



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

Διπλωματική Εργασία

Γεωφυσική Έρευνα σε Παράκτιες Περιοχές Τοποθέτησης
Ηλεκτροδίου Γείωσης του Καλωδίου Ηλεκτρικής Διασύνδεσης
Αττικής – Κρήτης



ΚΟΣΙΑΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Γ. ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ
ΑΘΗΝΑ, ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2022

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας υπό την επίβλεψη του κ. Γεώργιου Αποστολόπουλου, καθηγητή του ΕΜΠ θα ήθελα να τον ευχαριστήσω ειλικρινά για την ευκαιρία που μου παρείχε να έρθω πιο κοντά στο αντικείμενο της γεωφυσικής και να συμμετέχω στην ερευνητική διαδικασία, όπως και για την ιδιαίτερη μέθοδο διδασκαλίας του μαθήματος της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής η οποία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη κριτικής σκέψης με σκοπό την προσέγγιση και επίλυση ενός επιστημονικού προβλήματος.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω :

Τον κ. Γεώργιο Αμολοχίτη, γεωφυσικό και μέλος Ε.Ε.Δ.Ι.Π. του τομέα Μεταλλευτικής, για την βοήθεια του κατά την διάρκεια του μαθήματος της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, τον κ. Κωνσταντίνο Λεονταράκη, Διδάκτωρ Γεωφυσικό/Μεταλλειολόγο-Μεταλλουργό και κ. Χρήστο Ορφανό, Διδάκτωρ Γεωφυσικό/Μεταλλειολόγο-Μεταλλουργό όπως και τους υποψήφιους Διδάκτορες Σταύρο Καριζώνη και Δημήτρη Καραϊσκό για τη βοήθεια τους στο πεδίο, και για την επίλυση αποριών που αντιμετωπίστηκαν.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τους φίλους μου και τους κοντινούς μου ανθρώπους που ήταν δίπλα μου και με βοήθησαν όταν το χρειαζόμουν.

Κοσιάδης Κωνσταντίνος

Αύγουστος 2022

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Γεωφυσική Έρευνα σε Παράκτιες Περιοχές Τοποθέτησης Ηλεκτροδίου Γείωσης του Καλωδίου Ηλεκτρικής Διασύνδεσης Αττικής-Κρήτης» αφορά την πραγματοποίηση γεωφυσικών ερευνών σε παράκτιες περιοχές στον Αργοσαρωνικό Κόλπο, συγκεκριμένα στη Νήσο Σταχτορρόη, και σε δύο πεδία στα βόρεια παράλια της Κρήτης πλησίον του Ηρακλείου. Ο σκοπός μας ήταν να απεικονιστεί η στρωματογραφία σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βάθος σε σχέση με την ηλεκτρική αγωγιμότητα, ώστε να εντοπιστεί η ύπαρξη και η έκταση της διείδυσης θαλασσινού νερού στο εκάστοτε πεδίο. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια αναζήτησης κατάλληλου περιβάλλοντος για την τοποθέτηση συστήματος ηλεκτρικής γείωσης του ενεργειακού καλωδίου ηλεκτρικής διασύνδεσης Αττικής-Κρήτης. Αρχικά συλλέχθηκαν οι απαραίτητες γεωλογικές πληροφορίες για τις περιοχές της έρευνας, όπως και αξιοποιήθηκαν προϋπάρχουσες μετρήσεις από άλλους ερευνητές. Αποφασίστηκε ότι η καταλληλότερη μέθοδος γεωφυσικής διασκόπησης είναι η Γεωηλεκτρική Τομογραφία (Electrical Resistivity Tomography), εφόσον ο στόχος ήταν ο εντοπισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Οι μετρήσεις επεξεργάστηκαν μέσω του λογισμικού RES2DINV της Geotomo Software και η αποτύπωση των τελικών τομών υλοποιήθηκε μέσω του λογισμικού Surfer της Golden Software. Ύστερα από την ακριβή διατύπωση του υπεδάφους στις υπό έρευνα περιοχές προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα, τα οποία θα αποτελέσουν πολύτιμο εργαλείο στα επόμενα στάδια της εκπόνησης του έργου κατασκευής του συστήματος γείωσης.

Η εργασία είναι συγκροτημένη από έξι κεφάλαια τα οποία περιλαμβάνουν τα παρακάτω :

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μία εισαγωγή στην γεωφυσική και στο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναλύει το θεωρητικό υπόβαθρο και τις αρχές στις οποίες βασίστηκαν οι μετρήσεις.

Στο τρίτο κεφάλαιο συναντάμε εφαρμογές Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας σε διάφορες περιοχές στον κόσμο με παραπλήσιες συνθήκες.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές σχεδιασμού ενός συστήματος ηλεκτρικής γείωσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από την ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής στην Νήσο Σταχτορρόη και στην Κρήτη.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μία σύνοψη των αποτελεσμάτων της έρευνας και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτά.

Abstract

The subject of the present thesis titled “Geophysical Investigation of Coastal Areas for the Placement of the Grounding Electrode for the Attica-Crete Interconnecting Power Cable” is the realization of geophysical research at coastal areas in the Argo-Saronic Gulf, specifically on the island of Stachtorroi, and at two different coastal fields on the island of Crete near Heraklion. The target of the investigation is to visualize the stratigraphy as deep as possible in relation to the electrical conductivity, in order to detect the possibility and extent of saline water intrusion. The investigation long term purpose is to detect suitable environment for the installation of an electrode grounding system that will be used for the Attica-Crete interconnecting power cable. The first step was to collect all the geological information that was available to us and make use of previous geophysical investigation’s data realized by other research teams. It was decided that the best geophysical method to implement was the Electrical Resistivity Tomography, mainly because our interest was the electrical resistivity of the ground. The data acquired was processed in the RES2DINV software of Geotomo Software and the final resistivity sections were created with the use of Surfer of Golden Software. After the detailed depiction of the ground stratigraphy, certain conclusions emerged, which will be a valuable asset in the next step of materializing the construction of the electrical grounding system.

The thesis is composed and separated in six chapters which include the following:

The first chapter serves as a brief introduction to geophysics and the subject of the thesis.

The second chapter analyzes the theoretical background on which the investigation was based upon.

In the third chapter we look into other cases where the Electrical Resistivity Tomography was applied with similar circumstances.

In the fourth chapter, the basic principles of drafting an electrical grounding system are delved into in detail.

The fifth chapter constitutes of the measurements and the sections that were acquired by the research team of the Applied Geophysics Laboratory on Stachtorroi Island and Crete.

The sixth and final chapter is an overview of the results and conclusions of the investigation.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Περίληψη	3
Ευρετήριο Εικόνων	8
Ευρετήριο Πινάκων	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1. Εισαγωγή	14
1.1. Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	18
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	18
2. Θεωρητικό υπόβαθρο	19
2.1. Ηλεκτρικές Μέθοδοι	19
2.2. Ηλεκτρικά Δυναμικά	20
2.2.1. Ο νόμος του Ohm – Ειδική ηλεκτρική αντίσταση, Ηλεκτρική αγωγιμότητα	22
2.2.2. Συσχέτιση ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και είδος πετρώματος	23
2.3. Μέθοδος της Ηλεκτρικής Ειδικής Αντίστασης	28
2.3.1. Ηλεκτρόδιο Ρεύματος σε Άπειρο Ομογενή Χώρο	28
2.3.2. Ηλεκτρόδιο Ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο	29
2.3.3. Ηλεκτρόδια Ρεύματος, διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια ημιάπειρου χώρου	30
2.3.4. Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση	31
2.4. Διατάξεις Ηλεκτροδίων	32
2.4.1. Κατανομή Ρεύματος και δυναμικού εντός Ομογενούς Υπεδάφους	34
2.5. Εξοπλισμός Υπαίθρου	35
2.6. Μετρήσεις και Τεχνικές Υπαίθρου	37
2.6.1. Ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις	37
2.6.2. Οριζόντιες Ηλεκτρικές Χαρτογραφήσεις	38
2.6.3. Μέθοδος Δισδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	42
3. Εφαρμογές Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας σε Παράκτιες Περιοχές	43
3.1. Εφαρμογές ERT στην περιοχή Μπαζιλικάτα(Basilicata), Νότια Ιταλία	43
3.1.1. Σκοπός της έρευνας	43

3.1.2.	Γεωμορφολογία της περιοχής	44
3.1.3.	Γεωηλεκτρική τομογραφία της περιοχής	46
3.1.4.	Συμπεράσματα	48
3.2.	Εφαρμογές ERT στην Μαλαισιανή ακτογραμμή	49
3.2.1.	Σκοπός της έρευνας	49
3.2.2.	Περιγραφή της γεωμορφολογίας του πεδίου έρευνας	49
3.2.3.	Μεθοδολογία και διαδικασία μετρήσεων	50
3.2.4.	Συμπεράσματα	52
3.3.	Εφαρμογές ERT στην Σαουδική Αραβία	53
3.3.1.	Σκοπός της έρευνας	53
3.3.2.	Μεθοδολογία και διαδικασία μετρήσεων	54
3.3.3.	Συμπεράσματα	59
3.4.	Εφαρμογές ERT στην ΒΑ Ινδία	59
3.4.1.	Περιοχή μετρήσεων	59
3.4.2.	Μεθοδολογία και αποτελέσματα μετρήσεων «Πεδίου 3»	60
3.4.3.	Συμπεράσματα	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4		63
4.	Βασικές Αρχές Σχεδιασμού Συστήματος Ηλεκτροδίων Γείωσης	64
4.1.	Διαδικασία σχεδιασμού συστήματος ηλεκτροδίων γείωσης	64
4.2.	Τύποι ηλεκτροδίων	64
4.2.1.	Ηλεκτρόδια στεριάς(Land electrodes)	65
4.2.2.	Ηλεκτρόδια θαλάσσης(Sea electrodes)	69
4.2.3.	Ηλεκτρόδια ακτής(Beach electrodes)	70
4.2.4.	Ηλεκτρόδια λίμνης(Pond electrodes)	71
4.3.	Επιλογή κατάλληλου τύπου ηλεκτροδίου	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5		74
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ		74
5.	Γεωφυσικές Έρευνες της Ερευνητικής Ομάδας του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής	75
5.1.	Γεωφυσική έρευνα στη Νήσο Σταχτορόνη	75
5.1.1.	Γενικά	75
5.1.2.	Γεωλογικά στοιχεία της περιοχής	78
5.1.3.	Γεωηλεκτρικές τομογραφίες	80

5.1.3.1.	Λήψη και επεξεργασία μετρήσεων	80
5.1.3.2.	Γεωφυσική έρευνα παλαιότερης χρονολογίας του Πανεπιστημίου Κρήτης	81
5.1.3.3.	Γεωηλεκτρικές τομές λιμένα Πάχης	82
5.1.3.4.	Γεωηλεκτρικές τομές Νήσου Σταχτορρόης	84
5.2.	Γεωφυσική έρευνα στην Κρήτη	86
5.2.1.	Γενικά	86
5.2.2.	Γεωλογικά στοιχεία της περιοχής	92
5.2.3.	Γεωηλεκτρικές τομογραφίες	95
5.2.3.1.	Γεωηλεκτρικές τομές πλησίον της παραλίας Αλμυρίδας	95
5.2.3.2.	Γεωηλεκτρικές τομές πλησίον της παραλίας Πέρα Γαλήνοι	97
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	99
6.	Συμπεράσματα και Σχόλια	100
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	102
7.	Βιβλιογραφία	103

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1 : Η ερευνητική ομάδα έπειτα από τις μετρήσεις στην Νήσο Σταχτορρόη.....	15
Εικόνα 1.2 : Σχηματική απεικόνιση του καλωδίου ηλεκτρικής διασύνδεσης «Αριαδνη».....	16
Εικόνα 2.1 : Σχηματική αναπαράσταση του Νόμου του Ohm(Αποστολόπουλος 2015).....	23
Εικόνα 2.2 : Σχηματική απεικόνιση δομής και πορώδους ποικίλων πετρωμάτων(Αποστολόπουλος 2015).26	
Εικόνα 2.3 : Ηλεκτρόδιο ρεύματος σε άπειρο ομογενή χώρο (Αποστολόπουλος 2015).....	28
Εικόνα 2.4 : Ηλεκτρόδιο ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο(Αποστολόπουλος 2015).....	29
Εικόνα 2.5 : Ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια ημιάπειρου χώρου(Αποστολόπουλος 2015).....	30
Εικόνα 2.6 : Διάταξη Schlumberger(Αποστολόπουλος 2015).....	32
Εικόνα 2.7 : Διάταξη Wenner(Αποστολόπουλος 2015).....	33
Εικόνα 2.8 : Διάταξη Dipole – Dipole(Αποστολόπουλος 2015).....	33
Εικόνα 2.9 : Διάταξη Pole – Dipole(Αποστολόπουλος 2015).....	33
Εικόνα 2.10 : Διάταξη Pole – Pole(Αποστολόπουλος 2015).....	34
Εικόνα 2.11 : Κατανομή ρευματικών και δυναμικών γραμμών(Αποστολόπουλος 2015).....	35
Εικόνα 2.12 : Διάταξη οργάνων και καλωδίων στην ύπαιθρο(Αποστολόπουλος 2015).....	36
Εικόνα 2.13 : Ηλεκτρική βυθοσκόπηση – Διάταξη Schlumberger(Αποστολόπουλος 2015).....	37
Εικόνα 2.14 : Οριζόντια ηλεκτρική χαρτογράφηση – Διάταξη Wenner(Αποστολόπουλος 2015).....	38
Εικόνα 2.15 : Δισδιάστατη γεωηλεκτρική τομογραφία, διάταξη ηλεκτροδίων και σειρά μετρήσεων(Αποστολόπουλος 2015).....	39
Εικόνα 2.16 : Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους δισδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τη βοήθεια προεπιλεγμένου αλγορίθμου(Αποστολόπουλος 2015).....	40
Εικόνα 2.17 : Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων(Αποστολόπουλος 2015).....	41
Εικόνα 3.1 : Περιοχή έρευνας, Μπαζιλικάτα, Ιταλία.....	44
Εικόνα 3.2 : Γεωλογικός χάρτης της υπό έρευνα περιοχής.....	45
Εικόνα 3.3 : Χάρτης τομών ERT.....	46
Εικόνα 3.4 : 2D Γεωηλεκτρικές τομές της περιοχής, οι θέσεις τους όπως φαίνονται στην Εικόνα 3.3 είναι : a) προφίλ 1, b) προφίλ 2, c) προφίλ 3, d) προφίλ 4, e) προφίλ 5.....	47
Εικόνα 3.5 : Γεωλογικός χάρτης της περιοχής, 1985.....	50
Εικόνα 3.6 : Σειρά ηλεκτρικών χαρτογραφήσεων L1-L5.....	51
Εικόνα 3.7 : Προφίλ φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης του πεδίου δοκιμών Riyadh.....	54
Εικόνα 3.8 : 2D μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του πεδίου δοκιμών Riyadh.....	54

Εικόνα 3.9 : 2D μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του πεδίου Dammam.....	55
Εικόνα 3.10 : Αντίσταση εδάφους, Dammam.....	56
Εικόνα 3.11 : Αντίσταση εδάφους, Makkah.....	56
Εικόνα 3.12 : Αντίσταση εδάφους, Dawadm.....	56
Εικόνα 3.13 : Αντίσταση εδάφους, Sabt Al-alaya.....	56
Εικόνα 3.14 : Αντίσταση εδάφους, Mujardah.....	57
Εικόνα 3.15 : Αντίσταση εδάφους, Najran.....	57
Εικόνα 3.16 : Πεδία Μετρήσεων.....	60
Εικόνα 3.17 : Inverted 2-D τομή κατά μήκος του Δ-A προφίλ.....	61
Εικόνα 3.18 : Προφίλ ηλεκτρικής τομογραφίας.....	61
Εικόνα 4.1 : Ρηχό οριζόντιο ηλεκτρόδιο.....	66
Εικόνα 4.2 : Ρηχό μονοδιάστατο (linear) ηλεκτρόδιο(General Guidelines for HVDC Electrode Design, CIGRE 2017).....	66
Εικόνα 4.3 : Ρηχό ηλεκτρόδιο σε διάταξη δακτυλίου(General Guidelines for HVDC Electrode Design, CIGRE 2017)	66
Εικόνα 4.4 : Διάταξη κάθετων ηλεκτροδίων(General Guidelines for HVDC Electrode Design, CIGRE 2017)	67
Εικόνα 4.5 : Κάθετο ηλεκτρόδιο(General Guidelines for HVDC Electrode Design, CIGRE 2017).....	67
Εικόνα 4.6 : Ηλεκτρόδιο βαθέος φρεατίου(General Guidelines for HVDC Electrode Design, CIGRE 2017)	68
Εικόνα 4.7 : Ηλεκτρόδιο θαλάσσης με προστατευτικό πλέγμα τιτανίου(General Guidelines for HVDC Electrode Design, CIGRE 2017)	69
Εικόνα 4.8 : Πλέγμα τιτανίου πλαισιωμένο σε βάση από σκυρόδεμα(General Guidelines for HVDC Electrode Design, CIGRE 2017)	69
Εικόνα 4.9 : Ηλεκτρόδιο θαλάσσης σε ξύλινο κλουβί και οπτάνθρακα(General Guidelines for HVDC Electrode Design, CIGRE 2017)	70
Εικόνα 4.10 : Ρηχό ηλεκτρόδιο ακτής(General Guidelines for HVDC Electrode Design, CIGRE 2017)...70	70
Εικόνα 4.11 : Ηλεκτρόδιο ακτής σε οπτάνθρακα με προστατευτικό κάλυμμα για την αποφυγή της επαφής του οπτάνθρακα με το χώμα(General Guidelines for HVDC Electrode Design, CIGRE 2017).....	71
Εικόνα 4.12 : Ηλεκτρόδιο λίμνης(General Guidelines for HVDC Electrode Design, CIGRE 2017).....	71
Εικόνα 5.1 : Δορυφορική φωτογραφία της νήσου Σταχτορρόης.....	75
Εικόνα 5.2 : Φωτογραφίες της νήσου κατά την προσέγγιση.....	76
Εικόνα 5.3 : Φωτογραφίες της νήσου κατά την προσέγγιση.....	76
Εικόνα 5.4 : Μεταφορά εξοπλισμού από το σκάφος στο πεδίο της έρευνας.....	76

Εικόνα 5.5 : Ξετύλιγμα και τοποθέτηση του καλωδίου κατά μήκος της τομής.....	77
Εικόνα 5.6 : Τοποθέτηση των ηλεκτροδίων.....	77
Εικόνα 5.7 : Γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ, τμήμα από το φύλλο «Μέγαρα»	78
Εικόνα 5.8 : Δολομιτικοί σχηματισμοί στο λιμάνι της Πάχης.....	79
Εικόνα 5.9 : Στρωματογραφικές στήλες της περιοχής.....	79
Εικόνα 5.10 : Σκαρίφημα περιοχής πλησίον του λιμένα της Πάχης	81
Εικόνα 5.11 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust).....	82
Εικόνα 5.12 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust Horizontal)	82
Εικόνα 5.13 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust)	82
Εικόνα 5.14 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust Horizontal)	82
Εικόνα 5.15 : α) Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust) , b) Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust Horizontal).....	83
Εικόνα 5.16 : α) Τομή Schlumberger (Robust-Robust) , b) Τομή Schlumberger (Robust-Robust Horizontal).....	83
Εικόνα 5.17 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust).....	84
Εικόνα 5.18 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust Horizontal)	84
Εικόνα 5.19 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust)	84
Εικόνα 5.20 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust Horizontal)	84
Εικόνα 5.21 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust Horizontal)	85
Εικόνα 5.22 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust Horizontal)	85
Εικόνα 5.23 : Δορυφορική φωτογραφία της ευρύτερης υπό έρευνα περιοχής κοντά στο Ηράκλειο.....	86
Εικόνα 5.24 : Φωτογραφίες από το ανατολικό προφίλ πλησίον της παραλίας Πέρα Γαλήνοι.....	87
Εικόνα 5.25 : Φωτογραφίες κατά τη μεταφορά του εξοπλισμού στο ανατολικό προφίλ.....	87
Εικόνα 5.26 : Φωτογραφίες κατά την διάρκεια των μετρήσεων στο ανατολικό προφίλ.....	88
Εικόνα 5.27 : Δορυφορική φωτογραφία του ανατολικού προφίλ.....	89
Εικόνα 5.28 : Φωτογραφίες του δυτικού προφίλ πλησίον της παραλίας Αλμυρίδας.....	90
Εικόνα 5.29 : Δορυφορική φωτογραφία του δυτικού προφίλ.....	91
Εικόνα 5.30 : Γεωλογικός χάρτης της Κρήτης, (Martha et al., 2019)	92
Εικόνα 5.31 : Γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ, τμήμα από το φύλλο «Ανώγεια»	93
Εικόνα 5.32 : Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής των μετρήσεων, (Seybold et al., 2019).....	94
Εικόνα 5.33 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust)	95
Εικόνα 5.34 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust Horizontal)	95

Εικόνα 5.35 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust)	95
Εικόνα 5.36 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust Horizontal).....	95
Εικόνα 5.37 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust).....	96
Εικόνα 5.38 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust Horizontal).....	96
Εικόνα 5.39 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust).....	97
Εικόνα 5.40 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust Horizontal).....	97
Εικόνα 5.41 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust).....	97
Εικόνα 5.42 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust Horizontal).....	97
Εικόνα 5.43 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust).....	98
Εικόνα 5.44 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust Horizontal).....	98

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1 : Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ποικίλων υλικών (Αποστολόπουλος 2015).....	25
Πίνακας 2 : Συσχέτιση μεταξύ γεωλογικών διεργασιών και ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Αποστολόπουλος 2015).....	27
Πίνακας 3 : Ερμηνεία των υλικών του υπεδάφους της υπό έρευνα περιοχής.....	52
Πίνακας 4 : Μετρούμενες τιμές ελάχιστων, μέγιστων και μέσω αντιστάσεων στα 6m.....	58
Πίνακας 5 : Τύποι και χαρακτηριστικά ηλεκτροδίων γείωσης (General Guidelines for HVDC Electrode Design, CIGRE 2017).....	65

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Εισαγωγή

Η επιστήμη της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής εκμεταλλεύεται φυσικά φαινόμενα της Γης ή τεχνητά, και μέσω μετρήσεων των μεγεθών τους στο υπέδαφος, στην επιφάνεια ή και στον αέρα, αναλύει και απεικονίζει την μορφή του υπεδάφους σε χώρους που χαρακτηρίζονται από τις ιδιότητες του εκάστοτε φαινομένου. Τα προαναφερόμενα φαινόμενα είναι η βαρύτητα της Γης, ο μαγνητισμός, ο ηλεκτρισμός, ο ηλεκτρομαγνητισμός, η διάδοση σεισμικών κυμάτων και οι αντίστοιχες ιδιότητες είναι η πυκνότητα, η μαγνητική επιδεκτικότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, η διηλεκτρική σταθερά και η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων.

Οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, παθητικές και ενεργητικές. Η βαρυτική και η μαγνητική μέθοδος αποτελούν τις παθητικές και οι υπόλοιπες τις ενεργητικές. Η διαφορά είναι η πηγή του φαινομένου. Στην περίπτωση των παθητικών το μετρούμενο φαινόμενο δεν προέρχεται από κάποια τεχνητή πηγή, αποτελεί είναι φυσικό φαινόμενο της Γης και η μέτρηση που θα πάρουμε είναι συνολική από το σημείο της διασκόπησης μέχρι το κέντρο της Γης. Οι ενεργητικές μέθοδοι χρειάζονται μία πηγή ώστε να δημιουργήσουν τις κατάλληλες συνθήκες για την μέτρηση ενός τεχνητού φαινομένου. Οι μετρήσεις των ενεργητικών μεθόδων αφορούν κάποιο συγκεκριμένο βάθος διασκόπησης το οποίο ορίζεται ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε γεωφυσικής έρευνας, τις προδιαγραφές του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται και προφανώς εξαρτάται και από το περιβάλλον της έρευνας και το κατά πόσο μας το επιτρέπει.

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από τον σκοπό για τον οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις, το αντικείμενο ή σχηματισμό που θέλουμε να εντοπίσουμε, τις φυσικές ιδιότητες του, το αναμενόμενο βάθος που θα συναντηθεί. Αξιοσημείωτο είναι ότι καμία μέθοδος δεν θεωρείται αρκετή από μόνη της γιατί όλες έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Σαν γενικό κανόνα, για την επίτευξη των βέλτιστων αποτελεσμάτων σε κάθε έρευνα εφαρμόζουμε τουλάχιστον δύο διαφορετικές μεθόδους ώστε να ελαττώματα της μίας να εξαλείφονται από τα πλεονεκτήματα της άλλης.

1.1. Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την πραγματοποίηση γεωφυσικών ερευνών σε παράκτιες περιοχές στον Αργοσαρωνικό Κόλπο, συγκεκριμένα στη Νήσο Σταχτορρόη, και σε δύο πεδία στα βόρεια παράλια της Κρήτης πλησίον του Ηρακλείου. Ο σκοπός μας ήταν να απεικονιστεί η στρωματογραφία σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βάθος σε σχέση με την ηλεκτρική αγωγιμότητα, ώστε να εντοπιστεί η ύπαρξη και η έκταση της διείσδυσης θαλασσινού νερού στο εκάστοτε πεδίο. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια αναζήτησης κατάλληλου περιβάλλοντος για την τοποθέτηση συστήματος ηλεκτρικής γείωσης του ενεργειακού καλωδίου ηλεκτρικής διασύνδεσης Αττικής-Κρήτης. Αρχικά συλλέχθηκαν οι απαραίτητες γεωλογικές πληροφορίες για τις περιοχές της έρευνας, όπως και αξιοποιήθηκαν προϋπάρχουσες μετρήσεις από άλλους ερευνητές. Αποφασίστηκε ότι η καταλληλότερη μέθοδος γεωφυσικής διασκόπησης είναι η Γεωηλεκτρική Τομογραφία (Electrical Resistivity Tomography), εφόσον ο στόχος ήταν ο εντοπισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις ηλεκτροδίων Schlumberger και Dipole–Dipole για την βέλτιστη απεικόνιση της στρωματογραφίας αλλά και των πλευρικών ανομοιογενειών στα πεδία μετρήσεων. Η λήψη των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πραγματοποιήθηκε μέσω οργάνου SYSCALPro και καλώδια μήκους 300-710 m για διασκόπηση σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βάθος.



Εικόνα 1.1 : Η ερευνητική ομάδα έπειτα από τις μετρήσεις στην Νήσο Σταχτορρόη.



Εικόνα 1.2 : Σχηματική απεικόνιση του καλωδίου ηλεκτρικής διασύνδεσης «Αριάδνη»

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1. Ηλεκτρικές Μέθοδοι

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

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

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

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

Παθητικές Μέθοδοι

➤ Μέθοδος του Φυσικού Δυναμικού (Self Potential Method)

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

➤ Μαγνητοτελλουρική Μέθοδος (Magnetotelluric Method).

Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις φυσικών τελλουρικών ρευμάτων, τα οποία παράγονται από μαγνητική επαγωγή ηλεκτρικών ρευμάτων στην ιονόσφαιρα. Χρησιμοποιείται για τον

καθορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών, τα οποία βρίσκονται σε σχετικά μεγάλα βάθη-μέχρι και τον μανδύα-μέσα στη γη.

Ενεργητικές μέθοδοι

➤ Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (Resistivity Method).

Χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό δυναμικό που σχετίζεται με την υπόγεια ροή ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από πηγή συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το μετρούμενο δυναμικό, και μπορούν επομένως να χαρτογραφηθούν με χρήση της μεθόδου, περιλαμβάνουν την παρουσία και ποιότητα των ρευστών, των πόρων και των αργίλων. Χρησιμοποιείται ευρέως σε υδρογεωλογικές, περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές μελέτες, με μέσα βάθη διασκόπησης

➤ Μέθοδος της Επαγόμενης Πολικότητας (Induced Polarization Method).

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

2.2. Ηλεκτρικά Δυναμικά

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

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

A. Ηλεκτροκινητικό Δυναμικό.

Όταν διάλυμα ειδικής αντίστασης ρ και ιξώδους η αναγκάζεται να περάσει δια μέσου εγκοίλων ή πόρων, παρατηρείται στα άκρα τους διαφορά δυναμικού.

$$E_k = - \frac{\Phi \times \Delta P \times \varepsilon \times \rho}{4 \times \pi \times \eta} \quad (2.1)$$

Όπου Φ : δυναμικό απορρόφησης, ΔP : διαφορά πίεσης, ε : διηλεκτρική σταθερά

B. Δυναμικό Διάχυσης.

Οφείλεται στη διαφορά ευκινησίας των διαφόρων ιόντων σε διαλύματα διαφορετικών συγκεντρώσεων.

$$E_d = \frac{R \times \Theta \times (I_a - I_c)}{F \times n \times (I_a - I_c)} \times \log\left(\frac{C_1}{C_2}\right) \quad (2.2)$$

Όπου C_1, C_2 : συγκεντρώσεις διαλυμάτων σε ιόντα, I_a, I_c : ευκινησία ιόντων, Θ : απόλυτη θερμοκρασία, n : σθένος, F : σταθερά του Faraday(=9.65*10⁴ C/mol), R : παγκόσμια σταθερά των αερίων(=8.31 joules/°C)

C. Δυναμικό Nerst.

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

$$E_s = \frac{R \times \Theta}{F \times n} \times \log\left(\frac{C_1}{C_2}\right) \quad (2.3)$$

(ηλεκτροχημικό ή στατικό δυναμικό είναι ο συνδυασμός των δύο τελευταίων δυναμικών)

D. Δυναμικό Ορυκτογένεσης.

Όταν δύο διαφορετικά μεταλλικά ηλεκτρόδια βυθίζονται σε ομογενές διάλυμα, τότε δημιουργείται μεταξύ τους διαφορά δυναμικού. Το δυναμικό αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο

σε ζώνες που έχουν σουλφίδια των μετάλλων, γραφίτη και μερικές φορές οξειδία των μετάλλων όπως μαγνητίτη.

Ε. Φυσικό Δυναμικό συσχετιζόμενο με παρουσία γεωθερμικών πεδίων.

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

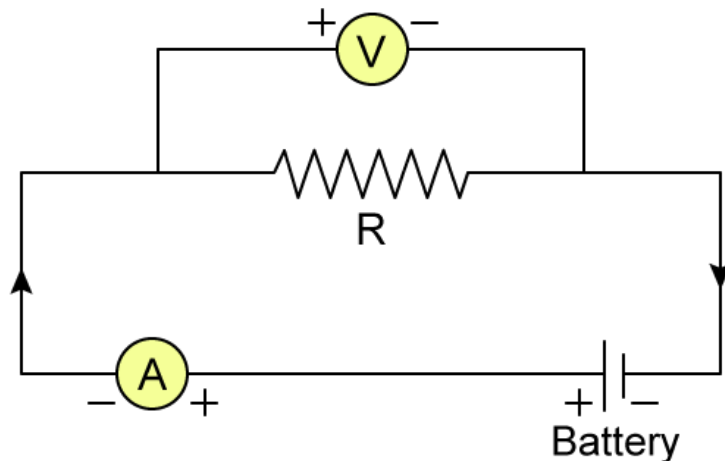
2.2.1.Ο Νόμος του Ohm – Ειδική ηλεκτρική αντίσταση, Ηλεκτρική αγωγιμότητα

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

Με βάση τον νόμο του Ohm, ένας κυλινδρικός αγωγός μήκους L και διατομής A που διαρρέεται από ρεύμα I και στα άκρα του μετράμε διαφορά δυναμικού ΔV , η ηλεκτρική αντίσταση R δίνεται από τον τύπο :

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.4)$$

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



Εικόνα 2.1 : Σχηματική αναπαράσταση του Νόμου του Ohm

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, συμβολίζεται με το γράμμα ρ (Ohm*m), αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο του υλικού κατασκευής του αγωγού και περιγράφει την ευκολία του αγωγού να διαβιβάσει ηλεκτρικό ρεύμα. Δίνεται από τον τύπο :

$$\rho = \frac{R \times A}{L} \quad (2.5)$$

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

2.2.2.Συσχέτιση ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και είδος πετρώματος

Τα περισσότερα πετρώματα δεν είναι ιδιαίτερα καλοί αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος και οι ειδικές αντιστάσεις τους θα ήταν πολύ υψηλές αν δεν είχαν πόρους με ρευστά, κυρίως νερό. Τα πετρώματα είναι ηλεκτρολυτικοί αγωγοί και προαναφερθείσα αγωγιμότητα είναι περισσότερο ηλεκτρολυτικοί παρά ωμική, και η διακύμανση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτάται από το ποσό της υγρασίας στο έδαφος.

Η αγωγιμότητα ενός πορώδους πετρώματος μεταβάλλεται με τον όγκο και την κατανομή των πόρων, αλλά πολύ περισσότερο με την αγωγιμότητα και το ποσό του περιεχομένου νερού. Η ειδική αντίσταση ενός μέσου δίνεται με βάση τον εμπειρικό τύπο του Archie :

$$\rho_e = \alpha \times \Phi^{-m} \times S^{-n} \times \rho_w \quad (2.6)$$

όπου,

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

Φ : το ποσοστό όγκου των πόρων (πορώδες)

S : το ποσοστό πόρων που περιέχουν νερό

ρ_w : η ειδική αντίσταση του νερού

Η ηλεκτρική αντίσταση πετρωμάτων και ορυκτών επηρεάζεται από τους παρακάτω παράγοντες :

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

ΥΛΙΚΟ	ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ($\Omega \cdot m$)
Αέρας	∞
Μαρμαρυγίας	$9 \times 10^{12} - 1 \times 10^{14}$
Χαλαζίας	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
Ασβεστίτης	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
Ορυκτό άλας	$30 - 1 \times 10^{13}$
Σιδηροπυρίτης	3×10^{-1}
Γάληνιτης	2×10^{-3}
Γάββρος	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$
Συμπαγής Γρανίτης	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^6$
Αποσαθρωμένος Γρανίτης	$1 - 1 \times 10^2$
Ασβεστόλιθος	$50 - 1 \times 10^7$
Βασάλτης	$10 - 1 \times 10^7$
Ψαμμίτης	$1 - 1 \times 10^3$
Σχιστόλιθος	$20 - 2 \times 10^3$
Δολομίτης	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^4$
Άμμος	$1 - 1 \times 10^3$
Άργιλος	$1 - 1 \times 10^2$
Εδαφικό Νερό	0,5 - 300
Θαλασσινό Νερό	0.2

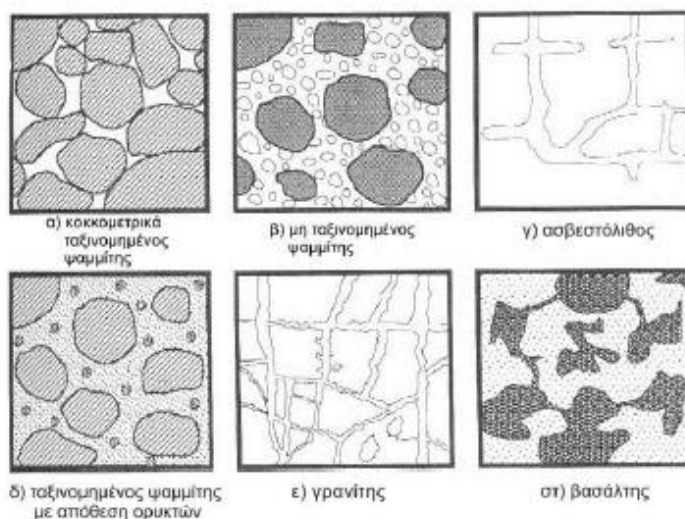
Πίνακας 1 : Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ποικίλων υλικών (Αποστολόπουλος 2015).

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

Σύμφωνα με την **Εικόνα 2.2** μπορούμε να διαπιστώσουμε τα ακόλουθα:

- i. Ο κοκκομετρικά ταξινομημένος ψαμμίτης έχει μεγάλα κενά και, συνεπώς, παρουσιάζει χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης (Εικόνα 2.2.α).
- ii. Ο μη ταξινομημένος ψαμμίτης έχει πολύ μικρότερο πορώδες και, επομένως χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερες τιμές ειδικής αντίστασης (Εικόνα 2.2.β).
- iii. Η διάλυση του ασβεστολίθου κατά μήκος των ρωγμών του, αυξάνει το πορώδες και, κατά συνέπεια μειώνει τις τιμές της ειδικής αντίστασης (Εικόνα 2.2.γ).

- iv. Η απόθεση ορυκτών σε οποιοδήποτε πέτρωμα μειώνει το πορώδες του, αυξάνοντας την ειδική αντίστασή του (Εικόνα 2.2.δ).
- v. Ένα πέτρωμα με την γρανιτική υφή θα άγει τον ηλεκτρισμό μέσω διακλάσεων και κατά μήκος των ορίων γωνιωδών κόκκων, έχοντας μικρό πορώδες και συνεπώς υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης (Εικόνα 2.8.ε).
- vi. Ο βασάλτης έχει κενούς χώρους που σπάνια συνδέονται μεταξύ τους, καθιστώντας το σχηματισμό ελάχιστα περατό. Επομένως, ακόμα και στην περίπτωση που αυτός χαρακτηρίζεται από μεγάλο πορώδες, παρουσιάζει υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης (Εικόνα 2.8.στ).



Εικόνα 2.2 : Σχηματική απεικόνιση δομής και πορώδους ποικίλων πετρωμάτων (Αποστολόπουλος 2015).

C. Περιεκτικότητα σε άλατα : Για δεδομένο πορώδες, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του ρευστού πλήρωσης των πόρων σε άλατα, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος.

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

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

Πίνακας 2 : Συσχέτιση μεταξύ γεωλογικών διεργασιών και ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Αποστολόπουλος 2015).

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

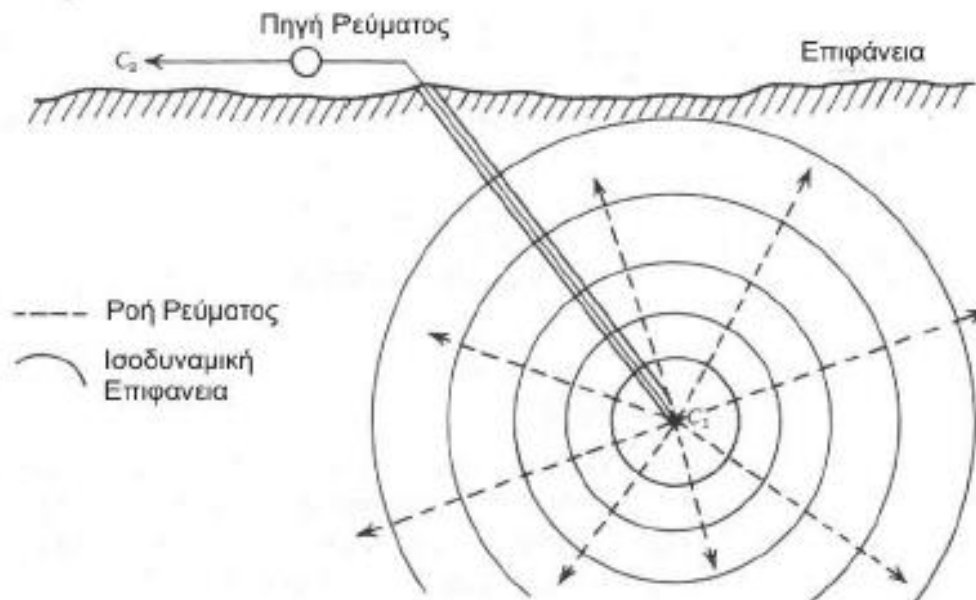
F. Επιδράσεις αργιλικών ορυκτών : Τα αργιλικά ορυκτά δρουν συμπληρωματικά στον χάρτη των αγωγιμοτήτων. Η ηλεκτρική ειδική αντίστασή τους είναι χαμηλή. Η προέλευση αυτής της πολύ υψηλής αγωγιμότητας των αργίλων οφείλεται στη διπλή στρώση ανταλλαγής κατιόντων, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 2.3**. Τα κατιόντα χρησιμεύουν στην εξισορρόπηση του φορτίου λόγω της υποκατάστασης εντός του κρυσταλλικού πλέγματος και για να «σπάσουν» τους δεσμούς. Το πεπερασμένο μέγεθος των κατιόντων εμποδίζει το σχηματισμό μονού στρώματος. Αντίθετα, σχηματίζεται διπλό στρώμα. Αποτελείται από ένα συμπαγή στρώμα δίπλα από την επιφάνεια της αργίλου και ένα διάχυτο στρώμα που η πυκνότητά του μειώνεται εκθετικά σε σχέση με την απόσταση από το συμπαγή στρώμα.

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

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

2.3. Μέθοδος της Ηλεκτρικής Ειδικής Αντίστασης

2.3.1. Ηλεκτρόδιο Ρεύματος σε Άπειρο Ομογενή Χώρο



Εικόνα 2.3 : Ηλεκτρόδιο ρεύματος σε άπειρο ομογενή χώρο (Αποστολόπουλος 2015).

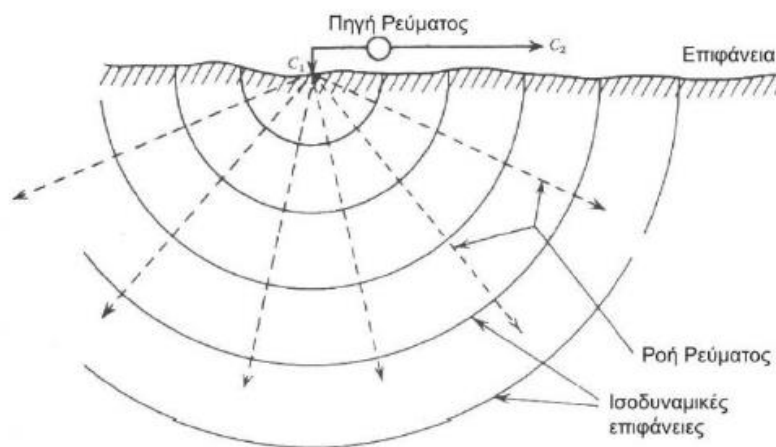
Σε ισότροπο και ομογενές μέσο τοποθετείται ηλεκτρόδιο μικρών διαστάσεων C1 (σημειακή πηγή ρεύματος) σε μεγάλο βάθος, και ηλεκτρόδιο C2 στην επιφάνεια της Γης σε μεγάλη απόσταση από το C1 (αμελητέα επίδραση στην διαμόρφωση του δυναμικού). Τα ηλεκτρόδια συνδέονται με πηγή ρεύματος δημιουργώντας κύκλωμα με ακτινικές γραμμές ροής ρεύματος που ξεκινούν από την σημειακή πηγή και κατευθύνονται προς τα έξω. Η διαφορά δυναμικού κατά μήκος των ομόκεντρων κύκλων παραμένει σταθερή λόγω της ηλεκτρικής αντίστασης του μέσου. Οι γραμμές ροής ρεύματος από το C1 ονομάζονται ισοδυναμικές γραμμές και σχηματίζουν στις τρεις διαστάσεις ισοδυναμικές σφαιρικές επιφάνειες που έχουν ως κέντρο και πάλι το ηλεκτρόδιο C1. Στις τρεις διαστάσεις οι ισοδυναμικές γραμμές σχηματίζουν ισοδυναμικές σφαιρικές επιφάνειες που έχουν ως κέντρο και πάλι το ηλεκτρόδιο C1.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του μέσου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\rho = \frac{V \times 4 \times \pi \times r}{I} \quad (2.7)$$

Όπου : ρ η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του μέσου, $4\pi r^2$ η επιφάνεια της ισοδυναμικής σφαίρας, r η απόσταση του εκάστοτε σημείου από το κέντρο C1.

2.3.2. Ηλεκτρόδιο Ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο



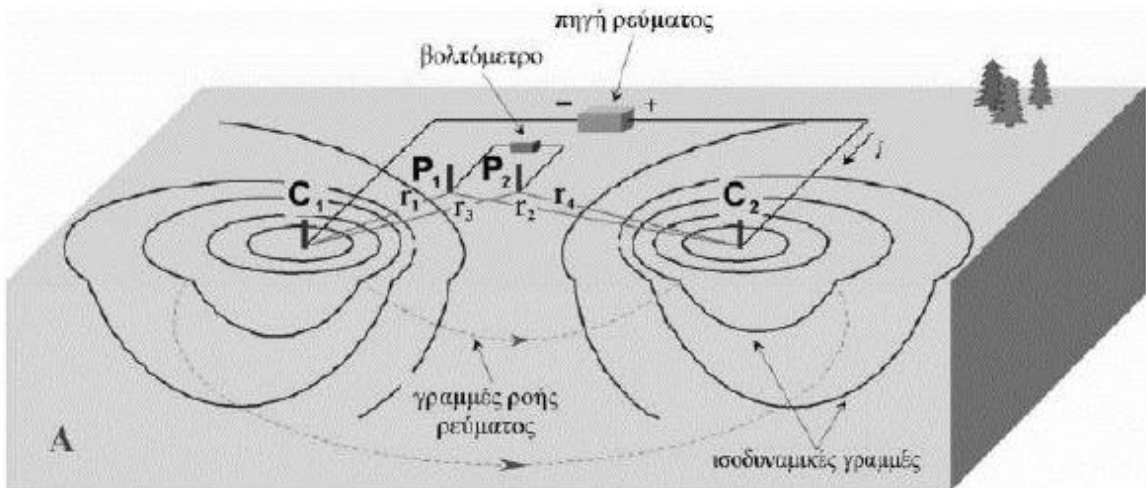
Εικόνα 2.4 : Ηλεκτρόδιο ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο (Αποστολόπουλος 2015).

Σε αντίθεση με έναν άπειρο ομογενή χώρο, τοποθετούμε και τα δύο ηλεκτρόδια C_1, C_2 στην επιφάνεια αλλά σε αρκετά μεγάλη απόσταση ώστε η διαφορά δυναμικού να είναι αμελητέα και συνδέονται με ηλεκτρική πηγή. Οι γραμμές ρεύματος όπως και στο άπειρο ομογενές μέσο είναι ακτινικές αλλά οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι ομόκεντρα ημισφαίρια. Η διαφορά στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του μέσου και της διαφοράς δυναμικού είναι ότι η επιφάνεια του ημισφαιρικού χώρου είναι $A=2\pi r^2$, άρα η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τον τύπο :

$$\rho = \frac{V \times 2 \times \pi \times r}{I} \quad (2.8)$$

2.3.3. Ηλεκτρόδια Ρεύματος και διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια ημιάπειρου χώρου

Εάν τα δύο ηλεκτρόδια C_1, C_2 τοποθετηθούν σε πεπερασμένη απόσταση μεταξύ τους, τότε το δυναμικό σε κοντινό σημείο της επιφάνειας επηρεάζεται και από τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος.



Εικόνα 2.5 : Ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια ημιάπειρου χώρου (Αποστολόπουλος 2015).

Στην περίπτωση αυτή η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τον εξής τύπο :

$$\rho = \frac{k \times \Delta V}{I} \quad (2.9)$$

Όπου k : ο γεωμετρικός παράγοντας που εξαρτάται από τις σχετικές θέσεις των ηλεκτροδίων C₁, C₂

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}} \quad (2.10)$$

2.3.4. Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση

Σε ομογενές και ισότροπο μέσο, η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση από τη **Σχέση (2.9)** θα είναι σταθερή και ανεξάρτητη των σχετικών θέσεων των τεσσάρων ηλεκτροδίων και θα ισούται με την ειδική αντίσταση του μέσου.

Σε ανομοιογενές όμως μέσο, η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση με τη **Σχέση (2.9)** ποικίλει ανάλογα με τις σχετικές θέσεις των ηλεκτροδίων και λέγεται φαινόμενη ειδική αντίσταση.

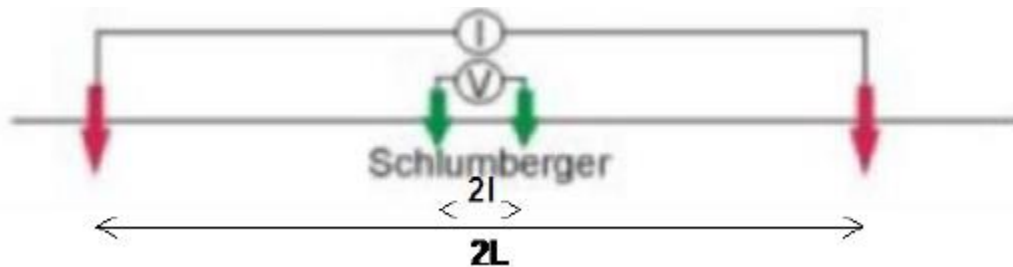
Η φαινόμενη ειδική αντίσταση που μετράμε $\{\rho_a = k * (\Delta V/I)\}$ για κάθε θέση ή/και διεύθυνση της διάταξης ηλεκτροδίων, δεν είναι αντιπροσωπευτική ούτε της πραγματικής ειδικής αντίστασης μέρους του υπεδάφους, ούτε μιας μέσης τιμής των πραγματικών ειδικών αντιστάσεων των διαφόρων μέσων του υπεδάφους.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

2.4. Διατάξεις Ηλεκτροδίων

Με την μέθοδο της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης διέρχεται ρεύμα στο υπέδαφος μέσω των ηλεκτροδίων ρεύματος και η διαφορά δυναμικού μετρείται στα ηλεκτρόδια δυναμικού. Η διάταξη των ηλεκτροδίων εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο της έρευνας αλλά και το σκοπό της. Οι διατάξεις ηλεκτροδίων είναι οι παρακάτω :

- Διάταξη Schlumberger : Τα ηλεκτρόδια της διάταξης είναι συμμετρικά ως προς το κέντρο της απέχοντας απόσταση L (ηλεκτρόδια ρεύματος) και l (ηλεκτρόδια δυναμικού). Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο :

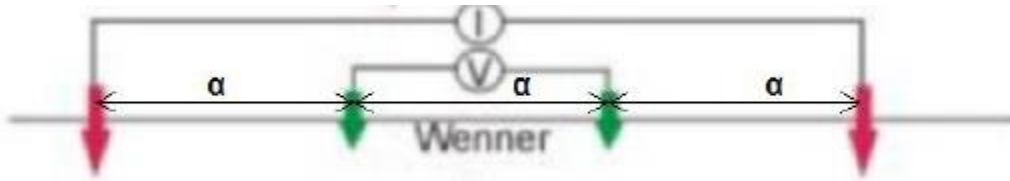
$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V \times \pi \times (L^2 - l^2)}{I \times 2 \times l} \quad (2.11)$$



Εικόνα 2.6 : Διάταξη Schlumberger (Αποστολόπουλος 2015).

- Διάταξη Wenner : Η απόσταση όλων των ηλεκτροδίων είναι σταθερή μεταξύ τους και ισούται με a . Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

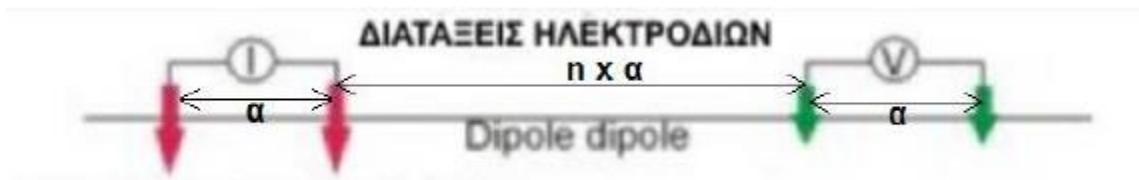
$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V \times \pi \times 2 \times a}{I} \quad (2.12)$$



Εικόνα 2.7 : Διάταξη Wenner (Αποστολόπουλος 2015).

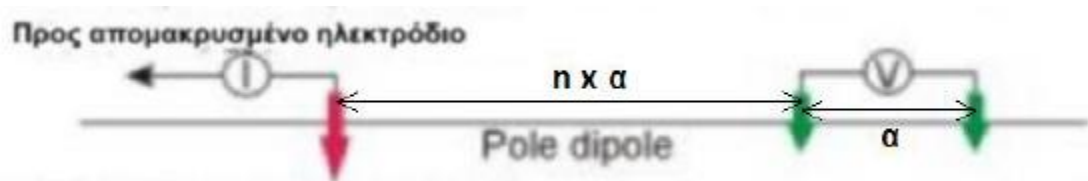
- Διάταξη Dipole – Dipole : Στη συγκεκριμένη διάταξη τα ηλεκτρόδια δυναμικού απέχουν μεταξύ τους απόσταση a , όση απέχουν και τα ηλεκτρόδια ρεύματος. Όσον αφορά τα δίπολα, αυτά απέχουν μεταξύ πολλαπλάσια απόσταση a . Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V \times \pi \times n \times a \times (n+1) \times (n+2)}{I} \quad (2.12)$$



Εικόνα 2.8 : Διάταξη Dipole – Dipole (Αποστολόπουλος 2015).

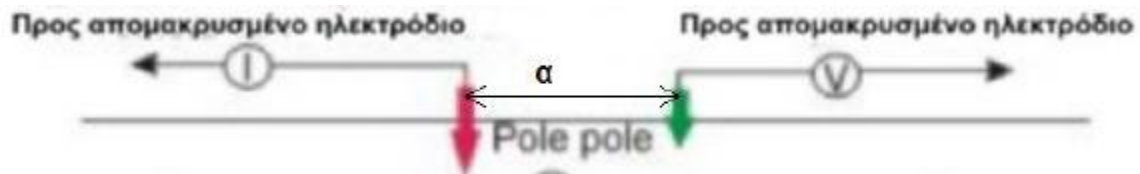
- Διάταξη Pole – Dipole : Τα ηλεκτρόδια δυναμικού απέχουν μεταξύ τους απόσταση a , ενώ το ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος βρίσκεται σε απόσταση πολλαπλάσια του a και το άλλο βρίσκεται σε πολύ απομακρυσμένο σημείο.



Εικόνα 2.9 : Διάταξη Pole – Dipole (Αποστολόπουλος 2015).

- Διάταξη Pole – Pole : Ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχουν απόσταση α , ενώ τα άλλα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού απέχουν πολύ μεγάλη απόσταση από τα δύο κοντινά ηλεκτρόδια. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V \times \pi \times 2 \times \alpha}{I} \quad (2.12)$$

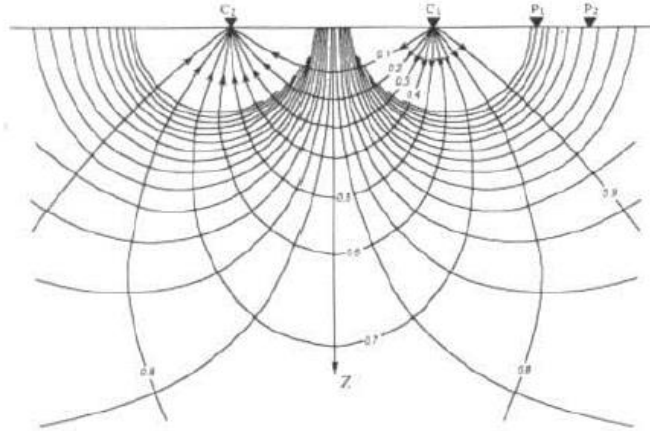


Εικόνα 2.10 : Διάταξη Pole – Pole (Αποστολόπουλος 2015).

2.4.1. Κατανομή Ρεύματος και Δυναμικού εντός Ομογενούς Υπεδάφους

Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή των ρευματικών και δυναμικών γραμμών για δύο ηλεκτρόδια ρεύματος στην επιφάνεια ομογενούς υπεδάφους. Το κλάσμα του ολικού ρεύματος που περνάει από βάθος z_1 δίνεται παρακάτω:

$$\frac{I_x}{I} = 1 - \frac{2}{\pi} \times \tan^{-1} \times \left(\frac{2 \times z_1}{C_1 \times C_2} \right) \quad (2.12)$$



Εικόνα 2.11 : Κατανομή ρευματικών και δυναμικών γραμμών (Αποστολόπουλος 2015).

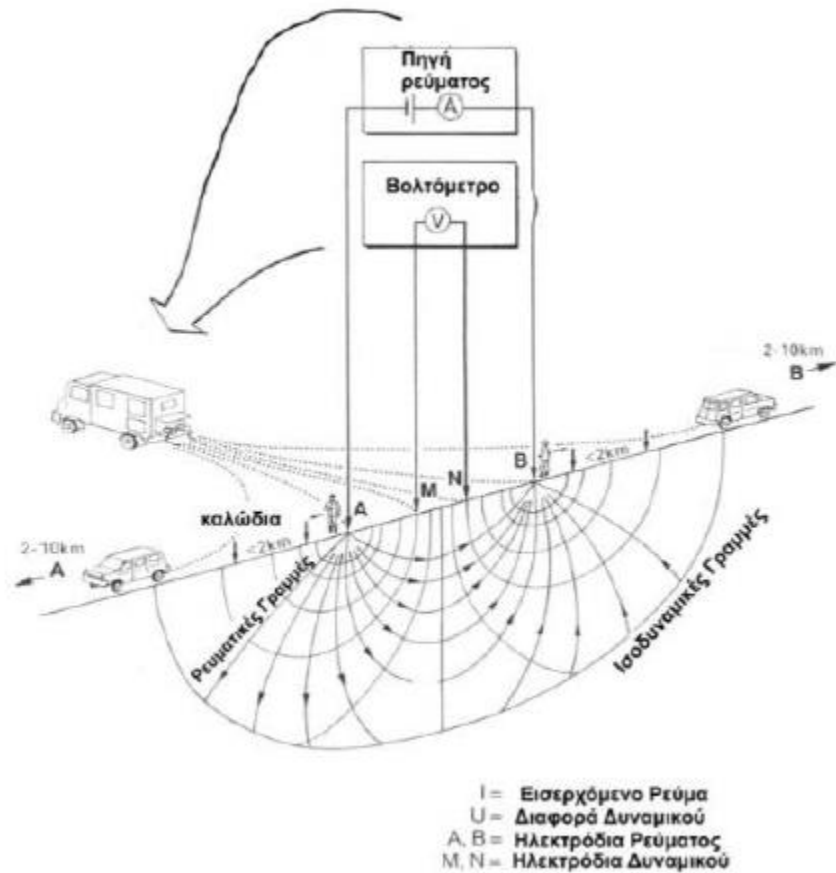
2.5.Εξοπλισμός Υπαίθρου

Για την εκπόνηση των μετρήσεων χρειαζόμαστε μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο διαβιβάζει μέσω των ηλεκτροδίων ηλεκτρικό ρεύμα ελεγχόμενης έντασης, ένα κύκλωμα δυναμικού το οποίο μετρά την πτώση τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού και τα απαραίτητα καλώδια και ηλεκτρόδια για την πλήρη κάλυψη του πεδίου μετρήσεων. Για τα βέλτιστα αποτελέσματα τα προαναφερθέντα κυκλώματα θα πρέπει να είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Ο απολύτως απαραίτητος εξοπλισμός που απαιτείται για τη μέτρηση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι ο ακόλουθος :

- ❖ Πηγή ηλεκτρικού ρεύματος και Αμπερόμετρο : Μέχρι 1 Ampere χρησιμοποιούμε συσσωρευτές, ενώ για ρεύμα μεγαλύτερης έντασης γεννήτριες.
- ❖ Βολτόμετρο : Υψηλής αντίστασης εισόδου (>10MΩ) για ακρίβειες από Mv ως V.

- ❖ Όργανο επιλογής της χρησιμοποιούμενης διάταξης
- ❖ Όργανο ρύθμισης της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού : Μεταξύ των καλωδίων δυναμικού και του οργάνου επιλογής της κατάλληλης διάταξης, παρεμβάλλεται ένας διακόπτης, ο οποίος ρυθμίζει την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού για την οποία πραγματοποιείται η μέτρηση.
- ❖ Καλώδια σε καρούλια
- ❖ Ηλεκτρόδια



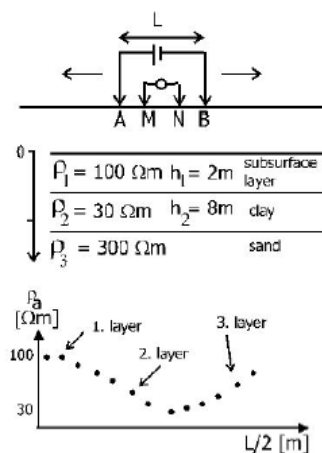
Εικόνα 2.12 : Διάταξη οργάνων και καλωδίων στην ύπαιθρο (Αποστολόπουλος 2015)

2.6. Μετρήσεις και Τεχνικές Υπαίθρου

Το βάθος ανίχνευσης εξαρτάται κυρίως από την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος (A , B στο **Εικόνα 2.10**). Όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ τους τόσο βαθύτεροι εδαφικοί σχηματισμοί διαρρέονται από το ηλεκτρικό ρεύμα και η πτώση τάσης στα ηλεκτρόδια δυναμικού (M , N στο **Εικόνα 2.10**) αφορά βαθύτερες ισοδυναμικές επιφάνειες και τα δύο επηρεάζουν την τελική τιμή της φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης. Οι δύο κύριες τεχνικές με τις οποίες εφαρμόζεται η μέθοδος της ειδικής αντίστασης είναι οι *ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις (Vertical Electrical Soundings ή VES)* και οι *οριζόντιες ηλεκτρικές χαρτογραφήσεις (Resistivity Profiling)*.

2.6.1. Ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις

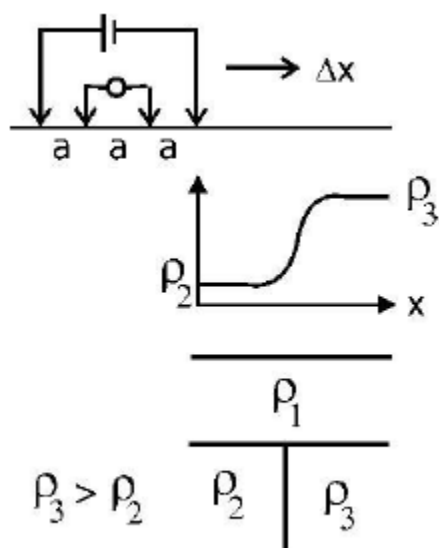
Στις ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων αυξάνουν σε μεγαλύτερες διαδοχικά αποστάσεις συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης τους . Η αύξηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ημισφαιρικού χώρου διασκόπησης επιτρέποντας μας να δούμε όλο και βαθύτερους εδαφικούς σχηματισμούς, και την εναλλαγή στρωμάτων σε σχέση με το βάθος που προκύπτουν από τις διαφορετικές τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης.



Εικόνα 2.13 : Ηλεκτρική βυθοσκόπηση – Διάταξη Schlumberger (Αποστολόπουλος 2015).

2.6.2.Οριζόντιες Ηλεκτρικές Χαρτογραφήσεις

Στην περίπτωση των οριζόντιων ηλεκτρικών χαρτογραφήσεων η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων παραμένει σταθερή και μετακινείται ολόκληρη η διάταξη. Ο σκοπός των οριζόντιων ηλεκτρικών χαρτογραφήσεων είναι η πλευρική σάρωση μίας ζώνης συγκεκριμένου πάχους για να μελετήσουμε τη πλευρική διαφοροποίηση του υλικού της ζώνης από τη μελέτη της οριζόντιας μεταβολής της ειδικής αντίστασης, δηλαδή την μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης κατά μήκος ενός σχηματισμού σε περίπου σταθερό βάθος.



Εικόνα 2.14 : Οριζόντια ηλεκτρική χαρτογράφηση – Διάταξη Wenner (Αποστολόπουλος 2015).

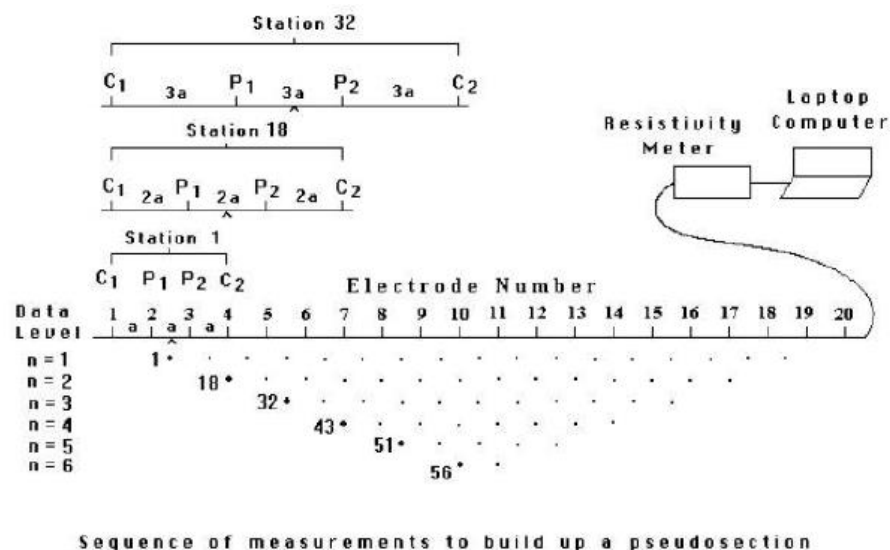
2.6.3.Μέθοδος Διδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας

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

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

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

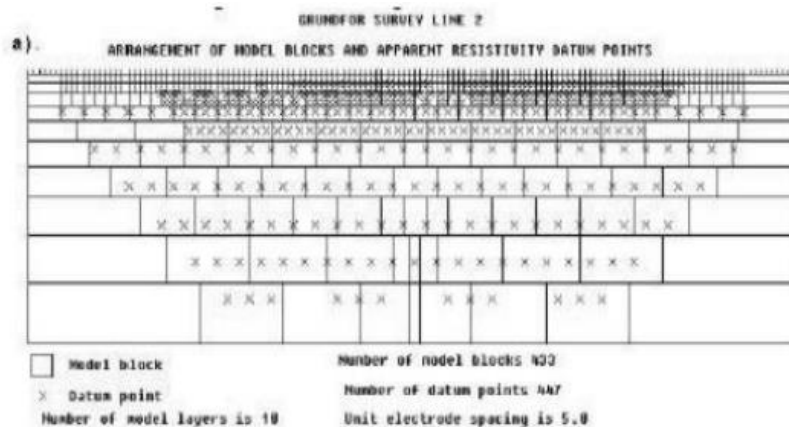
Η δισδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία απαιτεί την καταγραφή δεδομένων με πολλές διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων, κατά μήκος μιας γραμμής. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει μια αρκετά πυκνή πλευρική κάλυψη, από πλευράς λήψης δεδομένων, προκειμένου να καταστεί εφικτή η ανίχνευση πολύπλοκων δομών του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



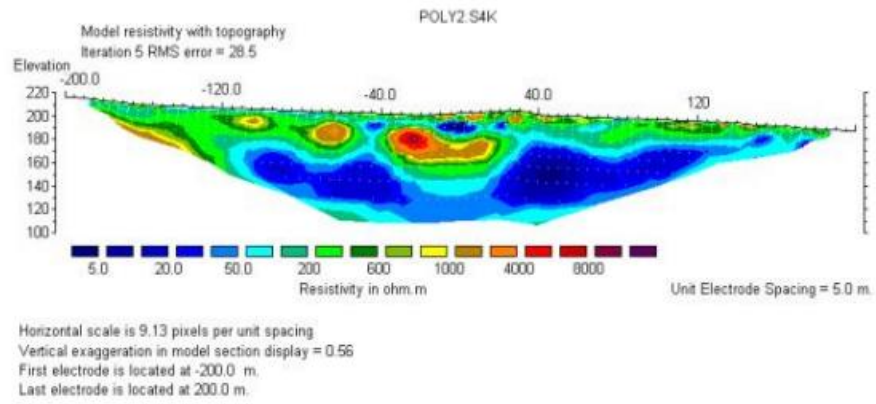
Εικόνα 2.15 : Δισδιάστατη γεωηλεκτρική τομογραφία, διάταξη ηλεκτροδίων και σειρά μετρήσεων (Αποστολόπουλος 2015).

Οι μεγάλες ποσότητες δεδομένων, οι οποίες παράγονται από τα συστήματα αυτά, απαιτούν με τη σειρά τους, αυτοματοποιημένο χειρισμό και επεξεργασία των δεδομένων. Αυτόματες αριθμητικές τεχνικές αντίστροφης δημιουργίας μοντέλων, οι οποίες βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων για τους ευθείς υπολογισμούς, έχουν αναπτυχθεί για να καλύψουν την ανάγκη αυτή.

Με τις τεχνικές αυτές, το υπέδαφος χωρίζεται σε κελιά σταθερών διαστάσεων, το μέγεθος των οποίων συνήθως αυξάνει με το βάθος (Εικόνα 2.15). Οι ειδικές ηλεκτρικές τους αντιστάσεις προσαρμόζονται, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, έως ότου επιτευχθεί μια αποδεκτή συμφωνία ανάμεσα στα δεδομένα εισόδου και την απόκριση του μοντέλου (Εικόνα 2.16). Όσον αφορά στην τοπογραφία, αυτή αντιμετωπίζεται είτε με διορθώσεις, δηλαδή μετατροπή των δεδομένων πριν και μετά την αντιστροφή, είτε με απευθείας εισαγωγή της στο πλέγμα.



Εικόνα 2.16 : Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους διςδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τη βοήθεια προεπιλεγμένου αλγορίθμου (Αποστολόπουλος 2015).



Εικόνα 2.17 : Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων (Αποστολόπουλος 2015).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

3. Εφαρμογές Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας σε Παράκτιες Περιοχές

3.1.Εφαρμογές ERT στην περιοχή Μπαζιλικάτα(Basilicata) της Νότιας Ιταλίας με σκοπο τον χαρακτηρισμό διείσδυσης θαλασσινού νερού κατά μήκος της ακτογραμμής.

(A. Satriani, A. Loperte and M. Proto)

3.1.1.Σκοπός της έρευνας

Η παράκτιες περιοχές είναι πολύ συχνά υποκειμένες σε ανεπανόρθωτη αλλοίωση από φαινόμενα όπως η παραθαλάσσια διάβρωση, πλημμύρες προερχόμενες από ποταμούς, παλιρροιακά κύματα και μόλυνση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Δυστυχώς το υπέδαφος σε παραθαλάσσιες περιοχές διεισδύεται τακτικά από θαλασσινό νερό με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης αλάτων στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα και την δημιουργία μίας ζώνης υφαλμύρισης. Η έκταση του φαινομένου εξαρτάται από την γεωμορφολογία και την τεκτονική δομή της εκάστοτε περιοχής, την υδρογεωλογία και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα. Η ηλεκτρική τομογραφία μας δίνει μια λεπτομερή εικόνα των ηλεκτρικών ειδικών αντιστάσεων του υπεδάφους που μας επιτρέπει τον χαρακτηρισμό της έκτασης μίας ζώνης υφαλμύρισης όπως και τον βαθμό της μόλυνσης του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα.

Η συγκεκριμένη έρευνα πραγματοποιήθηκε στην περιοχή Μπαζιλικάτα της Ιταλία κατά μήκος της ακτογραμμής του Ιονίου πελάγους. Η διείσδυση της θάλασσας στο υπέδαφος έχει δημιουργήσει σοβαρά οικολογικά και περιβαλλοντικά προβλήματα. Συγκεκριμένα η μόλυνση του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα από το θαλασσινό νερό έχει μειώσει το διαθέσιμο νερό για ιδιωτική και αγροτική χρήση, όπως και προκαλεί μείωση της γονιμότητας του εδάφους λόγω αύξησης της αλατότητας του.

Το αποτέλεσμα είναι η μείωση των αποθεμάτων νερού σε όλη την τοπική ακτογραμμή και ταυτοχρόνως την ερημοποίηση (desertification) και υποβάθμιση του εδάφους. Η εφαρμογή και τα αποτελέσματα της ERT θα συνεισφέρουν στον χαρακτηρισμό του βαθμού και της έκτασης του προβλήματος.

3.1.2.Γεωμορφολογία της περιοχής

Η υπό έρευνα περιοχή (Εικόνα 3.1) βρίσκεται στην ακτογραμμή της περιοχής Μπαζιλικάτα στο Ιόνιο πέλαγος μεταξύ της εκβολής των ποταμών Sinni και Bradano , από την Δυτική και Ανατολική πλευρά αντιστοίχως. Όσον αφορά το γεωλογικό υπόβαθρο, η περιοχή βρίσκεται εντός του βυθίσματος του ποταμού Bradano και περικλείεται από ασβεστόλιθους του παράκτιου τμήματος της περιοχής Matera από την Βορριο-Ανατολική πλευρά, ενώ στην Νοτιο-Δυτική πλευρά εντοπίζονται κλαστικά ιζήματα στα Απένινα όρη.



Εικόνα 3.1 : Περιοχή έρευνας, Μπαζιλικάτα, Ιταλία



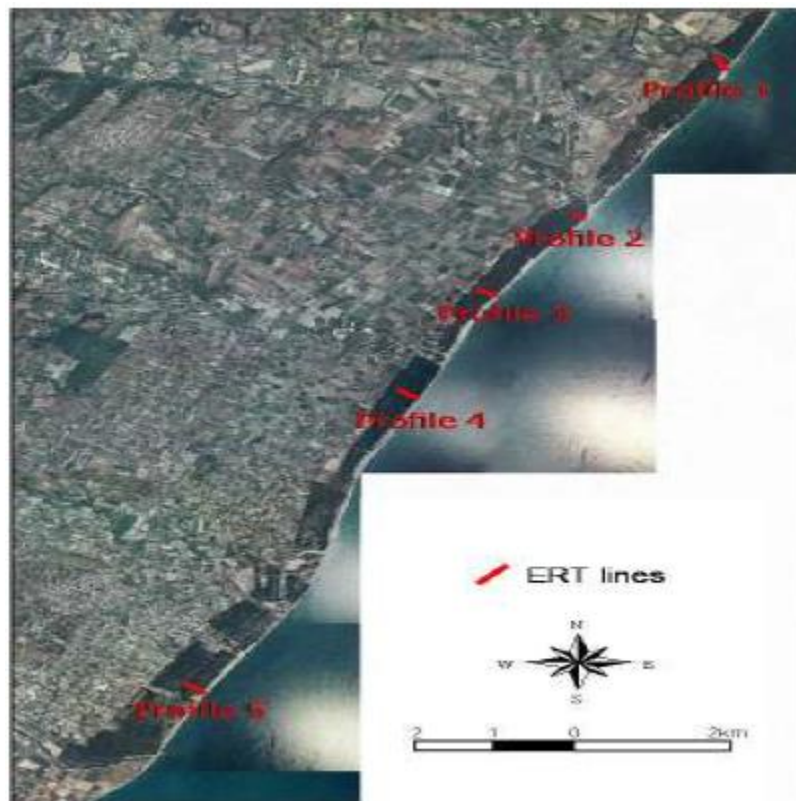
Εικόνα 3.2 : Γεωλογικός χάρτης της υπό έρευνα περιοχής.

Το βύθισμα είναι πληρωμένο με ιζήματα που εκτείνονται 2–3 χιλιόμετρα, τα οποία αποτελούνται από γεωλογικούς σχηματισμούς όπως διακρίνονται στον παραπάνω γεωλογικό χάρτη (Εικόνα 3.2). Λεπτομερώς :

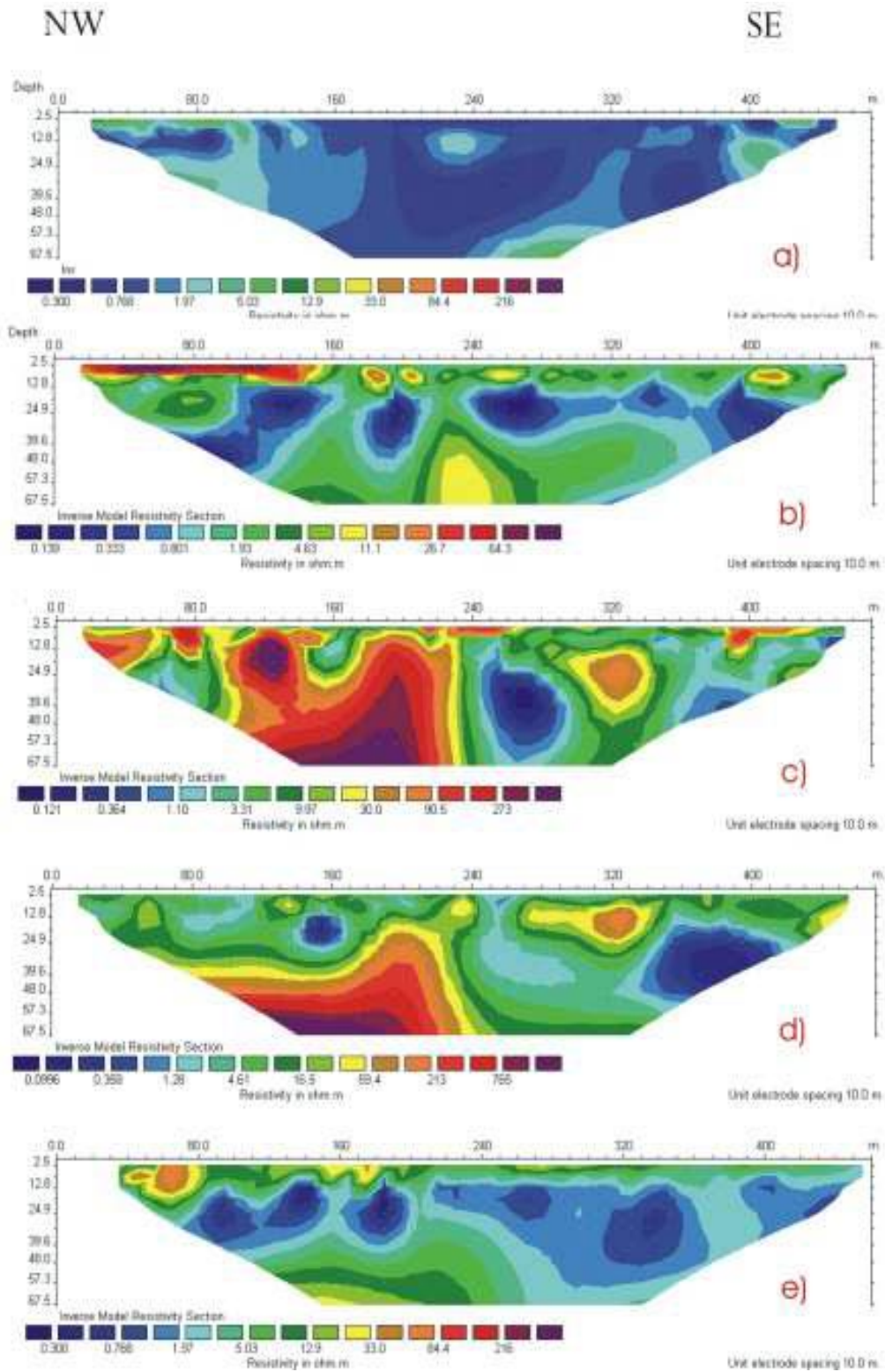
1. Παραλιακές αποθέσεις αποτελούμενες κυρίως από αμμώδης σχηματισμούς 10-100m σε πλάτος και αμμοχάλικες στην περιοχή του ποταμού Sinni.
2. Αλλούβιες αποθέσεις πλησίον των ποταμών και των εκβολών τους πάχους περισσότερο των 60m κυρίως αργιλικών υλικών και στρώσεων από άμμο.
3. Αποθέσεις της θαλάσσιας αναβαθμίδας αποτελούμενες κυρίως από κροκαλοπαγή, άμμο και λάσπη.
4. Αργιλικά υλικά.
5. Όρια στα οποία διακρίνεται ο γκρεμός της θαλάσσιας αναβαθμίδας.

3.1.3.Γεωηλεκτρική τομογραφία της περιοχής

Στο διάστημα μεταξύ Ιουνίου-Ιουλίου του 2010, διεκπεραιώθηκαν ηλεκτρικές τομογραφίες με διάταξη Wenner-Schlumberger, 48 ηλεκτροδίων με 10m απόσταση μεταξύ τους για την ανακατασκευή της γεωμετρίας του μετώπου διείσδυσης του θαλασσινού νερού. Η διάταξη Wenner-Schlumberger δίνουν καλή οριζόντια αλλά και κατακόρυφη ανάλυση και για την απόκτηση 2D μοντέλων ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της αντιστροφής μέσω του αλγορίθμου RES2DINV. Για να βρεθεί το επίπεδο της αλατότητας στην υπό έρευνα περιοχή πραγματοποιήθηκαν 5 γεωηλεκτρικές τομές κάθετες ως προς την ακτογραμμή μεταξύ των ποταμών Agri και Bradano.



Εικόνα 3.3 : Χάρτης τομών ERT



Εικόνα 3.4 : 2D Γεωηλεκτρικές τομές της περιοχής, οι θέσεις τους όπως φαίνονται στην Εικόνα 3.3 είναι : a) προφίλ 1, b) προφίλ 2, c) προφίλ 3, d) προφίλ 4, e) προφίλ 5

3.1.4. Συμπεράσματα

Όπως διακρίνεται από την Εικόνα 3.3 , στην 1^η τομή ERT πλησίον του δέλτα του ποταμού Bradano με διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ, κυριαρχούν τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από 1-10 Ωm(μέχρι και τα 110m). Τιμές χαμηλότερες του 1 Ωm παρατηρούνται κοντά στην ακτογραμμή που προσδίδονται σε στρώσεις οι οποίες είναι κορεσμένες με θαλασσινό νερό. Η 2^η τομή πραγματοποιήθηκε κοντά στην εκροή του ποταμού Basento. Η διείσδυση του θαλασσινού νερού είναι εκτενής και παρατηρούνται τιμές κάτω του 1 Ωm από τα 60m του προφίλ, αλλά υπάρχουν σημεία αρκετά υψηλότερης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης έως και 4 Ωm σε βάθος μεγαλύτερο των 10m και έως 65 Ωm στη ΒΔ πλευρά της τομής, κοντά στην επιφάνεια. Μεταξύ των ποταμών Basento και Cavone, βρίσκεται η 3^η τομή, παράλληλα στην 2^η. Κατευθείαν διακρίνονται τιμές πολύ μεγαλύτερες από τις προηγούμενες τομές, κάτι που υποδεικνύει ότι η διείσδυση της θάλασσας υποχωρεί. Χαμηλές τιμές παραμένουν ακριβώς δίπλα στην ακτογραμμή, αυτό ισχύει και για την 4^η τομή, δίπλα στον ποταμό Cavone, η οποία είναι σχεδόν πανομοιότυπη με την 3^η. Τέλος η 5^η τομή πλησίον της εκροής του Agri και μεταξύ του ποταμού Sinni χαρακτηρίζει εκ νεου την διείσδυση της θάλασσας με τιμές κοντινές των πρώτων δύο προφίλ.

Οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αυξάνονται κυρίως μεταξύ των ποταμών Bradano και Basento, λόγω της διείσδυσης, η οποία είναι λιγότερο κρίσιμη στο επόμενο κομμάτι της ακτογραμμής και επανεμφανίζεται δίπλα στον ποταμό Agri. Τα αποτελέσματα δίνουν μια χαρακτηριστική εικόνα της έκτασης του φαινομένου και αυτό είναι εμφανές και στην επιφάνεια όπου παρατηρείται μειωμένη βλάστηση στα σημεία με χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση, λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης αλάτων που καθιστά δύσκολη την απορρόφηση νερού από τις ρίζες της χλωρίδας εξαιτίας της υψηλής οσμωτικής πίεσης που δημιουργείται.

3.2.Χαρτογράφηση της διείσδυσης θάλασσας με χρήση ERT στη Μαλαισιανή ακτογραμμή.

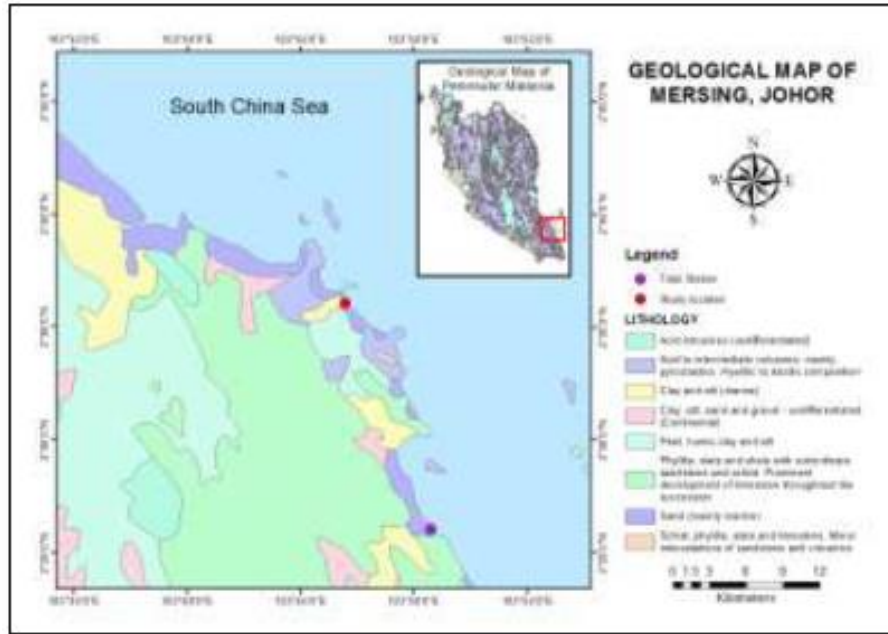
(Z. A. M. Hazreek)

3.2.1.Σκοπός της έρευνας

Η διείσδυση της θάλασσας σε υπόγειο υδροφορέα μπορεί να προκαλέσει πληθώρα προβλημάτων, από τη μείωση της παραγωγικότητας στην γεωργία και στην κτηνοτροφία, την ελάττωση των αποθεμάτων πόσιμου νερού, έως και την διάβρωση θεμελίων λόγω της υψηλής συγκέντρωσης αλάτων. Η κατανάλωση νερού που έχει αναμειχθεί μαζί με θαλασσίνο νερό μπορεί να και επιφέρει προβλήματα υγείας όπως αφυδάτωση και διάφορες νεφρικές δυσλειτουργίες. Μια συνηθισμένη προσέγγιση του προβλήματος του εντοπισμού της διείσδυσης είναι οι γεωτρήσεις, αλλά λόγω χαμηλότερου κόστους και ταχύτερης απόκτησης δεδομένων, επιλέχθηκε η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για την λύση του προβλήματος.

3.2.2.Περιγραφή του πεδίου έρευνας και γεωμορφολογία

Η περιοχή εντοπίζεται στην Ανατολική ακτή του κρατιδίου Johor της Μαλαισίας. Οι συντεταγμένες του πεδίου είναι 2°36'4.78»N, 103°46'57.24»E στον παραλιακό δρόμο του Jalan Penyabong περίπου 26km από την πόλη Mersing. Το ανάγλυφο της περιοχής είναι πολύ ήπιο και η πρόσβαση δεν αποτελεί πρόβλημα και είναι εύκολη με όλα τα μεταφορικά μέσα. Η Ανατολική ακτή του Johor χαρακτηρίζεται από ιζήματα της Τεταρτογενούς(Quaternary) περιόδου, τα οποία βρίσκονται από την πόλη Telok Ramunia έως και την Endau. Ανάμεσα στις πόλεις Mersing-Endau απαντώνται χαλαρά ιζήματα, κατά μήκος της ακτής σε βάθος έως και 30m. Με βάση τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής, τα ιζήματα είναι κατά βάση άμμος.

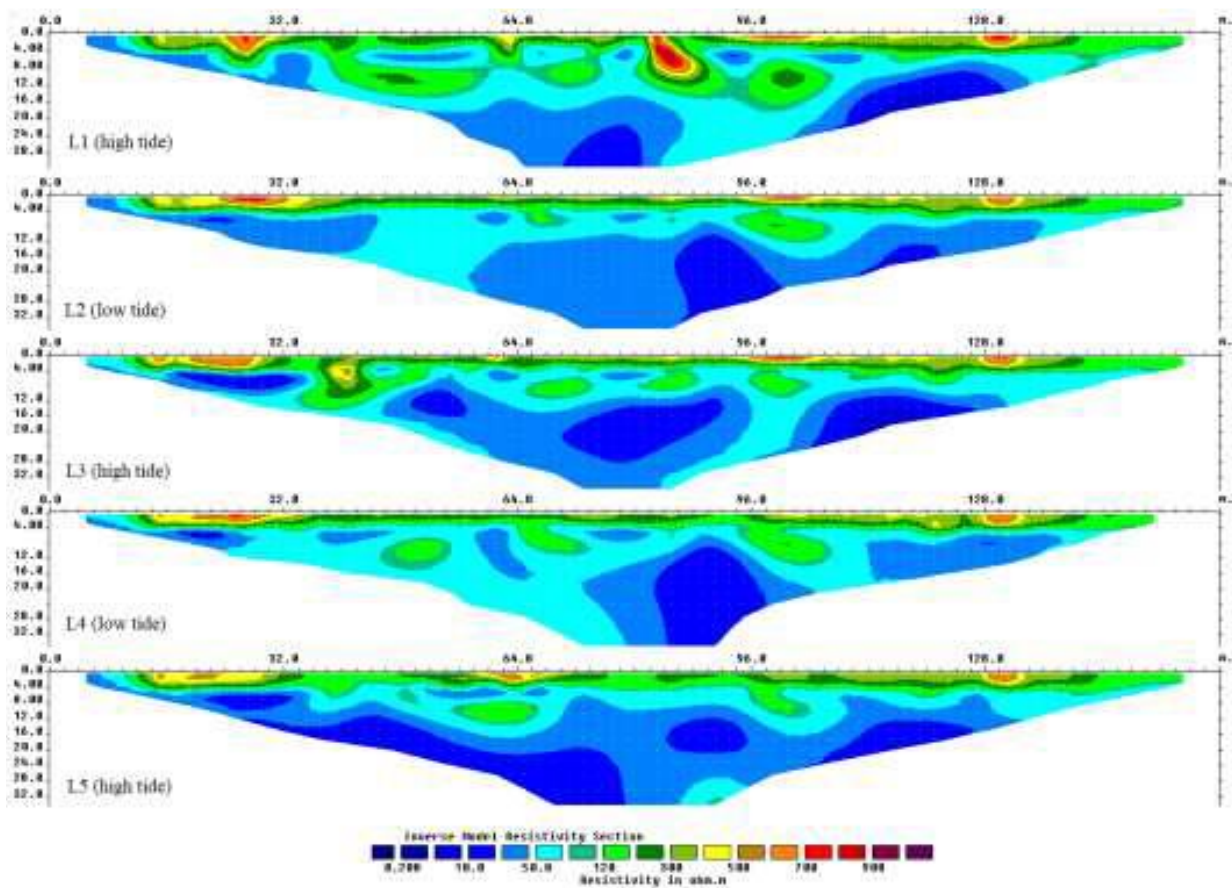


Εικόνα 3.5 : Γεωλογικός χάρτης της περιοχής, 1985

3.2.3.Μεθοδολογία και διαδικασία μετρήσεων

Το Νοέμβριο του 2017 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τη χρήση εξοπλισμού αποτελούμενο από ABEM Terrameter SAS 4000, ABEM Electrode Selector 464, 4 πολύκλινα καλώδια και 61 ηλεκτρόδια από ανοξείδωτο χάλυβα. Το μήκος της εκάστοτε έρευνας ήταν 160m με 2m απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και ικανότητα διασκόπησης έως και 30m σε βάθος. Η διατάξεις Wenner-Schlumberger επιλέχθηκαν λόγω της ανάγκης να εντοπισθούν αλλαγές ως προς το βάθος αλλά και οριζόντια στρώματα. Επίσης χαρακτηρίζεται από αρκετά ικανοποιητική δυνατότητα να εντοπίζει όρια μεταξύ άμμου και αργιλικών υλικών και παρέχει ξεκάθαρη εικόνα υπογείων υδροφορέων και ζωνών διείσδυσης θάλασσας. Ηλεκτρικό ρεύμα έντασης 10-100Ma εισχώρησε στο υπέδαφος μέσω ενός ζεύγους ηλεκτροδίων, η γείωση τους εγκαταστάθηκε σχολαστικά ώστε να αποφευχθούν προβλήματα κατά την διάρκεια της διείσδυσης του ρεύματος. Για την λήψη δεδομένων αρκετά ηλεκτρόδια έπρεπε να βραχούν, λόγω του ζεστού και ξηρού κλίματος, ώστε να διευκολύνεται η μετάδοση του ρεύματος στο υπέδαφος.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με βάση τις ώρες που παρουσιάζονται η πλήμμη (high tide) και η ρηχία (low tide). Η πρώτη μέτρηση (L1) διεκπεραιώθηκε στις 20:11 κατά την διάρκεια της πλήμμης, Η 2^η (L2) στις 02:08 κατά την διάρκεια της ρηχίας, η 3^η στις 07:55 (πλήμμη), η 4^η στις 14:18 (ρηχία) και η τελευταία μέτρηση έγινε στις 20:57, κατά την πλήμμη. Η ανάλυση των δεδομένων έγινε με τη χρήση του προγράμματος RES2DINV και τη μέθοδο της αντιστροφής, ώστε να προκύψει το προφίλ της διεύθυνσης στο υπέδαφος.



Εικόνα 3.6 : Σειρά ηλεκτρικών χαρτογραφήσεων L1-L5 (Σημειώνεται ότι το σημείο 0m είναι η θάλασσα).

Τιμή μέτρησης (Ωm)	Υλικό	Χρώμα στο inverse μοντέλο
< 5 Ωm	Θαλασσινό νερό	Σκούρο μπλε
5-15 Ωm	Υφάλμυρο νερό	Μπλε
50-100 Ωm	Νερό υδροφορέα	Τιρκουάζ-πράσινο
>400 Ωm	Βραχώδες υπόβαθρο	Κίτρινο-κόκκινο

Πίνακας 3 : Ερμηνεία των υλικών του υπεδάφους της υπό έρευνα περιοχής.

Οι μετρήσεις L1, L3, L5 πραγματοποιήθηκαν όταν η στάθμη της θάλασσας βρισκόταν στο ύψιστο σημείο με αποτέλεσμα να παρατηρούνται μειωμένες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και αυξημένη παρουσία θαλασσινού νερού στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, λόγω της ώθησης του αλμυρού νερού από τις υπερκείμενες παλιρροιακές κινήσεις. Η διείσδυση της θάλασσας φτάνει έως και τα 124m από την ακτή και σε μέγιστο βάθος 12m. Εμφανές είναι ότι τα προφίλ του υπεδάφους κυριαρχούνται σχεδόν ολοκληρωτικά από θαλασσινό(σκούρο μπλε χρώμα) και υφάλμυρο (μπλε χρώμα) νερό, με εξαίρεση την παρουσία κάποιων φακών καθαρού (τιρκουάζ-πράσινο χρώμα) νερού του υδροφορέα.

3.2.4. Συμπεράσματα

Η εφαρμογή της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την βοήθεια λογισμικού μοντελοποίησης δεδομένων, είναι μία μη-καταστροφική λύση για τον χαρακτηρισμό του υπεδάφους, τον εντοπισμό διείσδυσης θαλασσινού νερού σε υδροφόρους ορίζοντες και τον εντοπισμό ζωνών υφαλμύρισης. Το χαμηλό κόστος και η γρήγορη λήψη μετρήσεων και η πολλαπλές μετρήσεις σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα την καθιστούν την πρωταρχική επιλογή ειδικά όταν απαιτείται ο εντοπισμός κινήσεων θαλασσινού νερού σε ελευθέρου τύπου υδροφορέα.

3.3.Μετρήσεις ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε διάφορες περιοχές της Σαουδικής Αραβίας για την εγκατάσταση γείωσης.

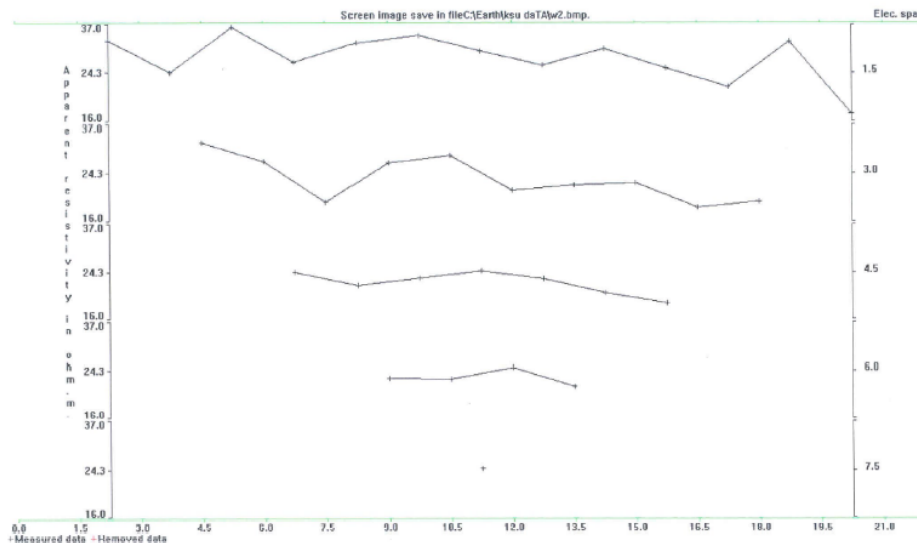
(N.H. Malik)

3.3.1.Σκοπός της έρευνας

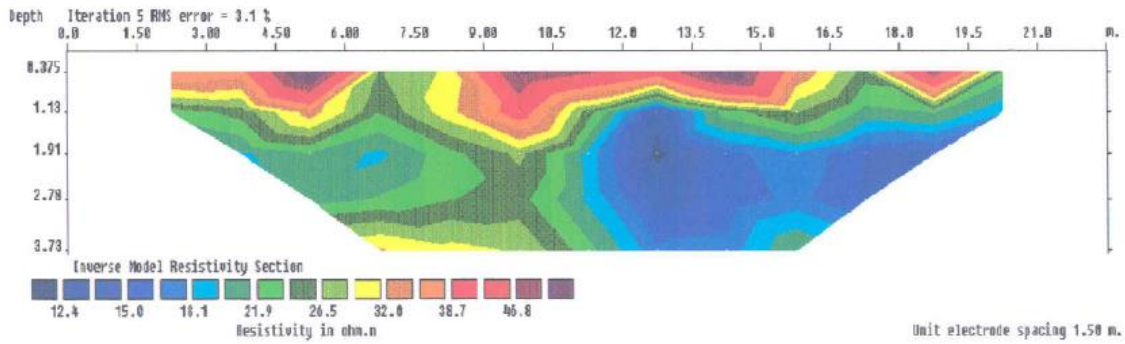
Οι ηλεκτροπαραγωγικοί σταθμοί και τα συστήματα παροχής ηλεκτρικού ρεύματος είναι γειωμένα ώστε να πληρούν τις προϋποθέσεις ασφαλείας για το προσωπικό, και για την περαιτέρω αύξηση της αξιοπιστίας του εξοπλισμού. Η φύση του εδάφους, συγκεκριμένα η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του, είναι μεγάλης σημασίας όσον αφορά τις επιδόσεις του συστήματος γείωσης. Η συγκεκριμένη έρευνα διεκπεραιώθηκε σε πάνω από 40 τοποθεσίες στην Σαουδική Αραβία, ώστε να εντοπισθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν τις επιδόσεις μίας εγκατάστασης γείωσης, και τις ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιηθούν εφόσον η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους είναι πιο υψηλή από τα επιθυμητά όρια. Οι ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις του εδάφους και των πετρωμάτων ποικίλουν δραματικά από περιοχή σε περιοχή και σπάνια παραμένουν σταθερές οριζοντίως ή καθέτως στην περιοχή ενδιαφέροντος. Αυτό καθιστά τη δημιουργία μοντέλων και πρόβλεψης της αύξησης του γήινου δυναμικού αρκετά δύσκολη διαδικασία. Παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι : ο τύπος του εδάφους, η χημική σύσταση του, η κοκκομετρία, η ύπαρξη και η συγκέντρωση αλάτων, το ποσοστό υγρασίας του, η θερμοκρασία περιβάλλοντος στην περιοχή καθώς και η διακύμανση της ανάλογα με τις εποχές, και τέλος η πίεση. Στην Σαουδική Αραβία υπάρχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις στην γεωλογία και ως αποτέλεσμα διαφορετικοί τύποι εδαφών με ανόμοιες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Συνεπώς υπάρχει ανάγκη να πραγματοποιηθούν μετρήσεις για τον προσδιορισμό των αναγκαίων δεδομένων με σκοπό τον σχεδιασμό και την εγκατάσταση συστημάτων γείωσης.

3.3.2. Μεθοδολογία και διαδικασία μετρήσεων

Η Ηλεκτρική Τομογραφία επιλέχθηκε για τον προσδιορισμό της κατανομής των αντιστάσεων στον υπέδαφος στον οριζόντια αλλά και στον κατακόρυφο άξονα. Μεμονωμένες μετρήσεις σε συγκεκριμένη απόσταση ηλεκτροδίων (διάταξη Wenner) μπορούν να μας δώσουν παραπλανητικά δεδομένα, ως εκ τούτου πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές μετρήσεις με διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ 16 ηλεκτροδίων. Η τομογραφία αρχικά διεκπεραιώθηκε δοκιμαστικά στο πεδίο Riyadh της Σαουδικής Αραβίας, σε μία ευθεία στην οποία τα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν σε προκαθορισμένες θέσεις και συνδέθηκαν με το καλώδιο. Αρχικά πάρθηκαν μετρήσεις με απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων της τάξεως του 1m (π.χ. ηλεκτρόδια 1,2,3,4 και στη συνέχεια 2,3,4,5). Έπειτα το πέρας της μέτρησης σε όλο το μήκος του καλωδίου η απόσταση αυξήθηκε στα 2m χωρίς την επανατοποθέτηση των ηλεκτροδίων αλλά το μηχάνημα επιλέγει αυτόματα διαφορετικές τετράδες ηλεκτροδίων (π.χ. 1,3,5,7 και στη συνέχεια 3,5,7,9). Ύστερα έγινε μέτρηση με απόσταση 3m (π.χ. 1,4,7,10) και τέλος με τη μέγιστη απόσταση 4m (π.χ. 1,5,9,13). Συνεπώς δημιουργήθηκε ένα προφίλ φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης που διαχωρίζει το υπέδαφος σε 5 στρώματα. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των μετρήσεων και εξειδικευμένο λογισμικό αντιστροφής πηγάζει ο 2D χάρτης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

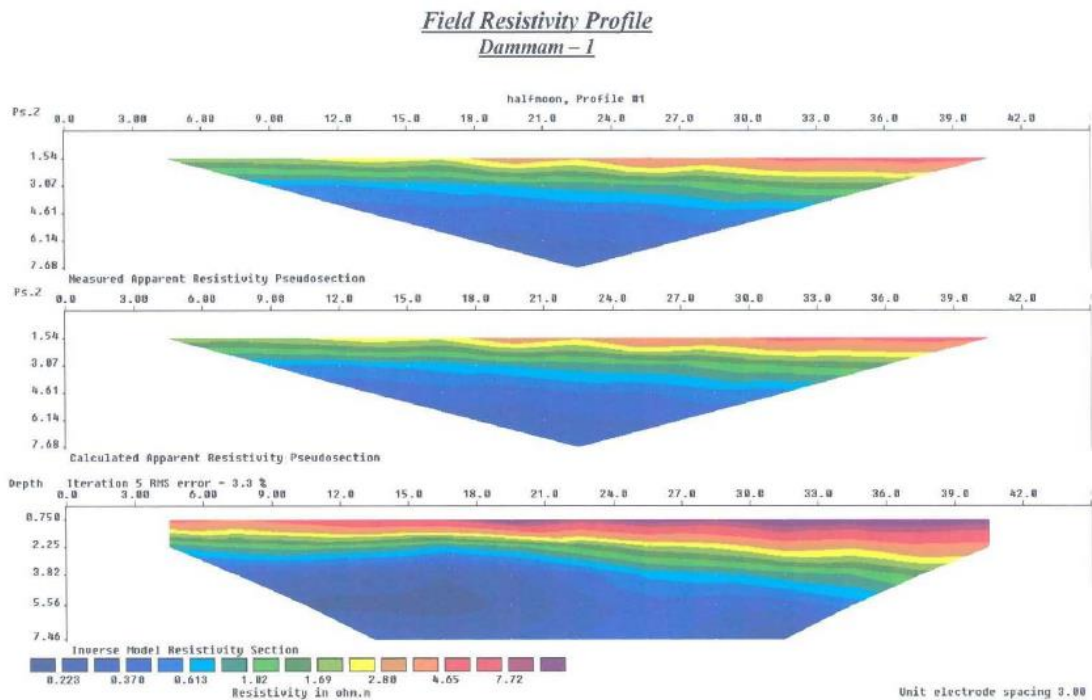


Εικόνα 3.7 : Προφίλ φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης του πεδίου δοκιμών Riyadh



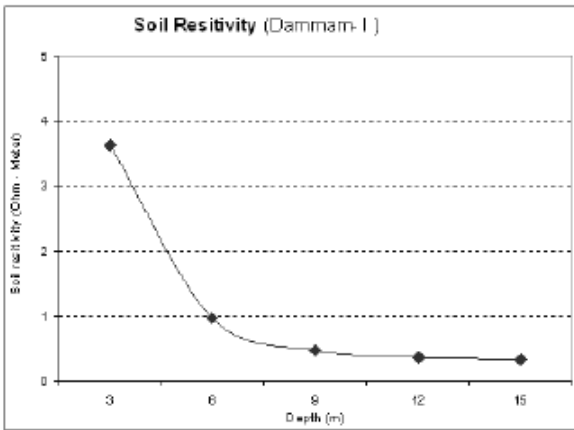
Εικόνα 3.8 : 2D μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του πεδίου δοκιμών Riyadh.

Ύστερα από την εφαρμογή της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο πεδίο δοκιμών πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε 40 τοποθεσίες στην Σαουδική Αραβία. Παρακάτω εξετάζεται το 2D μοντέλο της περιοχής Dammam πλησίον του Περσικού Κόλπου.

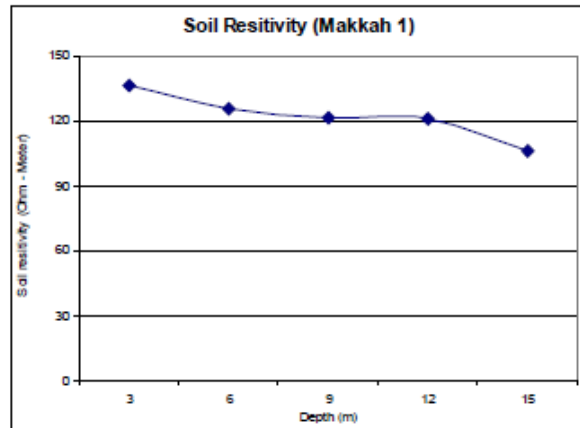


Εικόνα 3.9 : 2D μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του πεδίου Dammam.

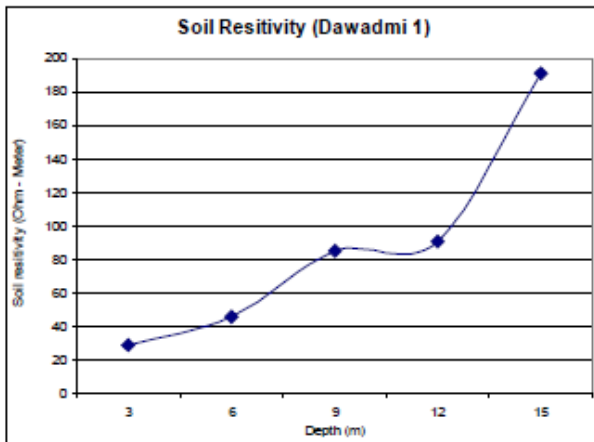
Από το παραπάνω μοντέλο της περιοχής Dammam, η οποία είναι πλησίον της θάλασσας, παρατηρήθηκε ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση μειώνεται δραστικά με την αύξηση του βάθους σε αντίθεση με άλλες περιοχές όπου το βάθος δεν είναι τόσο ισχυρός συντελεστής και η αντίσταση άλλες φορές αυξάνεται, μειώνεται ή δεν επηρεάζεται σε σχέση με αυτό. Αυτό εξαρτάται κυρίως από την γεωλογία της περιοχής.



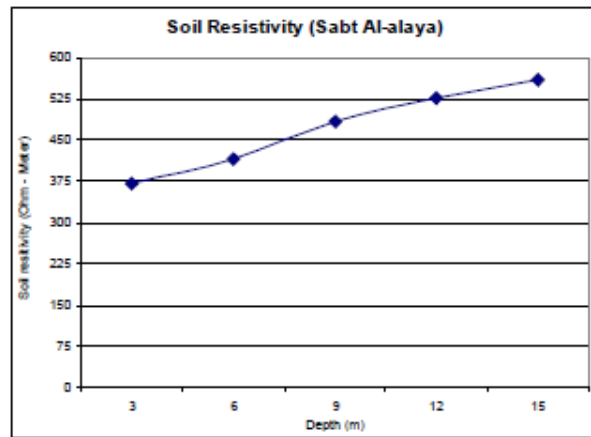
Εικόνα 3.10 : Αντίσταση εδάφους, Dammam



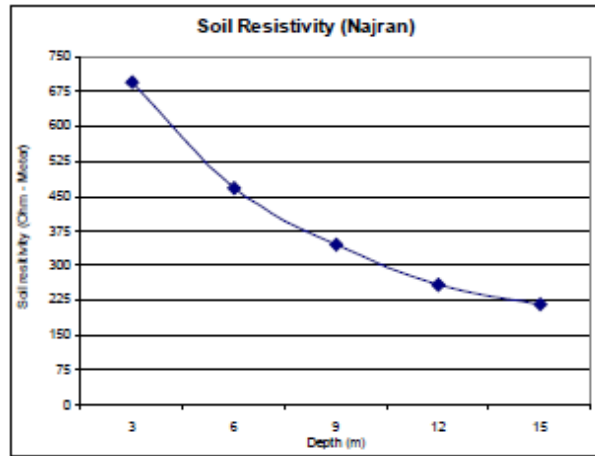
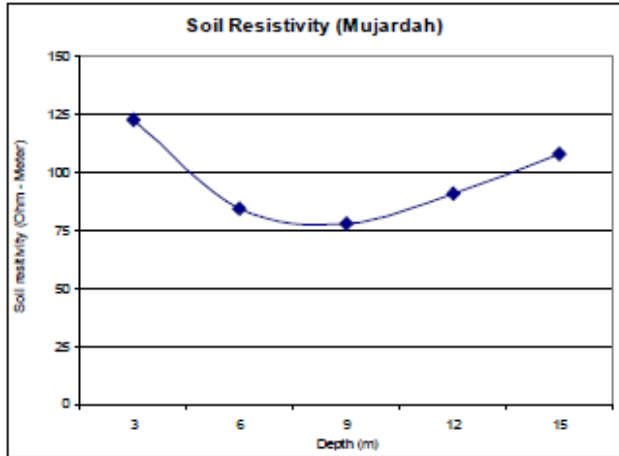
Εικόνα 3.11 : Αντίσταση εδάφους, Makkah



Εικόνα 3.12 : Αντίσταση εδάφους, Dawadmi



Εικόνα 3.13 : Αντίσταση εδάφους, Sabt Al-alaya



Εικόνα 3.14 : Αντίσταση εδάφους, Mujardah

Εικόνα 3.15 : Αντίσταση εδάφους, Najran

Από τις παραπάνω εικόνες διακρίνεται η διαφορά μεταξύ της πτώσης της αντίστασης του εδάφους στην περιοχή Dammam (Εικόνα 3.10) και των υπολοίπων πεδίων στα οποία δεν παρατηρείται κάποια κοινή μεταβολή της αντίστασης σε σχέση με την αύξηση του βάθους.

Καθώς και οι εγκαταστάσεις γειώσεων χρησιμοποιούν ράβδους που εισχωρούν κάθετα στο έδαφος για λίγα μέτρα ερευνήθηκαν οι αντιστάσεις για βάθος 6m. Η μέση τιμή της αντίστασης σε κάποιες περιοχές ήταν χαμηλότερη από 2Ωm ενώ σε άλλες έφτανε πολύ υψηλές τιμές > 10⁶Ωm. Ως εκ τούτου δημιουργήθηκε η ανάγκη να κατηγοριοποιηθούν τα εδάφη ανάλογα με τις τιμές που επιδεικνύουν. Έδαφος με τιμές αντίστασης ≤ 100Ωm χαρακτηρίστηκε ως χαμηλής αντίστασης, 100Ωm < ρ < 300Ωm ως μέτριας, 300Ωm < ρ < 1000Ωm ως υψηλής, και τέλος ρ > 1000Ωm ως πολύ υψηλής. Οι παραπάνω χαρακτηρισμοί είναι εξαιρετης σημασίας γιατί ανάλογα με την αντίσταση του εδάφους πρέπει να παρθούν διαφορετικά μέτρα για την επιτυχή γείωση της παρακείμενης περιοχής. Σε πεδία χαμηλής αντίστασης οι ράβδοι/ηλεκτρόδια της γείωσης μπορούν να καταφέρουν ικανοποιητικά αποτελέσματα χωρίς περαιτέρω ενέργειες. Στην περίπτωση μέτριων τιμών ίσως απαιτηθεί η χρήση πλεγμάτων γείωσης. Παρ' όλα αυτά σε περιοχές με υψηλές και πολύ υψηλές τιμές αντίστασης θα πρέπει να εφαρμοστούν ειδικά μέτρα όπως η χρήση υλικών χαμηλής αντίστασης που θα περικλείουν τα ηλεκτρόδια για την διευκόλυνση της διοχέτευσης του ρεύματος.

ΌΝΟΜΑ ΠΕΔΙΟΥ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ (Ωm)			ΤΥΠΟΣ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΕΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ
	Min.	Max.	Ave.		
Riyadh-1	20	69	30	Σκληρό βραχώδες	Χαμηλή
Riyadh-3	7105	8026	7658	Βραχώδες	Πολύ Υψηλή
Riyadh-4	70	275	131	Αμμώδες	Μέτρια
Dwadmi-1	22	98	46	Σκληρό αμμώδες	Χαμηλή
Dwadmi-2	-	-	754	Μαλακό αμμώδες	Υψηλή
Kharj-1	-	-	439800	Πετρώδες	Πολύ Υψηλή
Kharj-2	18	20	19	Σκληρή άργιλος	Χαμηλή
Gaseem-1	-	-	>629000	Πολύ χαλαρό αμμώδες	Πολύ Υψηλή
Gaseem-2	3	5	4	Υγρό αμμώδες	Χαμηλή
Jeddah-4	3	4	4	Αμμώδες	Χαμηλή
Makkah-1	111	150	126	Μαλακό	Μέτρια
Dammam-2	7	9	8	Αγροτικό χώμα	Χαμηλή
Hafoof-1	9	12	10	Αγροτικό χώμα	Χαμηλή
Hafer-Al-Batin-1	85	152	128	Πετρώδης άμμος	Μέτρια
Hafer-Al-Batin-2	69	115	90	Πετρώδης άμμος	Χαμηλή
Khafji-2	17	26	21	Συμπιεσμένη άμμος	Χαμηλή
Atawala	121	161	135	Αγροτικό χώμα	Μέτρια
Mandaq	357	473	412	Βραχώδες	Υψηλή
Mikhwa	174	297	229	Πετρώδες	Μέτρια
Sabt-Al-Alaya	257	634	416	Αμμώδες	Υψηλή
Shudiq	106	266	172	Πετρώδες	Μέτρια
Mujardah	71	103	85	Βραχώδες	Χαμηλή
Abu Areish	55	98	74	Βουνίσιο χώμα	Χαμηλή
Byesh	41	63	55	Άργιλος και άμμος	Χαμηλή
Najran	200	1787	534	Πετρώδες	Υψηλή
Sharourah	-	-	9800	Πολύ χαλαρή άμμος	Πολύ Υψηλή

Πίνακας 4 : Μετρούμενες τιμές ελάχιστων, μέγιστων και μέσω αντιστάσεων στα 6m.

3.3.3.Συμπεράσματα

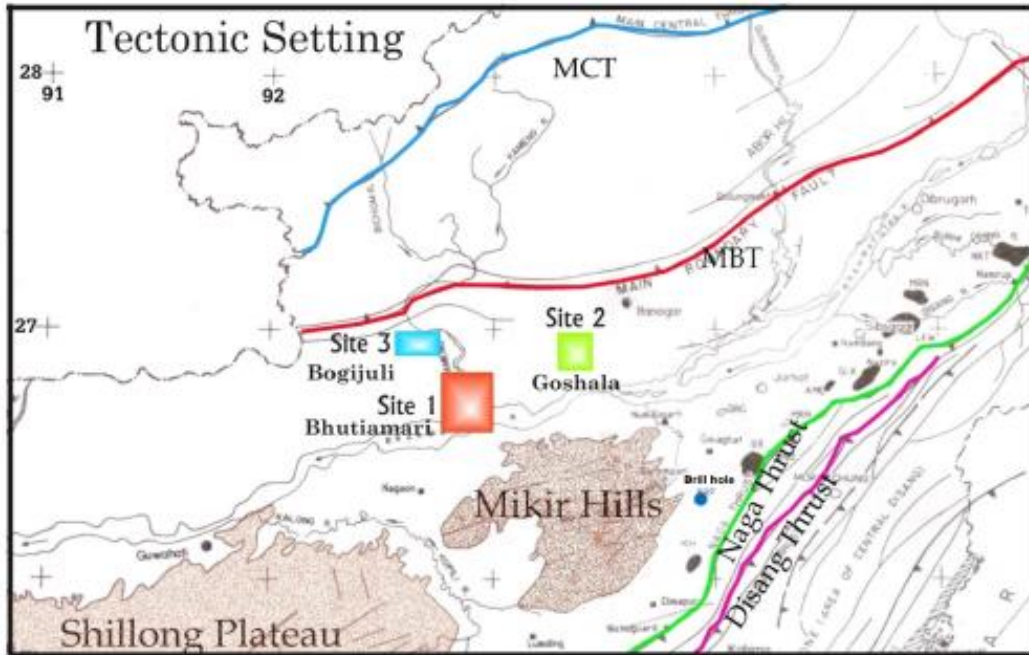
Με τη χρήση Ηλεκτρικής Τομογραφίας (ERT) έγιναν έρευνες σε 40 σημεία της Σαουδικής Αραβίας καλύπτοντας ποίκιλα γεωγραφικές και γεωλογικές τοποθεσίες. Τα αποτελέσματα δείχνουν ένα μεγάλο φάσμα ηλεκτρικών αντιστάσεων. Συμπαγή πετρώματα και συνεκτικοί σχηματισμοί και χαλαρά αμμώδη εδάφη μπορούν να έχουν μέτριες έως και πολύ υψηλές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης ενώ τοπία κοντά στη θάλασσα έχουν πολύ χαμηλές τιμές. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους θα γίνουν διαφορετικές ενέργειες για την εγκατάσταση συστήματος γείωσης ηλεκτρικών σταθμών.

3.4.Εφαρμογή ηλεκτρικής τομογραφίας και μαγνητοτελλουρικών μετρήσεων σε επιλεγμένα πεδία εγκατάστασης ηλεκτροδίων γείωσης για HVDC συστήματα αναμετάδοσης στην ΒΑ Ινδία.

(A. Manglik)

3.4.1.Περιοχή μετρήσεων

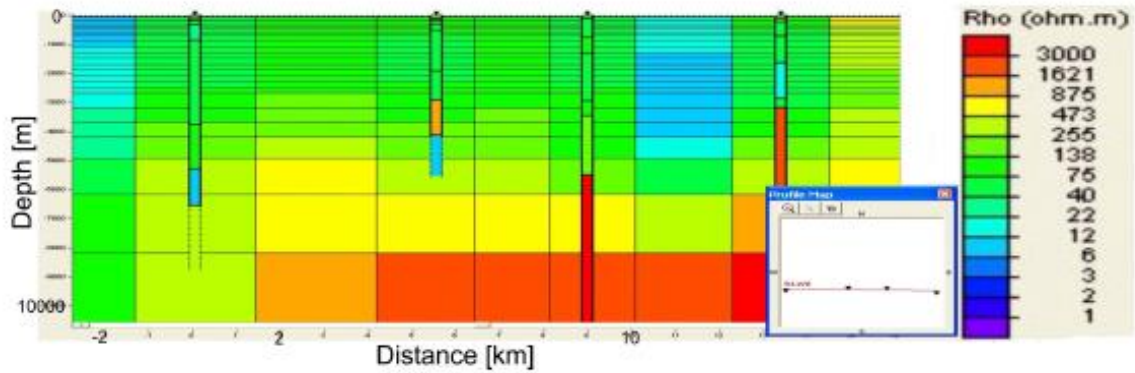
Πραγματοποιήθηκαν μαγνητοτελλουρικές μετρήσεις σε συνδυασμό με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας σε τρία πεδία εγκαταστάσεων στην ΒΑ Ινδία (NER) στα οποία η τοπογραφία είναι επίπεδη και η γεωλογία της περιοχής χαρακτηρίζεται κυρίως από αλλούβιες αποθέσεις χωρίς εκτεθειμένη βραζόμαζα στην επιφάνεια.



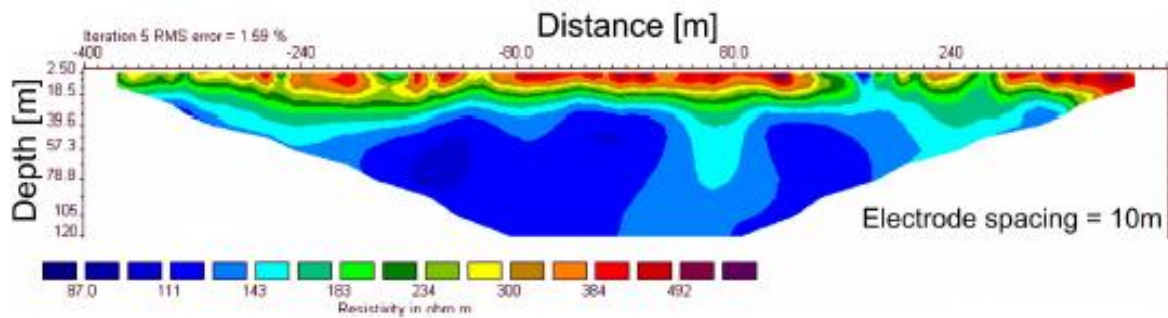
Εικόνα 3.16 : Πεδία μετρήσεων

3.4.2. Μεθοδολογία και αποτελέσματα μετρήσεων «Πεδίου 3»

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν κατά μήκος δύο ορθογώνιων προφίλ που τέμνουν το πεδίο. Κάθε τομή αποτελείται από τέσσερις σταθμούς μαγνητοτελλουρικών μετρήσεων. Τα δεδομένα δείχνουν την ύπαρξη μίας αγώγιμης ζώνης από τα 3.2-3.6km. Για τον χαρακτηρισμό των επιφανειακών σχηματισμών πραγματοποιήθηκε ηλεκτρική τομογραφία σε μία περιοχή έκτασης 360000m². Το μοντέλο που προκύπτει δίνει μία επιφανειακή ζώνη υψηλής αντίστασης πάχους 20m, μία ζώνη με σχετικά υψηλή ηλεκτρική αντίσταση που φτάνει μέχρι τα 80m σε βάθος, και τέλος μία αγώγιμη ζώνη ακριβώς από κάτω.



Εικόνα 3.17 : Inverted 2-D τομή κατά μήκος του Δ-A προφίλ. Διακρίνονται και οι μεμονωμένες μετρήσεις σε κάθε σταθμό



Εικόνα 3.18 : Προφίλ ηλεκτρικής τομογραφίας

3.4.3. Συμπεράσματα

Ο συνδυασμός ηλεκτρικών και μαγνητοτελλουρικών μετρήσεων δίνει μία πολύ ικανοποιητική εικόνα του υπεδάφους όσον αφορά την ηλεκτρική αντίσταση του για τους επιφανειακούς αλλά και για τους βαθύτερους σχηματισμούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ

4. Βασικές Αρχές Σχεδιασμού Συστήματος Ηλεκτροδίων Γείωσης.

4.1. Διαδικασία σχεδιασμού συστήματος ηλεκτροδίων γείωσης.

Ο σχεδιασμός συστήματος ηλεκτροδίων γείωσης καλωδίων HVDC δύναται να διακριθεί σε δύο στάδια, αρχικά την απόκτηση ενός γεωηλεκτρικού μοντέλου του υπεδάφους και δεύτερον την προσομοίωση της λειτουργίας του ηλεκτροδίου. Η διαδικασία απαιτεί αρκετές επαναλήψεις και μικροβελτιώσεις ανάλογα με τα υπάρχοντα δεδομένα και αποτελεί μια διεπιστημονική προσέγγιση καθότι περιλαμβάνει στοιχεία ηλεκτροτεχνίας, γεωλογίας και γεωφυσικής. Ο πυρήνας του προβλήματος είναι η απόκτηση ενός γεωηλεκτρικού μοντέλου υψηλής ακρίβειας μέσω διαφόρων τεχνικών γεωφυσικών μετρήσεων. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η προσομοίωση της λειτουργίας του ηλεκτροδίου κατά βάση των απαιτήσεων από δεδομένα που προέκυψαν.

4.2. Τύποι ηλεκτροδίων

Λόγω της τεράστιας ποικιλίας γεωγραφικών, γεωφυσικών και τεχνικών χαρακτηριστικών του εκάστοτε πεδίου οι τύποι ηλεκτροδίων διαφέρουν από σύστημα σε σύστημα. Υπάρχουν διαφοροποιήσεις στα σχήματα των ηλεκτροδίων και στην διάταξη τους. Γενικώς απαιτείται πάντα ένας βαθμός προσαρμογής στον τόπο κατασκευής άρα τα απόλυτα συμμετρικά συστήματα σπανίζουν.

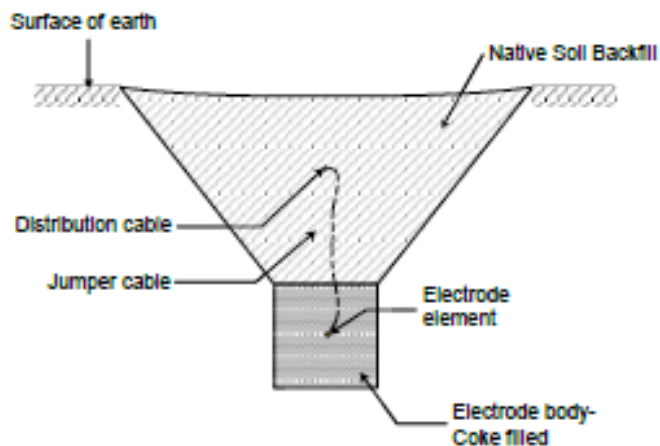
Type	Active part in	Advantage	Disadvantage	Example/Figure
Land (Shallow Horizontal)	Surface soil	Generally located close to converter site Low electrode line and electrode power losses compared with neutral line.	May have high temperature rise, high potentials. potential for electro-osmosis. May not be rated for full time in operation in earth return	Nelson River BP1 Radisson (Shallow ring electrode) Figure 2.4
Land (Vertical)	Relatively shallow soil within 200m of the surface	Reduced area of electrode site compared to shallow horizontal land electrode	Obvious end effect of current releasing density.	Puer-Qiaoxiang HVDC Project, China Figure 2.9
Land (Deep Well)	Deep soil up to 1000m deep	Minimum area of land electrode site. Perhaps no electrode line near or in the converter station.	Obvious end effect of increased current density.	Changcuicun electrode site, Heyuan city of China Figure 2.10
Sea	Seawater	Low resistance to remote earth, thus low power losses. no temperature rise no risk for electro-osmosis	Must achieve low current density to avoid chlorine evolution.	Kontek, Bjäverskov Figure 2.13
Shore (Beach)	Soil saturated with seawater	Low resistance to remote earth, thus low power losses easy to exchange active parts	Tidal water level variation can affect characteristics. Subject to erosion in storms.	Skagerrak, Lövens Breddning Figure 2.15
Shore (Pond)	Seawater	Low resistance to remote earth, thus low power losses. Easy to exchange active parts	Requires construction of breakwater. Economic design favours high current density which results in high potentials.	Gotland, Massangä Figure 2.16

Πίνακας 5 : Τύποι και χαρακτηριστικά ηλεκτροδίων γείωσης (General Guidelines for HVDC Electrode Design, CIGRE 2017)

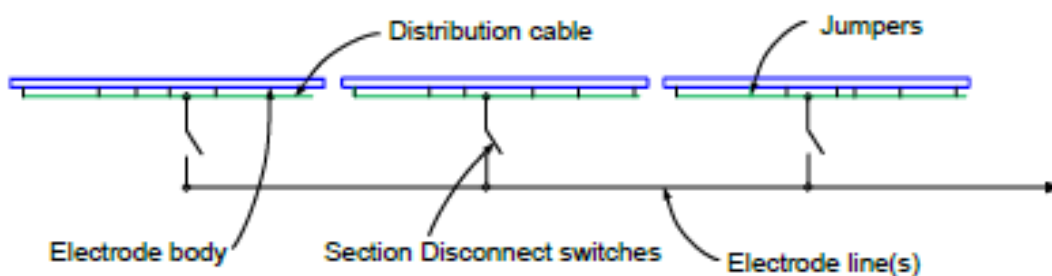
4.2.1. Ηλεκτρόδια στεριάς (Land electrodes)

Διαχωρίζονται σε 3 κατηγορίες αναλόγως με το βάθος τοποθέτησης και την διάταξη τους.

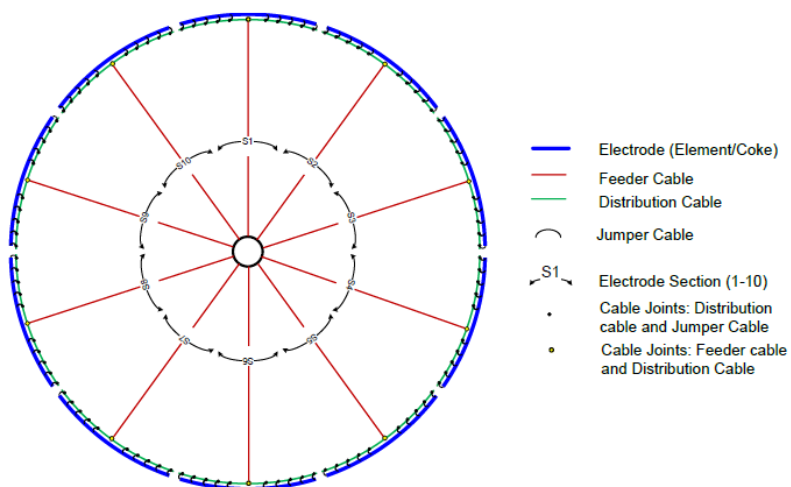
- *Ρηχά οριζόντια ηλεκτρόδια :* Η τοποθέτηση τους γίνεται πλησίον της επιφάνειας σε τάφρους πληρωμένες με οπτάνθρακα, έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής και μπορούν να τροποποιηθούν σε διάφορα σχήματα (μονοδιάστατα ηλεκτρόδια, ηλεκτρόδια μονού/διπλού/τριπλού δακτυλίου, ελλειπτικά ηλεκτρόδια).
- *Κάθετα ηλεκτρόδια :* Χρησιμοποιούνται σε βάθος έως και 200m ώστε να φτάσουν σε εδαφικούς σχηματισμούς με χαμηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και υψηλότερες τιμές υγρασίας.
- *Ηλεκτρόδια βαθέων φρεατίων(deep well) :* Χρησιμοποιείται ευρέως όταν υπάρχουν στρώματα υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τα οποία είναι υπερκείμενα από σχηματισμούς χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Μπορούν να φτάσουν και τα 1000m σε βάθος.



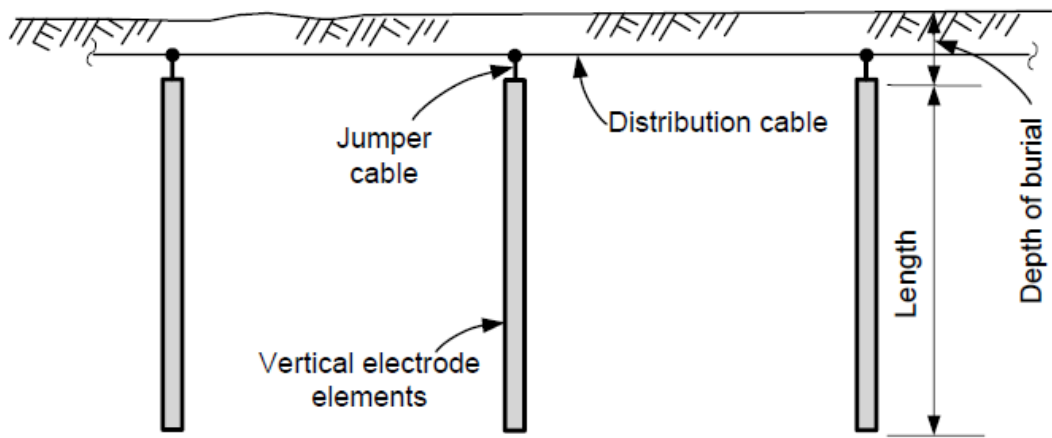
Εικόνα 4.1 : Ρηχό οριζόντιο ηλεκτρόδιο



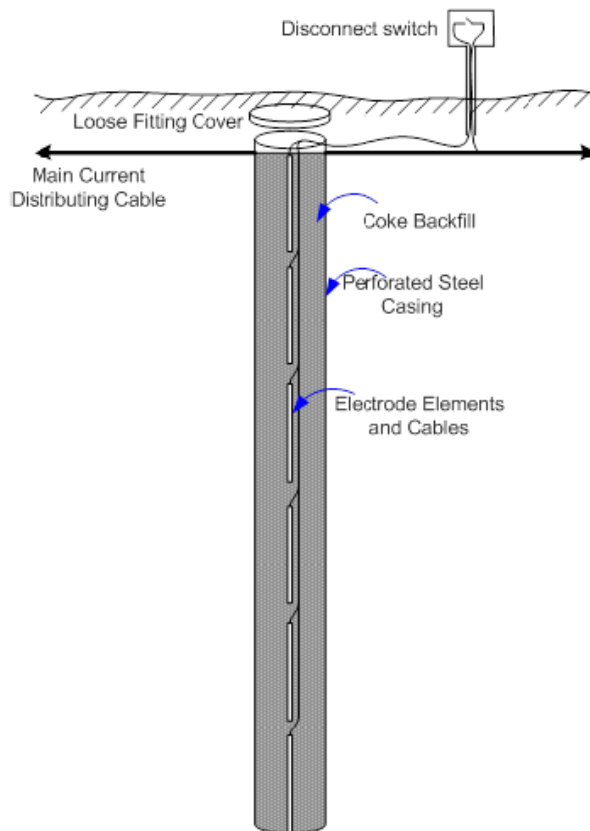
Εικόνα 4.2 : Ρηχό μονοδιάστατο (linear) ηλεκτρόδιο



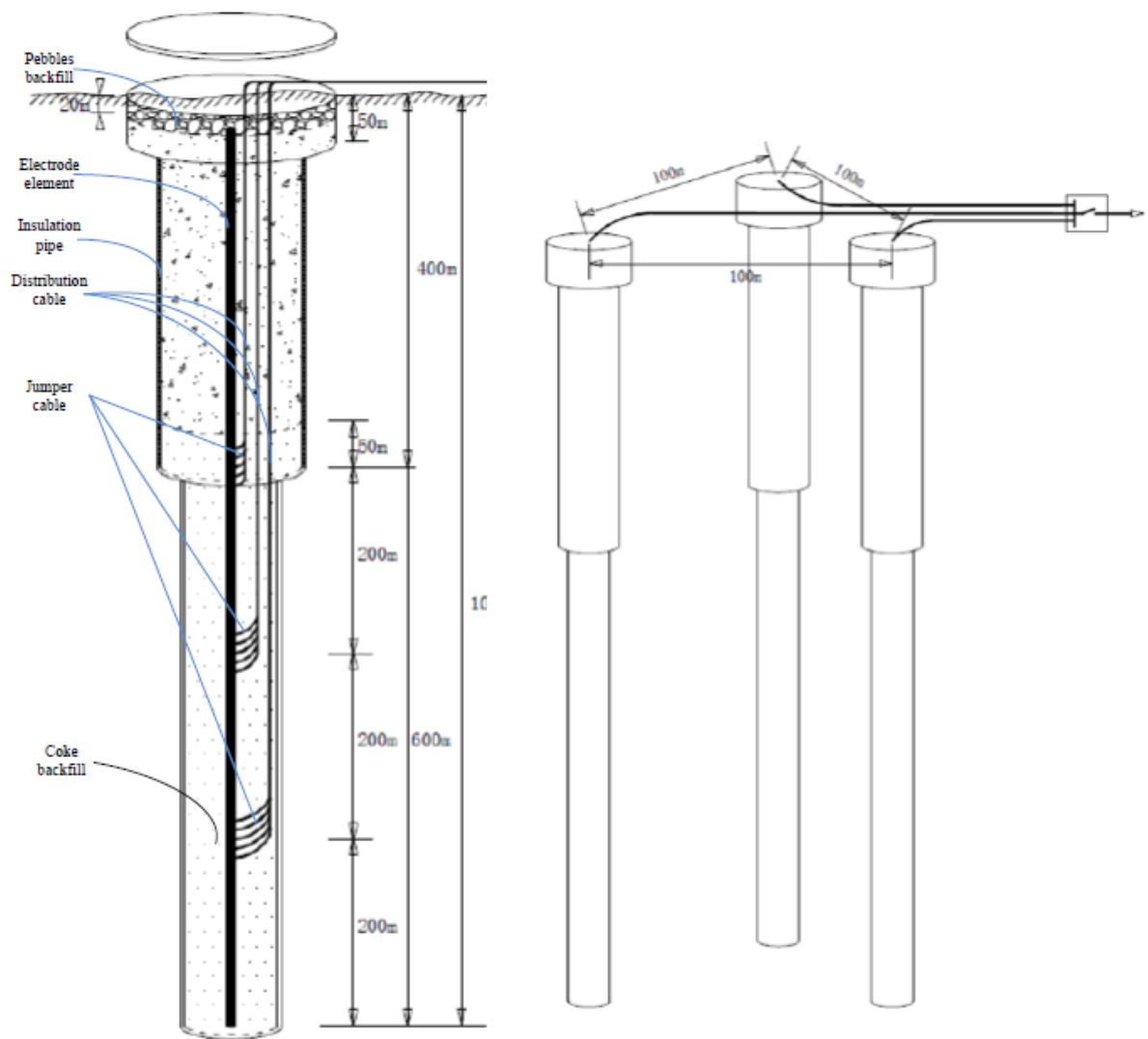
Εικόνα 4.3 : Ρηχό ηλεκτρόδιο σε διάταξη δακτυλίου



Εικόνα 4.4 : Διάταξη κάθετων ηλεκτροδίων



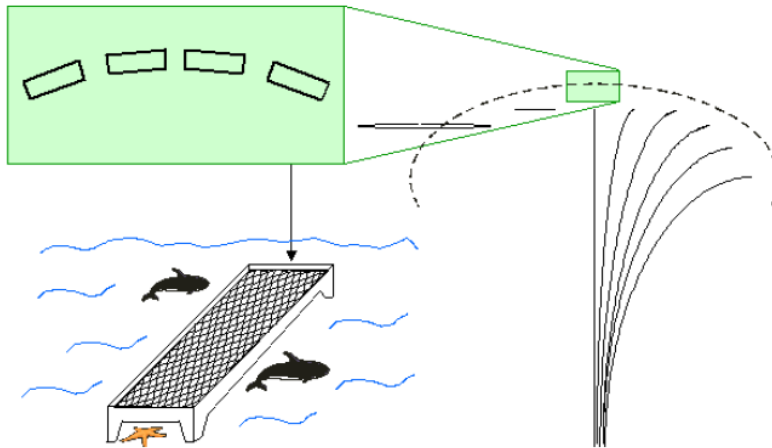
Εικόνα 4.5 : Κάθετο ηλεκτρόδιο



Εικόνα 4.6 : Ηλεκτρόδιο βαθέος φρεατίου

4.2.2. Ηλεκτρόδια θαλάσσης (Sea electrodes)

Τοποθετούνται μακριά από την ακτογραμμή μέσα στην θάλασσα με ή χωρίς περίφραξη. Χρησιμοποιείται κάποιο είδος περίφραξης εάν η πυκνότητα δεν είναι αρκετά χαμηλή ώστε να περιοριστεί το ηλεκτρικό πεδίο μέσα σε αποδεκτά όρια.



Εικόνα 4.7 : Ηλεκτρόδιο θαλάσσης με προστατευτικό πλέγμα τιτανίου



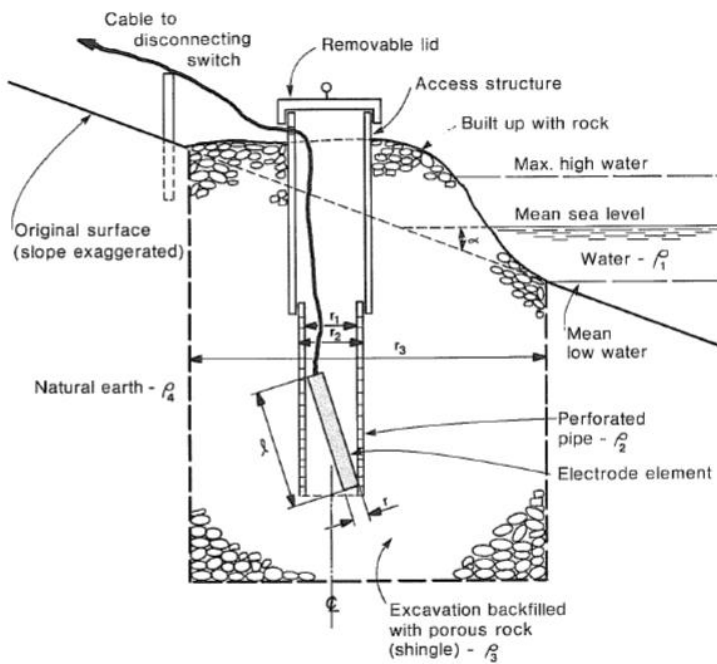
Εικόνα 4.8 : Πλέγμα τιτανίου πλαισιωμένο σε βάση από σκυρόδεμα



Εικόνα 4.9 : Ηλεκτρόδιο θαλάσσης σε ξύλινο κλουβί και οπτάνθρακα

4.2.3. Ηλεκτρόδια ακτής (Beach electrodes)

Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στην ακτογραμμή πάνω από την στάθμη της πλημμυρίδας αλλά με το ενεργό μέρος του ηλεκτροδίου σε βάθος κάτω από την στάθμη της θάλασσας ώστε να υπάρχει επαφή με το θαλασσινό νερό που έχει διεισδύσει στο υπέδαφος.



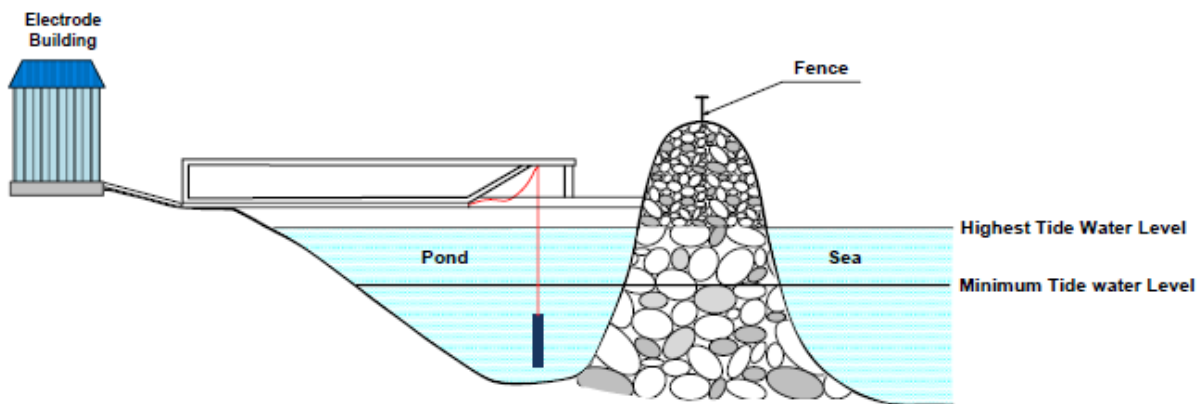
Εικόνα 4.10 : Ρηχό ηλεκτρόδιο ακτής



Εικόνα 4.11 : Ηλεκτρόδιο ακτής σε οπτάνθρακα με προστατευτικό κάλυμμα για την αποφυγή της επαφής του οπτάνθρακα με το χώμα.

4.2.4. Ηλεκτρόδια λίμνης (Pond electrodes)

Αποτελούν ηλεκτρόδια ακτής (επαφή με θαλασσινό νερό στο υπέδαφος) που κατασκευάζονται σε μικρές περιοχές με που προστατεύονται από κύματα μέσω κυματοθραύστη.



Εικόνα 4.12 : Ηλεκτρόδιο λίμνης

4.3.Επιλογή κατάλληλου τύπου ηλεκτροδίου

Η επιλογή του κατάλληλου ηλεκτροδίου αποτελεί κρίσιμο σημείο στον σχεδιασμό συστήματος γείωσης. Απαιτεί μία τεχνικοοικονομική έρευνα όλων των επιλογών ώστε να κατασκευαστεί ένα ασφαλές, αξιόπιστο, οικονομικά εφικτό και φιλικό προς το περιβάλλον σύστημα ηλεκτροδίων.

Για την επιλογή λαμβάνονται υπόψιν οι παρακάτω παράγοντες :

- Η απόσταση μεταξύ του σταθμού μετατροπής και των ηλεκτροδίων
- Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση στον σταθμό μετατροπής
- Οι λειτουργικές προδιαγραφές λειτουργίας των ηλεκτροδίων
- Χρονικοί περιορισμοί της λειτουργίας των ηλεκτροδίων
- Συντήρηση της εγκατάστασης
- Προβλεπόμενο κόστος
- Πιθανοί περιορισμοί όσον αφορά τη χρήση του χώρου
- Ασφάλεια στο πεδίο των ηλεκτροδίων
- Συνολικός αριθμός των στοιχείων της υποδομής που μπορεί να επηρεαστούν αρνητικά

Εάν οι σταθμοί μετατροπής είναι σχετικά κοντά στην θάλασσα και το αναμενόμενο διάστημα λειτουργίας είναι μεγάλο ή συνεχές, τότε τα ηλεκτρόδια θαλάσσης ή ακτής αποτελούν την προτιμότερη επιλογή λόγω της χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του θαλασσινού νερού σε σχέση με το έδαφος. Στην περίπτωση που η απόσταση του σταθμού μετατροπής και της θάλασσας είναι μεγάλη, τότε θα χρησιμοποιηθεί ηλεκτρόδιο στεριάς ή θαλάσσης. Αυτό μπορεί να αποδειχθεί τεχνικά δύσκολο εφόσον οι γεωλογικές συνθήκες της περιοχής παρουσιάζουν βραχώδες υπόβαθρο υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χωρίς να υπάρχει κάποιο υποκείμενο στρώμα με χαμηλότερες τιμές. Στην προκειμένη περίπτωση η μόνη επιλογή που απομένει είναι να κατασκευαστεί μία μακριά γραμμή ηλεκτροδίων μέχρι τη ακτή. Τα ηλεκτρόδια κάθετου τύπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πεδία όπου το έδαφος δεν είναι κατάλληλο για ρηχά οριζόντια ηλεκτρόδια. Το ενεργό τμήμα του κάθετου ηλεκτροδίου διεισδύει το υπέδαφος σε συγκεκριμένο βάθος κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, σε ένα στρώμα με υψηλό ποσό υγρασίας ή σε σημείο που υπάρχει υφάλμυρο νερό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

5. Γεωφυσικές Έρευνες της Ερευνητικής Ομάδας του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής.

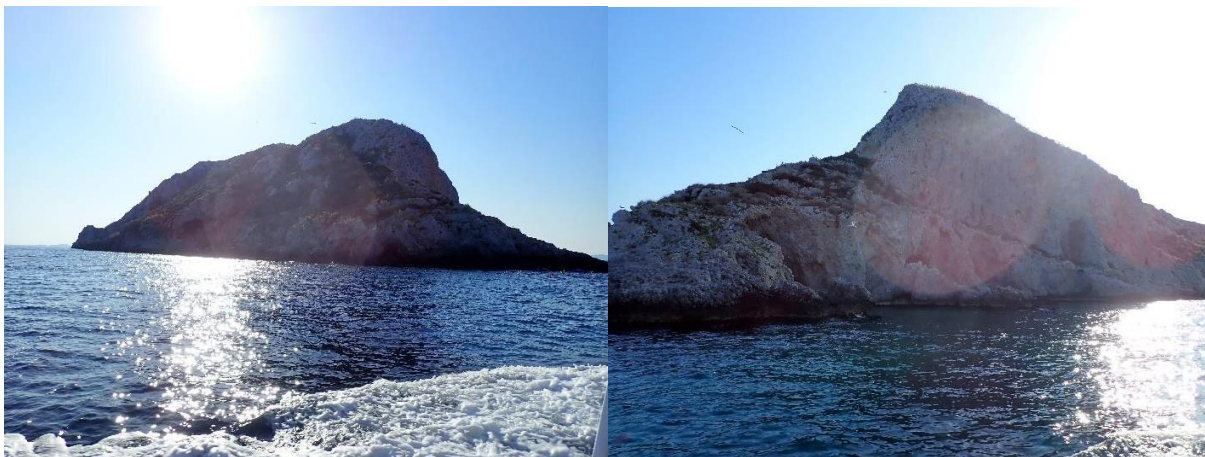
5.1.Γεωφυσική Έρευνα στη Νήσο Σταχτορρόη

5.1.1.Γενικά

Ο σκοπός της γεωφυσικής έρευνας ήταν να εντοπιστεί η στρωματογραφία της νήσου όσο το δυνατόν βαθύτερα, και η μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με το βάθος μέσω μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας.



Εικόνα 5.1 : Δορυφορική φωτογραφία της νήσου Σταχτορρόης, ορατό το προφίλ της γεωηλεκτρικής τομής.



Εικόνες 5.2 - 5.3 : Φωτογραφίες της νήσου κατά την προσέγγιση.



Εικόνα 5.4 : Μεταφορά εξοπλισμού από το σκάφος στο πεδίο της έρευνας.



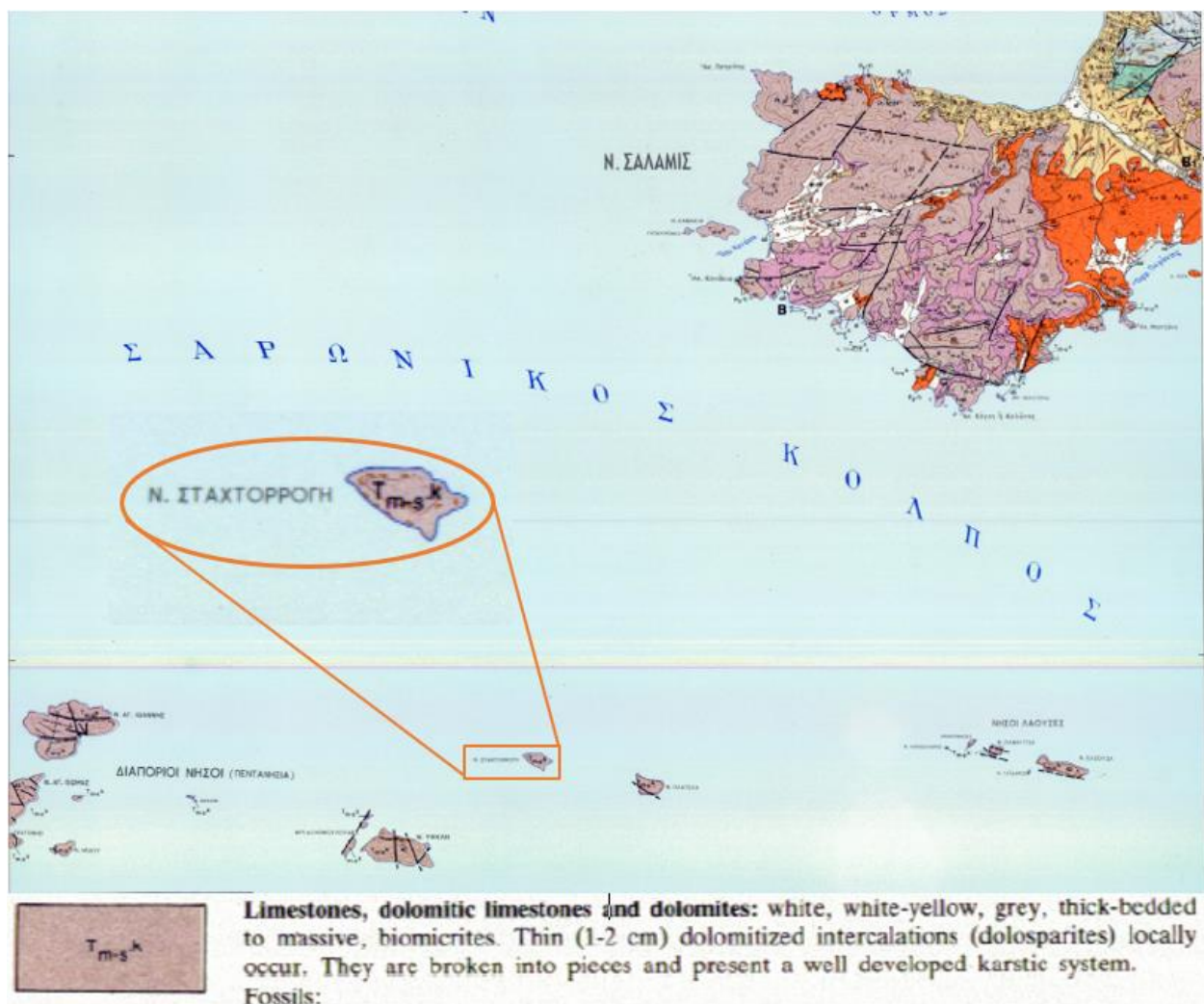
Εικόνα 5.5 : Ξετύλιγμα και τοποθέτηση του καλωδίου κατά μήκος της τομής.



Εικόνα 5.6 : Τοποθέτηση των ηλεκτροδίων.

5.1.2. Γεωλογικά στοιχεία της περιοχής

Η νήσος βρίσκεται νότια της Πάχης Μεγάρων στον Σαρωνικό Κόλπο και ανήκει στο σύμπλεγμα των Διαπόριων Νήσων ή Πεντηνήσια. Η γεωλογία της υπό έρευνα περιοχής περιγράφεται αναλυτικά από το γεωλογικό χάρτη του *Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών*, και επιβεβαιώνει ότι το υπέδαφος της νήσου αποτελείται σχεδόν εξ ολοκλήρου από δολομιτικούς σχηματισμούς (δολομίτες και δολομιτικούς ασβεστόλιθους).

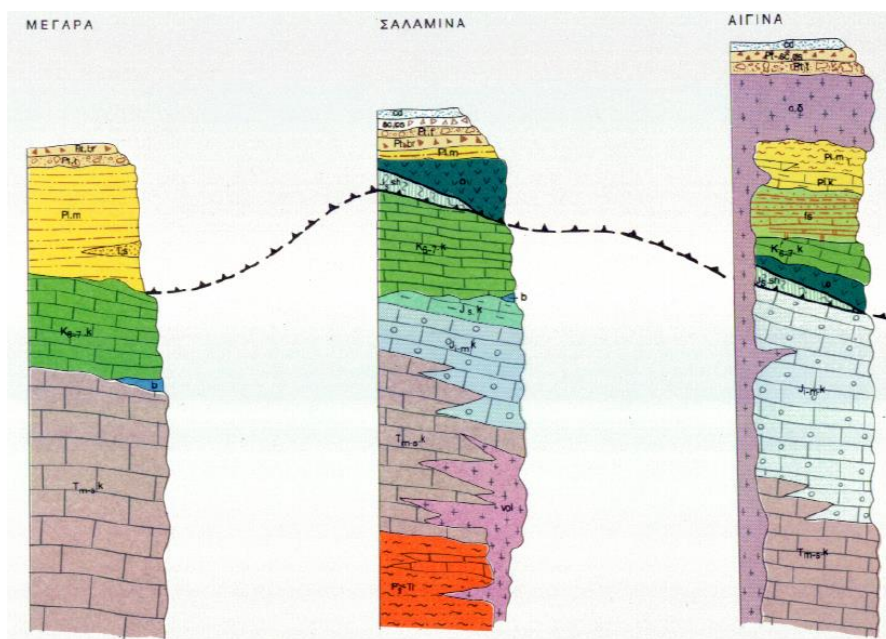


Εικόνα 5.7 : Γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ, τμήμα από το φύλλο «Μέγαρα», κλίμακα 1:50000, εμφανής είναι η νήσος Σταχτορρόη μεγεθυμένη και ο χαρακτηρισμός της γεωλογίας της.

Οι δολομιτικοί σχηματισμοί έχουν εντοπιστεί στο λιμάνι της Πάχης και από ερευνητές του Πανεπιστημίου Κρήτης.



Εικόνα 5.8 : Δολομιτικοί σχηματισμοί στο λιμάνι της Πάχης, εμφανή ρήγματα μερικά πληρωμένα με αργιλικό υλικό.



Εικόνα 5.9 : Στρωματογραφικές στήλες της περιοχής.

5.1.3.Γεωηλεκτρικές Τομογραφίες

5.1.3.1. Λήψη και επεξεργασία μετρήσεων

Η λήψη των των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πραγματοποιήθηκε μέσω οργάνου SYSCALPro.

Γενικά χαρακτηριστικά :

- Χρήση έως 4000 ηλεκτροδίων
- Μνήμη flash δεδομένων : πάνω από 21000 αναγνώσεις
- Τροφοδοσία από δύο επαναφορτιζόμενες μπαταρίες 12V, 7.2A
- Παντός καιρού
- Διαστάσεις : 31 x 23 x 36 cm
- Βάρος : 13 kg

Χρησιμοποιήθηκαν καλώδια μήκους 300m (2x150m) για να μπορέσουμε να πάρουμε μετρήσεις για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βάθος. Καθότι η νήσος είχε αρκετά βραχώδες έδαφος, η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων ήταν δύσκολη και χρησιμοποιήσαμε νερό στις επαφές για να πετύχουμε την απαραίτητη αγωγιμότητα στο σημείο επαφής ηλεκτροδίων – εδάφους και την σωστή διοχέτευση του ρεύματος στο υπέδαφος. Επιλέχθηκαν διατάξεις ηλεκτροδίων Schlumberger και Dipole-Dipole για διασκόπηση σε βάθος με έμφαση στην στρωματογραφία αλλά και σε πλευρικούς σχηματισμούς.

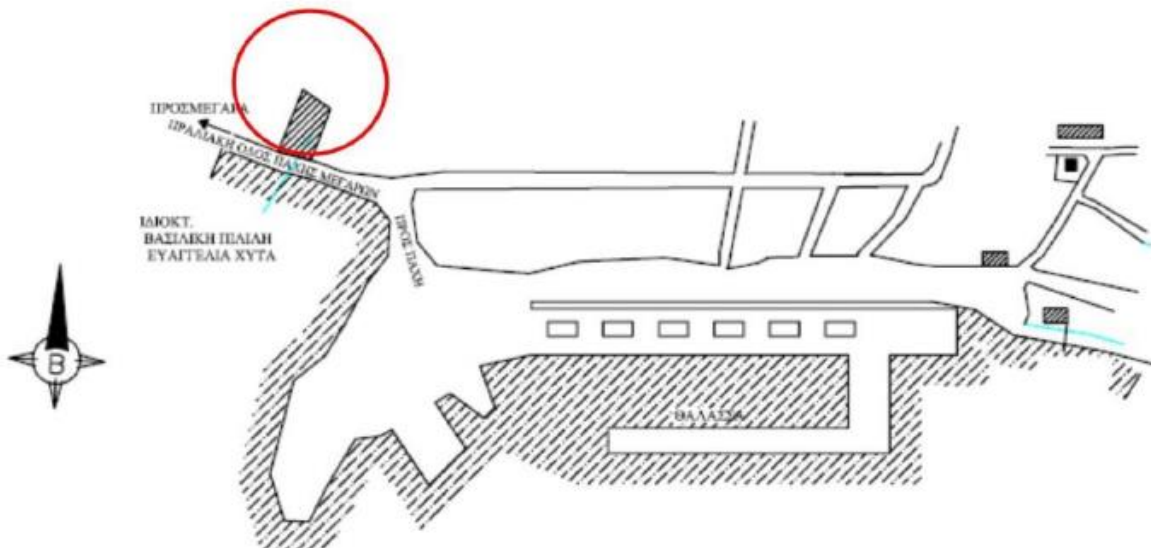
Η επεξεργασία των δεδομένων της συγκεκριμένης, αλλά και όλων των επερχόμενων μετρήσεων, έχει γίνει μέσω του προγράμματος RES2DINV. Δημιουργείται ένα γεωηλεκτρικό μοντέλο για τον υπολογισμό των φαινόμενων τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης οι οποίες συγκρίνονται με τις μετρούμενες από την έρευνα με αλληπάλληλες επαναλήψεις μέχρι να συγκλίνουν σε ένα αποδεκτό όριο. Τιμές με μεγάλες αποκλίσεις αφαιρούνται για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος. Πραγματοποιήθηκε τελειοποίηση του μοντέλου (refinement) ώστε να δούμε μετρήσεις σε σημεία όπου υπάρχει έλλειψη πληροφοριών. Επιλέχθηκαν δύο διαφορετικές διαδικασίες για την ερμηνεία κατά την διαδικασία της αντιστροφής :

- *Robust – Robust*: Γεωλογικό μοντέλο λιγότερο ευαίσθητο σε θόρυβο, δυνατότητα εντοπισμού απότομων αλλαγών στις τιμές των δεδομένων.
- *Robust – Robust Horizontal*: Το λογισμικό θεωρεί ότι τα στρώματα είναι σχετικά οριζόντια και δίνει ιδιαίτερη σημασία στην στρωματογραφία, δηλαδή στην κάθετη εναλλαγή τους σε σχέση με το βάθος.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν χάρτες contour μέσω του λογισμικού Surfer για την τελική απεικόνιση του υπεδάφους της υπό έρευνα περιοχής.

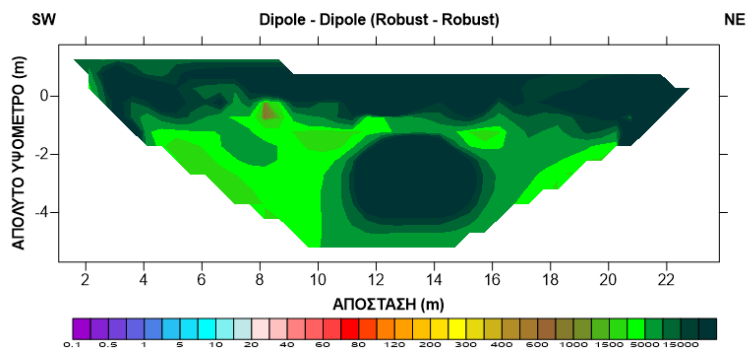
5.1.3.2. Γεωφυσική έρευνα παλαιότερης χρονολογίας από το Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Στην περιοχή του λιμένα της Πάχης πραγματοποιήθηκε το 2013 γεωφυσική έρευνα στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας από ερευνητές της σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πανεπιστημίου Κρήτης. Τα δεδομένα των ηλεκτρικών μετρήσεων επεξεργάστηκαν εκ νέου και θα είναι πολύτιμα για την κατανόηση της επίδρασης του θαλασσινού νερού στους δολομιτικούς σχηματισμούς της περιοχής.

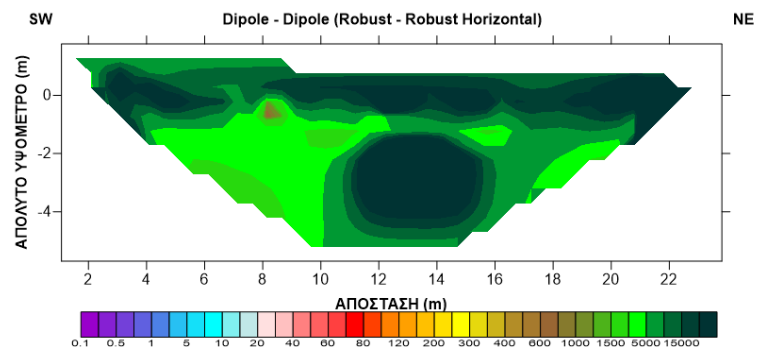


Εικόνα 5.10 : Σκαρίφημα περιοχής πλησίον του λιμένα της Πάχης, εμφανής η περιοχή των μετρήσεων με κόκκινο χρώμα (Πλατανά et al., 2013)

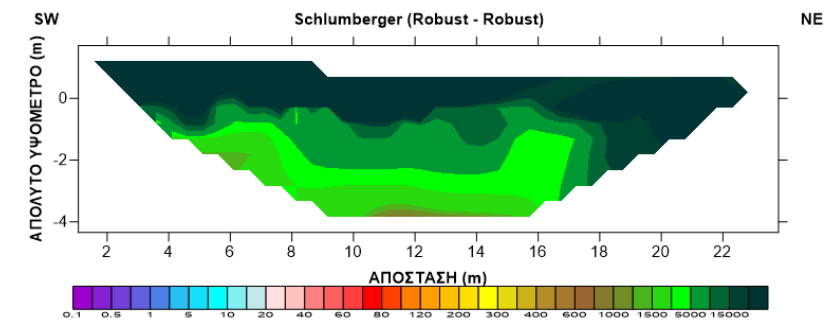
5.1.3.3. Γεωηλεκτρικές τομές λιμένα Πάχης



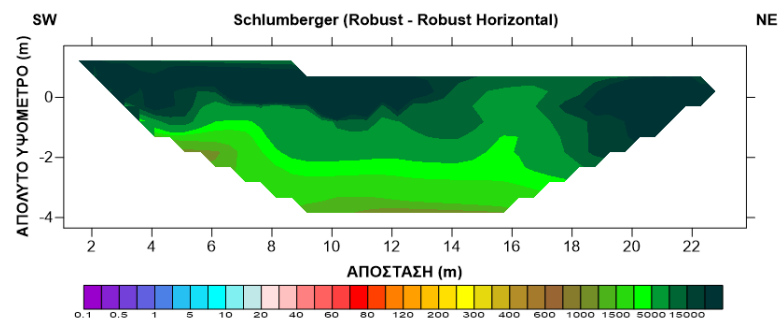
Εικόνα 5.11 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust)



Εικόνα 5.12 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust Horizontal)

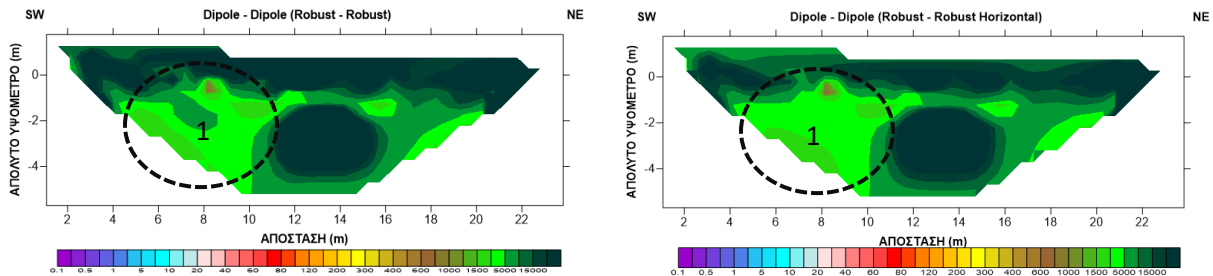


Εικόνα 5.13 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust)



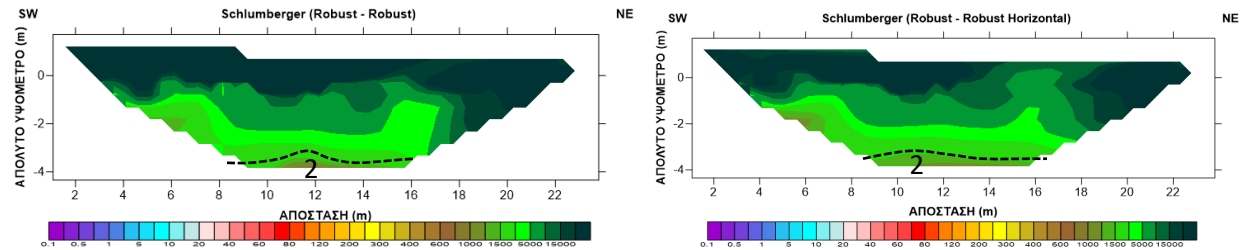
Εικόνα 5.14 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust Horizontal)

Παρατηρούμε πολύ υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην επιφάνεια οι οποίες μειώνονται σταδιακά με το βάθος πιθανότατα λόγω ρηγμάτων πληρωμένων ή μη με αργιλικά υλικά. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τομές με διάταξη Dipole-Dipole στις οποίες παρατηρούμε μία περιοχή (*περιοχή 1*) χαμηλότερων τιμών από τα -2m και βαθύτερα με διεύθυνση ΝΔ όπου βρίσκεται και η θάλασσα.



Εικόνα 5.15 : α) Τομή Dipole-Dipole(Robust-Robust) , b) Τομή Dipole-Dipole(Robust-Robust Horizontal).

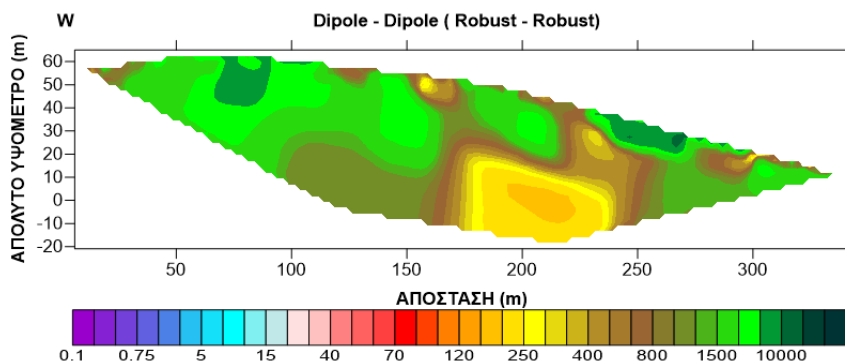
Από τις τομές Schlumberger παρατηρούμε ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι σχετικά χαμηλή στα εδαφικά στρώματα κάτω από τα -4m (*περιοχή 2*).



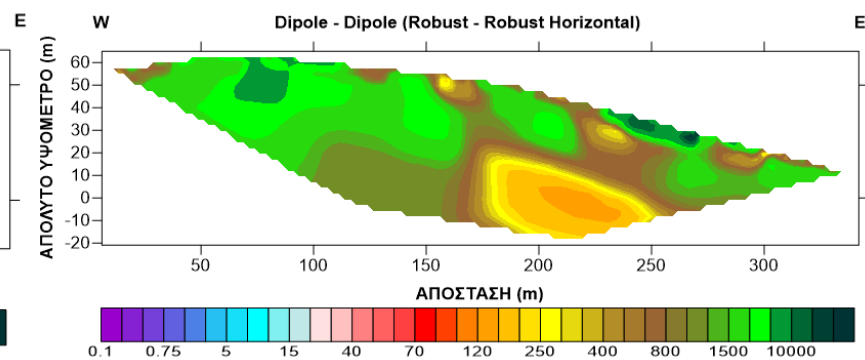
Εικόνα 5.16 : α) Τομή Schlumberger (Robust-Robust) , b) Τομή Schlumberger (Robust-Robust Horizontal).

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι υπάρχει διείσδυση του θαλασσινού νερού από την ΝΔ πλευρά ιδιαίτερα σε βάθος μεγαλύτερο των -4m.

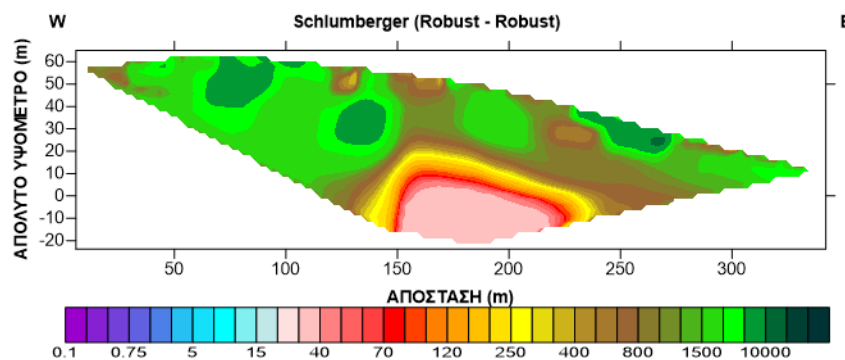
5.1.3.4. Γεωηλεκτρικές τομές Νήσου Σταχτορρόης



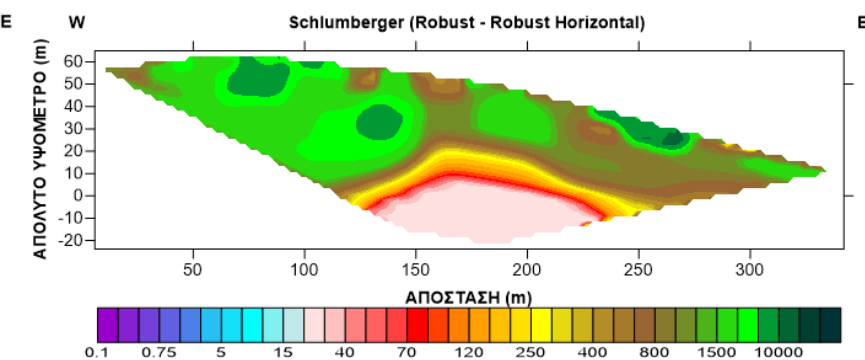
Εικόνα 5.17 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust)



Εικόνα 5.18 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust Horizontal)

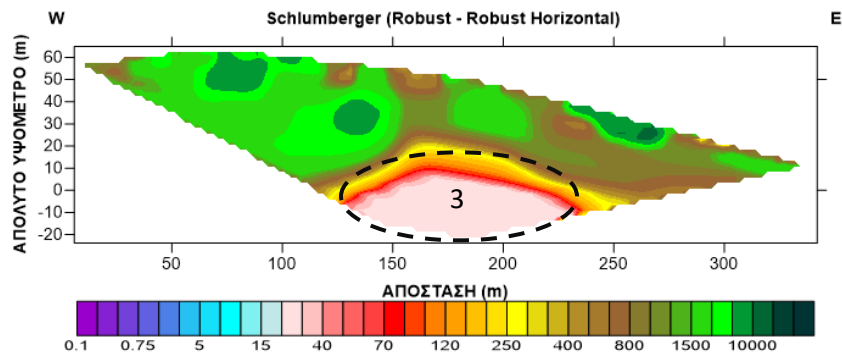


Εικόνα 5.19 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust)

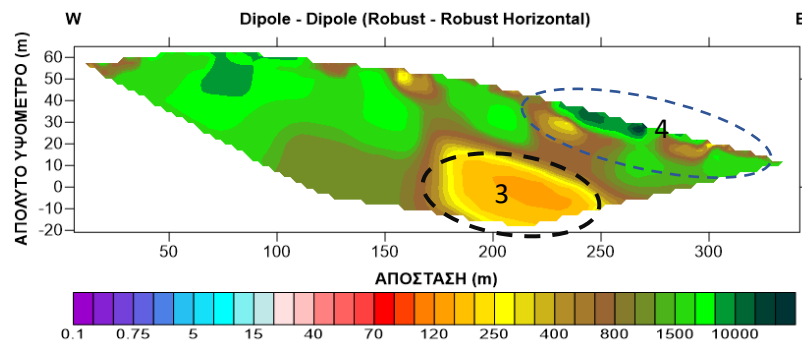


Εικόνα 5.20 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust Horizontal)

Οι τομές Schlumberger απεικονίζουν χαρακτηριστικά την κατάσταση του υπεδάφους που επικρατούν στην Νήσο, ειδικά όσον αφορά τον σκοπό της έρευνας. Παρατηρούμε ένα περιβάλλον αρκετά ανομοιογενές στο οποίο υπάρχουν κάποιοι συμπαγής δολομιτικοί σχηματισμοί στην επιφάνεια ενώ με την αύξηση του βάθους γίνονται όλο και λιγότερο συνεκτικοί, κατακερματισμένοι πιθανότατα πληρωμένοι με αργιλικό υλικό. Από την στάθμη της θάλασσας και βαθύτερα γίνεται μία ραγδαία πτώση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην *περιοχή 3* λόγω της διείσδυσης θαλασσινού νερού στον δολομίτη.



Εικόνα 5.21 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust Horizontal)



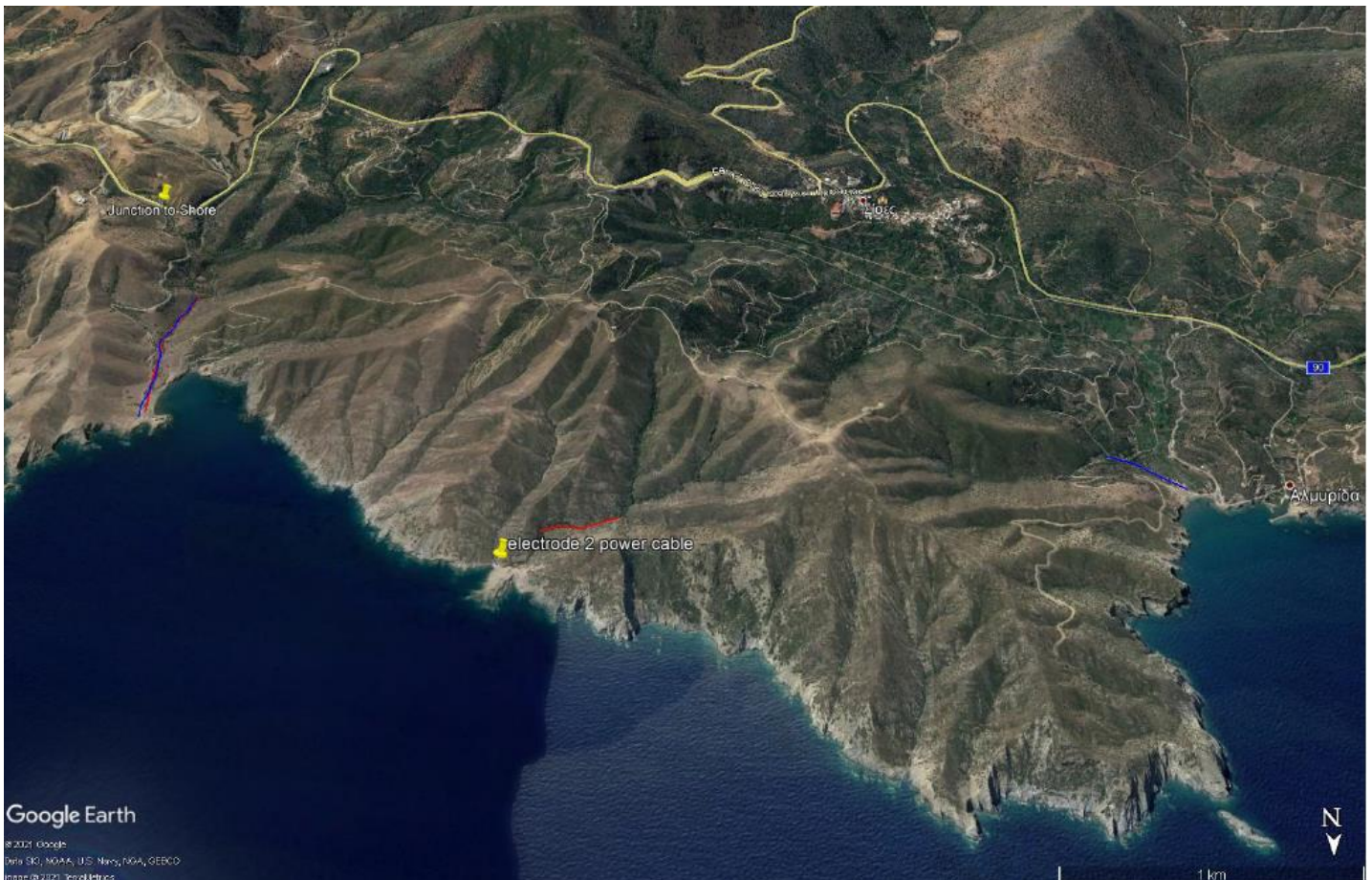
Εικόνα 5.22 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust Horizontal)

Η διείσδυση αυτή είναι πιο εμφανής στην τομή Schlumberger(Robust-Robust Horizontal) σε σύγκριση με τις τομές Dipole-Dipole. Το φαινόμενο αυτό προφανώς είναι αναμενόμενο καθότι η διάταξη Schlumberger και ιδιαιτέρως με την διαδικασία επεξεργασίας Robust-Robust Horizontal είναι ιδανική για τον εντοπισμό της εναλλαγής των κάθετων στρωμάτων, ενώ η διάταξη Dipole-Dipole είναι πιο ευαίσθητη σε πλευρικές ανωμαλίες. Η μεγαλύτερη λεπτομέρεια της διάταξης Dipole-Dipole σε πλευρικούς σχηματισμούς γίνεται ευδιάκριτη στην περιοχή 4 όπου βλέπουμε μία ανομοιογένεια στο υπέδαφος η οποία δεν είναι εμφανής στην τομή Schlumberger.

5.2.Γεωφυσική Έρευνα στην Κρήτη

5.2.1.Γενικά

Ο σκοπός της γεωφυσικής έρευνας ήταν να εντοπιστεί η στρωματογραφία στις δύο υπό έρευνα περιοχές σε μεγάλο βάθος, και η μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με το βάθος μέσω μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας. Η διαδικασία της λήψης των μετρήσεων ήταν σχεδόν ίδια με την έρευνα στη Νήσο Σταχτορρόη. Η κύρια διαφορά ήταν το μήκος των καλωδίων όπου εδώ ανήλθε σε 710m στο πεδίο της παραλίας Πέρα Γαλήνοι, και 355m στο πεδίο στην παραλία Αλμυρίδα.



Εικόνα 5.23 : Δορυφορική φωτογραφία της ευρύτερης υπό έρευνα περιοχής κοντά στο Ηράκλειο, ορατά τα προφίλ των γεωηλεκτρικών τομών που πραγματοποιήθηκαν (μπλε χρώμα) και του ενός που δεν πραγματοποιήθηκε λόγω αντίξοων συνθηκών (κόκκινο χρώμα).



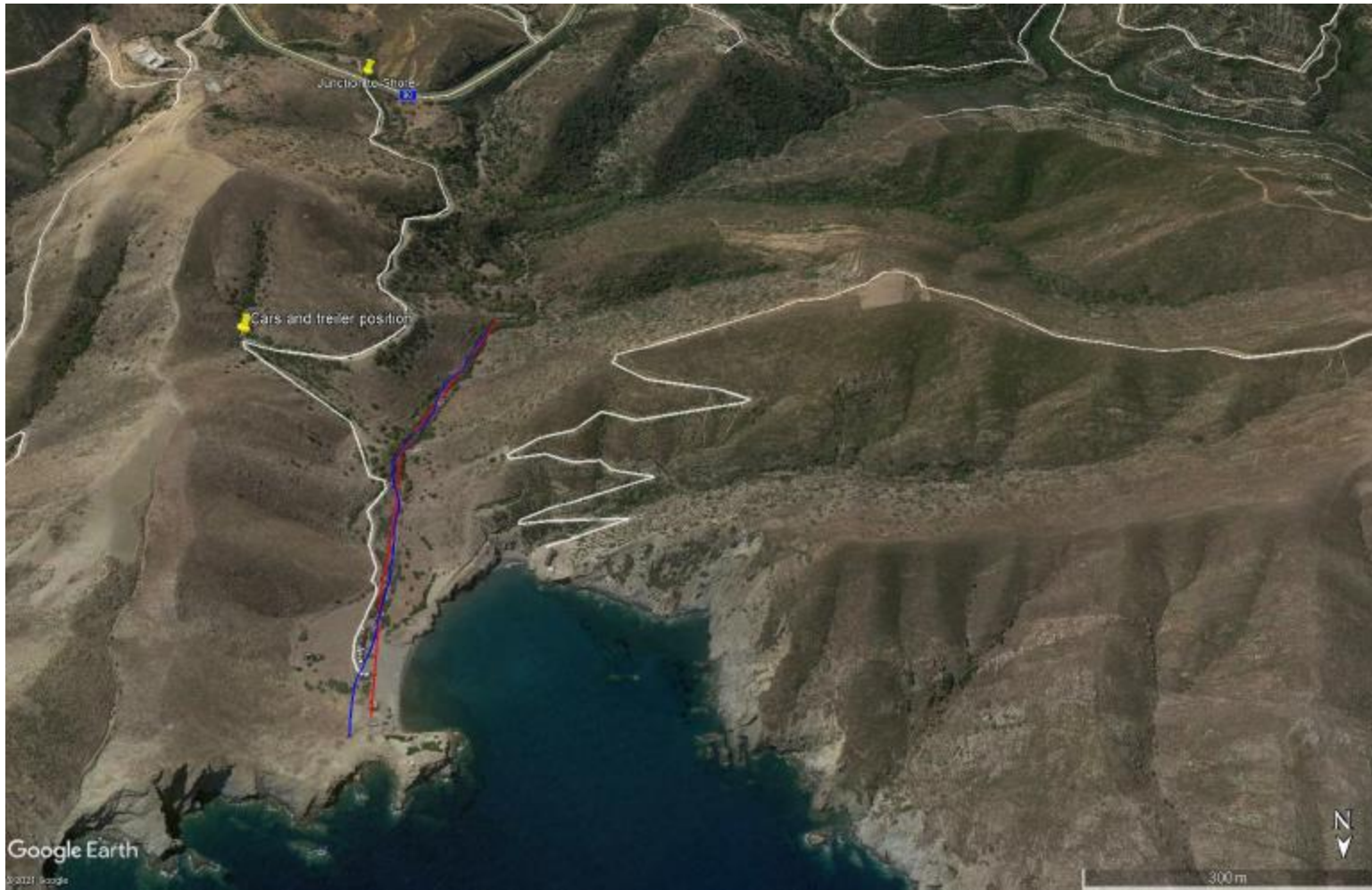
Εικόνα 5.24 : Φωτογραφίες από το ανατολικό προφίλ πλησίον της παραλίας Πέρα Γαλήνοι.



Εικόνα 5.25 : Φωτογραφίες κατά τη μεταφορά του εξοπλισμού στο ανατολικό προφίλ.



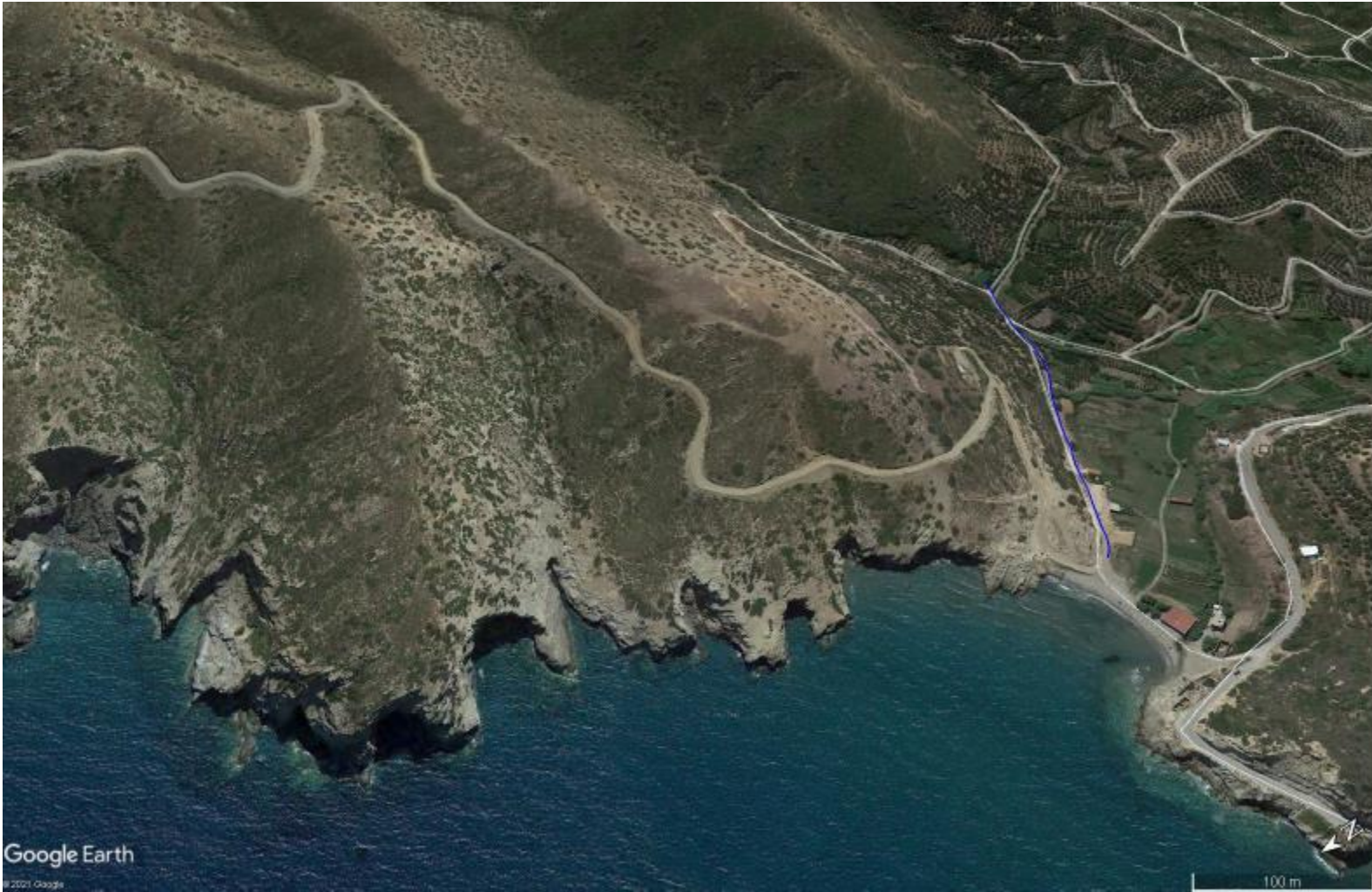
Εικόνα 5.26 : Φωτογραφίες κατά την διάρκεια των μετρήσεων στο ανατολικό προφίλ.



Εικόνα 5.27 : Δορυφορική φωτογραφία του ανατολικού προφίλ.



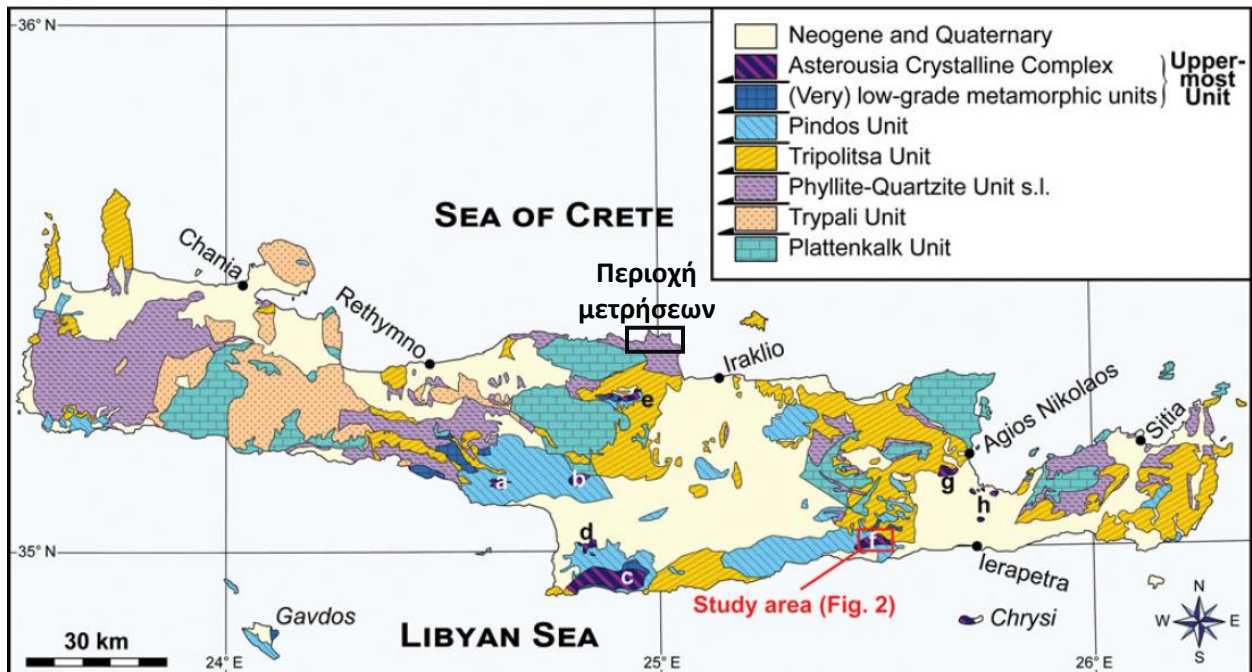
Εικόνα 5.28 : Φωτογραφίες του δυτικού προφίλ πλησίον της παραλίας Αλμυρίδας.



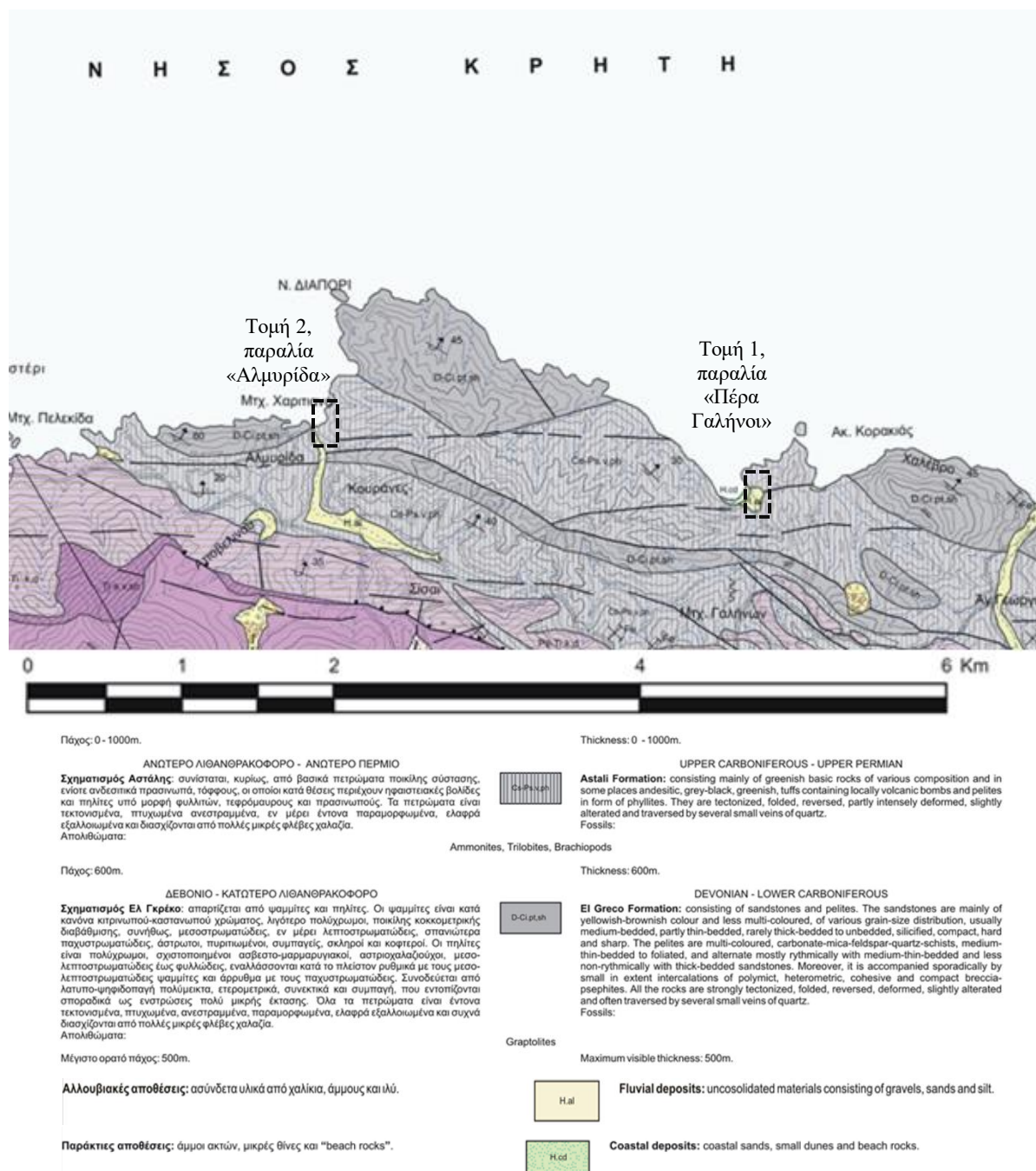
Εικόνα 5.29 : Δορυφορική φωτογραφία του δυτικού προφίλ.

5.2.2. Γεωλογικά στοιχεία της περιοχής.

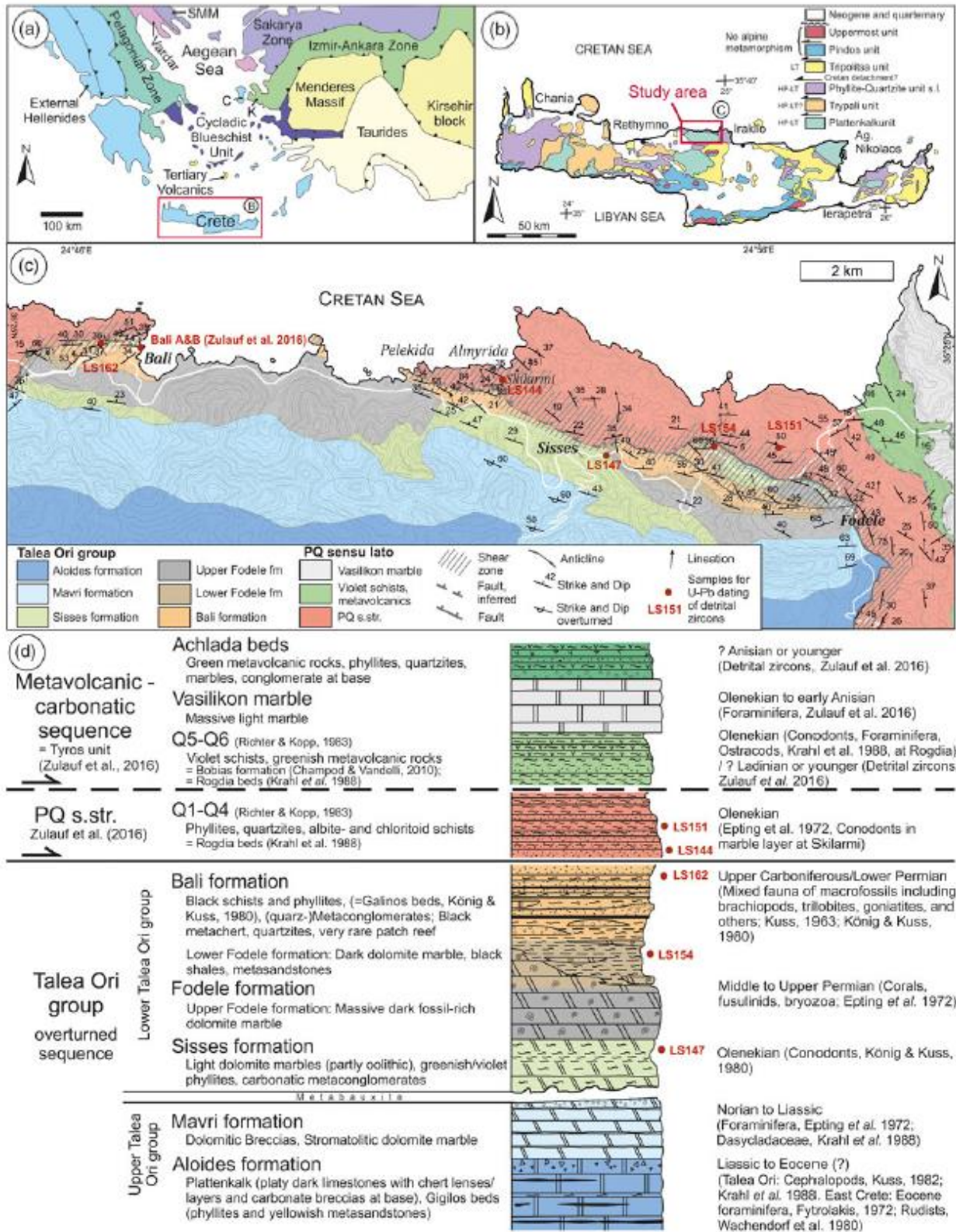
Στην περιοχή που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις κυριαρχούν τμήματα Φυλλίτη – Χαλαζίτη, τα πετρώματα είναι έντονα τεκτονισμένα, πτυχωμένα, ανεστραμμένα, ενίοτε παραμορφωμένα και ελαφρά εξαλλοιωμένα. Συγκεκριμένα εντοπίζεται ο Σχηματισμός Αστάλης, ο οποίος αποτελείται από ανδεσιτικούς σχηματισμούς πράσινου χρώματος, περιέχει φυλλίτες και διασχίζεται από φλέβες χαλαζία. Στα δυτικά της παραλίας Αλμυρίδας αλλά και μεταξύ της και της παραλίας Πέρα Γαλήνοι, δηλαδή ανάμεσα στα δύο πεδία των μετρήσεων, παρατηρούμε Σχηματισμό Ελ Γκρέκο που αποτελείται κυρίως από ψαμμίτες κιτρινωπού χρώματος και πηλίτες και διασχίζεται από φλέβες χαλαζία όπως και ο Σχηματισμός Αστάλης. Ακριβώς δίπλα στην παραλία Πέρα Γαλήνοι υπάρχουν αλλουβιακές αποθέσεις μικρής έκτασης που απαρτίζονται από χαλίκια, άμμο και ίλυ, όπως και παραλιακές αποθέσεις αποτελούμενες από άμμο, μικρές θίνες και χαλίκια.



Εικόνα 5.30 : Γεωλογικός χάρτης της Κρήτης, εμφανής η περιοχή των μετρήσεων σε μαύρο πλαίσιο (Martha et al., 2019).



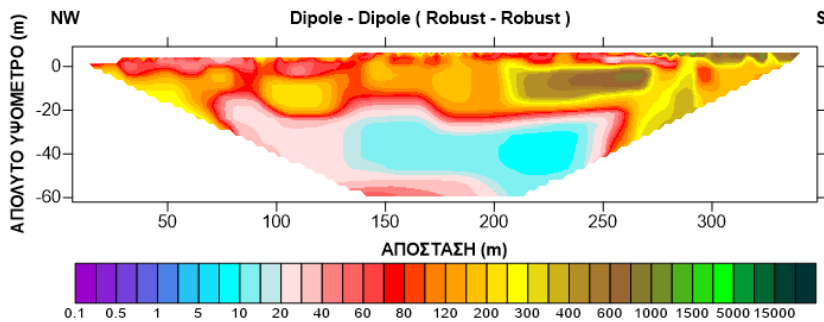
Εικόνα 5.31 : Γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ, τμήμα από το φύλλο «Ανώγεια», κλίμακα 1:50000, εμφανής η περιοχή των μετρήσεων(μαυρο πλαίσιο).



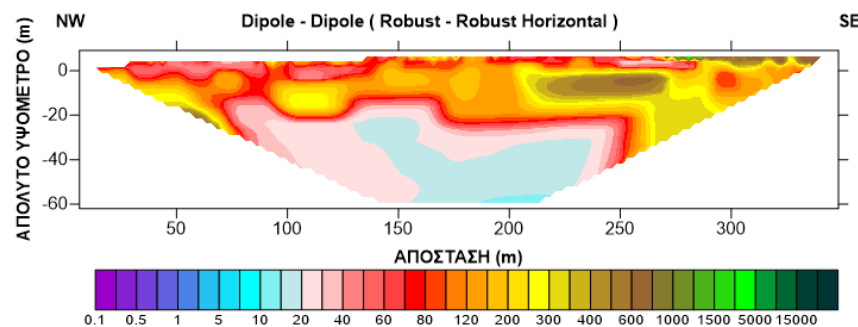
Εικόνα 5.32 : Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής των μετρήσεων, από κάτω ανέφρονται οι παρατηρούμενοι γεωλογικοί σχηματισμοί (Seybold et al., 2019).

5.2.3. Γεωηλεκτρικές Τομογραφίες

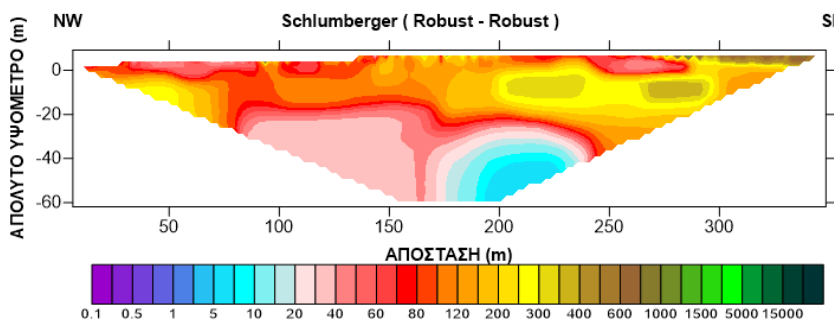
5.2.3.1. Γεωηλεκτρικές τομές πλησίον της παραλίας Αλμυρίδας



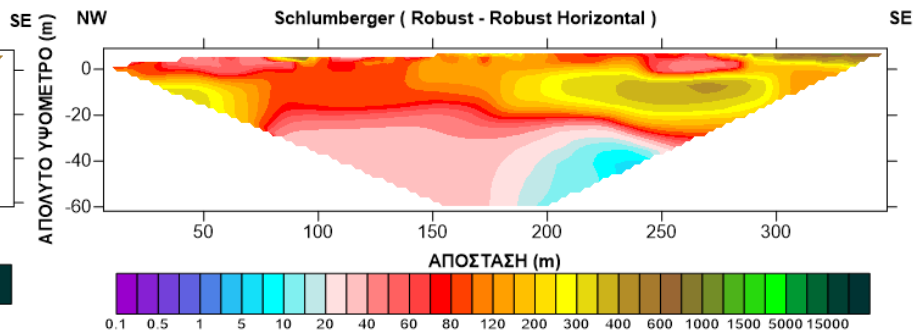
Εικόνα 5.33 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust)



Εικόνα 5.34 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust Horizontal)

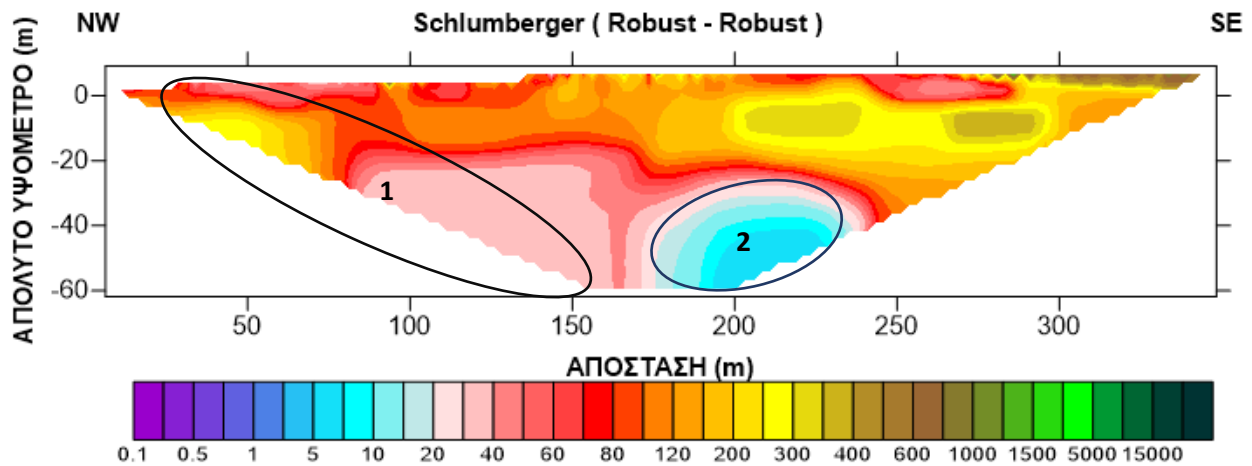


Εικόνα 5.35 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust)

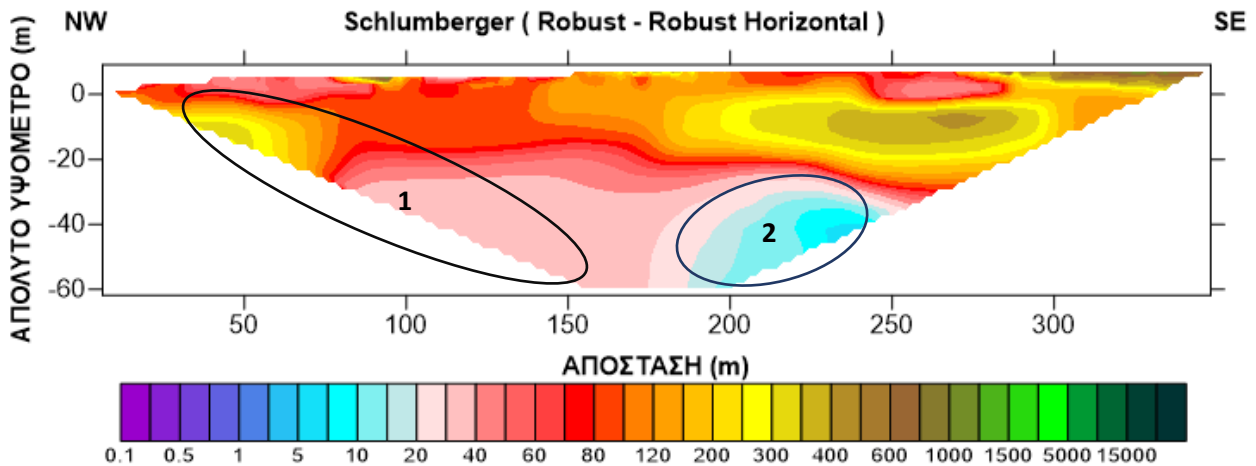


Εικόνα 5.36 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust Horizontal)

Όπως είναι αναμενόμενο, οι τομές Schlumberger μας δίνουν πιο αξιόπιστη εικόνα για την στρωματογραφία του υπεδάφους. Στην περιοχή ο κυριαρχεί ο γεωλογικός Σχηματισμός Αστάλης. Παρατηρούμε ότι στην ΒΔ πλευρά της τομής στην *περιοχή 1*, δηλαδή στο παράκτιο τμήμα, οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δεν είναι χαμηλές αλλά αντιθέτως είναι αρκετά ψηλές ακόμα και αρκετές δεκάδες μέτρα κάτω από την στάθμη της θάλασσας. Αυτό οφείλεται στην χαμηλή διαπερατότητα του φυλλίτη που υπάρχει στον σχηματισμό ο οποίος δεν επιτρέπει την διείσδυση του θαλασσινού νερού. Προς την ΝΑ κατεύθυνση βλέπουμε στην *περιοχή 2* χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτό πιθανότατα οφείλεται σε διείσδυση θαλασσινού νερού σε βάθος μεγαλύτερο από αυτό που μας επέτρεψαν οι συνθήκες εντοπίσουμε ή υπάρχει διείσδυση νερού από κάποια πλευρικό πεδίο στο οποίο δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις όπως την πεδιάδα στο Νότο ή τον λόφο στα ΒΔ του πεδίου.

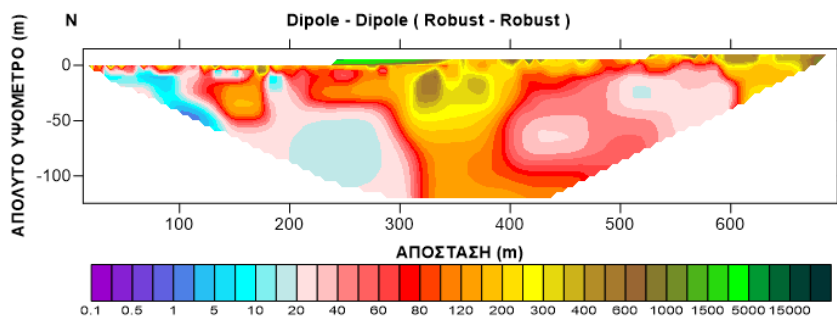


Εικόνα 5.37 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust).

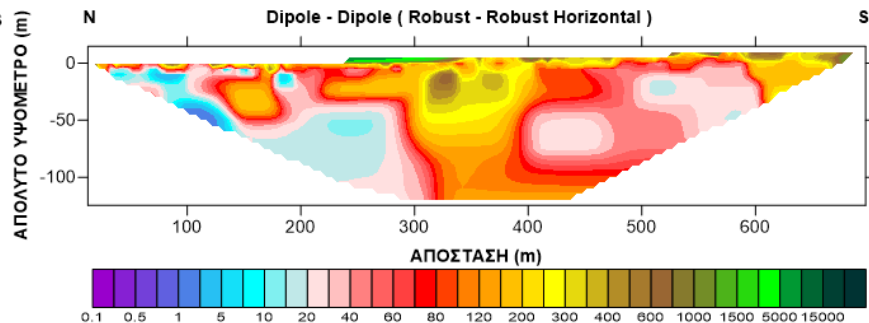


Εικόνα 5.38 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust Horizontal).

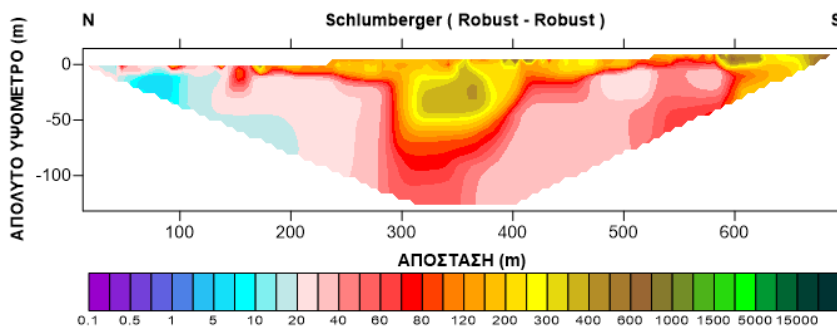
5.2.3.2. Γεωηλεκτρικές τομές πλησίον της παραλίας Πέρα Γαλήνοι



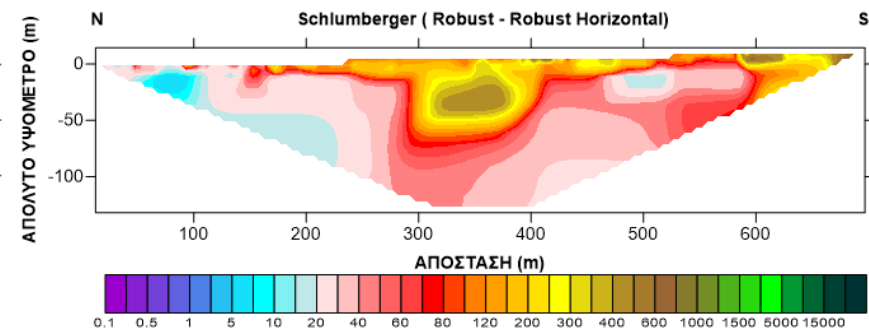
Εικόνα 5.39 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust) .



Εικόνα 5.40 : Τομή Dipole-Dipole (Robust-Robust Horizontal).

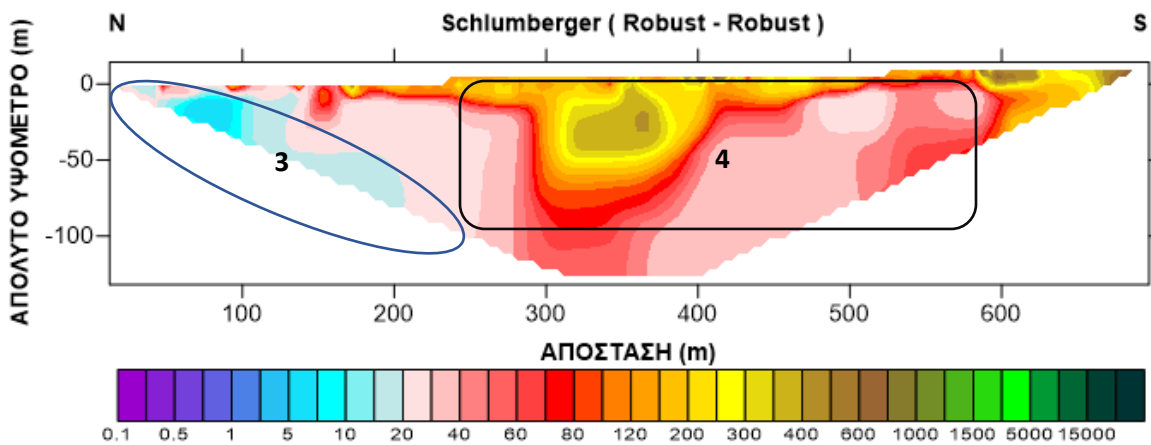


Εικόνα 5.41 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust).

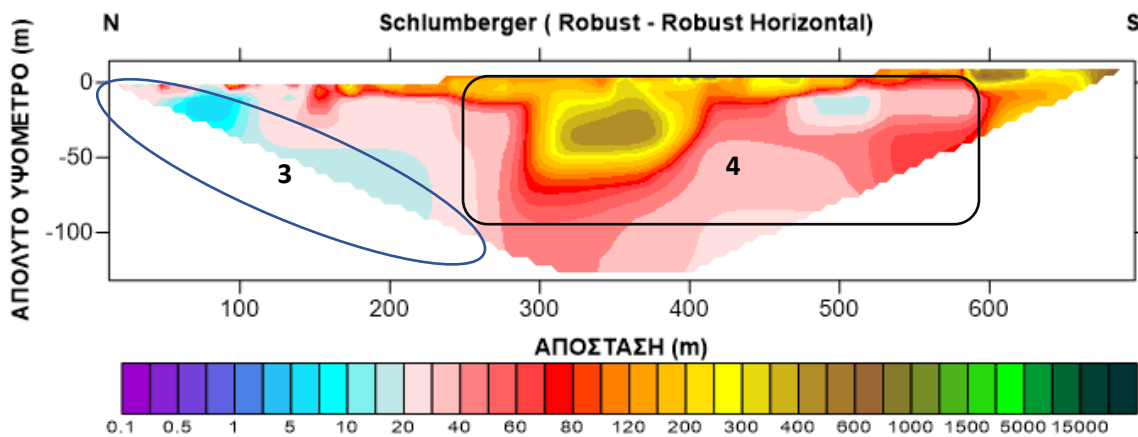


Εικόνα 5.42 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust Horizontal).

Λόγω του μεγαλύτερου μήκους της τομής σε αυτό το πεδίο έχουμε την ικανότητα να δούμε την στρωματογραφία σε μεγαλύτερο βάθος. Οι διάταξη Schlumberger είναι πάλι εκείνη που μας δίνει τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες μετρήσεις, εδώ παρατηρούμε κατευθείαν στην *περιοχή 3*, πλησίον της ακτής, πολύ χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κάτι που υποδεικνύει την ύπαρξη διείσδυσης θαλασσινού νερού. Η διείσδυση αυτή πιθανότατα οφείλεται στην ύπαρξη αλλουβιακών και παράκτιων αποθέσεων πλευρικά στα δυτικά της τομής. Οι παραπάνω σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές διαπερατότητας σε αντίθεση με τον φυλλίτη που υπάρχει στην παραλία Αλμυρίδα όπου και δεν επιτρέπει την διείσδυση. Όσο συνεχίζουμε νότια και απομακρυνόμαστε από την ακτή, αρχίζουμε να συναντάμε ξανά τον φυλλίτη του Σχηματισμού Αστάλης στην *περιοχή 4*, με αποτέλεσμα να βλέπουμε μεγάλη ανομοιογένεια και αύξηση στις τιμές των μετρήσεων ακόμα και σε βάθος κάτω από τα -100m.



Εικόνα 5.43 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust).



Εικόνα 5.44 : Τομή Schlumberger (Robust-Robust Horizontal).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6. Συμπεράσματα και Σχόλια

Ο σκοπός της έρευνας ήταν η απεικόνιση σε μεγάλο βάθος της στρωματογραφίας των περιοχών, στην Νήσο Σταχτορρόη και στη Κρήτη, σε σχέση με την ηλεκτρική αγωγιμότητα τους μέσω της μεθόδου της Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας.

Το πρώτο βήμα μας ήταν να συλλέξουμε πληροφορίες για την γεωλογία της περιοχής και να ανατρέξουμε σε πιθανές παλαιότερες μετρήσεις στα ίδια πεδία. Έπειτα αναζητήσαμε παραπλήσιες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί διεθνώς. Στα πλαίσια της εργασίας ανατρέξαμε σε τέσσερις σχετικές περιπτώσεις οι οποίες παρουσιάζονται.

Στην Νότια Ιταλία, συγκεκριμένα στην περιοχή Μπαζιλικάτα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ώστε να διερευνηθεί η διείσδυση θαλασσινού νερού κατά μήκος της ακτογραμμής του Ιονίου πελάγους. Η έρευνα έγινε με σκοπό να καταπολεμηθεί η οικολογική καταστροφή που έχει δημιουργήσει η παρουσία ενός μετώπου υφαλμύρινης στον υδροφόρο ορίζοντα με αποτέλεσμα την μόλυνση του με άλατα και μειώνοντας το διαθέσιμο νερό για αγροτικές χρήσεις. Η μέθοδος ERT χαρακτήρισε ακριβώς τον βαθμό και την έκταση της μόλυνσης.

Στα παράλια της Μαλαισίας εφαρμόστηκε η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ώστε να εντοπιστεί η διείσδυση της θάλασσας στον υπόγειο υδροφορέα που μειώνει τα αποθέματα σε πόσιμο νερό και προκαλεί ιατρικά προβλήματα στον πληθυσμό της περιοχής. Η γεωφυσική διασκόπηση αποτύπωσε με λεπτομέρεια και με χαμηλότερο κόστος το πρόβλημα, από τις γεωτρήσεις που θα γινότουσαν αρχικά.

Στην Σαουδική Αραβία υλοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας σε πάνω από σαράντα περιοχές με τον σκοπό της εγκατάστασης ενός συστήματος γείωσης ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών, ώστε να εντοπιστεί το καταλληλότερο περιβάλλον. Οι τομές έδειξαν ένα μεγάλο φάσμα τιμών και θα αξιοποιηθούν για την κατασκευή του συστήματος γείωσης στο μέλλον.

Στην ΒΑ Ινδία εφαρμόστηκε η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε συνδυασμό με μαγνητοτελλουρικές μετρήσεις σε επιλεγμένα πεδία εγκατάστασης ηλεκτροδίων γείωσης. Το αποτέλεσμα ήταν μία εξαιρετική απεικόνιση μέχρι τα 120m μόνο από τις τομές της γεωηλεκτρικής τομογραφίας ενώ οι μαγνητοτελλουρικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για πολύ μεγαλύτερο βάθος.

Με βάση τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι η μέθοδος της γεωηλεκτρικής τομογραφίας μπορεί να αποδώσει τα αποτελέσματα που αναζητάμε και να εκπληρώσει τον σκοπό της έρευνας μας.

Η λήψη των των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πραγματοποιήθηκε μέσω οργάνου SYSCALPro. Η επεξεργασία των δεδομένων της συγκεκριμένης, αλλά και όλων των επερχόμενων μετρήσεων, έχει γίνει μέσω του προγράμματος RES2DINV. Για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε η διαδικασία Robust-Robust και η Robust-Robust Horizontal για να έχουμε έμφαση

στην στρωματογραφία. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν χάρτες contour μέσω του λογισμικού Surfer για την τελική απεικόνιση του υπεδάφους της υπό έρευνα περιοχής.

Οι γεωηλεκτρικές τομές που προέκυψαν από τα δεδομένα των μετρήσεων απεικονίζουν με υψηλή ακρίβεια την στρωματογραφία των περιοχών εγκατάστασης του συστήματος ηλεκτροδίων γείωσης, ειδικά αν λάβουμε υπόψιν τις αντίξοες συνθήκες που αντιμετωπίστηκαν στο πεδίο. Όπως ήταν αναμενόμενο οι τομές Schlumberger αποδείχθηκαν οι βέλτιστες για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και τον χαρακτηρισμό του υπεδάφους, ειδικά στις περιοχές της Κρήτη όπου απεικονίζουν ξεκάθαρα την ύπαρξη φυλλιτικών σχηματισμών που μερικώς εμποδίζει την διείσδυση του θαλασσινού νερού.

Είναι πλέον ξεκάθαρο ότι μέθοδος της Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας όσο και η ευρύτερη επιστήμη της εφαρμοσμένης γεωφυσικής έχει εξαιρετικά πολύτιμη συνεισφορά στο έργο ενός μηχανικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

7. Βιβλιογραφία

- Αποστολόπουλος, Γεώργιος. Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής. Αθήνα, 2013, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Βλασσοπούλου, Αγγελική, Σταθοπούλου, Κατερίνα. Γεωφυσική Έρευνα στην Κοιλάδα του Θορικού για τον Εντοπισμό της Στρωματογραφίας και του Μετώπου Υφαλμύρινσης. Αθήνα 2014, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Γαρμπή, Ευσταθία. Γεωφυσική Έρευνα στην Περιοχή Αρχαίου Ναού της Αρτέμιδος Αττικής. Αθήνα 2019, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Πλατανά, Ευστρατία. Γεωφυσική Διασκόπηση για τον Χαρακτηρισμό των Γεωλογικών Σχηματισμών σε Οικόπεδο στην Περιοχή των Μεγάρων Αττικής. Χανιά 2013, διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Παπαδοπούλου, Μυρτώ. Γεωφυσική Έρευνα στη Μονή Καισαριανής για την Επίλυση Γεωτεχνικών Προβλημάτων. Αθήνα, 2015, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Σακαλίδη, Αλεξάνδρα-Ελπίς. Γεωφυσική Έρευνα στην Περιοχή Αρχαίου Ναού της Αρτέμιδος Αττικής. Αθήνα 2019, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Everett, Mark E. Near-Surface Applied Geophysics. Cambridge 2013, Cambridge University Press
- Hazreek, Z.A.M. Alel, M.N.A, Yusof, M.F, Fahmy, K.A. Saad, R., Nordiana, M.M. Hafiz, Z. Seawater Intrusion Mapping using Electrical Resistivity Imaging (ERI) at Malaysian Coastal Area. 2018, International Journal of Civil Engineering and Technology.
- Kearey, P. Brooks, M. Hill, I. An Introduction to Geophysical Exploration. 2002, Blackwell Science Ltd Editorial Offices.
- Malik, N.H. Al-Arainy, A.A. Qureshi, M.I. Anam, M.S. Measurements of Earth Resistivity in Different Parts of Saudi Arabia for Grounding Installations.
- Manglik, A. Verma, S.K Muralidharan, D. Sasmal, R.P. Electrical and Electromagnetic Investigations for HVDC Ground Electrode Sites in India. India 2011, National Geophysical Research Institute.
- Satriani, A. Loperte, A. Proto, M. Electrical Resistivity Tomography for Coastal Salt Water Intrusion Characterization Along the Ionian Coast of Basilicata Region (Southern Italy). 2011, Institute of Methodologies of Environmental Analysis.
- CIGRE, General Guidelines for HVDC Electrode Design, 2017
- Surfer, Full User's Guide. 2019, Εγχειρίδιο Χρήσης Λογισμικού, Golden Software, Colorado, USA
- RES2DINV, 2D Resistivity and IP Inversion. 1995-2001, Εγχειρίδιο Χρήσης Λογισμικού, Geotomo Software, Malaysia.