



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΕΛΙΣΣΑΒΕΤ Σ. ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΙ

ΘΕΜΑ

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ ΚΑΙ
ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΗ
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΜΑΡΓΑΡΙΤΕΣ
ΚΡΗΤΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2024



[λευκή σελίδα]



ΕΛΙΣΣΑΒΕΤ Σ. ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΙ
Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5845

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ ΚΑΙ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΩΝ
ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ
ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΜΑΡΓΑΡΙΤΕΣ ΚΡΗΤΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωφυσικής,
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Επιβλέποντες

Βαργεμέζης Γιώργος
Καντηράνης Νίκος
Παπαδόπουλος Νίκος (ΙΤΕ)

© Ελισσάβετ Σ. Φραγκιαδάκι, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ ΚΑΙ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΩΝ
ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ
ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΜΑΡΓΑΡΙΤΕΣ ΚΡΗΤΗΣ – *Διπλωματική Εργασία*

© Elissavet S. Fragkiadaki, School of Geology, Dept. of Geophysics, 2024

All rights reserved.

COMBINED INTERPRETATION OF GEOPHYSICAL AND MINERALOGICAL
DATA TO THE QUALITATIVE AND QUANTITATIVE EVALUATION OF CLAY
DEPOSITS IN MARGARITES IN CRETE ISLAND – *Bachelor Thesis*



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.



Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	6
Κεφάλαιο 2: Ιστορική περιγραφή χωριού Μαργαριτών	7
Κεφάλαιο 3: Περιοχή έρευνας	8
Κεφάλαιο 4: Ορυκτολογική μελέτη	14
Κεφάλαιο 5: Γεωφυσική μελέτη	17
Κεφάλαιο 5.1: Επαγόμενη πόλωση	17
Κεφάλαιο 5.2: Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση Πετρωμάτων και Σχηματισμών	20
Κεφάλαιο 5.3: Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης	22
Κεφάλαιο 5.4: Φαινόμενη αντίσταση και τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων	25
Κεφάλαιο 5.5: Εφαρμογή Γεωφυσικών μεθόδων και Αποτελέσματα	29
Κεφάλαιο 5.5.1: Όργανο μετρήσεων	30
Κεφάλαιο 5.5.2: Αποτελέσματα μετρήσεων	31
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα	43
Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία	43



Η γεωφυσική είναι ο κλάδος της Γεωλογίας που ασχολείται με τις φυσικές ιδιότητες της Γης και τα φαινόμενα που σχετίζονται με αυτήν, όπως το μαγνητικό πεδίο, η σεισμική δραστηριότητα κ.α. Πιο συγκεκριμένα, η γεωφυσική, μέσω διασκοπήσεων που πραγματοποιεί, βοηθά στην εξερεύνηση και κατανόηση των επιφανειακών και υπόγειων στρωμάτων της Γης ενώ επιπλέον και τον εντοπισμό υδροφόρων στρωμάτων. Οι διασκοπήσεις αυτές χωρίζονται σε μεθόδους, όπως είναι οι σεισμικές, οι μαγνητικές, οι βαρυτικές, οι ηλεκτρικές, οι ηλεκτρομαγνητικές κ.α., οι οποίες επιτρέπουν την ανάλυση της σύνθεσης και της δομής του φλοιού της Γης, χωρίς την ανάγκη για γεωτρήσεις.

Η ορυκτολογία είναι ο κλάδος της Γεωλογίας που ασχολείται με τη μελέτη των ορυκτών, δηλαδή των φυσικών στερεών που αποτελούν τα βασικά υλικά των πετρωμάτων. Εξετάζει τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των ορυκτών, όπως η σκληρότητα, η πυκνότητα, το χρώμα, η διαφάνεια, καθώς και τη κρυσταλλογραφική τους δομή. Επιπλέον, μελετά τις γεωλογικές διαδικασίες που σχηματισμό και την κατανομή των ορυκτών στην Γη. Η ορυκτολογία είναι σημαντική για την κατανόηση της σύνθεσης και διαμόρφωσης του πλανήτη ενώ η μελέτη της συμβάλλει στην ανακάλυψη νέων κοιτασμάτων αλλά και στην κατανομή της γεωχημικής συμπεριφοράς των στοιχείων και διαδικασιών που επηρεάζουν την ποιότητα των εδαφών.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται και τα όρια των αργιλικών υλικών στα επιφανειακά στρώματα της περιοχής μελέτης μέσω της χρήσης της ηλεκτρικής τομογραφίας για την ακριβή μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης των γεωλογικών σχηματισμών. Κάθε σχηματισμός χαρακτηρίζεται από ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών αντίστασης, το οποίο επιτρέπει την αναγνώρισή του μέσω της μεθόδους αυτής. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται χημική ανάλυση δειγμάτων από την περιοχή για τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής σύστασης των αργιλικών υλικών. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής συγκρίνονται με αντίστοιχα ευρήματα από ανασκαφές στην αρχαία Ελεύθερνα, επιτρέποντας τη συσχέτιση γεωλογικών και αρχαιολογικών δεδομένων στην περιοχή μελέτης.

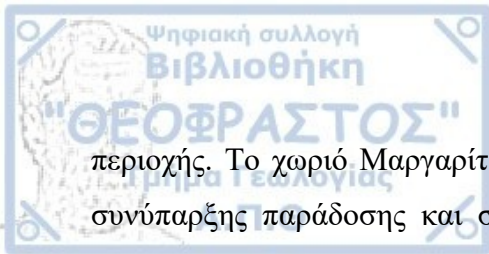
Κεφάλαιο 2: Ιστορική περιγραφή χωριού Μαργαριτών

Οι Μαργαρίτες, ένα παραδοσιακό χωριό στην ενδοχώρα του Ρεθύμνου στην Κρήτη, φημίζονται διεθνώς για την αρχαία και βαθιά ριζωμένη παράδοσή τους στην κεραμική τέχνη. Η σχέση του χωριού με την κεραμική, που βασίζεται στη χρήση της τοπικής αργίλου, ξεκινά από την αρχαιότητα, φτάνοντας μέχρι την εποχή του μινωικού πολιτισμού. Η γεωλογική ιδιαιτερότητα της περιοχής, με την αφθονία αργίλου, αποτέλεσε καταλυτικό παράγοντα στην ανάπτυξη αυτής της τέχνης, η οποία σταδιακά εξελίχθηκε σε κύρια οικονομική δραστηριότητα των κατοίκων.

Η άργιλος, ως εύπλαστο και ανθεκτικό υλικό, αποτέλεσε το πρωταρχικό μέσο για την κατασκευή κεραμικών ειδών, καλύπτοντας τόσο καθημερινές ανάγκες όσο και καλλιτεχνικές και διακοσμητικές απαιτήσεις. Από την αρχαιότητα, οι τεχνίτες στις Μαργαρίτες ανέπτυξαν εξειδικευμένες τεχνικές επεξεργασίας και διακόσμησης της αργίλου, δημιουργώντας αντικείμενα όπως αγγεία, πιάτα, κανάτες και άλλα κεραμικά είδη, που έχουν διατηρηθεί μέσα στο χρόνο. Η διατήρηση αυτής της παράδοσης μέσα από τις γενιές συνέβαλε στη διατήρηση της κεραμικής τέχνης στο χωριό, η οποία παραμένει ζωντανή μέχρι σήμερα.

Οι σημερινοί κάτοικοι του χωριού συνεχίζουν να εφαρμόζουν τις παραδοσιακές μεθόδους επεξεργασίας της αργίλου, σεβόμενοι τις αρχαίες τεχνικές, ενώ ταυτόχρονα ενσωματώνουν σύγχρονες καλλιτεχνικές τάσεις. Στα εργαστήρια του χωριού, οι επισκέπτες έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθήσουν από κοντά όλη τη διαδικασία κατασκευής κεραμικών αντικειμένων, από τη συλλογή της αργίλου μέχρι το πλάσιμο και το ψήσιμο στους φούρνους, προσφέροντας μια μοναδική ματιά στην τοπική παράδοση και στην πολιτιστική κληρονομιά του χωριού.

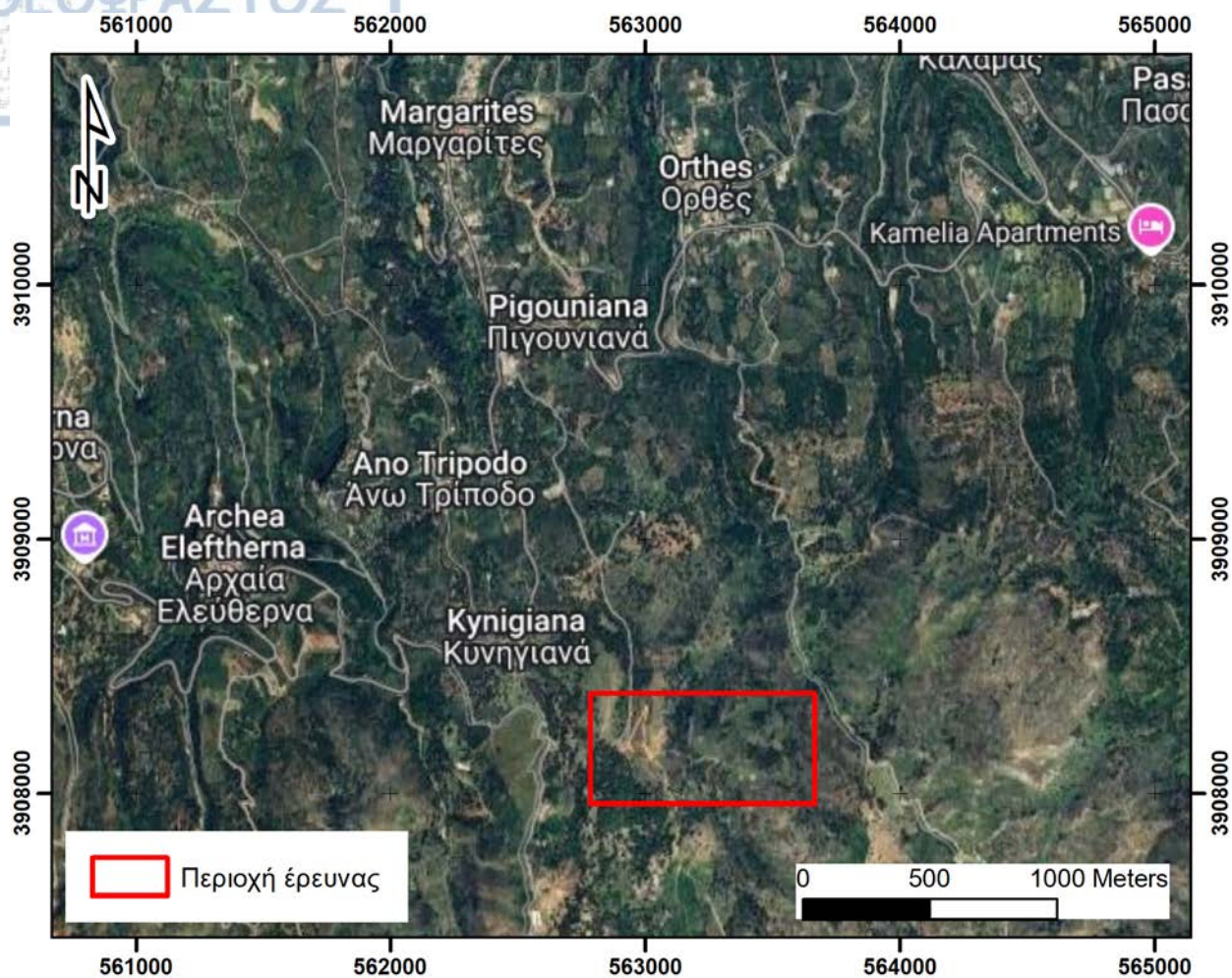
Η κεραμική τέχνη στις Μαργαρίτες δεν αποτελεί απλώς μια τοπική παράδοση. Αντιπροσωπεύει μια ζωντανή σύνδεση της διαχρονικής σχέσης του ανθρώπου με το φυσικό του περιβάλλον. Η άργιλος, που επί αιώνες αποτέλεσε θεμέλιο για την επιβίωση και την καλλιτεχνική δημιουργία, συνεχίζει να εμπνέει τους ντόπιους τεχνίτες, οι οποίοι δημιουργούν έργα που αντικατοπτρίζουν την ιστορία και την πολιτιστική ταυτότητα της



περιοχής. Το χωριό Μαργαρίτες αποτελεί έτσι ένα ζωντανό παράδειγμα της αρμονικής συνύπαρξης παράδοσης και σύγχρονης δημιουργίας, με την άργιλο να παραμένει το κεντρικό στοιχείο αυτής της καλλιτεχνικής κληρονομιάς.

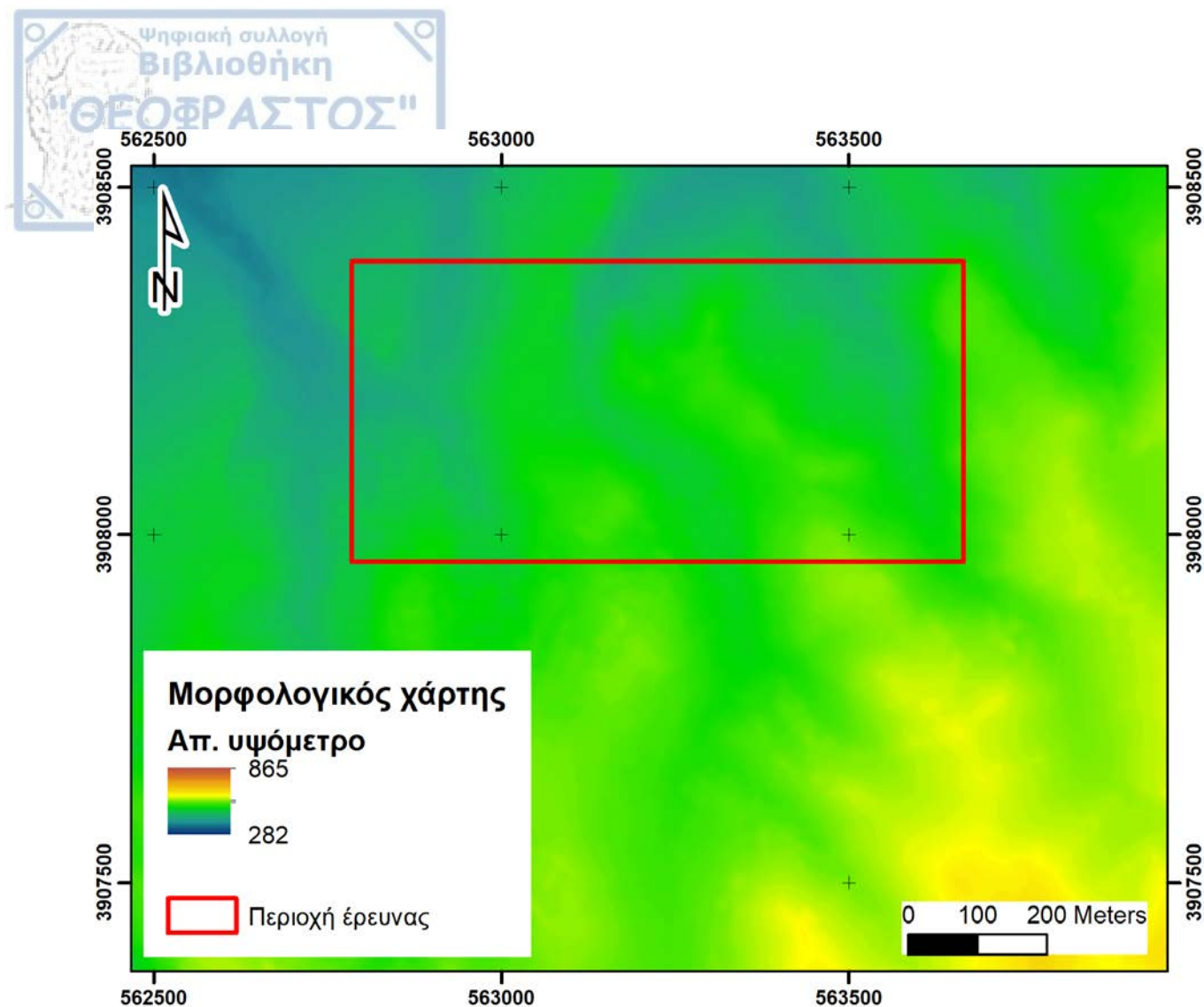
Κεφάλαιο 3: Περιοχή έρευνας

Η περιοχή μελέτης εντοπίζεται 2,5 χιλιόμετρα νότια του χωριού Μαργαρίτες, σε τοποθεσίες όπου, σύμφωνα με τους ντόπιους, πραγματοποιείται ακόμη και σήμερα η εξόρυξη της αργίλου για την κατασκευή κεραμικών αντικειμένων. Παρακάτω εμφανίζεται ο δορυφορικός χάρτης στον οποίο φαίνεται η περιοχή μελέτης σε ορθογώνιο πλαίσιο.



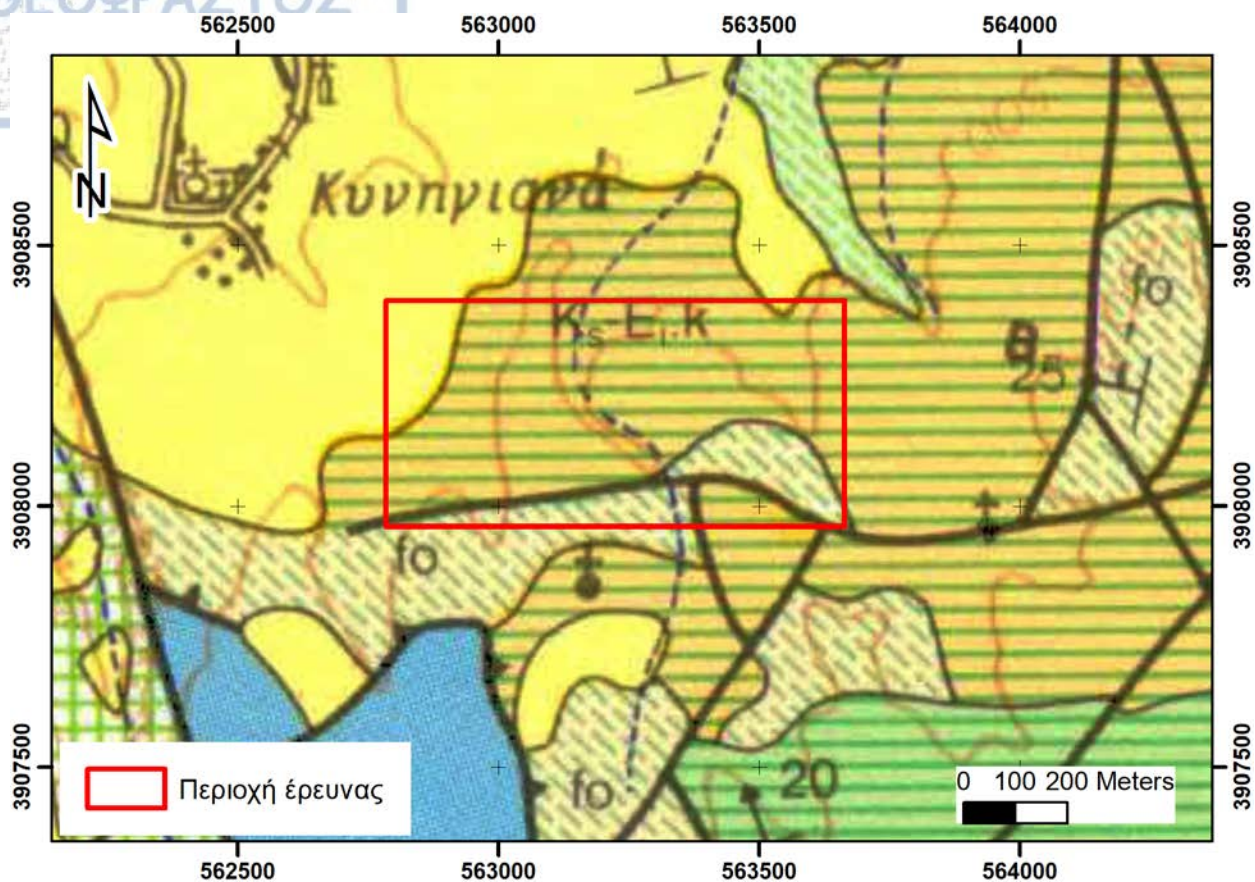
Εικόνα 1: Δορυφορικός χάρτης περιοχής μελέτης

Επιπρόσθετα, παρακάτω εμφανίζεται ο μορφολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης με αυτήν μέσα στο ορθογώνιο πλαίσιο.



Εικόνα 2: Μορφολογικός χάρτης περιοχής μελέτης.

Τέλος, στην παρακάτω εικόνα εμφανίζεται ο γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ με την περιοχή μελέτης σε ορθογώνιο πλαίσιο, σύμφωνα με τον οποίο, στην περιοχή μελέτης εμφανίζονται βιογενείς ασβεστόλιθοι, μάργες, άργιλοι και κροκαλοπαγή ηλικίας Μειοκαίνου, καθώς επίσης φλύσχης και πλακώδεις ασβεστόλιθοι ηλικίας Ηωκαίνου. Παρακάτω στις εικόνες 4,5 φαίνεται αναλυτικά το υπόμνημα του χάρτη της περιοχής μελέτης.

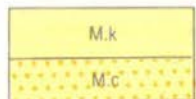


Εικόνα 3: Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης.

ΜΕΙΟΚΑΙΝΟ

Βιογενείς ασβεστόλιθοι, μάργες, άργιλοι και κροκαλοπαγή (M.k): υπέρκεινται ασύμφωνα των αλπικών σχηματισμών και διακρίνονται λιθοστρωματογραφικά σε τρεις ορίζοντες, που είναι από πάνω προς τα κάτω οι εξής:

— Ανώτερος ορίζοντας: αποτελείται από οργανογενείς υφαλώδεις ή στρωματώδεις ασβεστόλιθους, χρώματος υπόλευκου έως τεφροκίτρινου, με Κοράλλια και Φύκη, στους οποίους παρεμβάλλονται μάργες με



Ostrea sp., *Pecten* sp.,

και Βρυόζωα. Κατά θέσεις, (ανατολικά του Περάματος) οι ασβεστόλιθοι είναι ανακρυσταλλωμένοι και αλλού (Άλφα - Πέραμα - Κεραμωτά) αντικαθίστανται από εναλλασσόμενες λεπτο-φυλλώδεις και συνεκτικές μάργες, με φυτικά λείψανα, βελόνες Σπόγγων, υπολείμματα Ψαριών, Μαλακίων και Εχινοδέρμων. Στις παραπάνω μάργες παρεμβάλλονται τεμάχια ασβεστολίθων του υποβάθρου.

— Ενδιάμεσος ορίζοντας: θαλάσσιες και υφάλμυρες αποθέσεις. Στη βάση απαντούν μικρολατυποπαγή, τα οποία εξελίσσονται, προς τα πάνω, σε άμμους και ψαμμίτες με

Heterostegina sp., *Pecten* sp., & *C*

Εκεί όπου το πάχος τους είναι σημαντικό (Βιγλότοποι), εμφανίζονται παρεμβολές ψαμμούχων ασβεστολίθων με Φύκη και Γαστερόποδα (*Turritella* sp.). Οι αποθέσεις αυτές προς τα πάνω εξελίσσονται σε μάργες και αργίλους, κατά θέσεις λεπτοφυλλώδεις με Ελασματοβράγχια.

Εικόνα 4: Υπόμνημα 1 γεωλογικού χάρτη

ΜΕΣΟ-ΑΝΩΤΕΡΟ ΗΩΚΑΙΝΟ

Φύση: μικρές υπολειμματικές εμφανίσεις από πηλίτες, χρώματος κίτρινου, κίτρινότεφρου έως βυσσινί και ψαμμιτικά τεμάχη, χρώματος πράσινου έως καφεπράσινου που έχουν υποστεί ελαφρά μεταμόρφωση. Στα κατώτερα μέλη του απαντούν μικρά τεμάχη ασβεστολιθικών ολισθολίθων με



Globotruncana sp., & *Rudis*

καθώς και ολισθολίθοι εκρηξιγενών πετρωμάτων διαφόρου μεγέθους.
Πάχος: 200 m περίπου.

ΜΕΣΟ-ΑΝΩΤΕΡΟ ΣΕΝΩΝΙΟ - ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΗΩΚΑΙΝΟ

Πλακώδεις ασβεστόλιθοι: είναι τα περισσότερο διαδεδομένα στρώματα της Εθιάς, και από πάνω προς τα κάτω αναλύονται σε:

α) Μεταβατικός ορίζοντας από: α₁) μικρολατυποπαγείς ασβεστόλιθους σε μικρές και σπάνιες εμφανίσεις, χρώματος μαύρου έως τεφρού, μέσο-παχυστρωματώδεις, με πλούσια βενθονική πανίδα από



Nummulites sp., *Alveolina* sp., *Disco*
Assilina sp., *Orbitolites complanatus*
Lockhartia sp.,

που προσδιορίζουν κατώτερο Ηώκαινο και α₂) βιομικριτικούς ασβεστόλιθους ανοιχτόχρωμους λεπτο-μεσο-στρωματώδεις που εναλλάσσονται με στρώσεις μαργαϊκές χρώματος κίτρινόφαιου, καθώς και ψαμμίτες χρώματος τεφρού έως κυανοπράσινου.

Στους βιομικριτικούς ασβεστόλιθους προσδιορίστηκε πλούσια πανίδα από:

Nummulitidae, *Discocyclina* sp., *Globigei*
Lagenidae (*Lagena* sp.), *Discorbidae*,
Globorotalia sp., *Rotaliidae*

θραύσματα Βρυοζώων, Εχινοδέρμων και *Corallinoidea*.
Ηλικία: Παλιόκαινο - Ηώκαινο.

β) Πελαγικοί βιοκλαστικοί και βιομικριτικοί ασβεστόλιθοι με *Globotruncana* μαύροι έως σκουρότεφροι πλούσιοι σε φακούς και κονδύλους, βυσινόχρωμου πυριτικού υλικού, με κατά θέσεις λεπτές σχιστολιθικές ενστρώσεις.

Στρωματογραφικά χαμηλότερα απαντούν λατυποπαγείς υποπράσινοι έως ροδόχρωμοι ασβεστόλιθοι, μεσο-παχυστρωματώδεις, με μικροπανίδα από:

Siderolites calcitrapoides LMK, *Hellenocycli*
Orbitoides apiculata SCHLUMBERGER, *Globo*
Globotruncanita stuarti (DE LAPPARENT), *Glc*
stuartiformis (DALBIEZ), *Contusotruncana fo*,
Omphalocyclus sp., *Rugoglobigerina* sp., *H*,
Gublerina sp., *Heterohelix* sp., *Pithonella o*,
Stomiosphaera sphaerica (KAUFMANN),

καθώς και θραύσματα Ρουδιστών και Εχινοδέρμων.
Ηλικία: Μαιστρίχτιο.

γ) Βιομικροσπαριτικοί ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι, ερυθροί έως ανοικτοπράσινοι και υπόλευκοι, μεσοστρωματώδεις με μικρούς και σχετικά σπάνιους κονδύλους πυριτικού υλικού, με Ακτινόζωα χρώματος λευκού. Τα κατώτερα μέλη τους κατά θέσεις έχουν λατυποποιηθεί.

Απολιθώματα:

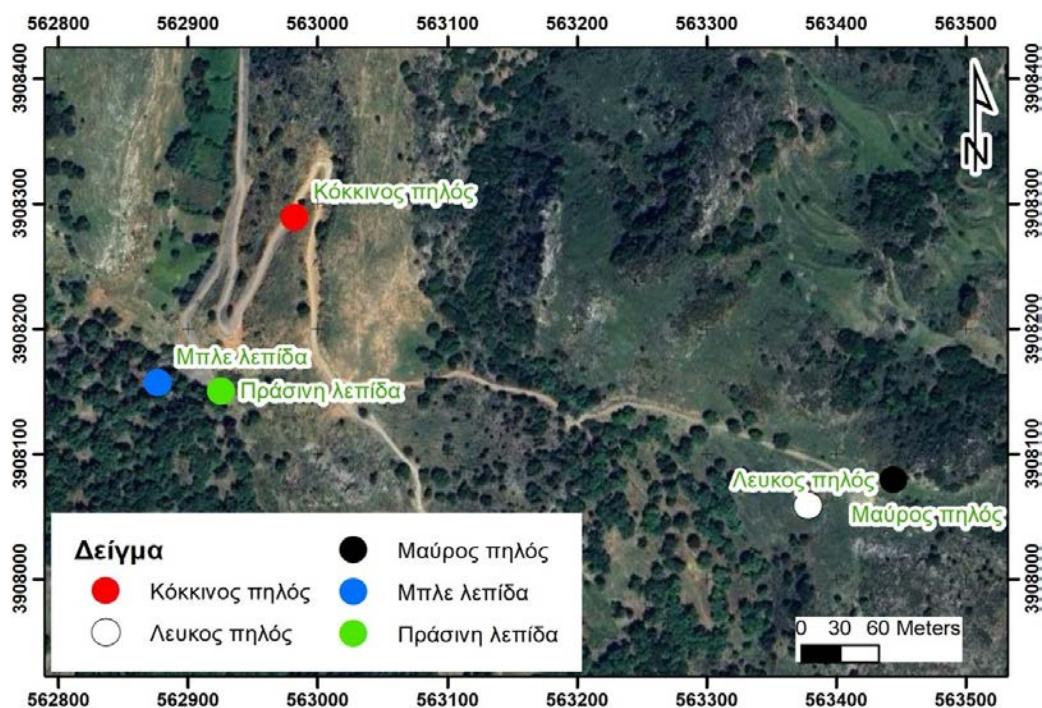
Orbitoides sp., *Rhapydionina liburnica*
Minouxia lobata (GENDROT), *Millioides*

θραύσματα Εχινοδέρμων και Ρουδιστών.
Ηλικία: Σενώνιο.
Συνολικό πάχος: 150 m περίπου.

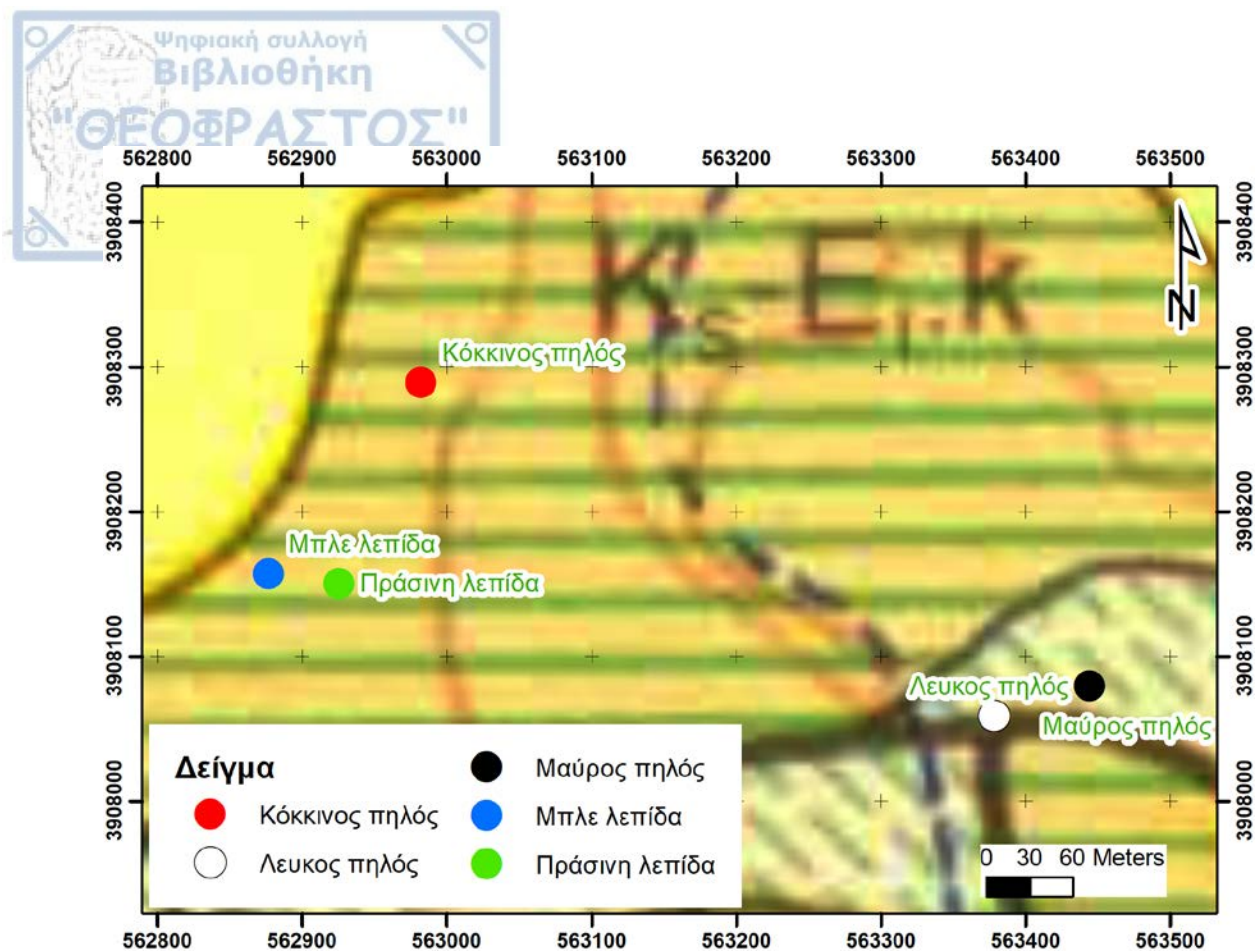
Εικόνα 5: Υπόμνημα 2 γεωλογικού χάρτη

Κεφάλαιο 4: Ορυκτολογική μελέτη

Η μελέτη της αργίλου αποτελεί ένα σημαντικό αντικείμενο της γεωλογικής έρευνας, καθώς οι ορυκτολογικές και οι χημικές αναλύσεις αυτής, μπορούν να προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες για τις διαδικασίες σχηματισμού και εξέλιξης των γεωλογικών σχηματισμών σε μία περιοχή. Η παρούσα μελέτη εστιάζει στην άργιλο από τις περιοχές που χρησιμοποιούν οι κεραμοποιοί των Μαργαριτών για την κατασκευή των κεραμικών τους, εξετάζοντας την ορυκτολογική σύσταση και τη χημική ανάλυσή της. Για τον σκοπό αυτό, κατά την πρώτη επίσκεψη στην περιοχή μελέτης συλλέχθηκαν δείγματα αργίλου από τις περιοχές αυτές, προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες αναλύσεις. Τις τοποθεσίες που έγιναν οι δειγματοληψίες υποδείχθηκαν από κάτοικο του χωριού, κεραμοποιός που χρησιμοποιεί για τις κατασκευές του άργιλο από τις τοποθεσίες αυτές. Παρακάτω φαίνεται σε δορυφορικό χάρτη η περιοχή μελέτης με τις 5 διαφορετικές περιοχές που συλλέχθηκαν τα δείγματα.



Εικόνα 6: Δορυφορικός χάρτης με τις περιοχές που συλλέχθηκαν τα δείγματα για ορυκτολογική και χημική ανάλυση.



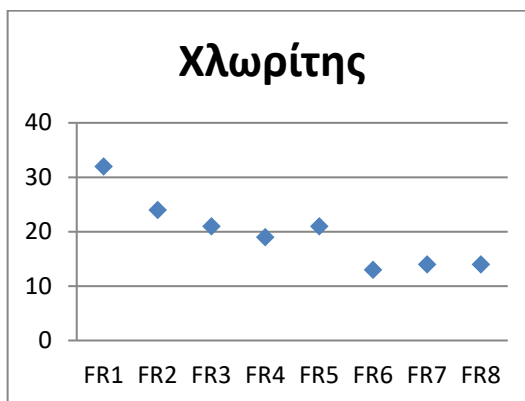
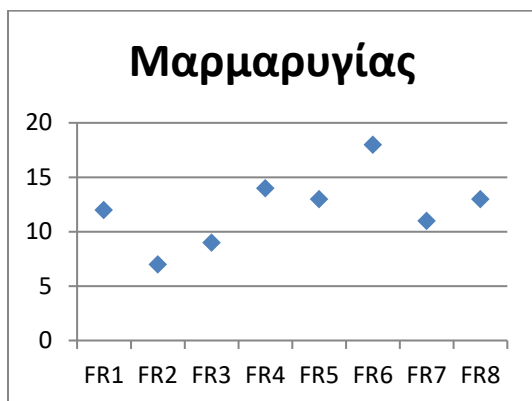
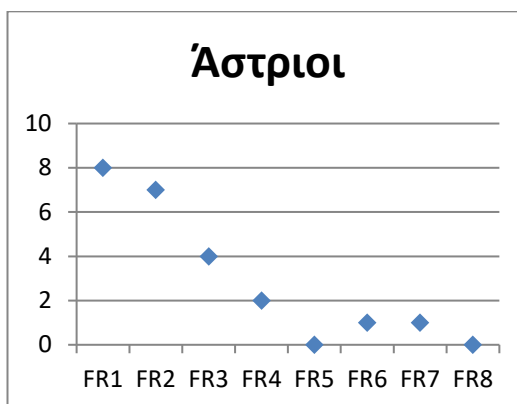
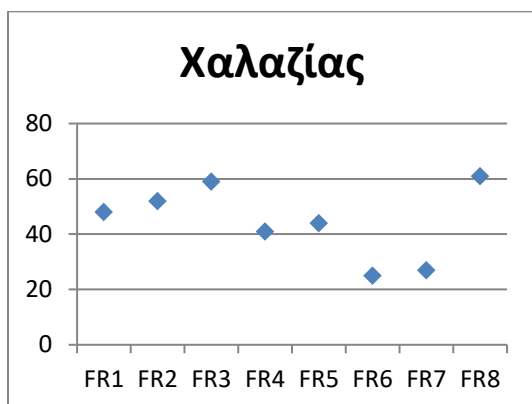
Εικόνα 7: Γεωλογικός χάρτης με τις τοποθεσίες που συλλέχθηκαν τα δείγματα.

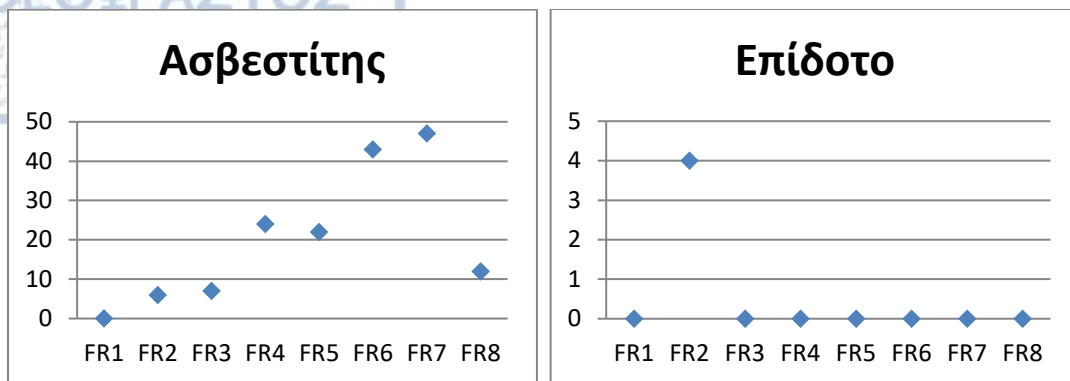
Επιπρόσθετα, οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων που έγιναν από τα δείγματα.

Πίνακας 1. Ορυκτολογική ανάλυση (% κ.β.)							
Δείγμα	Είδος	Χαλαζίας	Άστριοι	Μαρμαρυγίας	Χλωρίτης	Ασβεστίτης	Επίδοτο
FR1	Μπλε λεπίδα	48	8	12	32	-	-
FR2	Μπλε λεπίδα	52	7	7	24	6	4
FR3	Πράσινη λεπίδα	59	4	9	21	7	-
FR4	Μαύρος πηλός	41	2	14	19	24	-
FR5	Μαύρος πηλός	44	-	13	21	22	-
FR6	Λευκός πηλός	25	1	18	13	43	-
FR7	Λευκός πηλός	27	1	11	14	47	-
FR8	Κόκκινος πηλός	61	-	13	14	12	-

Πίνακας 2. Χημική ανάλυση (% κ.β.)

Δείγμα	Είδος	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3t}	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
FR1	Μπλε λεπίδα	56.30	0.74	16.47	5.67	0.05	1.58	1.10	3.46	<0,01	1.00
FR2	Μπλε λεπίδα	59.72	0.89	16.27	8.64	0.10	1.58	2.95	1.56	<0,01	<0,01
FR3	Πράσινη λεπίδα	63.10	0.55	13.50	4.89	0.08	1.73	3.36	2.65	0.05	0.54
FR4	Μαύρος πηλός	48.72	0.70	13.99	5.99	0.11	4.22	11.01	2.58	0.06	2.81
FR5	Μαύρος πηλός	50.33	0.77	14.68	6.27	0.08	3.83	8.53	2.69	0.06	0.58
FR6	Λευκός πηλός	23.06	0.35	6.79	3.57	0.06	1.58	18.68	1.04	0.09	<0,01
FR7	Λευκός πηλός	37.46	0.55	11.40	6.27	0.13	3.73	19.25	2.24	0.14	<0,01
FR8	Κόκκινος πηλός	57.37	0.86	16.95	6.71	0.02	0.98	5.02	2.47	<0,01	<0,01





Κεφάλαιο 5: Γεωφυσική μελέτη

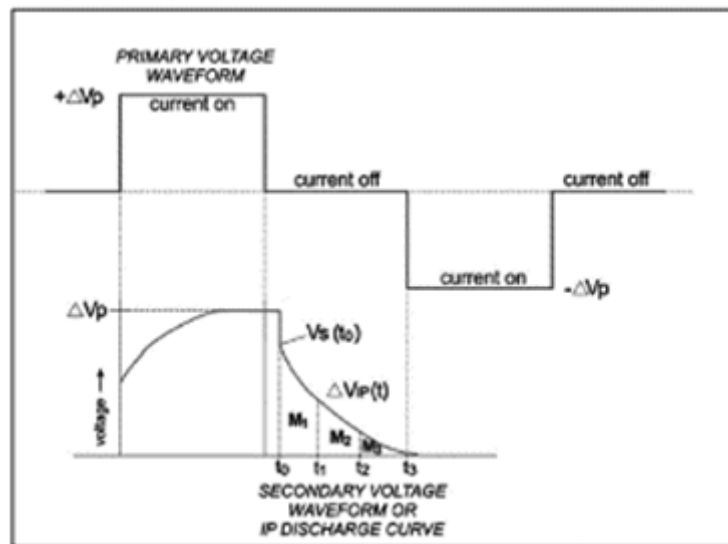
Υπό μια γενική έννοια του όρου οι ηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης ανιχνεύουν κατακόρυφες αλλά και οριζόντιες διαφοροποιήσεις των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους μετρώντας κάποιες συγκεκριμένες φυσικές ποσότητες όπως για παράδειγμα η διαφορά δυναμικού. Όπως όλες οι γεωφυσικές μέθοδοι έτσι και οι ηλεκτρικές διακρίνονται σε ενεργητικές και παθητικές, με γνώμονα το εάν χρησιμοποιούν φυσικά ή τεχνητά ηλεκτρικά πεδία. Χαρακτηριστικές ενεργητικές μέθοδοι είναι η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης ενώ παθητικές είναι η μέθοδος του φυσικού δυναμικού και η μαγνητοτελλουρική μέθοδος. Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως για γεωλογικούς-γεωτεχνικούς σκοπούς, έχουν εφαρμογή στην αρχαιολογική έρευνα και στην επίλυση περιβαλλοντικών προβλημάτων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης, οπότε θα δοθεί βάση μόνο στη θεωρία των συγκεκριμένων μεθόδων διασκόπησης.

Κεφάλαιο 5.1: Επαγόμενη πόλωση

Στην μέθοδο της επαγόμενης πόλωσης αρχικά εισάγεται ρεύμα (συνεχές ή εναλλασσόμενο) στο έδαφος από τα ηλεκτρόδια ρεύματος και στην συνέχεια διακόπτεται η παροχή του. Υπό κανονικές συνθήκες το δυναμικό μηδενίζεται ακαριαία, ωστόσο

παρατηρούνται κάποιες θέσεις στις οποίες στα ηλεκτρόδια δυναμικού συνεχίζουν να μετρούνται τιμές μη μηδενικές, που όμως μειώνονται εκθετικά με τον χρόνο (Παπαζάχος, 1996). Στόχος της διασκόπησης αυτής είναι ο προσδιορισμός της ύπαρξης αυτών των θέσεων, γεγονός που θα συνεπάγεται και την εμφάνιση χαρακτηριστικών γεωλογικών σχηματισμών.

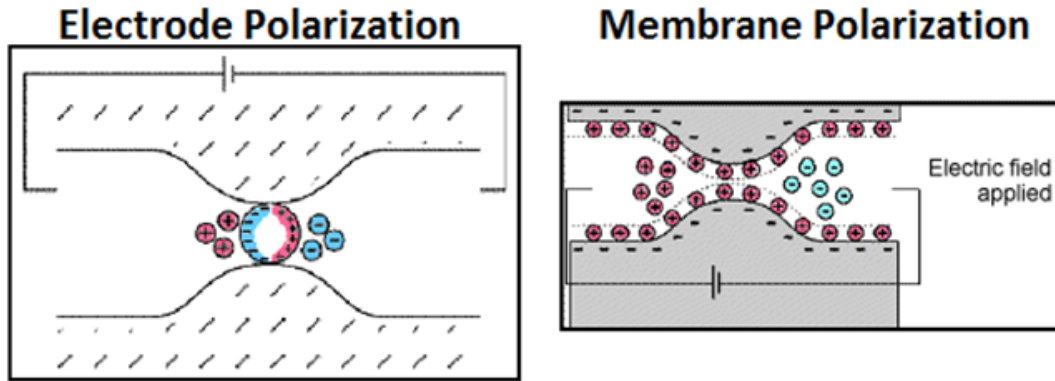
Σχηματικά η διαφορά δυναμικού παρουσιάζεται στην εικόνα 8, όπου από την αρχική τάση V_p που είχε πριν τη διακοπή, μεταπίπτει απότομα στην V_s μετά την διακοπή και συνεχίζει να μειώνεται εκθετικά με το χρόνο, μέχρις ότου μηδενιστεί. Αυτό συμβαίνει γιατί κάποια μεταλλικά ορυκτά (μαγνητίτης, σιδηροπυρίτης, γαληνίτης) ή και αργιλικά ορυκτά έχουν την τάση να δρουν ως πυκνωτές και να πολώνουν τα ηλεκτρικά φορτία.



Εικόνα 8: Διάγραμμα $\Delta V-t$ κατά τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (πάνω) και της επαγόμενης πόλωσης (κάτω). (Martinsetal, 2016)

Οι δύο τρόποι πόλωσης του υπεδάφους (εικόνα 9) είναι η πόλωση ηλεκτροδίων (electrode polarization), που συμβαίνει στους κόκκους μεταλλικών ορυκτών και η πόλωση μεμβράνης (membrane polarization), που εμφανίζεται στα πετρώματα που έρχονται σε επαφή με ηλεκτρολύτες. Κατά την εισαγωγή του ρεύματος στο υπέδαφος, στις θέσεις αυτές τα θετικά και αρνητικά φορτία τείνουν να προσανατολιστούν και να διαταχθούν αντιδιαμετρικά του μεταλλικού κόκκου ή της επιφάνειας επαφής του

πετρώματος με τον πορώδη σχηματισμό (ηλεκτρολύτη). Όταν, όμως, σταματάει η τάση του ρεύματος, τα ιόντα που έχουν δημιουργηθεί, επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση και στην διάρκεια αυτού του χρόνου οι θέσεις αυτές δρουν ως ηλεκτρικές πηγές. (Παπαζάχος, 1996)



Εικόνα 9: Τρόποι πόλωσης του υπεδάφους.

Οι ποσότητες που μετριοούνται και έχουν ενδιαφέρον για τους γεωφυσικούς είναι η πολικότητα (P) και η φορτιστικότητα (M) που δίνονται από τις σχέσεις (1) και (2):

$$P = \frac{V_{(t1)}}{V_p} \quad (1)$$

όπου, V_{t1} είναι η τάση σε χρόνο t_1 (εικόνα 7) και V_p είναι η αρχική τάση πριν την διακοπή του ρεύματος.

$$M = \frac{M_2}{V_p} = \frac{1}{V_p} \cdot \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (2)$$

όπου, M_2 το εμβαδόν που σχηματίζεται από την εκθετική καμπύλη και τον άξονα των χρόνων μεταξύ t_1 και t_2 (εικόνα 8) και V_p η αρχική τάση.

Κεφάλαιο 5.2: Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση Πετρωμάτων και Σχηματισμών

Η ηλεκτρική αντίσταση ενός αγωγού είναι η δυσκολία που παρουσιάζεται στη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος δια μέσου ενός αγωγού. Συμβολίζεται με R και η μονάδα στο SI είναι τα Ωm . Ο νόμος του Ωm στην απλοποιημένη του μορφή, ορίζει ότι οι τρεις ποσότητες I (ένταση ρεύματος), V (διαφορά δυναμικού), R συνδέονται με τη σχέση (3):

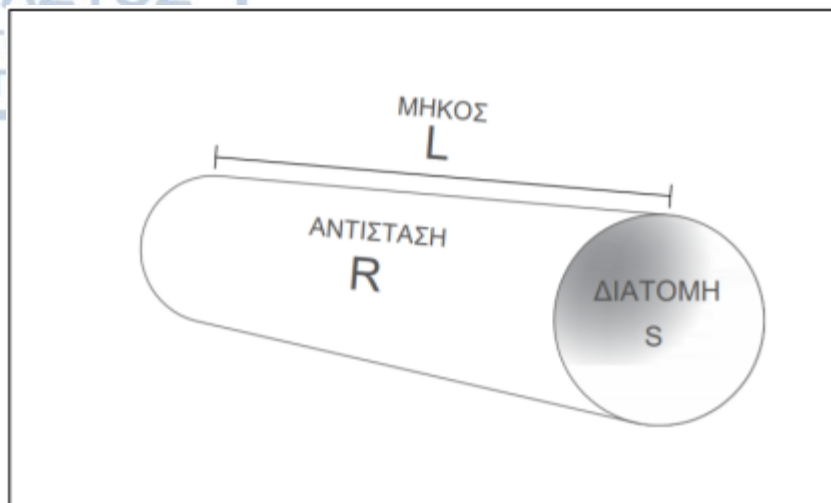
$$R = \frac{V}{I} \quad (3)$$

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ , είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τις ηλεκτρικές μεθόδους διασκόπησης (Παπαζάχος, 1996).

Αν R είναι η ηλεκτρική αντίσταση ενός κομματιού πετρώματος σχήματος κυλίνδρου, διατομής S και μήκους L , η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, ορίζεται από την σχέση (4) (Εικόνα 9):

$$\rho = \frac{RS}{L} \quad (4)$$

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων SI είναι το $1 \Omega m$.



Εικόνα 10: Κύλινδρος μήκους L, διατομής S και αντίστασης R.

Ο τύπος $\sigma = \frac{1}{\rho}$ εκφράζει την ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα που είναι αντίστροφη της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Τα περισσότερα ορυκτά από τα οποία συνήθως αποτελούνται τα πετρώματα είναι μονωτές και η ηλεκτρική αγωγιμότητα των πετρωμάτων αυτών, και ιδιαίτερα αυτών που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της Γης, οφείλεται στα ιόντα τα οποία σχηματίζονται στο νερό που περιέχεται στους πόρους τους (ηλεκτρική αγωγιμότητα). Συνεπώς η ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός πετρώματος εξαρτάται από το πορώδες του πετρώματος.

Ο Archie (1942) πρότεινε μια εμπειρική σχέση μεταξύ της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ και του πορώδους ϕ , έμεινε γνωστή ως νόμος του Archie. Η εξίσωση είναι η εξής

$$\rho = \alpha \rho_U \phi^{-m} \quad (5)$$

Όπου:

- ρ_U η ειδική αντίσταση του νερού των πόρων του πετρώματος
- ϕ το πορώδες (δηλαδή ο όγκος των πόρων/ολικό όγκο του πετρώματος)
- α, m σταθερές με εύρη τιμών τα οποία υπολογίστηκαν πειραματικά $\alpha=1.0, m=2.0$

Από τον νόμο του Archie προκύπτει πως πετρώματα με μεγαλύτερα πορώδη παρουσιάζουν χαμηλότερες ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις.

Εκτός από το πορώδες του πετρώματος, η ηλεκτρική αντίσταση του υπεδάφους εξαρτάται από την παρουσία νερού, την χημική σύσταση του νερού και τη θερμοκρασία (Τσούρλος κ.α,2019). Τα μαγματικά πετρώματα τείνουν να εμφανίζουν τις υψηλότερες αντιστάσεις και τα ιζηματογενή τις χαμηλότερες (λόγω υψηλότερου πορώδους), ενώ τα μεταμορφωμένα πετρώματα βρίσκονται κάπου στο ενδιάμεσο.

ΥΛΙΚΟ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ
Αέρας	∞
Σιδηροπυρίτης	$3 \cdot 10^{-1}$
Γαληνίτης	$2 \cdot 10^{-3}$
Χαλαζίας	$4 \cdot 10^{10} - 2 \cdot 10^{14}$
Ασβεστίτης	$1 \cdot 10^{12} - 1 \cdot 10^{13}$
Γρανίτης	$100 - 1 \cdot 10^6$
Ασβεστόλιθος	$50 - 1 \cdot 10^7$
Ψαμμίτης	$1 - 1 \cdot 10^8$
Σχιστόλιθος	$20 - 2 \cdot 10^3$
Άμμος	1-1000
Άργιλος	1-100
Υπόγειο νερό	0,5-300
Θαλασσινό νερό	0,2

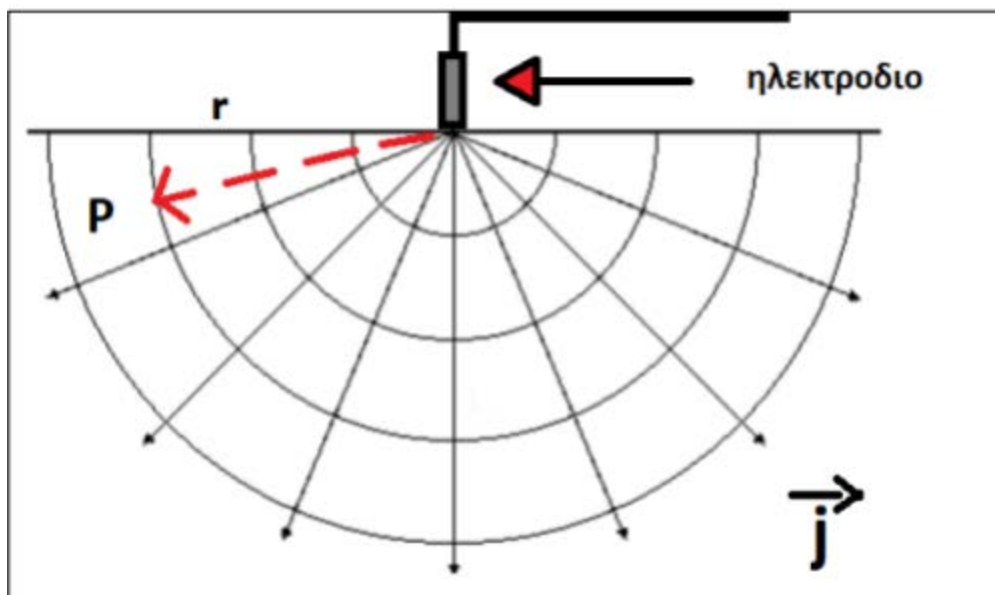
Πίνακας ι: Ενδεικτικές τιμές της ειδικής αντίστασης.

Κεφάλαιο 5.3: Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

Η μέθοδος της ειδικής αντίστασης είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος της ηλεκτρικής διασκόπησης και ανήκει σε εκείνες που το ηλεκτρικό πεδίο παράγεται με τεχνητό τρόπο. Ο σκοπός της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ανάγεται στον προσδιορισμό της δομής του υπεδάφους, η οποία διαμορφώνει τις ιδιότητες του πεδίου. Σύμφωνα με τα προηγούμενα, πραγματοποιούνται μετρήσεις της έντασης του ρεύματος I και της διαφοράς δυναμικού V που παράγεται με στόχο τον καθορισμό της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος. Όμως δεν είναι εύκολος ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης ρ , καθώς αυτή είναι συνάρτηση της γεωηλεκτρικής δομής του

υπεδάφους και της γεωμετρίας της μέτρησής μας. Γι' αυτό υπολογίζεται αρχικά μία ανύπαρκτη ποσότητα, η φαινόμενη ειδική αντίσταση ρ_a , για να ληφθεί υπόψη η επίδραση της γεωμετρίας.

Αν θεωρηθεί ότι η Γη είναι ομογενής και τοποθετηθεί ένα ηλεκτρόδιο Α στην επιφάνειά της, από το οποίο εισάγεται ηλεκτρικό ρεύμα σε αυτήν, τότε η κατανομή του ρεύματος θα είναι σαν αυτή της εικόνας 11. Όπως φαίνεται, το ρεύμα από το ηλεκτρόδιο Α διαδίδεται σφαιρικά του σημείου προς όλες τις κατευθύνσεις μόνο μέσα στο έδαφος, σχηματίζονται νοητά ημισφαίρια διαφόρων ακτινών. Ωστόσο, δεν διαδίδεται προς την ατμόσφαιρα, καθώς ο αέρας έχει μεγαλύτερη αντίσταση και προτιμάται η κίνηση προς το πιο αγωγίμο μέσο.



Εικόνα 11: Διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος J μέσα στη Γη.

Από τον γενικευμένο νόμο του Ohm προκύπτει ότι το δυναμικό σε μία ορισμένη απόσταση r από ένα θετικό πόλο που βρίσκεται πάνω στις επιφάνειές της δίνεται από την σχέση (6):

$$V = \frac{\rho i}{2\pi r} \quad (6)$$

όπου, ρ η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων της, i η ένταση του ρεύματος και $2\pi r$ είναι το αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης του εμβαδού του ημισφαίριου ($S_{\eta\mu}=2\pi r^2$). Αν ο πόλος είναι αρνητικός, τότε το δεύτερο μέλος της σχέσης (6) είναι αρνητικό.

Στην περίπτωση που ο θετικός πόλος βρίσκεται θαμμένος σε κάποιο βάθος μέσα στην επιφάνεια της Γης, τότε η κίνηση του ρεύματος σχηματίζει νοητές σφαίρες με κέντρο το ηλεκτρόδιο και αυτή τη φορά το δυναμικό δίνεται από τον τύπο (7):

$$V = \frac{\rho i}{4\pi r} \quad (7)$$

Για αρνητικό πόλο, το δεύτερο μέλος της εξίσωσης είναι αρνητικό.

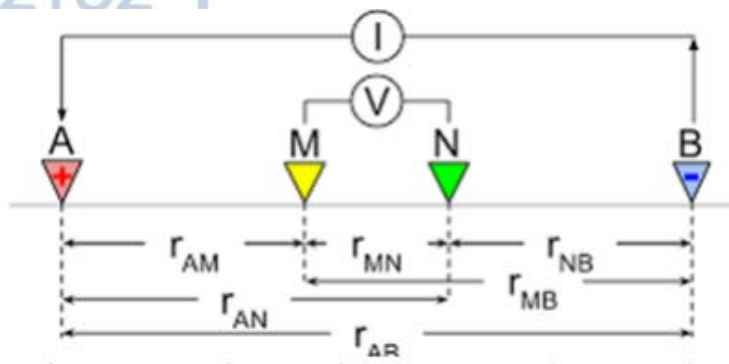
Στη γεωφυσική απαιτείται παραπάνω από ένα ηλεκτρόδιο για να γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί, όποτε κρίνεται αναγκαίο να προσδιοριστεί η διαφορά δυναμικού σε ένα ηλεκτρόδιο λόγω της ύπαρξης δύο πηγών ρεύματος. Έστω, μια διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων, εκ των οποίων τα δύο είναι ρεύματος (A,B) και τα άλλα δυναμικού (M,N). Το δυναμικό που δημιουργείται στο ηλεκτρόδιο M λόγω της ύπαρξης του θετικού πόλου A και του αρνητικού πόλου B υπολογίζεται από τον τύπο (8):

$$V_M = \frac{\rho i}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{MB}} \right) \quad (8)$$

Ομοίως, για το σημείο N:

$$V_N = \frac{\rho i}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{NB}} \right) \quad (9)$$

Όπου, ρ η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, i η ένταση το ρεύματος που εισάγεται από τα ηλεκτρόδια ρεύματος και r_{AM} , r_{MB} , r_{AN} , r_{NB} οι αποστάσεις των αντίστοιχων ηλεκτροδίων.



Εικόνα 12: Σχεδιαστική αναπαράσταση των αποστάσεων των 4 ηλεκτροδίων με τη χρήση της διαφοράς δυναμικού.

Άρα, η διαφορά δυναμικού των σημείων M, N που οφείλεται στα ηλεκτρόδια ρεύματος A, B δίνεται από τη σχέση (10):

$$V_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho i}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{MB}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{NB}} \right) \quad (10)$$

Λύνοντας την εξίσωση ως προς ρ προκύπτει ο τύπος (11):

$$\rho = \frac{V_{MN}}{i} \left(\frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{MB}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{NB}}} \right) \quad (11)$$

Όπου, ο παρονομαστής του κλάσματος της παρένθεσης ονομάζεται γεωμετρικός παράγοντας, συμβολίζεται με K ($K = \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{MB}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{NB}}$) και εξαρτάται από την διάταξη των ηλεκτροδίων. Αυτό σημαίνει ότι οι αποστάσεις στις οποίες τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια κατά την διασκόπηση επηρεάζουν το αποτέλεσμα και γι' αυτό είναι αναγκαία η ύπαρξη συγκεκριμένων διατάξεων για την βελτίωση συνεννόηση των επιστημόνων όσον αφορά την σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 5.4: Φαινόμενη αντίσταση και τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων

Η γη δεν είναι ομογενής ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η πραγματική ειδική αντίσταση των πετρωμάτων της εύκολα, δηλαδή, με απλή εφαρμογή της σχέσης (11). Για τον λόγο αυτό, απαιτούνται μέθοδοι που βασίζονται στην έννοια της φαινόμενης ειδικής

αντίστασης, που συμβολίζεται με ρ_α , η οποία χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της πραγματικής ειδικής αντίστασης στους διαφόρους σχηματισμούς του υπεδάφους.

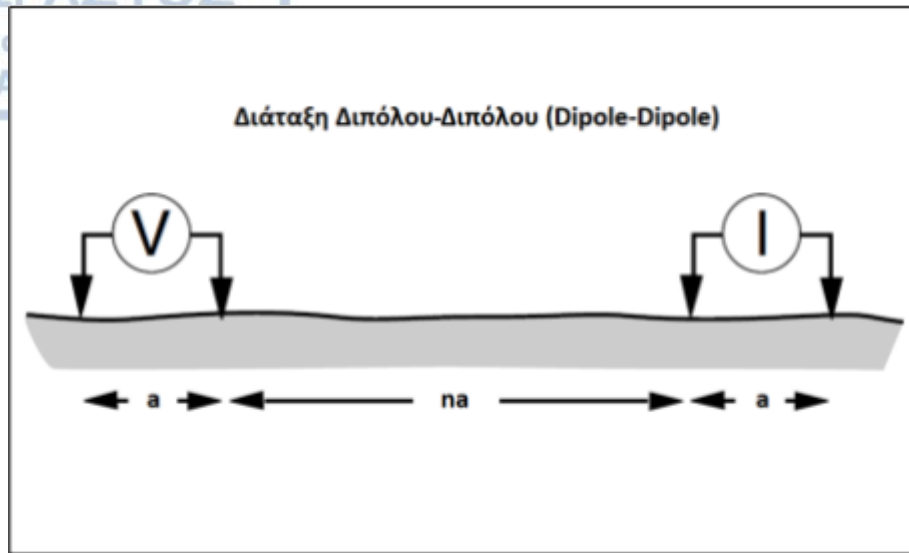
Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατά τους οποίους διατάσσονται τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού. Για την επιλογή της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων συνυπολογίζονται διάφοροι παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί αφορούν τις ανάγκες της έρευνας, το βάθος διασκόπησης αλλά και τη γεωμετρία των υπεδάφινων στόχων που αναζητούνται. Οι βασικότερες διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης είναι: η διάταξη Wenner, η διάταξη Schlumberger, διάταξη διπόλου-διπόλου, διάταξη πόλου-πόλου, διάταξη πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient). Στην παρούσα μελέτη, κατά την χρήση της μεθόδου της ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις διπόλου-διπόλου και πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), και για το λόγο αυτό θα αναφερθούν οι πληροφορίες μόνο για αυτές.

• Διάταξη διπόλου-διπόλου:

Σε αυτή τη διάταξη τα ηλεκτρόδια ρεύματος είναι απομακρυσμένα από τα ηλεκτρόδια δυναμικού. Τα δύο ζεύγη δημιουργούν δύο δίπολα. Ισχύει ότι $AB=MN=a$, δηλαδή οι αποστάσεις των δύο διπόλων είναι σταθερές και ίσες με a . Αντίθετα, η απόσταση των ηλεκτροδίων A και M είναι πολύ μεγαλύτερη αποτελώντας πολλαπλάσιο της απόστασης a ($n \times a$, $n \geq 1$). Όσο αυξάνουμε το n , τόσο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη διείσδυση του ηλεκτρικού ρεύματος σε βάθος (Milsom, 2003). Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τον τύπο (12):

$$\rho_\alpha = \pi n(n+1)(n+2)a \frac{\Delta V}{I} \quad (12)$$

Βασικό πλεονέκτημα αυτής της διάταξης ηλεκτροδίων είναι η χρησιμότητά της όταν θέλουμε να διακρίνουμε πλευρικές και κατακόρυφες μεταβολές. Η διάταξη υστερεί στο λόγο σήματος προς θόρυβο.



Εικόνα 13: Γεωμετρία της διάταξης διπόλου-διπόλου

Διάταξη πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient):

Οι Dahlin και Zhou (2006) όρισαν ότι σε αυτή τη διάταξη τα ηλεκτρόδια ρεύματος A, B βρίσκονται σε απόσταση $(s+2)a$, ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού M, N μετακινούνται ανάμεσα στα A, B σε όλες τις δυνατές θέσεις, καταγράφοντας τη διαφορά δυναμικού. Η απόσταση των δύο ηλεκτροδίων M, N είναι ίση με a και σταθερή. Ο παράγοντας s είναι ακέραιος αριθμός και συμβολίζει το μέγιστο αριθμό των μετρήσεων δυναμικού που μπορεί να πραγματοποιήσει το δίπολο δυναμικού MN. Ως n ορίζεται η απόσταση μεταξύ του διπόλου δυναμικού (M, N) με το κοντινότερο ηλεκτρόδιο ρεύματος. Επίσης, το m ορίστηκε ως ο παράγοντας που περιγράφει την απόσταση από το μέσο του MN με το μέσο του AB το οποίο αποτελεί το κέντρο της διάταξης.

$$m = \frac{\left(\frac{x_M + x_N}{2}\right) - \left(\frac{x_A + x_B}{2}\right)}{(x_N - x_M)} = \frac{x_{MN} - x_{AB}}{a} \quad (13)$$

όπου

- x_A, x_B, x_N, x_M είναι οι θέσεις των ηλεκτροδίων δυναμικού και ρεύματος με $x_B > x_A$, $x_M > x_N$



- x_{AB} και x_{MN} είναι τα σημεία που βρίσκονται στα μέσα των 2 διπόλων AB, MN

Θετικό m σημαίνει, υποδηλώνει ότι το δίπολο ηλεκτροδίων δυναμικού βρίσκεται στα δεξιά σχετικά με το κέντρο της διάταξης ηλεκτροδίων.

Αρνητικό m δηλώνει πως το δίπολο ηλεκτροδίων δυναμικού βρίσκεται στα αριστερά συγκριτικά με το κέντρο διάταξης ηλεκτροδίων.

Επίσης, για τιμές s, n το m υπολογίζεται από τους τύπους:

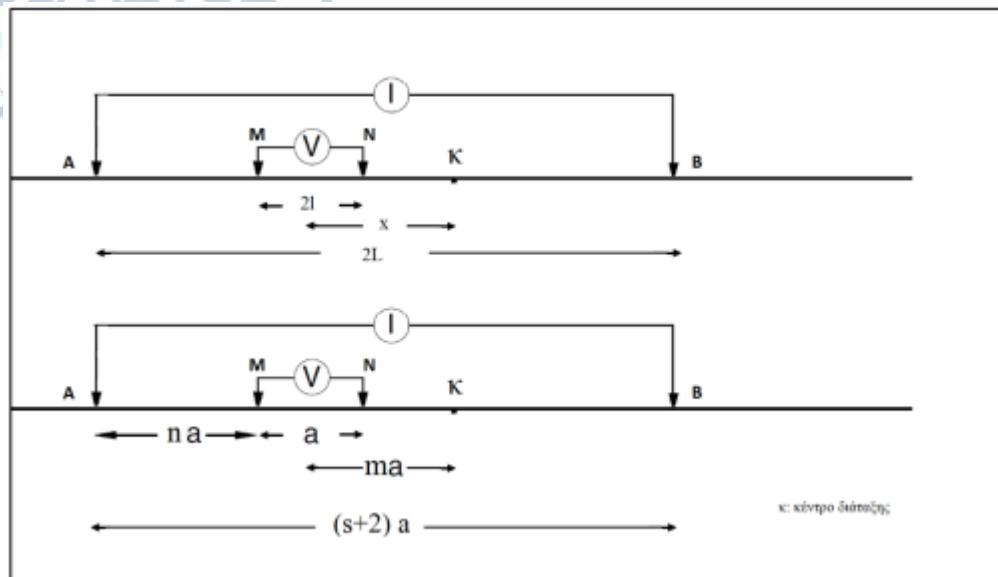
$$m = n - \frac{s+1}{2} \text{ για } x_{MN} \leq x_{AB} \text{ (m} \leq 0 \text{)} \quad (14)$$

$$m = n - \frac{s+1}{2} \text{ για } x_{MN} > x_{AB} \text{ (m} > 0 \text{)} \quad (15)$$

Για τη συγκεκριμένη διάταξη ισχύει ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος συγκριτικά με τις αποστάσεις ηλεκτροδίων δυναμικού τόσο αυξάνεται το βάθος διασκόπησης (Dahlin και Zhou, 2006). Πλεονεκτήματα της διάταξης αυτής είναι ότι ο λόγος σήματος θορύβου είναι υψηλός αλλά και ότι η πυκνότητα και το πλήθος των δεδομένων που συλλέγονται είναι πολλά (Tassis et al. 2020). Επίσης, παρουσιάζει πολύ καλή διακριτική ικανότητα στα επιφανειακά στρώματα.

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση υπολογίζεται από τον τύπο (16):

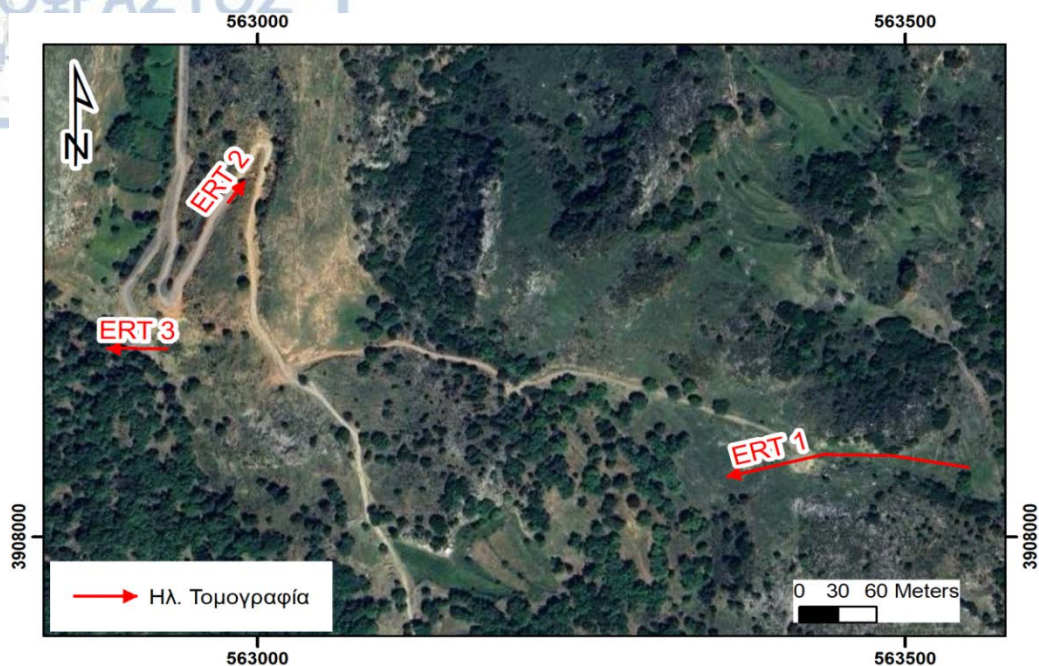
$$\rho_a = \frac{\pi}{l} \frac{(L^2 - x^2)^2}{L^2 + x^2} \frac{\Delta V}{2I} \quad (16)$$



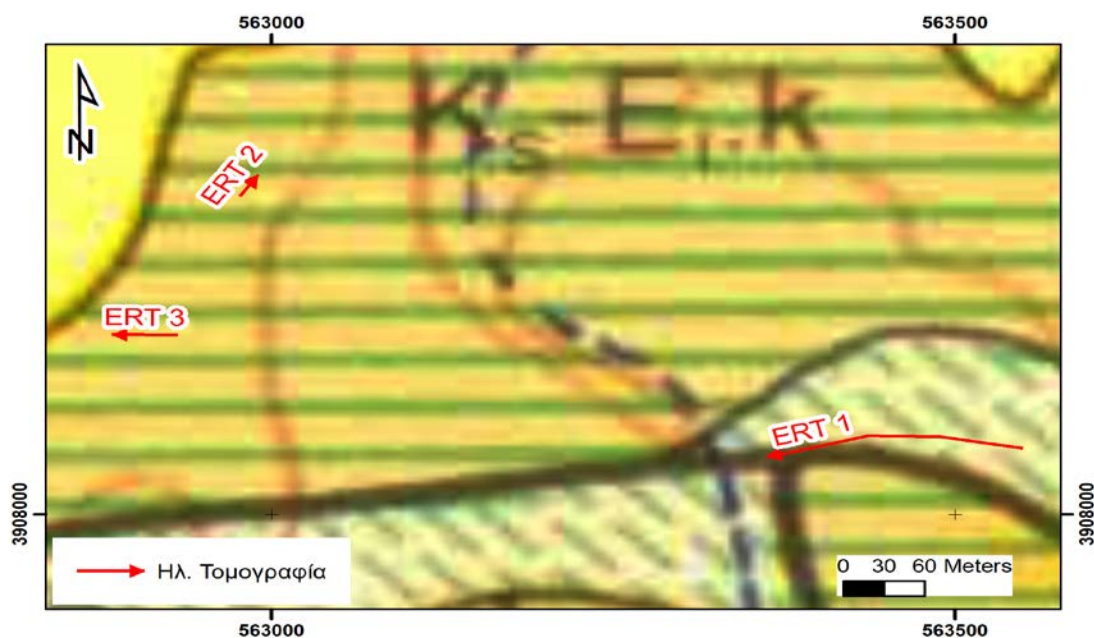
Εικόνα 14: Διάταξη πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient)

Κεφάλαιο 5.5: Εφαρμογή Γεωφυσικών μεθόδων και Αποτελέσματα

Όπως προαναφέρθηκε, ο στόχος της γεωφυσικής έρευνας ήταν ο καθορισμός της υπεδάφιας γεωλογικής και στρωματογραφικής δομής της περιοχής μελέτης. Λαμβάνοντας υπόψη την τοπογραφία της περιοχής καθώς και τα διαφορετικά χρωματικά είδη πηλού αποφασίστηκε να γίνουν 3 τομογραφίες σε διαφορετικά σημεία η καθεμία και 3 μετρήσεις επαγόμενης πόλωσης αντίστοιχα. Οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη των μετρήσεων είναι η διπόλου-διπόλου και η πολλαπλή βαθμίδα (multiple gradient). Πραγματοποιήθηκε η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης, όμως τα αποτελέσματα της δεν είναι πολύ αξιόπιστα ώστε να προκύψουν ασφαλή αποτελέσματα και γι' αυτό τον λόγο θα δοθεί κύρια σημασία στα αποτελέσματα των ηλεκτρικών τομογραφιών. Στους παρακάτω χάρτες (δορυφορικός, γεωλογικός) φαίνεται η περιοχής μελέτης και τα σημεία που έγιναν οι μετρήσεις.



Εικόνα 15: Δορυφορικός χάρτης με τα σημεία των γεωφυσικών μετρήσεων.



Εικόνα 16: Γεωλογικός χάρτης με τα σημεία των γεωφυσικών μετρήσεων.

Κεφάλαιο 5.5.1: Όργανο μετρήσεων

Για την λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το όργανο Syscal Pro, της εταιρίας Iris Instruments, καθώς επίσης συνδέθηκε με εξωτερική μπαταρία των 12V. Η σύνδεση

πραγματοποιήθηκε με την επαφή των ινών του καλωδίου απευθείας με το ηλεκτρόδιο και σε όσα χρειάστηκαν, προστέθηκε λίγο νερό στην επαφή του ηλεκτροδίου με το ύπαιθρο για την καλύτερη επαφή τους. Για το κάθε σημείο μέτρησης (ERT1, ERT2, ERT3) χρησιμοποιήθηκε διαφορετικός αριθμός ηλεκτροδίων με διαφορετική απόσταση ανάμεσα αυτών. Στους χάρτες στις εικόνες 15, 16 φαίνονται οι κατευθύνσεις των μετρήσεων στην κάθε τοποθεσία μέτρησης.



Εικόνα 17: Γεωφυσικό όργανο Syscal Pro

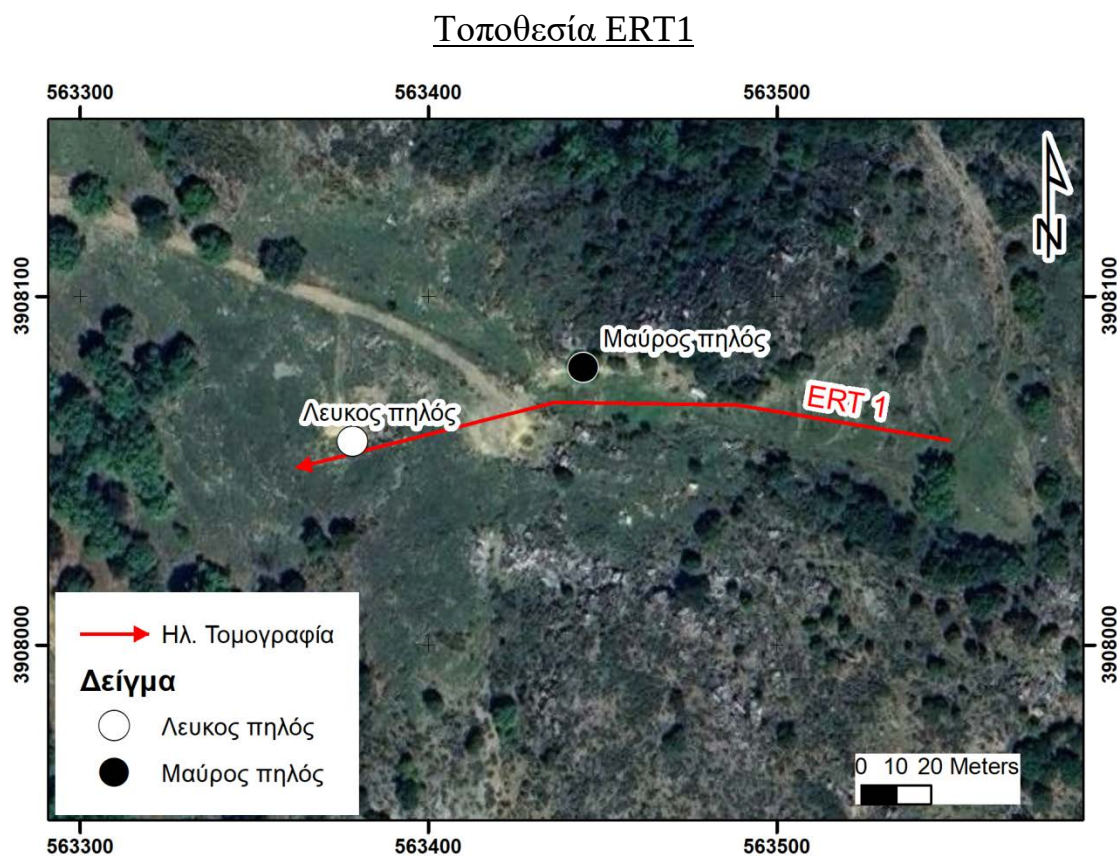
Κεφάλαιο 5.5.2: Αποτελέσματα μετρήσεων

Όπως έχει αναφερθεί ήδη, κατά την λήψη των μετρήσεων μιας διδιάστατης διασκόπησης, η διαδικασία γίνεται με αυτοματοποιημένο τρόπο. Αφού πραγματοποιηθεί η διασκόπηση, ένας φορητός υπολογιστής συνδέεται με το όργανο μέτρησης, «φορτώνονται» τα δεδομένα της τομογραφίας και δημιουργείται μία ψευδοτομή. Η ψευδοτομή είναι ένα διάγραμμα, όπου προβάλλεται η φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση του υπεδάφους.

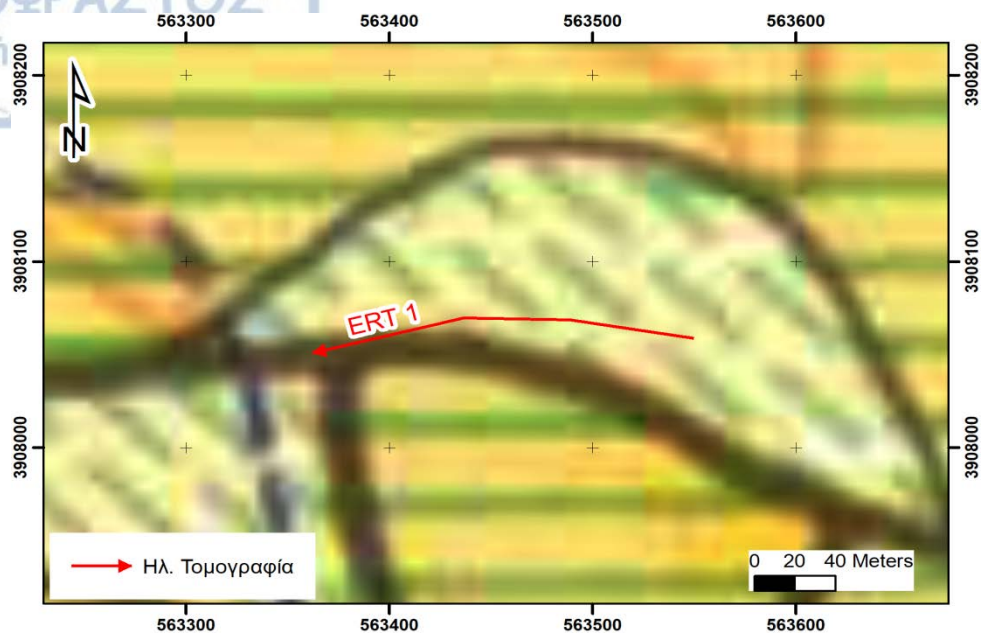
Ωστόσο, επιδιώκεται η εκτίμηση της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η επεξεργασία των δεδομένων με ειδικά προγράμματα που πραγματοποιούν αντιστροφή της τομογραφίας και εξομαλύνουν την «εικόνα» του

υπεδάφους. Για την αντιστροφή της τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Kim 2009.

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής παρουσιάζονται σε επόμενα διαγράμματα για την κάθε τοποθεσία. Ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει τις θέσεις των ηλεκτροδίων ενώ ο κατακόρυφος δείχνει το βάθος (σε m) της διασκόπησης σε κάθε θέση. Οι τιμές των αντιστάσεων παρουσιάζονται με χρωματική κλίμακα στα δεξιά της κάθε τομογραφίας, με τις μικρές αντιστάσεις να έχουν μπλε χρώμα, τις μεσαίες πράσινο-κίτρινο και τις μεγαλύτερες κόκκινο-μοβ. Οι ισοϋψείς γραμμές με τα αντίστοιχα νούμερα, ενώνουν τις περιοχές ομοίων αντιστάσεων και βοηθούν στην εκτίμηση των ενδιάμεσων τιμών.

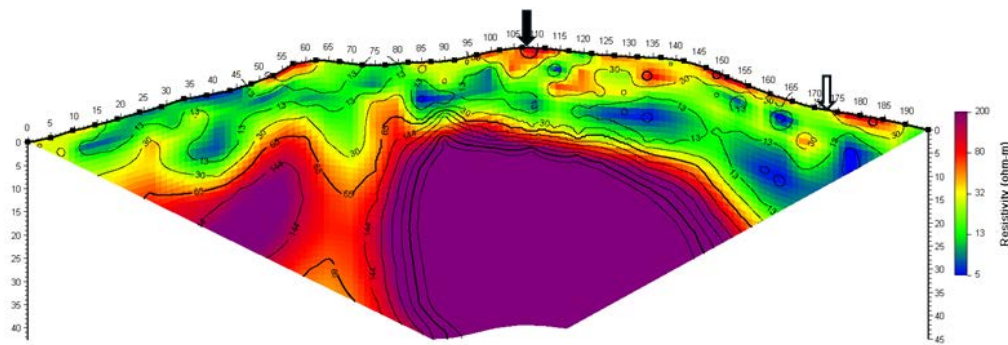


Εικόνα 18: Θέση της γεωηλεκτρικής τομογραφίας 1 στο χάρτη σε σχέση με τις δειγματοληψίες του λευκού και μαύρου πηλού.

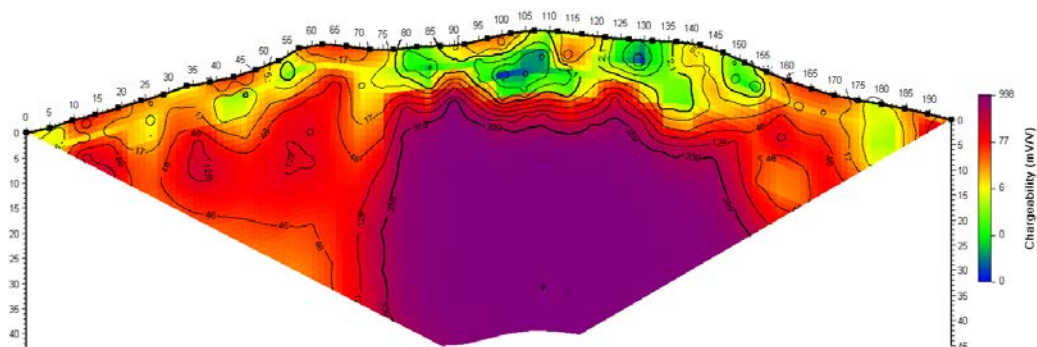


Εικόνα 19: Γεωλογικός χάρτης θέσης ERT1.

•Διάταξη διπόλου-διπόλου:



Διάγραμμα 1: Γεωηλεκτρική τομογραφία ERT1 μέσω της διάταξης διπόλου-διπόλου με βελάκια στα σημεία που έγιναν οι δειγματοληψίες του μαύρου και λευκού πηλού.

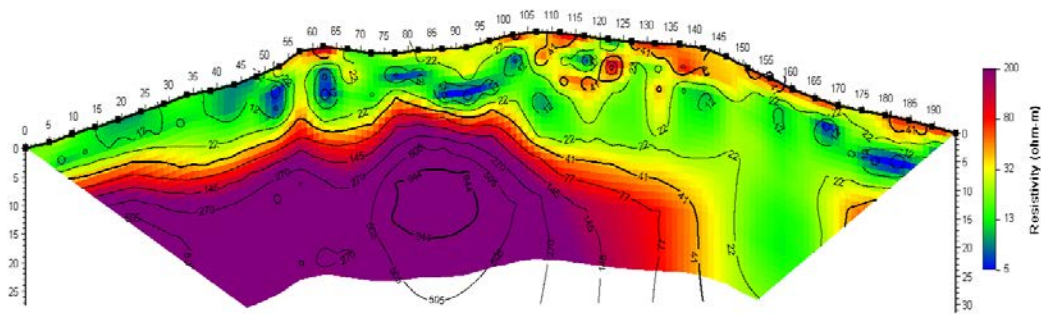


Διάγραμμα 2: Διάγραμμα επαγόμενης πόλωσης της ERT1 μέσω της διάταξης διπόλου-διπόλου.

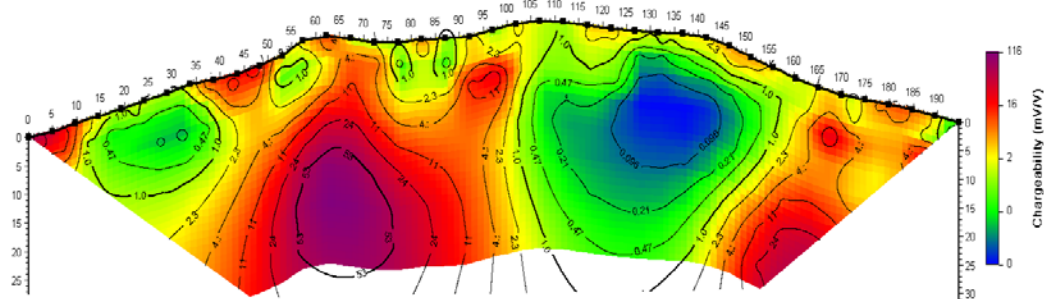
Τα παραπάνω διαγράμματα δείχνουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ERT1 (Εικόνα 18) μέσω των μεθόδων της τομογραφίας (Διάγραμμα 1) και της επαγόμενης πόλωσης (Διάγραμμα 2) με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Η ERT1 έχει προσανατολισμό Α-Δ και χρησιμοποιήθηκαν 41 ηλεκτρόδια, τα οποία τοποθετήθηκαν ανά 5 m για την συνολική απόσταση των 195 m. Η λήψη των μετρήσεων έγινε από Α προς Δ, όπως δείχνει και το βέλος στην εικόνα 18.

Στο διάγραμμα 1 παρατηρείται ένα σχετικά οριζόντιο στρώμα που εμφανίζεται σε ολόκληρη τη διασκόπηση με γενικό εύρος αντιστάσεων 10-30 Ohm.m μέσα στο οποίο εντοπίζονται μειωμένες τιμές της αντίστασης (5-10 Ohm.m, μπλε χρώμα) αλλά επίσης και αυξημένες τιμές της αντίστασης (30-100 Ohm.m, κόκκινο χρώμα). Η περιοχή αυτή σύμφωνα με το υπόμνημα του γεωλογικού χάρτη της περιοχής, αντιστοιχεί στο φλύσχη της περιοχής, ο οποίος αποτελείται από εμφανίσεις πηλινών και ψαμμιτικών τεμαχών, που συμφωνούν με τις αντίστοιχες τιμές της αντίστασης όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Κάτω από το σχετικά οριζόντιο στρώμα, εμφανίζεται ένα μεγάλο στρώμα μεγάλης αντίστασης (200 Ohm.m). Αυτό το στρώμα θα μπορούσε να αντιστοιχεί στους πλακώδεις ασβεστόλιθους που αναφέρονται στο υπόμνημα του γεωλογικού χάρτη της περιοχής. Εμφανίζεται, επίσης, και το ρήγμα που φαίνεται στο χάρτη, στις τιμές 55-75 του διαγράμματος.

•Διάταξη πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient):



Διάγραμμα 3: Γεωηλεκτρική τομογραφία ERT1 μέσω της διάταξης multiple gradient.



Διάγραμμα 4: Διάγραμμα επαγόμενης πόλωσης της ERT1 μέσω διάταξης multiple gradient.

Τα διαγράμματα 3,4 δείχνουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ERT1 (Εικόνα 18) μέσω της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας (Διάγραμμα 3) και της μεθόδου επαγόμενης πόλωσης (Διάγραμμα 4) με τη διάταξη πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient).

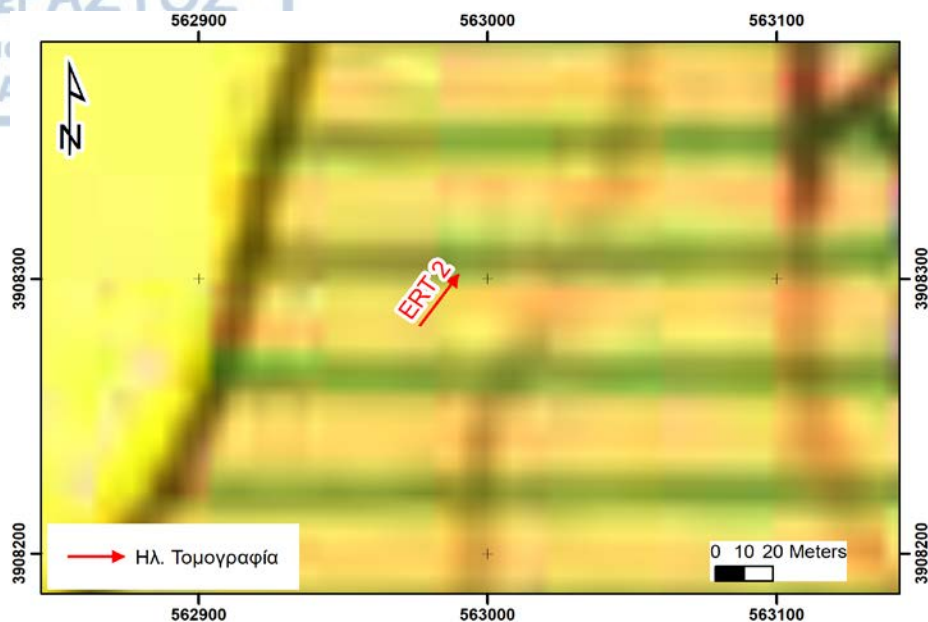
Με τη διάταξη αυτή λαμβάνονται παρόμοια αποτελέσματα, αν και εμφανίζουν κάποιες μικρές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Πάλι στο διάγραμμα 3 παρατηρείται ένα σχετικά οριζόντιο στρώμα χαμηλής αντίστασης (10-30 Ohm.m) μέσα στο οποίο εντοπίζονται μειωμένες τιμές της αντίστασης (5-10 Ohm.m, μπλε χρώμα) αλλά

επίσης και αυξημένες τιμές της αντίστασης (30-100 Ohm.m, κόκκινο χρώμα). Ωστόσο στο διάγραμμα 3, ανατολικά (τιμές 140-165 του διαγράμματος) δεν παρατηρούνται τόσα σημεία χαμηλής αντίστασης (5-10 Ohm.m) όσα παρατηρούνται στο Διάγραμμα 1. Επιπλέον, η περιοχή μεγάλων αντιστάσεων είναι μικρότερη και δεν φαίνεται ξεκάθαρα το ρήγμα το περιοχής.

Τοποθεσία ERT2

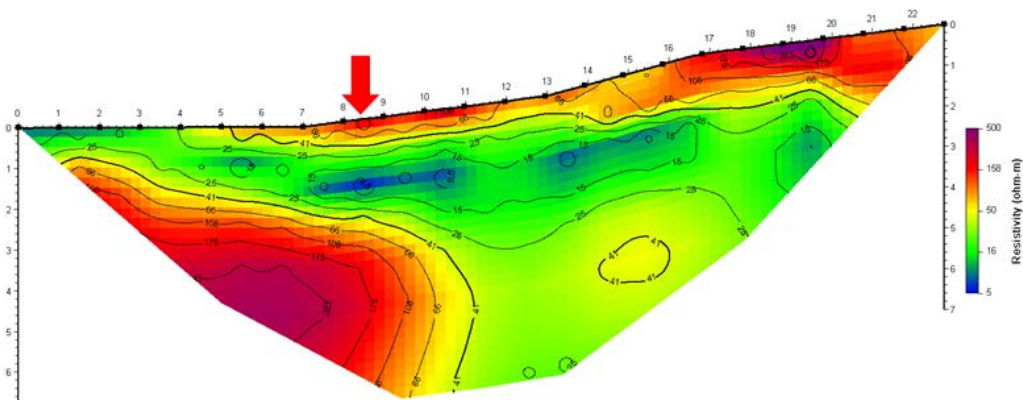


Εικόνα 20: Θέση της ERT2 στο χάρτη σε σχέση με τη δειγματοληψία του κόκκινου πηλού.



Εικόνα 21: Γεωλογικός χάρτης θέσης ERT2.

• Διάταξη διπόλου-διπόλου.



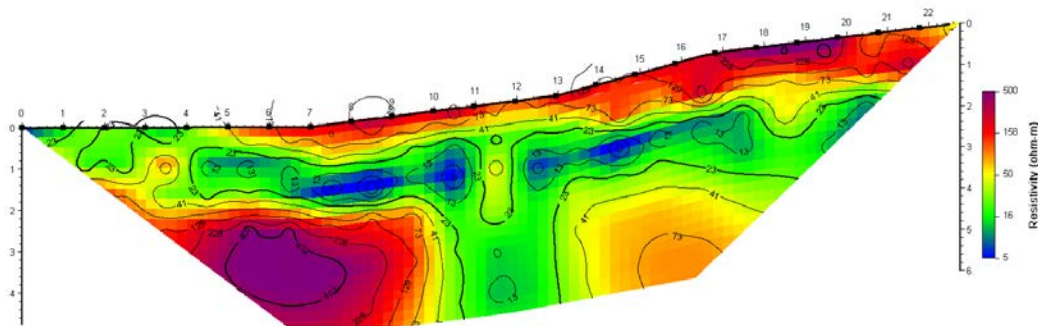
Διάγραμμα 5: Γεωηλεκτρική τομογραφία της θέσης ERT2 μέσω διάταξης διπόλου-διπόλου με βελάκι στο σημείο που έγινε η δειγματοληψία του κόκκινου πηλού.

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ERT2 (Εικόνα 20) μέσω της μεθόδου της τομογραφίας (Διάγραμμα 5) μέσω της διάταξης διπόλου-διπόλου. Η ERT2 έχει προσανατολισμό ΝΔ-ΒΑ και χρησιμοποιήθηκαν 24 ηλεκτρόδια,

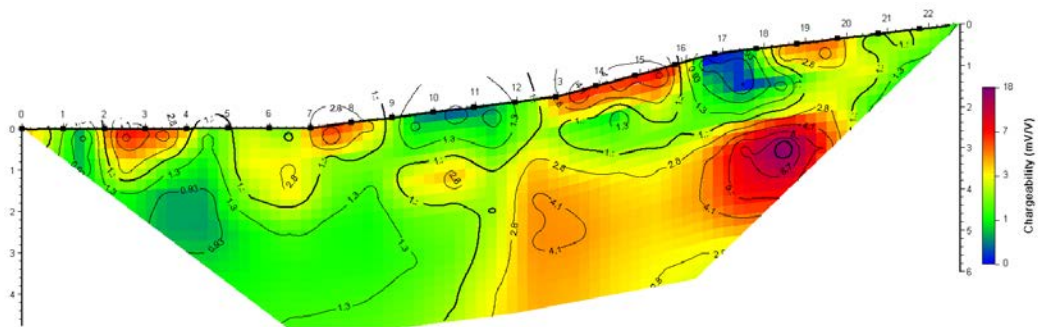
τα οποία τοποθετήθηκαν ανά 1 m για την συνολική απόσταση των 23 m. Η λήψη των μετρήσεων έγινε από ΝΔ προς ΒΑ, όπως δείχνει και το βέλος στην εικόνα 20.

Στο διάγραμμα 5 παρατηρείται ένα σχετικά οριζόντιο στρώμα (θέσεις 4-23 των αντιστάσεων) μικρού πάχους και αντίστασης 50-150 Ohm.m, μέσα στο οποίο βρίσκονται και σημεία αρκετά μεγαλύτερης αντίστασης των 400 Ohm.m. Αντίστοιχες αντιστάσεις έχει, επίσης, το δυτικό κομμάτι του διαγράμματος. Ανάμεσα στις περιοχές των μεγάλων αντιστάσεων, σύμφωνα με το Διάγραμμα 5, βρίσκεται ένα στρώμα σχετικά μεγάλου πάχους που έχει μικρές αντιστάσεις (15-45 Ohm.m), μέσα στο οποίο εμφανίζονται σε σημεία και μικρότερες αντιστάσεις (5-10 Ohm.m). Σύμφωνα με το υπόμνημα του γεωλογικού χάρτη της περιοχής, οι αντιστάσεις αυτές φαίνεται να αντιστοιχούν στους βιογενείς ασβεστόλιθους που παρεμβάλλονται από μάργες, αργίλους και κροκαλοπαγή.

•Διάταξη πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient)



Διάγραμμα 6: Γεωηλεκτρική τομογραφία της ERT2 μέσω διάταξης multiple gradient

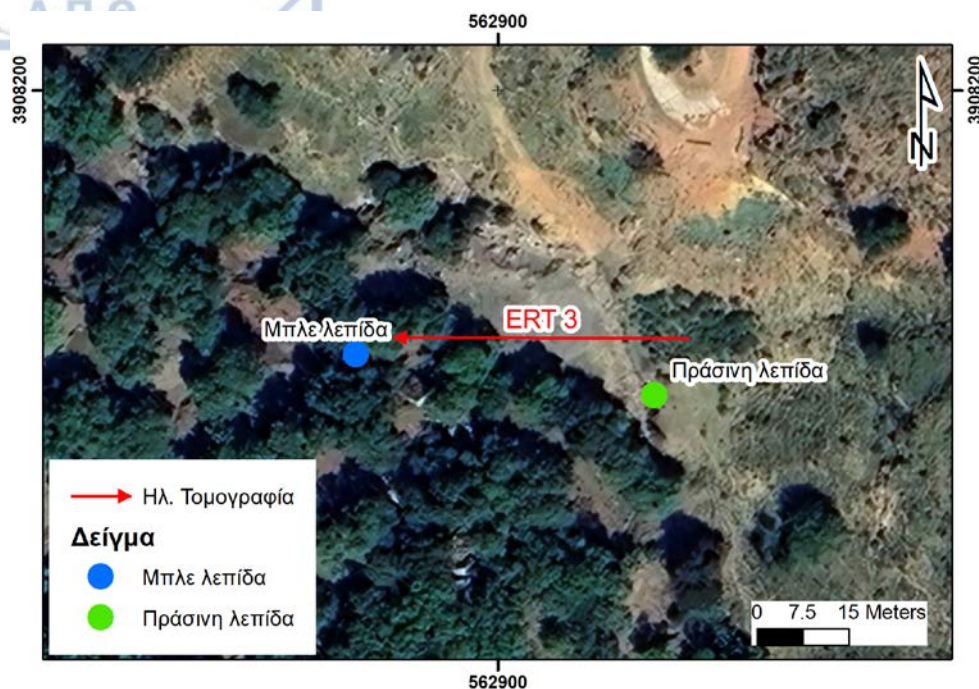


Διάγραμμα 7: Διάγραμμα επαγόμενης πόλωσης της ERT2 μέσω της διάταξης multiple gradient.

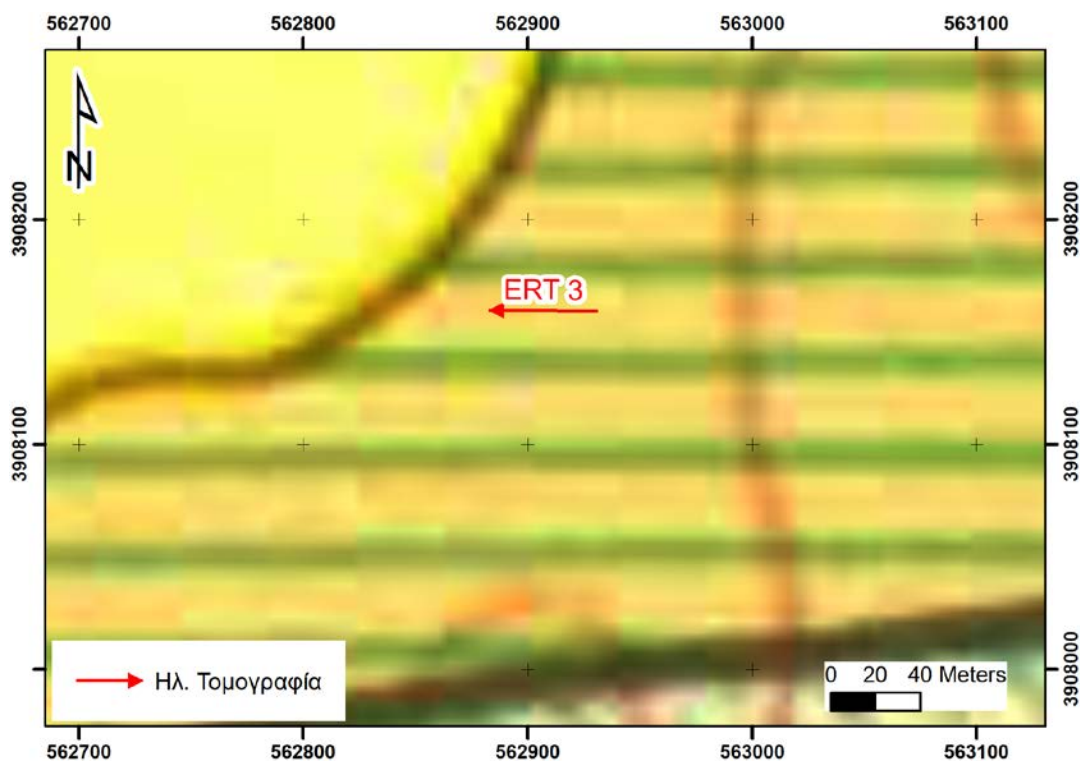
Τα διαγράμματα 6,7 δείχνουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ERT2 (Εικόνα 20) μέσω της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας (Διάγραμμα 6) και της μεθόδου επαγόμενης πόλωσης (Διάγραμμα 7) με τη διάταξη πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient).

Η διάταξη πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), όπως προαναφέρθηκε, λαμβάνει αποτελέσματα όμοια με αυτά της διάταξης διπόλου-διπόλου. Μία διαφορά που παρατηρείται στο διάγραμμα της διάταξης αυτής είναι ότι στα στρώματα των μεγάλων αντιστάσεων έχουμε ακόμα μεγαλύτερης αντίστασης (500 Ohm.m) σημεία από τα αντίστοιχα του διαγράμματος 5, ενώ στο στρώμα της μικρότερης αντίστασης φαίνονται περισσότερα σημεία μικρότερης αντίστασης (5-10 Ohm.m) απ' ότι στο διάγραμμα 5. Μία επιπλέον διαφορά είναι ότι στο ΝΑ κομμάτι του διαγράμματος εμφανίζεται στρώμα μεγαλύτερης αντίστασης (41-73 Ohm.m) από αυτό που εμφανίζεται στο διάγραμμα 5 (25-41 Ohm.m).

Τοποθεσία ERT3

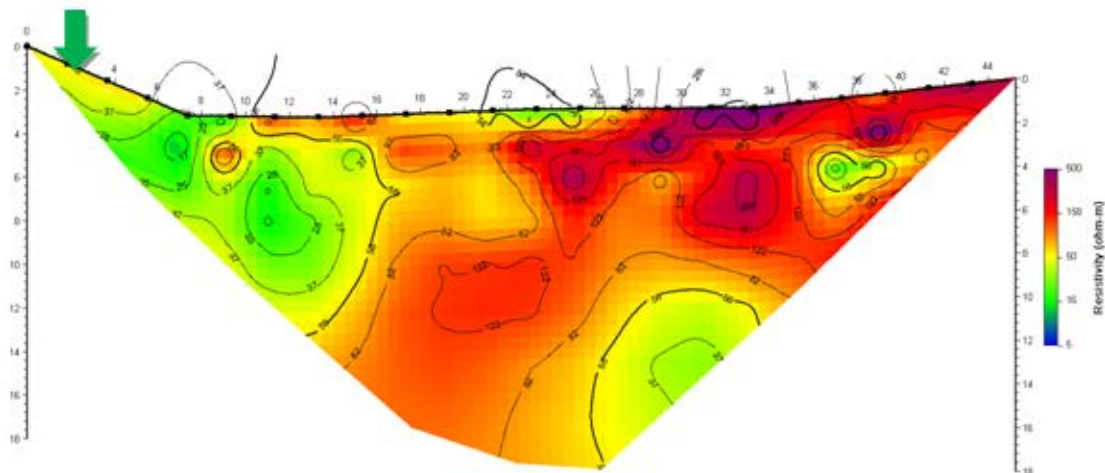


Εικόνα 22: Θέση της ERT3 στο χάρτη σε σχέση με τη δειγματοληψία της μπλε και πράσινης λεπίδας.

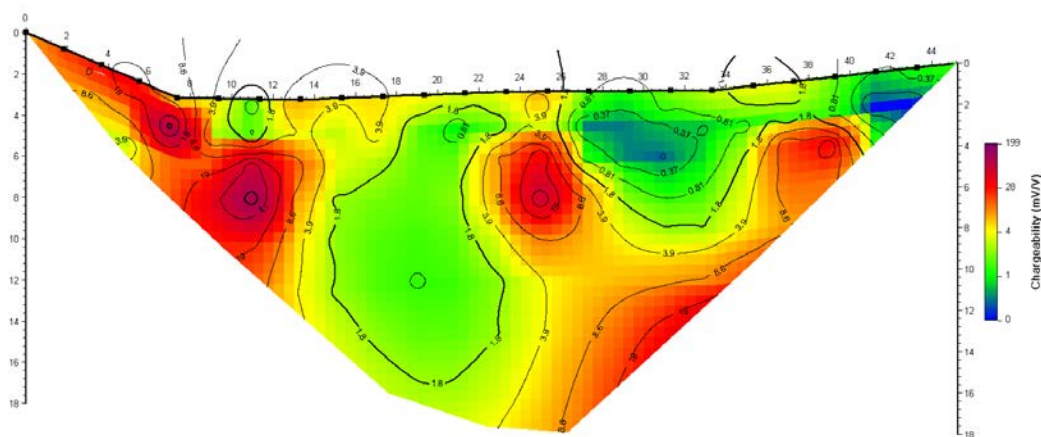


Εικόνα 23: Γεωλογικός χάρτης της θέσης ERT3.

• Διάταξη διπόλου-διπόλου:



Διάγραμμα 8: Γεωηλεκτρική τομογραφία θέσης ERT3 μέσω διάταξης διπόλου-διπόλου με βελάκι το σημείο δειγματοληψία της πράσινης λεπίδας.



Διάγραμμα 9: Διάγραμμα επαγόμενης πόλωσης της θέσης ERT3 μέσω της διάταξης διπόλου-διπόλου.

Τα παραπάνω διαγράμματα δείχνουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ERT3 (Εικόνα 22) μέσω της μεθόδου της τομογραφίας (Διάγραμμα 8) μέσω της διάταξης διπόλου-διπόλου και της μεθόδου της επαγόμενης πόλωσης (Διάγραμμα 9). Η ERT3 έχει προσανατολισμό Α-Δ και χρησιμοποιήθηκαν 24 ηλεκτρόδια, τα οποία τοποθετήθηκαν

ανά 2 m για την συνολική απόσταση των 46 m. Η λήψη των μετρήσεων έγινε από Α προς Δ, όπως δείχνει και το βέλος στην εικόνα 22.

Στο διάγραμμα 8 παρατηρούμε ότι στα ανατολικά έχουμε κυρίως στρώματα μεγάλης αντίστασης (82-181 Ohm.m) με κάποια ενδιάμεσα σημεία μεγαλύτερης αντίστασης (269-369 Ohm.m) και κάποια σημεία μικρότερης αντίστασης (37-56 Ohm.m). Από την άλλη μεριά, το δυτικό κομμάτι του διαγράμματος εμφανίζει στρώμα με σχετικά μικρή αντίσταση (17-37 Ohm.m) με κάποια σημεία μεγαλύτερης αντίστασης (37-82 Ohm.m).

Η διαφοροποίηση αυτή πιστεύεται ότι αντιστοιχεί σε διαφορές τόσο στην σύσταση σε σχέση με την παρουσία οξειδίων σιδήρου στο οποίο οφείλεται το κόκκινο χρώμα, σε οργανικές ιλύες (πιθανή σχέση με το μαύρο χρώμα) και σε ασβεστιτικά άλατα (πιθανή σχέση με λευκό χρώμα).

Σύμφωνα με το υπόμνημα του γεωλογικού χάρτη, τα στρώματα του διαγράμματος 8 φαίνεται να είναι οι βιογενείς ασβεστόλιθοι που παρεμβάλλονται με μάργες, αργίλους και κροκαλοπαγή.



Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δεδομένα, εκτιμώνται τα πάχη των στρωμάτων των αργίλων της περιοχής σύμφωνα με τις παραπάνω τομογραφίες, τα οποία σε όλες τις τοποθεσίες που μελετήθηκαν είναι περίπου στα 10-15 m. Επιπλέον, παρατηρούμε το σημαντικό εύρος των αντιστάσεων που έχουν οι άργιλοι που χρησιμοποιούνται στην κεραμική, οι οποίες κυμαίνονται από 5-80 Ohm.m στις τοποθεσίες που μελετήσαμε. Τέλος, μπορούμε να εντοπίσουμε μέσω των τομογραφιών την αντίσταση των αργίλων που συλλέχτηκαν για την ορυκτολογική και χημική ανάλυση που αναφέρεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο και να συγκρίνουμε τις διαφορές τους, οι οποίες είναι: για το μαύρο πηλό 5 Ohm.m, για τον λευκό πηλό περίπου 40 Ohm.m, για τον κόκκινο πηλό περίπου 80 Ohm.m, για την πράσινη λεπίδα περίπου στα 50 Ohm.m και για την μπλε δεν μπορούμε να ξέρουμε καθώς βρίσκεται εκτός τομογραφίας.

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

Βασίλης Κ. Παπαζάχος (1996), "Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική", Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Τζήμα Ελένη (2020), "Ερευνα Υφάλμυρων Υδροφορέων με τη μέθοδο της Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας".

Τριαντάφυλλος Μ. Γραβάλας (2021), "Διερεύνηση Εδαφικών Ρωγμών με Γεωφυσικές Μεθόδους".

Ηλιάνα Παπαθανασάκη (2016), "Διερεύνηση βέλτιστων διατάξεων μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας μεταξύ γεωτρήσεων".

Στέργιος Σ. Θεοδωρικός (2017), "Ορυκτολογία και Πετρολογία", 4^η έκδοση, Θεσσαλονίκη

<https://www.geomatrix.co.uk/marine-products/electrical-resistivity/syscal-pro-deep-marine/> (Εικόνα 16)



<https://www.newsbeast.gr/travel/arthro/9006605/margarites-to-chorio-ton-pitharadon-sto-rethymno>

<https://candia.wordpress.com/the-place/rethimno-athinorama/margarites/>