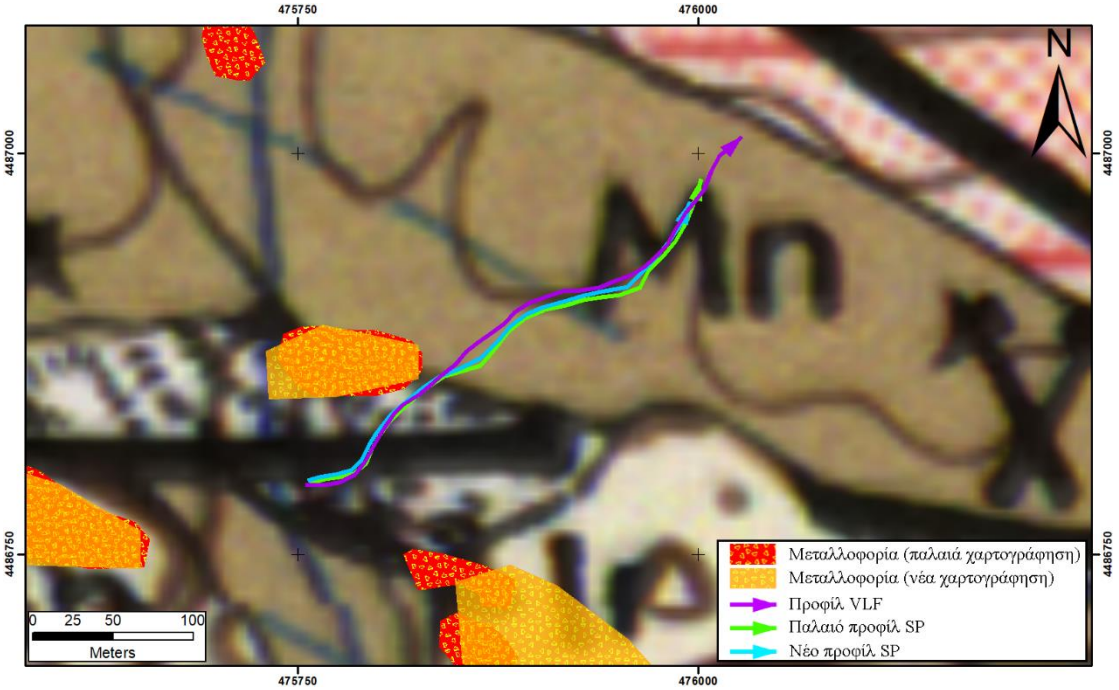
Σχήμα 5.40 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 7

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

5.8 Περιοχή 8η

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στην 8η περιοχή, καθώς και η γεωλογία σε αυτήν (Σχήμα 5.41).



Σχήμα 5.41 Δομή και γεωλογία της 8ης περιοχής

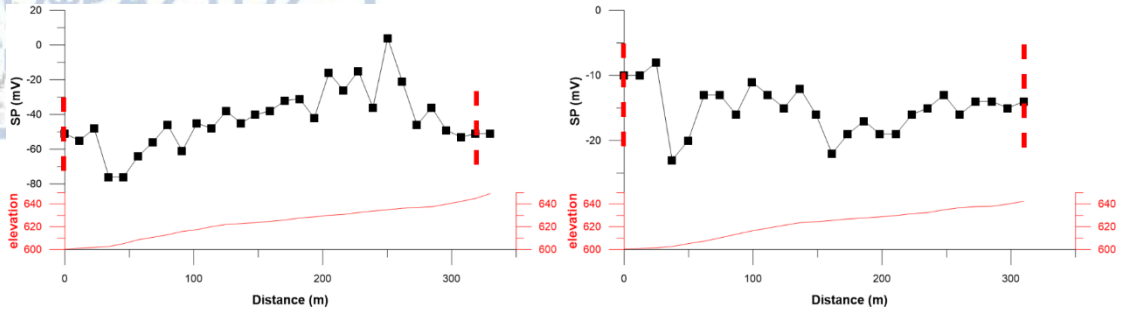
Πραγματοποιήθηκε μέτρηση φυσικού δυναμικού με τα παλαιά και τα νέα ηλεκτρόδια, καθώς και μέτρηση VLF με Βορειοανατολική φορά, κατά μήκος ενός δρόμου. Στα πρώτα 80 περίπου μέτρα της όδευσης συναντάται το ρήγμα του Στρατωνίου και επικρατεί ο σχηματισμός του σιδηρούν καλύμματος, ενώ στη συνέχεια και μέχρι το τέλος της όδευσης κυριαρχεί ο σχηματισμός του διμαρμαρυγιακού γνεύσιου.

5.8.1 Φυσικό Δυναμικό

Οι καμπύλες του φυσικού δυναμικού, τόσο για τα παλιά όσο και για τα καινούρια ηλεκτρόδια, στην περιοχή που οι μετρήσεις είναι κοινές (κόκκινες παύλες) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.42.

Αξίζει να σημειωθεί πως η μορφή της καμπύλης με τα παλαιά ηλεκτρόδια, καθώς και το ανάγλυφο στο προφίλ αυτό παρουσιάζει παραπλήσια εικόνα με το φυσικό δυναμικό με τα παλαιά ηλεκτρόδια στην 3η περιοχή (κεφ. 5.3.1), δηλαδή εμφανίζει μία αρνητική ανωμαλία της τάξης των -30 mV στα πρώτα 80 περίπου μέτρα, γεγονός που υποδεικνύει την συνέχεια της μεταλλοφόρας περιοχής που βρίσκεται Βορειοδυτικά της όδευσης, στα Νοτιοανατολικά.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.42 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 8

Όσο αφορά την καμπύλη με τα νέα ηλεκτρόδια, παρατηρείται η ομοιότητά της με την αντίστοιχη μέτρηση στην 4η περιοχή (κεφ. 5.4.1), καθώς αποτελούν οδεύσεις με κοινή αρχή σε διαφορετικά κομμάτια δρόμου, και υποδεικνύουν αμφότερες την ύπαρξη μιας ευρύτερης ζώνης διάσπαρτης μεταλλοφορίας με φορά ΒΒΔ-ΝΝΑ στην περιοχή, όπως φαίνεται και στον γεωλογικό χάρτη.

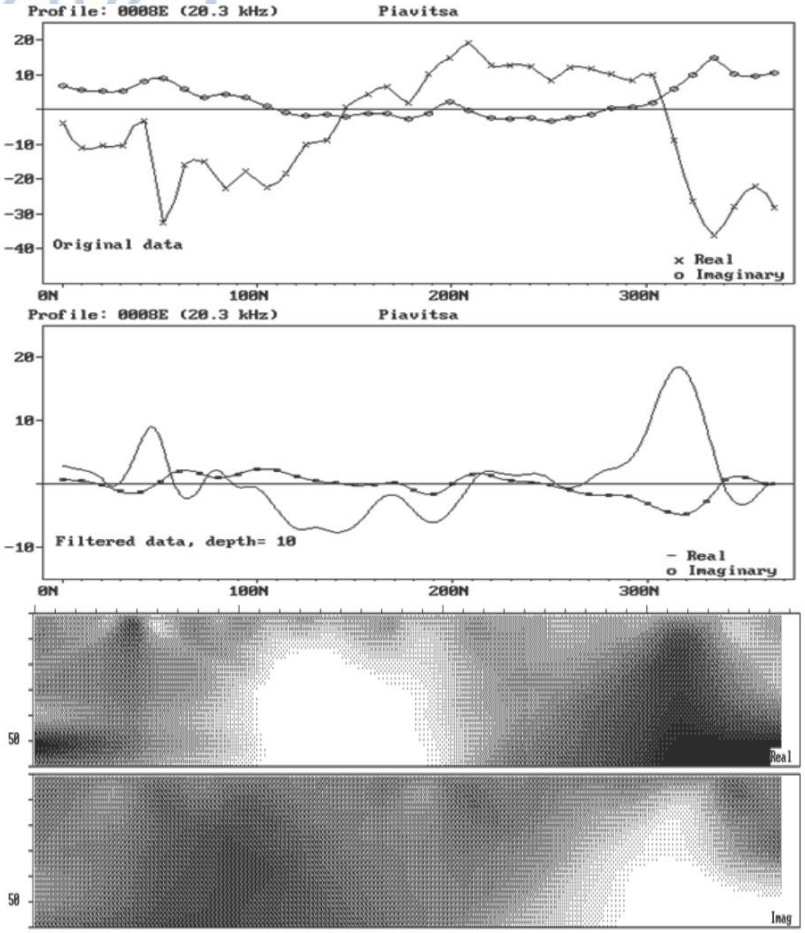
5.8.2 VLF

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το φιλτράρισμα των δεδομένων VLF παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.43, ενώ τα αποτελέσματα της αντιστροφής των δεδομένων στο Σχήμα 5.44.

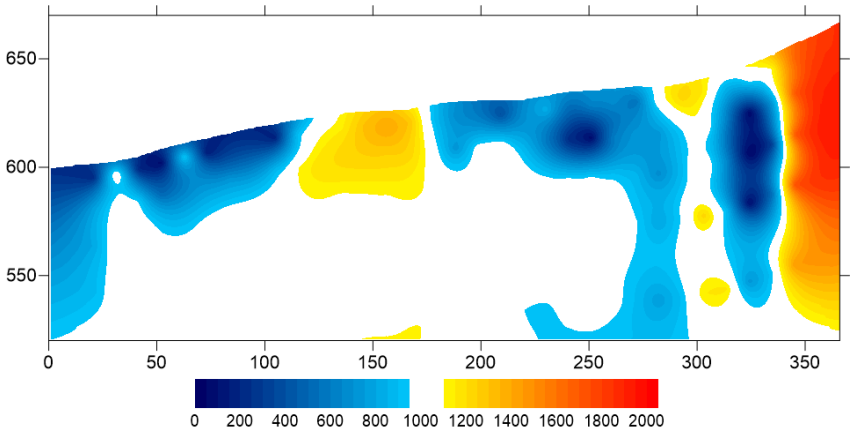
Με βάση τα φιλτραρισμένα δεδομένα, διακρίνεται μία αγώγιμη ζώνη στα 40 μέτρα της όδευσης, καθώς και μία ακόμη, με μεγαλύτερο πλάτος ανωμαλίας, με κέντρο τα 320 μέτρα της όδευσης, η οποία λαμβάνοντας υπόψη την φανταστική συνιστώσα παραπέμπει σε ακόμη πιο αγώγιμη ζώνη σε σχέση με την πρώτη. Επιπλέον, παρατηρείται μία ανωμαλία στα 110 περίπου μέτρα της όδευσης η οποία παραπέμπει σε επαφή γεωλογικών σχηματισμών. Χωρικά, στο σημείο αυτό παρατηρείται η επαφή μεταξύ του σχηματισμού του σιδηρούν καλύμματος με τον διμαρμαρυγιακό γνεύσιο.

Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει τα πρώτα 110 περίπου μέτρα ως αγώγιμα, στα οποία συναντάται ο σχηματισμός του σιδηρούν καλύμματος, ενώ παρατηρείται και η αλλαγή των τιμών των αντιστάσεων στο σημείο αυτό, όπου λαμβάνει χώρα η αλλαγή στον σχηματισμό του γνευσίου. Επιπλέον, το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει κι αυτό μία πολύ αγώγιμη ζώνη με κέντρο τα 320 μέτρα του μοντέλου.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.43 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 8



Σχήμα 5.44 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 8

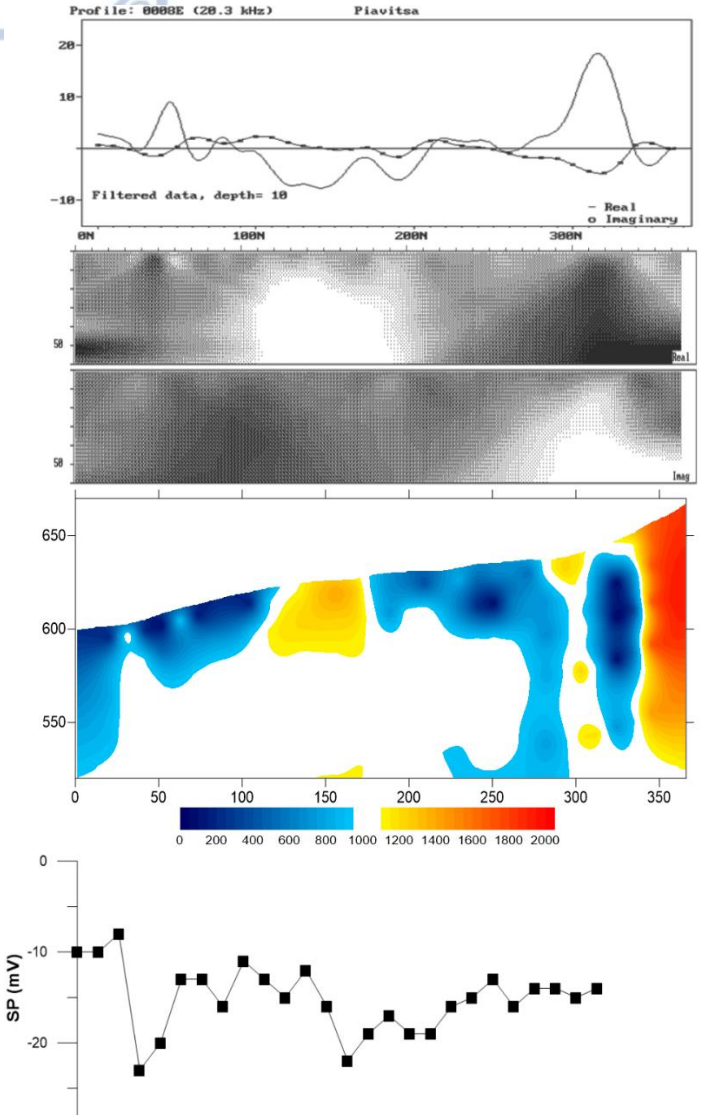
5.8.3 Συνδυαστική ερμηνεία

Η συνδυαστική εικόνα όλων των παραπάνω για την 8^{η} περιοχή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.45. Σε αυτήν διακρίνονται με την σειρά τα φιλτραρισμένα δεδομένα VLF, το μοντέλο της πυκνότητας ρεύματος, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

αντιστροφή των δεδομένων VLF καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση που έχουν αυτά στον χώρο.



Σχήμα 5.45 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 8

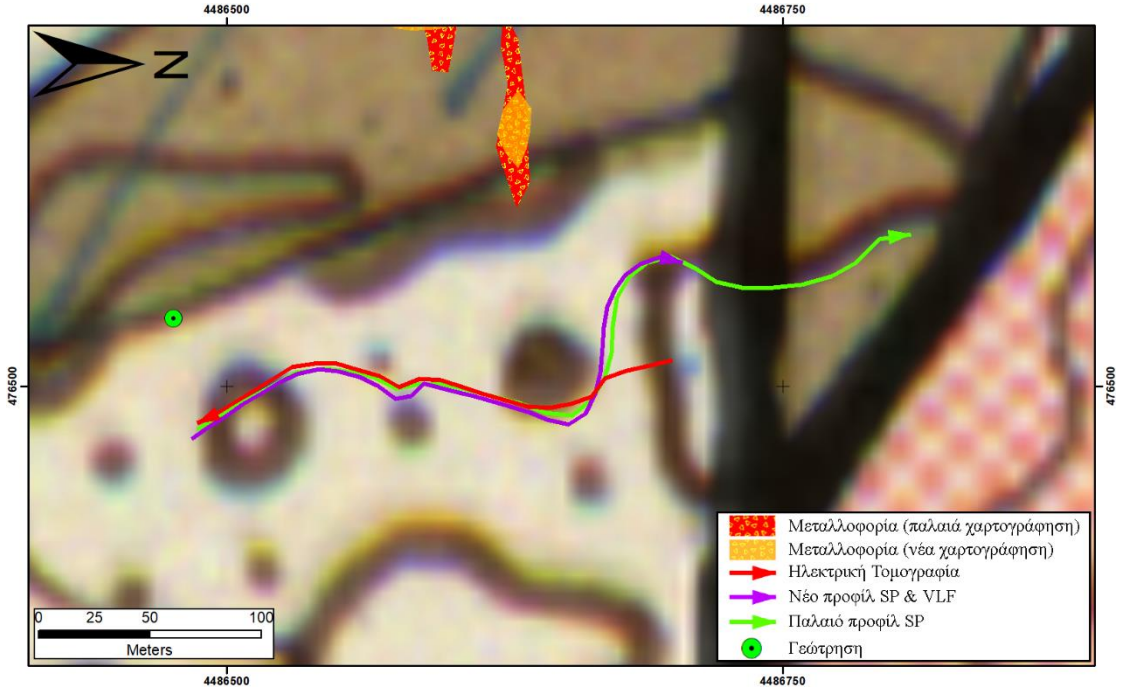
Παρατηρείται η καλή συμφωνία των δεδομένων VLF με αυτά του φυσικού δυναμικού, όσο αφορά την αγώγιμη ζώνη με κέντρο τα 40 μέτρα των οδεύσεων, η οποία χωρικά συμπίπτει με την χαρτογραφημένη μεταλλοφόρα ζώνη.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

5.9 Περιοχή 9η

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στην 9η περιοχή, καθώς και η γεωλογία σε αυτήν (Σχήμα 5.46).



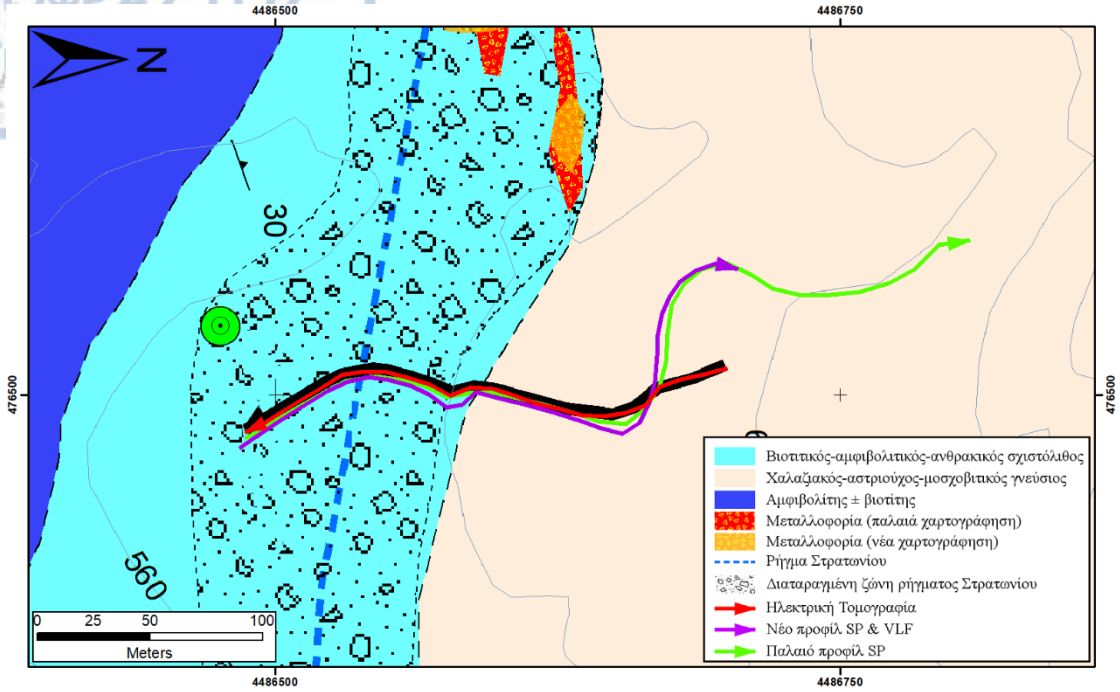
Σχήμα 5.46 Δομή και γεωλογία της 9ης περιοχής

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας με φορά προς το Νότο, μετρήσεις φυσικού δυναμικού με τα παλιά όσο και με τα νέα ηλεκτρόδια, καθώς και μέτρηση VLF με φορά προς το Βορρά. Ο σχηματισμός που κυριαρχεί σε ολόκληρη την περιοχή είναι οι άμμοι με τις κροκάλες, ενώ η όδευση του φυσικού δυναμικού με τα παλιά ηλεκτρόδια συναντά και τον σχηματισμό του διμαρμαρυγιακού γνευσίου στα τελευταία μέτρα της όδευσης.

Ένας επιπλέον χάρτης που προέκυψε από την γεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής σε προηγούμενες μελέτες παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.47. Σε αυτόν διακρίνεται η θέση της ηλεκτρικής τομογραφίας, με τα πρώτα μέτρα της να βρίσκονται στον σχηματισμό του γνευσίου, ενώ από το κέντρο αυτής και μετά επικρατεί ο σχηματισμός του σχιστολίθου, ο οποίος είναι διαταραγμένος λόγω της δράσης του ρήγματος του Στρατωνίου.

Η γεώτρηση, στην θέση που φαίνεται στον χάρτη, δίνει στοιχεία για μία επιφανειακή διαβρωμένη ζώνη έως το βάθος των 10 περίπου μέτρων, τα επόμενα 10 μέτρα αποτελούνται από τεκτονίτη (λεπτόκοκκο υλικό που δημιουργείται εξαιτίας της δράσης τεκτονικών δυνάμεων και τριβής μεταξύ πετρωμάτων) με πρωτόλιθο ανθρακικό σχιστόλιθο, από τα 20 έως τα 35 περίπου μέτρα κυριαρχεί σχιστόλιθος που αναφέρεται ως βιοτιτικός-αμφιβολιτικός-ανθρακικός, ενώ στη συνέχεια και έως το βάθος που μελετάται η ζώνη χαρακτηρίζεται ως ρηξιγενής.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.47 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για την 9η περιοχή

5.9.1 Ηλεκτρική Τομογραφία

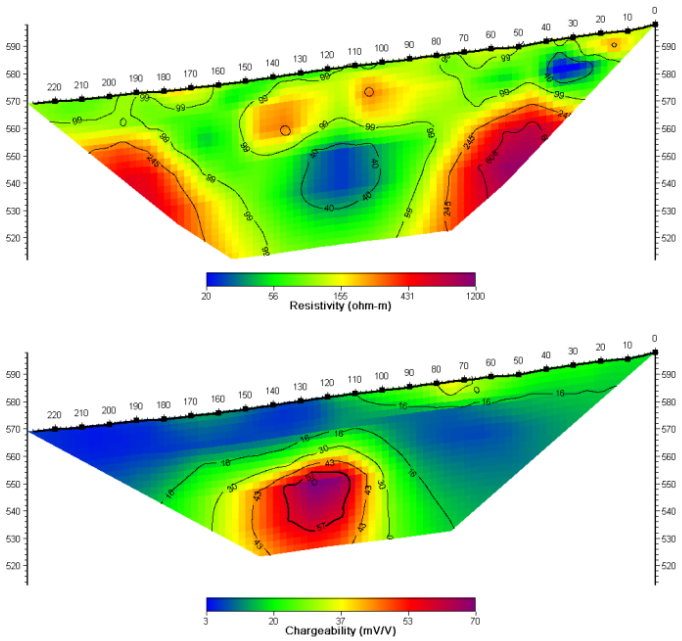
Τα αποτελέσματα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της φορτιστικότητας για την περιοχή αυτή παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.48.

Το μοντέλο των αντιστάσεων έρχεται σε καλή συμφωνία με τον χάρτη που προέκυψε από τη γεωλογική χαρτογράφηση, καθώς στα πρώτα μέτρα του προφίλ εμφανίζονται πολύ μεγάλες αντιστάσεις ($> 600\ \Omega\text{hm.m}$), στο κέντρο αυτού εμφανίζεται μία ρηξιγενής ζώνη με εύρος 80 περίπου μέτρων ($80 - 160\text{m}$), η οποία αποτελεί την διαταραγμένη ζώνη εξαιτίας της δράσης του ρήγματος του Στρατωνίου, καθώς και αντιστάσεις μικρότερες από αυτές του γνευσίου στο τέλος του προφίλ ($> 200\ \Omega\text{hm.m}$) που παραπέμπουν στον σχηματισμό του διαταραγμένου σχιστολίθου.

Ενδιαφέρον παρουσιάζεται στο κέντρο των γεωηλεκτρικών μοντέλων, όπου εμφανίζονται πολύ μικρές αντιστάσεις ($< 40\ \Omega\text{hm.m}$) και υψηλές τιμές φορτιστικότητας ($> 60\ \text{mV/V}$), οι οποίες παρουσιάζουν παραπλήσια εικόνα με αυτές του $1^{ου}$ προφίλ (κεφ. 5.1.1) και υποδεικνύουν την ύπαρξη μεταλλοφορίας στην ζώνη αυτή.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

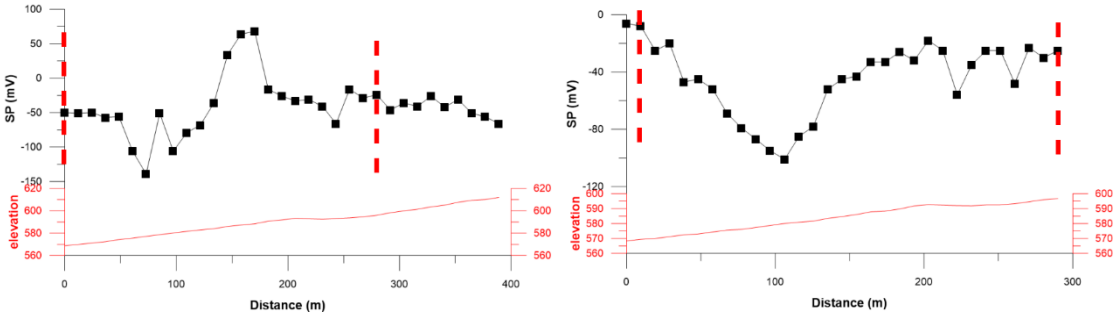
Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλ Α.Π.Θ



Σχήμα 5.48 Μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (α) και επαγόμενης πόλωσης (β) για την περιοχή 9

5.9.2 Φυσικό δυναμικό

Οι καμπύλες του φυσικού δυναμικού, τόσο για τα παλιά όσο και για τα καινούρια ηλεκτρόδια, στην περιοχή που οι μετρήσεις είναι κοινές (κόκκινες παύλες) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.49.



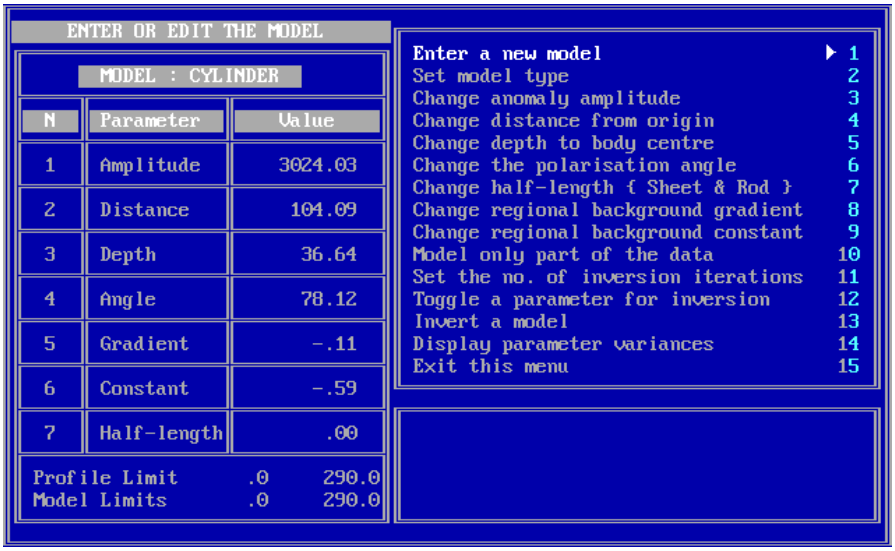
Σχήμα 5.49 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 9

Οι καμπύλες εμφανίζουν παρόμοια εικόνα, εκτός από ένα κομμάτι τριών μετρήσεων στα 150 περίπου μέτρα της όδευσης με τα παλαιά ηλεκτρόδια, οι οποίες χαρακτηρίζονται είτε ως σφαλματικές, είτε ως ένα εποχικό φαινόμενο (άνοδος ρευστών σε ζώνη ρήγματος) το οποίο δεν εμφανίστηκε στις μετρήσεις με τα νέα ηλεκτρόδια. Μία μεγάλη αρνητική ανωμαλία της τάξης των -80 mV εμφανίζεται και στις δύο οδεύσεις στα 100 περίπου μέτρα των οδεύσεων, η οποία παραπέμπει σε ζώνη μεταλλοφορίας.

Με βάση την εικόνα που προέκυψε από την ηλεκτρική τομογραφία, παρατηρείται πως η ανωμαλία που παρουσιάζει το φυσικό δυναμικό δημιουργείται από έναν

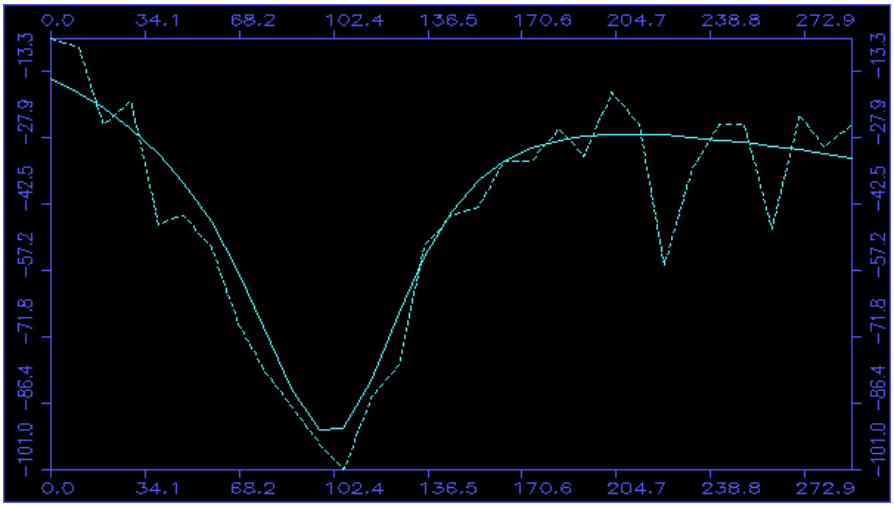
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

κυλινδρικό στόχο. Έτσι, επιλέγοντας αυτό ως γεωμετρικό σχήμα και γνωρίζοντας πως η ανωμαλία σχηματίζεται περίπου στα 110 μέτρα της όδευσης, καθώς και το βάθος που συναντάται ο στόχος είναι περίπου τα 30 μέτρα, το μοντέλο που προκύπτει μέσω του λογισμικού SPINV είναι το ακόλουθο (Σχήμα 5.50).



Σχήμα 5.50 Παράμετροι που χαρακτηρίζουν την ανωμαλία φυσικού δυναμικού στην περιοχή 9

Αντίστοιχα, η εικόνα που προκύπτει από τα συνθετικά δεδομένα με αυτές τις παραμέτρους (συνεχής καμπύλη) σε σχέση με την καμπύλη των πραγματικών δεδομένων (διακεκομμένη καμπύλη) παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.51.



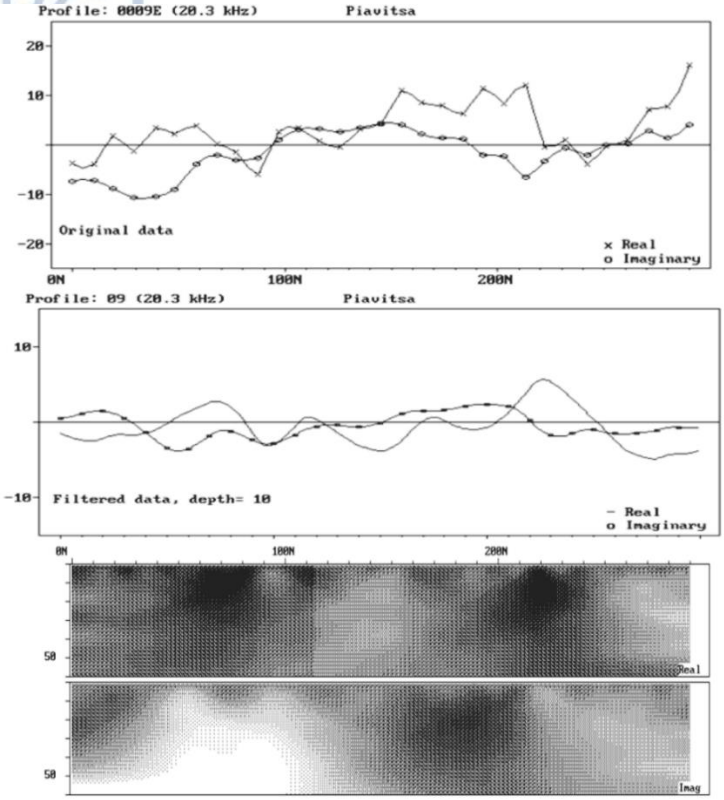
Σχήμα 5.51 Συνθετική καμπύλη φυσικού δυναμικού σε σχέση με την μετρημένη για την περιοχή 9

5.9.3 VLF

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το φιλτράρισμα των δεδομένων VLF παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.52, ενώ τα αποτελέσματα της αντιστροφής των δεδομένων στο Σχήμα 5.53.

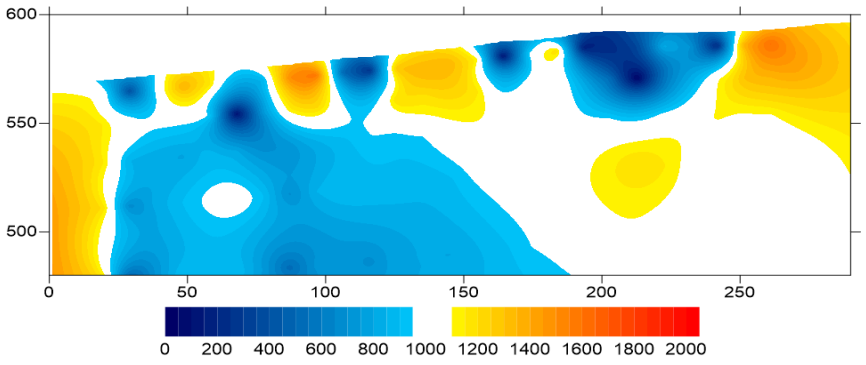
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ



Σχήμα 5.52 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 9

Με βάση τα φιλτραρισμένα δεδομένα, διακρίνεται μία πολύ αγώγιμη ζώνη με κέντρο τα 75 μέτρα η οποία παραπέμπει σε αργιλική πλήρωση ή μεταλλοφορία, καθώς και μία ακόμη στα 220 μέτρα η οποία παραπέμπει σε μία λιγότερο αγώγιμη ζώνη.



Σχήμα 5.53 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 9

Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει χαμηλές αντιστάσεις από τα 25 έως τα 150 περίπου μέτρα, ενώ εμφανίζεται και ένας πολύ αγώγιμος επιφανειακός στόχος στα 210 περίπου μέτρα του προφίλ.

5.9.4 Συνδυαστική ερμηνεία

Η συνδυαστική εικόνα όλων των αποτελεσμάτων των μεθόδων για την 9η περιοχή, δηλαδή τα φιλτραρισμένα δεδομένα VLF, το μοντέλο της πυκνότητας

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ

ρεύματος, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των δεδομένων VLF, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των τομογραφικών δεδομένων, το μοντέλο της φορτιστικότητας καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση τους στον χώρο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.54.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή στο 110^{ο} περίπου μέτρο των οδεύσεων, όπου εμφανίζονται πολύ χαμηλές αντιστάσεις, υψηλές τιμές φορτιστικότητας και μεγάλη αρνητική καμπύλη φυσικού δυναμικού, τα οποία υποδεικνύουν την ύπαρξη μεταλλοφορίας στην ζώνη αυτή.

Η θέση της ζώνης αυτής στον χάρτη που προέκυψε από τη γεωλογική χαρτογράφηση βρίσκεται στην επαφή του γνευσίου με τον σχιστόλιθο, ενώ συμπίπτει και με προέκταση των χαρτογραφημένων μεταλλοφόρων σωμάτων που βρίσκονται Δυτικά του προφίλ προς τα Ανατολικά.

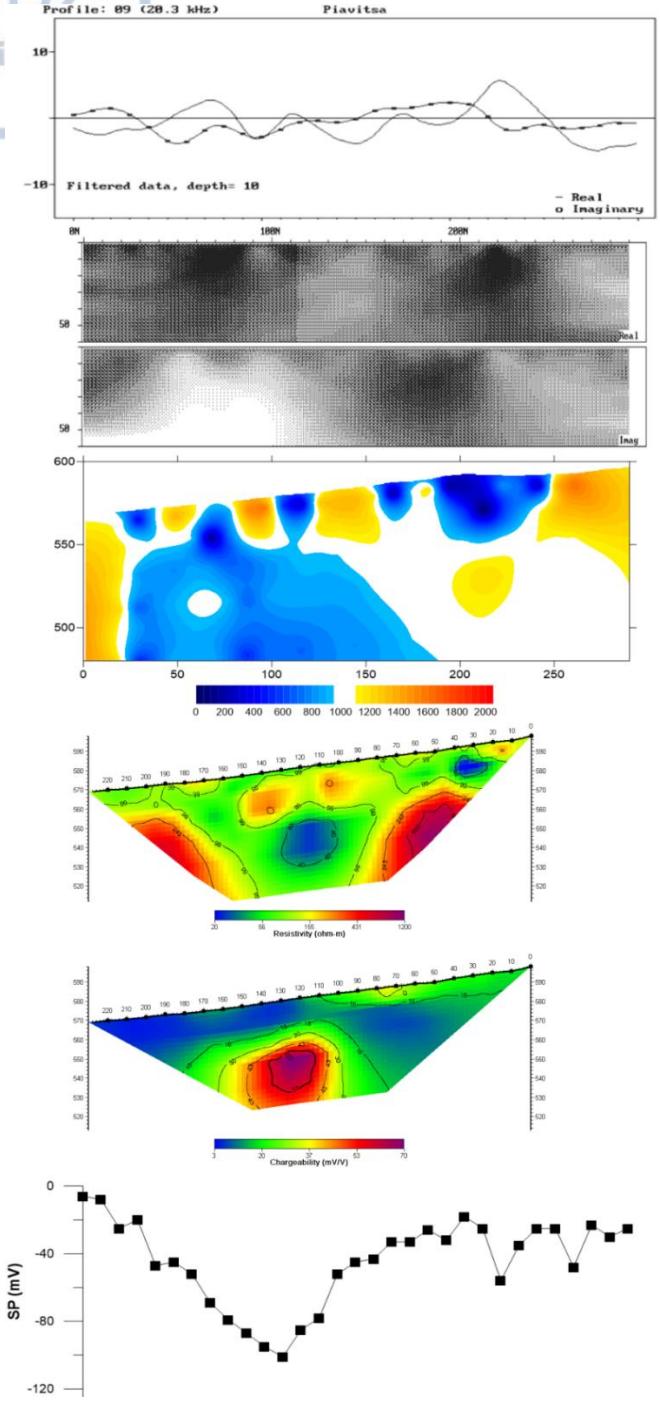
Η ύπαρξη γραφίτη είναι πιθανή και σε αυτή την περιοχή, με βάση τα δεδομένα της γεώτρησης, τα οποία αναφέρουν την ύπαρξη ανθρακικού σχιστολίθου στα βάθη 20 έως 35 μέτρα, ικανού να δημιουργήσει τέτοιου είδους ανωμαλίες.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας των μέσων τιμών αντίστασης, φορτιστικότητας και φυσικού δυναμικού που δημιούργησε η ζώνη ενδιαφέροντος σε αυτή την περιοχή (Πίνακας 10).

	Ηλεκτρική Αντίσταση (Ohm.m)	Φορτιστικότητα (mV/V)	Φυσικό Δυναμικό (mV)
Περιοχή 9^{η}	55	54	-88

Πίνακας 10 Ίχνος της ζώνης ενδιαφέροντος στην 9^{η} περιοχή

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



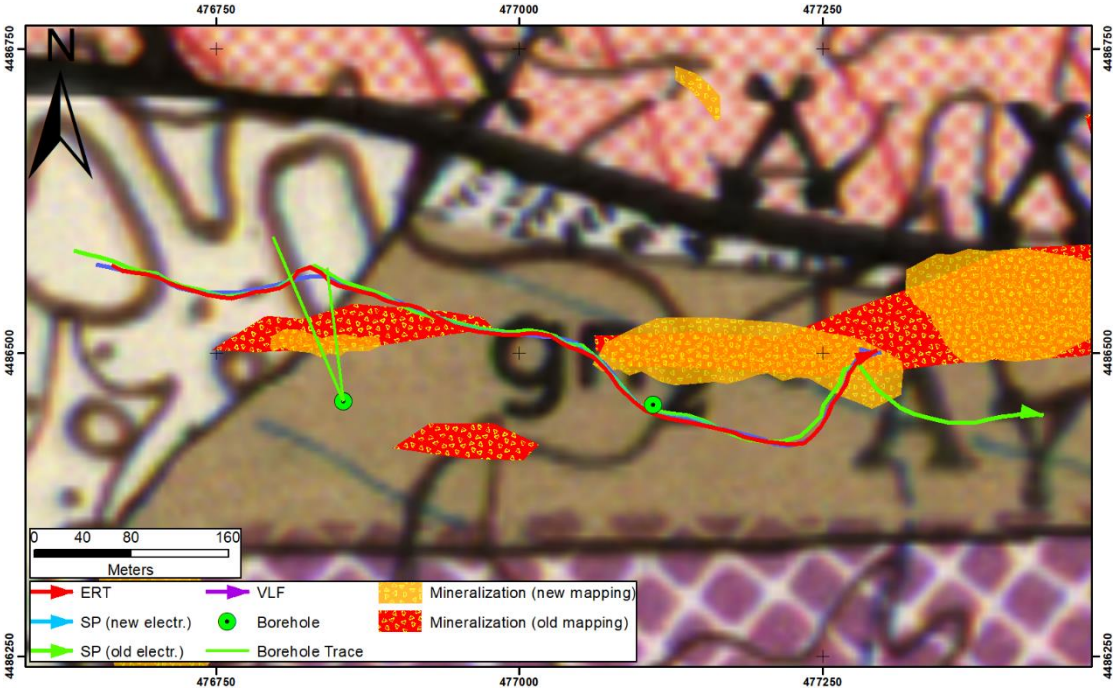
Σχήμα 5.54 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 9

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

5.10 Περιοχή 10η & 12η

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στην 10η (Δυτικά) και την 12η (Ανατολικά) περιοχή καθώς και η γεωλογία σε αυτές (Σχήμα 5.55), οι οποίες θα μελετηθούν ως μία λόγω της έκτασης και του όγκου των μετρήσεων που έλαβαν μέρος σε αυτές.



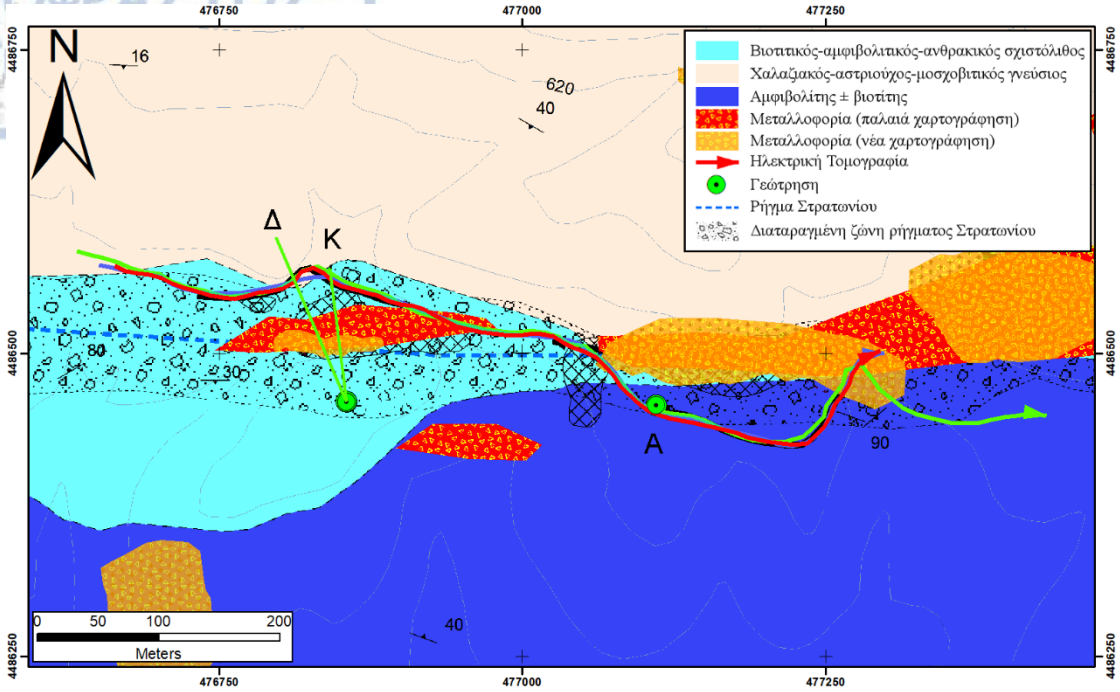
Σχήμα 5.55 Δομή και γεωλογία της 10ης και 12ης περιοχής

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας με την μέθοδο της αλληλεπικάλυψης πέντε τομογραφιών, μετρήσεις φυσικού δυναμικού τόσο με τα παλαιά όσο και με τα νέα ηλεκτρόδια, καθώς και μέτρηση VLF με φορά προς Ανατολικά. Ο σχηματισμός που κυριαρχεί στα Δυτικά είναι οι άμμοι και οι κροκάλες, ενώ στην συνέχεια και έως το τέλος των προφίλ της ηλεκτρικής τομογραφίας επικρατεί ο διμαρμαρυγιακός γνεύσιος.

Ο χάρτης που προέκυψε από την γεωλογική χαρτογράφηση (Σχήμα 5.56) παρουσιάζει το προφίλ της ηλεκτρικής τομογραφίας να βρίσκεται στον σχηματισμό του διαταραγμένου από τη δράση του ρήγματος του Στρατωνίου σχιστολίθου από την αρχή του έως τα 450 μέτρα, καθώς και στα τελευταία 30 μέτρα, ενώ από τα 450 έως τα 690 μέτρα του προφίλ επικρατεί ο σχηματισμός του αμφιβολίτη.

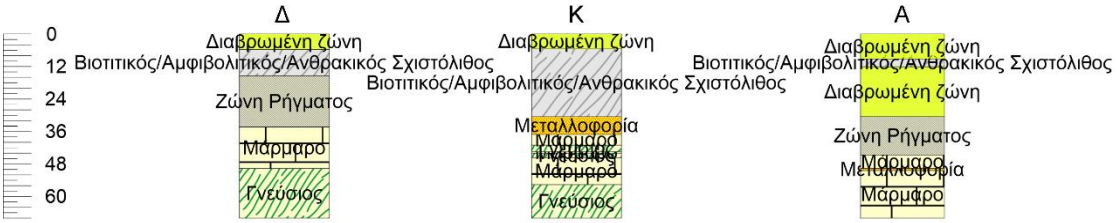
Οι γεωτρήσεις σημειώνονται στον χάρτη ως Δ (Δυτική), Κ (Κεντρική) και Α (Ανατολική). Στη Δυτική γεώτρηση τα 6 πρώτα μέτρα αναφέρονται ως διαβρωμένη ζώνη, ενώ στα επόμενα 10, έως το βάθος των 16 περίπου μέτρων συναντάται υψηλά διαβρωμένος σχιστόλιθος, ο οποίος είναι πλούσιος σε οξείδια σιδήρου και μαγγανίου. Στη συνέχεια, έως το βάθος των 35 περίπου μέτρων η ζώνη χαρακτηρίζεται ως ρηξιγενής, ενώ ακολούθως μέχρι το βάθος των 50 μέτρων συναντάται ο σχηματισμός του μαρμάρου. Τέλος, μέχρι το μέγιστο βάθος διασκόπησης συναντάται ο σχηματισμός του γνευσίου, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως βιοτιτικός.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.56 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για το 10ο και 12ο προφίλ

Στην Κεντρική γεώτρηση τα πρώτα 6 περίπου μέτρα αναφέρονται ως διαβρωμένη ζώνη, ενώ μέχρι το βάθος των 30 μέτρων συναντάται σχιστόλιθος, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως βιοτιτικός-αμφιβολιτικός-ανθρακικός, με τα 10 πρώτα μέτρα του να χαρακτηρίζονται ως υψηλά εξαλλοιωμένα. Από τα 30 έως τα 37 περίπου μέτρα η ζώνη χαρακτηρίζεται ως λατυποπαγές πέτρωμα πλούσιο σε μεταλλοφορία ροδοχρωσίτη, ενώ μέχρι το μέγιστο βάθος διασκόπησης συναντώνται εναλλαγές σε ορίζοντες λατυποπαγούς μαρμάρου με βιοτιτικό γνεύσιο. Η Ανατολική γεώτρηση, η οποία είναι η μόνη που βρίσκεται πάνω στο προφίλ που μετρήθηκε, δίνει στοιχεία για μία διαταραγμένη ζώνη στα 30 πρώτα μέτρα, με ένα υγιές κομμάτι σχιστολίθου να παρεμβάλει στα 9 με 12 μέτρα, ρηξιγενής ζώνη να ακολουθεί από τα 30 έως τα 45 μέτρα, ενώ στη συνέχεια και έως το μέγιστο βάθος διασκόπησης βρίσκεται ο σχηματισμός του μαρμάρου, ο οποίος είναι πλούσιος σε μαγγανιούχα ορυκτά με ιδιαίτερη παρουσία ροδοχρωσίτη, λίγων σουλφιδίων, καθώς και λεπτές ενστρώσεις γραφίτη κατά τόπους. Σε μεγαλύτερα βάθη, τα οποία δεν μελετώνται, συναντάται ο σχηματισμός του βιοτιτικού γνεύσιου. Οι γεωτρήσεις αυτές παρουσιάζονται και σχηματικά στο Σχήμα 5.57.



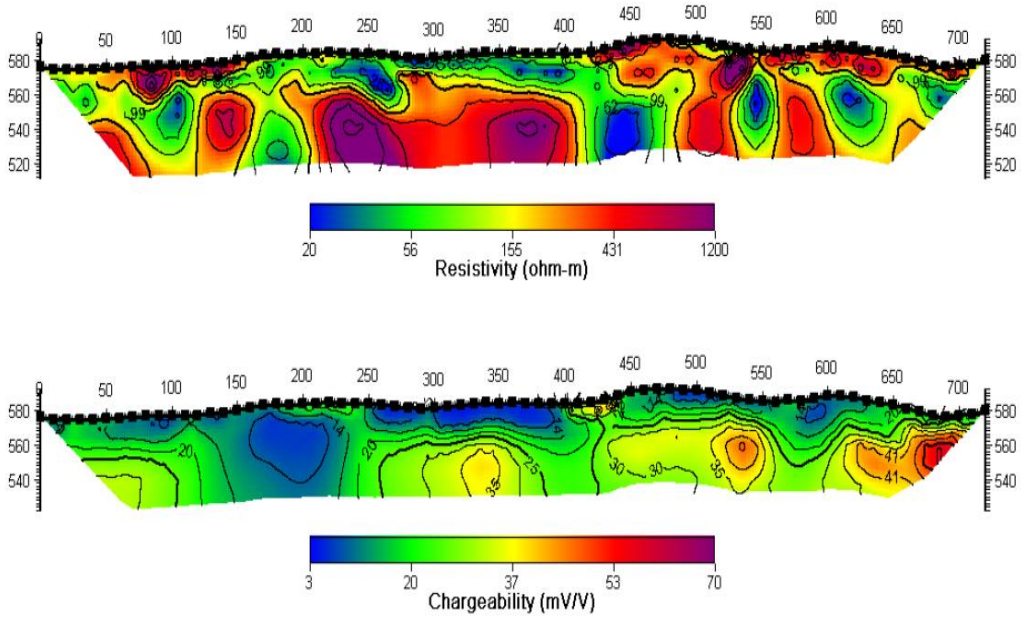
Σχήμα 5.57 Σχηματική απεικόνιση γεωτρήσεων κοντά στα προφίλ της περιοχής 10 και 12

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

5.10.1 Ηλεκτρική Τομογραφία

Τα αποτελέσματα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της φορτιστικότητας για την περιοχή αυτή παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.58. Το προφίλ αυτό μετρήθηκε με πέντε επάλληλες γραμμές (roll along) ώστε να ληφθεί επιπλέον των 230 μέτρων πλευρική πληροφορία, με το βάθος διασκόπησης να παραμένει το ίδιο.



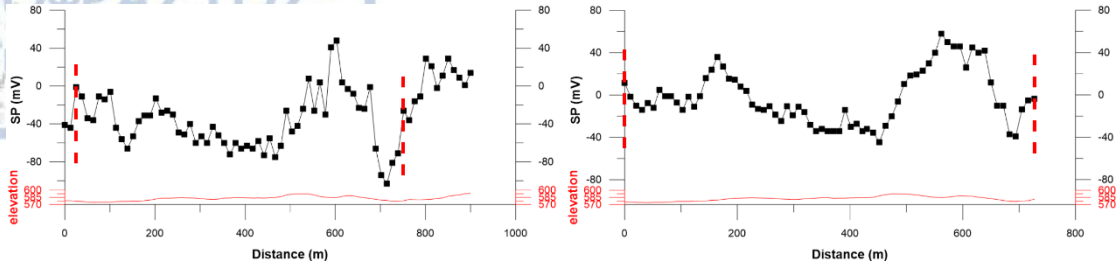
Σχήμα 5.58 Μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (α) και επαγόμενης πόλωσης (β) για την περιοχή 10 και 12

Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει ένα διαταραγμένο περιβάλλον, με πιθανές ρηξιγενείς ζώνες να εμφανίζονται στα 100, 180, 420, 550 και 600 μέτρα του μοντέλου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρατηρείται σε όλο το μήκος της τομογραφίας, με υψηλά φορτισμένες περιοχές ($30 - 60$ mV/V) να εμφανίζονται τόσο σε αγώγιμες ($<$ 40 Ohm. m), όσο και σε αντιστατικές ($>$ 500 Ohm. m) περιοχές του μοντέλου των αντιστάσεων, γεγονός που πιθανά οφείλεται στο περιβάλλον πέτρωμα όπου φιλοξενείται η μεταλλοφορία.

5.10.2 Φυσικό Δυναμικό

Οι καμπύλες του φυσικού δυναμικού, τόσο για τα παλιά όσο και για τα καινούρια ηλεκτρόδια, στην περιοχή που οι μετρήσεις είναι κοινές (κόκκινες παύλες) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.59.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

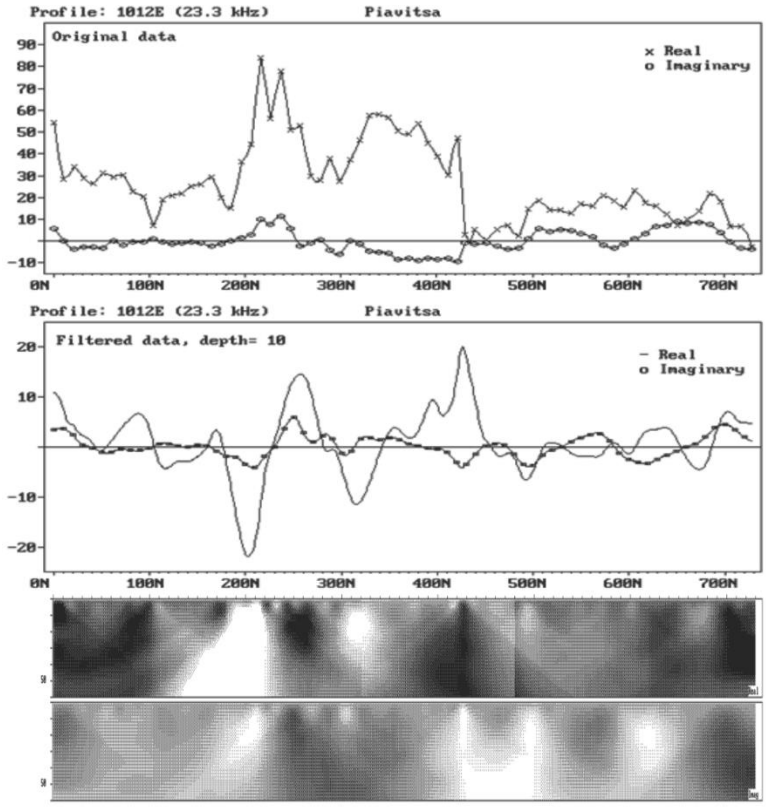


Σχήμα 5.59 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 10 και 12

Οι καμπύλες εμφανίζουν παραπλήσια εικόνα σε όλο το μήκος των κοινών μετρήσεων, με τις νέες μετρήσεις να εμφανίζουν μία μεγάλη αύξηση των τιμών στα 150 και στα 600 μέτρα της όδευσης, που υποδεικνύει κίνηση ρευστών μέσω ρηξιγενών ζωνών. Επιπλέον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον εμφανίζεται στα 350 με 440 περίπου μέτρα της καμπύλης με τα νέα ηλεκτρόδια, καθώς και από τα 650 έως τα 720 μέτρα, τα οποία εμφανίζουν σημαντικές αρνητικές ανωμαλίες και χωρικά συμπίπτουν με τις νεότερες χαρτογραφημένες ζώνες μεταλλοφορίας στην περιοχή.

5.10.3 VLF

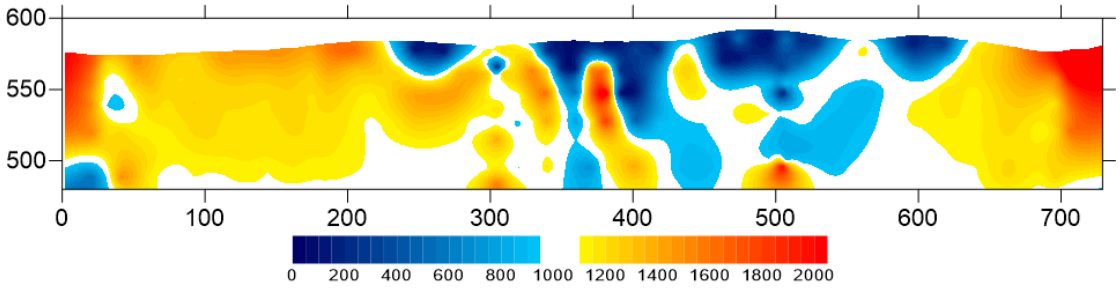
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το φιλτράρισμα των δεδομένων VLF παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.60, ενώ τα αποτελέσματα της αντιστροφής των δεδομένων στο Σχήμα 5.61.



Σχήμα 5.60 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 10 και 12

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Με βάση τα φιλτραρισμένα δεδομένα παρατηρούνται αγώγιμες ζώνες στα 80, 250, 420 και 620 περίπου μέτρα της όδευσης, ενώ στα πρώτα 20 μέτρα, στα 250 περίπου μέτρα καθώς και στο τέλος της όδευσης παρουσιάζονται ανωμαλίες που παραπέμπουν σε διείσδυση σχηματισμού, γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με το γεωλογικό μοντέλο που προέκυψε από την χαρτογράφηση.



Σχήμα 5.61 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 10 και 12

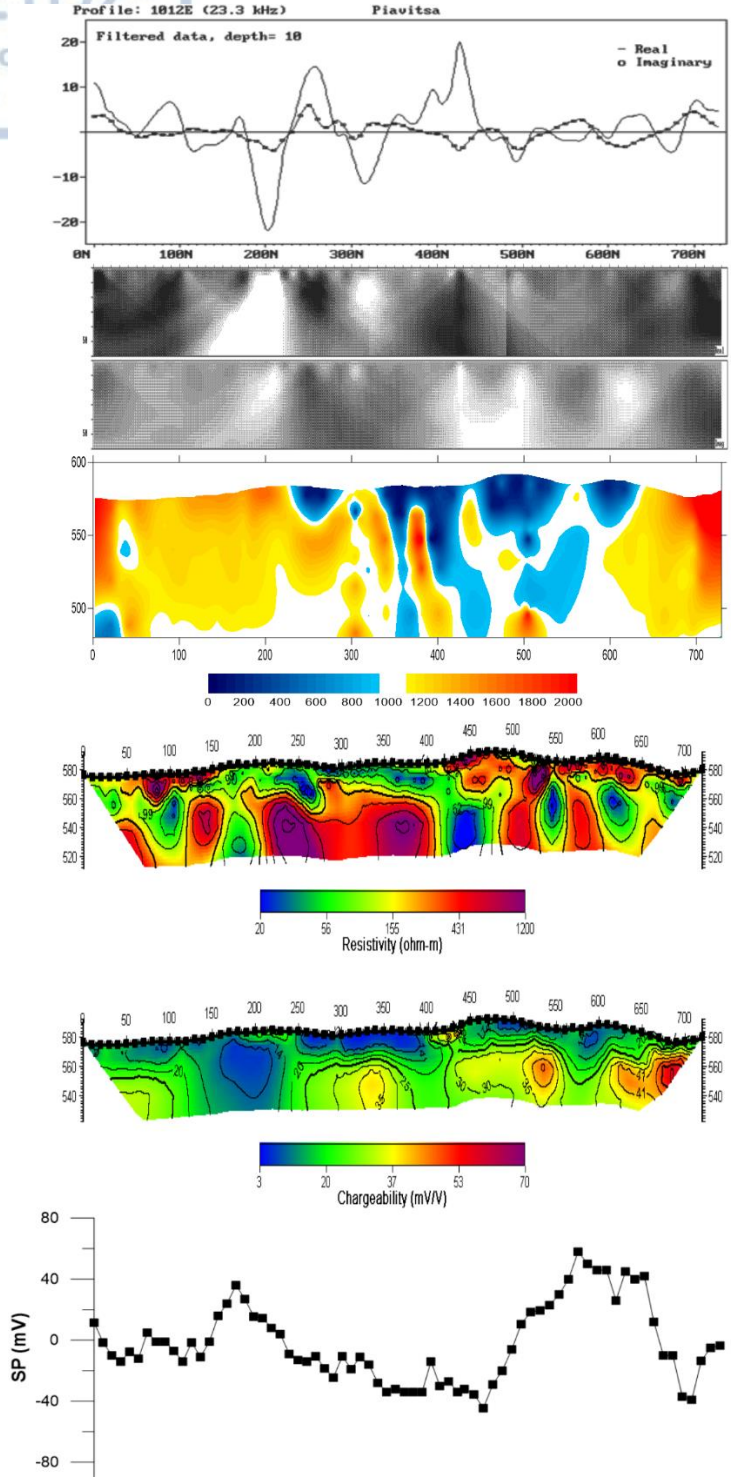
Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλές αντιστάσεις στα πρώτα 30 μέτρα του προφίλ, τα οποία αντιστοιχούν στον σχηματισμό του γνευσίου, με βάση τον χάρτη που προέκυψε από την γεωλογική χαρτογράφηση, ενώ στη συνέχεια και μέχρι τα 220 μέτρα του προφίλ οι αντιστάσεις παρουσιάζουν μικρή μείωση, καθώς συναντάται ο σχηματισμός του διαταραγμένου σχιστολίθου. Επιπλέον παρουσιάζονται αγώγιμες ζώνες στα 250, 350 έως 450, 500 και 600 μέτρα του προφίλ, οι οποίες μπορούν να χαρακτηριστούν και ως πολύ αγώγιμες.

5.10.4 Συνδυαστική ερμηνεία

Η συνδυαστική εικόνα όλων των αποτελεσμάτων των μεθόδων για την 10η και 12η περιοχή, δηλαδή τα φιλτραρισμένα δεδομένα VLF, το μοντέλο της πυκνότητας ρεύματος, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των δεδομένων VLF, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των τομογραφικών δεδομένων, το μοντέλο της φορτιστικότητας καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση που έχουν αυτά στον χώρο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.62.

Για την ευκολότερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται επίσης σχηματική απεικόνιση των γεωτρήσεων σε σχέση με τα μοντέλα της αντίστασης και της φορτιστικότητας στο Σχήμα 5.63. Καθώς η Δυτική και Κεντρική γεώτρηση έχουν κοινή αρχή αλλά πραγματοποιήθηκαν με διαφορετικό αζιμούθιο και γωνία κλίσης, στο σχήμα παρουσιάζεται η κατακόρυφη προβολή τους σε σχέση με την θέση τους με την τομογραφία. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την μεγάλη απόσταση των γεωτρήσεων (~100m) αυτών από την θέση της τομογραφίας, αναμένεται να δημιουργεί χωρικά σφάλματα στην βέλτιστη αποτύπωση των σχηματισμών που τις απαρτίζουν.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

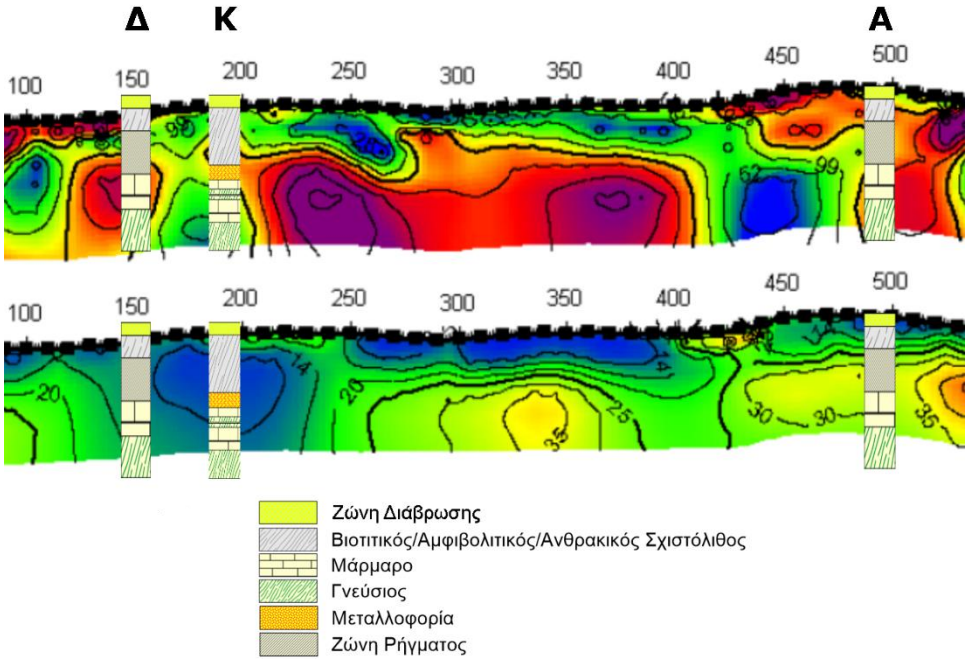


Σχήμα 5.62 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 10 και 12

Σε αυτήν διακρίνονται τέσσερις ζώνες ενδιαφέροντος σε σχέση με την ύπαρξη μεταλλοφορίας, οι οποίες συναντώνται από τα $30-100$, $260-380$, $430-560$ και $620-710$ μέτρα των τομογραφικών δεδομένων. Στις ζώνες αυτές εμφανίζονται αρνητικές ανωμαλίες φυσικού δυναμικού που έρχονται σε καλή συμφωνία με την θέση των στόχων στα τομογραφικά μοντέλα, με τις τιμές τους να φτάνουν τα -40 mV, ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι στόχοι με κέντρο τα 540 και 650 μέτρα, οι οποίοι ενώ παρουσιάζουν παραπλήσια χαρακτηριστικά με χαμηλές αντιστάσεις και υψηλές τιμές

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

φορτιστικότητας (35 – 60 mV/V), οι τιμές του φυσικού δυναμικού είναι θετικές (~20 – 40 mV). Μία πιθανή εξήγηση για αυτή την αύξηση των τιμών φυσικού δυναμικού είναι η άνοδος ρευστών μέσα από την ζώνη ρήγματος που συναντάται στα 580 μέτρα των μοντέλων, με αποτέλεσμα να αλλάζει το πρόσημο στις τιμές φυσικού δυναμικού, που κατά τα άλλα αναμένονταν να είναι αρνητικές, λόγω του είδους της μεταλλοφορίας που συναντάται στην περιοχή.



Σχήμα 5.63 Σχηματική απεικόνιση γεωτρήσεων σε σχέση με το μοντέλο αντιστάσεων και φορτιστικότητας, αντίστοιχα, στην περιοχή 10 και 12

Ιδιαίτερο, επίσης, ενδιαφέρον παρουσιάζει ο στόχος που οριοθετείται στα 260 με 380 μέτρα των τομογραφικών μοντέλων, ο οποίος στο μοντέλο των αντιστάσεων εμφανίζεται με υψηλές έως πολύ υψηλές αντιστάσεις, καθώς η μεταλλοφορία φιλοξενείται μέσα σε συμπαγή σχηματισμό μαρμάρου, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους στόχους που συναντώνται στο μοντέλο, όπου αναπτύσσονται κατά μήκος ρηξιγενών ζωνών.

Τέλος, παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας των μέσων τιμών αντίστασης, φορτιστικότητας και φυσικού δυναμικού που δημιούργησαν οι ζώνες ενδιαφέροντος σε αυτή την περιοχή (Πίνακας 11).

Περιοχή 10η και 12η	Ηλεκτρική Αντίσταση (Ohm.m)	Φορτιστικότητα (mV/V)	Φυσικό Δυναμικό (mV)
Ζώνη 1 (30-100μ.)	188	29	-6
Ζώνη 2 (260-380μ.)	620	32	-22
Ζώνη 3 (430-560μ.)	329	33	-5
Ζώνη 4 (620-710μ.)	103	44	4

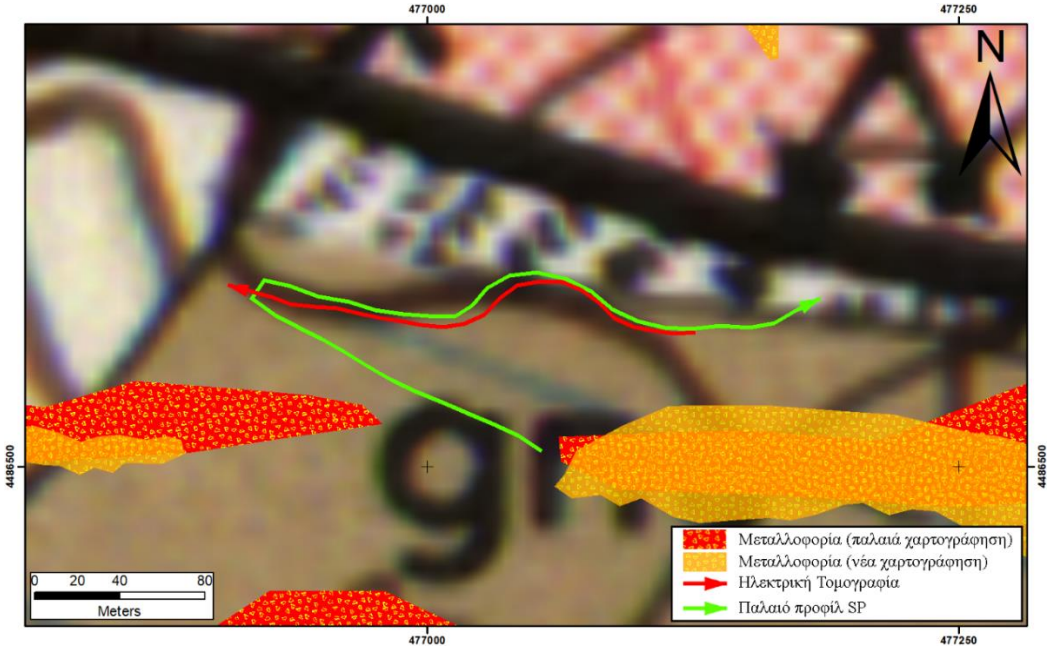
Πίνακας 11 Ίχνος των ζωνών ενδιαφέροντος στην 10η και 12η περιοχή

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

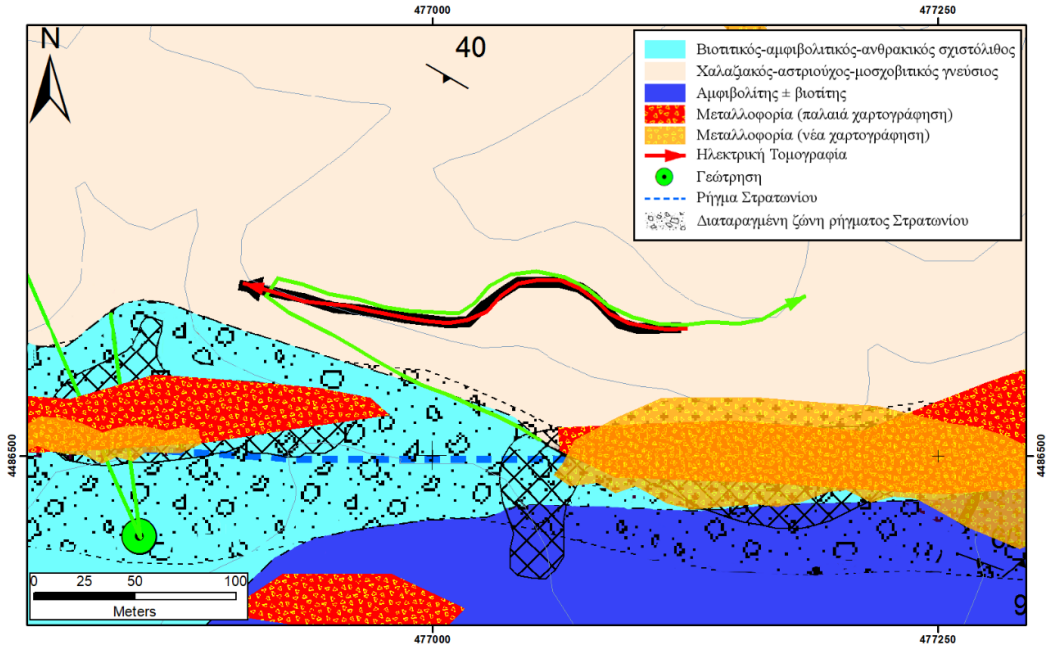
5.11 Περιοχή 11η

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στην 11η περιοχή, καθώς και η γεωλογία σε αυτήν (Σχήμα 5.64).



Σχήμα 5.64 Δομή και γεωλογία της 11ης περιοχής

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας με φορά προς τη Δύση, καθώς και μετρήσεις φυσικού δυναμικού με τα παλιά ηλεκτρόδια κατά μήκος ενός δρόμου με φορά προς την Ανατολή. Ο σχηματισμός που κυριαρχεί σε όλο το μήκος των προφίλ είναι ο διμαρμαρυγιακός γνεύσιος, όπως φαίνεται επίσης και στον χάρτη που προέκυψε από την γεωλογική χαρτογράφηση (Σχήμα 5.65).



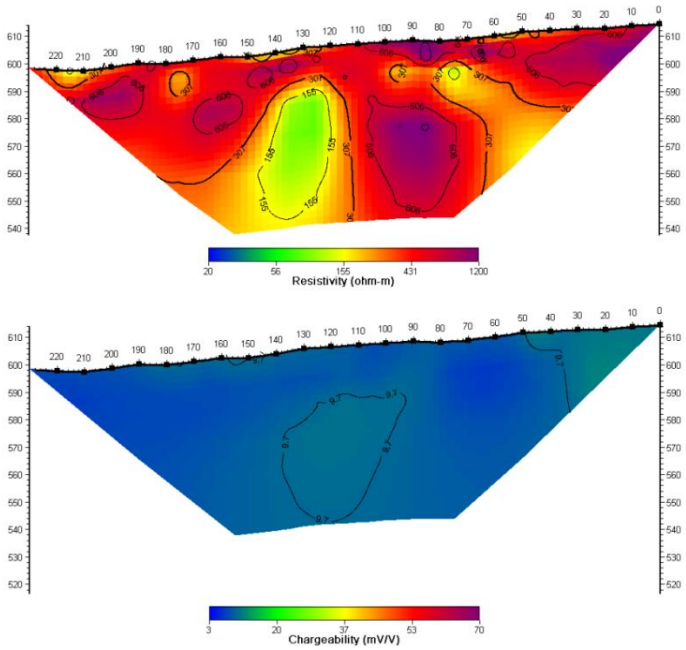
Σχήμα 5.65 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για το 11ο προφίλ

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

5.11.1 Ηλεκτρική Τομογραφία

Τα αποτελέσματα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της φορτιστικότητας για την περιοχή αυτή παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.66.



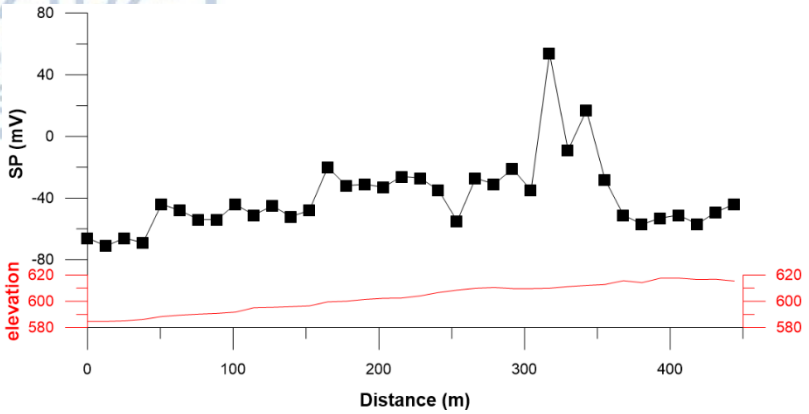
Σχήμα 5.66 Μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (α) και επαγόμενης πόλωσης (β) για την περιοχή 11

Στο μοντέλο της ηλεκτρικής αντίστασης παρατηρούνται υψηλές αντιστάσεις σε όλο το μήκος του προφίλ, γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με την γεωλογία στην περιοχή, εκτός από μία ρηξιγενή ζώνη στο κέντρο του προφίλ στην οποία οι αντιστάσεις μειώνονται. Το προφίλ δεν εμφανίζει καθόλου φορτιστικότητα, εκτός από την ρηξιγενή ζώνη όπου εμφανίζει τιμές έως 10 mV/V, οι οποίες πιθανά υποδεικνύουν την συμμετοχή της αργίλου στην πλήρωση της ζώνης.

5.11.2 Φυσικό Δυναμικό

Η καμπύλη του φυσικού δυναμικού για την περιοχή αυτή παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 5.67.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.67 Καμπύλη φυσικού δυναμικού στην περιοχή 11

Η καμπύλη δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον όσο αφορά την ύπαρξη μεταλλοφορίας, ενώ στα 300 περίπου μέτρα της όδευσης εμφανίζεται μία αύξηση στις τιμές για τρεις μετρήσεις, οι οποίες χωρικά αντιστοιχούν στην επαφή του διμαρμαρυγιακού γνευσίου με το σιδηρούν κάλυμμα.

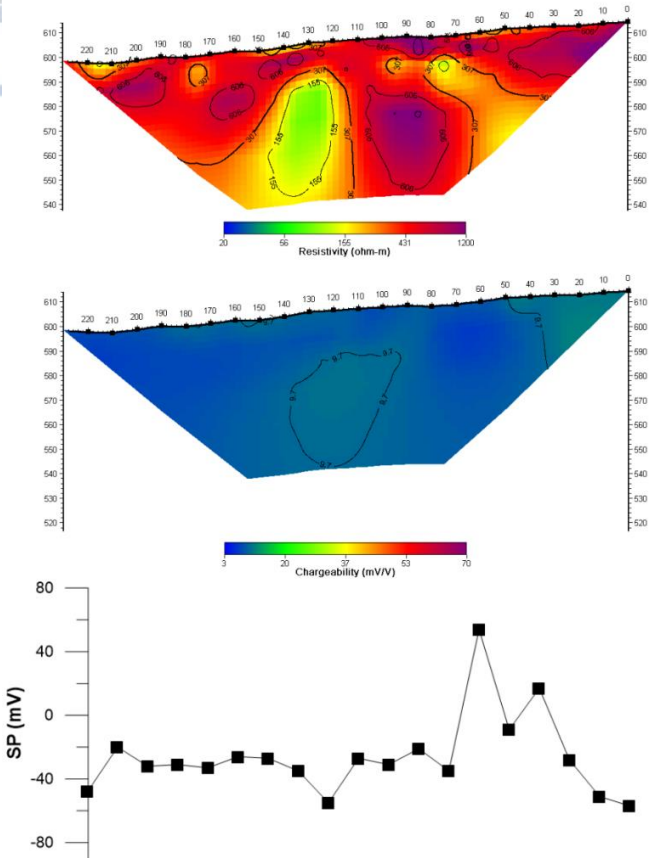
5.11.3 Συνδυαστική ερμηνεία

Η συνδυαστική εικόνα όλων των αποτελεσμάτων των μεθόδων για την 11η περιοχή, δηλαδή το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των τομογραφικών δεδομένων, το μοντέλο της φορτιστικότητας καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση που έχουν αυτά στον χώρο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.68.

Η καμπύλη του φυσικού δυναμικού σε σχέση με τα μοντέλα της ηλεκτρικής τομογραφίας παρουσιάζει μία μικρή μείωση -30 mV στη θέση της ρηξιγενούς ζώνης στα 125 μέτρα, όμως δεδομένου ότι πρόκειται για μία μόνο μέτρηση, δεν υποδεικνύει την ύπαρξη μεταλλοφορίας, αλλά εμπίπτει στα όρια του σφάλματος και του θορύβου της μεθόδου. Οι τρείς μετρήσεις όπου το φυσικό δυναμικό αυξάνεται, αντιστοιχούν σε μία ακόμη διαταραγμένη ζώνη (χαμηλότερες αντιστάσεις) του μοντέλου των αντιστάσεων, η οποία συμπίπτει με το όριο του διμαρμαρυγιακού γνευσίου με το σιδηρούν κάλυμμα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ



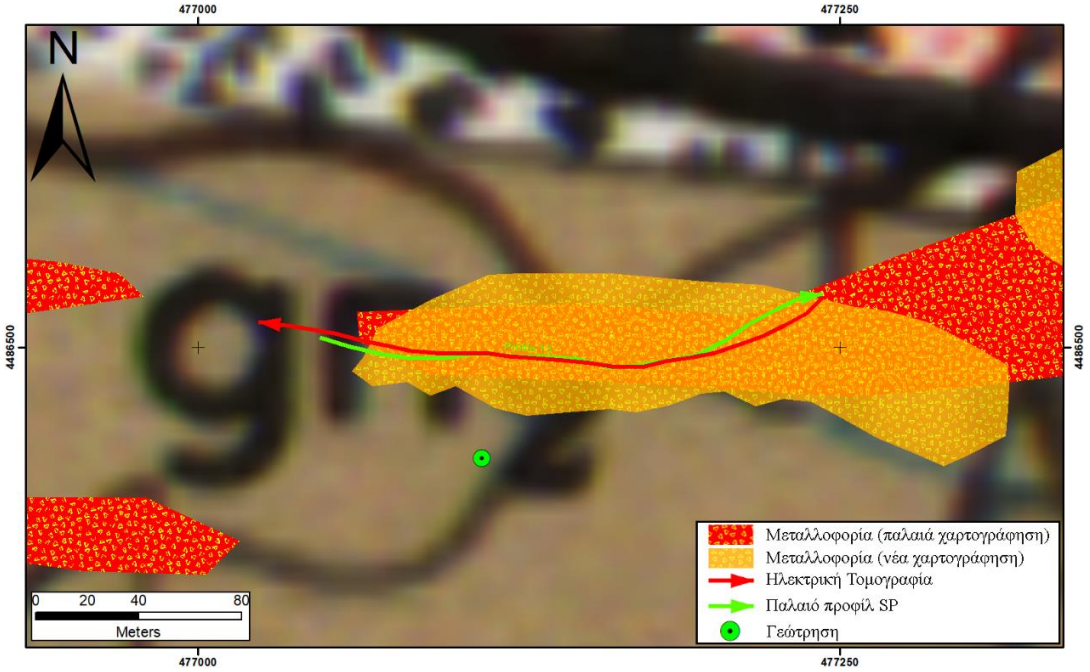
Σχήμα 5.68 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 11

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

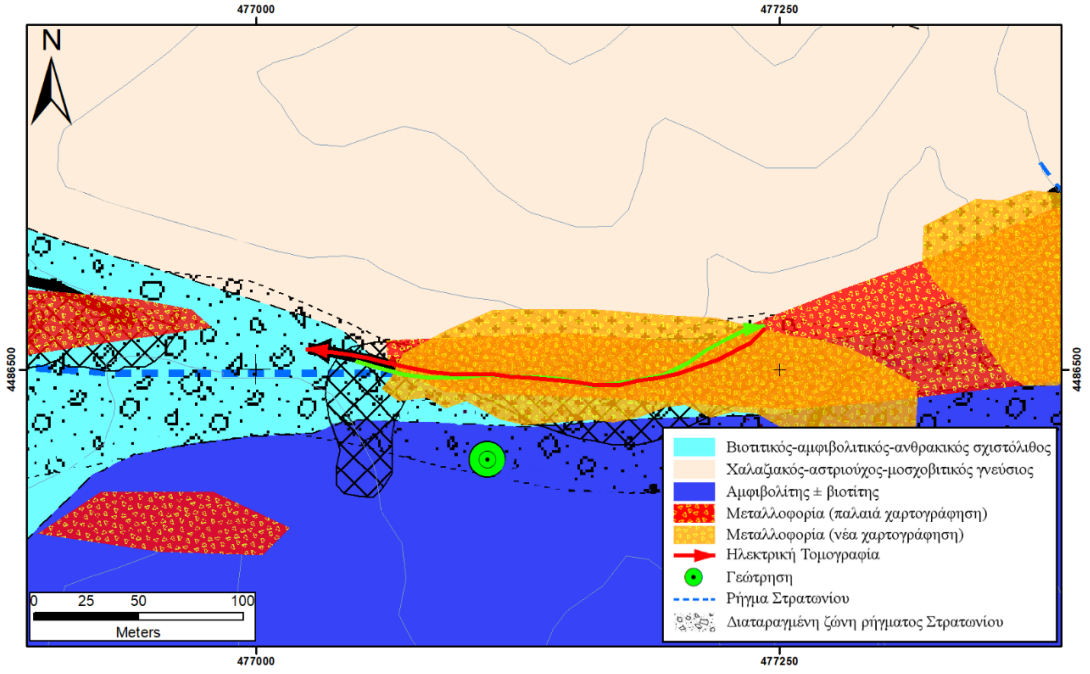
5.12 Περιοχή 13η

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στην 13η περιοχή, καθώς και η γεωλογία σε αυτήν (Σχήμα 5.69).



Σχήμα 5.69 Δομή και γεωλογία της 13ης περιοχής

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας με φορά προς τη Δύση, καθώς και μετρήσεις φυσικού δυναμικού με τα παλιά ηλεκτρόδια με φορά προς την Ανατολή. Ο σχηματισμός που κυριαρχεί σε όλο το μήκος των προφίλ είναι ο διμαρμαρυγιακός γνεύσιος.



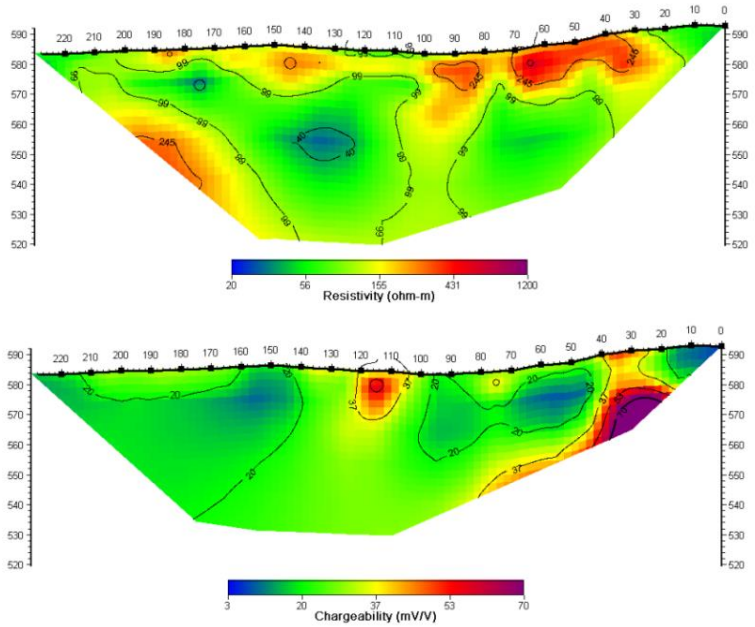
Σχήμα 5.70 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για την 13η περιοχή

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Στον χάρτη που προέκυψε από την γεωλογική χαρτογράφηση (Σχήμα 5.70), τα προφίλ εμφανίζονται μέσα στο σχηματισμό του διαταραγμένου σχιστολίθου, καθώς και κατά μήκος της διεύθυνσης του ρήγματος του Στρατωνίου, με μόνο τα πρώτα μέτρα του προφίλ της ηλεκτρικής τομογραφίας να βρίσκονται στον σχηματισμό του γνευσίου.

5.12.1 Ηλεκτρική Τομογραφία

Τα αποτελέσματα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της φορτιστικότητας για την περιοχή αυτή παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.71.



Σχήμα 5.71 Μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (α) και επαγόμενης πόλωσης (β) για την περιοχή 13

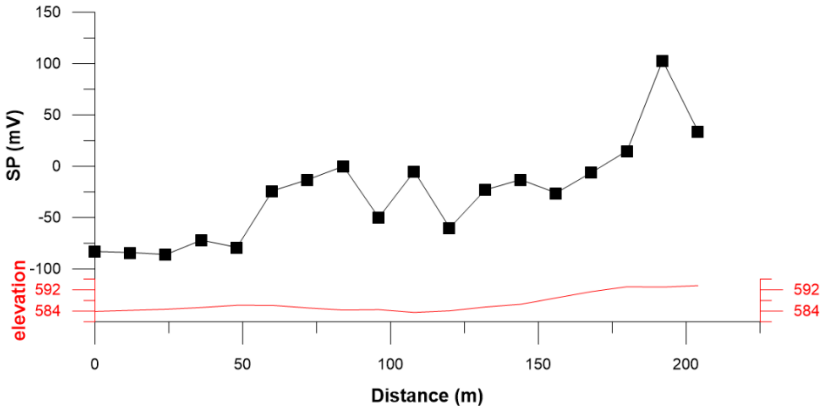
Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει υψηλές τιμές αντίστασης στα επιφανειακά στρώματα, λόγω της μηχανικής αποσάθρωσης που αυτά δέχονται, καθώς και μία πιθανή ρηξιγενή ζώνη στα 150 με 180 μέτρα του προφίλ. Το μοντέλο της φορτιστικότητας παρουσιάζει τιμές 20 mV/V σε όλη την έκταση του προφίλ, γεγονός που οφείλεται είτε στην συμμετοχή της αργίλου σε όλη την διαταραγμένη αυτή ζώνη από τη δράση του ρήγματος του Στρατωνίου, είτε από διάσπαρτη μεταλλοφορία σε όλο το μήκος των μοντέλων. Ο στόχος που εμφανίζεται στα 30 μέτρα του προφίλ με υψηλές τιμές φορτιστικότητας (> 70 mV/V) δεν υποδεικνύει την ένδειξη συμπαγούς μεταλλοφορίας αλλά πιθανά την επαφή του σχηματισμού του γνευσίου με τον σχιστόλιθο. Επιπλέον, η εμφάνισή του στα όρια της ηλεκτρικής τομογραφίας τον καθιστά ευάλωτο σε σφαλματική ερμηνεία, καθώς ο αριθμός των δεδομένων στα όρια των τομογραφιών είναι περιορισμένος.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

5.12.2 Φυσικό Δυναμικό

Η καμπύλη του φυσικού δυναμικού για την περιοχή αυτή παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 5.72.



Σχήμα 5.72 Καμπύλη φυσικού δυναμικού στην περιοχή 13

Η καμπύλη παρουσιάζει παραπλήσια εικόνα με αυτή του φυσικού δυναμικού της 11ης περιοχής (κεφ. 5.11.2), καθώς οι οδεύσεις και στις δύο περιοχές έχουν κοινή αρχή και πραγματοποιήθηκαν μέσα στο διμαρμαρυγιακό γνεύσιο, με βάση το χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε.. Η αύξηση της τιμής του φυσικού δυναμικού, παρότι είναι μεγάλη σε απόλυτη τιμή, εμπίπτει στα όρια του σφάλματος, όντας μοναδική μέτρηση. Παρόλα αυτά, χωρικά, συμβαίνει στην επαφή μεταξύ του διαταραγμένου σχιστολίθου με τον γνεύσιο.

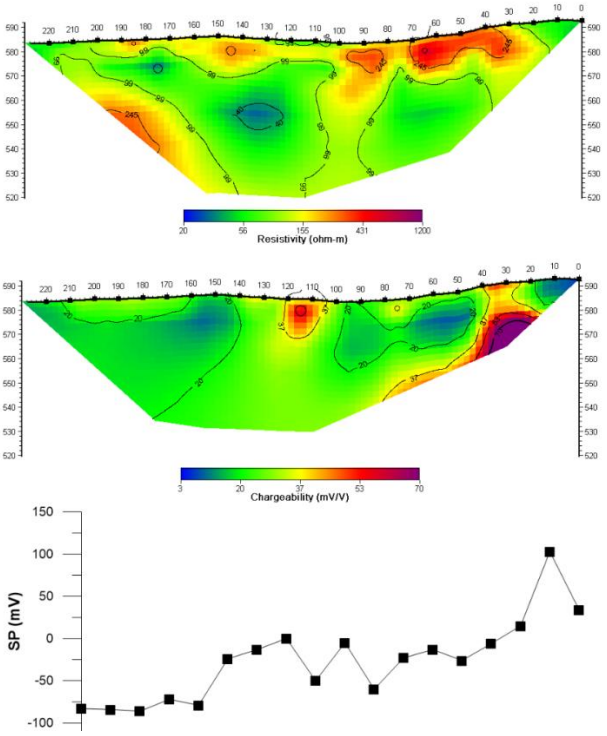
5.12.3 Συνδυαστική ερμηνεία

Η συνδυαστική εικόνα όλων των αποτελεσμάτων των μεθόδων για την 13η περιοχή, δηλαδή το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των τομογραφικών δεδομένων, το μοντέλο της φορτιστικότητας καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση που έχουν αυτά στον χώρο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.73.

Η καμπύλη του φυσικού δυναμικού σε σχέση με τα γεωηλεκτρικά μοντέλα παρουσιάζει μία μικρή αύξηση των τιμών στο σημείο όπου παρουσιάζονται υψηλές τιμές φορτιστικότητας, δηλαδή στα πρώτα μέτρα της τομογραφίας, στην επαφή του γνευσίου με τον σχιστόλιθο, όμως δεν υπάρχουν σαφείς ενδείξεις για την ύπαρξη συμπαγούς μεταλλοφορίας στην περιοχή, με τις μετρήσεις να υποπίπτουν στα όρια του σφάλματος, λόγω της θέσης που αυτές βρίσκονται σε σχέση με το τομογραφικό μοντέλο.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ



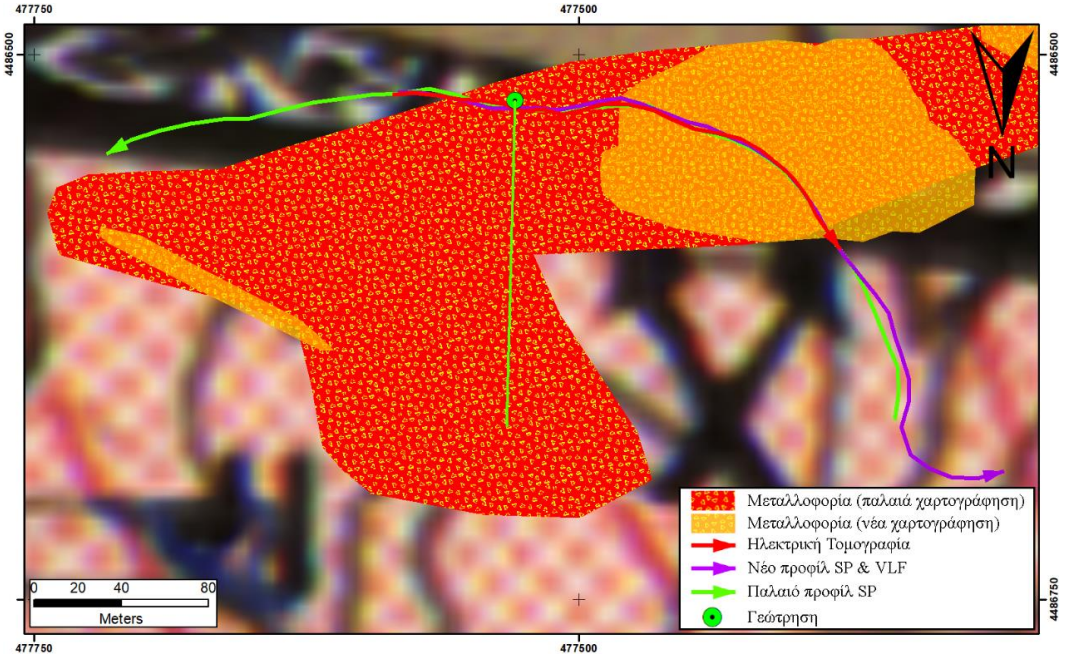
Σχήμα 5.73 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 13

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

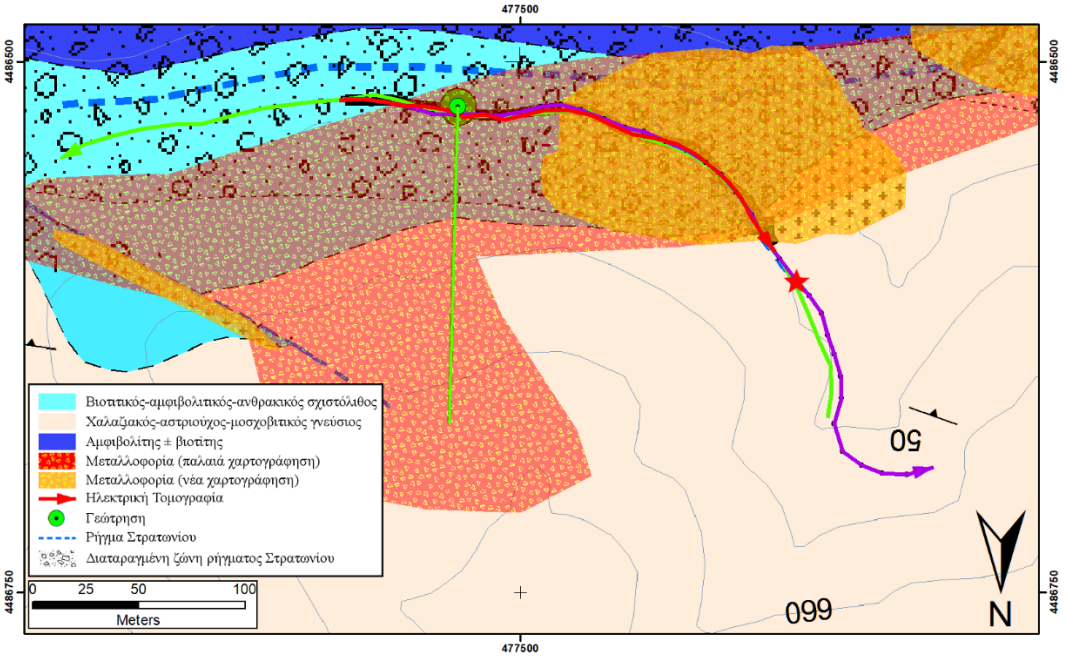
5.13 Περιοχή 14η

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στην 14η περιοχή, καθώς και η γεωλογία σε αυτήν (Σχήμα 5.74).



Σχήμα 5.74 Δομή και γεωλογία της 14ης περιοχής

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας με φορά προς τη Δύση, μετρήσεις φυσικού δυναμικού με τα παλιά ηλεκτρόδια με φορά προς την Ανατολή, καθώς και μέτρηση VLF και φυσικού δυναμικού με τα νέα ηλεκτρόδια με φορά προς τα Δυτικά. Τα προφίλ βρίσκονται πάνω στο ρήγμα του Στρατωνίου και στην επαφή του σιδηρούν καλύμματος με τον βιοτιτικό γνεύσιο.



Σχήμα 5.75 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για την 14η περιοχή

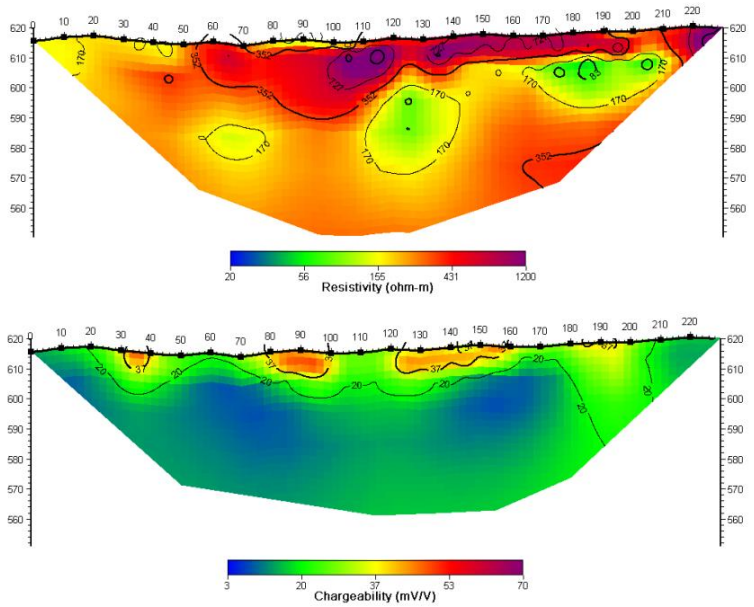
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ο χάρτης που προέκυψε από την γεωλογική χαρτογράφηση (Σχήμα 5.75) παρουσιάζει το προφίλ της τομογραφίας να βρίσκεται μέσα στον σχηματισμό του διαταραγμένου σχιστολίθου, με τα τελευταία 20 περίπου μέτρα να βρίσκονται στον σχηματισμό του γνευσίου. Σε απόσταση 30 περίπου μέτρων από το τέλος της ηλεκτρικής τομογραφίας (κόκκινο αστέρι στον χάρτη) παρατηρήθηκε αλλαγή του χρώματος του σχηματισμού.

Η γεώτρηση, στην θέση που φαίνεται στον χάρτη, δίνει στοιχεία για διαταραγμένη ζώνη 10 μέτρων, το πρώτο μισό της οποίας αποτελείται από τσιμέντο, στη συνέχεια από τα 10 έως τα 19 περίπου μέτρα συναντάται ρηξιγενής ζώνη, ενώ έπειτα μέχρι το μέγιστο βάθος διασκόπησης συναντάται ο σχηματισμός του βιοτιτικού γνεύσιου.

5.13.1 Ηλεκτρική Τομογραφία

Τα αποτελέσματα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της φορτιστικότητας για την περιοχή αυτή παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.76.



Σχήμα 5.76 Μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (α) και επαγόμενης πόλωσης (β) για την περιοχή 14

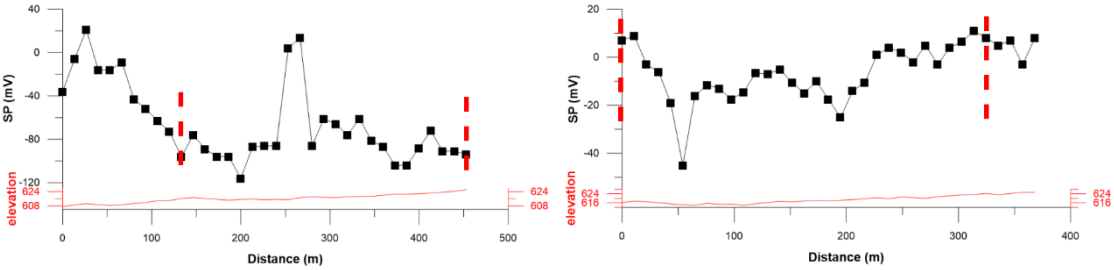
Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει μεγάλες τιμές σε όλη την έκταση του και ιδιαίτερα στα επιφανειακά στρώματα, το οποίο έρχεται σε καλή συμφωνία με τα δεδομένα της γεώτρησης, που αναφέρουν τα πρώτα 10 μέτρα ως διαταραγμένη ζώνη, με τα επόμενα 10 να αναφέρονται ως ρηξιγενής ζώνη, δηλαδή περιοχές όπου οι ηλεκτρικές αντιστάσεις αναμένεται να είναι χαμηλότερες, λόγο πλήρωσης από πιο λεπτόκοκκα υλικά. Το μοντέλο της φορτιστικότητας εμφανίζει τέσσερις επιφανειακές ζώνες στα 35, 90, 140 και 190 μέτρα του προφίλ με υψηλές τιμές φορτιστικότητας (~35 mV/V), οι οποίες σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το μοντέλο βρίσκεται μέσα

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

στο σχηματισμό του σιδηρούν καλύμματος, αποτελούν ενδείξεις για την ύπαρξη διάσπαρτης μεταλλοφορίας στην περιοχή.

5.13.2 Φυσικό Δυναμικό

Οι καμπύλες του φυσικού δυναμικού, τόσο για τα παλιά όσο και για τα καινούρια ηλεκτρόδια, στην περιοχή που οι μετρήσεις είναι κοινές (κόκκινες παύλες) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.77.



Σχήμα 5.77 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 14

Οι καμπύλες, σε γενικές γραμμές, εμφανίζουν πολλά κοινά στοιχεία, με εξαίρεση δύο μετρήσεις με τα παλαιά ηλεκτρόδια στα 250 μέτρα της όδευσης, οι οποίες πιθανά αποτελούν σφαλματικές μετρήσεις. Σε γενικές γραμμές, παρουσιάζονται αρνητικές ανωμαλίες από τα 30 έως τα 220 περίπου μέτρα της όδευσης με τα νέα ηλεκτρόδια, με δύο πιο εμφανείς ζώνες στα 50 και 200 μέτρα, οι οποίες αποτελούν ένδειξη για ύπαρξη μεταλλοφορίας.

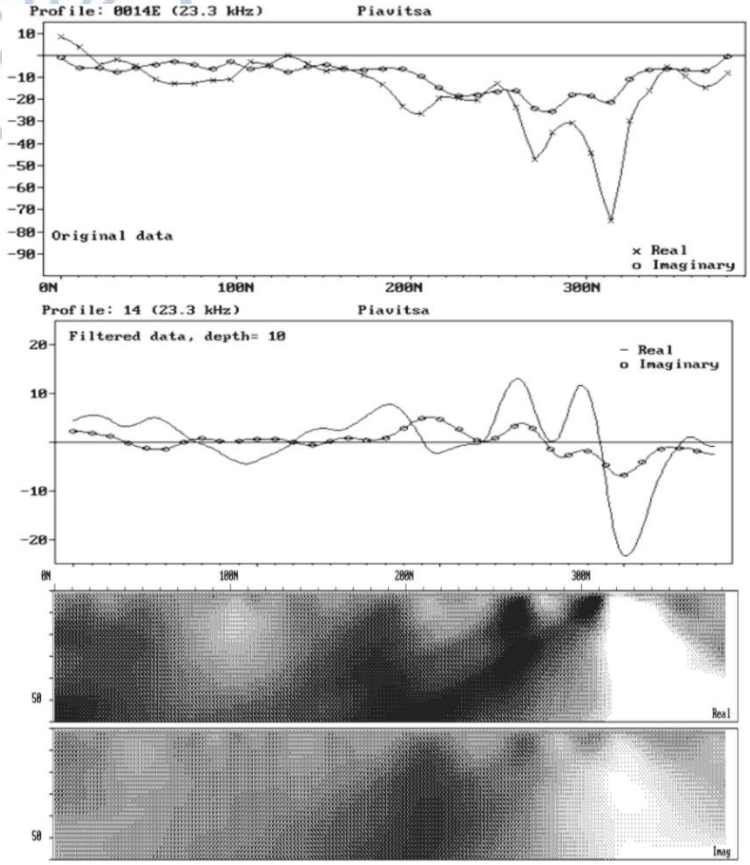
5.13.3 VLF

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το φιλτράρισμα των δεδομένων VLF παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.78, ενώ τα αποτελέσματα της αντιστροφής των δεδομένων στο Σχήμα 5.79.

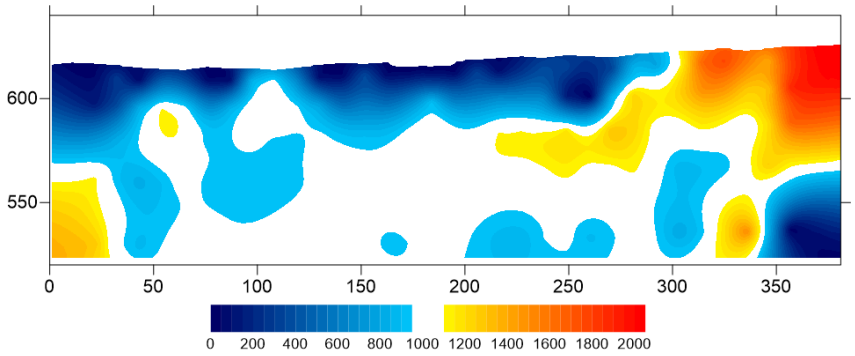
Με βάση τα φιλτραρισμένα δεδομένα εμφανίζονται αγώγιμες ζώνες στα πρώτα 300 περίπου μέτρα του προφίλ, με ιδιαίτερο ενδιαφέρον να σημειώνεται στα 60 και στα 300 μέτρα, όπου παρουσιάζονται δύο πολύ αγώγιμες ζώνες, με υψηλά θετική πραγματική συνιστώσα και αρνητική φανταστική συνιστώσα. Επιπλέον, στα 310 περίπου μέτρα παρατηρείται υψηλά αρνητική καμπύλη πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας, η οποία παραπέμπει σε επαφή γεωλογικών σχηματισμών.

Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει τα πρώτα 250 μέτρα ως αγώγιμα, ενώ στη συνέχεια και έως το τέλος της όδευσης παρουσιάζει υψηλές αντιστάσεις. Η αλλαγή αυτή από αγώγιμη σε αντιστατική περιοχή συναντάται στο ίδιο σημείο όπου παρατηρήθηκε η αλλαγή του χρώματος του σχηματισμού κατά τη διάρκεια των μετρήσεων πεδίου.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.78 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 14

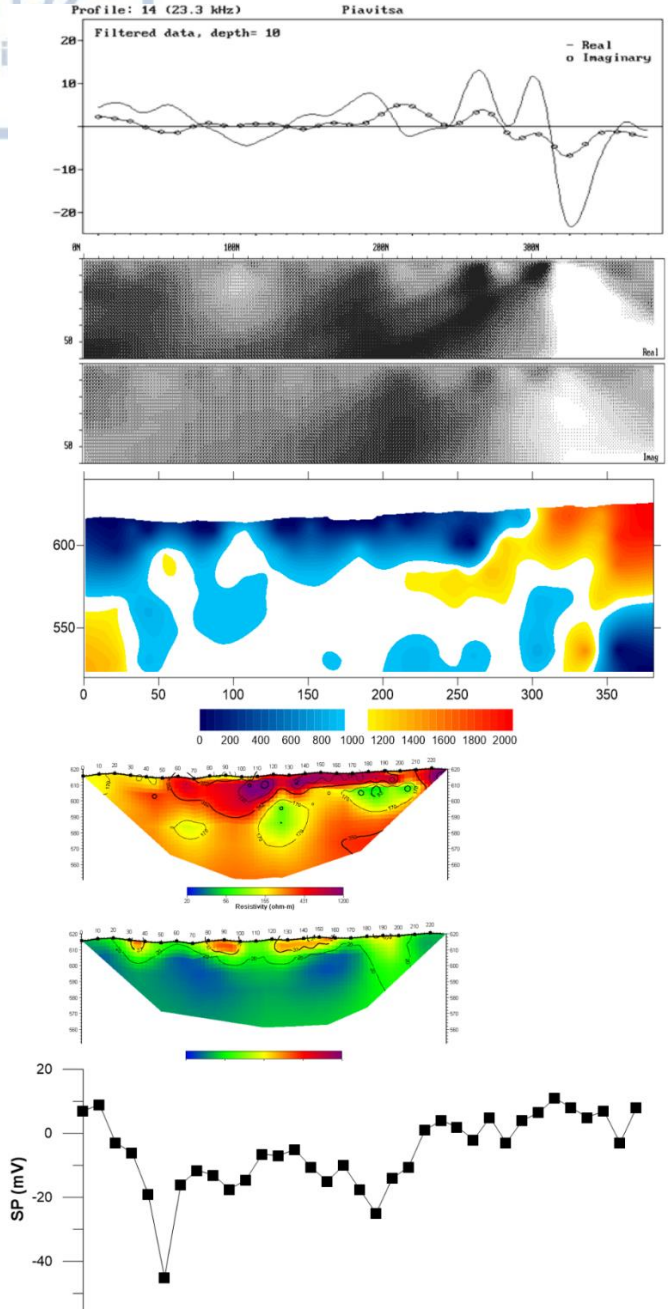


Σχήμα 5.79 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 14

5.13.4 Συνδυαστική ερμηνεία

Η συνδυαστική εικόνα όλων των αποτελεσμάτων των μεθόδων για την 14η περιοχή, δηλαδή τα φιλτραρισμένα δεδομένα VLF, το μοντέλο της πυκνότητας ρεύματος, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των δεδομένων VLF, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των τομογραφικών δεδομένων, το μοντέλο της φορτιστικότητας καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση που έχουν αυτά στον χώρο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.80.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.80 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 14

Σε αυτήν παρατηρείται αρχικά η συμφωνία μεταξύ των στόχων που παρουσιάζει το μοντέλο φορτιστικότητας με τις υψηλά φορτισμένες ζώνες στα 35 και 190 μέτρα του μοντέλου με τις μεγάλες αρνητικές ανωμαλίες στην καμπύλη του φυσικού δυναμικού στα σημεία αυτά. Η καμπύλη του φυσικού δυναμικού δίνει ένδειξη για διάσπαρτη μεταλλοφορία από τα 30 έως τα 220 μέτρα του τομογραφικού μοντέλου, καθώς παρουσιάζει αρνητικές ανωμαλίες σε όλο αυτό το εύρος. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τις ηλεκτρικές αντιστάσεις που συναντώνται στις ζώνες αυτές αλλά και το γεγονός ότι βρίσκονται σε πολύ επιφανειακό τμήμα του εδάφους, παραπέμπουν σε διάσπαρτη μεταλλοφορία που οφείλεται στον σχηματισμό του σιδηρούν καλύμματος στην περιοχή.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας των μέσων τιμών αντίστασης, φορτιστικότητας και φυσικού δυναμικού που δημιούργησαν οι ζώνες ενδιαφέροντος σε αυτή την περιοχή (Πίνακας 12).

Περιοχή 14η	Ηλεκτρική Αντίσταση (Ohm.m)	Φορτιστικότητα (mV/V)	Φυσικό Δυναμικό (mV)
Ζώνη 1 (30-40μ.)	179	45	-18
Ζώνη 2 (80-100μ.)	378	47	-14
Ζώνη 3 (120-160μ.)	853	41	-9
Ζώνη 4 (180-200μ.)	549	34	-17

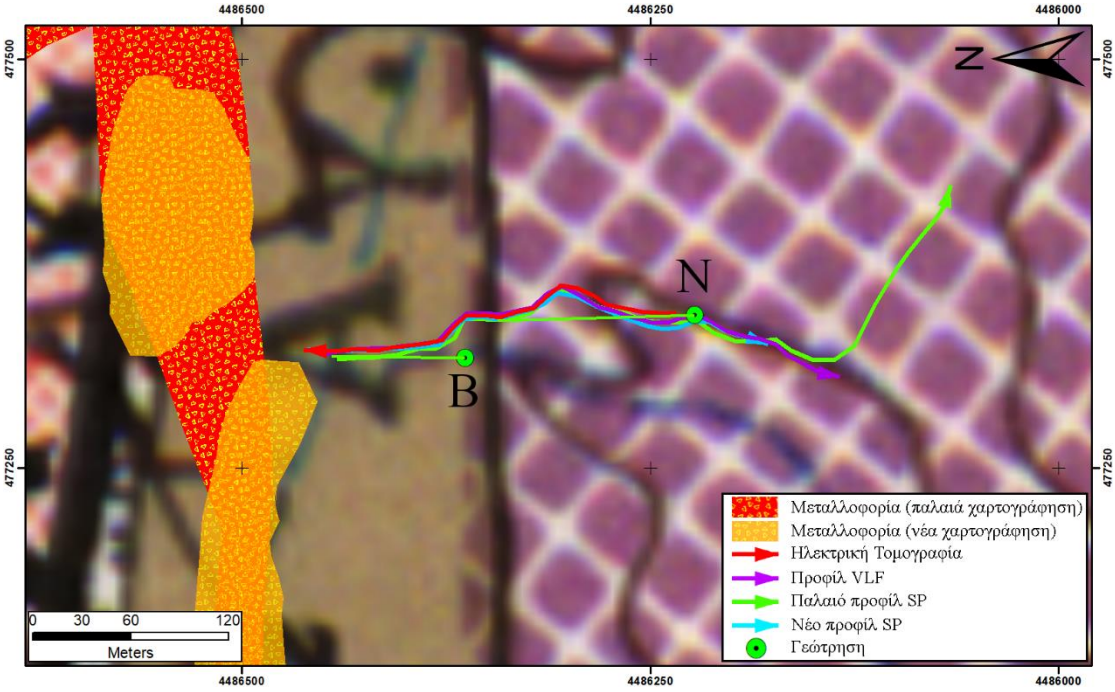
Πίνακας 12 Ίχνος των ζωνών ενδιαφέροντος στην 14η περιοχή

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

5.14 Περιοχή 15η

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στην 15η περιοχή, καθώς και η γεωλογία σε αυτήν (Σχήμα 5.81).

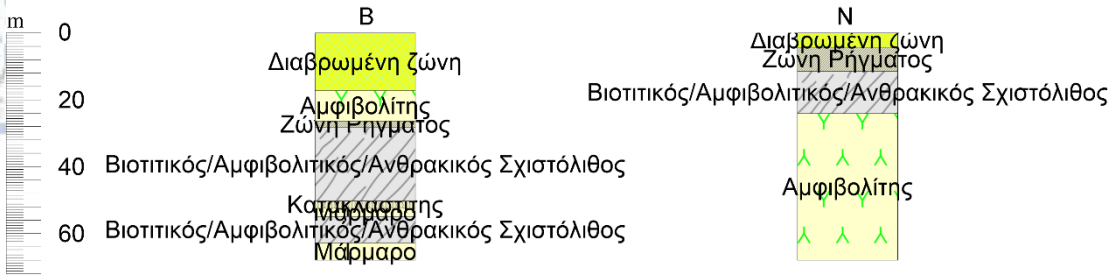


Σχήμα 5.81 Δομή και γεωλογία της 15ης περιοχής

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας με φορά προς τον Βορρά, μετρήσεις φυσικού δυναμικού με τα παλιά και τα νέα ηλεκτρόδια με φορά προς το Νότο, καθώς και μέτρηση VLF επίσης με φορά προς το Νότο. Στο Βόρειο κομμάτι των προφίλ συναντάται ο σχηματισμός του διμαρμαρυγιακού γνεύσιου και Νότια συναντάται ο σχηματισμός του αμφιβολίτη, ενώ σύμφωνα με τον χάρτη που προέκυψε από τη γεωλογική χαρτογράφηση, όλα τα μετρηθέντα προφίλ βρίσκονται μέσα στο σχηματισμό του αμφιβολίτη.

Οι γεώτρησεις σημειώνονται στον χάρτη ως Β (Βόρεια) και Ν (Νότια). Στη Βόρεια γεώτρηση τα 17 πρώτα μέτρα αναφέρονται ως διαβρωμένη ζώνη, τα δέκα τελευταία των οποίων αναφέρονται ως εξαιρετικά διαβρωμένη ζώνη. Στα επόμενα 10 μέτρα, έως το βάθος των 27 περίπου μέτρων συναντάται ο σχηματισμός του αμφιβολίτη, ο οποίος έρχεται σε τεκτονική επαφή με τον σχιστόλιθο (βιοτιτικό-αμφιβολιτικό-ανθρακικό), ο οποίος συνεχίζει έως το βάθος των 50 μέτρων. Στη συνέχεια, και μέχρι το μέγιστο βάθος διασκόπησης συναντώνται εναλλαγές του προαναφερθέντος σχιστολίθου με μάρμαρο, με την δημιουργία κατακλαστίτη κατά τόπους. Στη Νότια γεώτρηση τα πρώτα 5 μέτρα αναφέρονται ως διαβρωμένη ζώνη, με το πρώτο μισό μέτρο αυτής να αποτελείται από τσιμέντο, ενώ τα επόμενα 6 ως ρηξιγενής ζώνη. Από τα 11 έως τα 24 μέτρα συναντάται ο σχηματισμός του βιοτιτικού-αμφιβολιτικού-ανθρακικού σχιστολίθου, ενώ στη συνέχεια έως το μέγιστο βάθος διασκόπησης συναντάται ο σχηματισμός του αμφιβολίτη. Οι γεωτρήσεις αυτές παρουσιάζονται και σχηματικά στο Σχήμα 5.82.

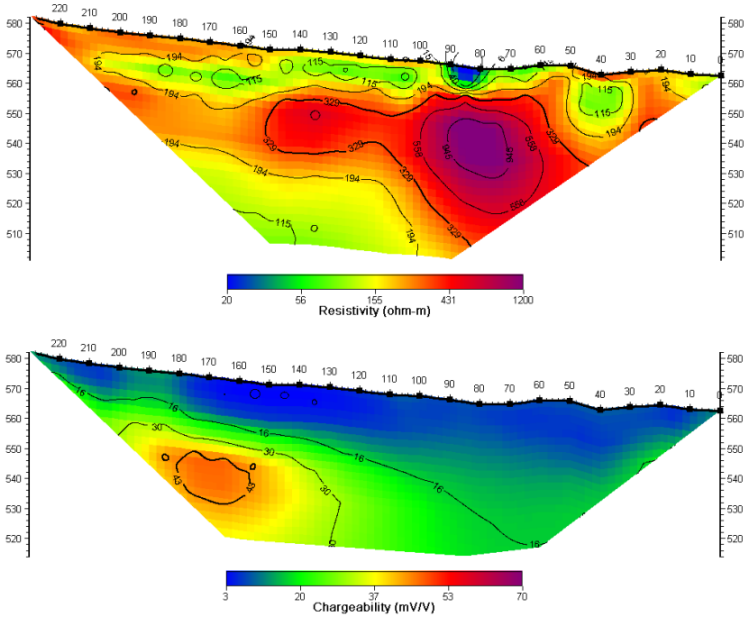
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.82 Σχηματική απεικόνιση γεωτρήσεων κοντά στα προφίλ της περιοχής 15

5.14.1 Ηλεκτρική Τομογραφία

Τα αποτελέσματα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της φορτιστικότητας για την περιοχή αυτή παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.83.



Σχήμα 5.83 Μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (α) και επαγόμενης πόλωσης (β) για την περιοχή 15

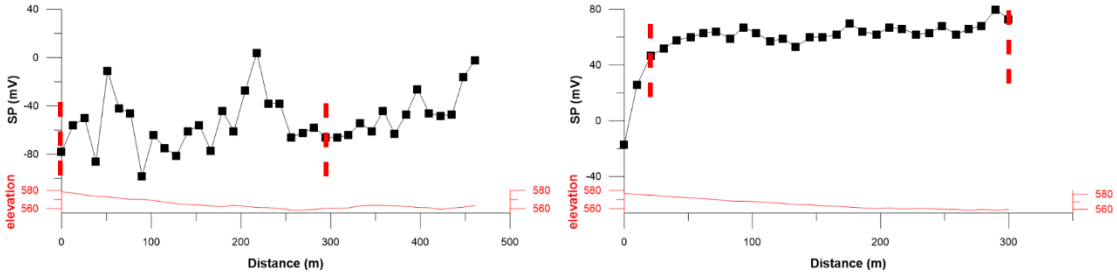
Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει στο σύνολό του ένα αρκετά αντιστατικό περιβάλλον, στα πρώτα 10 μέτρα του οποίου διακρίνεται η διαταραγμένη ζώνη, η οποία εμφανίζει χαμηλότερες αντιστάσεις, λόγω της συμμετοχής πιο λεπτόκοκκων υλικών. Στο μοντέλο επίσης διακρίνεται η πολύ καλή συμφωνία των δεδομένων των γεωτρήσεων με την γεωλογία του μοντέλου, καθώς διακρίνεται η επαφή του αμφιβολίτη (πολύ υψηλές αντιστάσεις) στο Νότιο τμήμα του μοντέλου με τις εναλλαγές του μαρμάρου με τον σχιστόλιθο στο Βόρειο καθώς και η ευρύτερα διαταραγμένη ζώνη στο Βόρειο κομμάτι του μοντέλου σε σχέση με το Νότιο. Το μοντέλο της φορτιστικότητας, λαμβάνοντας υπόψη την γεωλογία της περιοχής και τα δεδομένα των γεωτρήσεων, παρουσιάζει επίσης ένα καλό παράδειγμα της επαφής του αμφιβολίτη στο Νότο (περιοχές με μικρές έως μηδαμινές τιμές φορτιστικότητας) με τις

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

εναλλαγές σχιστολίθου και μαρμάρου (υψηλές τιμές φορτιστικότητας) στο Βορρά, το οποίο δίνει ένδειξη για ύπαρξη ενός συμπαγούς μεταλλοφόρου σώματος με κέντρο τα 170 μέτρα του μοντέλου, σε βάθος 25 περίπου μέτρων.

5.14.2 Φυσικό Δυναμικό

Οι καμπύλες του φυσικού δυναμικού, τόσο για τα παλιά όσο και για τα καινούρια ηλεκτρόδια, στην περιοχή που οι μετρήσεις είναι κοινές (κόκκινες παύλες) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.84.



Σχήμα 5.84 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) παλαιά και (β) νέα ηλεκτρόδια στην περιοχή 15

Οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν διαφορετικές εικόνες όσο αφορά δύο θετικές ανωμαλίες που εμφανίζονται στην όδευση με τα παλαιά ηλεκτρόδια, με κέντρο τα 50 και 210 μέτρα αντίστοιχα, η οποία δεν εμφανίζεται στην όδευση με τα νέα ηλεκτρόδια. Ενδιαφέρον παρουσιάζεται στις δύο πρώτες μετρήσεις της νέας όδευσης, όπου αρχίζει να σχηματίζεται μία αρνητική ανωμαλία φυσικού δυναμικού, η οποία οδήγησε στην περαιτέρω μελέτη της ως νέα περιοχή (κεφ. 5.17), ενώ το υπόλοιπο κομμάτι των μετρήσεων δεν παρουσιάζει ενδείξεις για ύπαρξη μεταλλοφορίας.

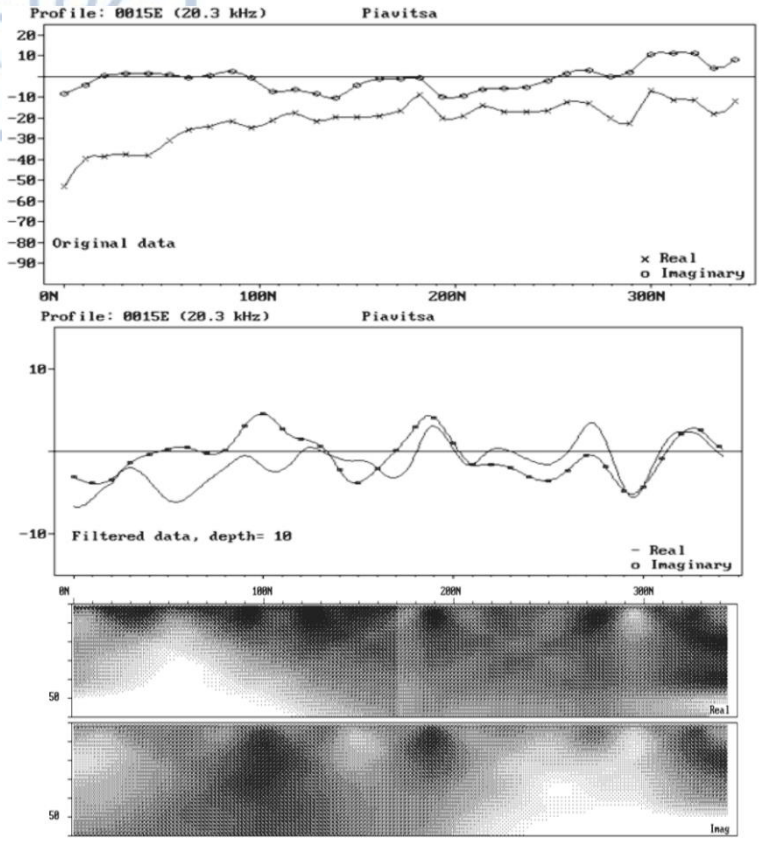
5.14.3 VLF

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το φιλτράρισμα των δεδομένων VLF παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.85, ενώ τα αποτελέσματα της αντιστροφής των δεδομένων στο Σχήμα 5.86.

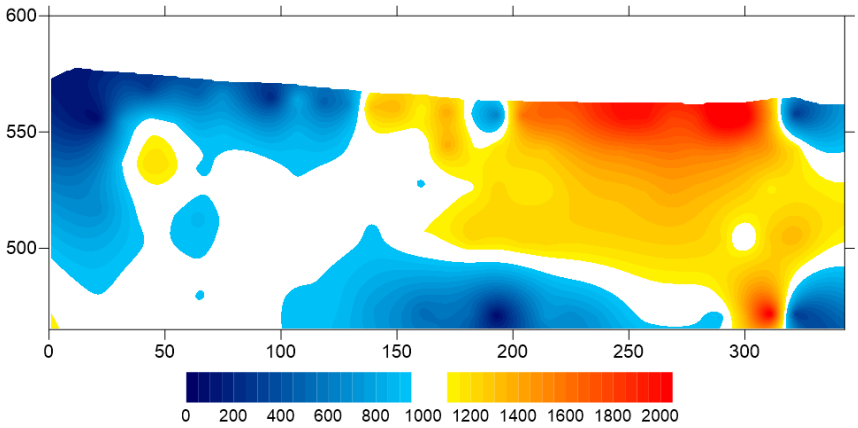
Με βάση τα φιλτραρισμένα δεδομένα, παρατηρείται μία αρνητική ανωμαλία της πραγματικής συνιστώσας στα 300 περίπου μέτρα, η οποία παραπέμπει σε επαφή γεωλογικών σχηματισμών, ενώ παρατηρούνται και ανωμαλίες που παραπέμπουν σε αγώγιμες ζώνες στα 180 και 280 μέτρα της όδευσης.

Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει τα πρώτα 120 περίπου μέτρα με μικρότερες αντιστάσεις, ενώ στην συνέχεια οι αντιστάσεις αυξάνονται, γεγονός που οφείλεται στην αλλαγή του σχηματισμού του διμαρμαρυγιακού γνευσίου στον αμφιβολίτη, η οποία αλλαγή λαμβάνει χώρα στα 115 περίπου μέτρα του προφίλ. Επιπλέον παρατηρείται ακόμη μία πιθανή επαφή σχηματισμών στα 310 μέτρα του μοντέλου, η οποία όμως δεν έχει κάποιο άμεσο αντίκρυσμα στον γεωλογικό χάρτη.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.85 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 15



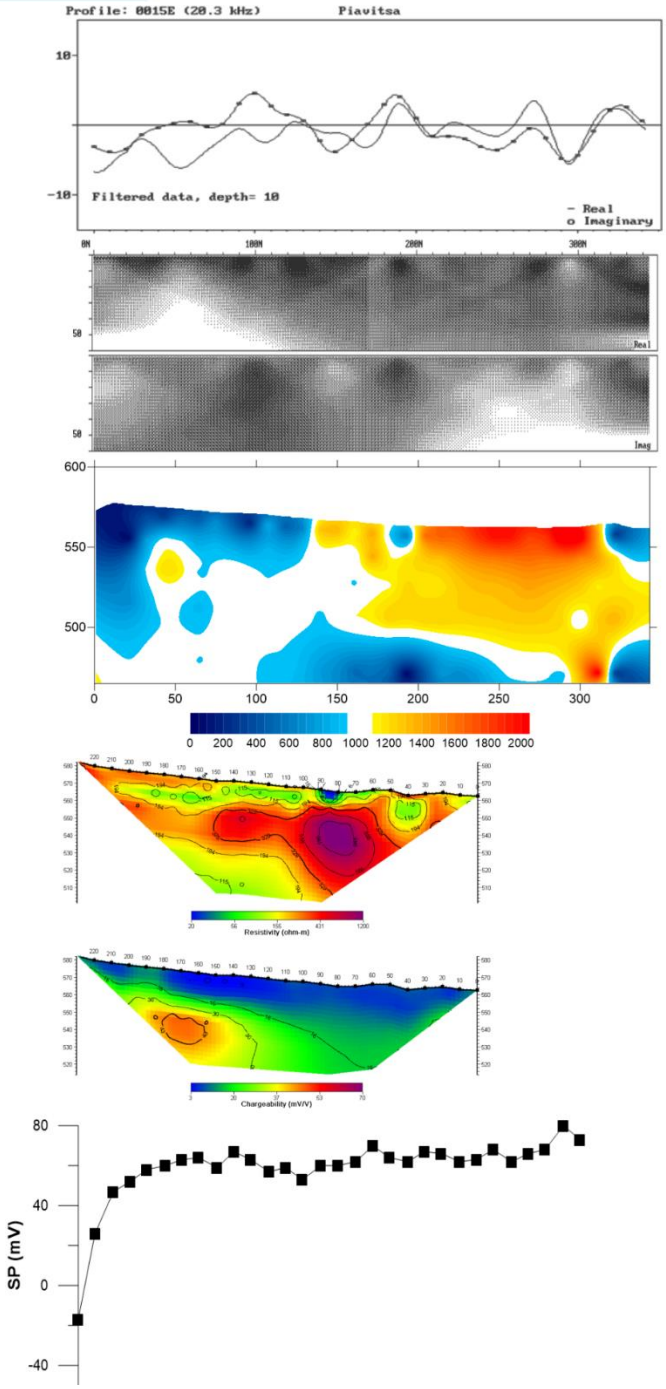
Σχήμα 5.86 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 15

5.14.4 Συνδυαστική ερμηνεία

Η συνδυαστική εικόνα όλων των αποτελεσμάτων των μεθόδων για την 15η περιοχή, δηλαδή τα φιλτραρισμένα δεδομένα VLF, το μοντέλο της πυκνότητας ρεύματος, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των δεδομένων VLF, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των τομογραφικών δεδομένων, το μοντέλο της φορτιστικότητας καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση που έχουν αυτά στον χώρο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.87.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Για την ευκολότερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται επίσης σχηματική απεικόνιση των γεωτρήσεων σε σχέση με τα μοντέλα της αντίστασης και της φορτιστικότητας στο Σχήμα 5.88.

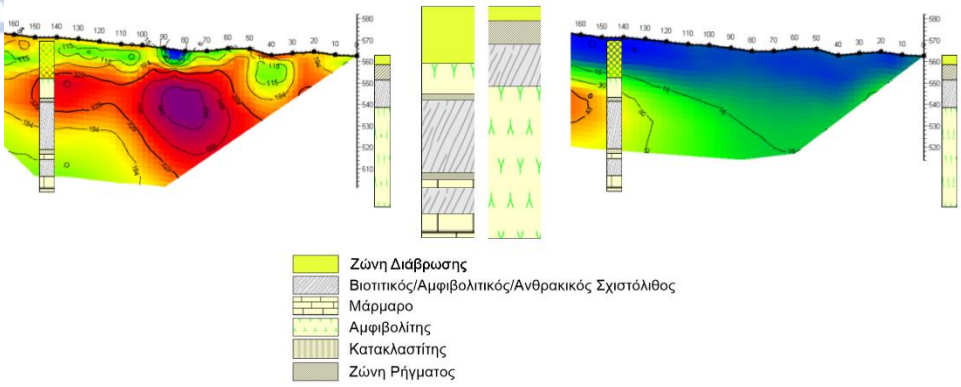


Σχήμα 5.87 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 15

Αρχικά, παρατηρείται η πολύ καλή συμφωνία των γεωηλεκτρικών δεδομένων με τα δεδομένα των γεωτρήσεων, ενώ παρουσιάζεται μία ζώνη ενδιαφέροντος με κέντρο τα 170 μέτρα με βάση το μοντέλο φορτιστικότητας, η οποία δεν έχει αντίκρυσμα στις μετρήσεις φυσικού δυναμικού, οι οποίες δεν δημιουργούν ανωμαλία στο σημείο. Μία πιθανή εξήγηση για το γεγονός αυτό είναι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα να βρίσκεται εκτός της ζώνης ενδιαφέροντος, με αποτέλεσμα να μην δημιουργείται

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

διαφορά δυναμικού στα άκρα του μεταλλεύματος λόγω διαφορετικού βαθμού οξείδωσής του.



Σχήμα 5.88 Σχηματική απεικόνιση γεωτρήσεων σε σχέση με το μοντέλο αντιστάσεων και φορτιστικότητας, αντίστοιχα, στην περιοχή 15

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας των μέσων τιμών αντίστασης, φορτιστικότητας και φυσικού δυναμικού που δημιούργησε η ζώνη ενδιαφέροντος σε αυτή την περιοχή (Πίνακας 13).

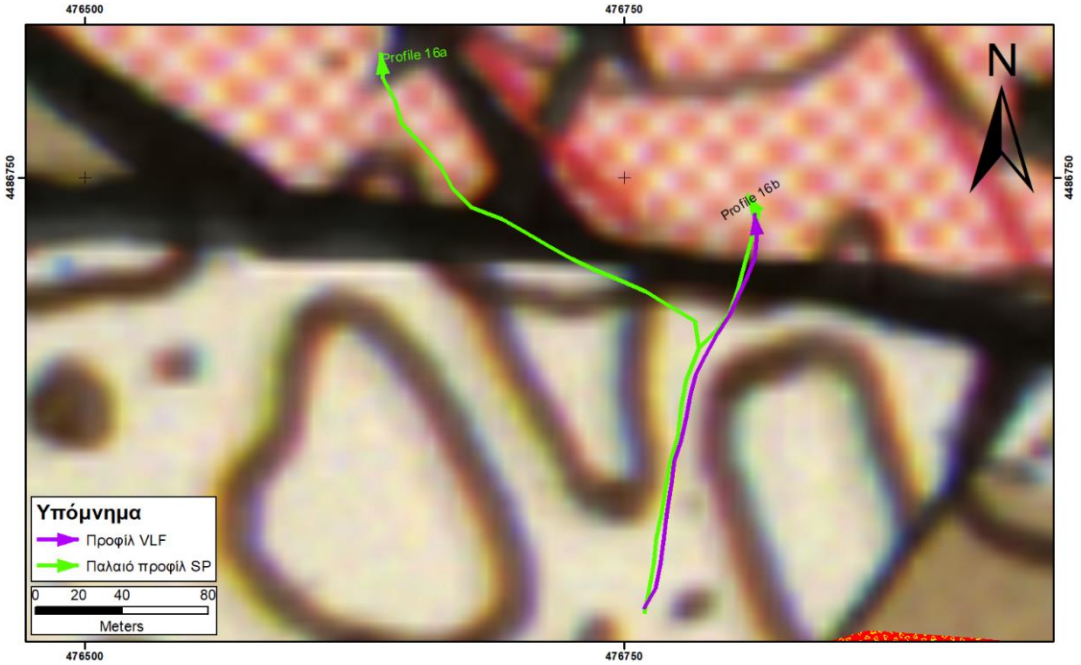
	Ηλεκτρική Αντίσταση (Ohm.m)	Φορτιστικότητα (mV/V)	Φυσικό Δυναμικό (mV)
Περιοχή 15η	197	45	61

Πίνακας 13 Ίχνος της ζώνης ενδιαφέροντος στην 15η περιοχή

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

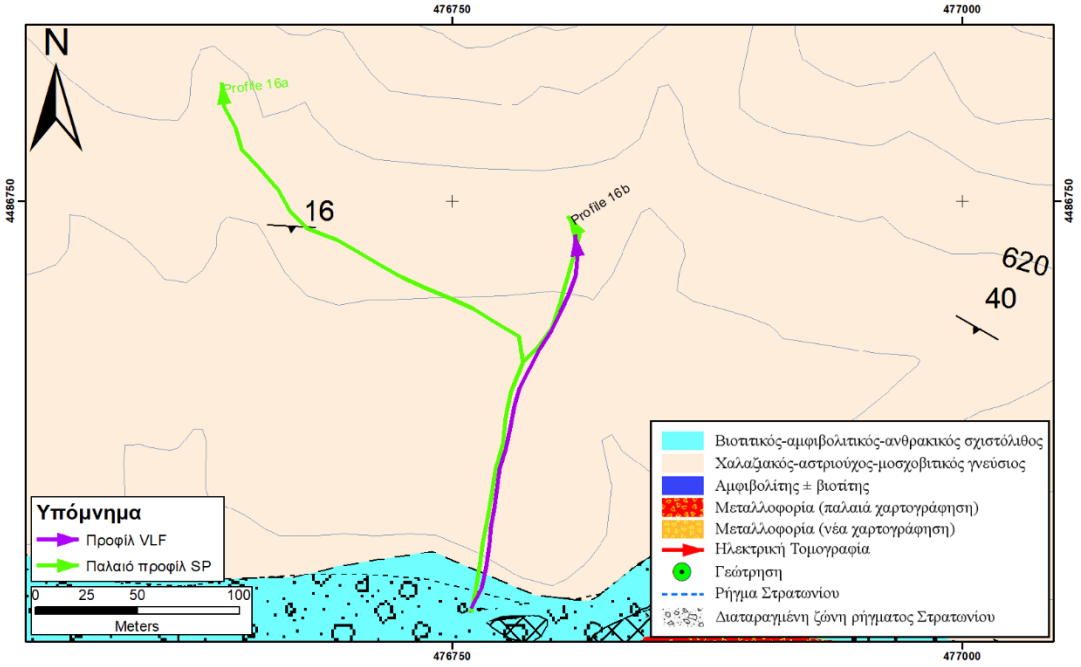
5.15 Περιοχή 16η

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στην 16η περιοχή, καθώς και η γεωλογία σε αυτήν (Σχήμα 5.89).



Σχήμα 5.89 Δομή και γεωλογία της 16ης περιοχής

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φυσικού δυναμικού με τα παλιά ηλεκτρόδια, σε δύο οδεύσεις που ορίζουν διαφορετικό κομμάτι δρόμου, καθώς και μέτρηση VLF. Αρχικά συναντάται ο σχηματισμός των άμμων και των κροκαλών, ο οποίος έρχεται σε επαφή με τον βιοτιτικό γνεύσιο μέσω του ρήγματος του Στρατωνίου.



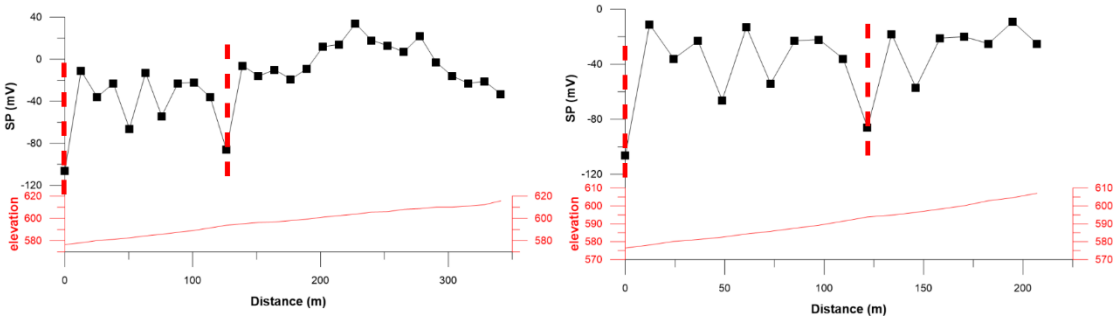
Σχήμα 5.90 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για την 16η περιοχή

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ο χάρτης που προέκυψε από την γεωλογική χαρτογράφηση (Σχήμα 5.90) παρουσιάζει τα πρώτα 20 μέτρα των οδεύσεων να βρίσκονται μέσα στον σχηματισμό του διαταραγμένου σχιστολίθου, ενώ στη συνέχεια επικρατεί ο σχηματισμός του γνευσίου.

5.15.1 Φυσικό Δυναμικό

Οι καμπύλες του φυσικού δυναμικού και για τις δύο οδεύσεις, στην περιοχή που οι μετρήσεις είναι κοινές (κόκκινες παύλες) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.91.



Σχήμα 5.91 Καμπύλη φυσικού δυναμικού για την (α) Δυτική και (β) Ανατολική όδευση στην περιοχή 16

Οι καμπύλες παρουσιάζουν ιδιαίτερες αυξομειώσεις στα πρώτα 120 περίπου μέτρα, στα οποία με βάση τον χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. συναντάται ο σχηματισμός των κροκαλών και των άμμων, ενώ στη συνέχεια στη συνέχεια της όδευσης συναντάται το ρήγμα του Στρατωνίου, γεγονός που υποδεικνύει μία τεκτονικά καταπονημένη ζώνη. Τα δεδομένα δεν παρουσιάζουν ανωμαλία ικανή να παραπέμψει σε ύπαρξη μεταλλοφορίας στην περιοχή αυτή, σε καμμία από τις δύο οδεύσεις.

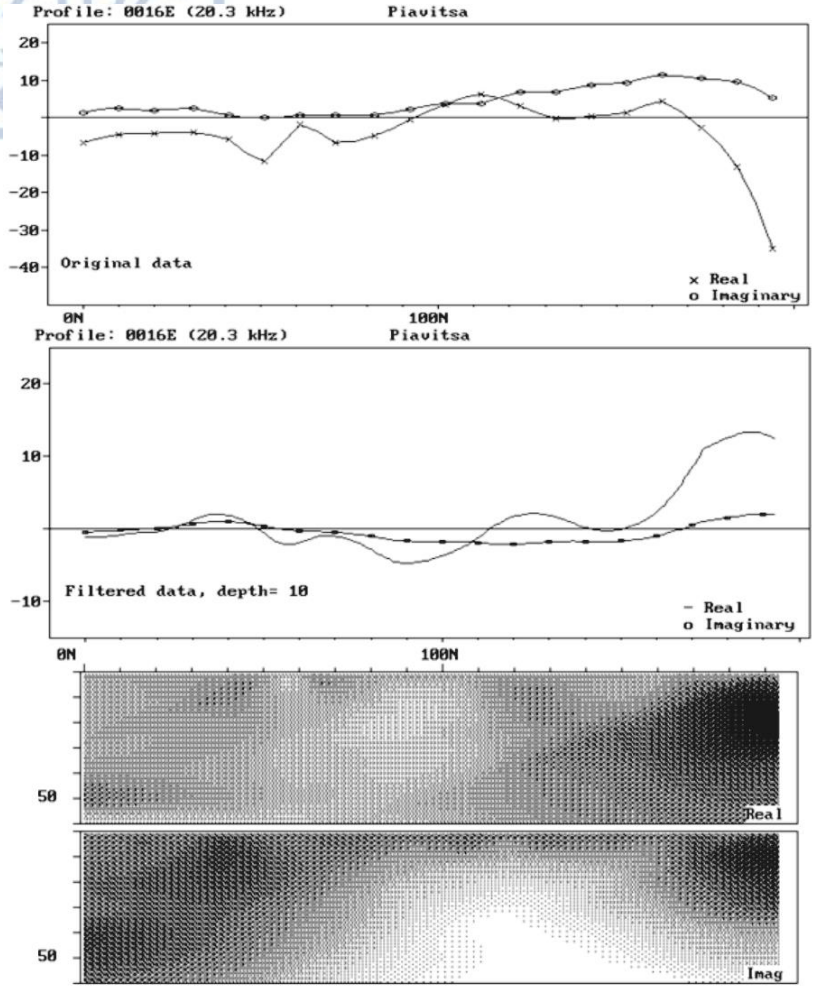
5.15.2 VLF

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το φιλτράρισμα των δεδομένων VLF παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.92, ενώ τα αποτελέσματα της αντιστροφής των δεδομένων στο Σχήμα 5.93.

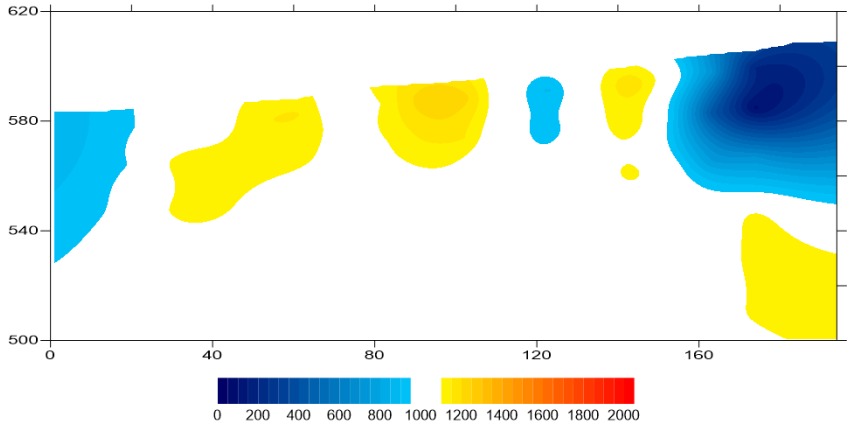
Με βάση τα φιλτραρισμένα δεδομένα παρατηρούνται δύο αγώγιμες ζώνες, στα 125 και 185 μέτρα του προφίλ αντίστοιχα, με την τελευταία να παραπέμπει σε υδροφορία.

Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει εικόνα που έρχεται σε συμφωνία με αυτή των φιλτραρισμένων δεδομένων, με την εμφάνιση αγώγιμων ζωνών στα 125 και 185 μέτρα του προφίλ.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.92 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 16



Σχήμα 5.93 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για το προφίλ 16

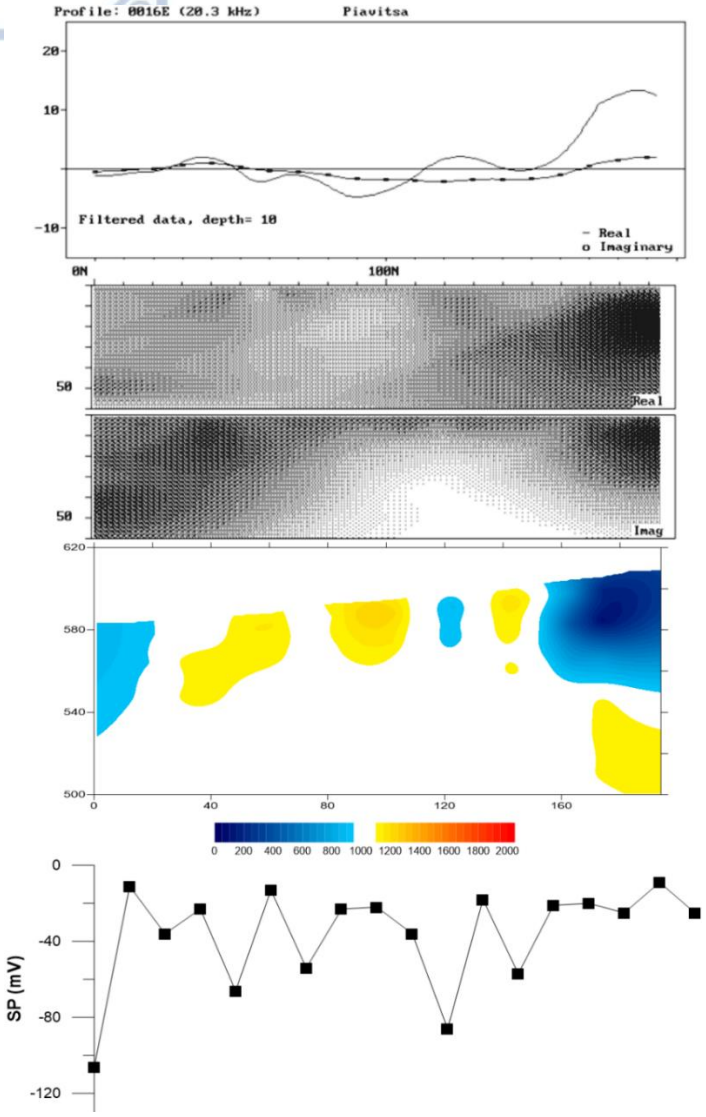
5.15.3 Συνδυαστική ερμηνεία

Η συνδυαστική εικόνα όλων των παραπάνω για την 16η περιοχή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.94. Σε αυτήν διακρίνονται με την σειρά τα φιλτραρισμένα δεδομένα VLF, το μοντέλο της πυκνότητας ρεύματος, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

αντιστροφή των δεδομένων VLF καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση που έχουν αυτά στον χώρο.



Σχήμα 5.94 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 16

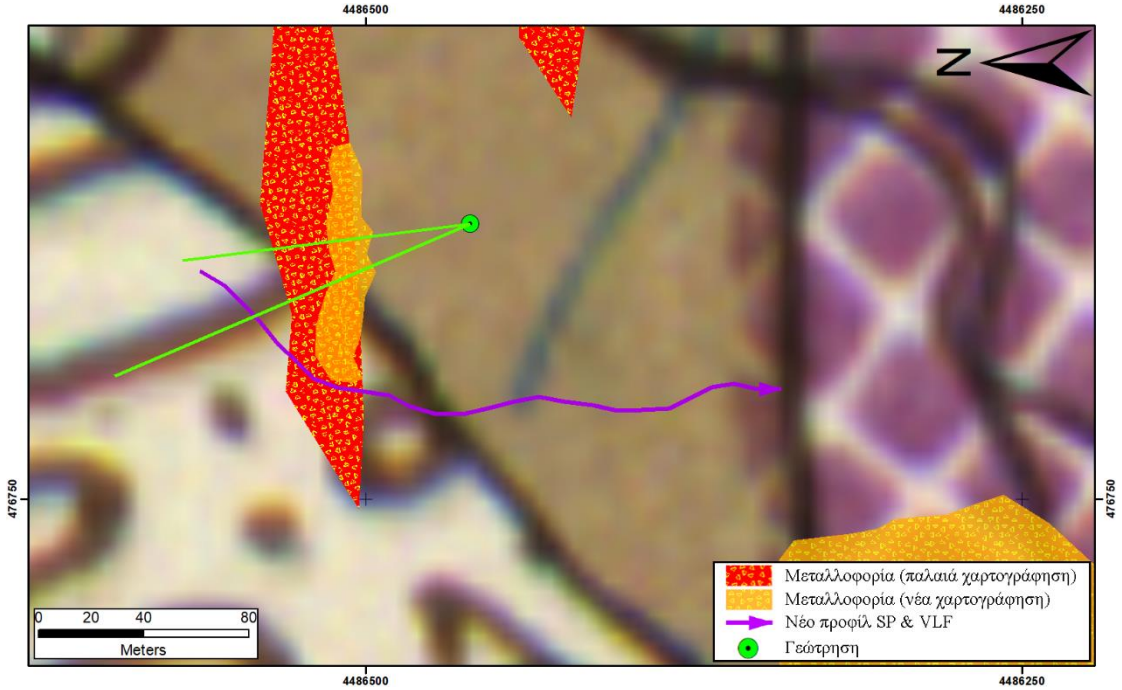
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η αγώγιμη ζώνη στα 185 περίπου μέτρα, η οποία δεν παραπέμπει σε ύπαρξη μεταλλοφορίας στο σημείο, παρά στην ύπαρξη υδροφορίας στην ρηξιγενή περιοχή που φέρνει σε επαφή τον σχηματισμό των κροκαλών και των άμμων, με το σχηματισμό του βιοτιτικού γνεύσιου.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

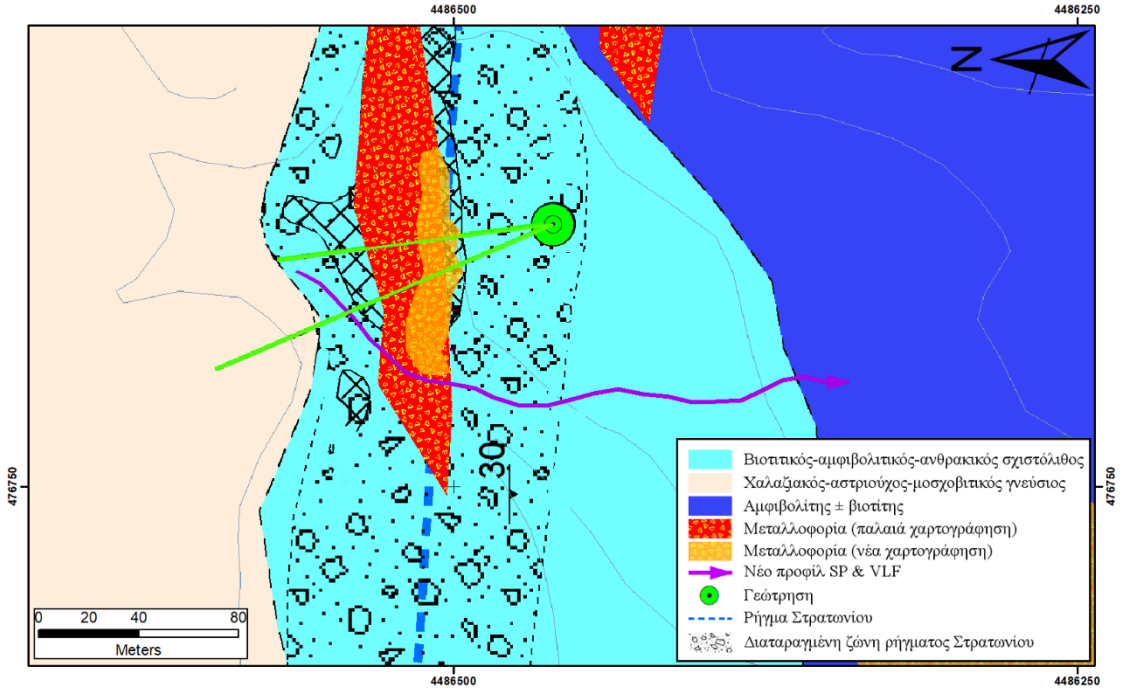
5.16 Περιοχή 19η

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στην 19η περιοχή, καθώς και η γεωλογία σε αυτήν (Σχήμα 5.95).



Σχήμα 5.95 Δομή και γεωλογία της 19ης περιοχής

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φυσικού δυναμικού με τα νέα ηλεκτρόδια, καθώς και μέτρηση VLF, με φορά προς το Νότο. Αρχικά συναντάται ο σχηματισμός των άμμων και των κροκαλών, ο οποίος έρχεται σε επαφή με τον βιοτιτικό γνεύσιο.



Σχήμα 5.96 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για την 19η περιοχή

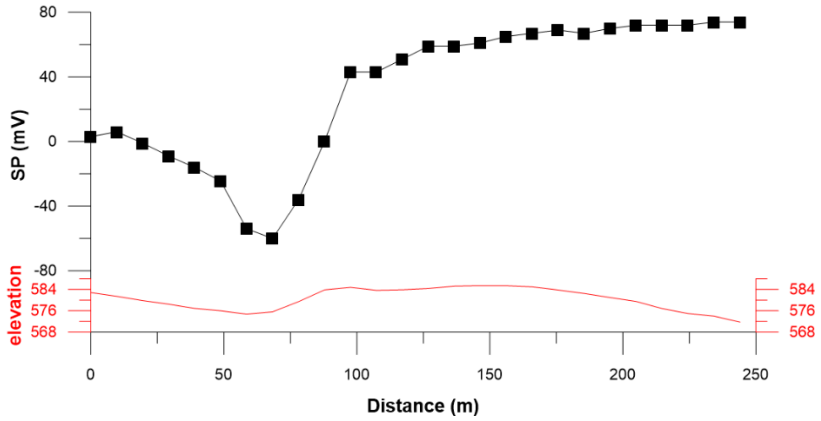
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ

Ο χάρτης που προέκυψε από την γεωλογική χαρτογράφηση (Σχήμα 5.96) παρουσιάζει τις οδεύσεις να βρίσκονται μέσα στον σχηματισμό του διαταραγμένου σχιστολίθου, με τα τελευταία 20 μέτρα αυτών να συναντούν τον σχηματισμό του αμφιβολίτη.

5.16.1 Φυσικό Δυναμικό

Η καμπύλη του φυσικού δυναμικού για την περιοχή αυτή παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 5.97.



Σχήμα 5.97 Καμπύλη φυσικού δυναμικού στην περιοχή 19

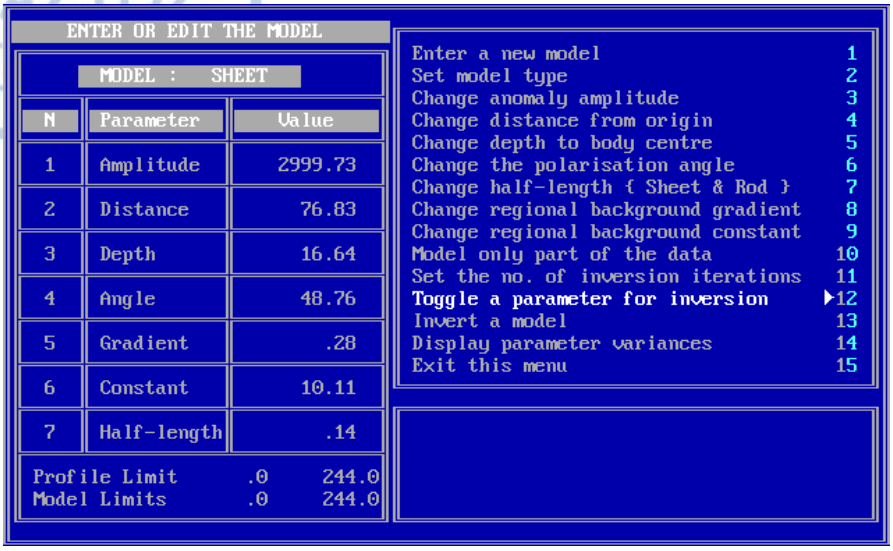
Σε αυτήν, παρουσιάζεται μία μεγάλη αρνητική ανωμαλία της τάξης των -80 mV, η οποία χωρικά συμπίπτει με την χαρτογραφημένη ζώνη μεταλλοφορίας, καθώς και στο σημείο που συναντάται το ρήγμα του Στρατωνίου με βάση τον χάρτη από τη γεωλογική χαρτογράφηση.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ανωμαλία δημιουργείται στη ζώνη του ρήγματος του Στρατωνίου, επιλέχθηκε το επίπεδο ως γεωμετρικό σχήμα του στόχου που δημιουργεί την ανωμαλία φυσικού δυναμικού. Επιπλέον, γνωρίζοντας πως η ανωμαλία σχηματίζεται περίπου στα 65 μέτρα της όδευσης, το μοντέλο που προκύπτει μέσω του λογισμικού SPINV είναι το ακόλουθο (Σχήμα 5.98).

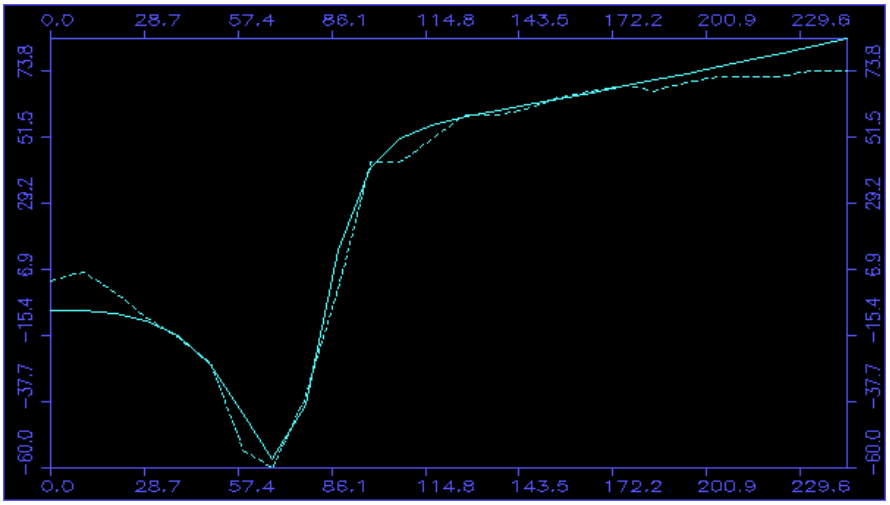
Αντίστοιχα, η εικόνα που προκύπτει από τα συνθετικά δεδομένα με αυτές τις παραμέτρους (συνεχής καμπύλη) σε σχέση με την καμπύλη των πραγματικών δεδομένων (διακεκομμένη καμπύλη) παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.99.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γ Α.Π



Σχήμα 5.98 Παράμετροι που χαρακτηρίζουν την ανωμαλία φυσικού δυναμικού στην περιοχή 19



Σχήμα 5.99 Συνθετική καμπύλη φυσικού δυναμικού σε σχέση με την μετρημένη για την περιοχή 19

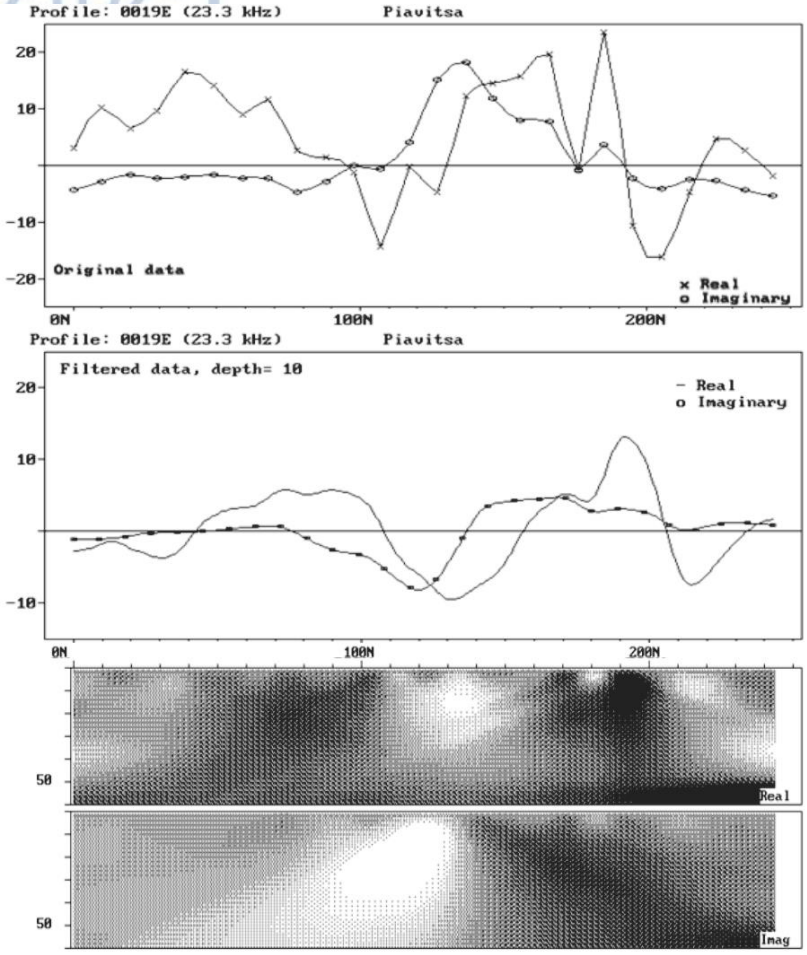
5.16.2 VLF

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το φιλτράρισμα των δεδομένων VLF παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.100, ενώ τα αποτελέσματα της αντιστροφής των δεδομένων στο Σχήμα 5.101.

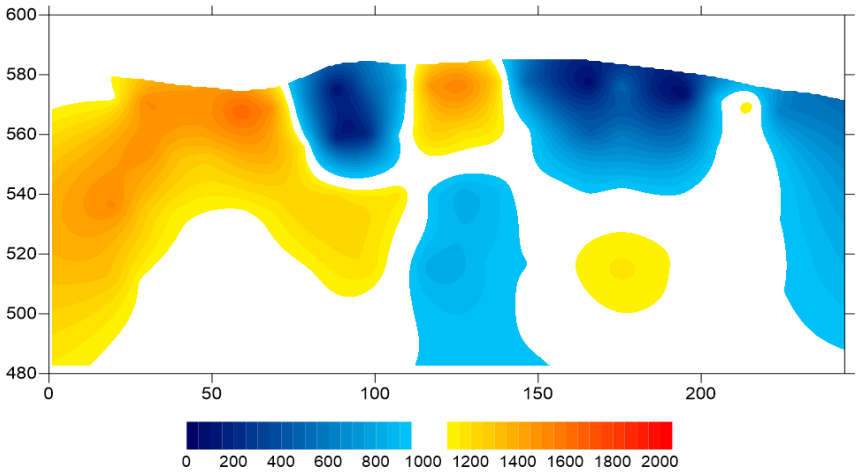
Με βάση τα φιλτραρισμένα δεδομένα, διακρίνεται μία πολύ αγώγιμη ζώνη στα 60 με 100 μέτρα της όδευσης, που παραπέμπει σε αργιλική πλήρωση ή μεταλλοφορία, ενώ στα 130 περίπου μέτρα παρουσιάζεται ανωμαλία η οποία παραπέμπει σε επαφή διαφορετικών γεωλογικών σχηματισμών.

Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει επίσης μία πολύ αγώγιμη ζώνη στα 90 περίπου μέτρα του προφίλ, στην θέση όπου εμφανίζεται η μεταλλοφόρα ζώνη σύμφωνα με τα δεδομένα της νεότερης γεωλογικής χαρτογράφησης στην περιοχή.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.100 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 19



Σχήμα 5.101 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 19

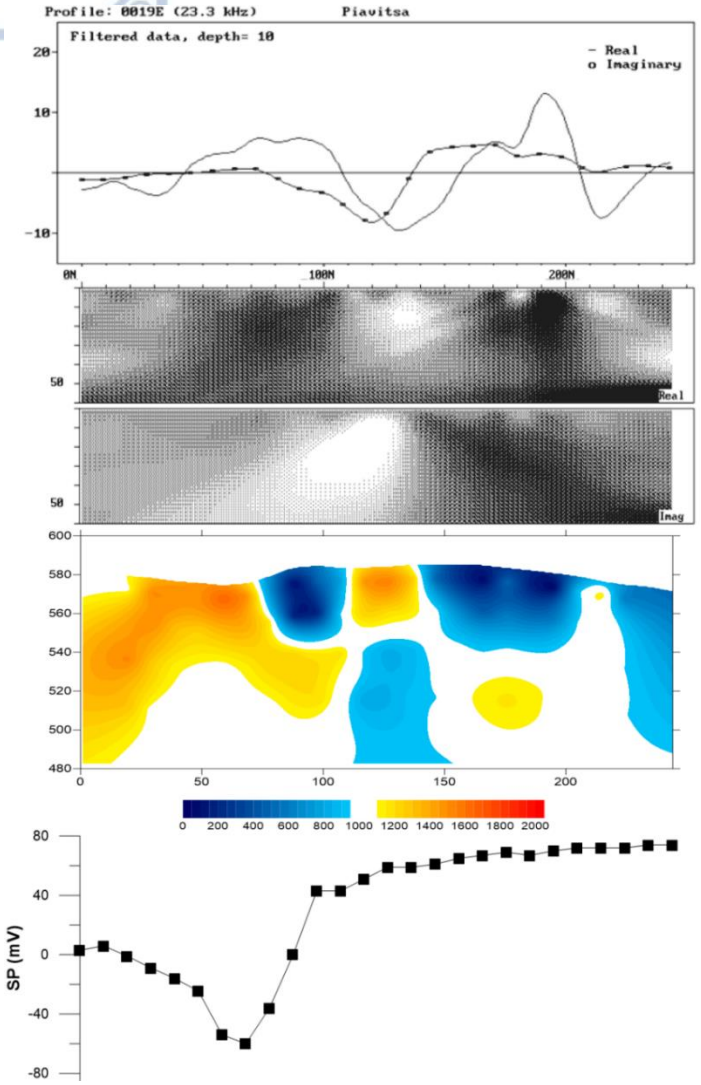
5.16.3 Συνδυαστική ερμηνεία

Η συνδυαστική εικόνα όλων των παραπάνω για την 19η περιοχή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.102. Σε αυτήν διακρίνονται με την σειρά τα φιλτραρισμένα δεδομένα VLF, το μοντέλο της πυκνότητας ρεύματος, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

την αντιστροφή των δεδομένων VLF καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση που έχουν αυτά στον χώρο.



Σχήμα 5.102 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 19

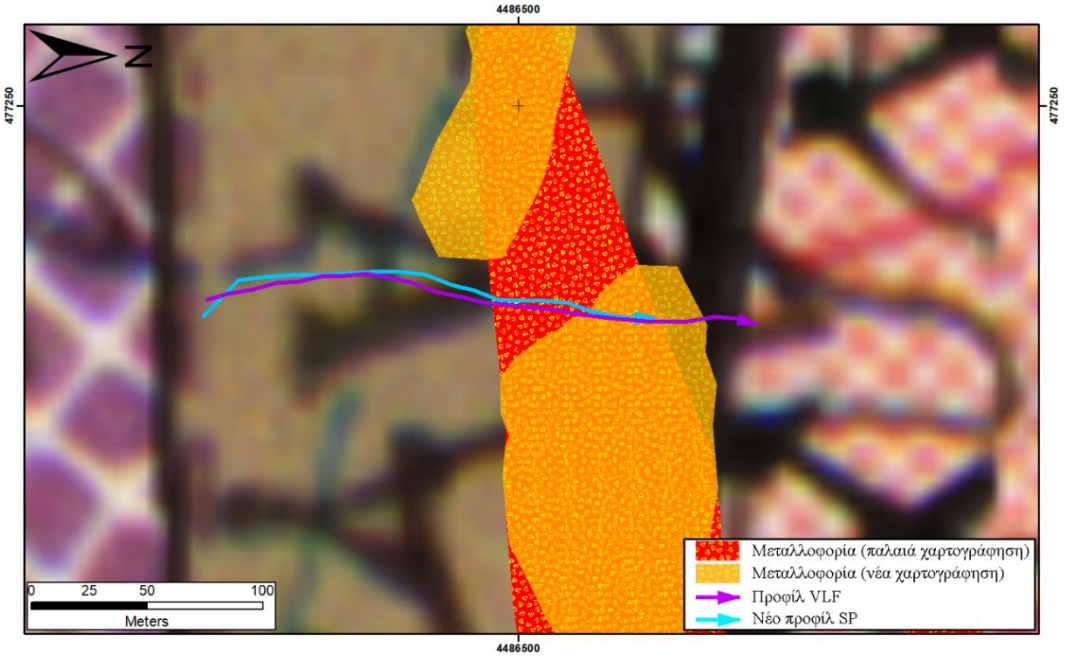
Στα αποτελέσματα τόσο των φιλτραρισμένων δεδομένων VLF, όσο και του μοντέλου αντιστάσεων, καθώς και της καμπύλης του φυσικού δυναμικού παρατηρούνται ανωμαλίες πάνω από την χαρτογραφημένη μεταλλοφόρα ζώνη, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη της, με την μεταλλοφορία να αναπτύσσεται κατά μήκος της ζώνης του ρήγματος του Στρατωνίου, σύμφωνα με τον χάρτη που προέκυψε από τα δεδομένα γεωλογικής χαρτογράφησης.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

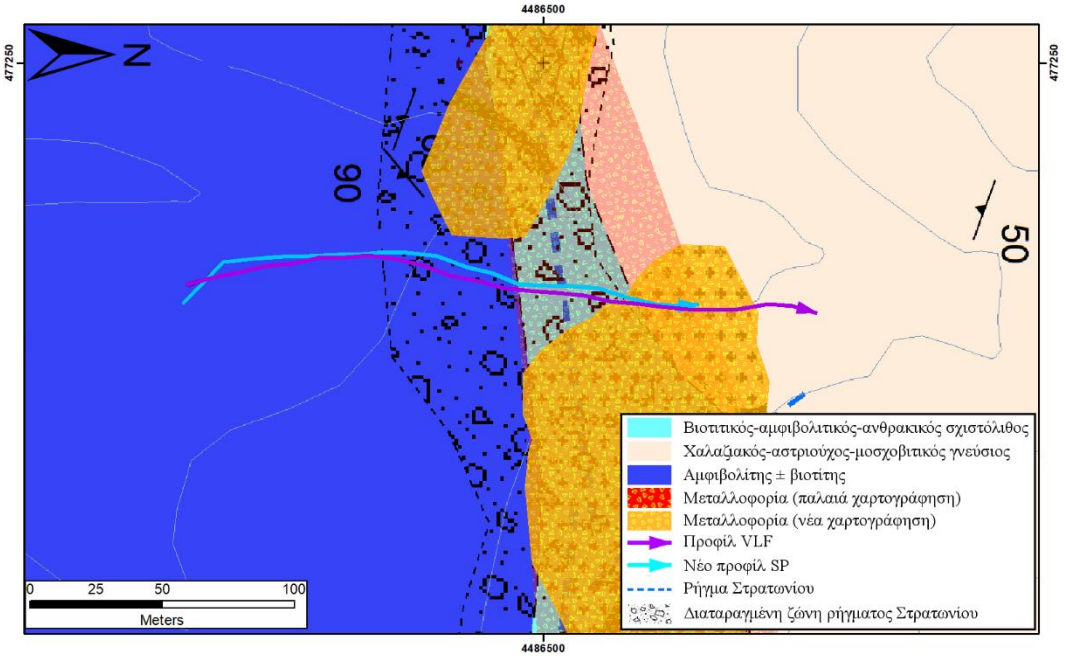
5.17 Περιοχή 20η

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στην 20η περιοχή, καθώς και η γεωλογία σε αυτήν (Σχήμα 5.103).



Σχήμα 5.103 Δομή και γεωλογία της 20ης περιοχής

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φυσικού δυναμικού με τα νέα ηλεκτρόδια, καθώς και μέτρηση VLF, με φορά προς τον Βορρά. Αρχικά συναντάται ο σχηματισμός του διμαρμαρυγιακού γνευσίου, ενώ στα τελευταία μέτρα των οδεύσεων συναντάται ο σχηματισμός του σιδηρούν καλύμματος, το οποίο έρχεται σε επαφή με το σχηματισμό του βιοτιτικού γνευσίου.



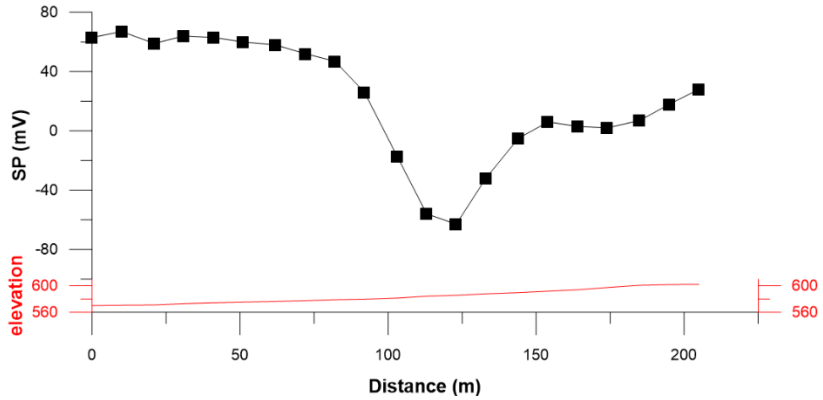
Σχήμα 5.104 Γεωλογία που προέκυψε από γεωλογική χαρτογράφηση για την 20η περιοχή

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ο χάρτης που προέκυψε από την γεωλογική χαρτογράφηση (Σχήμα 5.104) παρουσιάζει τις οδεύσεις να βρίσκονται μέσα στον σχηματισμό του αμφιβολίτη αρχικά, στη συνέχεια συναντάται ο σχηματισμός του διαταραγμένου σχιστολίθου και το ρήγμα του Στρατωνίου, ενώ στα τελευταία μέτρα συναντάται ο σχηματισμός του γνευσίου.

5.17.1 Φυσικό Δυναμικό

Η καμπύλη του φυσικού δυναμικού για την περιοχή αυτή παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 5.105.



Σχήμα 5.105 Καμπύλη φυσικού δυναμικού στην περιοχή 20

Σε αυτήν, παρουσιάζεται μία μεγάλη αρνητική ανωμαλία της τάξης των −80 mV, η οποία χωρικά συμπίπτει με την επαφή του αμφιβολίτη με τον σχιστόλιθο, καθώς και κατά μήκος του ρήγματος του Στρατωνίου, με βάση τον χάρτη που προέκυψε από τη γεωλογική χαρτογράφηση. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μορφή της, η οποία είναι παραπλήσια με αυτήν στην 19^{η} περιοχή (κεφ. 5.16.1), λαμβάνοντας υπόψη ότι έχουν ίδια διεύθυνση μέτρησης και αντίθετη φορά, ενώ διασχίζουν αμφότερες τους ίδιους σχηματισμούς.

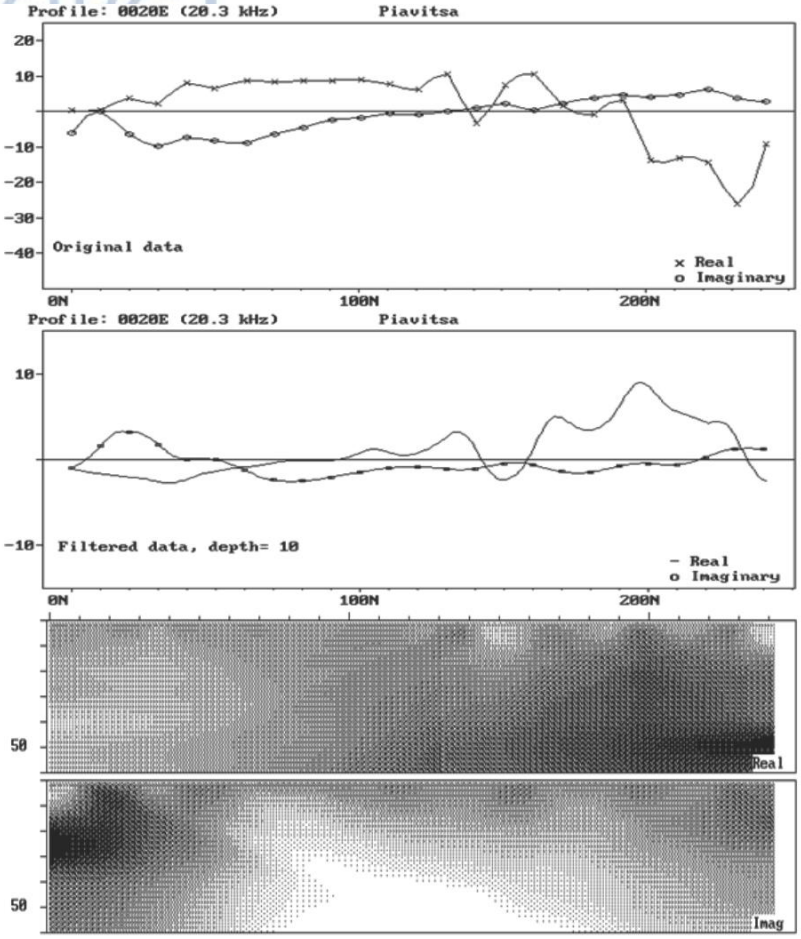
5.17.2 VLF

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το φιλτράρισμα των δεδομένων VLF παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.106, ενώ τα αποτελέσματα της αντιστροφής των δεδομένων στο Σχήμα 5.107.

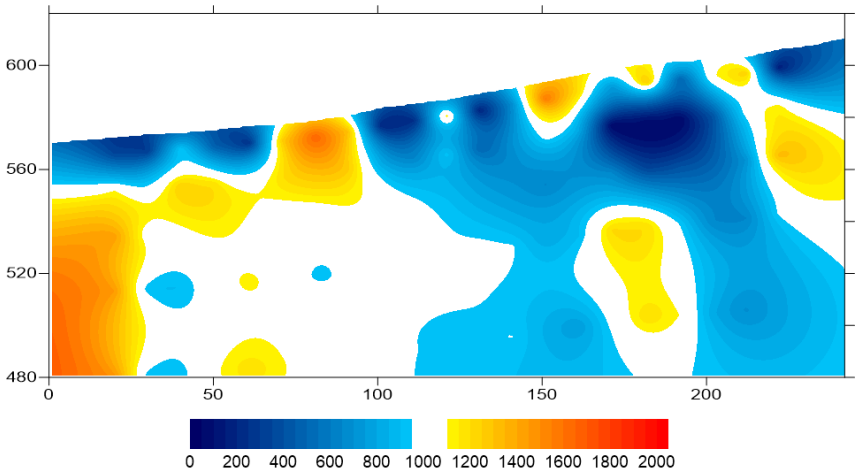
Με βάση τα φιλτραρισμένα δεδομένα, διακρίνεται μία πολύ αγώγιμη ζώνη από τα 90 έως τα 140 περίπου μέτρα, καθώς και μία λιγότερο αγώγιμη από τα 160 έως τα 230 μέτρα της όδευσης.

Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει ένα αγώγιμο περιβάλλον στο σύνολό του, με αγώγιμους στόχους να εμφανίζονται σε ολόκληρη την έκταση του μοντέλου, με ιδιαίτερα αγώγιμους στα 110 και 180 μέτρα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.106 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 20



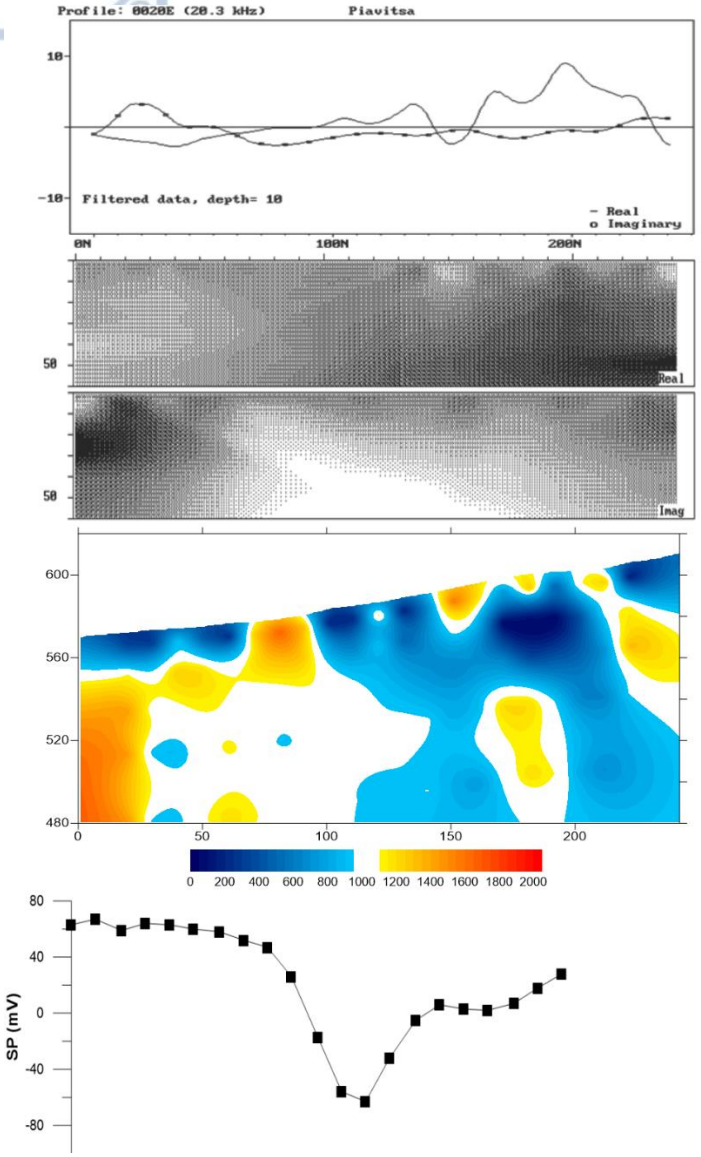
Σχήμα 5.107 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 20

5.17.3 Συνδυαστική ερμηνεία

Η συνδυαστική εικόνα όλων των παραπάνω για την 20η περιοχή παρουσιάζεται στο . Σε αυτήν διακρίνονται με την σειρά τα φιλτραρισμένα δεδομένα VLF, το μοντέλο της πυκνότητας ρεύματος, το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

των δεδομένων VLF καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση που έχουν αυτά στον χώρο.



Σχήμα 5.108 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 20

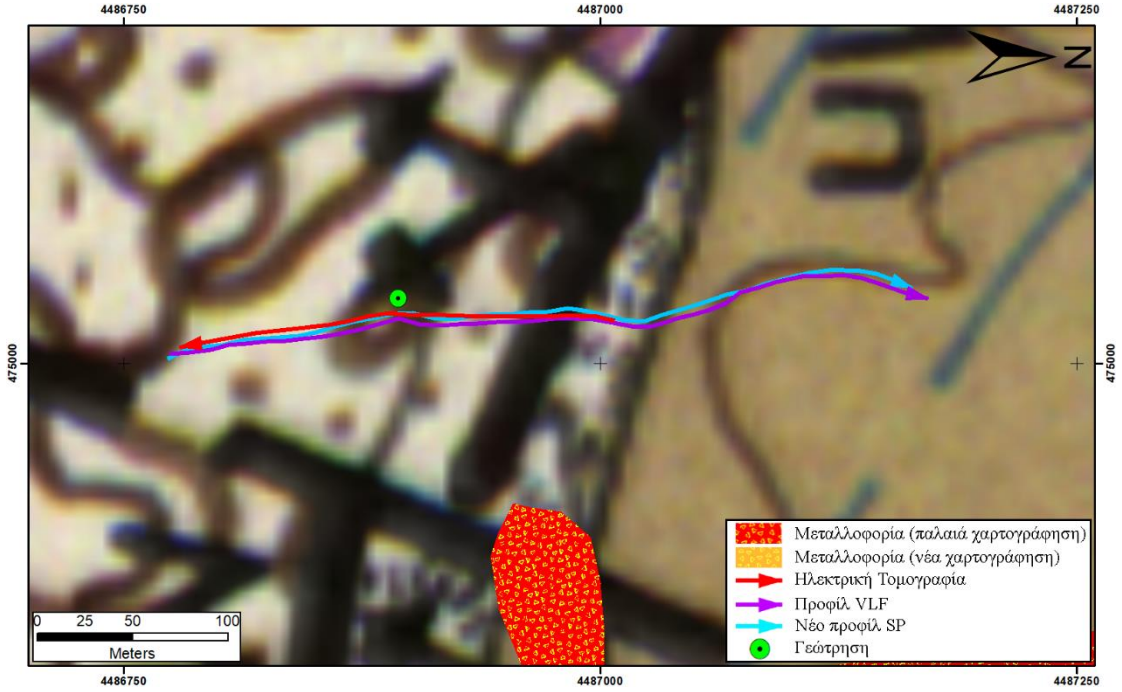
Στα αποτελέσματα τόσο των φιλτραρισμένων δεδομένων VLF, όσο και του μοντέλου αντιστάσεων, καθώς και της καμπύλης του φυσικού δυναμικού παρατηρούνται ανωμαλίες στην επαφή του αμφιβολίτη με τον διαταραγμένο σχιστόλιθο, καθώς και κατά μήκος του ρήγματος του Στρατωνίου, γεγονός που υποδεικνύει την ανάπτυξη μεταλλοφορίας σε αυτή τη ζώνη.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

5.18 Περιοχή 21η

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή των μετρήσεων που έλαβαν μέρος στην 21η περιοχή, καθώς και η γεωλογία σε αυτήν (Σχήμα 5.109).



Σχήμα 5.109 Δομή και γεωλογία της 21ης περιοχής

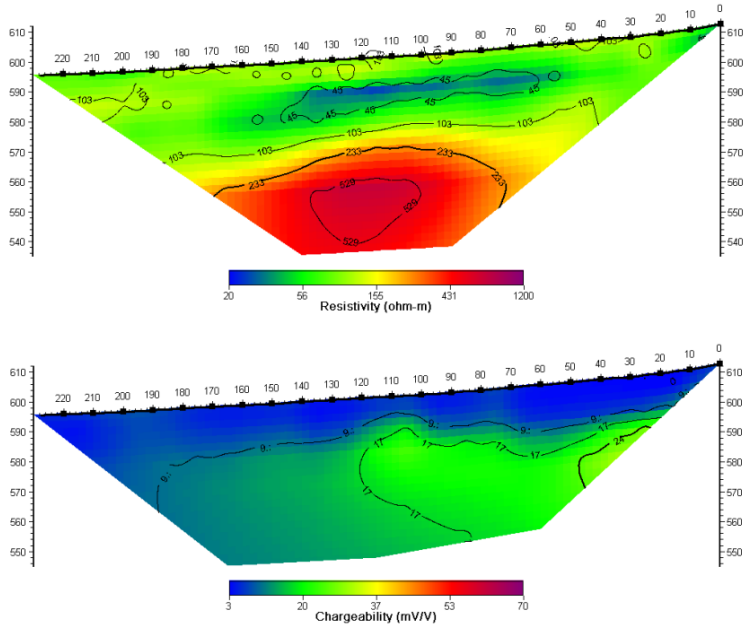
Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας και μέτρηση φυσικού δυναμικού με τα νέα ηλεκτρόδια με φορά προς το Νότο, καθώς και επιπλέον μέτρηση φυσικού δυναμικού και VLF με φορά προς το Βορρά. Αρχικά συναντάται ο σχηματισμός των κροκαλών και των άμμων, ο οποίος έρχεται σε επαφή με το σιδηρούν κάλυμμα και τον διμαρμαρυγιακό γνεύσιο.

Η γεώτρηση, στην θέση που φαίνεται στον χάρτη, δίνει στοιχεία για μία επιφανειακή διαβρωμένη ζώνη έως το βάθος των 24 περίπου μέτρων, στα επόμενα 12 μέτρα έως το βάθος των 36 μέτρων συναντάται ο σχηματισμός του σχιστολίθου που χαρακτηρίζεται ως βιοτιτικός-αμφιβολιτικός-ανθρακικός, ενώ στη συνέχεια και έως το βάθος των 47 μέτρων συναντάται ο σχηματισμός του γνευσίου, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως βιοτιτικός. Στα επόμενα 10 μέτρα συναντάται ο σχηματισμός του αμφιβολίτη, ενώ από τα 57 μέτρα έως και το μέγιστο βάθος διασκόπησης η ζώνη χαρακτηρίζεται ως ρηξιγενής.

5.18.1 Ηλεκτρική Τομογραφία

Τα αποτελέσματα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της φορτιστικότητας για την περιοχή αυτή παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.110.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

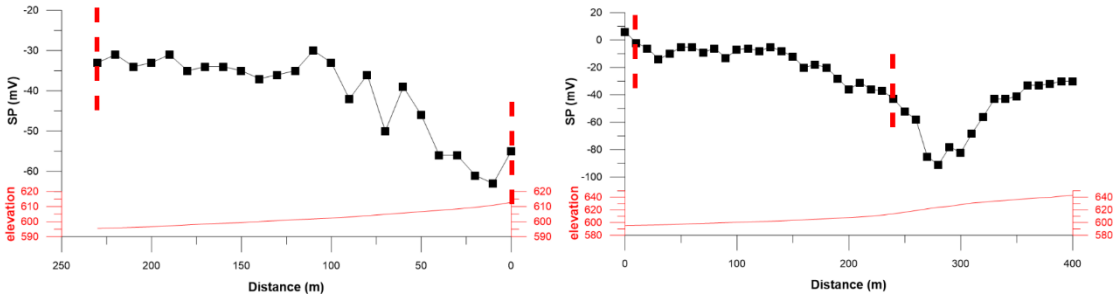


Σχήμα 5.110 Μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (α) και επαγόμενης πόλωσης (β) για την περιοχή 21

Το μοντέλο των αντιστάσεων παρουσιάζει μία ομαλή στρωματογραφία, η οποία έρχεται σε συμφωνία με τα δεδομένα της γεώτρησης. Στα 70 μέτρα το μοντέλο της αντίστασης εμφανίζει ένδειξη για πιθανή ζώνη ρήγματος που κλείνει προς Βορρά, ενώ το μοντέλο της φορτιστικότητας εμφανίζει έναν φορτισμένο στόχο με περισσότερο από 25 mV/V με κέντρο τα 25 μέτρα του μοντέλου, ενώ οι τιμές της φορτιστικότητας ελαττώνονται έως τα 110 μέτρα, όπου και διακόπτονται.

5.18.2 Φυσικό Δυναμικό

Οι καμπύλες του φυσικού δυναμικού, τόσο για την αρχική όσο και για την δεύτερη μέτρηση, στην περιοχή που οι μετρήσεις είναι κοινές (κόκκινες παύλες) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.111.



Σχήμα 5.111 Καμπύλη φυσικού δυναμικού με (α) αρχική και (β) δεύτερη μέτρηση στην περιοχή 21

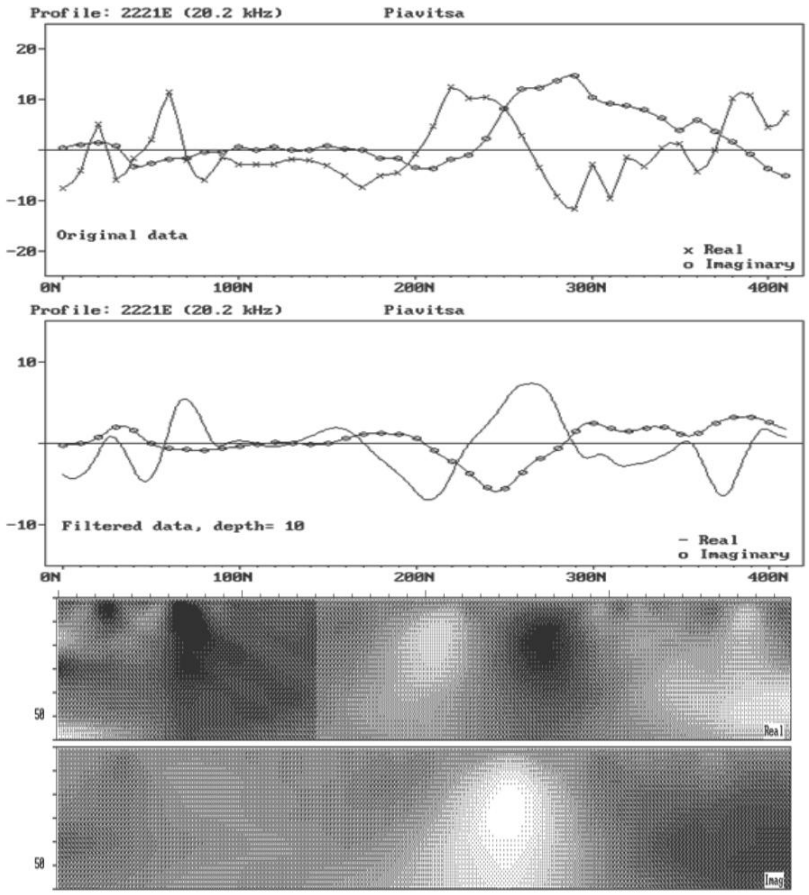
Στην κοινή περιοχή παρουσιάζεται μία μείωση της τάξης των -30mV, σε μία μεγάλη έκταση που καλύπτει τα 110 πρώτα μέτρα της αρχικής όδευσης, η οποία αποτελεί ένδειξη για μεταλλοφορία, μιας και συμπίπτει χωρικά με τον σχηματισμό του

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

σιδηρούν καλύμματος, το οποίο συναντάται στα πρώτα αυτά μέτρα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η δεύτερη μέτρηση, η οποία είναι μεγαλύτερη σε μήκος, στην οποία συναντάται μία μεγάλη αρνητική ανωμαλία στα 290 μέτρα, η οποία παραπέμπει σε πιο συμπαγή μεταλλοφορία, ή μεταλλοφορία με μεγαλύτερη συγκέντρωση μεταλλικών ορυκτών.

5.18.3 VLF

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το φιλτράρισμα των δεδομένων VLF παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.112, ενώ τα αποτελέσματα της αντιστροφής των δεδομένων στο Σχήμα 5.113.

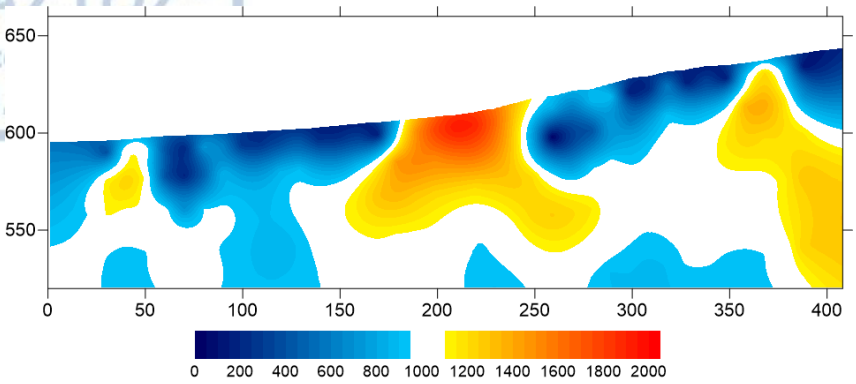


Σχήμα 5.112 Πρωτογενή δεδομένα (α), φιλτραρισμένα (β) και μοντέλο πυκνότητας ρεύματος (γ) για την περιοχή 21

Με βάση τα φιλτραρισμένα δεδομένα, διακρίνεται ανωμαλία που παραπέμπει σε πολύ αγώγιμη ζώνη με κέντρο τα 260 μέτρα, καθώς και ανωμαλία που παραπέμπει σε επαφή σχηματισμών στα 200 μέτρα.

Το μοντέλο των αντιστάσεων έρχεται σε καλή συμφωνία με τα φιλτραρισμένα δεδομένα, καθώς παρουσιάζει μία πολύ αγώγιμη ζώνη στα 260 μέτρα, ενώ χαρτογραφείται πολύ καλά η επαφή του σιδηρούν καλύμματος στα 170 μέτρα με τον σχηματισμό των κροκαλών και των άμμων, καθώς και με τον σχηματισμό του διμαρμαρυγιακού γνευσίου στα 250 περίπου μέτρα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.113 Μοντέλο αντιστάσεων από αντιστροφή δεδομένων VLF για την περιοχή 21

5.18.4 Συνδυαστική ερμηνεία

Η συνδυαστική εικόνα όλων των αποτελεσμάτων των μεθόδων για την 21η περιοχή, δηλαδή το μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων από την αντιστροφή των τομογραφικών δεδομένων, το μοντέλο της φορτιστικότητας καθώς και η καμπύλη του φυσικού δυναμικού, σύμφωνα με την θέση που έχουν αυτά στον χώρο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.114.

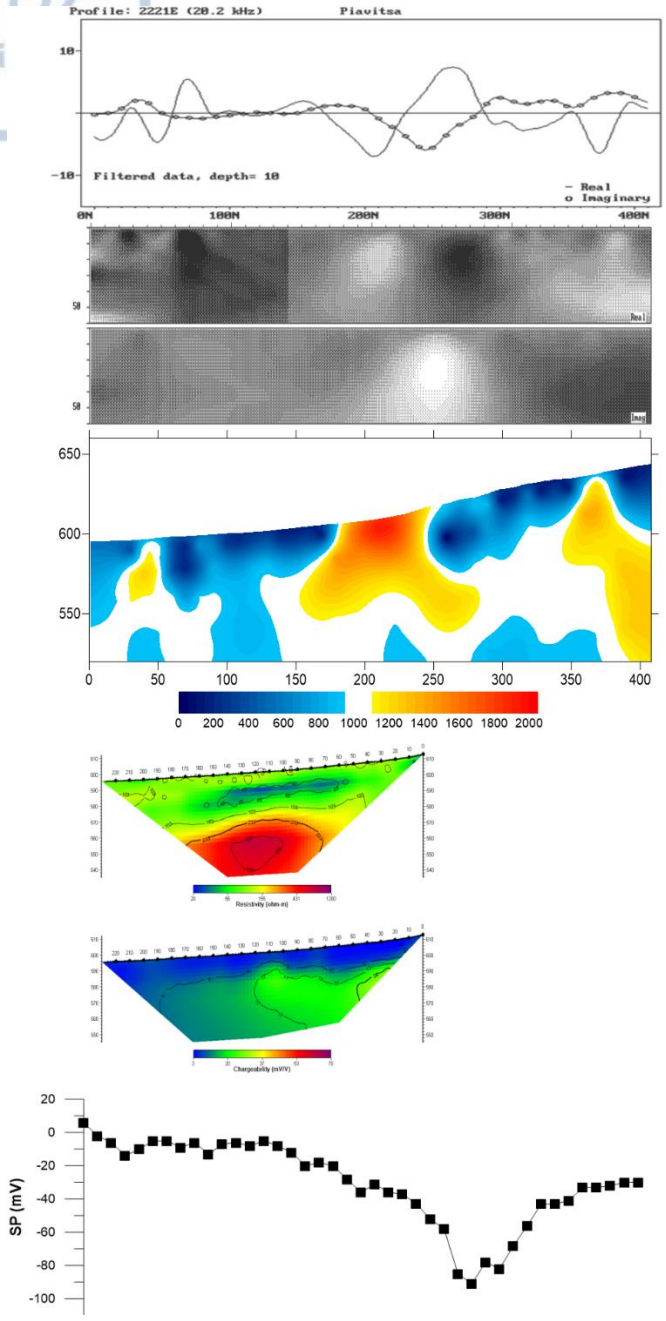
Για την ευκολότερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται επίσης σχηματική απεικόνιση των γεωτρήσεων σε σχέση με τα μοντέλα της αντίστασης και της φορτιστικότητας στο Σχήμα 5.115.

Παρατηρείται η καλή συμφωνία του μοντέλου των αντιστάσεων με τα δεδομένα της γεώτρησης, όπου η επιφανειακή διαβρωμένη ζώνη των 25 περίπου μέτρων αντιστοιχεί σε τιμές $50 - 100\ \mathrm{Ohm.m}$, ενώ είναι εμφανής και η στρωματογραφική επαφή με τον σχηματισμό του σχιστολίθου.

Με βάση το μοντέλο της φορτιστικότητας καθώς και της καμπύλης του φυσικού δυναμικού, διακρίνεται η φορτισμένη περιοχή που καλύπτει το πρώτο μισό των μετρήσεων στο γεωηλεκτρικό μοντέλο, στα πρώτα 40 μέτρα του οποίου παρατηρούνται οι συνεχείς μειώσεις των τιμών του φυσικού δυναμικού, οι οποίες αντιστοιχούν χωρικά στον σχηματισμό του σιδηρούν καλύμματος και καταλήγουν σε μία πιο συμπαγή μεταλλοφορία ή μεταλλοφορία με υψηλότερη περιεκτικότητα εκτός του γεωηλεκτρικού μοντέλου, στην περιοχή που αντιστοιχεί στα 260 έως 320 μέτρα του μοντέλου του VLF.

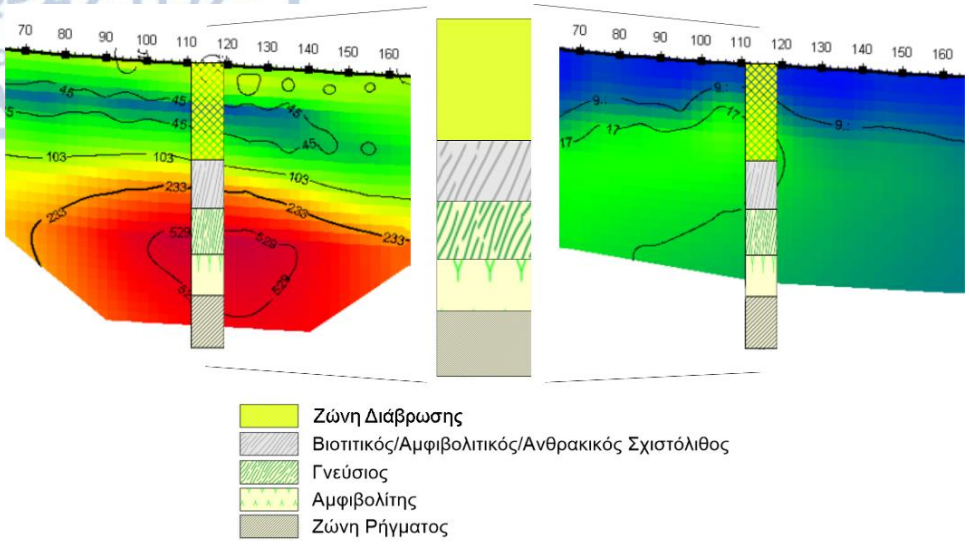
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ



Σχήμα 5.114 Συνδυαστική εικόνα δεδομένων για την περιοχή 21

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 5.115 Σχηματική απεικόνιση γεώτρησης σε σχέση με το μοντέλο αντιστάσεων και φορτιστικότητας, αντίστοιχα, στην περιοχή 21

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

5.19 Σύνοψη

Από την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των γεωφυσικών μεθόδων που εφαρμόστηκαν στις παραπάνω περιοχές, μπορούν να εξαχθούν κάποιες επιπλέον πληροφορίες, οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια.

Στην 1η περιοχή (κεφ. 5.1) παρατηρείται η πολύ καλή συμφωνία του γεωηλεκτρικού μοντέλου των αντιστάσεων με το γεωλογικό μοντέλο. Οι αντιστάσεις του χαλαζιακού-αστριούχου-μοσχοβιτικού γνευσίου παρουσιάζονται μεγαλύτερες από 300 Ohm. m, ενώ αυτές του διαταραγμένου σχιστολίθου από $100 - 200$ Ohm. m. Μία ζώνη μεταλλοφορίας με πιθανή συμμετοχή γραφίτη αναπτύσσεται κατά μήκος του ρήγματος του Στρατωνίου, όπως αυτό εμφανίζεται στον χάρτη της γεωλογικής χαρτογράφησης, στο κέντρο του γεωηλεκτρικού μοντέλου, σε βάθος 25 μέτρων και σε μήκος περίπου 40 μέτρων, η οποία εμφανίζεται στην γεώτρηση μέσα στον σχηματισμό του αμφιβολίτη και αναφέρεται ως ανθρακικές φλέβες με ασβεστίτη και ροδοχρωσίτη.

Στην 2η περιοχή (κεφ. 5.2) παρατηρείται ανωμαλία φυσικού δυναμικού της τάξης των -30 mV από το 90° έως το 210° μέτρο της όδευσης με τα νέα ηλεκτρόδια, το οποίο παρουσιάζει ένδειξη για την ύπαρξη διάσπαρτης μεταλλοφορίας, σε συμφωνία με το γεωλογικό μοντέλο της χαρτογράφησης.

Στην 3η περιοχή (κεφ. 5.3) παρατηρείται η πολύ καλή συμφωνία του μοντέλου των αντιστάσεων από την αντιστροφή των δεδομένων VLF, με τον σχηματισμό του διμαρμαρυγιακού γνευσίου να παρουσιάζεται με πολύ υψηλότερες αντιστάσεις από την τιμή ημιχώρου, ενώ παρουσιάζονται ισχυρές ενδείξεις για ύπαρξη μεταλλοφόρας ζώνης από τα 150 έως τα 220 μέτρα της όδευσης του φυσικού δυναμικού, σχηματίζοντας ξεκάθαρη ανωμαλία της τάξης των -60 mV.

Στην 4η περιοχή (κεφ. 5.4) παρατηρούνται αρνητικές ανωμαλίες φυσικού δυναμικού στα πρώτα 120 μέτρα της όδευσης, οι οποίες συμπίπτουν με το σχηματισμό του σιδηρούν καλύμματος και την χαρτογραφημένη μεταλλοφόρα ζώνη.

Στην 5η περιοχή (κεφ. 5.5) παρατηρούνται αρνητικές ανωμαλίες φυσικού δυναμικού στα πρώτα 250 μέτρα της όδευσης, με μία ζώνη στα 100 μέτρα να παραπέμπουν σε μεγαλύτερη συγκέντρωση μεταλλικών ορυκτών, λόγω της μεγαλύτερης αρνητικής ανωμαλίας φυσικού δυναμικού.

Στην 6η περιοχή (κεφ. 5.6) παρατηρείται αρνητική ανωμαλία φυσικού δυναμικού στα τελευταία 130 μέτρα της όδευσης, η οποία δίνει ένδειξη για ύπαρξη διάσπαρτης μεταλλοφορίας στη ζώνη αυτή.

Στην 7η περιοχή (κεφ. 5.7) παρατηρείται η πολύ καλή συμφωνία του μοντέλου των αντιστάσεων από την αντιστροφή των δεδομένων VLF με το γεωλογικό μοντέλο, με την επαφή του σχηματισμού του μαρμάρου με τον διμαρμαρυγιακό γνεύσιο στα 185 μέτρα της όδευσης να αποτυπώνεται με ακρίβεια, ενώ παρουσιάζεται ένδειξη για ύπαρξη μεταλλοφόρας ζώνης με κέντρο τα 70 μέτρα, η οποία εμφανίζεται ως αγώγιμη ζώνη με βάση τα δεδομένα VLF και παρουσιάζεται αρνητική ανωμαλία φυσικού δυναμικού στο σημείο αυτό.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ

Στην 8η περιοχή (κεφ. 5.8) παρατηρείται η ομοιότητα των αποτελεσμάτων του φυσικού δυναμικού με την 4η περιοχή, καθώς πρόκειται για μετρήσεις με κοινή αρχή και οδεύσεις σε υποπαράλληλους δρόμους. Με βάση αυτά, καθώς και τα δεδομένα από την 2η περιοχή, η οποία βρίσκεται Νοτιοανατολικά των δύο αυτών περιοχών, ενδείκνυται η συνέχεια της χαρτογραφημένης ζώνης μεταλλοφορίας σε όλο το μήκος αυτών των περιοχών, με φορά ΒΒΔ-ΝΝΑ.

Στην 9η περιοχή (κεφ. 5.9) παρατηρείται η καλή συμφωνία του γεωηλεκτρικού με το γεωλογικό μοντέλο. Ο σχηματισμός του χαλαζιακού-αστριούχου-μοσχοβιτικού γνευσίου παρουσιάζεται με ακόμη μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την 1η περιοχή ($> 600\ \Omega\mathrm{hm.m}$) καθώς είναι πιο υγιής και μακριά από τη δράση του ρήγματος του Στρατωνίου, ενώ ο σχηματισμός του διαταραγμένου σχιστολίθου παρουσιάζεται με τιμές μικρότερες από $300\ \Omega\mathrm{hm.m}$. Μία ζώνη μεταλλοφορίας με πιθανή συμμετοχή γραφίτη αναπτύσσεται κατά μήκος της γεωλογικής επαφής του γνευσίου με τον σχιστόλιθο στο κέντρο του γεωηλεκτρικού μοντέλου, σε βάθος 25 μέτρων και σε μήκος περίπου 30 μέτρων, η οποία δεν συναντάται στα στοιχεία της γεώτρησης.

Στην 10η και 12η περιοχή (κεφ. 5.10) παρατηρείται ένα ιδιαίτερα διαταραγμένο περιβάλλον, καθώς το γεωηλεκτρικό μοντέλο μετρήθηκε παράλληλα και κατά μήκος της ανάπτυξης του ρήγματος του Στρατωνίου. Εμφανίζονται τέσσερις ζώνες μεταλλοφορίας με διαφορετική γεωφυσική συμπεριφορά και μορφή: η πρώτη ζώνη εμφανίζεται μεταξύ των 30 και 100 μέτρων του μοντέλου με την πιο κοντινή γεώτρηση να δίνει στοιχεία για διαβρωμένο σχιστόλιθο πλούσιο σε οξείδια μαγγανίου και σιδήρου, το οποίο αντικατοπτρίζεται με τις χαμηλότερες τιμές φορτιστικότητας των στόχων ενδιαφέροντος στην περιοχή. Η δεύτερη ζώνη συναντάται στα 260 με 380 μέτρα με γεώτρηση που βρίσκεται κοντά στα 260 μέτρα να δίνει στοιχεία για λατυποπαγές μάρμαρο πλούσιο σε μεταλλοφορία ροδοχρωσίτη, ενώ άλλη γεώτρηση που βρίσκεται κοντά στα 380 μέτρα επικρατεί ο σχηματισμός του μαρμάρου πλούσιου σε μαγγανιούχα ορυκτά, με παρουσία ροδοχρωσίτη και σουλφιδίων, καθώς και λεπτών ενστρώσεων γραφίτη κατά τόπους. Η τρίτη ζώνη συναντάται στα 430 με 560 μέτρα ενώ η τέταρτη στα 620 με 710 μέτρα, τις οποίες χωρίζει ζώνη ρήγματος στην οποία υπάρχουν ενδείξεις για κίνηση ρευστών, καθώς οι τιμές φυσικού δυναμικού παρουσιάζουν σημαντική αύξηση, με αλλαγή του προσήμου από αρνητικό σε θετικό. Το μοντέλο της φορτιστικότητας παρουσιάζει αύξηση των τιμών των ζωνών ενδιαφέροντος προς τα Ανατολικά, δίνοντας ενδείξεις για την μεγαλύτερη συμμετοχή μεταλλικών ορυκτών προς αυτή τη διεύθυνση.

Στην 11η περιοχή (κεφ. 5.11) δεν υπάρχουν καθαρές ενδείξεις για την ύπαρξη μεταλλοφορίας.

Στην 13η περιοχή (κεφ. 5.12) παρατηρούνται οι υψηλές τιμές αντιστάσεων καθώς και οι θετικές τιμές φορτιστικότητας σε όλη την έκταση του μοντέλου, το οποίο συνδέεται με το γεγονός ότι το μοντέλο μετρήθηκε πάνω στην ανάπτυξη του ρήγματος του Στρατωνίου, με αποτέλεσμα να αποτυπώνεται ως ένα εξαιρετικά διαταραγμένο περιβάλλον. Η φορτιστικότητα του μοντέλου είναι πιθανό να οφείλεται είτε στην συμμετοχή αργιλικών ορυκτών σε όλη την έκταση του μοντέλου, είτε σε διάσπαρτη μεταλλοφορία που προκύπτει από τα δεδομένα γεωλογικής χαρτογράφησης.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ

Στην 14η περιοχή (κεφ. 5.13) παρατηρείται ένα διαταραγμένο περιβάλλον που παρουσιάζει υψηλές αντιστάσεις, καθώς και τέσσερις ζώνες διάσπαρτης μεταλλοφορίας με κέντρο τα 35, 90, 140 και 190 μέτρα και υψηλές τιμές φορτιστικότητας, με μεγάλες αρνητικές ανωμαλίες φυσικού δυναμικού να εμφανίζονται στα 35 και 190 μέτρα. Επιπλέον παρατηρείται η καλή συμφωνία του μοντέλου των αντιστάσεων από την αντιστροφή των δεδομένων VLF, στο οποίο διακρίνεται η αλλαγή του σχηματισμού στα 310 μέτρα του μοντέλου, στο ίδιο σημείο που παρατηρήθηκε κατά τις μετρήσεις πεδίου.

Στην 15η περιοχή (κεφ. 5.14) παρατηρείται η καλή συμφωνία του γεωηλεκτρικού μοντέλου με τα δεδομένα των γεωτρήσεων, με τις αντιστάσεις του αμφιβολίτη, στην υγιή του μορφή, να είναι μεγαλύτερες από 1000 Ohm. m. Μία ζώνη ενδιαφέροντος παρουσιάζεται στα 170 μέτρα του μοντέλου σε βάθος 30 μέτρων, με μήκος 25 μέτρων, το οποίο δεν εμφανίζεται στα στοιχεία των γεωτρήσεων και δεν έρχεται σε συμφωνία με τα δεδομένα φυσικού δυναμικού.

Στην 16η περιοχή (κεφ. 5.15) δεν υπάρχουν ενδείξεις για την ύπαρξη μεταλλοφορίας, παρά για υδροφορία στα τελευταία μέτρα της Ανατολικής όδευσης.

Στην 19η περιοχή (κεφ. 5.16) παρατηρείται μία μεγάλη αρνητική ανωμαλία φυσικού δυναμικού της τάξης των −80 mV σε μία ζώνη από τα 60 έως τα 100 μέτρα της όδευσης, η οποία αναπτύσσεται κατά μήκος του ρήγματος του Στρατωνίου και έρχεται σε συμφωνία με τα δεδομένα γεωλογικής χαρτογράφησης, ενώ τα δεδομένα VLF παρουσιάζουν την ζώνη αυτή ως πολύ αγώγιμη, εντείνοντας τις ενδείξεις για ύπαρξη μεταλλοφορίας που παραπέμπει σε συμπαγές σώμα.

Στην 20η περιοχή (κεφ. 5.17) παρατηρείται μία μεγάλη αρνητική ανωμαλία φυσικού δυναμικού της τάξης των −80mV σε μία ζώνη από τα 80 έως τα 150 μέτρα της όδευσης, η οποία αναπτύσσεται κατά μήκος της επαφής των σχηματισμών του αμφιβολίτη με τον διαταραγμένο σχιστόλιθο, καθώς και κατά μήκος του ρήγματος του Στρατωνίου, και παρουσιάζει ιδιαίτερες ομοιότητες με την ανωμαλία στην 19η περιοχή, λαμβάνοντας υπόψη ότι πρόκειται για παράλληλες μετρήσεις με αντίθετη φορά μέτρησης των οδεύσεων, σε παραπλήσιο γεωλογικό περιβάλλον.

Στην 21η περιοχή (κεφ. 5.18) παρατηρείται η καλή συμφωνία του γεωηλεκτρικού μοντέλου τόσο με το γεωλογικό μοντέλο, όσο και με τα δεδομένα της γεώτρησης, με την αντίσταση της επιφανειακής ζώνης διάβρωσης να φτάνει τιμές από 50 έως 100 Ohm. m. Ενδιαφέρον παρουσιάζεται στα πρώτα 110 μέτρα των γεωηλεκτρικών μοντέλων, όπου στα 20 μέτρα εμφανίζεται μία ζώνη με υψηλότερες τιμές φορτιστικότητας και μεγαλύτερες αρνητικές ανωμαλίες φυσικού δυναμικού, οι οποίες συνεχίζουν με μικρότερες τιμές έως το μήκος των 110 μέτρων του μοντέλου, παραπέμποντας σε διάσπαρτη μεταλλοφορία που οφείλεται στο σχηματισμό του σιδηρούν καλύμματος. Στην περαιτέρω μέτρηση φυσικού δυναμικού και VLF στην περιοχή παρατηρείται η ύπαρξη πολύ αγώγιμης ζώνης με εμφάνιση μεγαλύτερης αρνητικής ανωμαλίας φυσικού δυναμικού με κέντρο τα 270 μέτρα, η οποία παραπέμπει σε μία πιο συμπαγή μορφή μεταλλοφορίας, ή μεταλλοφορίας με μεγαλύτερες περιεκτικότητες μεταλλικών ορυκτών.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

6 Συμπεράσματα

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται την εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων στην περιοχή Πιάβιτσα, στην Βορειοανατολική Χαλκιδική, η οποία παρουσιάζει επιφανειακές εμφανίσεις μεταλλοφορίας μαγγανίων και σουλφιδίων. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόστηκαν οι ηλεκτρικές μέθοδοι του φυσικού δυναμικού, της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τόσο με δεδομένα συνεχούς ρεύματος όσο και επαγόμενης πόλωσης, καθώς και η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος VLF, με στόχο τον εντοπισμό και την ταυτοποίηση αυτών των δομών σε σχέση με δεδομένα χαρτογραφικών μελετών, τον χαρακτηρισμό τους τόσο από φυσική όσο και από γεωφυσική άποψη μέσω της συνδυαστικής ερμηνείας των αποτελεσμάτων των μεθόδων, καθώς και την σύγκριση όλων των παραπάνω με το γεωλογικό μοντέλο της περιοχής και με δεδομένα γεωτρήσεων, για την εξαγωγή πιο αξιόπιστων συμπερασμάτων.

Το σύνθετο γεωλογικό μοντέλο της περιοχής σε συνδυασμό με το γεγονός ότι πρόκειται για ένα ιδιαίτερα διαταραγμένο περιβάλλον λόγω της δράσης του ρήγματος του Στρατωνίου καθιστά επιτακτική την συνδυαστική εφαρμογή και ερμηνεία των γεωφυσικών μεθόδων, καθώς τα γεωφυσικά χαρακτηριστικά των μεταλλοφοριών που συναντώνται στην περιοχή δεν είναι τα αναμενόμενα. Πιο συγκεκριμένα, οι αντιστάσεις των μεταλλοφόρων σωμάτων, είτε ως διάσπαρτη μεταλλοφορία είτε ως συμπαγής, αποδείχθηκαν σε πολλές περιπτώσεις πολύ υψηλότερες από τις αναμενόμενες, είτε λόγω της επιφανειακής εμφάνισής τους, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι τιμές τους, είτε λόγω της κάλυψης των τιμών τους από το ιδιαίτερα αντιστατικό περιβάλλον στο οποίο φιλοξενούνται. Στην αποσαφήνιση τέτοιων προβλημάτων βοήθησε ιδιαίτερα η συνδυαστική ερμηνεία με επιπλέον δεδομένα επαγόμενης πόλωσης, φυσικού δυναμικού και VLF, οριοθετώντας τις ζώνες ενδιαφέροντος, και δίνοντας ενδείξεις για τα φυσικά χαρακτηριστικά τους. Από την άλλη, σε περιοχές όπου εφαρμόστηκε μόνο η μέθοδος του φυσικού δυναμικού, ή ο συνδυασμός φυσικού δυναμικού και VLF, παρουσιάστηκαν δυσκολίες στην ερμηνεία, λόγω της μη μοναδικότητάς αυτής.

Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής, παρατίθενται με τη σειρά κάποια γενικότερα και στη συνέχεια ειδικότερα συμπεράσματα. Τα γενικότερα είναι τα παρακάτω:

- Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν έρχονται σε καλή συμφωνία σε σχέση με τα δεδομένα γεωλογικής χαρτογράφησης, όσο αφορά τον εντοπισμό επιφανειακών εμφανίσεων μεταλλοφορίας.
- Αντίστοιχα, η κατανομή των γεωφυσικών ιδιοτήτων συσχετίστηκε με καλή συμφωνία, επίσης, και με τα δεδομένα των γεωτρήσεων -όπου αυτά υπήρχαν-, δείχνοντας την σχέση των περιοχών μεταλλοφορίας με τον αντίστοιχο γεωλογικό σχηματισμό μέσα στον οποίο αναπτύσσονται.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

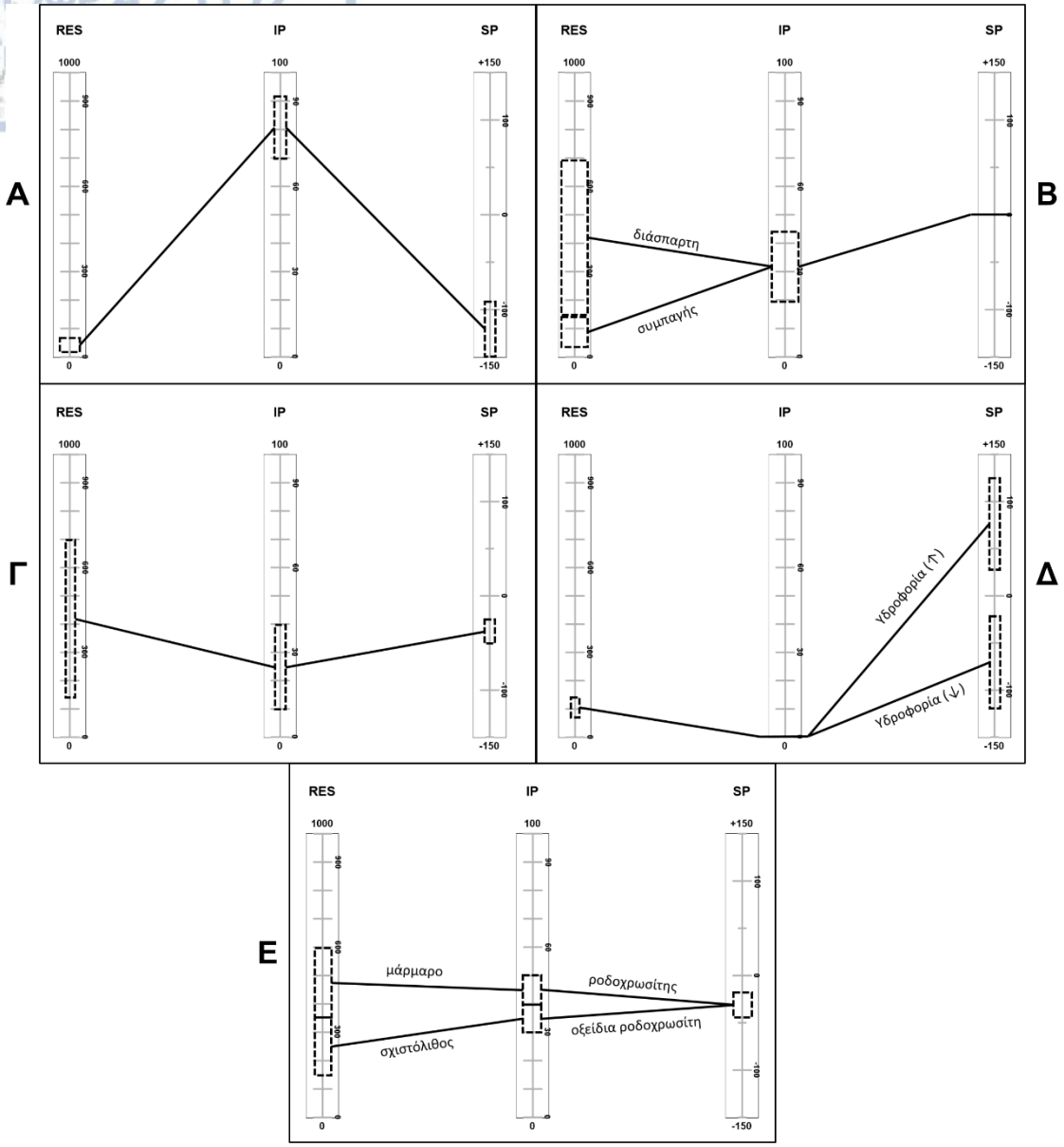
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

- Οι ζώνες μεταλλοφορίας αναπτύσσονται κατά κύριο λόγο παράλληλα στη διεύθυνση του ρήγματος του Στρατωνίου (Α-Δ), όπως αυτό εμφανίζεται στους χάρτες μικρότερης κλίμακας που προέκυψαν από τη γεωλογική χαρτογράφηση, ενώ δευτερευόντως εμφανίζονται με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ.
- Η ηλεκτρική τομογραφία αποτέλεσε ισχυρό οδηγό για τον εντοπισμό δομών ενδιαφέροντος, καθώς και για τον χαρακτηρισμό των γεωφυσικών τους χαρακτηριστικών.
- Η μέθοδος του φυσικού δυναμικού έδωσε ενδείξεις σε κάποιες περιοχές για το είδος της μεταλλοφορίας και για τη συμμετοχή γραφιτικών οριζόντων σε ζώνες ενδιαφέροντος.
- Η αντιστροφή των δεδομένων VLF επιβεβαίωσε σε πλήθος περιοχών το υπάρχον γεωλογικό μοντέλο και το μοντέλο που παρατηρήθηκε στις μετρήσεις πεδίου.
- Η δυσκολία ερμηνείας των αποτελεσμάτων αυξήθηκε σε μεγάλο βαθμό με την εφαρμογή λιγότερων γεωφυσικών μεθόδων.

Τα ειδικότερα συμπεράσματα, τα οποία αφορούν τον γεωφυσικό χαρακτηρισμό των κοιτασμάτων που παρουσιάζονται στην περιοχή είναι τα παρακάτω:

- Οι πολύ χαμηλές τιμές αντιστάσεων, οι υψηλές τιμές φορτιστικότητας και οι μεγάλες αρνητικές ανωμαλίες φυσικού δυναμικού, παραπέμπουν σε ύπαρξη γραφίτη, ιδιαίτερα όταν αυτές συναντώνται στο σχηματισμό του σχιστολίθου (Σχήμα 6.1Α).
- Η μεταλλοφορία που συναντάται εκτός της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα δεν δημιουργεί ανωμαλίες φυσικού δυναμικού, εμφανίζεται με χαμηλές ή υψηλές αντιστάσεις ανάλογα με τη μορφή της μεταλλοφορίας, ενώ εμφανίζει μέτριες τιμές φορτιστικότητας (Σχήμα 6.1Β).
- Η επιφανειακή, διάσπαρτη μεταλλοφορία, εμφανίζεται με ένα μεγάλο εύρος κυρίως υψηλών τιμών αντιστάσεων, με μικρές έως μέτριες τιμές φορτιστικότητας και μικρές έως μέτριες αρνητικές ανωμαλίες φυσικού δυναμικού (Σχήμα 6.1Γ).
- Η κίνηση υπόγειου νερού εμφανίζεται με χαμηλές αντιστάσεις, χωρίς φορτιστικότητα και με θετικές ή αρνητικές τιμές φυσικού δυναμικού, ανάλογα με τη φορά της ροής του (Σχήμα 6.1Δ).
- Τα οξείδια μιας μεταλλοφορίας εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές φορτιστικότητας σε σχέση με την πιο υγιή μορφή της ίδιας μεταλλοφορίας, με διαφορετικές τιμές αντιστάσεων, ανάλογα με το γεωλογικό σχηματισμό στον οποίο φιλοξενούνται, καθώς και με ένα εύρος αρνητικών ανωμαλιών φυσικού δυναμικού, ανάλογα με την περιεκτικότητα που έχουν σε μεταλλικά ορυκτά (Σχήμα 6.1Ε).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 6.1 Σχηματική αναπαράσταση της ερμηνείας των γεωφυσικών ιδιοτήτων που προέκυψαν για την περιοχή μελέτης σε σχέση με χαρακτηριστικές γεωλογικές δομές (αναλυτική εξήγηση στο κείμενο). Εύρος τιμών Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (0 έως 1000 Ohm.m), Φορτιστικότητας (0 έως 100 mV/V) και Φυσικού Δυναμικού (-150 έως +150 mV).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

6.1 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην εργασία αυτή έγινε μία προσπάθεια για αποτύπωση των γεωφυσικών χαρακτηριστικών των μαγγανιούχων κοιτασμάτων στην περιοχή της Πιάβιτσας Χαλκιδικής, όμως δεν αποτελεί σε καμία περίπτωση μία πλήρη μελέτη και υπάρχουν πολλά τα οποία μπορούν να γίνουν. Έτσι, προτείνεται:

- Η πραγματοποίηση γεωφυσικών μετρήσεων όσο πιο κοντά γίνεται σε θέσεις υπαρχόντων γεωτρήσεων, οι οποίες παρέχουν πληροφορία για ύπαρξη μεταλλοφορίας.
- Η μελέτη των γεωχημικών ιδιοτήτων της μεταλλοφορίας (είδος ορυκτών που την αποτελούν και περιεκτικότητά τους), με σκοπό την συσχέτισή και τη σύνδεση των τιμών των γεωηλεκτρικών μοντέλων αντίστασης και φορτιστικότητας με το συγκεκριμένο είδος μεταλλοφορίας.
- Η επέκταση της μελέτης τόσο σε έκταση, με εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων σε περισσότερες περιοχές, όσο και σε βάθος, για την μελέτη των χαρακτηριστικών βαθύτερων ζωνών ενδιαφέροντος.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Βιβλιογραφία

ABEM. (1989). ABEM Wadi VLF instrument instruction manual. Bromma: ABEM Instrument Inc.

Airo, M.-L. (2015). Geophysical signatures of mineral deposit types in Finland. *Geological Survey of Finland, Special Paper*, *58*, 9–70.

Barker, R. D. (1989). Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, *54*(8), 1031–1037. https://doi.org/10.1190/1.1442728

Bleil, D. F. (1953). Induced polarization: A method of Geophysical Prospecting. *Geophysics*, *18*(3), 636–661. https://doi.org/10.1190/1.1437917

Bompaire, J. (1964). *Actes de Xéropotamou*. Paris: P. Lethielleux.

Clark, A. (1990). *Seeing beneath the soil: Prospecting methods in archaeology*. London: B.T. Batsford Ltd. https://doi.org/10.4324/9780203164983

Constable, S. C., Parker, R. L., & Constable, C. G. (1987). Occam's inversion; a practical algorithm for generating smooth models from electomagnetic sounding data. *Geophysics*, *52*(3), 289–300.

Cook, K. L., & Van Nostrand, R. G. (1954). Interpretation of resistivity data over filled sinks. *Geophysics*, *XIX*(4), 761–790. https://doi.org/10.1190/1.1438048

Cooper, G. R. J. (1997). SPINV: Self-Potential data modeling and inversion, *23*(10), 1121–1123.

Corry, C. E. (1985). Spontaneous polarization associated with porphyry sulfide mineralization. *Geophysics*, *50*(6), 1020–1034. https://doi.org/10.1190/1.1441967

Davies, O. (1935). *Roman mines in Europe*. Oxford: Clarendon Press.

Edsen, N. A., & Nissen, J. (1997). VLFMOD, a free forward VLF modeling software package.

Edwards, L. S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, *42*(5), 1020–1036. https://doi.org/10.1190/1.1440762

Fitterman, D. V., & Corwin, R. F. (1982). Inversion of self-potential data from the Cerro

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

Prieto geothermal field, Mexico. *Geophysics*, *47*(6), 938–945.

Ford, K., Keating, P., & Thomas, M. D. (2007). Overview of geophysical signatures associated with Canadian ore deposits. *In Goodfellow, W. D. (Ed) Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*, 939–970. https://doi.org/doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1355

Fox, R. W. (1830). On the Electro-Magnetic Properties of Metalliferous Veins in the Mines of Cornwall. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, *120*(1830), 399–414. Retrieved from http://www.jstor.org/stable/107914

Fraser, D. C. (1969). Contouring of VLF-EM data. *Geophysics*, *34*(6), 958–967.

Galanopoulos, V., & Theodoroudis, A. (1994). Gold silver and base metals in the manganese mineral assemblages of the NE Chalkidiki ore deposits. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, *XXX*(1), 507–518.

Grant, F. S., & West, G. F. (1965). *Interpretation Theory in Applied Geophysics*. New York: McGraw-Hill Book Co.

Gunn, P. J., & Brook, W. A. (1978). MPPO-1, Crone PEM, SP, ground magnetic, MIP and Turam data over drilled massive sulphide mineralisation at Steeple Hill, W.A. *Exploration Geophysics*. https://doi.org/10.1071/EG978164

Karous, M., & Hjelt, S. E. (1983). Linear filtering of VLF dip-angle measurements. *Geophysical Prospecting*, *31*(5), 782–794. https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1983.tb01085.x

Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration* (3rd ed.). Blackwell Science Ltd. https://doi.org/10.1029/EO067i011p00132-01

Kellett, R., Bishops, J., & Reed, E. Van. (1993). The effects of source polarization in CSAMT data over two massive sulfide deposits in Australia. *Geophysics*, *59*(12), 1764–1772. https://doi.org/10.1190/1.1443390

Kim, J. H. (2010). DC_2DPro - User's Guide. Korea: KIGAM.

King, A. (2007). Review of Geophysical Technology for Ni-Cu-PGE deposits. *Ore Deposits and Exploration Technology*, *Proceeding*, 647–665.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Kirsch, R. (2006). *Groundwater Geophysics*. Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-29387-6

Labson, V. F., Becker, A., Morrison, H. F., & Conti, U. (1985). Geophysical exploration with audiofrequency natural magnetic fields. *Geophysics*, *50*(4), 656–664. https://doi.org/10.1190/1.1441940

Langore, L., Alikaj, P., & Gjovreku, D. (1989). Achievements in copper sulphide exploration in Albania with IP and EM methods. *Geophysical Prospecting*, *37*(8), 975–991. https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02243.x

Lundberg, H. (1929). The history of magnetic and electrical prospecting for oil. *Mining Magazine*, *41*(2), 73–78.

Markiewicz, R. D., Davenport, G. C., & Randall, J. A. (1984). The use of self-potential surveys in geotechnical investigations. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1984*, 164–165. https://doi.org/10.1190/1.1894184

Milsom, J. (2003). *Field Geophysics* (3rd ed.). John Wiley and Sons Ltd.

Monteiro Santos, F. A., Mateus, A., Figueiras, J., & Gonçalves, M. A. (2006). Mapping groundwater contamination around a landfill facility using the VLF-EM method - A case study. *Journal of Applied Geophysics*, *60*(2), 115–125. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.01.002

Morgan, L. (2010). *Geophysical characteristics of volcanogenic massive sulfide deposits in volcanogenic massive sulfide occurence model*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-C.

Nyquist, J. E., & Corry, C. E. (2002). Self-potential: The ugly duckling of environmental geophysics. *The Leading Edge*, *21*(5), 446–451. https://doi.org/10.1190/1.1481251

Ogilvy, R. D., & Lee, A. C. (1991). Interpretation of VLF-EM in-phase data using current density pseudosections. *Geophysical Prospecting*, *39*(4), 567–580. https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1991.tb00328.x

Oldenburg, D. W., & Jones, F. H. M. (2007). Inversion for Applied Geophysics. Version 1.0 (2017/06/28). University of British Columbia, Geophysical Inversion Facility, 2000-2007. Retrieved February 5, 2019, from

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

https://www.eoas.ubc.ca/ubcgif/iag/index.htm

Paál, G. (1965). Ore prospecting based on VLF-radio signals. *Geoexploration*, *3*(3), 139–147. https://doi.org/10.1016/0016-7142(65)90016-5

Pain, C. C., Herwanger, J. V., Worthington, M. H., & De Oliveira, C. R. E. (2002). Effective multidimensional resistivity inversion using finite-element techniques. *Geophysical Journal International*, *151*(3), 710–728. https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01786.x

Palacky, G. J. (1988). Resistivity Characteristics of Geologic Targets. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, 52–129. https://doi.org/10.1190/1.9781560802631.ch3

Parasnis, D. S. (1956). The electrical resistivity of some sulphide and oxide minerals and their ores. *Geophysical Prospecting*, *4*(3), 249–278. https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1956.tb01409.x

Pavlides, S. B., & Tranos, M. D. (1991). Structural characteristics of two strong earthquakes in the North Aegean: Ierissos (1932) and Agios Efstratios (1968). *Journal of Structural Geology*, *13*(2), 205–214. https://doi.org/10.1016/0191-8141(91)90067-S

Pridmore, D. F., Hohmann, G. W., Ward, S. H., & Sill, W. R. (1981). An investigation of finite-element modeling for electrical and electromagnetic data in three dimensions. *Geophysics*, *46*(07), 1009–1024.

Pridmore, Donald F., & Shuey, R. T. (1976). The electrical resistivity of galena, pyrite, and chalcopyrite. *American Mineralogist*, *61*, 248–259.

Quarto, R., & Schiavone, D. (1996). Detection of cavities by the self-potential method. *First Break*, *14*(11), 419–430. https://doi.org/10.3997/1365-2397.1996023

Robinson, E. S., & Coruh, C. (1988). *Basic exploration geophysics*. John Wiley and Sons.

Roy, A., & Apparao, A. (1971). Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, *36*(5), 943–959. https://doi.org/10.1190/1.1440226

Sasaki, Y. (1994). 3-D resistivity inversion using the finite-element method.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

Geophysics, *59*(11), 1839–1848. https://doi.org/10.1190/1.1443571

Sato, M., & Mooney, H. M. (1960). The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials. *Geophysics*, *XXV*(1), 226–249. https://doi.org/10.1190/1.1438689

Schiavone, D., & Quarto, R. (1984). Self-potential prospecting in the study of water movements. *Geoexploration*, *22*(1), 47–58. https://doi.org/10.1016/0016-7142(84)90005-X

Seigel, H. O. (1959). Mathematical formulation and type curves for induced polarization. *Geophysics*, *XXIV*(3), 547–565. https://doi.org/10.1190/1.1438625

Seigel, H. O. (1974). The magnetic induced polarization (MIP) method. *Geophysics*, *39*(3), 321–339. https://doi.org/10.1190/1.1440431

Siron, C. R., Rhys, D., Thompson, J. F. H., Baker, T., Veligrakis, T., Camacho, A., & Dalampiras, L. (2018). Structural controls on porphyry Au-Cu and Au-rich polymetallic Carbonate-hosted replacement deposits of the Kassandra mining District, Northern Greece. *Economic Geology*, *113*(2), 309–345. https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4552

Strangway, D. W., Swift, C. M., & Holmer, R. C. (1973). The application of audio-frequency magnetotellurics (AMT) to mineral exploration. *Geophysics*, *38*(6), 1159–1175. https://doi.org/10.1190/1.1440402

Šumi, F. (1959). Geophysical exploration in mining by induced polarization. *Geophysical Prospecting*, *7*(3), 300–310. https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1959.tb01472.x

Swidinsky, A., Hölz, S., & Jegen, M. (2012). On mapping seafloor mineral deposits with central loop transient electromagnetics. *Geophysics*, *77*(3), E171–E184. https://doi.org/10.1190/geo2011-0242.1

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1180/minmag.1982.046.341.32

Tsourlos, P. I. (1995). *Modelling, Interpretation and Inversion of Multielectrode Resistivity Survey Data*. University of York.

Tsourlos, P. I., & Ogilvy, R. D. (1999). An algorithm for the 3-D inversion of

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

tomographic resistivity and induced polarisation data: Preliminary results. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, *2*(2), 30–45.

Ward, S. H. (1959). AFMAG - Airborne and Ground. *Geophysics*, *XXIV*(4), 761–789. https://doi.org/10.1190/1.1438657

Ward, Stanley H. (1990). *Resistivity and induced polarization methods*. *Geotechnical and environmental geophysics*. Society of Exploration Geophysicists. https://doi.org/10.1190/1.9781560802785

Yi, M. J., Kim, J. H., Song, Y., Cho, S. J., Chung, S. H., & Suh, J. H. (2001). Three-dimensional imaging of subsurface structures using resistivity data. *Geophysical Prospecting*, *49*(4), 483–497. https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2001.00269.x

Yüngül, S. (1950). Interpretation of spontaneous polarization anomalies caused by spheroidal orebodies. *Geophysics*, *15*(2), 237–246. https://doi.org/10.1190/1.1437597

Αποστολόπουλος, Γ. (2013). *Σημειώσεις εφαρμοσμένης γεωφυσικής*. Αθήνα: Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Τομέας Μεταλλευτικής, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Ι.Γ.Μ.Ε. (1978). Γεωλογικός χάρτης 1:50000 Φύλλο Σταυρός. Χαρτογράφηση: Dr. Kockel F., Dr. Mollat H., Dr. Walther H.W., Antoniades P., Ioannides K.

Μουντράκης, Δ. Μ. (2010). *Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας*. Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

Παπάγγελος, Ι. (1991). *Το κοινόν του Μαδεμίου*. Θεσσαλονίκη.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης