



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΚΡΟΤΚΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΣΤΗ
ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΟΙΚΙΣΜΟΥ ΠΕΡΙΒΟΛΙ ΓΡΕΒΕΝΩΝ ΜΕ
ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



[1]



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2024

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	7
2.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ	7
2.1.1 Βασικές αρχές γεωηλεκτρικών μεθόδων	9
2.1.2 Ηλεκτρική τομογραφία	14
2.1.3 Λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΕΔΟΜΕΝΑ	19
3.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	19
3.1.1 Γεωλογικά & γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της περιοχής	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ.....	24
4.1 ΤΡΟΠΟΣ ΛΗΨΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	24
4.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	27
4.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	31
5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ	31
5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	41

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο την μελέτη κατολισθητικών φαινομένων στην περιοχή Περιβόλι, Γρεβενών.

Σκοπός της εργασίας ήταν η εύρεση, μέτρηση και ανάλυση των χαρακτηριστικών του συγκεκριμένου κατολισθητικού φαινομένου μέσω της χρήσης γεωηλεκτρικών μεθόδων διασκόπησης. Οι διαδικασίες που έλαβαν χώρα ήταν, αρχικά η επί τόπου οριοθέτηση και καταγραφή των χαρακτηριστικών της κατολίσθησης τόσο μέσω της υπαίθριας παρατήρησης όσο και μέσω της μετέπειτα χρήσης κατάλληλου εξοπλισμού για την μέτρηση των ηλεκτρικών αντιστάσεων του υπεδάφους. Ακολούθησε η ανάλυση των γεωηλεκτρικών μετρήσεων που καταγράφηκαν στο πεδίο μέσω της χρήσης ανοιχτού λογισμικού αντιστροφής γεωηλεκτρικών δεδομένων και τέλος έγινε προσπάθεια ερμηνείας των αποτελεσμάτων με στόχο την καλύτερη κατανόηση του υποβάθρου αλλά και των πλευρικών ορίων του συγκεκριμένου φαινομένου.

Για το εργαστηριακό κομμάτι της έρευνας χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των υλικών της κατολίσθησης και των υπόλοιπων γεωλογικών σχηματισμών που μετρήθηκαν με τη χρήση του Syscal Pro (IRIS Instruments) αλλά και τα τοπογραφικά δεδομένα από τη χρήση διαφορικού GPS της Trimble GNSS System. Επιπλέον έγινε χρήση απαραίτητου για τις μετρήσεις εξοπλισμού όπως μετροταινίες, ηλεκτρόδια και ειδικά καλώδια για την επίτευξη των μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν τη γεωμετρία του υποβάθρου της κατολίσθησης καθώς και τα πάχη των στρωμάτων που συντελούν στο γεωτεχνικό φαινόμενο. Αξίζει να αναφερθεί ότι επιπλέον έρευνα με χρήση μεγαλύτερης έκτασης λήψης γεωηλεκτρικών μετρήσεων είναι δυνατόν να δώσει τόσο τα πλευρικά όρια της κατολίσθησης όσο και παραπάνω πληροφορίες για το φαινόμενο, οι οποίες χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης λόγω του ότι το φαινόμενο επηρεάζει το οδικό δίκτυο, το οποίο συνδέει απομακρυσμένες περιοχές με τον κεντρικό οδικό άξονα της χώρας.



ABSTRACT

The present thesis focused on the study of landslide phenomena in the area of Perivoli, Grevena.

The aim of this research was to identify, measure, and analyze the characteristics of this specific landslide phenomenon through the use of geoelectrical surveying methods. The processes involved the on-site delineation and documentation of the landslide's features, both through field observation and later through the use of suitable resistivity meter, to record subsurface resistivity. Following this, an analysis of the geoelectrical measurements collected in the field was carried out using open-source geoelectrical data inversion software and finally the interpretation of the results, with the goal of better understanding the subsurface as well as the lateral boundaries of the phenomenon.

As for the experimental part of the research, we used the resistivity data collected in situ with the use of the Syscal Pro instrument (IRIS Instruments) and the topography data acquired with differential GPS by Trimble GNSS System. Additionally, essential hardware such as measuring tapes, electrodes, and specialized cables were employed to carry out the measurements.

The results highlighted the geometry of the subsurface of the landslide as well as the thicknesses of the layers contributing to this geotechnical phenomenon. It is worth noting that further research, using a wider range of geoelectrical measurements, could provide information on both the lateral boundaries of the landslide and additional details about the phenomenon. These require further investigation, as the phenomenon poses a threat the road network connecting remote areas to the country's main highway



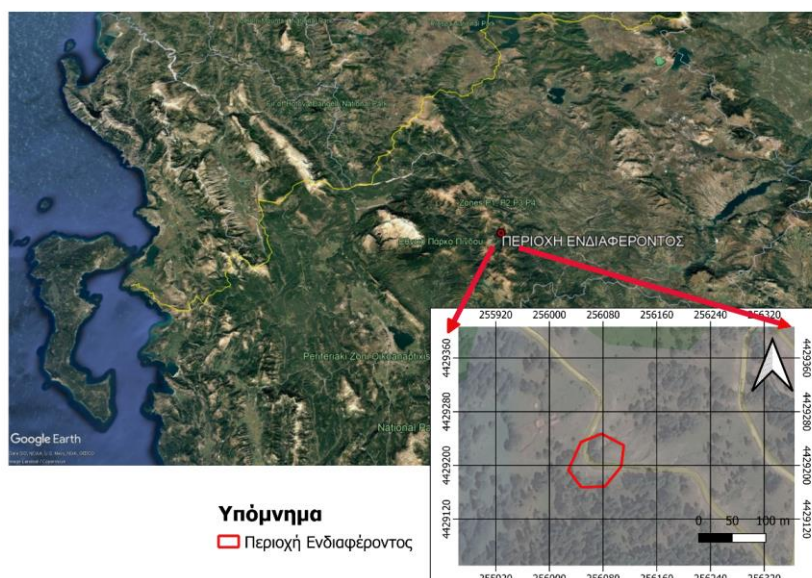
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας του Τμήματος Γεωλογίας, του Τομέα Γεωφυσικής, από τη φοιτήτρια Κρότκα Κωνσταντίνα υπό την εποπτεία του ΕΔΙΠ του Τομέα Γεωφυσικής ΑΠΘ, Φίκου Ηλία.

Σκοπός της εργασίας είναι η συμβολή στη μελέτη κατολισθητικού φαινομένου στον οικισμό Περιβόλι Γρεβενών με την γεωφυσική μέθοδο διασκόπησης της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η γεωφυσική έρευνα αποσκοπεί στον προσδιορισμό των ορίων πλευρικά και σε βάθος του όγκου που κατολισθαίνει.

Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή έξω από τον οικισμό Περιβόλι μετρήσεις Ηλεκτρικής αντίστασης με εφαρμογή της μεθόδου Ηλεκτρικής Τομογραφίας. Για την λήψη των μετρήσεων έγινε χρήση συστήματος μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της επαγόμενης πόλωσης της εταιρείας IRIS Instruments – μοντέλο Syscal Pro ενώ η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με την χρήση του ανοιχτού λογισμικού αντιστροφής γεωηλεκτρικών δεδομένων Resistivity Inversion in Python (ResIPy).

Για την παρούσα εργασία βοήθησαν ο κύριος Παπαθανασίου Γεώργιος, καθηγητής Τμήματος Γεωλογίας, με τις γεωλογικές και γεωτεχνικές του γνώσεις. Αλλά και οι φοιτητές Αναγνώστου Ευάγγελος, Κάκκας Νικόλαος, Καραχάλιου Αθανασία-Θεοδώρα και Σαμαρά Δόμνα που συνέβαλλαν για την λήψη γεωηλεκτρικών μετρήσεων στο πεδίο.



Σχήμα 1: Χάρτης Προσανατολισμού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η Εφαρμοσμένη Γεωφυσική είναι κλάδος των γεω-επιστημών που σαν αντικείμενο μελέτης έχει τη δομή των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού με την εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων και με σκοπό τον εντοπισμό δομών οικονομικού ή και άλλου ενδιαφέροντος. Ο κλάδος αυτός άνθισε ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια χάρη στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και πληροφορικής που συνδέονται άμεσα με τον τομέα αυτόν.

Βάση του τρόπου μέτρησης των φυσικών ιδιοτήτων των σχηματισμών του υπεδάφους- οι γεωφυσικές μέθοδοι διακρίνονται σε ενεργητικές και παθητικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης- ανάλογα με τα παραγόμενα σήματα που καταγράφονται. Επιπρόσθετα οι μέθοδοι διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με τη φυσική ιδιότητα που παρατηρείται σε κάθε περίπτωση. Κάποιες από τις πιο συχνά εφαρμοζόμενες μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης είναι: Σεισμικές (διάθλαση, ανάκλαση, MASW), Βαρυτικές, Μαγνητικές, Ηλεκτρομαγνητικές και Ηλεκτρικές Μέθοδοι.

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις αποσκοπούν στην αναγνώριση των δομών του υπεδάφους και σε στόχους που υπάρχουν σ' αυτό. Χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς για αναζήτηση και εντοπισμό στόχων όπως στην μεταλλευτική έρευνα, στην γεωτεχνική μελέτη, στην υδρογεωλογία, στην περιβαλλοντική μελέτη ακόμα και στην αρχαιολογία. Κύρια προϋπόθεση χρήσης γεωφυσικής διασκόπησης είναι ο στόχος μελέτης να εμφανίζει εμφανή διαφορά κάποιας φυσικής του ιδιότητας -αυτή που μελετάται κάθε φορά- με το περιβάλλον στο οποίο φιλοξενείται. (Παπαζάχος Κ. et. al.,2013)

2.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

Οι γεωηλεκτρικές μέθοδοι έχουν υπάρξει ιδιαίτερα σημαντικές κυρίως για τις μικρού βάθους διασκοπήσεις με σκοπό τον εντοπισμό θαμμένων στόχων, οι οποίοι εμφανίζονται αγωγίμοι ή αντιστατικοί και ανθεκτικοί στην φύση. Η φυσική ιδιότητα που μελετάται στις ηλεκτρικές μεθόδους είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, η

[7]

αντίσταση δηλαδή που εμφανίζουν οι δομές - γεωλογικοί σχηματισμοί στην ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Η κατανομή αυτής εξαρτάται από την γεωλογία της περιοχής αλλά και από άλλους παράγοντες όπως η περιεκτικότητα των σχηματισμών σε ορυκτά, ρευστά, το πορώδες και τον βαθμό κορεσμού των πετρωμάτων σε νερού.

Οι γεωηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως σε τομείς όπως υδρογεωλογία, περιβαλλοντικές μελέτες για τον εντοπισμό και χαρτογράφηση ρύπων και εφαρμοσμένη γεωλογία- για προσδιορισμό κυρίως ορίων μεταξύ των σχηματισμών. Στις ηλεκτρικές μεθόδους πραγματοποιούνται τρεις κύριοι τρόποι λήψης δεδομένων, αυτές είναι η όδευση, η βυθοσκόπηση και η ηλεκτρική τομογραφία. Η όδευση αποσκοπεί στην μελέτη στρωμάτων στο ίδιο βάθος και σκοπός της είναι ο εντοπισμός των πλευρικών μεταβολών των σχηματισμών. Από την άλλη πλευρά η βυθοσκόπηση λαμβάνει μετρήσεις με το βάθος, μελετάται δηλαδή κατά βάθος μεταβολή των σχηματισμών. Οι δύο αυτές μέθοδοι εμφανίζουν μονοδιάστατα δεδομένα, η πρώτη μέθοδος εμφανίζει τα δεδομένα στον οριζόντιο άξονα ενώ η δεύτερη τα εμφανίζει στον κατακόρυφο άξονα (βάθος). Στην μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιείται συνδυασμός των δύο παραπάνω τρόπων μέτρησης. Έτσι λαμβάνεται ένα δισδιάστατο μοντέλο κατανομής ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων στην περιοχή μελέτης.

Η ηλεκτρική τομογραφία αποτελεί σημαντικό εργαλείο διερεύνησης των υπεδάφινων σχηματισμών. Η ευρεία χρήση της μεθόδου αυτής οφείλεται στα ιδιαίτερα πλεονεκτήματά της καθώς δεν είναι επεμβατική, παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες ιδιαιτέρως για μικρά βάθη καθώς και τρισδιάστατες εικόνες του υπεδάφους. Ωστόσο η λήψη των μετρήσεων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες γεγονός που καθιστά περίπλοκη την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Για τον λόγο αυτό είναι σημαντικό να υπάρχει πληθώρα πληροφοριών για την κάθε περιοχή μελέτης σχετικά με την υδρολογική κατάσταση αυτής, την γενική λιθολογία της καθώς και την τεκτονική της. Πριν την λήψη μετρήσεων σε μία περιοχή είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την γεωλογική κατάσταση αυτής προκειμένου να αποφευχθούν πιθανά προβλήματα στο πεδίο αλλά και για να ληφθεί μία πιο έγκυρη εικόνα των δεδομένων μέτρησης.

2.1.1 Βασικές αρχές γεωηλεκτρικών μεθόδων

Οι γεωηλεκτρικές μέθοδοι είναι γεωφυσικές τεχνικές που αποσκοπούν στην μελέτη των ιδιοτήτων του υπεδάφους μέσω της μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης των γεωλογικών σχηματισμών. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην παρουσία διαφορετικών γεωλογικών σχηματισμών ή και διαφορετικής σύστασης αυτών, οι οποίοι εμφανίζουν και διαφορετικές τιμές ηλεκτρικών ιδιοτήτων και έτσι μπορεί να γίνει ποιοτική ερμηνεία του υπεδάφους χώρου.

Όπως έχει αναφερθεί στην ηλεκτρική μέθοδο προσδιορίζεται η ηλεκτρική αντίσταση ή η ηλεκτρική αγωγιμότητα των γεω-σχηματισμών. Η φυσική αυτή ιδιότητα αφορά την αντίσταση που εμφανίζουν οι σχηματισμοί στην διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος. Για την καταμέτρηση των αντιστάσεων αυτών λαμβάνεται υπόψιν ο θεμελιώδης νόμος του Ohm. Ο νόμος αυτός δηλώνει ότι η διαφορά δυναμικού V ισούται με την ένταση ηλεκτρικού ρεύματος I πολλαπλασιασμένο με την αντίσταση R του υλικού το οποίου διαπερνά το ρεύμα ($V=I \cdot R$). Από τις τιμές αυτές η ένταση του ρεύματος I ελέγχεται από τον χειριστή της μέτρησης, ενώ κατά την διαδικασία μετράται από την συσκευή χρήσης η διαφορά δυναμικού V και έτσι είναι δυνατός ο προσδιορισμός της αντίστασης R των γεωυλικών. (Παπαζάχος Κ. et al., 2013)

Για όλες τις ενεργητικές ηλεκτρικές μεθόδους απαιτείται εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος στον υπεδάφιο χώρο προκειμένου να μετρηθούν οι αντιστάσεις των σχηματισμών. Η εισαγωγή αυτή επιτυγχάνεται μέσω των ηλεκτροδίων ηλεκτρικού ρεύματος συνήθως μόνο δύο σε κάθε μέθοδο. Η διάδοση ωστόσο αυτού μέσα στο υπέδαφος πραγματοποιείται με δύο κύριους τρόπους:

- a. Ηλεκτρολυτική Αγωγιμότητα, η διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος γίνεται μέσω των ιόντων αλάτων και ορυκτών τα οποία βρίσκονται διαλυμένα μέσα στο νερό που είναι εγκλωβισμένα στο πορώδες των γεωλογικών σχηματισμών. Σε αυτόν τον τρόπο προαπαιτείται παρουσία υγρού στοιχείου στο υπέδαφος.
- b. Ηλεκτρονική Αγωγιμότητα (Ohmic Conduction), η διάδοση του ρεύματος γίνεται μέσω των ελεύθερων ηλεκτρονίων που βρίσκονται στην κρυσταλλική

δομή των πετρωμάτων και των ορυκτών. Για αυτόν τον τρόπο διάδοσης του ηλεκτρικού ρεύματος δεν υπάρχει προϋπόθεση ύπαρξης νερού στον υπεδάφιο χώρο αφού η διάδοση γίνεται μέσω των σχηματισμών. (Τσούρλος Π., 2021)

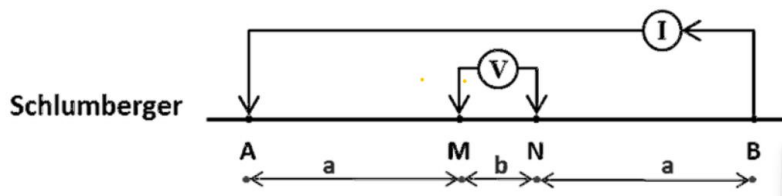
Στην διενέργεια της μεθόδου γίνεται μελέτη της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης. Η ποσότητα αυτή ορίζεται ως η ηλεκτρική αντίσταση (R) που εμφανίζει ο σχηματισμός ανά μονάδα όγκου (V) και ορίζεται : $\rho = (V \cdot A) / (I \cdot L) = R(A/L)$ - όπου οι παράγοντες A και L αναφέρονται στην γεωμετρία- και σαν μονάδες έχει $\Omega m \cdot m$.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες και έτσι είναι μια ιδιαίτερα ευμετάβλητη ιδιότητα. Για την ερμηνεία των δεδομένων καταγραφής είναι απαραίτητη η γνώση των ειδικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή μελέτης που έχουν αν κάνουν με την γεωλογία, την υδρογεωλογική κατάσταση, την λιθολογία κ.ά. Ορισμένοι από τους παράγοντες είναι η παρουσία νερού, η χημική σύσταση αυτού, το πορώδες των γεωλογικών σχηματισμών.

Κατά την διενέργεια της μεθόδου αυτής γίνεται εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος και μέτρηση της διαφοράς δυναμικού με την χρήση 4 μεταλλικών ηλεκτροδίων. Η διάταξη των ηλεκτροδίων αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων των μετρήσεων. Έτσι υπάρχουν διάφορες διατάξεις (τρόποι τοποθέτησης των ηλεκτροδίων στο χώρο) με συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα η κάθε μια, που επιλέγονται ανάλογα τη περίπτωση. Από τις πιο διαδεδομένες διατάξεις που χρησιμοποιούνται είναι οι: Schlumberger, Wenner, Διπόλου- Διπόλου, Πόλου-Διπόλου και η πολλαπλής βαθμίδας. (Τσούρλος Π., 2021)

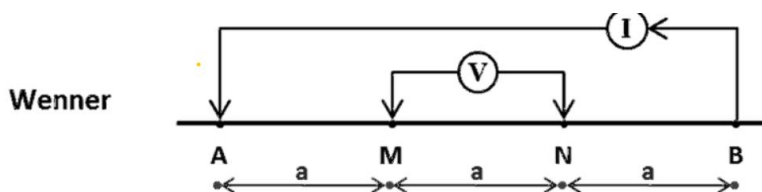
Η διάταξη Schlumberger χρησιμοποιεί τέσσερα ηλεκτρόδια σε ευθεία γραμμή, τα δύο εισάγουν ηλεκτρικό ρεύμα και βρίσκονται στα εξωτερικά άκρα της διάταξης και τα άλλα δύο εσωτερικά της διάταξης ηλεκτρόδια μετράνε την διαφορά δυναμικού. Σε μία τυπική διάταξη τα δύο εσωτερικά ηλεκτρόδια καταγραφής παραμένουν σταθερά και βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους (b). Ενώ τα ηλεκτρόδια εισαγωγής ρεύματος μετακινούνται και απομακρύνονται από το κέντρο

συμμετρίας της διάταξης παρουσιάζοντας μεγάλες αποστάσεις από τα ηλεκτρόδια μέτρησης δυναμικού (a). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η κατά βάθος διασκόπηση ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους της περιοχής μελέτης. Έτσι η διάταξη αυτή αποτελεί ιδανική επιλογή για την μελέτη της μεταβολής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος (βυθοσκόπησης) μιας περιοχής. Η διάταξη αυτή ακόμα εμφανίζει πρακτικά και θεωρητικά πλεονεκτήματα εξαιτίας της απαίτησης μετακίνησης δύο μόνο ηλεκτροδίων καθώς και της ευαισθησίας στις μεταβολές των αντιστάσεων με το βάθος.



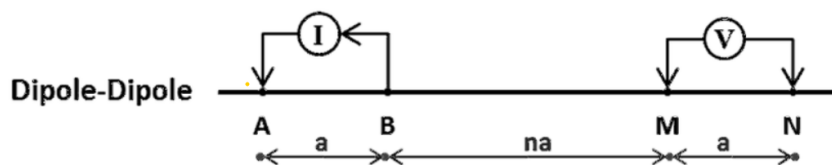
Σχήμα 2: Θέσεις ηλεκτροδίων με την διάταξη Schlumberger

Η διάταξη Wenner χρησιμοποιεί τέσσερα ηλεκτρόδια τοποθετημένα σε ευθεία γραμμή με ίσες αποστάσεις μεταξύ αυτών (a). Έτσι κατά την διάταξη αυτή τοποθετούνται στις άκρες της διάταξης τα ηλεκτρόδια εισαγωγής ρεύματος ενώ στο εσωτερικό αυτής βρίσκονται τα ηλεκτρόδια μέτρησης διαφοράς δυναμικού. Το κάθε ηλεκτρόδιο απέχει ίση απόσταση από το επόμενο ηλεκτρόδιο της διάταξης. Με τον τρόπο αυτό γίνεται δυνατή η διασκόπηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων σε ένα συγκεκριμένο βάθος. Όπως και με τη προηγούμενη διάταξη η αύξηση των αποστάσεων των ηλεκτροδίων αυξάνει το βάθος διασκόπησης ενώ η μετακίνηση των ηλεκτροδίων διατηρώντας σταθερή την απόσταση αυτών επιτυγχάνει η μελέτη της πλευρικής μεταβολής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων και άρα την πλευρική αλλαγή των γεωλογικών σχηματισμών.



Σχήμα 3: Θέσεις ηλεκτροδίων με την διάταξη Wenner

Στην διάταξη διπόλου- διπόλου χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια από τα οποία -όπως και στις προαναφερθείσες διατάξεις- δύο είναι για εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και δύο για μέτρηση της διαφοράς δυναμικού. Η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων γίνεται κατά ζεύγη σε ευθεία γραμμή και διατηρούν σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Η απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίων ζεύγους ηλεκτρικού ρεύματος (a) είναι πολλαπλάσια από την απόσταση των ηλεκτροδίων του ζεύγους ηλεκτροδίων μέτρησης διαφοράς δυναμικού (na).



Σχήμα 4: Θέσεις ηλεκτροδίων με την διάταξη Διπόλου-Διπόλου

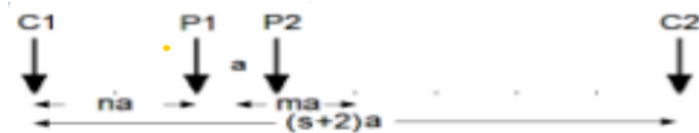
Στην διάταξη πόλου – διπόλου χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια, όπου το ένα ζεύγος ηλεκτροδίων χρησιμοποιείται για την εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος ενώ το άλλο για καταγραφή διαφοράς δυναμικού. Η απόσταση μεταξύ του ζεύγους ηλεκτροδίων καταγραφής δυναμικού είναι σταθερή , a . Η απόσταση του ενός ηλεκτροδίου ρεύματος είναι πολλαπλάσια της απόστασης που εμφανίζει το ζεύγος ηλεκτροδίων καταγραφής του δυναμικού (na), ενώ η απόσταση του δεύτερου ηλεκτροδίου θεωρείται άπειρη- δηλαδή αρκετά μεγαλύτερη από την απόσταση των ηλεκτροδίων καταγραφής διαφοράς δυναμικού (∞).



Σχήμα 5: Θέσεις ηλεκτροδίων με την διάταξη Πόλου- Διπόλου

Στην διάταξη πολλαπλής βαθμίδας χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια όπου το ένα ζεύγος εισάγει ηλεκτρικό ρεύμα στον υπεδάφιο χώρο και το άλλο ζεύγος

καταγράφει την διαφορά δυναμικού. Τα ηλεκτρόδια εισαγωγής ρεύματος βρίσκονται στα άκρα και απέχουν αρκετά μεταξύ τους, ενώ τα ηλεκτρόδια καταγραφής διαφοράς δυναμικού βρίσκονται στον χώρο ενδιάμεσα. Στην διάταξη αυτή λαμβάνουν χώρα πολλές μετρήσεις από τα ηλεκτρόδια καταγραφής διαφοράς δυναμικού όπου κατά την διάρκεια αυτών η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος παραμένει σταθερή και αλλάζει η θέση ή και η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων καταγραφής. Έτσι στην μία μέτρηση η απόσταση των ηλεκτροδίων καταγραφής θα είναι σταθερή (a) ενώ στον επόμενο κύκλο μετρήσεων θα είναι πολλαπλάσιά της (na).



Σχήμα 6: Θέσεις ηλεκτροδίων στην διάταξη πολλαπλών βαθμίδων (multi-gradient)

Οι καταγεγραμμένες τιμές των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων των σχηματισμών δεν αφορούν τις πραγματικές τιμές αλλά τις φαινόμενες ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις αυτών. Η φαινόμενη ειδ. ηλ. αντίσταση ενός σχηματισμού αποτελεί τιμή αντίστασης επηρεασμένη από γειτονικούς σχηματισμούς και υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\rho_a = \pi n(n+1)(n+2)(\Delta V/I)a$$

όπου a είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων σε κάθε ζεύγος και n ο παράγοντας διαχωρισμού μεταξύ των ζευγών.

Στόχος των γεωφυσικών μελετών είναι η μελέτη των πραγματικών τιμών των ειδ. ηλ. αντιστάσεων των σχηματισμών του υπεδάφους. Η μελέτη διαφορετικού τμήματος της περιοχής αλλά στο ίδιο βάθος πραγματοποιείται με διατήρηση των αποστάσεων μεταξύ των ζευγών ηλεκτροδίων, ενώ για διερεύνηση σε βάθος οι αποστάσεις αυξάνονται διατηρώντας ωστόσο την αναλογία μεταξύ των ζευγών στις αποστάσεις τους (παράγοντας n). Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας συνδυάζει τόσο την όδευση όσο και την βυθοσκόπηση.

Σε όλες τις περιπτώσεις τα δεδομένα που λαμβάνονται από τις μετρήσεις αποτελούν τις φαινόμενες ηλεκτρικές αντιστάσεις των γεωλογικών σχηματισμών. Προκειμένου να υπολογιστούν οι πραγματικές ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις χρειάζεται να γίνει αντιστροφή των δεδομένων, έτσι ώστε να προκύψουν οι αντιστάσεις ενδιαφέροντος των γεωλογικών σχηματισμών για τα διάφορα βάθη.

2.1.2 Ηλεκτρική τομογραφία

Η γεωφυσική μέθοδος διασκόπησης της ηλεκτρικής τομογραφίας (Electrical Resistivity Tomography, ERT) χρησιμοποιείται ευρέως για την δημιουργία λεπτομερών εικόνων κατανομής των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων του υπεδάφους μελέτης με το βάθος. Έτσι ενδείκνυται για την μελέτη γεωλογικών δομών και ανίχνευση υπόγειων νερών. Η συγκεκριμένη μέθοδος πέραν από χωρική μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν χρονική μελέτη για την μεταβολή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους με την πάροδο του χρόνου, δίνοντας πληροφορίες για τις αλλαγές του υπεδάφους με τον χρόνο. Παρέχεται έτσι η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου και για περιβαλλοντολογικές και γεωτεχνικές μελέτες.

Η ERT εντάσσεται στις ηλεκτρικές μεθόδους διασκόπησης και έτσι για την διενέργεια αυτής απαιτείται η εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος. Έτσι βασικό ρόλο στην μέθοδο έχει η διάταξη των ηλεκτροδίων προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή μελέτη του υπεδάφους χώρου. Ο σχεδιασμός της διάταξης επιλέγεται με βάση τον στόχο της έρευνας καθώς και τα χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής. Επίσης η διάταξη μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ευθεία γραμμή στην επιφάνεια του εδάφους αλλά μπορεί να γίνει και εντός γεωτρήσεων για καλύτερη μελέτη του χώρου. (Γκαζοτζί Π. et. al., 2008)

Η συγκεκριμένη γεωφυσική μέθοδος εμφανίζει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος αυτή μπορεί να προσφέρει λεπτομερείς και υψηλής ανάλυσης εικόνες κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των σχηματισμών του υπεδάφους. Ακόμα δεν συμπεριλαμβάνεται στις παρεμβατικές μεθόδους ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για μελέτη γεωλογικών όσο και περιβαλλοντικών συνθηκών. Χάριν της ευελιξίας

των διατάξεων ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο αυτή γίνεται δυνατή η μελέτη τόσο ρηχών περιοχών με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια όσο και μεγαλύτερων βαθών. Ωστόσο η διερεύνηση μεγάλων βαθών εμπεριέχει κινδύνους που αφορούν στον περιορισμένη διακριτική ικανότητα των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των στόχων και κατά συνέπεια στην δυσκολία στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Εξαιτίας μεταβλητού βάθους μελέτης η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκει χρήση σε πληθώρα εφαρμογών. (Τσούρλος Π., 2021)

2.1.3 Λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων

Όπως προαναφέρθηκε κατά την καταγραφή των μετρήσεων οι τιμές που λαμβάνονται αφορούν τις φαινόμενες αντιστάσεις των γεωλογικών σχηματισμών που εμφανίζονται στην περιοχή. Για την μελέτη του υπεδάφους χρειάζεται η μελέτη των πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων. Για να ληφθούν αυτές χρειάζεται οι καταγεγραμμένες τιμές να υποβληθούν σε επεξεργασία και μαθηματική αντιστροφή. Στη συγκεκριμένη εργασία αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται με την χρήση ανοιχτού λογισμικού.



Σχήμα 7: Εισαγωγική εικόνα ανοιχτού λογισμικού ResIPy

Το λογισμικό ResIPy (Resistivity Inversion in Python) εντάσσεται στην οικογένεια των ανοιχτών λογισμικών που χρησιμοποιούνται ευρέως για την επεξεργασία των δεδομένων μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα η εφαρμογή του ResIPy χρησιμοποιείται για την επεξεργασία, το φιλτράρισμα και την μοντελοποίηση

ηλεκτρομαγνητικών δεδομένων. Πιο συγκεκριμένο το ResIPy αποτελείται από ένα γραφικό περιβάλλον (GUI) και ένα πακέτο από κώδικες R* της Python. Το πακέτο από κώδικες της ομάδας R* διακρίνεται σε 4 είδη κώδικα, κάθε ένα από τα οποία διασφαλίζει διαφορετικά αποτελέσματα και όλα μαζί συντελούν στην εξαγωγή της επιθυμητής εικόνας. Η εφαρμογή αυτή λαμβάνει σαν δεδομένα εισαγωγής ηλεκτρομαγνητικά δεδομένα ενώ εξάγει ένα μοντέλο κατανομής των ιδιοτήτων στο υπέδαφος με το βάθος. Βασική χρήση του ResIPy είναι η αντιστροφή των γεωηλεκτρικών δεδομένων σε δύο ή τρεις διαστάσεις, καθώς επίσης και η κατανομή της επαγόμενης πόλωσης (IP).

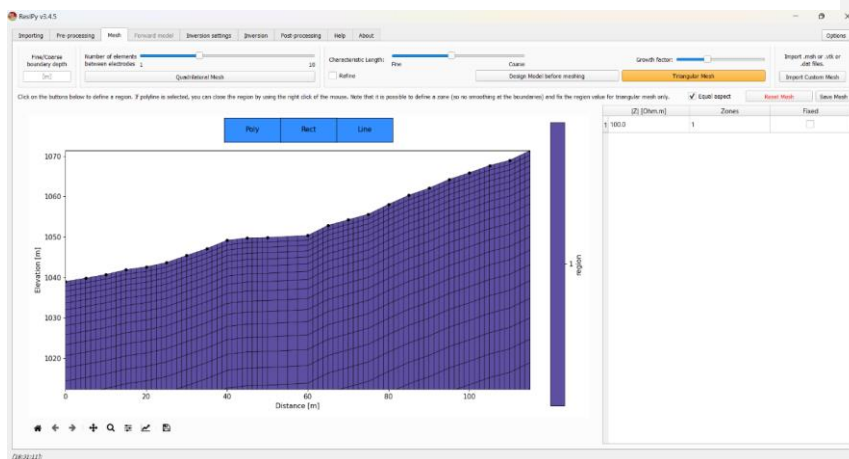
R* Family Codes in Python (R2,cT2,R3t,cR3t)

- R2, cR2: Οι γραμμές κώδικα αυτής της κατηγορίας αποσκοπούν στην αντιστροφή δεδομένων ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στις δύο διαστάσεις, ενώ τα δεδομένα εξόδου τους μπορούν να σχεδιαστούν από τρίτους. (A. Binley et. al., 2005)
- R3t, cR3t: Οι γραμμές κώδικα αυτής της κατηγορίας αποσκοπούν στην αντιστροφή δεδομένων ροής ρεύματος στις τρεις διαστάσεις.

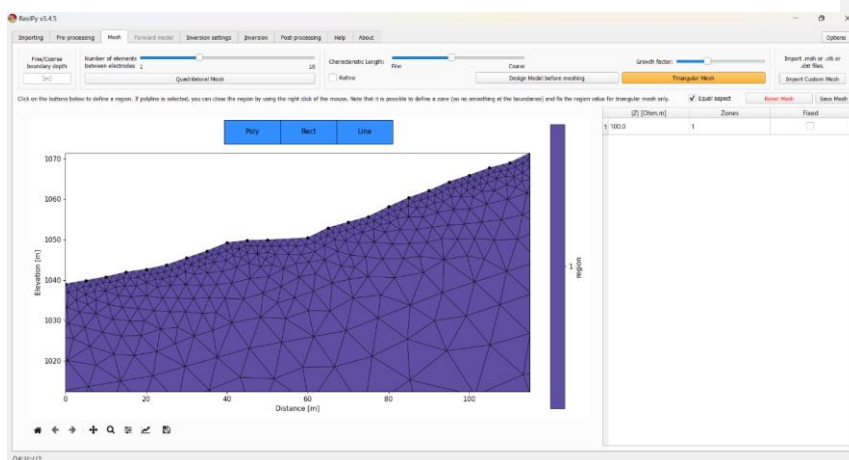
Οι κώδικες R2 και R3t λαμβάνουν υπόψη τις τρεις διαστάσεις (x,y,z) ενώ στους κώδικες cR2 και cR3t προσμετράται και η διάσταση του χρόνου (t). Με αυτή την παράμετρο είναι δυνατό να μελετάμε μία περιοχή με την πάροδο του χρόνου. Με τον τρόπο αυτό δίνεται στους επιστήμονες η δυνατότητα να επεξεργάζονται περιβαλλοντικά κυρίως προβλήματα που αφορούν μολυσμένες περιοχές, κινήσεις υπόγειων υδάτων και άλλα.

Το ResIPy είναι ένα εργαλείο στα χέρια των γεωφυσικών και άλλων επιστημόνων που δίνει την δυνατότητα μοντελοποίησης. Με τον όρο μοντελοποίηση αναφερόμαστε στην δημιουργία ενός θεωρητικού μοντέλου υπεδάφους με στόχους – ποικίλης γεωμετρίας- στους οποίους προσδίδονται από τον χρήστη καθορισμένες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Το αποτέλεσμα που λαμβάνεται είναι η μορφή της κατανομής αντιστροφής των αντιστάσεων αν οι στόχοι και το περιβάλλον είχαν τις συγκεκριμένες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Ο προσδιορισμός του υπεδάφους μοντέλου γίνεται τόσο σε τριγωνικό/ τετραγωνικό πλέγμα όσο και σε

τριγωνικά/ τετραεδρικά πρίσματα, ανάλογα σε πόσες διαστάσεις εργάζεται ο χρήστης- 2 ή 3 αντίστοιχα.(C. Geuzaine et. al., 2009)



Σχήμα 8: Περιβάλλον του λογισμικού ResIPy για προσδιορισμό τετραγωνικού πλέγματος



Σχήμα 9: Περιβάλλον του λογισμικού ResIPy για προσδιορισμό τριγωνικού πλέγματος

Επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός της διάταξης των μετρήσεων μας. Δηλώνεται ο αριθμός ηλεκτροδίων που χρησιμοποιείται κατά τη μέθοδο λήψης μετρήσεων στην ηλεκτρική τομογραφία, η απόσταση αυτών αλλά και τυχόν θαμμένα καλώδια μέσα σε γεωτρήσεις.



Σαν αποτέλεσμα προκύπτουν τα συνθετικά δεδομένα, που είναι μετρήσεις που θα λαμβάνονταν αν οι μετρήσεις είχαν γίνει με τις συγκεκριμένες τιμές ιδιοτήτων που όρισε ο γεωφυσικός. Και σε τελικό στάδιο λαμβάνεται η γενική μορφή αντιστροφής του θεωρητικού μοντέλου κατανομής των αντιστάσεων κατά μήκος της διάταξης των ηλεκτροδίων που ορίστηκε και σε σχέση με το βάθος. Οι χρωματικοί δείκτες είναι ενδεικτικοί και μπορούν να τροποποιηθούν από τον χρήστη, ενώ στο δεξιά μέρος της τομής υπάρχει χρωματικός επεξηγηματικός δείκτης για τις τιμές.

Το ResIPy ωστόσο κάνει επίλυση του ευθέως προβλήματος και για πραγματικά δεδομένα. Έτσι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τιμές πραγματικών μετρήσεων που υπάρχουν και να υπολογίσουμε τις θεωρητικές τιμές - μετρήσεις για οποιαδήποτε πραγματική διάταξη ηλεκτροδίων στο χώρο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΕΔΟΜΕΝΑ

3.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

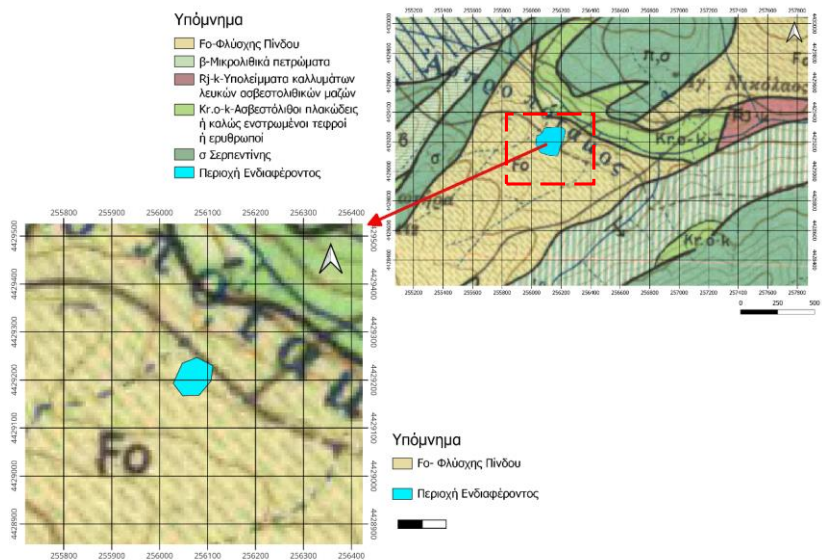
Ο ελληνικός χώρος χωρίζεται από τους επιστήμονες σε γεωτεκτονικές ζώνες βασιζόμενοι στην αλληλουχία των σχηματισμών στην πάροδο του γεωλογικού χρόνου αλλά και στην τεκτονική από την οποία αυτοί επηρεάστηκαν. Βασιζόμενοι στις ορογενετικές φάσεις και κατ'επέκταση στην τεκτονική καταπόνηση των σχηματισμών η Ελλάδα χωρίζεται σε δύο κατηγορίες ζωνών, τις Εσωτερικές και Εξωτερικές Ελληνίδες ζώνες. (Μουντράκης, 2020)

Η περιοχή όπου πραγματοποιήθηκε η μελέτη του κατολισθητικού φαινομένου βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή των Γρεβενών και πιο συγκεκριμένα κοντά στον οικισμό, Περιβόλι. Η περιοχή αυτή εντάσσεται στις Εξωτερικές Ελληνίδες και ειδικότερα στην γεωτεκτονική ζώνη της Πίνδου. Η ζώνη αυτή εμφανίζει ιδιαίτερο γεωλογικό ενδιαφέρον εξαιτίας της ποικιλίας των γεωλογικών δομών και τα πετρώματά της, καθώς και λόγω της σημαντικότητας της θέσης της στην κατανόηση της τεκτονικής εξέλιξης της περιοχής.

Οι σχηματισμοί που κυριαρχούν στην ζώνη της Πίνδου είναι ο φλύσχος της Πίνδου και οι ασβεστόλιθοι και πλακώδεις ασβεστόλιθοι. Οι γεωλογικοί αυτοί σχηματισμοί εμφανίζονται και στην περιοχή μελέτης. (Μουντράκης Δ., 2020)

Πιο συγκεκριμένα ο φλύσχος της Πίνδου διακρίνεται σε δύο στρώματα και διαχωρίζεται ως ο 1^{ος} και 2^{ος} φλύσχος της Πίνδου και αποτελούνται από κλαστικά ιζήματα. Ο 1^{ος} φλύσχος της Πίνδου χαρακτηρίζεται από εναλλαγές πελιτών, ψαμμιτών και μαργών και αποτέθηκε κατά το Κάτω Κρητιδικό. Ο 2^{ος} φλύσχος της Πίνδου εμφανίζει ασβεστομαργαϊκή σύσταση και η απόθεση αυτού έγινε μεταξύ Δάνιου και Άνω Ηωκαίνου. Στην περιοχή μελέτης η εμφάνιση του φλύσχη είναι χαοτική με ψαμμιτική και αργιλική σύσταση ενώ ο ασβεστόλιθος της περιοχής εμφανίζει χαρακτηριστικό λευκό χρώμα. (Μουντράκης Δ., 2020)

Από τον γεωλογικό χάρτη είναι δυνατή η παρατήρηση των σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής.



Σχήμα 10: Γεωλογικός χάρτης με αποτύπωση της κατολίσθησης " Χάρτης ΙΓΜΕ Φύλλο Πεντάλοφος Κλίμακα 1:50.000"

Όπως παρατηρείται στην ευρύτερη περιοχή μελέτης οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται είναι ο Φλύσχης της Πίνδου (**Fo**) (Δάνιο-Ηώκαινο) ο οποίος εμφανίζεται αδιαίρετος. Ο σχηματισμός αυτός συνυπάρχει με ψαμμιτικές μάζες, μάργες και τεφρούς ή ερυθρούς αργιλικούς σχιστόλιθους. Ακόμα στην περιοχή εντοπίζονται Μεσοζωικοί ασβεστόλιθοι ως μεμονωμένα υπολειμματικά καλύμματα χωρίς απολιθώματα. Οι Μεσοζωικοί Ασβεστόλιθοι διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες τους πλακώδεις ή καλά στρωματωμένους τεφρούς ή ερυθρωπούς ασβεστόλιθους (**Kr.o-k**) και στα υπολειμματικά καλύμματα λευκών ασβεστολιθικών μαζών (**R,j-k**). Επιπρόσθετοι σχηματισμοί είναι οι περιδοτίτες (**π**) και σερπεντίνιτες (**σ**) οι οποίοι εντοπίζονται είτε μεμονωμένοι είτε συνδυαστικά σε τμήματα της ευρύτερης περιοχής. Ακόμα υπάρχουν δολεριτικές εμφανίσεις (**δ**) και μικρολιθικά πετρώματα (**β**) σε κοντινή απόσταση.

Από τεκτονικές εμφανίσεις στην περιοχή λήψης των γεωηλεκτρικών μετρήσεων εντοπίζεται στα NA ρήγμα BA-NA παράταξης με μικρής γωνία κλίσης 20° -40° προς τα NA.

Στην επί τόπου παρατήρηση του πεδίου μελέτης εντοπίστηκε ρέμα το οποίο αποτελεί φυσικό όριο μεταξύ των επιφανειακών σχηματισμών που παρατηρήθηκαν στην ευρύτερη περιοχή (φλύσχη και ασβεστόλιθο). Εκατέρωθεν του ρέματος εντοπίζεται στα ανατολικά ο φλύσχη και στα δυτικά ο ασβεστόλιθος, γεγονός που στον γεωλογικό χάρτη δεν αποτυπώνεται. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται αυτός ο διαχωρισμός.



Σχήμα 11: Απεικόνιση του φυσικού ορίου των δύο σχηματισμών στον χάρτη (ασβεστόλιθου & φλύσχη)

Ακόμα η παρουσία του ρέματος έδωσε την δυνατότητα παρατήρησης της γεωλογικής δομής των δύο σχηματισμών και της σύνθεσης του υλικού της κατολίσθησης όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 12). Έτσι έγινε μελέτη τόσο του υλικού της κινούμενης μάζας, φλύσχη, όσο και του υπόβαθρου, ασβεστόλιθος. Όπως αναφέρθηκε από τον γεωλογικό χάρτη (Σχήμα 10) στην περιοχή εντοπίζονται δύο ειδών ασβεστόλιθοι, ωστόσο το υπόβαθρο της κατολίσθησης πιθανόν να προέρχεται από τα υπολειμματικά καλύμματα των λευκών ασβεστόλιθων μαζών (K.j-k). Η υπόθεση αυτή προκύπτει από το χαρακτηριστικό λευκό χρώμα του ασβεστόλιθου που παρατηρήθηκε στην επί τόπου μελέτη, που βρίσκεται σε αντίθεση με το τεφρό ή ερυθρωπό χρώμα που εμφανίζεται στους Μεσοζωικούς ασβεστόλιθους

της ευρύτερης περιοχής (Kr.o-k). Από την πλευρική εμφάνιση της κατολίσθησης μέσα στο ρέμα διακρίνεται και μανδύας αποσάθρωσης, που αποτελείται από αποσαθρωμένο υλικό τόσο από τον υπερκείμενο φλύσχη όσο και από τον υποκείμενο ασβεστόλιθο. Το εδαφικό αυτό στρώμα προήλθε από την φυσική και πιθανά και χημική αποσάθρωση του υποκείμενου ασβεστόλιθου, ο οποίος τροποποιήθηκε από την επίδραση του περιβάλλοντος αλλά και των καιρικών συνθηκών της περιοχής.



Σχήμα 12: Πλευρική παρατήρηση κατολίσθησης με εμφάνιση του μανδύα αποσάθρωσης

3.1.1 Γεωλογικά & γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της περιοχής

Ο κάθε σχηματισμός εμφανίζει διαφορετικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία εξαρτώνται τόσο από την σύσταση του σχηματισμού όσο και από τον βαθμό αποσάθρωσης ή και τεκτονικής καταπόνησης αυτού. Ως εκ τούτου είναι σαφές πως τα χαρακτηριστικά αυτά διαφέρουν ακόμα και για τον ίδιο σχηματισμό σε διαφορετικές θέσεις μελέτης εξαιτίας εξωτερικών παραγόντων.

Στην περιοχή λήψης των μετρήσεων ο σχηματισμός του φλύσχη παρατηρήθηκε και πραγματοποιήθηκε γεωτεχνική κατάταξη αυτού. Έτσι

[22]

χαρακτηρίστηκε ως κατηγορίας XI καθώς εμφανίζεται ως *τεκτονικώς ισχυρά διατμημένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος σε χαοτική δομή με θύλακες αργίλου*. Λεπτά στρώματα ψαμμίτη έχουν μετατραπεί σε κερματισμένα πολύ μικρά βραχώδη τεμάχια οπότε χαρακτηρίζεται ιδιαίτερα ασταθής και συνδέεται με κατολισθητικά φαινόμενα σε πολλές περιοχές της Δυτικής Ελλάδας όπου και εμφανίζεται. Από μηχανικής συμπεριφοράς ο συγκεκριμένος φλύσχος εμφανίζει μεγάλη ανισοτροπία με ταχείες μεταβολές εξαιτίας του βαθμού αποσάθρωσης και κερματισμού του καθώς και των μεγάλων κλίσεων στα πρηνή της περιοχής, τον προσανατολισμό των ασυνεχειών του και της παρουσίας νερού. Έτσι παρουσιάζονται ιδιαίτερα χαμηλές τιμές στην αντοχή του, επιπλέον χαρακτηριστικό του φλύσχος κατηγορίας XI είναι η αυξημένη παρουσία αργίλου, που οδηγεί στη δημιουργία αδιαπέρατων ή ημιδιαπερατών φραγμάτων για τα υπόγεια νερά, προκαλώντας προβλήματα στην σταθερότητα των πρηνών όπου αυτός εμφανίζεται. (Μαρίνος Β., 2013)

Ο ασβεστόλιθος παρουσιάζει υψηλές τιμές αντοχής, ωστόσο αυτό αφορά μια υγιή εμφάνιση του σχηματισμού. Ο ασβεστόλιθος είναι ιδιαίτερα ευπαθής στην διάβρωση λόγω παρουσίας νερού που μπορεί να οδηγήσει στην καρστικοποίηση αυτού αλλά και σε μείωση των αντοχών της βραχομάζας. Έτσι τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του ασβεστόλιθου δεν επηρεάζονται μόνο από τη σύσταση και την εσωτερική δομή της βραχομάζας αλλά μεταβάλλονται από πολλούς παράγοντες όπως ο βαθμός αποσάθρωσης, η δευτερογενής χαλάρωση, η παρουσία νερού κ.ά. (Στουρνάρας Γ. et. al., 2021)

Ο μανδύας αποσάθρωσης που εντοπίζεται στην σύνθεση της κατολίσθησης παρουσιάζει χαλαρή δομή με ποικιλία στην κοκκομετρία του υλικού που προήλθε από το αρχικό πέτρωμα. Οι τιμές αντοχής που εμφανίζει ο μανδύας αποσάθρωσης ποικίλουν είναι ωστόσο χαμηλότερες από αυτές του αρχικού πετρώματος από το οποίο δημιουργήθηκε. Ακόμα λόγω ασβεστολιθικής σύστασης είναι ιδιαίτερα διαπερατός από τα υπόγεια ύδατα γεγονός που συμβάλλει στην εμφάνιση αστοχιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ

4.1 ΤΡΟΠΟΣ ΛΗΨΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο μελέτης αφορούσαν 3 τομές ηλεκτρικής τομογραφίας με λήψη δεδομένων καταγραφής. Κύριος στόχος της μελέτης του κατολίσθητικού φαινομένου είναι ο προσδιορισμός των ορίων αυτού, τόσο πλευρικά όσο και σε βάθος. Έτσι οι τομές που πραγματοποιήθηκαν έγιναν παράλληλα στην κίνηση της κινούμενης μάζας αλλά και εγκάρσια αυτής. Αρχική σκέψη για το μήκος των τομογραφιών ήταν η παράλληλη στον άξονα κίνησης της κατολίσθησης να αποτελεί την μεγαλύτερη τομή ενώ οι άλλες δύο εγκάρσιες να έχουν μικρότερο μήκος. Μετά τις πρώτες μετρήσεις στην πρώτη τομογραφία όμως στο πεδίο μελέτης παρατηρήθηκαν μετρήσεις και επιφανειακές εμφανίσεις που άλλαξαν τα δεδομένα.

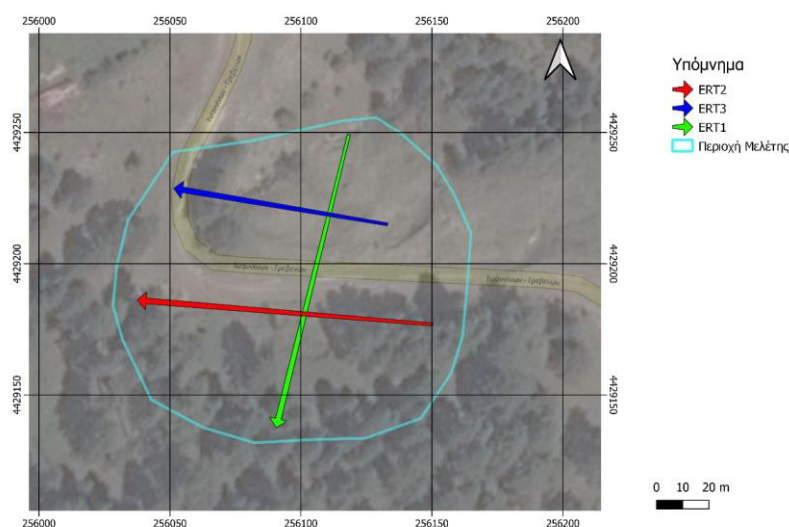
Η πρώτη ηλεκτρική τομογραφία (ERT1) η οποία έγινε παράλληλα με τον άξονα κίνησης της κατολίσθησης είχε σαν κύριο στόχο τον προσδιορισμό του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης αλλά και το άνω όριο της κατολίσθησης. Στην επί τόπου παρατήρηση βρέθηκε στο νότιο τμήμα της κατολίσθησης επιφανειακή αποκάλυψη του ασβεστόλιθου η οποία θεωρήθηκε πως ήταν η κύρια στέψη της κατολίσθησης. Για τον λόγο αυτό η ηλεκτρική αυτή τομογραφία είχε τέτοια χωρική διάταξη ώστε οι μετρήσεις που έγιναν να περιλαμβάνουν έκταση και νοτιότερα της ασβεστολιθικής εμφάνισης προκειμένου να μελετηθεί αν η συγκεκριμένη εμφάνιση αποτελούσε την στέψη της κατολίσθησης ή απλά ένα φρύδι αυτής. Έτσι η τομή που χαράχθηκε είχε μήκος 115 μέτρα με φορά από το βόρειο τμήμα της κατολίσθησης (πόδι της κατολίσθησης) προς το νότιο τμήμα της (ασβεστολιθική εμφάνιση). Χρησιμοποιήθηκαν 24 ηλεκτρόδια με απόσταση 5 μέτρων μεταξύ τους για την λήψη γεωηλεκτρικών δεδομένων. Ωστόσο ένα εκ των ηλεκτροδίων δεν συμπεριλήφθηκε στις καταγεγραμμένες μετρήσεις εξαιτίας του οδικού δικτύου το οποίο διαπερνάει το γεωτεχνικό φαινόμενο. Έτσι η καταγραφή γεωηλεκτρικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε από 23 ηλεκτρόδια. Στις μετρήσεις αυτές με μια πρώτη ματιά δεν παρατηρήθηκε ιδιαίτερη αύξηση των καταγεγραμμένων ειδικών ηλεκτρικών

[24]

μεταβολής του πλάτους των πλευρικών ορίων της κινούμενης μάζας στην κορυφή και στο πόδι της κατολίσθησης.

Με βάση το μήκος που έχουν οι ηλεκτρικές τομογραφίες προσδιορίζεται και το βάθος διασκόπησης. Έτσι για μήκος 115 μέτρων το βάθος διασκόπησης ανέρχεται περίπου στα 30 μέτρα ενώ για μήκος τομής 92 μέτρων το βάθος των καταγεγραμμένων μετρήσεων είναι περίπου 20 μέτρα, με μειούμενη διακριτική ικανότητα με το βάθος. Η γεωφυσική μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας από έναν συνδυασμό λήψης δεδομένων με την διαδικασία της όδευσης και βυθοσκόπησης, έτσι μπορεί να γίνει αντιληπτό από τις γεωηλεκτρικές μετρήσεις τόσο οι πλευρικές μεταβολές όσο και οι κατά βάθος αλλαγές στους γεωλογικούς σχηματισμούς.

Στο παρακάτω σχήμα, φαίνονται σε κάτοψη οι θέσεις των ηλεκτρικών τομογραφιών πάνω στο πεδίο μελέτης με την φορά που λήφθηκαν τα δεδομένα. Στην εικόνα ακόμα διακρίνεται το οδικό δίκτυο που διασχίζει την περιοχή μελέτης.



Σχήμα 13: Θέσεις ηλεκτρικών τομογραφιών στην περιοχή μελέτης

Για την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων σε κάθε τομή χρησιμοποιείται μετροταινία μεγάλου μήκους, η οποία τοποθετείται στο πεδίο ορίζοντας την ευθεία

της μέτρησης και καθορίζοντας τις ακριβείς θέσεις που θα τοποθετηθούν τα μεταλλικά πασαλίκια - ηλεκτρόδια. Κατά μήκος της ευθείας τοποθετήθηκε κατάλληλο πολύκλωνο καλώδιο (24 κλώνοι) με εξόδους ανά 5 μέτρα. Τα ηλεκτρόδια καρφώθηκαν στο έδαφος κατά μήκος της μετροταινίας σε συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ τους (ERT1: 5m, ERT2: 5m, ERT3: 4m) ενώ η έξοδος του κάθε κλώνου ενώθηκε με το μεταλλικό ηλεκτρόδιο με τη χρήση της κολλητικής ταινίας.

4.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Στην διαδικασία λήψης δεδομένων είναι απαραίτητα τόσο η τεχνολογία όσο και τα αναλώσιμα υλικά. Πέραν του σωστού προσδιορισμού των αποστάσεων που θα τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια σε μία ηλεκτρική τομογραφία είναι ιδιαίτερα σημαντικό να είναι γνωστά τα ακριβή σημεία και το υψόμετρο όπου αυτά τοποθετούνται. Με αυτό τον τρόπο γίνεται ανάλυση των δεδομένων που θα ληφθούν πάνω σε ένα μορφολογικό μοντέλο εδάφους που θα αντιστοιχεί στην μορφολογία του πεδίου μελέτης. Η τοπογραφική αποτύπωση των θέσεων των ηλεκτροδίων για κάθε τομή έγινε με την χρήση διαφορικού GPS (Trimble GNSS System) προσφέροντας ακρίβεια λίγων εκατοστών τόσο στην οριζόντια θέση όσο και στο απόλυτο υψόμετρο.



Σχήμα 14: Διαφορικό GPS (Trimble GNSS System)

Το σύστημα Trimble GNSS (Global Navigation Satellite System) χρησιμοποιείται ευρέως σε μια ποικιλία εφαρμογών που αποσκοπούν στον εντοπισμό της θέσης και πλοήγησης. Οι τομείς που βρίσκει θέση το σύστημα αυτό είναι τόσο στην τοπογραφία, στην κατασκευαστική, στην γεωργία, στις μεταφορές όσο και στα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS). Τα κύρια στοιχεία του συστήματος αυτού είναι: οι δέκτες- οι οποίοι λαμβάνουν σήματα από δορυφόρους και παρέχουν δεδομένα εντοπισμού θέσης, οι κεραίες οι οποίες συλλέγουν δορυφορικά σήματα και τα μεταδίδουν στους δέκτες με την ελάχιστη δυνατή απώλεια σήματος, τα λογισμικά για την συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση των σημάτων που λαμβάνονται από τους δορυφόρους, και οι υπηρεσιακές διορθώσεις. Το συγκεκριμένο σύστημα παρουσιάζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως υψηλή ακρίβεια, σήματα πολλαπλών αστερισμών GNSS για την βελτίωση της διαθεσιμότητας και της αξιοπιστίας, ανθεκτικότητα, επεκτασιμότητα. Για την λειτουργία του το Trimble GNSS απαιτεί σύνδεση στο διαδίκτυο για την λήψη γεωχωρικών δεδομένων από τους συνδεδεμένους δορυφόρους, γεγονός που αποτελεί πρόβλημα σε απόμακρες περιοχές όπου το δίκτυο είναι ασθενές.

Για την λήψη των μετρήσεων των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων που εμφανίζουν οι σχηματισμοί του υπεδάφους σε ένα πεδίο μελέτης χρησιμοποιήθηκε το όργανο μέτρησης, Syscal Pro (IRIS Instruments). Το συγκεκριμένο όργανο αποτελεί σύστημα γενικής χρήσης μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Το σύστημα δίνει την δυνατότητα παράλληλης καταγραφής έως και δέκα καναλιών δυναμικού μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο απόκτησης των επιθυμητών δεδομένων.

Το σύστημα καταγραφής Syscal Pro αποτελείται από τον πομπό και τον δέκτη. Ο πομπός είναι το σύστημα εισαγωγής ρεύματος στο υπέδαφος. Η τάση εισαγόμενου ρεύματος κυμαίνεται στα 0 – 800 Vpp, η ένταση είναι στα 0 – 2500 mA ενώ η ισχύς ελέγχεται αυτόματα με DC/DC μετατροπέα 100W. Όλα αυτά απαιτούν πηγή ρεύματος η οποία είναι η μπαταρία και βρίσκεται εσωτερικά αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και εξωτερική μπαταρία 12V. Ο δέκτης μπορεί να παράγει παλμούς διάρκειας 250ms, 500ms, 1s, 2s, 4s ή 8s. Η εισαγόμενη σ' αυτόν αντίσταση- δηλαδή το μέγιστο όριο καταγραφόμενης τιμής- είναι στα 100 MOhms ενώ η τάση εισόδου εμφανίζει

[28]

αυτόματη αύξηση και προστασία εισόδου τα 1000 V. Σχετικά με τις καταγραφές το Syscal Pro της IRIS Instruments μπορεί να λάβει μετρήσεις αντίστασης, φυσικού δυναμικού και επαγόμενης πόλωσης. Η λαμβάνουσες τιμές από τις μετρήσεις πεδίου διατηρούνται στο εσωτερικό καταγραφικό με όριο αποθήκευσης 44800 καταγραφές. Επιπλέον, το σύστημα έχει εγκατεστημένο πρόγραμμα εξομάλυνσης – απομόνωσης δηλαδή των θορύβων που εμφανίζονται στις μετρήσεις.

4.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα δεδομένα που λαμβάνονται αφορούν τις φαινόμενες ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις που εμφανίζουν οι σχηματισμοί της περιοχής μελέτης. Ωστόσο για να γίνει σωστή μελέτη του γεωτεχνικού φαινομένου είναι απαραίτητη η μελέτη των πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων των γεωυλικών του υπεδάφιου χώρου. Έτσι οι μετρήσεις εισάγονται, επεξεργάζονται και αντιστρέφονται σε εξειδικευμένο λογισμικό αντιστροφής.

Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιείται μετά την υπαίθρια εργασία και πάνω στα δεδομένα που λήφθηκαν. Όπως ήδη έχει αναφερθεί στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το ανοιχτό λογισμικό αντιστροφής γεωηλεκτρικών δεδομένων Resistivity Inversion in Python (ResIPy). Πιο συγκεκριμένα στο λογισμικό εισήχθησαν δύο ειδών δεδομένα αυτά των καταγραφών σήματος και τα υψόμετρα των ακριβών θέσεων των ηλεκτροδίων. Οι καταγεγραμμένες τιμές φαινομένων ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων συγκεντρώθηκαν σε 6 συνολικά πακέτα- δύο για κάθε τομογραφία - αφού στο πεδίο πραγματοποιήθηκε μέτρηση με δύο διατάξεις, την διάταξη διπόλου- διπόλου (DD) και την διάταξη πολλαπλής βαθμίδας (MG).

Η διάταξη διπόλου – διπόλου (DD) περιλαμβάνει ζεύγος ηλεκτροδίων καταγραφής δυναμικού απομακρυσμένα από αυτό των ηλεκτροδίων ηλεκτρικού ρεύματος με σταθερές αποστάσεις μεταξύ τους. Ανάλογα και με την έκταση της τομής διάταξης λαμβάνεται συγκεκριμένος αριθμός μετρήσεων. Η διάταξη πολλαπλών βαθμίδων (mg) περιλαμβάνει ζεύγος ηλεκτροδίων ρεύματος σε σταθερή απόσταση στα άκρα της διάταξης με το ζεύγος ηλεκτροδίων καταγραφής δυναμικού να κινείται ανάμεσα στα προηγούμενα και να έχει σταθερή απόσταση, η οποία όμως σε κάθε

[29]



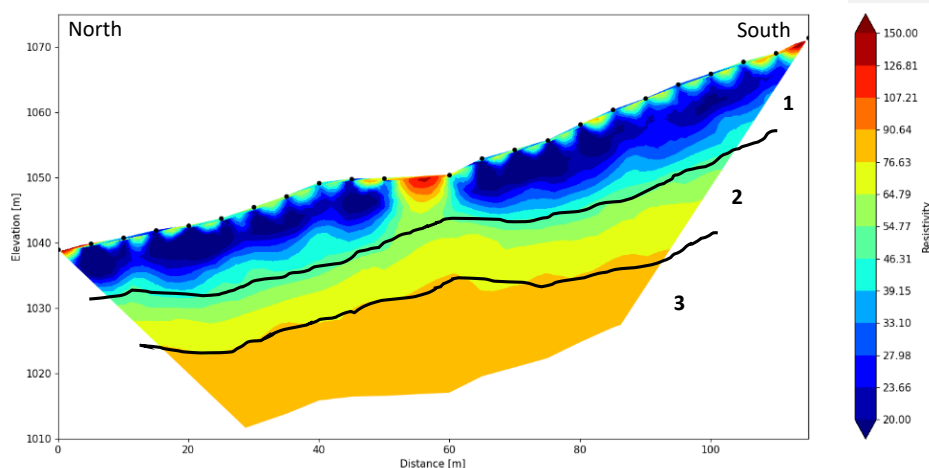
κύκλο μετρήσεων αυξάνεται. Έτσι μπορεί να προκύψει μεγάλος αριθμός συνδυασμών μετρήσεων καταγραφής ανάλογα την έκταση της τομής. Έτσι είναι λογικό να λαμβάνονται περισσότερες καταγραφές κατά την μέθοδο διάταξης των πολλαπλών βαθμίδων. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν ταυτόχρονα ο συνδυασμός των καταγραφών των δύο μεθόδων διάταξης που προαναφέρθηκαν. Με τον τρόπο αυτό προέκυψε πλήθος δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την αντιστροφή των δεδομένων δίνοντας μια αξιόπιστη εικόνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ

Με το πρόγραμμα αντιστροφής ResIPy δημιουργείται ένα διδιάστατο μοντέλο απεικόνισης των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων στον υπεδάφιο χώρο μελέτης. Ακόμα εισάγοντας και τις ακριβείς θέσεις των ηλεκτροδίων ο αλγόριθμος διορθώνει κατάλληλα τις μετρήσεις και το τελικό αποτέλεσμα περιλαμβάνει και την παράμετρο του υψομέτρου, δίνοντας έτσι την δυνατότητα ορθότερης ερμηνείας των αποτελεσμάτων.

Παρακάτω παρουσιάζονται και αναλύονται οι διδιάστατες εικόνες κατανομής των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε ηλεκτρική τομογραφία.



Σχήμα 15: Κατανομή αντιστάσεων στην ERT1

Όπως φαίνεται οι ηλεκτρικές αντιστάσεις έχουν αποδοθεί με τη βοήθεια συγκεκριμένης χρωματικής κλίμακας και έτσι σε κάθε εύρος τιμών ηλεκτρικών αντιστάσεων αντιστοιχεί ένας χρωματικός δείκτης. Η συγκεκριμένη χρωματική κλίμακα κυμαίνεται από έντονο μπλε σταδιακά σε έντονο κόκκινο χρώμα. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 15 οι χαμηλότερες τιμές αντιστοιχούν σε ένα σκούρο μπλε [31]

χρώμα και καθώς οι τιμές αυξάνονται το χρώμα μεταβαίνει σε κίτρινο για τις ενδιάμεσες αντιστάσεις και καταλήγει στο σκούρο κόκκινο χρώμα για τις πιο υψηλές ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις καταγραφής. Με βάση την χρωματική αυτή κατηγοριοποίηση είναι εφικτός ο διαχωρισμός των σχηματισμών μελέτης σε στρώματα, βασιζόμενοι στις ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις που καταγράφηκαν.

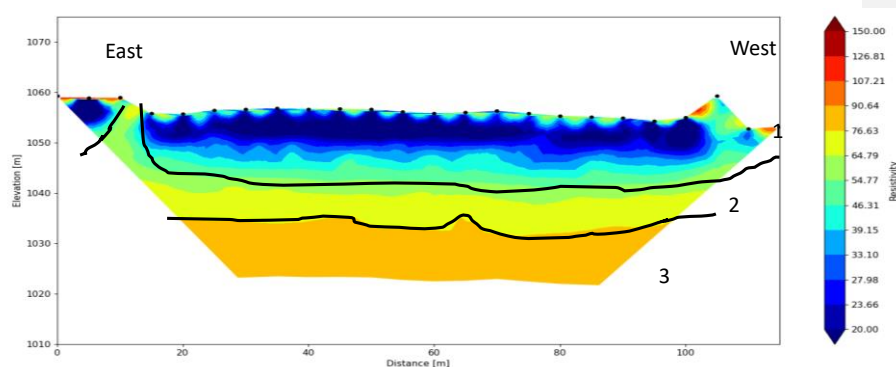
Στην ERT1 τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή του αποτελέσματος είναι 642, που όπως προαναφέρθηκε προήλθαν από συνδυασμό των μετρήσεων από τις δύο διατάξεις καταγραφής dipole-dipole και multi-gradient. Ακόμα το τελικό αποτέλεσμα προήλθε από επεξεργασία των αρχικών δεδομένων από το ίδιο το λογισμικό βελτιστοποιώντας το τελικό σφάλμα των υπολογισμένων τιμών. Στην συγκεκριμένη τομογραφία το τελικό σφάλμα RMS ήταν ίσο με 2,36%.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα της καταγραφής που απεικονίζονται στο Σχήμα 15 ο υπεδάφιος χώρος, όπου έγιναν οι μετρήσεις για την πρώτη ηλεκτρική τομογραφία, μπορεί να διαχωριστεί σε τρία κύρια στρώματα – γεωηλεκτρικούς σχηματισμούς. Έτσι όπως είναι αντιληπτό και με την βοήθεια της χρωματικής κλίμακας, στο στρώμα 1 εντοπίζονται οι χαμηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή της τομογραφίας. Το επιφανειακό αυτό στρώμα εμφανίζει αντιστάσεις με εύρος τιμών 20-45 $\Omega\text{m}\cdot\text{m}$ και πάχος περίπου 10 μέτρα, πάχος το οποίο φαίνεται να παραμένει σταθερό καθ' όλη την έκταση της τομογραφίας παρά την κλίση που αυτή εμφανίζει. Όπως αναφέρθηκε και στον τρόπο λήψης των δεδομένων στην συγκεκριμένη τομογραφία δεν λήφθηκαν μετρήσεις από ένα ηλεκτρόδιο εξαιτίας της παρουσίας οδικού δικτύου το οποίο διασχίζει την τομή μεταξύ του 11^{ου} και 13^{ου} ηλεκτροδίου. Στη θέση αυτή παρατηρείται αύξηση της αντίστασης κοντά στην επιφάνεια. Η απουσία κάποιων δεδομένων μεταξύ των δύο αυτών ηλεκτροδίων, που καλύπτει την έκταση των 10 μέτρων μειώνει μερικώς την λεπτομέρεια του τελικού αποτελέσματος στη θέση αυτή. Το στρώμα 2 που παρατηρείται για ενδιάμεσες τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων και περιλαμβάνει εύρος τιμών καταγραφής 45-75 $\Omega\text{m}\cdot\text{m}$. Το δεύτερο αυτό στρώμα που υπόκειται του πρώτου φαίνεται από την εικόνα να έχει πάχος επίσης 10 μέτρα με σταθερό πάχος στην έκταση της τομής. Η μόνη ανωμαλία που εντοπίζεται βρίσκεται και εδώ μεταξύ 11^{ου} και 13^{ου} ηλεκτροδίου όπου όπως αναφέρθηκε η τομή διασχίζει

[32]

το επαρχιακό οδικό δίκτυο. Τελευταίο και με τις μεγαλύτερες τιμές αντιστάσεων εμφανίζεται το στρώμα 3, το οποίο εντοπίζεται σε βάθος περίπου 20 μέτρων από την επιφάνεια όπου οι τιμές των αντιστάσεων κυμαίνονται μεταξύ 75 και 90 $\Omega\text{m}\cdot\text{m}$.

Η ίδια λογική και χρωματική κλίμακα ισχύει και για τις άλλες δύο ηλεκτρικές τομογραφίες που θα αναλυθούν παρακάτω.



Σχήμα 16: Κατανομή αντιστάσεων στην ERT2

Για την δημιουργία της δεύτερης ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκαν επίσης δεδομένα και από τις δύο μεθόδους καταγραφής γεωηλεκτρικών δεδομένων (dd και mg) όπως έγινε και για την πρώτη ηλεκτρική τομογραφία. Για την δεύτερη ηλεκτρική τομογραφία (ERT2) χρησιμοποιήθηκαν 792 μετρήσεις δεδομένων και το τελικό σφάλμα (RMS) ήταν ίσο με 2,42%.

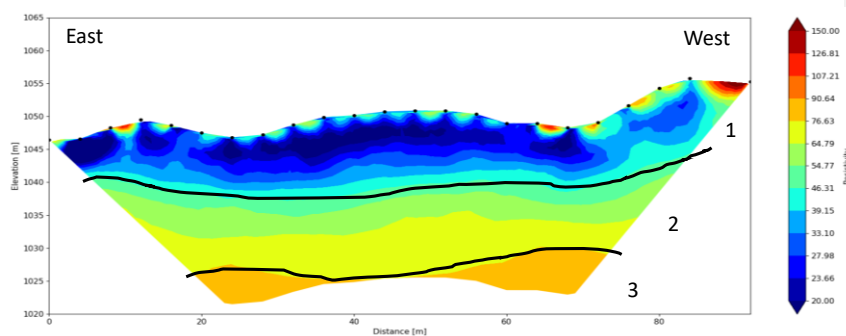
Στην δεύτερη ηλεκτρική τομογραφία (ERT2) που φαίνεται στο σχήμα 16 εντοπίζονται επίσης 3 στρώματα βάσει της ίδιας κατανομής των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων.

Έτσι υπάρχει το επιφανειακό στρώμα 1, χαμηλών τιμών καταγραφής 20-45 $\Omega\text{m}\cdot\text{m}$ και πάχος 10 μέτρα. Στην τομή αυτή δεν υπήρξε δυσκολία στην καταγραφή δεδομένων έτσι τα δεδομένα λήφθηκαν με την χρήση και των 24 ηλεκτροδίων, γεγονός που δίνει μία ολοκληρωμένη εικόνα των σχηματισμών.

Στην ηλεκτρική αυτή τομογραφία εντοπίζονται σε δύο σημεία αυξημένες τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων στο ανατολικό και δυτικό τμήμα της τομής. Στο ανατολικό τμήμα μεταξύ 1^{ου} και 3^{ου} ηλεκτροδίου οι αυξημένες τιμές έχουν εύρος 90-105 Ohm*m ενώ μεταξύ 3^{ου} και 4^{ου} ηλεκτροδίου παρατηρούνται χαμηλότερες μετρήσεις αντίστασης 45-75 Ohm*m. Αντίστοιχα και στο δυτικό τμήμα της τομογραφίας παρατηρείται επιφανειακή αύξηση αντίστασης των σχηματισμών με εύρος τιμών 45-105 Ohm*m μεταξύ 21^{ου} και 24^{ου} ηλεκτροδίου. Ωστόσο στο κεντρικό τμήμα της κατολίσθησης που βρίσκεται ενδιάμεσα στο 4^ο και 21^ο ηλεκτρόδιο κυριαρχεί επιφανειακά το στρώμα 1 που πιθανά αποτελεί την κινούμενη μάζα της κατολίσθησης.

Όπως και στην προηγούμενη (ERT1) έτσι και σε αυτή την ηλεκτρική τομογραφία κάτω από το επιφανειακό στρώμα 1 εντοπίζεται το στρώμα 2 με ενδιάμεσες τιμές 45-75 Ohm*m. Αυτό το στρώμα έχει επίσης περίπου 10 μέτρα πάχος με εξαίρεση τα σημεία όπου έχουμε επιφανειακά αυξημένες αντιστάσεις οπότε το στρώμα 2 εμφανίζει τοπικά μεγαλύτερο πάχος. Τέλος σε βάθος 20 περίπου μέτρων, ομοιόμορφα σε όλο το μήκος της τομής, ξεκινάει το στρώμα 3 με υψηλότερες τιμές αντίστασης από 75 έως 90 Ohm*m.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η τελική εικόνα της ηλεκτρικής τομογραφίας ERT3 η οποία υπενθυμίζεται πως έχει συνολικά μικρότερο μήκος γεγονός που εξηγεί και το σχετικά μικρότερο μέγιστο βάθος διασκόπησης.



Σχήμα 17: Κατανομή αντιστάσεων στην ERT3

Σε αντιστοιχία με τις δύο προηγούμενες ηλεκρ. Τομογραφίες έτσι και για την ηλεκτρική τομογραφία (ERT3) χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα και των δύο διατάξεων λήψης δεδομένων dipole-dipole και multi-gradient. Έτσι τα δεδομένα μετρήσεων που συμπεριλήφθηκαν για την δημιουργία της ηλεκτρικής αυτής τομογραφίας είναι συνολικά 693. Να σημειωθεί πως και σε αυτή την τομογραφία έγινε καταγραφή από 23 ηλεκτροδία αντί για 24 εξαιτίας της απουσίας ενός λόγω της παρουσίας του οδικού δικτύου. Σε αυτή την τομογραφία η τελική τιμή RMS ήταν 2,92%.

Όπως και στις άλλες δύο ηλεκτρικές τομογραφίες που αναλύθηκαν παραπάνω διακρίνονται 3 κύρια γεωηλεκτρικά στρώματα βάση της κατανομής των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων στον υπεδάφιο χώρο της περιοχής μελέτης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 17. Το στρώμα 1, χαμηλών αντιστάσεων με εύρος τιμών μεταξύ 20 έως 45 Ohm*m, το οποίο στην μεγαλύτερη έκταση της τομής εμφανίζεται ομοιόμορφα στα επιφανειακά περίπου 10 μέτρα με κάποιες τοπικής έκτασης διαφοροποιήσεις κυρίως στο δυτικό τμήμα της τομής. Πιο συγκεκριμένα οι διαφοροποιήσεις παρατηρούνται με αυξημένες τιμές αντίστασης έως και 125 Ohm*m μεταξύ 17^{ου} και 18^{ου} ηλεκτροδίου, αλλά και μεταξύ 18^{ου} και 19^{ου} και 20^{ου} και 21^{ου}, όπου ωστόσο οι αντιστάσεις που καταγράφηκαν είναι σχετικά χαμηλότερες με εύρος τιμών 45-90 Ohm*m. Υψηλές αντιστάσεις με τιμές που φτάνουν τα 150 Ohm*m παρατηρούνται στο δυτικό τμήμα της τομογραφίας όπου η τομογραφία διασχίζει ξανά το επαρχιακό οδικό δίκτυο. Βαθύτερα, το στρώμα 2 εμφανίζει ενδιάμεσες τιμές 45-75 Ohm*m και έχει πάχος περίπου 10 μέτρα, που όμως τοπικά φτάνει και τα 15 μέτρα όπως στην περιοχή που εκτείνεται μεταξύ 6^{ου} και 10^{ου} ηλεκτροδίου. Παρόμοια με τις προηγούμενες ηλεκτρικές τομογραφίες σε βάθος κατά μέσο όρο τα 20 μέτρα εμφανίζεται το στρώμα 3 με αυξημένες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 75-90 Ohm*m.

5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από τις εικόνες των ηλεκτρικών τομογραφιών όπως σχολιάστηκαν και προηγούμενως διακρίνονται 3 γεωηλεκτρικά στρώματα τα οποία αντιστοιχούν στα γεωλογικά στρώματα που παρατηρήθηκαν στο πεδίο. Κατά την υπαίθρια καταγραφή

των μετρήσεων έγινε σαφής διαχωρισμός 3 στρωμάτων, χάρη στο ρέμα τη περιοχής μελέτης. Τα 3 αυτά στρώματα είναι από κάτω προς τα επάνω ο ασβεστόλιθος, ο μανδύας αποσάθρωσης και ο φλύσχος. Αυτοί οι τρεις σχηματισμοί εμφανίζουν διαφορετικά γεωτεχνικά και γεωηλεκτρικά χαρακτηριστικά.

Όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο (3.1.1) για τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, ο ασβεστόλιθος εμφανίζει υψηλές τιμές αντοχής σε μη αποσαθρωμένες συνθήκες, ο μανδύας αποσάθρωσης χαμηλότερες τιμές αντοχής από το μητρικό του πέτρωμα ενώ ο φλύσχος κατηγορίας XI ιδιαίτερα χαμηλές αντοχές, εξαιτίας της τεκτονικής του καταπόνησης και της συμπεριφοράς του ως έδαφος. Τα γεωτεχνικά αυτά χαρακτηριστικά συνδέονται άμεσα και με τα γεωηλεκτρικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών αυτών. Έτσι ο ασβεστόλιθος όντας ο πιο συνεκτικός σχηματισμός παρουσιάζει τις πιο υψηλές τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων ενώ ο φλύσχος ιδιαίτερα χαμηλές. Ο μανδύας αποσάθρωσης σαν προϊόν του ασβεστόλιθου εμφανίζει χαμηλότερες τιμές αντίστασης από το μητρικό του πέτρωμα, υψηλότερες όμως από τον τεκτονισμένο σχηματισμό του φλύσχη.

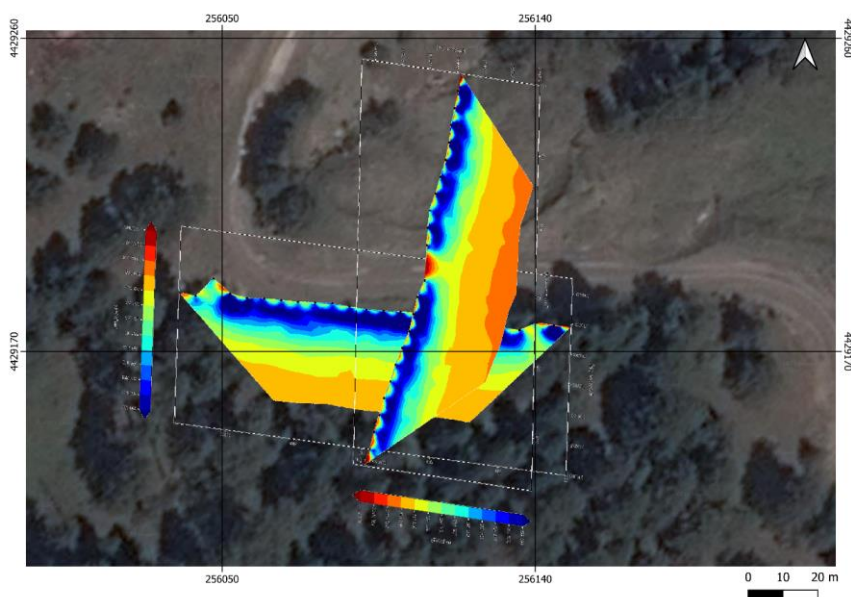
Επομένως τα 3 γεωηλεκτρικά στρώματα των σχημάτων 14, 15 και 16 που χαρακτηρίστηκαν με τις υψηλές, ενδιάμεσες και χαμηλές τιμές γεωηλεκτρικών αντιστάσεων είναι ο ασβεστόλιθος, ο μανδύας αποσάθρωσης και ο φλύσχος αντίστοιχα. Έτσι στα παραπάνω σχήματα το γεωηλεκτρικό στρώμα 1 αντιστοιχεί στον φλύσχη ($20-45 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$), το γεωηλεκτρικό στρώμα 2 αντιστοιχεί στον μανδύα αποσάθρωσης ($45-75 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) και το γεωηλεκτρικό στρώμα 3 αντιστοιχεί στο ασβεστόλιθο ($45-125 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$), που αποτελεί και το υπόβαθρο του γεωτεχνικού φαινομένου.

Η αρχική παρατήρηση που έγινε στις ηλεκτρικές τομογραφίες αφορά την ERT1 που είναι παράλληλη με τον άξονα κίνησης της κατολίσθησης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω για τον τρόπο λήψης δεδομένων στην τομή αυτή η χωρική διάταξη πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε να συμπεριληφθεί μία εδαφική κατάπτωση στο νότιο (ανάντι) τμήμα αυτής, καθώς θεωρήθηκε πως ήταν κάποιο φρύδι ή η κύρια στέψη. Η κατάπτωση αυτή τοποθετείται μεταξύ $22^{\text{ου}}$ και $23^{\text{ου}}$ ηλεκτροδίου της τομής και από τα αποτελέσματα της τομογραφίας (Σχήμα 15) για τις υπεδάφειες ειδικές ηλεκτρικές

αντιστάσεις βγαίνει το συμπέρασμα πως η εδαφική αυτή κατάπτωση δεν αποτελεί την κύρια στέψη της κατολίσθησης καθώς για να μπορεί να στηριχτεί αυτή η υπόθεση θα έπρεπε να παρατηρείται επιφανειακή αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή νοτιότερα αυτής προς τα ανάντι της κατολίσθησης. Εφόσον τίποτα από τα δύο δεν παρατηρείται στην ERT1 προκύπτει πως η εδαφική αυτή κατάπτωση οφείλεται στην ανομοιογένεια του φλύσχη που αποτελεί το επιφανειακό ενιαίο στρώμα της κατολίσθησης.

Η πρώτη ηλεκτρική τομογραφία (ERT1) βρίσκεται εγκάρσια στις άλλες δύο ηλεκτρικές τομογραφίες (ERT2 & ERT3) που πραγματοποιήθηκαν κατά τις μετρήσεις και έτσι υπάρχουν σημεία τομής μεταξύ αυτών. Τα σημεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την διαπίστωση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων από το λογισμικό αντιστροφής αλλά και για την ερμηνεία του υπεδάφιου χώρου.

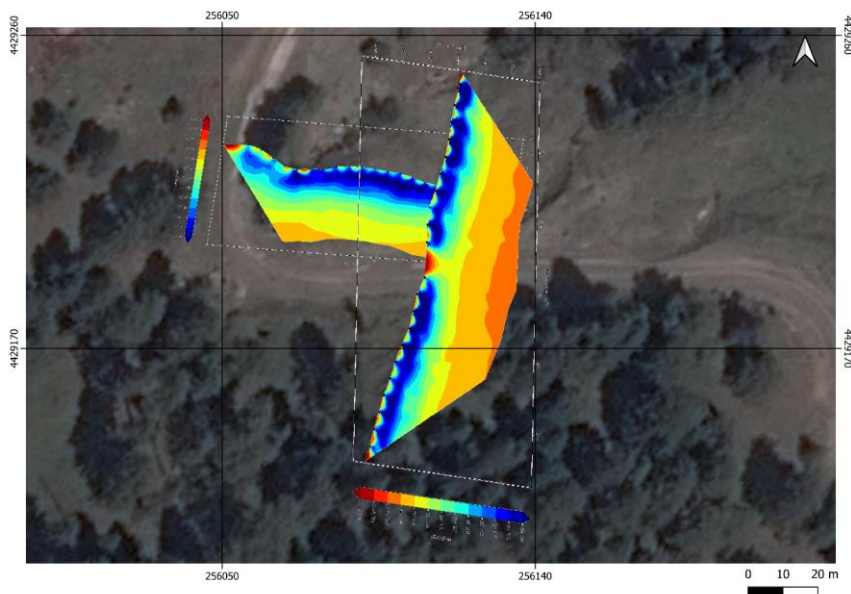
Το πρώτο σημείο τομής που θα ερμηνευτεί, αφορά την 1^η και 2^η ηλεκτρική τομογραφία (ERT1 & ERT2), και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 18: Ηλεκτρική τομογραφία ERT1 & ηλεκτρική τομογραφία ERT2

Το σημείο τομής βρίσκεται σε υψόμετρο 1.055 m και στην ERT1 εντοπίζεται μεταξύ 14^{ου} και 15^{ου} ηλεκτροδίου ενώ στην ERT2 μεταξύ 9^{ου} και 10^{ου} ηλεκτροδίου. Ο συνδυασμός των δύο ηλεκτρικών τομογραφιών για το σημείο αυτό δείχνουν κοινά στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα το επιφανειακό στρώμα της περιοχής που αποτελεί ο φλύσχης έχει πάχος 13 m και στις δύο ηλεκτρικές τομογραφίες ενώ υπόκειται το στρώμα 2 του μανδύα αποσάθρωσης με πάχος 10 m. Το υπόβαθρο του γεωτεχνικού φαινομένου που αποτελεί ο ασβεστόλιθος βρίσκεται και στις δύο τομογραφίες σε βάθος 23 m.

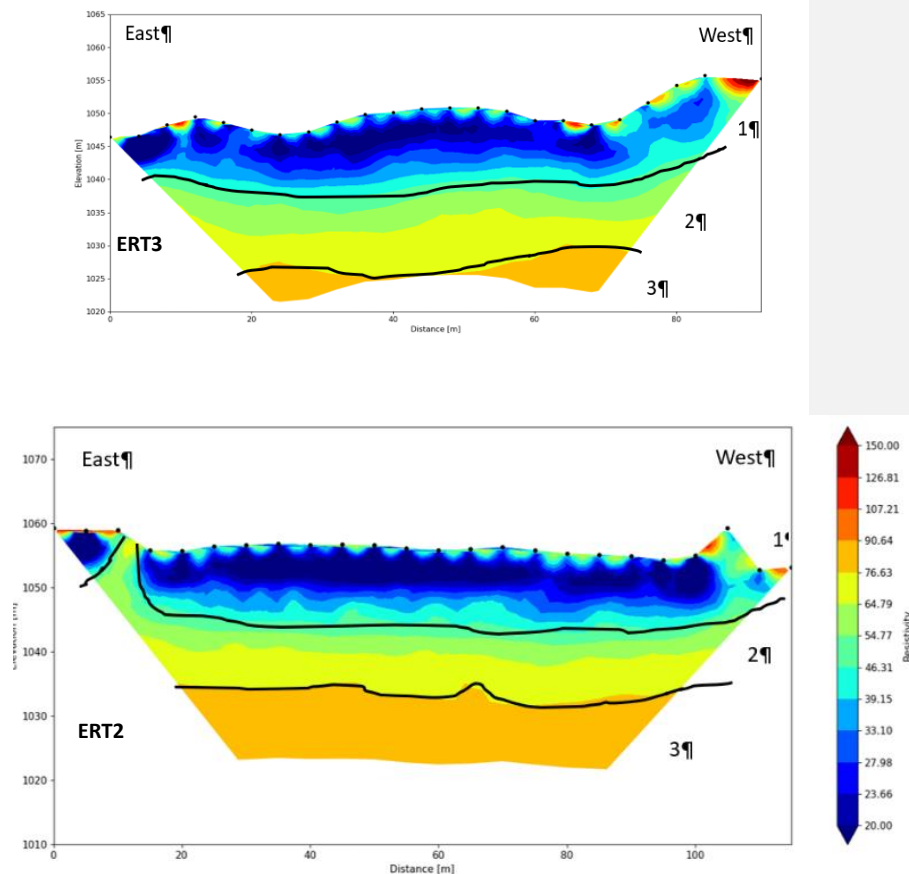
Το δεύτερο σημείο τομής που θα ερμηνευτεί, αφορά την 1^η και 3^η ηλεκτρική τομογραφία (ERT1 & ERT3), και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 19: Ηλεκτρική τομογραφία ERT1 & ηλεκτρική τομογραφία ERT3

Το σημείο τομής για αυτές τις τομογραφίες βρίσκεται σε υψόμετρο 1.046 m και στην ERT1 εντοπίζεται μεταξύ 7^{ου} και 8^{ου} ηλεκτροδίου ενώ στην ERT3 μεταξύ 7^{ου} και 8^{ου} ηλεκτροδίου. Στο κοινό αυτό σημείο το πρώτο επιφανειακό στρώμα που είναι ο φλύσχης της περιοχής έχει πάχος 10 m και ο υποκείμενος μανδύας αποσάθρωσης έχει πάχος 11 m. Το υπόβαθρο της κατολίσθησης εντοπίζεται και σε βάθος 21 m και είναι όπως αναφερθεί ο ασβεστόλιθος. Παρατηρείται πως και σε αυτό το σημείο [38]

τομής υπάρχουν κοινά στοιχεία των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων των γεωλογικών σχηματισμών που αποτελούν την κατολίσθηση.



Σχήμα 20: Σύγκριση ηλεκτρικών τομογραφιών ERT2 & ERT3

Οι δύο εγκάρσιες στον άξονα κίνησης της κατολίσθησης ηλεκτρικές τομογραφίες έχουν διαφορετικό μήκος, η ERT2 έχει μήκος 115 m ενώ η ERT3 έχει μήκος 92 m, επομένως η σύγκριση αυτών πρέπει να γίνει με προσοχή όμως είναι ξεκάθαρο πως και στις 2 τομές συναντάμε την ίδια αλληλουχία σχηματισμών σε διαφορετικά υψόμετρα. Αν επιλέξουμε να γίνει σύγκριση μόνο στα σημεία τομής των



τομογραφιών αυτών με την ERT1 προκύπτει πως στα σημεία αυτά το υψόμετρο στην ERT2 είναι 1.055 m και στην ERT3 είναι 1.046 m, το υψόμετρο αυτό αναφέρεται στον επιφανειακό σχηματισμό του φλύσχη. Με ανάλογο τρόπο από τις γεωηλεκτρικές εικόνες βρίσκουμε αντίστοιχα τα υψόμετρα για τα άλλα δύο γεωλογικά στρώματα που εντοπίζονται στο υπέδαφος της περιοχής: ο μανδύας αποσάθρωσης στην ERT2 ξεκινάει στα 1.046 m ενώ στην ERT3 στα 1.037 m και ο ασβεστόλιθος στην ERT2 εντοπίζεται στα 1.035 m και στην ERT3 στα 1.025 m.

Από αυτά τα υψόμετρα μπορεί να υπολογιστεί έμμεσα η κλίση τόσο του εδάφους, δηλαδή του επιφανειακού στρώματος, όσο και των υποκείμενων στρωμάτων. Στα δύο σημεία αναφοράς για τις τομογραφίες ERT2 & ERT3 προκύπτει ότι η απόσταση των παράλληλων ηλεκτρικών τομογραφιών είναι 37,5 m. Με τον τύπο εύρεσης κλίσης: $i = \Delta H / \Delta S$, όπου i η κλίση, ΔH η υψομετρική διαφορά δύο σημείων και ΔS η οριζόντια απόσταση αυτών προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές:

$i_{(\text{φλύσχη})} = 0.24$ & $i_{(\text{μανδύα αποσάθρωσης})} = 0,24$, δηλαδή κλίση = $13,45^\circ$ και για τα δύο στρώματα, φλύσχη και μανδύα αποσάθρωσης

Ενώ για τον ασβεστόλιθο $i_{(\text{ασβεστόλιθου})} = 0,26$ δηλαδή κλίση = $13,57^\circ$.

Προκύπτει λοιπόν πως στο σύνολό τους οι σχηματισμοί παρουσιάζουν σχεδόν ίδια κλίση στην έκταση του γεωτεχνικού φαινομένου και για την διεύθυνση την παράλληλη με τον άξονα κίνησης.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Γκαζοτζή Π. & Τσοχατζή Δ., 2008. Ηλεκτρική τομογραφία μεταξύ γεωτρήσεων στην περιοχή της Σίνδου, Διπλωματική Εργασία, ΑΠΘ.

Μαρίνος Β., Κίλιας Α., Μακεδών Θ. & Θωμαΐδου Ε., 2013. Οδηγός Άσκησης Υπαίθρου Δυτική Μακεδονία – Ηπείρου- Στερεάς Ελλάδας, Τεχνική Γεωλογία, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.

Μουντράκης Δ., 2020. Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας, Β' Έκδοση, Μέρος 1^ο, Κεφάλαιο Α', 25-28, Θεσσαλονίκη.

Μουντράκης Δ., 2020. Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας, Β' Έκδοση, Μέρος 1^ο, Κεφάλαιο Δ', 153, Θεσσαλονίκη.

Παπαζάχος Κ. & Παπαζάχος Β., 2013. Εισαγωγή στην Γεωφυσική, Β' Έκδοση, Κεφάλαιο 1, 1-2, Θεσσαλονίκη

Στουρνάρας Γ. & Σταυροπούλου Μ., 2021. Τεχνική Γεωλογία, Κεφάλαιο 2, 42-48, Θεσσαλονίκη

Τσούρλος Π., 2021. Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι Γεωφυσικών Διασκοπήσεων, Σημειώσεις Παραδόσεων, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη

Blanchy G, Saneiyan S, Boyd J, McLachlan P., Binley A., 2020. ResIPy, an intuitive open source software for complex geoelectrical inversion/ modeling, Computers & Geoscienced, Volume 137.

Διαδικτυακές Πηγές

[7 – Electrode configurations: Wenner, Schlumberger and Dipole-Dipole. A... / Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)

Αλλαγή κωδικού πεδίου

https://www.researchgate.net/figure/Some-commonly-used-array-and-their-geometric-factors-Lokeetal-2013-4-Recent-trends-in_fig1_322064515

Αλλαγή κωδικού πεδίου

[Summary of different array types of electrical method_Langeo Geophysical Instruments \(langeoinstrument.com\)](#)

Αλλαγή κωδικού πεδίου



[Ελληνική Αρχή Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών - Ελληνική Αρχή Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών \(eagme.gr\)](#)

[Getting Started — ResIPy 3.4.1 documentation](#)

[Prof Andrew Binley - R2 \(lancs.ac.uk\)](#)

[Prof Andrew Binley - cR2 \(lancs.ac.uk\)](#)

[Prof Andrew Binley - R3t \(lancs.ac.uk\)](#)

[Prof Andrew Binley - cR3t \(lancs.ac.uk\)](#)

[Trimble GNSS Systems | Trimble Geospatial](#)

[Syscal Pro \(iris-instruments.com\)](#)

Αλλαγή κωδικού πεδίου

Αλλαγή κωδικού πεδίου

Αλλαγή κωδικού πεδίου

Αλλαγή κωδικού πεδίου

Αλλαγή κωδικού πεδίου

Αλλαγή κωδικού πεδίου

Αλλαγή κωδικού πεδίου

Αλλαγή κωδικού πεδίου

Αλλαγή κωδικού πεδίου