



**ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ :

***ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΕΥΡΕΣΗ ΠΙΘΑΝΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ
ΤΥΡΝΑΒΟΥ.***

ΤΟΥ ΦΟΙΤΗΤΗ :

ΧΙΣΙΡΙΔΗ ΜΙΧΑΗΛ-ΑΓΓΕΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ :

ΒΑΡΓΕΜΕΖΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΑΠΘ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2020



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη – Ευχαριστίες	3
1.Εισαγωγή	4
2.Περιοχή Μελέτης	5
2.1.Γεωγραφική Θέση	5
2.2.Γεωμορφολογικά Χαρακτηριστικά	7
2.3.Γεωλογικά Χαρακτηριστικά	8
2.4.Σεισμικότητα	11
3.Σπήλαια	13
3.1.Καρστική Γεωμορφολογία	14
3.2.Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης Εγκοίλων	15
3.2.1.Γεωραντάρ (GPR)	17
3.2.2.Μέθοδος Πολύ Χαμηλής Συχνότητας (VLF)	19
3.2.3.Πολυκαναλική Ανάλυση Επιφανειακών Κυμάτων (MASW)	21
4.Ηλεκτρικές Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης	23
4.1.Γενικά	23
4.2.Βασικές Ηλεκτρικές Μέθοδοι	23
4.3.Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση	24
4.3.1.Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης	26
4.3.2.Διατάξεις Ηλεκτροδίων	28
4.4.Ηλεκτρική Τομογραφία (ERT)	33
5.Μέθοδος Έρευνας	34
5.1.Εξοπλισμός	34
5.2.Περιγραφή Μεθόδου	35
5.3.Αποτελέσματα Έρευνας	42
6.Συμπεράσματα	48
7.Βιβλιογραφία	88

Περίληψη – Ευχαριστίες

Σκοπός της συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι αφενός η ολοκλήρωση του προπτυχιακού κύκλου σπουδών μου, αφετέρου η εμβάθυνση των γνώσεών μου στον τομέα της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής και των πολυάριθμων μεθόδων και εφαρμογών της ως εργαλείο στην κλασσική Γεωλογία. Θέμα της αποτελεί η εφαρμογή της μεθόδου της Ηλεκτρικής Τομογραφίας με σκοπό την απεικόνιση του χώρου πιθανού σπηλαιίου σε περιοχή πλησίον του Τυρνάβου.

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο αναφέρονται οι ορισμοί της Γεωφυσικής, της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής και της Γεωφυσικής Διασκόπησης για την εξοικείωση του αναγνώστη με το πλαίσιο και τους όρους της εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά των γενικών στοιχείων της περιοχής όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Στη συνέχεια, αναφέρονται πληροφορίες που αφορούν την έννοια του καρστ και της ιδιαίτερης μορφολογίας που δημιουργείται. Εκεί, γίνεται σύντομη περιγραφή άλλων μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό καρστικών μορφών. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και στην έννοια της ηλεκτρικής αντίστασης και έπειτα, περιγράφεται η μέθοδος της Ηλεκτρικής Τομογραφίας. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του εξοπλισμού, των βημάτων κατά τις εργασίες υπαίθρου και των αποτελεσμάτων που λάβαμε. Η εργασία καταλήγει στην παρουσίαση των συμπερασμάτων μετά τη συλλογή, επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων. Δεν θα μπορούσε να λείπει η σχετική βιβλιογραφία στο τέλος της διπλωματικής εργασίας, απαραίτητη για την πραγματοποίηση οποιασδήποτε μελέτης.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή Βαργεμέζη Γεώργιο, τον σπηλαιοεξερευνητή Πολυδωρόπουλο Κωνσταντίνο, καθώς και τα δύο ακόμα μέλη της ομάδας που πραγματοποιήσαμε τις εργασίες υπαίθρου, Παραδεισοπούλου Παρθένα και Διαμαντή Νεκταρία, για την πολύτιμη βοήθεια, τη στήριξη και την εμπιστοσύνη τους προς εμένα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές και το διδακτικό προσωπικό του Γεωλογικού Τμήματος της Σχολής Θετικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης που συνέβαλλαν στο να αγαπήσω την Επιστήμη της Γεωλογίας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους συμφοιτητές και φίλους μου για τις όμορφες αναμνήσεις στα έδρανα, τα λεωφορεία και τις ασκήσεις υπαίθρου και φυσικά, στην οικογένειά μου για τη συμπαράσταση και τη στήριξη που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της έως τώρα ακαδημαϊκής μου πορείας.

1.Εισαγωγή

Γεωφυσική με την ευρύτερη έννοια του όρου είναι η επιστήμη που εφαρμόζει τους νόμους της Φυσικής για να μελετήσει τη Γη, τη Σελήνη και τους πλανήτες. Αντικείμενό της είναι η δομή του εσωτερικού της Γης, το πεδίο βαρύτητάς της, το γεωμαγνητικό και το γεωηλεκτρικό της πεδίο, οι γεωθερμικές μεταβολές στο εσωτερικό της, οι μέθοδοι ραδιοχρονολόγησης, η Σεισμολογία και η Γεωδυναμική. (Παπαζάχος Β. & Παπαζάχος Κ., 2008)

Κλάδο της Γεωφυσικής με πολύτιμη πρακτική σημασία για τον άνθρωπο αποτελεί η **Εφαρμοσμένη Γεωφυσική** που ασχολείται με τη μελέτη των επιφανειακότερων στρωμάτων της Γης, με έμφαση σε στόχους οικονομικού, γεωτεχνικού, πολιτισμικού και περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος. (Παπαζάχος Β. & Παπαζάχος Κ., 2008)

Γεωφυσική Διασκόπηση είναι η μελέτη της δομής των απρόσιτων στην άμεση παρατήρηση επιφανειακών στρωμάτων του γήινου φλοιού και βασίζεται κατά κύριο λόγο στη συλλογή, επεξεργασία και ερμηνεία γεωφυσικών μετρήσεων που γίνονται απευθείας από τη φύση με γεωφυσικά όργανα, λαμβάνοντας σοβαρά υπόψη τις απευθείας παρατηρήσεις που γίνονται στο πεδίο. (Παπαζάχος Β., 1996)

Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται χρησιμεύουν στον υπολογισμό άλλων μεγεθών που περιγράφουν τις φυσικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών. Οι μεταβολές των φυσικών μεγεθών είναι στις περισσότερες των περιπτώσεων που ενδιαφέρουν την Γεωφυσική Διασκόπηση. Οι γεωφυσικές παρατηρήσεις επιδέχονται διάφορες ερμηνείες και μπορούν να εξηγηθούν με διαφορετικά μοντέλα δομής και φυσικές διαδικασίες του εσωτερικού της Γης. Επίσης, παρατηρείται σημαντικό ποσοστό αλληλοεπικάλυψης των φυσικών ιδιοτήτων των γεωλογικών σχηματισμών (π.χ. της πυκνότητας, της μαγνητικής επιδεκτικότητας, της ταχύτητας των ελαστικών κυμάτων, της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης).

Αυτό δημιουργεί την ανάγκη να εφαρμοστούν περισσότερες από μία **Γεωφυσικές Μέθοδοι Διασκόπησης** (Σεισμικές, Βαρυτομετρικές, Μαγνητικές, Ηλεκτρικές, Ηλεκτρομαγνητικές, Ραδιομετρικές, Θερμικές) και να χρησιμοποιηθούν δεδομένα διάφορων κατηγοριών για να καθοριστεί συνδυαστικά ένα ρεαλιστικό μοντέλο του εσωτερικού της Γης, τόσο σε σχέση με τη δομή του, όσο και σε σχέση με την γεωδυναμική του συμπεριφορά και εξέλιξη. (Παπαζάχος Β. & Παπαζάχος Κ., 2008)

Σημαντικά πλεονεκτήματα των Γεωφυσικών Μεθόδων Διασκόπησης έναντι άλλων μεθόδων διερεύνησης του εσωτερικού της Γης αποτελούν το ότι είναι μη καταστρεπτικές και πολύ πιο οικονομικές σε σχέση με τις εκσκαφές και τις



γεωτρήσεις και το ότι είναι αποδοτικές και ευέλικτες όταν εφαρμόζονται συνδυαστικά για την επίλυση σύνθετων γεωλογικών προβλημάτων.

Το πρώτο και βασικό στάδιο μιας γεωφυσικής έρευνας είναι ο σχεδιασμός που αποσκοπεί στο να κατανοήσουμε το είδος του γεωλογικού προβλήματος που χρίζει επίλυσης και τις γεωφυσικές ιδιότητες του στόχου, καταλήγοντας στην επιλογή της καταλληλότερης γεωφυσικής μεθόδου. Σημαντικές είναι οι παράμετροι του επιθυμητού βάθους διερεύνησης, των διαστάσεων του προς ανεύρεση στόχου και το κατά πόσο οι γεωφυσικές ιδιότητες του στόχου διαφέρουν από τις αντίστοιχες ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών που τον περιβάλλουν. Επίσης, ο τρόπος με τον οποίο γίνονται οι μετρήσεις (π.χ. απόσταση μεταξύ των σημείων μέτρησης, διεύθυνση των προφίλ/γραμμών μέτρησης και απόσταση μεταξύ τους) επηρεάζει την διακριτική ικανότητα μιας γεωφυσικής μεθόδου.

Στην παρούσα εργασία η μέθοδος Γεωφυσικής Διασκόπησης που χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση πιθανού σπηλαίου ήταν η Ηλεκτρική Τομογραφία, μια Ηλεκτρική μέθοδος με πολύ καλή διακριτική ικανότητα μεταξύ άλλων στα έγκοιλα και τις μεγαλύτερες καρστικές μορφές. Παρακάτω περιγράφονται τα γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής πλησίον του Τυρνάβου όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

2.Περιοχή Μελέτης

2.1.Γεωγραφική Θέση

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην κεντρική Ελλάδα και πιο συγκεκριμένα στην Τοπική Κοινότητα Δαμάσιου της Δημοτικής Ενότητας Τυρνάβου, οι οποίες ανήκουν διοικητικά στην Περιφερειακή Ενότητα της Λάρισας, της Περιφέρειας της Θεσσαλίας.

Ακόμα πιο συγκεκριμένα, η περιοχή μελέτης τοποθετείται Βόρεια του χωριού Δαμάσι, στις Βόρειες παρυφές της πεδινής έκτασης που περικλείεται Βόρεια και Ανατολικά από την οροσειρά της Μελούνας, Δυτικά τον λόφο του Αγίου Θεοδώρου και Νότια από την κοιλάδα του Τιταρήσιου ποταμού.

Η πεδιάδα αυτή αποτελεί μία από τις κατεξοχήν αμπελουργικές περιοχές της Δημοτικής Ενότητας του Τυρνάβου, η οποία φημίζεται για τον Αγροτικό Οινοποιητικό Συνεταιρισμό της.



Εικόνα 2.1.1. Δορυφορική φωτογραφία της ευρύτερης περιοχής. Με κόκκινο σύμβολο η περιοχή όπου εφαρμόστηκε η γεωφυσική μέθοδος της Ηλεκτρικής Τομογραφίας.



Εικόνα 2.1.2. Άποψη της οροσειράς της Μελούνας από την πλευρά του Τυρνάβου.

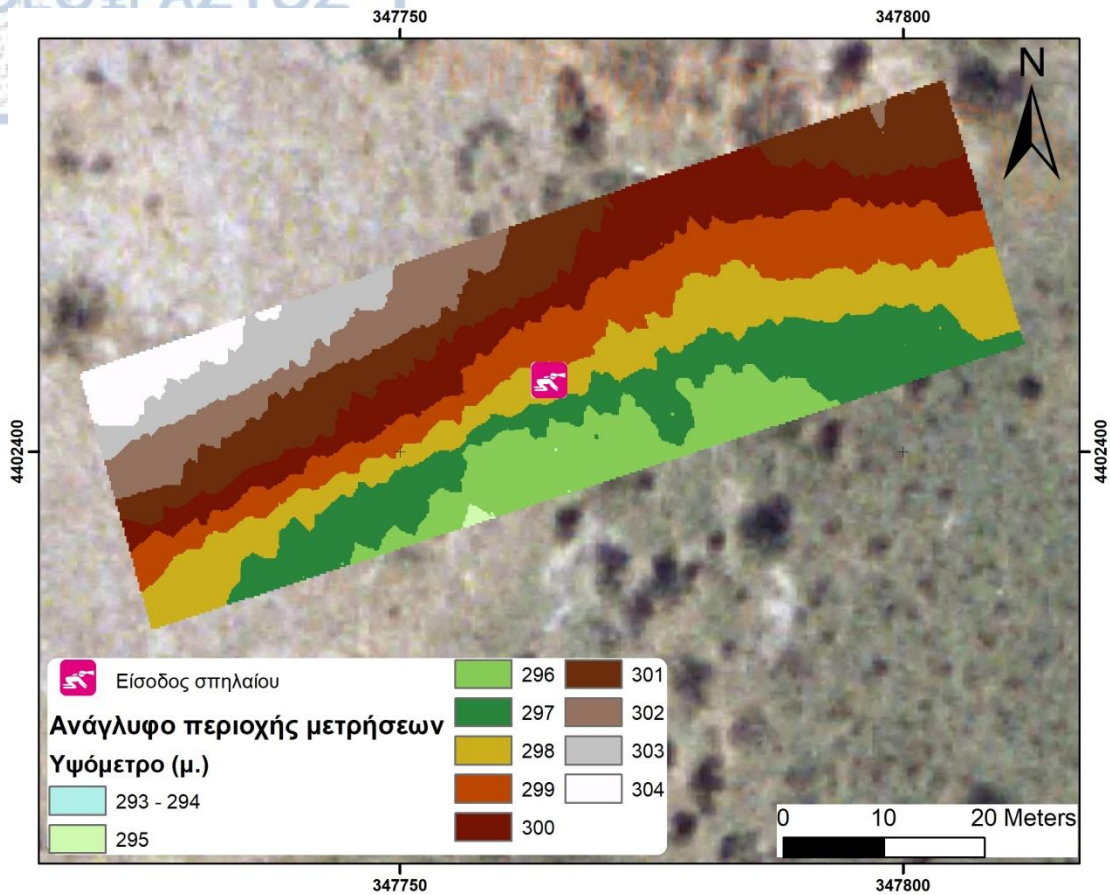
2.2.Γεωμορφολογικά Χαρακτηριστικά

Η Γεωμορφολογία είναι ο κλάδος της Φυσικής Γεωγραφίας που εξετάζει τις συνθήκες διαμόρφωσης του γήινου ανάγλυφου και την κατανομή του στην υφήλιο, συνδυαστικά με τις κλιματικές και υδατικές συνθήκες του γήινου χώρου, ως προϊόν των αλληλεπιδράσεων των συνθηκών μεταξύ τους, χωρίς την επίδραση του ανθρώπου.

Το ανάγλυφο, όπως παρατηρήθηκε στην ευρύτερη περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας, είναι πεδινού χαρακτήρα. Οι ορεινοί όγκοι που περικλείουν την πεδινή έκταση στα όρια της οποίας βρίσκεται το σημείο όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις χαρακτηρίζονται από ήπιο ανάγλυφο χωρίς ιδιαίτερες βραχώδεις εξάρσεις. Η βλάστηση είναι σχετικά χαμηλή και κυρίως θαμνώδης, καθώς δεν υπάρχει ιδιαίτερα σχηματισμένο έδαφος για να την υποστηρίξει. Στα πεδινά τμήματα της περιοχής, όπου το έδαφος είναι πλουσιότερο, κυριαρχούν οι αμπελώνες και οι αμυγδαλεώνες.

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία που διαμορφώνουν το γεωμορφολογικό ανάγλυφο στην ευρύτερη περιοχή είναι ο ποταμός Τιταρήσιος, παραπόταμος του Πηνειού ποταμού, η κοιλάδα του οποίου βρίσκεται Νότια της περιοχής μελέτης και ακολουθεί τη διεύθυνση του ενεργού σεισμικού ρήγματος του Τυρνάβου, διεύθυνσης Ανατολή – Δύση. Επίσης, όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο (2.3), σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του ανάγλυφου σε τοπικό επίπεδο κατέχει ένα ακόμα ρήγμα που τέμνει την περιοχή μελέτης.

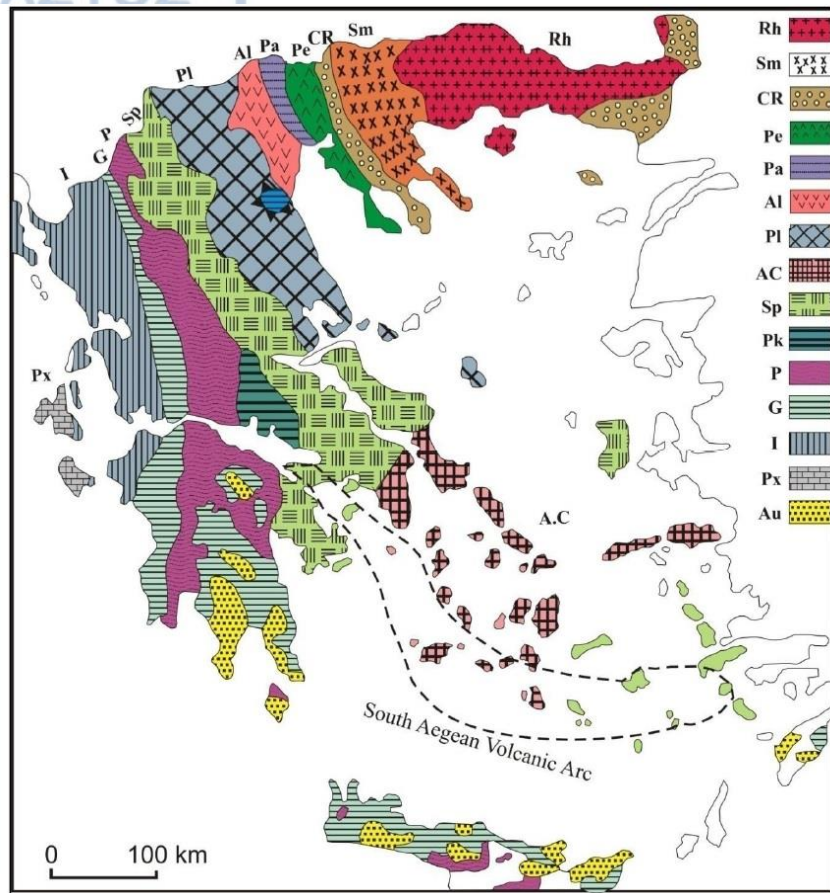
Στην παρακάτω εικόνα (2.2.1) φαίνεται η κατανομή του υψομέτρου στην περιοχή όπου ελήφθησαν οι ηλεκτρικές μετρήσεις.



Εικόνα 2.2.1. Κατανομή του υψομέτρου, μικρής κλίμακας, στην περιοχή όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

2.3. Γεωλογικά Χαρακτηριστικά

Γεωτεκτονικά, η περιοχή μελέτης τοποθετείται στο χώρο της Πελαγονικής Ζώνης. Η ζώνη αυτή αποτελεί μια επιμήκη λωρίδα ΒΒΔ-ΝΝΑ διεύθυνσης που εκτείνεται από τη Βόρεια Μακεδονία προς τους Ελληνικούς ορεινούς όγκους του Βόρα, του Βέρνου, του Βερμίου, των Πιερίων, του Ολύμπου, του Πηλίου και της Βόρειας Εύβειας. Στη συνέχεια, κάμπτεται προς τις Σποράδες και περιλαμβάνει τα νησιά Σκιάθο, Σκόπελο και Σκύρο. Η πιθανή της προέκταση προς τη Μικρά Ασία θεωρείται ότι γίνεται διαμέσου του κεντρικού αιγακού χώρου μεταξύ Λέσβου και Χίου. (Μουντράκης, 2010)

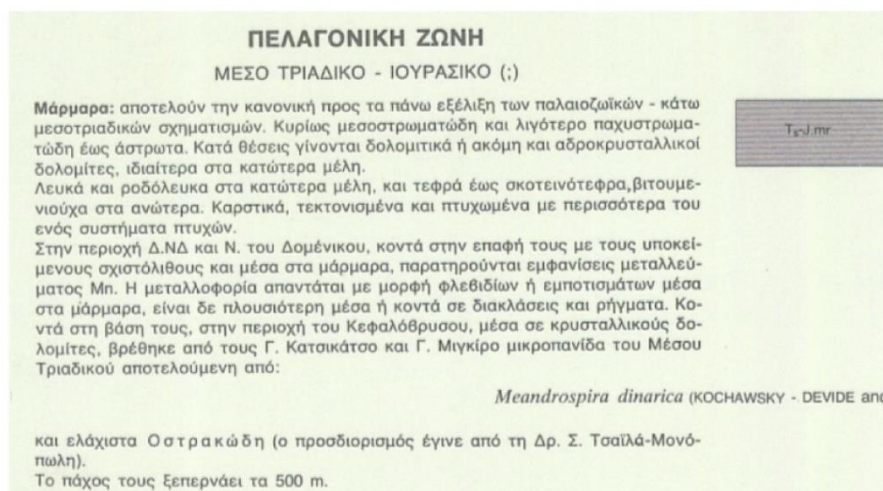
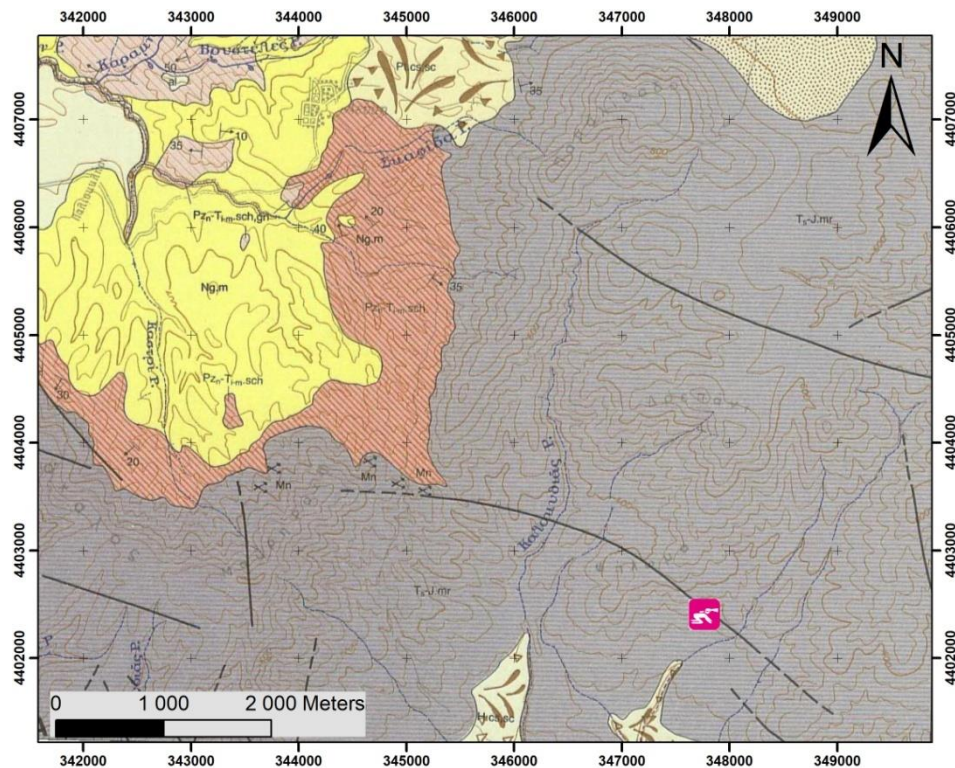


Εικόνα 2.3.1. Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών. Rh: Μάζα της Ροδόπης, Sm: Σερβομακεδονική μάζα, CR: Περιοδοπική ζώνη, [Pe: Ζώνη Παιονίας, Pa: Ζώνη Πάικου, Al: Ζώνη Αλμωπίας] = Ζώνη Αξίου, Pl: Πελαγονική ζώνη, Ac: Αττικο-Κυκλαδική ζώνη, Sp: Υποπελαγονική ζώνη, Pk: Ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας, P: Ζώνη Πίνδου, G: Ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης, I: Ιόνιος ζώνη, Px: Ζώνη Παξών ή Προαπούλια, Au: Ενότητα «Τάλεα όρη - πλακώδεις ασβεστόλιθου» πιθανόν της Ιονίου ζώνης. (επεξεργασμένο από Mountrakis 1983)

Στρωματογραφικά, η Πελαγονική Ζώνη συγκροτείται, από κάτω προς τα πάνω, από το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο, τους γνευσιωμένους γρανίτες, τα ημιμεταμορφωμένα πετρώματα Πέρμιου - Τριαδικού, τα δύο ανθρακικά καλύμματα ανατολικό και δυτικό, ηλικίας Τριαδικού – Ιουρασικού, τους οφειόλιθους και τα Άνω Κρητιδικά επικλυσιογενή ιζήματα. (Μουντράκης, 2010)

Η περιοχή έρευνας τοποθετείται επάνω στο ανατολικό ανθρακικό κάλυμμα. Το ανατολικό ανθρακικό κάλυμμα είναι πάρα – αυτόχθονο, αποτέθηκε δηλαδή ανατολικότερα της Πελαγονικής προς τη ζώνη της Αλμωπίας και επωθήθηκε στη συνέχεια δυτικά, επάνω στο κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο της Πελαγονικής, στο οποίο βρίσκεται σήμερα χωρίς τη μεσολάβηση κλαστικών ιζημάτων. Τα ιζήματά του χαρακτηρίζονται ως καθαρά νηριτικά και συνίστανται από

ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, μάρμαρα, δολομίτες και σιπολίτες. Τέλος, τα ανθρακικά ιζήματα του ανατολικού Πελαγονικού καλύμματος εμφανίζουν αισθητή μεταμόρφωση χαμηλής πρασινοσχιστολιθικής φάσης, η οποία έλαβε χώρα την περίοδο Ανώτερου Ιουρασικού – Κάτω Κρητιδικού. (Μουντράκης, 2010)



Εικόνα 2.3.2. Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Με ροζ σύμβολο φαίνεται η περιοχή όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

Σύμφωνα με τον παραπάνω γεωλογικό χάρτη το ανατολικό ανθρακικό κάλυμμα στην περιοχή όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις αποτελείται κυρίως από μάρμαρα κατά θέσεις δολομιτικά ή και ανδοκρυσταλλικούς δολομίτες, ιδιαίτερα στα κατώτερα μέλη του. Επίσης, αναφέρεται ότι τα πετρώματα αυτά είναι καρστικά, τεκτονισμένα και πτυχωμένα, γεγονός που ενθαρρύνει την μελέτη μας.

Πράγματι, όπως παρατηρήσαμε, η καταπόνηση των ανθρακικών πετρωμάτων στην περιοχή μελέτης είναι σημαντική, αφού τέμνονται από τουλάχιστον τρία συστήματα ασυνεχειών. Επίσης, η επιφανειακή τους εμφάνιση δείχνει στοιχεία εκτεταμένης μηχανικής και χημικής αποσάθρωσης.

Τέλος, ένα πολύ σημαντικό στοιχείο της γεωλογίας της περιοχής μελέτης είναι η παρουσία μεγάλης ζώνης ρήγματος Βορειοδυτικής – Νοτιοανατολικής διεύθυνσης, το οποίο σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη τέμνει την περιοχή όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Η ύπαρξή του συμβάλει καθοριστικά στο δευτερογενές πορώδες των σχηματισμών και στην κατείσδυση των μετεωρικών κατακρημνισμάτων, γεγονός που με τη σειρά του συμβάλει άμεσα στην εκδήλωση εκτεταμένων καρστικών φαινομένων (χημική διάλυση πετρωμάτων) και άρα στην ανάπτυξη καρστικών μορφών (αγωγοί, έγκοιλα, σπήλαια).

2.4.Σεισμικότητα

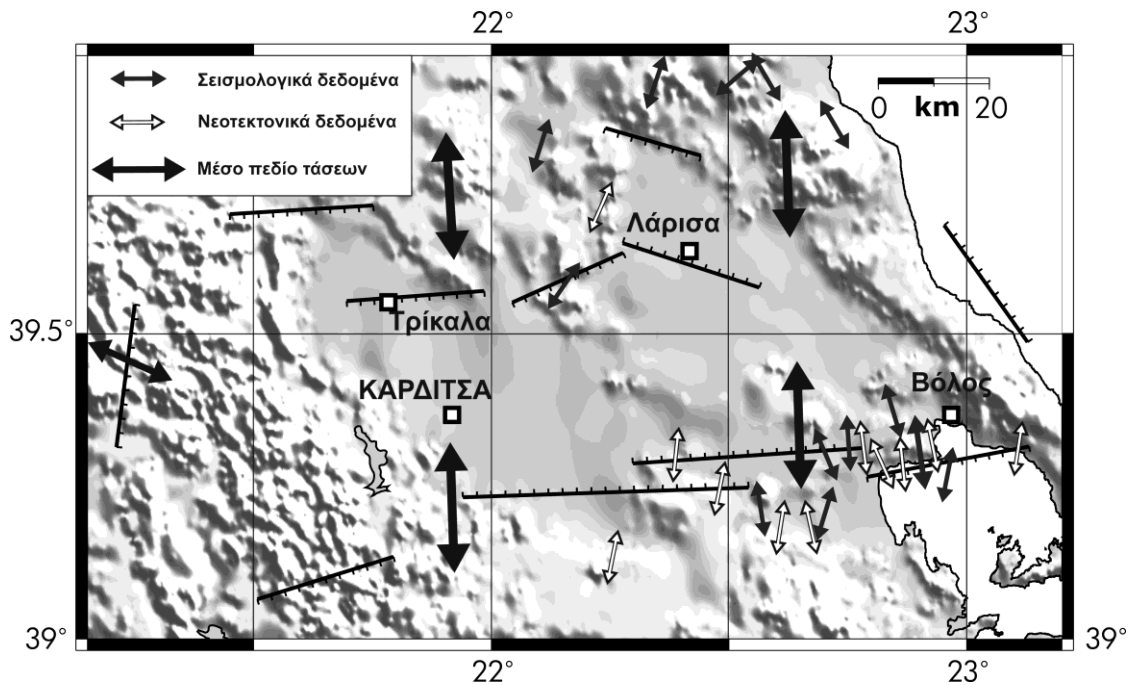
Στην παρακάτω εικόνα (2.4.1) παριστάνονται οι τεκτονικές τάσεις στη Θεσσαλία και τις γύρω περιοχές που έχουν προσδιορισθεί τόσο με σεισμολογικές, όσο και με γεωλογικές-νεοτεκτονικές μεθόδους. (Mountrakis et al., 2006)

Οι τάσεις με σεισμολογικές μεθόδους έχουν υπολογιστεί με ανάλυση σειсмоγραμμάτων, ενώ τα γεωλογικά-νεοτεκτονικά αποτελέσματα έχουν υπολογιστεί από παρατηρήσεις σε εργασίες υπαίθρου. Τα τέσσερα μεγάλα διπλά βέλη παριστάνουν τις μέσες διευθύνσεις των τάσεων στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας. Οι τεκτονικές τάσεις είναι εφελκυστικές και έχουν διεύθυνση Βορρά - Νότου.

Στην παρακάτω εικόνα δείχνονται επίσης τα σημαντικότερα (έντεκα) ενεργά ρήγματα της Θεσσαλίας που έδωσαν ισχυρούς σεισμούς ($M \geq 6.0$) κατά τους ιστορικούς χρόνους και καθορίστηκαν με σεισμολογικές και γεωλογικές παρατηρήσεις. (Παπαζάχος και συνεργάτες, 2001)

Το μακρύ ευθύγραμμο τμήμα κάθε συμβόλου παριστάνει τη διεύθυνση και το μήκος του ρήγματος, ενώ οι μικρές κάθετες γραμμές στη διεύθυνση του ρήγματος (δόντια) δείχνουν τη διεύθυνση κλίσης του. Όλα τα ρήγματα είναι κανονικά και

έχουν διεύθυνση περίπου Ανατολή – Δύση, ενώ άλλα κλίνουν προς το Βορρά και άλλα προς το Νότο.



Εικόνα 2.4.1. Οι εφελκυστικές τάσεις (διπλά βέλη) που επεκτείνουν το φλοιό της Θεσσαλίας κατά τη διεύθυνση Βορρά - Νότου και προκαλούν ρήγματα με διεύθυνση Ανατολής - Δύσης. Με μικρά άσπρα και μαύρα βέλη σημειώνονται τα αποτελέσματα από γεωλογικά – νεοτεκτονικά και σεισμολογικά δεδομένα αντίστοιχα, ενώ με μεγάλα μαύρα βέλη σημειώνεται το μέσο πεδίο τάσεων της περιοχής.

Στην επόμενη εικόνα (2.4.2), η οποία αποτελεί προϊόν συστηματικής νεοτεκτονικής – γεωλογικής και σεισμολογικής μελέτης της ευρύτερης περιοχής της Βορειοδυτικής Θεσσαλίας, παρουσιάζονται οι εφελκυστικές τάσεις διεύθυνσης Βορρά – Νότου και τα κύρια μεγάλα κανονικά ρήγματα της περιοχής, διεύθυνσης Ανατολής – Δύσης.

Τα αποτελέσματα της μελέτης παρουσιάστηκαν σε ημερίδα με θέμα 'Σεισμικότητα Θεσσαλίας, η Γεωλογία των σεισμών και το ρήγμα του Τυρνάβου', που πραγματοποιήθηκε τον Ιούνιο του 2017 στο δημοτικό θέατρο Τυρνάβου.



Εικόνα 2.4.2. 'Σεισμικότητα και σεισμική επικινδυνότητα στη Θεσσαλία', Παπαζάχος Κ. (2017)

Τα πλησιέστερα μεγάλα εφελκυστικά - κανονικά ρήγματα στην περιοχή ενδιαφέροντος σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μελέτη είναι αυτά της Ροδιάς (Rodia Fault) και του Τυρνάβου (Tyrnavos Fault), τα οποία πιθανόν ευθύνονται για την ανάπτυξη της υπολεκάνης της Βόρειας Θεσσαλίας (Tyrnavos Basin).

3. Σπήλαια

Ο όρος **σπήλαιο** χρησιμοποιείται για να περιγράψει φυσικά ανοίγματα στο βράχο, μεγάλα αρκετά ώστε να επιτρέπουν την είσοδο στον άνθρωπο.

Τα σπήλαια είναι μουσεία της φύσης που διατηρούν πολύ σημαντικά αρχαιολογικά ευρήματα, όπως και ιζήματα και αποθέσεις που παρέχουν πληροφορίες για το παλαιοπεριβάλλον και το παλαιοκλίμα. Για τους παραπάνω λόγους αποτελούν πρόκληση για τους σπηλαιοεξερευνητές και τους επιστήμονες που ασχολούνται με αυτά. Τα σπήλαια είναι ευρέως διαδεδομένα από τον Αρκτικό κύκλο έως την Ανταρκτική, αλλά και κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας σε

βάθη πολλών εκατοντάδων μέτρων. Παρόλο που χιλιάδες χιλιόμετρα σπηλαίων έχουν χαρτογραφηθεί, είναι βέβαιο ότι πολλά περάσματα μένει να εξερευνηθούν και αυτά αποτελούν τα μόνα πραγματικά άγνωστα μέρη της Γης, πέρα από τους ωκεανούς. Για την ανακάλυψή τους είναι συχνά απαραίτητη η κατανόηση του επιστημονικού πλαισίου κάτω από το οποίο αυτά δημιουργούνται, ενώ η ανεύρεσή τους προσφέρει ευκαιρίες για νέα επιστημονικά ευρήματα. Η συνέργεια μεταξύ επιστήμης και εξερεύνησης είναι ο κύριος λόγος που κάνει την αναζήτηση και μελέτη τους τόσο συναρπαστική και προκλητική.

Η μελέτη των σπηλαίων και της ιδιαίτερης μορφολογίας που δημιουργούν είναι διεπιστημονική και πραγματοποιείται από γεωλόγους, βιολόγους, αρχαιολόγους, γεωγράφους, ιστορικούς, οικολόγους και άλλους επιστήμονες. Κάθε χρόνο πολλές καλά εξοπλισμένες ομάδες αναλαμβάνουν αποστολές για την ανακάλυψη νέων σπηλαίων, αλλά εξακολουθεί να ισχύει το γεγονός ότι μεμονωμένα άτομα και ομάδες που εργάζονται σε μικρότερες έρευνες επιτυγχάνουν να είναι οι πρώτοι άνθρωποι που μπαίνουν σε ένα πέρασμα ή σύστημα περασμάτων.

Και ενώ η συγκίνηση της ανακάλυψης οδηγεί πολλούς στην σπηλαιοεξερεύνηση, πολλοί είναι και αυτοί στις ανεπτυγμένες κυρίως χώρες, που επισκέπτονται τουριστικά αξιοποιημένα σπήλαια ως ψυχαγωγική δραστηριότητα.

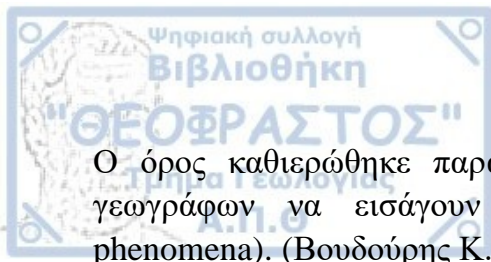
3.1.Καρστική Γεωμορφολογία

Η πλειοψηφία των σπηλαίων αποτελούν μέρος ενός ευρύτερου γεωμορφολογικού πεδίου, γνωστό ως καρστ (karst).

Σύμφωνα με τον Ford και Williams, '*καρστ* είναι ένα γεωμορφολογικό πεδίο με ξεχωριστή υδρολογία και γεωμορφές που έχουν προκύψει από τον συνδυασμό υψηλής διαλυτότητας πετρωμάτων και καλά ανεπτυγμένου δευτερογενούς πορώδους'. Στις περιοχές αυτές επικρατούν βαθιές κοιλάδες και χαράδρες ποταμών, σπήλαια και σπηλαιώματα, εξάρσεις πετρωμάτων, κλειστές κοιλότητες και υποχωρήσεις και πηγές ανάβλυσης νερού. (Ford and Williams, 2007).

Σε πολλές περιοχές της γης στις οποίες επικρατούν τα ανθρακικά πετρώματα (ασβεστόλιθοι, δολομίτες, μάρμαρα), διαμορφώνεται το καρστικό επιφανειακό ανάγλυφο, εξαιτίας της διάλυσης των πετρωμάτων αυτών λόγω της κίνησης νερού εμπλουτισμένου με διοξείδιο του άνθρακα (CO₂).

Η λέξη καρστ έχει σλάβικη προέλευση και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Cuvjic και άλλους Αυστριακούς γεωλόγους το 1893, για να περιγράψουν τα ιδιαίτερα φαινόμενα που παρατήρησαν στη Δαλματία της Κροατίας. (Βουβαλίδης, 2011)



Ο όρος καθιερώθηκε παρά τις προσπάθειες Γάλλων κυρίως γεωλόγων και γεωγράφων να εισάγουν τον όρο ασβεστολιθικά φαινόμενα (limestone phenomena). (Βουδούρης Κ., 2013)

Η καρστική γεωμορφολογία είναι τόσο διαδεδομένη στην επιφάνεια του πλανήτη που υπολογίζεται ότι το ένα τέταρτο του παγκόσμιου πληθυσμού αντλεί το νερό που χρησιμοποιεί από τους ταμειυτήρες της. Εκτός όμως από τις ξεχωριστές γεωμορφές και την πλούσια υδρολογία, οι καρστικές περιοχές χαρακτηρίζονται και από ιδιαίτερα βιολογικά χαρακτηριστικά, διαμορφώνοντας μοναδικά οικοσυστήματα και παρέχοντας διάφορους πόρους στον άνθρωπο.

Για την κατανόηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους, τη διαχείριση των πόρων τους και την αιφόρο ανάπτυξη των περιοχών που χαρακτηρίζονται από την καρστική γεωμορφολογία, είναι απαραίτητη και η συμβολή οικονομολόγων, συμβούλων, μηχανικών και σχεδιαστών περιβαλλοντικής διαχείρισης.

Όσων αφορά την Ελλάδα, τα ανθρακικά πετρώματα καλύπτουν σχεδόν το 35% της έκτασής της και τα νερά που φιλοξενούνται στους καρστικούς υδροφορείς που αναπτύσσονται σε αυτά αποτελούν μαζί με τους προσχωματικούς - αλλουβιακούς υδροφορείς τα σημαντικότερα υδροφόρα συστήματα της χώρας.

Από τα παραπάνω, εύκολα συνάγεται το συμπέρασμα του πόσο σημαντική είναι η κατανόηση του ιδιαίτερου αυτού γεωμορφολογικού φαινομένου, με σκοπό την ορθολογική αξιοποίηση των πόρων του, αλλά και την αντιμετώπιση των ιδιαίτερων τεχνικογεωλογικών του προκλήσεων.

3.2. Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης Εγκοίλων

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει υπάρξει μία έκρηξη ενδιαφέροντος όσων αφορά την έρευνα του καρστ και των διάφορων πτυχών του και κατά συνέπεια έχει υπάρξει μεγάλη αύξηση στη σχετική βιβλιογραφία, στις μεθόδους έρευνας και στον ειδικό τεχνολογικό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για τον σκοπό αυτό.

Το καρστικό περιβάλλον είναι ένα από τα πιο απαιτητικά όσων αφορά τα υπόγεια ύδατα, την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και τα περιβαλλοντικά ζητήματα. Οι γεωφυσικές μέθοδοι παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σε καρστικές περιοχές, όπως για παράδειγμα στον καθορισμό του υδροφόρου ορίζοντα, στην εκτίμηση του κινδύνου ή στην ανεύρεση ρύπων. Ωστόσο, οι περιοχές αυτές συνιστούν μία πρόκληση και η επιλογή της πιο κατάλληλης γεωφυσικής μεθόδου αποτελεί μία δύσκολη διαδικασία, λόγω των μεταβλητών και απρόβλεπτων χαρακτηριστικών τους. (Chalikakis K. Et al., 2011)



Από τις αρχές του 1990 οι γεωφυσικές έρευνες που σχετίζονται με καρστικά έγκοιλα αυξήθηκαν σε μεγάλο βαθμό λόγω της τεχνολογικής ανάπτυξης, του χαμηλότερου κόστους, των απλούστερων διαδικασιών στο πεδίο και της ταχείας ερμηνείας των αποτελεσμάτων. Τα τελευταία χρόνια αρκετές μελέτες υλοποιήθηκαν με σκοπό την παροχή κατευθυντήριων γραμμών για τις γεωφυσικές μεθόδους στην εξερεύνηση των καρστικών μορφών. (Chalikakis K. et al., 2011)

Οι γεωφυσικές μέθοδοι στοχεύουν στο χαρακτηρισμό των μεταβολών των φυσικών παραμέτρων των υπόγειων σχηματισμών. Οι γεωφυσικές μετρήσεις παράγουν ένα σύνολο δεδομένων στα οποία καταγράφονται διάφορες παράμετροι. Κάθε μία από αυτές τις παραμέτρους σχετίζεται με μία ή και περισσότερες φυσικές ιδιότητες των υποεπιφανειακών χαρακτηριστικών και με τη χωρική τους κατανομή. (Chalikakis K. et al., 2011)

Γενικότερα, το βάθος διερεύνησης για καρστικούς σχηματισμούς ποικίλει από δύο έως διακόσια μέτρα. Η γεωφυσική απόκριση εξαρτάται από το μέγεθος του στόχου σε σχέση με το βάθος που βρίσκεται και από την αντίθεση μεταξύ των φυσικών ιδιοτήτων του στόχου και των σχηματισμών που τον περιβάλλουν. Το μέγεθος των καρστικών μορφών είναι συνήθως περιορισμένο, εκτός από τις σπηλαιώσεις που έχουν μεγαλύτερο μέγεθος και απαντώνται συνήθως σε μεγαλύτερα βάθη. Επίσης, σημαντικό ρόλο στην απόκριση καταλαμβάνει το πάχος και η σύσταση των υπερκείμενων σχηματισμών (ποσοστό αργίλου, πυκνότητα, παρουσία νερού στο πορώδες) ειδικά όσο αυξάνεται το βάθος. (Chalikakis K. et al., 2011)

Στα καρστικά περιβάλλοντα ο βράχος που περιβάλλει ένα σπήλαιο ή μια κοιλότητα είναι συχνά διαταραγμένος από τη χημική και φυσική αλληλεπίδραση του νερού με αυτόν. Έτσι, οι διακλάσεις και η διάλυση στο περιβάλλοντα χώρο ενός εγκοίλου προκαλούν μεγαλύτερο όγκο στην ανωμαλία που καταγράφεται από μία γεωφυσική μέθοδο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να είναι ευκολότερη η ανίχνευση ενός εγκοίλου στις καταγραφές, αλλά ο πραγματικός του όγκος να είναι μικρότερος από αυτό που φαίνεται.

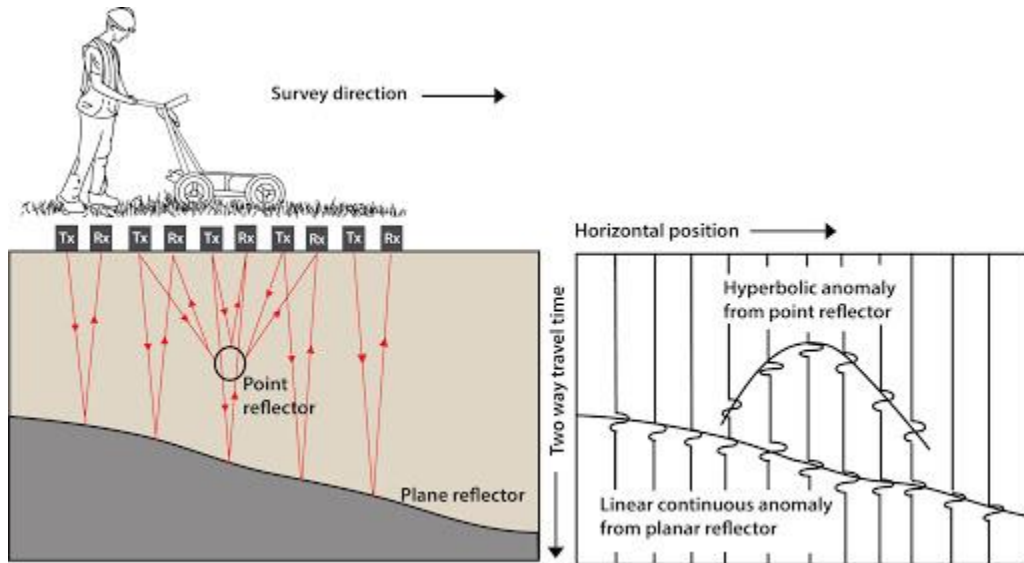
Υπάρχει μεγάλη ποικιλία γεωφυσικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται στην ανίχνευση καρστικών μορφών και σπηλαίων. Όλες στηρίζονται στην αντίθεση των φυσικών ιδιοτήτων του προς ανίχνευση κενού, ακόμα και αν αυτό είναι πληρωμένο με νερό ή ιζήματα, με τον περιβάλλοντα βράχο.

Στη συνέχεια περιγράφονται κάποιες από τις χρησιμότερες γεωφυσικές μεθόδους για το σκοπό αυτό.

3.2.1. Γεωραντάρ (GPR)

Το Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar, GPR) είναι μία μέθοδος γεωφυσικής διασκόπησης που βασίζεται στην μετάδοση υψηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υπέδαφος και στην μετέπειτα καταγραφή των ανακλώμενων κυμάτων στην επιφάνεια.

Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται συνεχείς τομές υψηλής ανάλυσης των υπεδάφινων σχηματισμών με μη επεμβατικό τρόπο. Οι παλμοί των ραδιοκυμάτων που εκπέμπονται είναι στην περιοχή συχνοτήτων 10MHz έως 1GHz. Η ενέργεια αυτή εκπέμπεται από έναν πομπό στο έδαφος και όταν έρχεται σε επαφή με αντικείμενα ή διεπιφάνειες μεταξύ υλικών διαφορετικής ηλεκτρικής αντίστασης και διηλεκτρικών σταθερών, ένα μέρος της ανακλάται προς την επιφάνεια, ενώ το υπόλοιπο συνεχίζει βαθύτερα μέχρι να συναντήσει την επόμενη αλλαγή ιδιοτήτων του υλικού μέσου που διέρχεται. Καθώς η ενέργεια κινείται βαθύτερα εξασθενεί λόγω της γεωμετρικής διασποράς, της απορρόφησής της από το μέσο και της μετατροπής της σε θερμότητα.



Εικόνα 3.2.1.1. Αρχή καταγραφής μεθόδου GPR. (πηγή φωτογραφίας Scantech Geoscience)

Οι πρώτες εφαρμογές της μεθόδου ξεκίνησαν τη δεκαετία του 1960 με την ανάπτυξη συστημάτων διασκόπησης καλυμμάτων πάγου με την ηχώ των εκπεμπόμενων ραδιοκυμάτων. Κατά τα μέσα της δεκαετίας του 1980 η μέθοδος άρχισε να εξελίσσεται ταχύτερα και να χρησιμοποιείται ευρέως στην διερεύνηση ρηχών υπεδάφινων στόχων, σε τεχνικά έργα, αρχαιολογικές έρευνες κ.α.

Ο εξοπλισμός του Γεωραντάρ αποτελείται από μία γεννήτρια σήματος, κεραίες εκπομπής (πομπός) και λήψης (δέκτης) της ενέργειας και την ψηφιακή μονάδα ελέγχου καταγραφής. Οι κεραίες του συστήματος είναι μονοστατικές (monostatic) ή διστατικές (bistatic). Η μονοστατική κεραία λειτουργεί ως πομπός και δέκτης παράλληλα, ενώ στις διστατικές κεραίες η μία χρησιμοποιείται ως πομπός και οι υπόλοιπες (μία ή παραπάνω) ως δέκτες. Το σήμα που λαμβάνεται ενισχύεται και καταγράφεται σε σχέση με τον χρόνο διπλής διαδρομής της ενέργειας από την ψηφιακή μονάδα ελέγχου. Το σύστημα του Γεωραντάρ μετακινείται στην επόμενη θέση μέτρησης κατά μήκος ενός προφίλ, χειροκίνητα ή από κάποιο όχημα που κινείται με σταθερή ταχύτητα, έως ότου ολοκληρωθούν οι μετρήσεις.

Το βάθος διερεύνησης του Γεωραντάρ και η κατακόρυφη διακριτική του ικανότητα εξαρτώνται κυρίως από τον τύπο της κεραίας. Οι κεραίες χαμηλών σχετικά συχνοτήτων (25-200MHz) μπορούν να καταγράψουν ενέργεια από ανακλάσεις βάθους έως 35 περίπου μέτρων, αλλά με μειωμένη διακριτική ικανότητα, σε αντίθεση με τις κεραίες υψηλότερων συχνοτήτων (300-1000MHz), οι οποίες λαμβάνουν ανακλάσεις από βάθη μικρότερα των 10 μέτρων, με υψηλότερη όμως διακριτική ικανότητα. Συνεπώς, η επιλογή κεραίας γίνεται με βάση τον στόχο και το επιθυμητό βάθος διερεύνησης. Έτσι, κεραίες χαμηλών συχνοτήτων χρησιμοποιούνται κυρίως για την απεικόνιση ρηγμάτων, γεωλογικών στρωμάτων, μεγάλων καρστικών μορφών κ.α., ενώ κεραίες μεγαλύτερων συχνοτήτων για έρευνα κοντά στην επιφάνεια με σκοπό τον εντοπισμό θαμμένων αντικειμένων, σωλήνων, καλωδίων κ.α.

Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει το βάθος διερεύνησης του Γεωραντάρ είναι η αγωγιμότητα των σχηματισμών που διέρχεται η ηλεκτρομαγνητική εκπομπή. Σε υπέδαφος υψηλής αγωγιμότητας όπως κορεσμένους σε νερό αργίλους, τα κύματα εξασθενούν και απορροφούνται μειώνοντας το βάθος διείσδυσης έως και κάτω από 1 μέτρο, ενώ σε χαμηλής αγωγιμότητας υλικά όπως ξηρά εδάφη μπορούν να φτάσουν έως τα 30 περίπου μέτρα.

Η οριζόντια διακριτική ικανότητα του Γεωραντάρ υποδηλώνει την ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση μεταξύ δύο ανακλαστήρων που βρίσκονται στο ίδιο περίπου βάθος, έτσι ώστε να εντοπίζονται από τη μέθοδο ως ξεχωριστά συμβάντα. Για καλύτερα αποτελέσματα απαιτείται μικρή απόσταση μεταξύ των διαδοχικών εκπομπών, δηλαδή μικρή ταχύτητα μετακίνησης από τη μία καταγραφή στην άλλη.

Οι βασικοί τρόποι με τους οποίους πραγματοποιούνται οι μετρήσεις της μεθόδου του Γεωραντάρ είναι η όδευση ή προφίλ ανακλάσεων (reflection profiling), με στόχο την καταγραφή διεπιφανειών και αντικειμένων διαφορετικών διηλεκτρικών σταθερών, η διαγραφή ταχυτήτων (velocity sounding), με σκοπό τον εντοπισμό

της μεταβολής της ταχύτητας με το βάθος και η τομογραφία, που χρησιμοποιείται κυρίως για μελέτη του χώρου μεταξύ στοών και γεωτρήσεων. Η επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται γίνεται με τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται στην Σεισμική Ανάκλαση και οι τομές που προκύπτουν προσομοιάζουν με αυτές.

Όσον αφορά τη διακριτική ικανότητα του Γεωραντάρ στην απεικόνιση καρστικών μορφών, αποδεικνύεται πολύ καλή στην περίπτωση ρηχών υπόγειων στόχων. Τα έγκοιλα γεμάτα με αέρα και τα κορεσμένα σε νερό ιζήματα ή κενά είναι ισχυροί ανακλαστές της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Επίσης, η ενέργεια που εκπέμπεται διεισδύει αρκετά καλά στα ανθρακικά πετρώματα που περικλείουν τα καρστικά έγκοιλα, φτάνοντας τα μερικές δεκάδες μέτρα βάθος. Για τους παραπάνω λόγους, η εφαρμογή της μεθόδου GPR εξυπηρετεί τις περισσότερες φορές την ανίχνευση καρστικών μορφών.

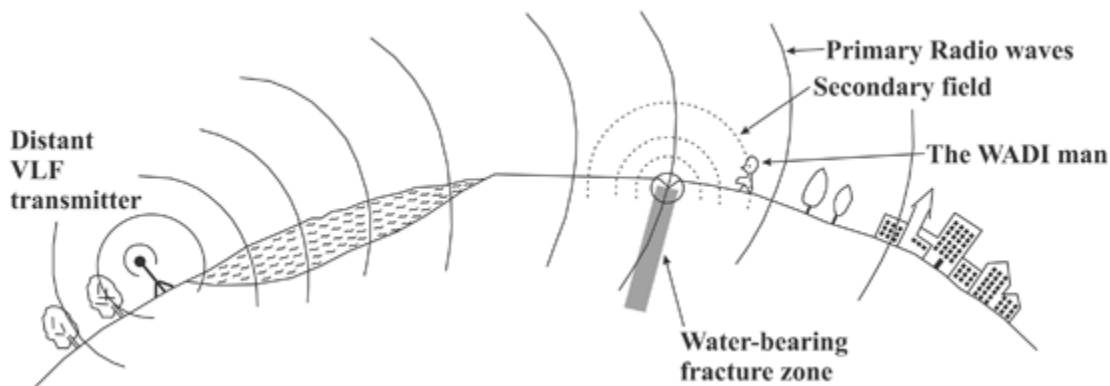
3.2.2. Μέθοδος Πολύ Χαμηλής Συχνότητας (VLF)

Όταν χαμηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τεχνητά ή φυσικά, διαδίδονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, επάγουν μέσα σε αυτό εναλλασσόμενα ηλεκτρικά ρεύματα, τα οποία παράγουν δευτερογενή ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τα κύματα αυτά έχουν ίδια συχνότητα με τα αρχικά, αλλά οι άλλες ιδιότητές τους (διεύθυνση, πλάτος, φάση) είναι διαφορετικές, γιατί εξαρτώνται από την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των ανώτερων τμημάτων του φλοιού. Με βάση τις διαφορές στις τιμές των ιδιοτήτων του πρωτογενούς πεδίου που είναι γνωστές και του δευτερογενούς πεδίου που αναζητούνται, καθορίζεται το μοντέλο της κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης σε μια περιοχή. (B. Παπαζάχος, 1996)

Η μέθοδος Πολύ Χαμηλής Συχνότητας (Very – Low Frequency, VLF) ανήκει στις Ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους ενεργής πηγής, δηλαδή χρησιμοποιεί ως πρωτεύοντα πεδία τεχνητά ηλεκτρομαγνητικά σήματα που προέρχονται από μακρινές πηγές μεγάλης ισχύος, όπως στρατιωτικές ή πολιτικές πηγές ραδιοκυμάτων. Οι πηγές αυτές - ραδιοπομποί βρίσκονται διάσπαρτοι ανά τον κόσμο. Οι περισσότεροι από αυτούς εκπέμπουν συνεχώς το σήμα τους, το οποίο λαμβάνεται σε αποστάσεις χιλιάδων χιλιομέτρων και χρησιμοποιείται κυρίως από τα υποβρύχια, στην πλοήγηση και στις επικοινωνίες. Τα σήματα που εκπέμπονται ανήκουν στην περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 15kHz και 30kHz.

Με βάση τον τρόπο δημιουργίας και καταγραφής των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, η VLF διακρίνεται στις μεθόδους πεδίου συχνότητας (frequency domain methods), ενώ με βάση τον τύπο μετρήσεων που πραγματοποιεί ο δέκτης στις μεθόδους γωνίας κλίσης (tilt/dip angle methods).

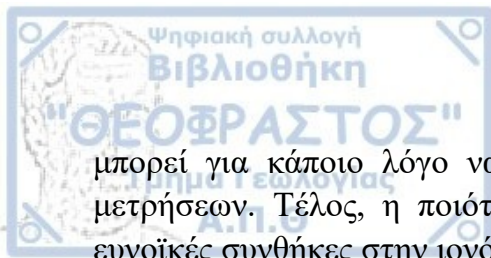
Η πρώτη εμπορικά διαθέσιμη συσκευή που χρησιμοποιήθηκε ως δέκτης VLF δημιουργήθηκε το 1964 από τον Ronka, ενώ τα τελευταία χρόνια έχει υπάρξει μεγάλη εξέλιξη στον αριθμό των διαθέσιμων συσκευών και στα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά. Ως αποτέλεσμα, η μέθοδος VLF χρησιμοποιείται σήμερα πέρα από την αναγνώριση αγώγιμων μεταλλοφόρων σχηματισμών και ζωνών ρηγμάτων κορεσμένων σε νερό, στη χαρτογράφηση χωματερών και ΧΥΤΑ, αλλά και στον εντοπισμό εγκοίλων.



Εικόνα 3.2.2.1. Αρχή καταγραφής μεθόδου VLF. (Sharma SP, 2014)

Η μέθοδος βασίζεται στο συντονισμό ενός πηνίου (σήματος) της συσκευής με τη συχνότητα του σταθμού εκπομπής – πομπού, που θα χρησιμοποιηθεί και στον προσανατολισμό ενός δεύτερου πηνίου (αναφοράς) προς τη διεύθυνση του εκάστοτε προφίλ μέτρησης. Τα προφίλ σχεδιάζονται ώστε να είναι κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, δηλαδή παράλληλα προς τη διεύθυνση της μαγνητικής συνιστώσας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Κατόπιν, πραγματοποιούνται μετρήσεις της γωνίας κλίσης κατά μήκος της κάθε τομής. Ανώμαλες μεταβολές των τιμών των γωνιών κλίσης υποδηλώνουν δομές χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης. Υπάρχουν συσκευές που παρουσιάζουν κάποιες παραλλαγές σε σχέση με την βασική λειτουργία της μεθόδου και καταγράφουν επιπλέον παραμέτρους.

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγεται ότι ο εξοπλισμός είναι μικρών διαστάσεων και συνεπώς εύκολα μεταφερόμενος. Επίσης, η μέθοδος εκτελείται αρκετά γρήγορα και είναι σχετικά οικονομική σε σχέση με άλλες γεωφυσικές μεθόδους. Στον αντίποδα, κάποια από τα μειονεκτήματά της είναι η ευαισθησία της σε ανθρωπογενείς ηλεκτρομαγνητικούς θορύβους, κατασκευές και γραμμικά αγωγά αντικείμενα που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, κυρίως μέσα στις πόλεις (αγωγούς νερού, καλώδια ρεύματος κ.α.). Επίσης, ο χρήστης του δέκτη VLF δεν έχει κανένα έλεγχο στην πηγή του σήματος, η οποία



μπορεί για κάποιο λόγο να μη λειτουργεί την προγραμματισμένη ημέρα των μετρήσεων. Τέλος, η ποιότητα των μετρήσεων μπορεί να επηρεαστεί από μη ευνοϊκές συνθήκες στην ιονόσφαιρα.

Παρόλα αυτά, η μέθοδος VLF αποτελεί μία απλή, εύκολη και γρήγορη γεωφυσική μέθοδο αναγνωριστικού κυρίως χαρακτήρα, η οποία μπορεί να εντοπίσει σε πρώτο χρόνο ανωμαλίες στις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης των σχηματισμών, με σκοπό την περαιτέρω έρευνα με χρήση άλλης γεωφυσικής μεθόδου ή και γεώτρησης στη συνέχεια.

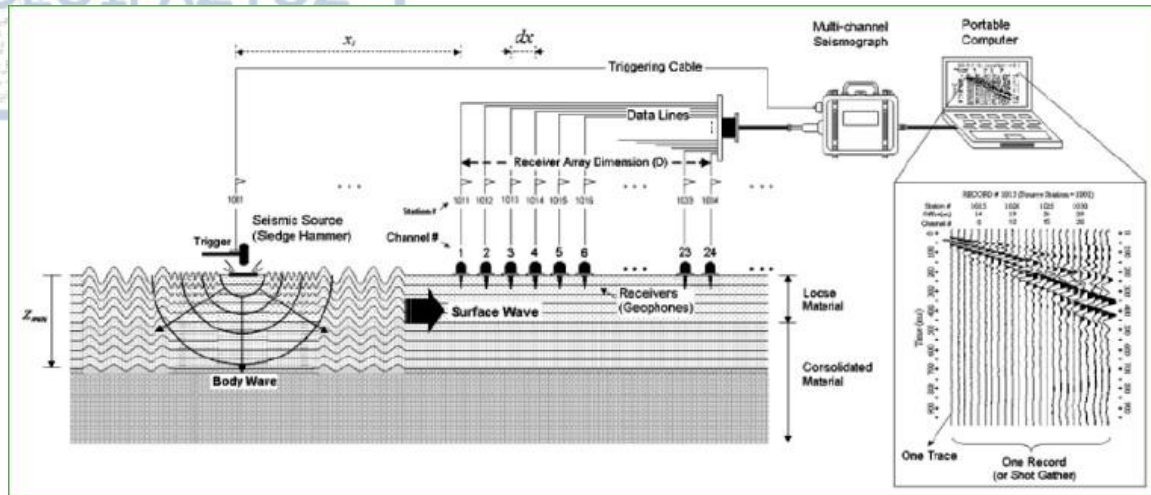
3.2.3. Πολυκαναλική Ανάλυση Επιφ. Κυμάτων (MASW)

Η Πολυκαναλική Ανάλυση Επιφανειακών Κυμάτων (Multichannel Analysis of Surface Waves, MASW) είναι μία Σεισμική μέθοδος γεωφυσικής διασκόπησης που χρησιμοποιεί τα επιφανειακά κύματα και από αυτά, κυρίως τα κύματα Rayleigh.

Η πιο συνήθης εφαρμογή της μεθόδου είναι σε γεωτεχνικά έργα με σκοπό τον χαρακτηρισμό των εδαφών θεμελίωσης, μέσω του προσδιορισμού των εδαφομηχανικών και βραχομηχανικών χαρακτηριστικών τους, παράγοντας μονοδιάστατα, δυσδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα του υπεδάφους (1D, 2D, 3D), συμπληρώνοντας ή αντικαθιστώντας τον παραδοσιακό τρόπο προσδιορισμού τους (επιτόπου δοκιμές φόρτισης, εργαστηριακές δοκιμές).

Η μέθοδος αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1990. Στην αρχική της μορφή χρησιμοποιεί μια ελεγχόμενη σεισμική πηγή (π.χ. σφυρί με πλάκα κρούσης) και βασίζεται στις συμβατικές διατάξεις των σεισμικών μεθόδων ανάκλασης και διάθλασης, με ίσες αποστάσεις ανάμεσα στα γεώφωνα. Τα τελευταία χρόνια υπάρχουν παραλλαγές που επιτρέπουν στη μέθοδο να αξιοποιεί τον περιβαλλοντικό θόρυβο από φυσικές ή ανθρωπογενείς πηγές αντί της ελεγχόμενης σεισμικής πηγής.

Η μέθοδος περιλαμβάνει τα στάδια της καταγραφής των πολυκαναλικών μετρήσεων, τον υπολογισμό των καμπυλών διασποράς και την αντιστροφή των καμπυλών αυτών, για τη δημιουργία του μονοδιάστατου 1D μοντέλου ταχυτήτων V_s ως προς το βάθος. Το δισδιάστατο 2D μοντέλο ταχυτήτων παρουσιάζει τη μεταβολή των ταχυτήτων ως προς το βάθος κατά μήκος μιας τομής και προκύπτει μετατοπίζοντας τη διάταξη των καναλιών που καταγράφουν και αντιστοιχίζοντας τα μονοδιάστατα μοντέλα σε διάφορες θέσεις κατά μήκος ενός προφίλ.



Εικόνα 3.2.3.1. Αρχή λήψης και καταγραφής δεδομένων της μεθόδου MASW. (Adel M.E. Mohamed, 2013)

Το μέγιστο βάθος διερεύνησης είναι συνήθως μεταξύ 10 και 30 μέτρων. Η σεισμική πηγή τοποθετείται εκτός της διάταξης των γεωφώνων και τα γεώφωνα σε μια ευθεία διάταξη, με ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Για τη βέλτιστη παραγωγή κυμάτων επιφανείας το τοπογραφικό ανάγλυφο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο επίπεδο (κλίση $< 10\%$), γιατί αλλιώς παρεμποδίζεται η δημιουργία των κυμάτων. Για την καταγραφή των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh χρησιμοποιούνται γεώφωνα με κατακόρυφο προσανατολισμό.

Το μήκος διάταξης γεωφώνων D σχετίζεται άμεσα με το μέγιστο μήκος κύματος λ_{max} που μπορεί να αναλυθεί, το οποίο μήκος κύματος καθορίζει το μέγιστο βάθος διερεύνησης Z_{max} . Η ελάχιστη απόσταση γεωφώνων d_x σχετίζεται με το μικρότερο μήκος κύματος λ_{min} που μπορεί να αναλυθεί και κατά συνέπεια, με το ρηχότερο βάθος Z_{min} που μπορεί να διακριθεί.

Κατά την επεξεργασία των καταγραφών επιδιώκεται ο διαχωρισμός της ενέργειας των επιφανειακών κυμάτων από τα άλλα είδη σεισμικής ενέργειας, δηλαδή της ενέργειας των κυμάτων χώρου και του τυχαίου θορύβου, έτσι ώστε να είναι ελάχιστα ορατή στο διάγραμμα ταχύτητας φάσης – συχνότητας. Από το διάγραμμα αυτό εξάγεται η καμπύλη διασποράς, η οποία χρησιμοποιείται στο στάδιο της αντιστροφής.

Σκοπός της διαδικασίας της αντιστροφής είναι η εύρεση του μοντέλου ταχυτήτων που αντιστοιχεί στην καμπύλη διασποράς που έχει μετρηθεί στο προηγούμενο στάδιο. Επειδή όμως η καμπύλη διασποράς δεν είναι μοναδική, η επιλογή της σωστής καμπύλης και των παραμέτρων για την αντιστροφή της πρέπει να γίνεται προσεκτικά, ώστε η λύση που θα δοθεί να είναι γεωλογικά ρεαλιστική.

Όσον αφορά τα καρστικά περιβάλλοντα, η μέθοδος MASW μπορεί να διακρίνει ζώνες χαμηλής ταχύτητας που ταυτίζονται με καρστικούς αγωγούς, διακλάσεις, έγκοιλα και σπήλαια, αποτελώντας έτσι μία χρήσιμη τεχνική στην τεχνικογεωλογική τους αντιμετώπιση.

4. Ηλεκτρικές Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης

4.1. Γενικά

Η χρήση ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης αποσκοπεί στον καθορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των εδαφών και πετρωμάτων των επιφανειακών τμημάτων του φλοιού της γης. Με τη χρήση των μεθόδων αυτών επιδιώκεται η αναπαράσταση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, δισδιάστατα και τρισδιάστατα. Η ερμηνεία των μοντέλων που προκύπτουν, μετά την λήψη και επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνονται κατά την έρευνα πεδίου, αποσκοπεί κυρίως στον εντοπισμό στόχων οικονομικού ενδιαφέροντος και στην επίλυση διάφορων γεωτεχνικών και περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Η μέτρηση της ηλεκτρικής τάσης είναι συνήθως το ζητούμενο μέγεθος κατά την εφαρμογή των ηλεκτρικών μεθόδων, ενώ η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι αυτή που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την ερμηνεία του μοντέλου των ανώτερων τμημάτων του φλοιού της γης.

4.2. Βασικές Ηλεκτρικές Μέθοδοι

Οι βασικές ηλεκτρικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα στη γεωφυσική έρευνα είναι :

- η μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης, που θα αναλυθεί ειδικότερα στο επόμενο κεφάλαιο (4.3),
- η μέθοδος των Ισοδυναμικών Γραμμών,
- η μέθοδος της Επαγόμενης Πολικότητας (Induced Polarization, IP),
- η μέθοδος των Τελλουρικών Ρευμάτων και τέλος,
- η μέθοδος του Φυσικού Δυναμικού (Self – Potential, SP), που αποτελεί και την παλαιότερη ηλεκτρική μέθοδο.

Οι τρεις πρώτες μέθοδοι χαρακτηρίζονται ως ενεργητικές, καθώς τα ηλεκτρικά μεγέθη που μετριοούνται οφείλονται σε ηλεκτρικά ρεύματα και πεδία που έχουν



παραχθεί τεχνητά από ειδικό εξοπλισμό. Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας μοιάζουν με τις σεισμικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης, στις οποίες ομοίως παράγονται τεχνητά ελαστικά κύματα και διοχετεύονται στο έδαφος.

Οι δύο τελευταίες μέθοδοι, του φυσικού δυναμικού και των τελλουρικών ρευμάτων, χαρακτηρίζονται ως παθητικές, καθώς βασίζονται σε μετρήσεις φυσικών ηλεκτρικών ρευμάτων και πεδίων. Για τον παραπάνω λόγω οι μέθοδοι αυτές προσομοιάζουν με τις μαγνητικές και τις βαρυτικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης, οι οποίες αντίστοιχα βασίζονται στα φυσικά μαγνητικά και βαρυτικά πεδία της γης.

Η μέθοδος του φυσικού δυναμικού αποτελεί την παλαιότερη ηλεκτρική μέθοδο και μία από τις πρώτες γεωφυσικές προσπάθειες διερεύνησης του εσωτερικού της γης, η οποία προτάθηκε το 1830 από τον Robert Fox για την διερεύνηση τυχόν επεκτάσεων γνωστών κοιτασμάτων σουλφιδίων στην Κορνουάλη της Αγγλίας. Από το 1920 η μέθοδος αυτή άρχισε να χρησιμοποιείται με αυξανόμενη συχνότητα στη μεταλλευτική έρευνα για τον εντοπισμό συμπαγών μεταλλευτικών δομών.

Η πρώτη ανίχνευση των φυσικών ηλεκτρικών ρευμάτων της γης, που αλλιώς λέγονται τελλουρικά, έγινε το 1847 από τον Άγγλο μαθηματικό Peter Barlow. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως στη μελέτη ευρύτερων περιοχών μεταλλευτικού ενδιαφέροντος

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και πιο συγκεκριμένα της Ηλεκτρικής Τομογραφίας, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων της διπλωματικής εργασίας, εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1912 από τον Conrad Schlumberger. Παρόλο που αρχικά το βάθος διερεύνησης ήταν σχετικά μικρό (μερικές εκατοντάδες μέτρα), η εξέλιξη της τεχνολογίας των συσκευών και των διατάξεων των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται επιτρέπουν σήμερα τη διερεύνηση σε βάθη που μπορεί να φτάσουν τα αρκετά χιλιόμετρα.

4.3.Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση

Η *ειδική ηλεκτρική αντίσταση* (*electric resistivity*) είναι μία θεμελιώδης παράμετρος που χαρακτηρίζει το υλικό από το οποίο δομείται μία περιοχή μελέτης και περιγράφει πόσο εύκολα μπορεί η περιοχή αυτή να διαβιβάσει ηλεκτρικό ρεύμα. Αποτελεί μια γεωμετρικά ανεξάρτητη ποσότητα και δίνεται από τον τύπο :

$$\rho = R \times A / L$$

όπου R η ηλεκτρική αντίσταση του μέσου, A η διατομή του μέσου και L το μήκος του. Μονάδα μέτρησης της τιμής της ειδικής αντίστασης είναι το Ωm .

Υψηλές τιμές της δηλώνουν ότι το υλικό είναι πολύ ανθεκτικό στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος (αντιστατικό υλικό). Αντίθετα, χαμηλές τιμές της υποδηλώνουν ότι το ηλεκτρικό ρεύμα μεταδίδεται πολύ εύκολα διαμέσου του υλικού (αγώγιμο υλικό).

Το αντίστροφο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι η **ηλεκτρική αγωγιμότητα** (*electric conductivity*) και δίνεται από τον τύπο :

$$\sigma = 1/\rho$$

μετράται σε Siemens/m ή mhos/m και δείχνει την ευκολία διάδοσης των ηλεκτρικών φορτίων μέσα από ένα πέτρωμα. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός γεωλογικού υλικού το χαρακτηρίζει ως καλό ή κακό αγωγό.

Η μετρούμενη ειδική αντίσταση των ορυκτών της γης ελέγχεται κατά κύριο λόγο από την κίνηση των φορτισμένων ιόντων στα ρευστά των πόρων. Αν και το καθαρό νερό δεν είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, το εδαφικό νερό περιέχει διαλυμένες ενώσεις οι οποίες αυξάνουν σημαντικά την ικανότητά του να άγει τον ηλεκτρισμό. Επομένως, το πορώδες, πρωτογενές και δευτερογενές (ρήγματα, διακλάσεις, ασυνέχειες), η θερμοκρασία, ο κορεσμός σε ρευστά και οι συγκεντρώσεις των διαλυμένων ενώσεων σε αυτά συμβάλλουν στη διαφοροποίηση της τιμής της ειδικής αντίστασης. (Τσελέντης & Παρασκευόπουλος, 2013).

Η συχνή μεταβολή των παραπάνω παραγόντων έχει σαν αποτέλεσμα η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης να παρουσιάζει πολύ μεγάλο εύρος τιμών, ακόμα και μέσα στους ίδιους σχηματισμούς και να αποτελεί με τον τρόπο αυτό μία από τις περισσότερο μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων του φλοιού της γης.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ειδικές αντιστάσεις διαφόρων υλικών.

Υλικά	Τιμές Ειδικών Αντιστάσεων (Ωm)
Αέρας	∞
Σιδηροπυρίτης	3×10^{-1}
Γαληνίτης	2×10^{-3}
Χαλαζίας	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
Ασβεστίτης	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
Ορυκτό Άλας	$30 - 1 \times 10^{13}$
Μαρμαρυγίας	$9 \times 10^{12} - 1 \times 10^{14}$

Γρανίτης	$100 - 1 \times 10^6$
Γάββρος	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$
Βασάλτης	$10 - 1 \times 10^7$
Ασβεστόλιθοι	$50 - 1 \times 10^7$
Ψαμμίτες	$1 - 1 \times 10^8$
Σχιστόλιθοι	$20 - 2 \times 10^3$
Δολομίτες	$100 - 10000$
Άμμος	$1 - 1000$
Άργιλος	$1 - 100$
Εδαφικό Νερό	$0,5 - 300$
Θαλασσινό Νερό	$0,2$

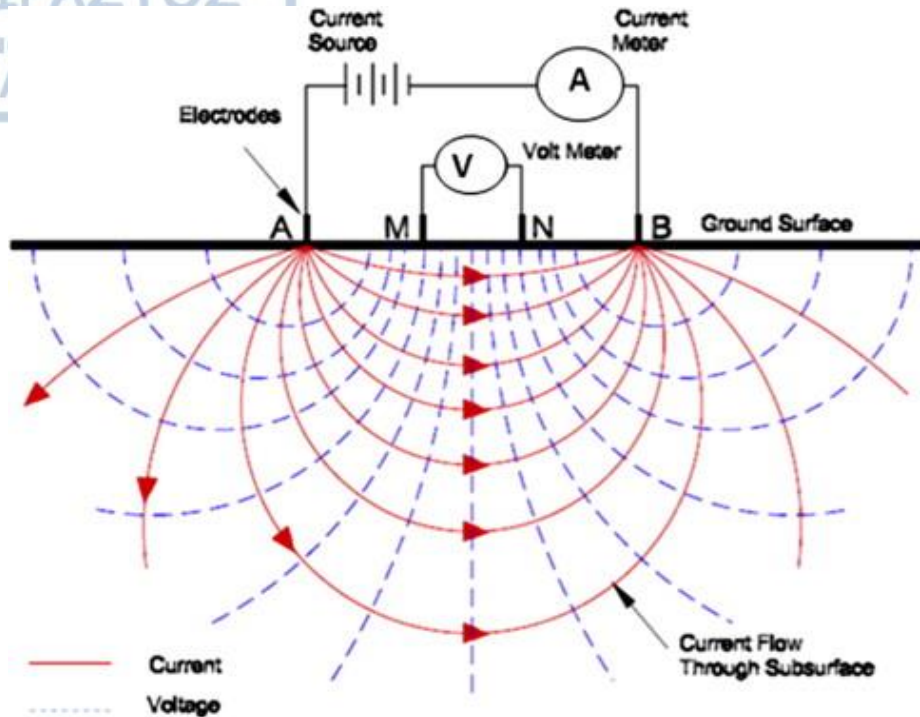
Πίνακας 4.3.1. Ειδικές αντιστάσεις διαφόρων υλικών. (Ιωάννης Φ. Λούης, 2004)

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι ο αέρας έχει άπειρη θεωρητικά αντίσταση. Αντιθέτως, τα ασβεστολιθικά πετρώματα και τα προϊόντα αποσάθρωσής τους, που σχεδόν αποκλειστικά περικλείουν τις καρστικές μορφές διάλυσης και τα σπήλαια, έχουν σημαντικές τιμές ειδικής αντίστασης. Επομένως, στην περίπτωση της αναζήτησης καρστικών μορφών και σπηλαίων η μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, με αρκετά ξεκάθαρα αποτελέσματα.

4.3.1. Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι ενεργητική και βασίζεται στη διάδοση ηλεκτρικού ρεύματος χαμηλής συχνότητας στο υπέδαφος και στη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού που δημιουργείται, μέσω ζευγών ηλεκτροδίων εισαγωγής ρεύματος και μέτρησης δυναμικού, τα οποία τοποθετούνται σε διάφορες θέσεις στο χώρο ενδιαφέροντος.

Ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I διαδίδεται στο υπέδαφος μέσω δύο ηλεκτροδίων ρεύματος A και B και η διαφορά δυναμικού $V(M-N)$ που δημιουργείται μετρείται από δύο ηλεκτρόδια δυναμικού M και N , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 4.3.2. Σχηματική παράσταση της βασικής διάταξης τεσσάρων ηλεκτροδίων κατά τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, των σχετικών διαδρομών του ηλεκτρικού ρεύματος που διαδίδεται μέσω των ηλεκτροδίων ρεύματος A και B (κόκκινες γραμμές) και των καμπυλών δυναμικού που δημιουργούνται (μπλε διακεκομμένες γραμμές) και καταγράφονται από τα ηλεκτρόδια δυναμικού M και N.

Η κατανομή της ειδικής αντίστασης στο υπέδαφος ονομάζεται **γεωηλεκτρική δομή**. Άμεσος στόχος της μεθόδου είναι ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους, ενώ η γεωλογική ερμηνεία της δομής αυτής αποτελεί τον τελικό στόχο, ο οποίος παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες και συνήθως απαιτεί πρόσθετα στοιχεία (γεωλογικά, γεωφυσικά κλπ.). (Παπαζάχος, 1996)

Θεωρώντας το μοντέλο της ομοιογενούς γης, η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης δίνεται από τον τύπο :

$$R = V/I$$

όπου V η διαφορά δυναμικού και I η ένταση του ρεύματος.



Η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δίνεται από τον τύπο :

$$\rho = R \times 2\pi / K \quad (1)$$

όπου K ο *γεωμετρικός παράγοντας* ή *γεωμετρικός συντελεστής* (*geometric factor*), που υπολογίζεται από τη σχέση :

$$K = 1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN$$

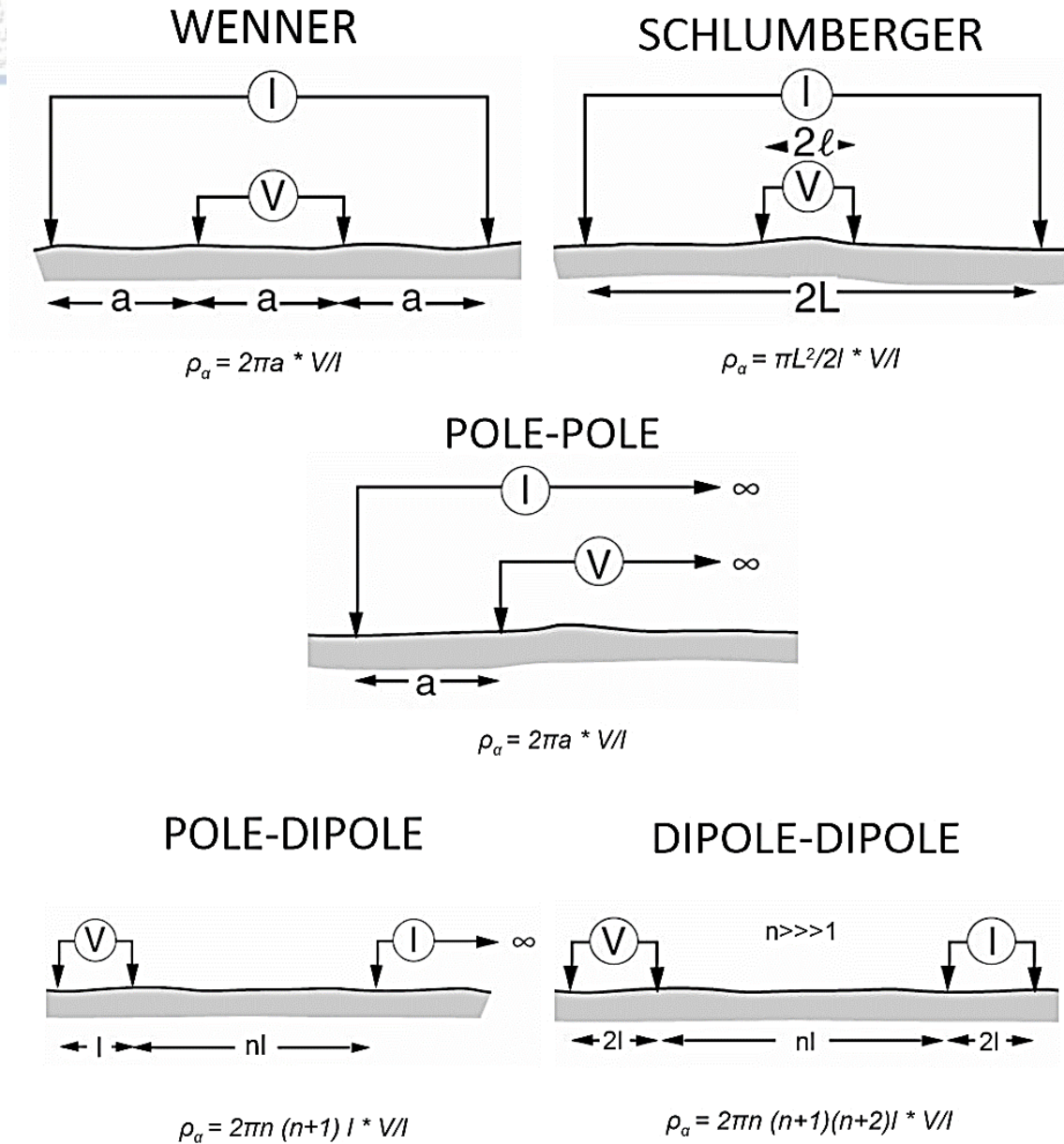
και εξαρτάται από τη γεωμετρία της διάταξης των ηλεκτροδίων.

Η εξίσωση (1) ισχύει και στην περίπτωση ανομοιογενούς μέσου, όπως ο φλοιός της Γης, όπου η μετρούμενη ειδική αντίσταση ονομάζεται *φαινόμενη ειδική αντίσταση* ρ_a . Η φαινόμενη ειδική αντίσταση είναι μία μέση τιμή ηλεκτρικής αντίστασης που διαμορφώνεται από όλους τους γεωλογικούς σχηματισμούς μέσα από τους οποίους διέρχεται το ηλεκτρικό ρεύμα. Για τη λήψη της πραγματικής τιμής της ειδικής αντίστασης πραγματοποιείται η διαδικασία της αντιστροφής των δεδομένων με τη χρήση ειδικών αλγορίθμων.

4.3.2. Διατάξεις Ηλεκτροδίων

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εφαρμόζεται στο πεδίο συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτροδίων σε συνάρτηση με τις ανάγκες της εκάστοτε έρευνας. Συνήθως επιλέγονται διατάξεις με εσωτερική συμμετρία και πρακτική εφαρμογή. Κάθε μία έχει διαφορετικό τρόπο τοποθέτησης των ηλεκτροδίων, όπου ανάλογα με τη γεωμετρία τους μεταβάλλεται η τιμή του γεωμετρικού παράγοντα K και επομένως της φαινόμενης ειδικής αντίστασης ρ_a .

Οι πιο διαδεδομένες και γνωστές διατάξεις ηλεκτροδίων φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.3.2.1. Οι κυριότερες διατάξεις ηλεκτροδίων και η αντίστοιχη εξίσωση της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης. (Milsom, 2003)

WENNER

Στη διάταξη Wenner χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια που διατάσσονται σε μία ευθεία και απέχουν ίση μεταξύ τους απόσταση a . Τα δύο εξωτερικά ηλεκτρόδια εισάγουν ρεύμα στο έδαφος και τα δύο εσωτερικά μετράνε τη διαφορά δυναμικού που δημιουργείται. Το σημείο μέτρησης αντιστοιχεί στο



μέσον της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού, δηλαδή στο κέντρο της διάταξης.

Η μετρούμενη φαινόμενη ειδική αντίσταση, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα (4.3.2.1), δίνεται από την εξίσωση :

$$\rho_a = 2\pi a \times V/I$$

Στην περίπτωση αυτή ο γεωμετρικός συντελεστής είναι :

$$K = 2\pi a$$

Πλεονεκτήματα της διάταξης αυτής σε σχέση με άλλες είναι ο εύκολος υπολογισμός της φαινόμενης ειδικής αντίστασης στο πεδίο και η μειωμένη εξάρτηση από την ευαισθησία του οργάνου. Στα μειονεκτήματά της συγκαταλέγεται ότι είναι ευαίσθητη σε τοπικές ρηχές μεταβολές, ότι απαιτείται μετακίνηση όλων των ηλεκτροδίων σε κάθε μέτρηση και τέλος, ότι απαιτείται μακρύ μήκος καλωδίων.

SCHLUMBERGER

Στη διάταξη Schlumberger χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια που διατάσσονται επί μιας ευθείας, με τα δύο εξωτερικά ηλεκτρόδια ρεύματος και τα δύο εσωτερικά ηλεκτρόδια δυναμικού, όπως και στη διάταξη Wenner. Και στην περίπτωση αυτή το σημείο μέτρησης αντιστοιχεί στο μέσον της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού.

Η διαφορά έγκειται στο ότι η απόσταση $2l$ μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την απόσταση $2L$ μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος ($2l \ll 2L$).

Η μετρούμενη φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από την εξίσωση :

$$\rho_a = \pi L^2 / 2l \times V/I$$

Δηλαδή, στην περίπτωση αυτή ο γεωμετρικός παράγοντας είναι :

$$K = \pi L^2 / 2l$$

Η διάταξη αυτή υπερέχει στο ότι χρειάζεται κοντύτερα καλώδια δυναμικού και σε κάθε μέτρηση μετακινούνται λιγότερα ηλεκτρόδια. Στον αντίποδα, υστερεί στο ότι χρειάζεται μακριά καλώδια ρεύματος και για μεγάλες αποστάσεις ηλεκτροδίων ρεύματος χρειάζεται πιο ευαίσθητο εξοπλισμό.

POLE – POLE

Στη διάταξη Pole – Pole ή δίδυμη διάταξη ή αλλιώς Half – Wenner, χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια, όπου ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού τοποθετούνται σε απόσταση a μεταξύ τους, ενώ τα άλλα δύο ηλεκτρόδια, ρεύματος και δυναμικού, τοποθετούνται σε άπειρη θεωρητικά απόσταση από τα προηγούμενα, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα (4.3.2.1). Το σημείο μέτρησης βρίσκεται στο μέσο της απόστασης a .

Η μετρούμενη φαινόμενη ειδική αντίσταση σε αυτήν την περίπτωση δίνεται από τον τύπο :

$$\rho_a = 2\pi a \times V/I$$

όπου ο γεωμετρικός παράγοντας, όπως και στη διάταξη Wenner, είναι:

$$K = 2\pi a$$

POLE – DIPOLE

Στη διάταξη Pole – Dipole ή Πόλου – Δίπολου ή αλλιώς Half – Schlumberger, χρησιμοποιούνται τέσσερα συνευθειακά ηλεκτρόδια, δύο ρεύματος και δύο δυναμικού. Τα δύο ηλεκτρόδια δυναμικού απέχουν μεταξύ τους απόσταση l , το ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος απέχει απόσταση nl από το δίπολο των ηλεκτροδίων δυναμικού (όπου n ακέραιος αριθμός), και το άλλο ηλεκτρόδιο ρεύματος απέχει άπειρη θεωρητικά απόσταση από τα υπόλοιπα. Το σημείο μέτρησης βρίσκεται στο κέντρο της απόστασης nl .

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο :

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

όπου ο γεωμετρικός παράγοντας είναι :

$$K = 2\pi n \times (n + 1)$$

Με την διάταξη αυτή επιτυγχάνεται διερεύνηση μεγάλου σχετικά βάθους, αλλά μειωμένης διακριτικής ικανότητας.

DIPOLE – DIPOLE

Στη διάταξη Dipole – Dipole ή Δίπολου – Δίπολου χρησιμοποιούνται ένα ζεύγος ηλεκτροδίων ρεύματος, που απέχουν μεταξύ τους απόσταση $2l$ και ένα ζεύγος ηλεκτροδίων δυναμικού, που απέχουν και αυτά μεταξύ τους απόσταση $2l$. Η απόσταση μεταξύ των δύο δίπολων είναι ίση με nl , όπου ο ακέραιος αριθμός n είναι πολύ μεγαλύτερος από τη μονάδα ($n \gg 1$). Το σημείο μέτρησης βρίσκεται στην ενδιάμεση απόσταση των δύο δίπολων.

Εδώ, η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο :

$$\rho_{\alpha} = 2\pi n(n + 1)(n + 2)l \times V/I$$

όπου ο γεωμετρικός παράγοντας είναι :

$$K = 2\pi n(n + 1)(n + 2)l$$

Το πλεονέκτημα της διάταξης αυτής είναι ότι παρουσιάζει ευαισθησία σε κάθετα όρια αλλαγής της ειδικής αντίστασης, τα καλώδια μπορεί να είναι σχετικά κοντά για μετρήσεις μεγάλου σχετικά βάθους και οι εργασίες υπαίθρου είναι εύκολες λόγω του μικρού μήκους των καλωδίων. Τα μειονεκτήματά της είναι ότι χρειάζεται πολύ ρεύμα και ευαίσθητα όργανα.

Η επιλογή της διάταξης των ηλεκτροδίων για μία περιοχή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, με κύριους το είδος του στόχου που θέλουμε να προσδιορίσουμε (στάθμη υδροφόρου ορίζοντα, ρήγμα, ασυνέχειες, έγκοιλα κτλ.), το πιθανό βάθος των υπεδάφινων δομών - στόχων, τη μέγιστη επιθυμητή κατακόρυφη και οριζόντια - πλευρική ανάλυση, τη διαφορετική ευαισθησία της κάθε διάταξης και τέλος, το λόγο του σήματος προς θόρυβο της κάθε διάταξης. Ο συνδυασμός των παραπάνω παραγόντων καθορίζει τη βέλτιστη επιλογή στη διάταξη των ηλεκτροδίων που θα επιλέξουμε για μία έρευνα πεδίου.

Για την γεωφυσική έρευνα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κατά την εφαρμογή της μεθόδου της Ηλεκτρικής Τομογραφίας στο ύπαιθρο, επιλέχθηκε η διάταξη Dipole - Dipole ή αλλιώς Δίπολου - Δίπολου και τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο (5.3).

4.4. Ηλεκτρική Τομογραφία (ERT)

Με διαδοχική αύξηση των αποστάσεων ανάμεσα στα ηλεκτρόδια επιτυγχάνεται η **βυθοσκόπηση ειδικής αντίστασης (electrical sounding, ES)**, δηλαδή η



διασκόπηση που σχεδιάζεται για τον προσδιορισμό των μεταβολών της ειδικής αντίστασης με το βάθος πάνω από ένα καθορισμένο σημείο στην επιφάνεια. (Φ. Λούης, 2004)

Από την άλλη, μετακινώντας τα ηλεκτρόδια πλευρικά και διατηρώντας πάντα σταθερή την απόσταση μεταξύ τους επιτυγχάνεται η **οριζοντιογραφία** ή αλλιώς το **προφίλ ειδικής αντίστασης (electrical profiling, EP)**, δηλαδή η ανίχνευση των πλευρικών μεταβολών της ειδικής αντίστασης ή αλλιώς η χωρική μεταβολή των τιμών της. (Φ. Λούης, 2004)

Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω διαδικασιών, δηλαδή της βυθοσκόπησης και του προφίλ ειδικής αντίστασης αποτελεί τη μέθοδο της **Ηλεκτρικής Τομογραφίας (electrical resistivity tomography, ERT)**.

Η μέθοδος αυτή επιτυγχάνεται είτε με την πραγματοποίηση επαναλαμβανόμενων βυθοσκοπήσεων κατά μήκος διαδοχικών και παράλληλων τομών, είτε με μια σειρά από προφίλ ειδικής αντίστασης με διαδοχικές αυξήσεις των αποστάσεων ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, προσφέροντας έτσι δισδιάστατη ή ακόμα και τρισδιάστατη κάλυψη μιας περιοχής. Με τον τρόπο αυτό, το μέγεθος της πληροφορίας που λαμβάνεται κατά την εφαρμογή της μεθόδου είναι πολύ μεγαλύτερο.

Η ταχύτητα λήψης και η πυκνότητα των μετρήσεων εξαρτώνται από την απόσταση τοποθέτησης μεταξύ των ηλεκτροδίων, τον αριθμό τους και τη διάταξη που χρησιμοποιείται. Έτσι, κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων ελέγχεται από τον όργανο ποια ηλεκτρόδια θα λειτουργήσουν διαδοχικά ως ηλεκτρόδια ρεύματος και ποια ως ηλεκτρόδια δυναμικού, αποσυνδέοντας τα υπόλοιπα. Οι μετρήσεις συνεχίζονται έως ότου μετρηθούν όλοι οι επιθυμητοί συνδυασμοί ηλεκτροδίων ρεύματος-δυναμικού με βάση τη διάταξη ηλεκτροδίων που έχει επιλεγεί. (Τσελέντης & Παρασκευόπουλος, 2013)

Τα δεδομένα που λαμβάνονται αποτυπώνονται σε μια ψευδοτομή που αντιπροσωπεύει τις τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Η ψευδοτομή χρησιμοποιείται μόνο ενδεικτικά για την κατανομή των ειδικών αντιστάσεων και όχι ως τελική τομή για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Η τελική τομή προκύπτει μετά την αφαίρεση των ακραίων τιμών (θορύβου) και τη χρήση ειδικών αλγορίθμων αντιστροφής των δεδομένων. (Τσελέντης & Παρασκευόπουλος, 2013)

Η ανάπτυξη του ειδικού εξοπλισμού λήψης των μετρήσεων με πολυκαναλικά όργανα, όπως και η εξέλιξη των συστημάτων επεξεργασίας - αντιστροφής των γεωφυσικών δεδομένων καθιστούν την Ηλεκτρική Τομογραφία αρκετά γρήγορη, πολύ αξιόπιστη και μία από τις πλέον εφαρμοζόμενες γεωφυσικές μεθόδους

διασκόπησης των επιφανειακών σχηματισμών του φλοιού της γης, που τα αποτελέσματά της μπορούν να συγκριθούν σε ακρίβεια με αυτά των γεωτρήσεων. Τέλος, παρουσιάζει πληθώρα εφαρμογών σε διάφορους τομείς έρευνας με κυριότερους από τους οποίους :

- την **Υδρογεωλογία** (αποτύπωση λιθολογικών σχηματισμών, εύρεση βάθους υδροφόρου και μη περατών σχηματισμών, αποτύπωση ζωνών υφαλμύρυνσης, εντοπισμός ζωνών ρήγματος, περιοχών μεγάλης υδραυλικής αγωγιμότητας, εγκοίλων κ.α.),
- την **Τεχνική Γεωλογία** (εντοπισμός ρηξιγενών ζωνών, εγκοίλων και ασταθών περιοχών, αποτύπωση πιθανών θέσεων διαρροής σε χωμάτινα φράγματα κ.α.),
- τη **Μεταλλευτική Έρευνα** (αποτύπωση ζωνών μεταλλοφορίας κ.α.)
- τη **Γεωθερμία** (παρατηρούνται χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης πάνω από τα γεωθερμικά πεδία λόγω της ύπαρξης θερμομεταλλικών ρευστών),
- την **Περιβαλλοντική Γεωλογία** (αποτύπωση διαρροής και κινήσεων ρύπων στο υπέδαφος κ.α.) και
- την **Αρχαιολογία** (αποτύπωση τοίχων, δρόμων, θόλων κ.α.).

5.Μέθοδος Έρευνας

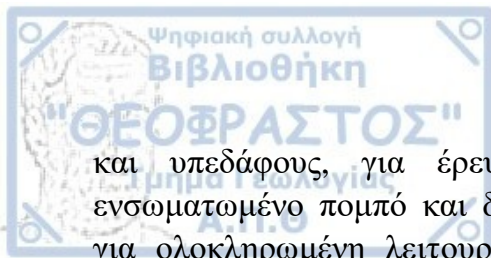
5.1.Εξοπλισμός

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων και την εξαγωγή των γεωφυσικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε εξειδικευμένος εξοπλισμός για τη μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας.

Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν :

- Το γεωφυσικό όργανο Syscal Pro, IRIS Instruments, France
- Διαφορικό GPS (DGPS)
- 24 ηλεκτρόδια από ανοξείδωτο ατσάλι
- Καρούλι πολύκλωνων καλωδίων
- Μετροταινίες
- Βαριοπούλες

Για τη λήψη των γεωηλεκτρικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ένα τελευταίας τεχνολογίας γεωφυσικό όργανο μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης. Το Syscal Pro της IRIS Instruments αποτελεί ένα πλήρως αυτοματοποιημένο όργανο πολλαπλών καναλιών μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους



και υπεδάφους, για έρευνα με μεθόδους συνεχούς ρεύματος. Διαθέτει ενσωματωμένο πομπό και δέκτη που τροφοδοτούνται από εσωτερική μπαταρία για ολοκληρωμένη λειτουργία εισαγωγής ηλεκτρικού ρεύματος και μέτρησης διαφοράς δυναμικού. Έχει τη δυνατότητα σύνδεσης με εξωτερική μπαταρία για ακόμη μεγαλύτερη αυτονομία. Η ικανότητα σύγχρονης μέτρησης 10 διαφορών δυναμικού καθιστούν ταχύτερη τη διαδικασία των μετρήσεων και μειώνουν κατά πολύ το χρόνο των εργασιών στο ύπαιθρο. Επίσης, ο αυτοματοποιημένος έλεγχος της αντιστάθμισης του φυσικού δυναμικού, η ενίσχυση του σήματος με τη διαδικασία της ψηφιακής υπέρθεσης, καθώς και η προβολή του σφάλματος κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων που πραγματοποιούνται από το συγκεκριμένο όργανο, καθιστούν συγκριτικό πλεονέκτημα για μετρήσεις υψηλής ακρίβειας. Η μέγιστη τάση εξόδου του είναι 800V με δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος έντασης που σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπερνάει τα 1500mA. Τέλος, διαθέτει ενσωματωμένο λογισμικό για τους βασικότερους τρόπους διάταξης των ηλεκτροδίων (Wenner, Schlumberger, Pole-Pole, Dipole-Dipole, Pole-Dipole, Gradient, Mixed Array), καθώς και διατάξεις που ορίζονται από τον χρήστη.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθιστούν το συγκεκριμένο όργανο μία πολύ καλή επιλογή για περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές γεωφυσικές μελέτες, μεγάλης ακρίβειας και γρήγορης σχετικά εκτέλεσης.

Το DGPS είναι ένα δίκτυο από επίγειους πομπούς και δέκτες με γνωστή θέση, οι οποίοι λαμβάνουν το σήμα από ένα GPS και υπολογίζουν το σφάλμα συγκρίνοντας την υπολογιζόμενη θέση, με τη γνωστή και πραγματική τους θέση. Στη συνέχεια, το σφάλμα εκπέμπεται στους χρήστες, όπου γίνεται διόρθωση του σήματος που λαμβάνουν από τους δορυφόρους του GPS.

Το διαφορικό γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (DGPS) χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την ακριβή καταγραφή των τοπογραφικών συντεταγμένων του κάθε ξεχωριστού σημείου τοποθέτησης των ηλεκτροδίων, με ακρίβεια χιλιοστών ειδικά στη μέτρηση του υψομέτρου, καθώς η κλίμακα της μελέτης μας είναι αρκετά μικρή.

Παρακάτω περιγράφονται η αρχική μας προσέγγιση στο σημείο του πιθανού σπηλαίου και η πραγματοποίηση των εργασιών πεδίου, με σκοπό για την εξαγωγή των γεωφυσικών δεδομένων ηλεκτρικής αντίστασης.

5.2. Περιγραφή Μεθόδου

Η πραγματοποίηση της έρευνας έγινε την Τρίτη 25 Φεβρουαρίου 2020 από πενταμελή ομάδα του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

αποτελούμενη από τρία μέλη του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, μεταξύ των οποίων τον αναπληρωτή καθηγητή και επιβλέπων της διπλωματικής εργασίας Βαργεμέζη Γεώργιο, δύο μέλη ΕΔΠ, την Διαμαντή Νεκταρία και την Παραδεισοπούλου Παρθένα, ένα σπηλαιοεξερευνητή της Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρίας, Πολυδωρόπουλο Κωνσταντίνο και εμένα, προπτυχιακό φοιτητή του τομέα Γεωλογίας.

Οι πληροφορίες που είχαμε ανέφεραν την ύπαρξη στενής εισόδου πιθανού σπηλαίου, το οποίο θεωρείτο ότι είχε πληρωθεί κατά το παρελθόν. Επίσης, ανέφεραν κίνηση αέρα στην είσοδο, ο οποίος εξερχόταν από το σπήλαιο κατά τους χειμερινούς μήνες και εισερχόταν σε αυτό τους καλοκαιρινούς.

Η προσέγγιση του σημείου, μετά από καθοδήγηση των ανθρώπων που μας παρείχαν τις παραπάνω πληροφορίες, έγινε νωρίς το πρωί και ήταν σχετικά εύκολη. Εκεί, αντικρίσαμε το αρκετά μικρό άνοιγμα για την είσοδο ανθρώπου και διαπιστώσαμε την ύπαρξη του αέρα που μας είχε επισημανθεί.





Εικόνες 5.2.1 και 5.2.2. Είσοδος πιθανού σπηλαίου.

Γρήγορα διαπιστώσαμε ότι η είσοδος στο πιθανό σπήλαιο δεν ήταν εφικτή, αλλά θα μπορούσε να γίνει με απλά σκαπτικά μέσα και σε λίγο σχετικά χρόνο. Πράγματι, μέσα σε λίγη ώρα και με τη χρήση αξίνας και φτυαριού καταφέραμε να διανοίξουμε την είσοδο, τόσο ώστε να επιτρέπεται η είσοδος ενός ανθρώπου μεσαίου αναστήματος. Η είσοδος στο σπήλαιο έγινε με απλό σπηλαιολογικό εξοπλισμό (κράνος, στολή, φακό) από τον σπηλαιοεξερευνητή της ομάδας.



Εικόνα 5.2.3. Αρχική προσπάθεια εισόδου στο πιθανό σπήλαιο.

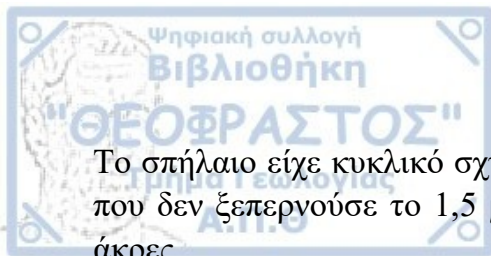


Εικόνες 5.2.4 και 5.2.5. Είσοδος του σπηλαιοεξερευνητή στο χώρο του σπηλαίου.

Με την είσοδό του διαπιστώσαμε, καταρχήν και δια ζώσης πριν από την γεωφυσική απεικόνιση, ότι ο χώρος που θα προσπαθούσαμε να αναγνωρίσουμε από την επιφάνεια είναι υπαρκτός, διαθέτει πλούσιο διάκοσμο, ικανές διαστάσεις και πιθανή συνέχεια προς το Βορρά.



Εικόνες 5.2.6 και 5.2.7. Εικόνες από το εσωτερικό του σπηλαίου.



Το σπήλαιο είχε κυκλικό σχήμα, με μήκος και πλάτος περίπου 10 μέτρα και ύψος που δεν ξεπερνούσε το 1,5 μέτρο στον κεντρικό του χώρο και περιοριζόταν στις άκρες.

Αφού χαρτογραφήθηκε και φωτογραφήθηκε με απλά μέσα, δηλαδή μετροταινία και φωτογραφική μηχανή κινητού τηλεφώνου αντίστοιχα, σειρά είχε η γεωφυσική έρευνα από την επιφάνεια, έτσι ώστε να διαπιστωθεί αρχικά η απεικόνισή του όπως και η τυχόν συνέχειά του κατά βάθος, μήκος και πλάτος.

Η ψηφιακή απεικόνιση του σπηλαίου και της ευρύτερης περιοχής του πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας. Η είσοδός μας στο χώρο του, μάς παρείχε πληροφορίες για τον τρόπο που θα ήταν καλύτερη η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων (η μεταξύ τους απόσταση σε κάθε τομογραφία και η απόσταση ανάμεσα στις διαδοχικές παράλληλες τομογραφίες), έτσι ώστε να διαπιστωθεί καλύτερα η όποια συνέχειά του.

Η διάταξη που επιλέχθηκε είναι Δίπολου – Δίπολου, λόγω της υψηλής διακριτικής της ικανότητας ως προς τις πλευρικές μεταβολές της ηλεκτρικής αντίστασης και της αποτελεσματικότητάς της σε αντίστοιχες μελέτες εντοπισμού εγκοίλων.

Σε κάθε τομογραφία τοποθετήθηκαν με τις βαριοπούλες και τις μετροταινίες 24 ηλεκτρόδια, κατά μήκος μίας όσο το δυνατόν πιο ευθείας γραμμής, λόγω των περιορισμών της μορφολογίας και κυρίως της βλάστησης στην περιοχή. Κάθε σημείο τοποθέτησης καταγραφόταν με τη χρήση του διαφορικού GPS. Η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια σε κάθε τομογραφία ήταν 4 μέτρα με επιθυμητό βάθος διασκόπησης τα 32 μέτρα. Συνεπώς, το μήκος της κάθε τομογραφίας ήταν 96 μέτρα. Η απόσταση ανάμεσα στις διαδοχικές παράλληλες τομογραφίες ήταν και αυτή 4 μέτρα.

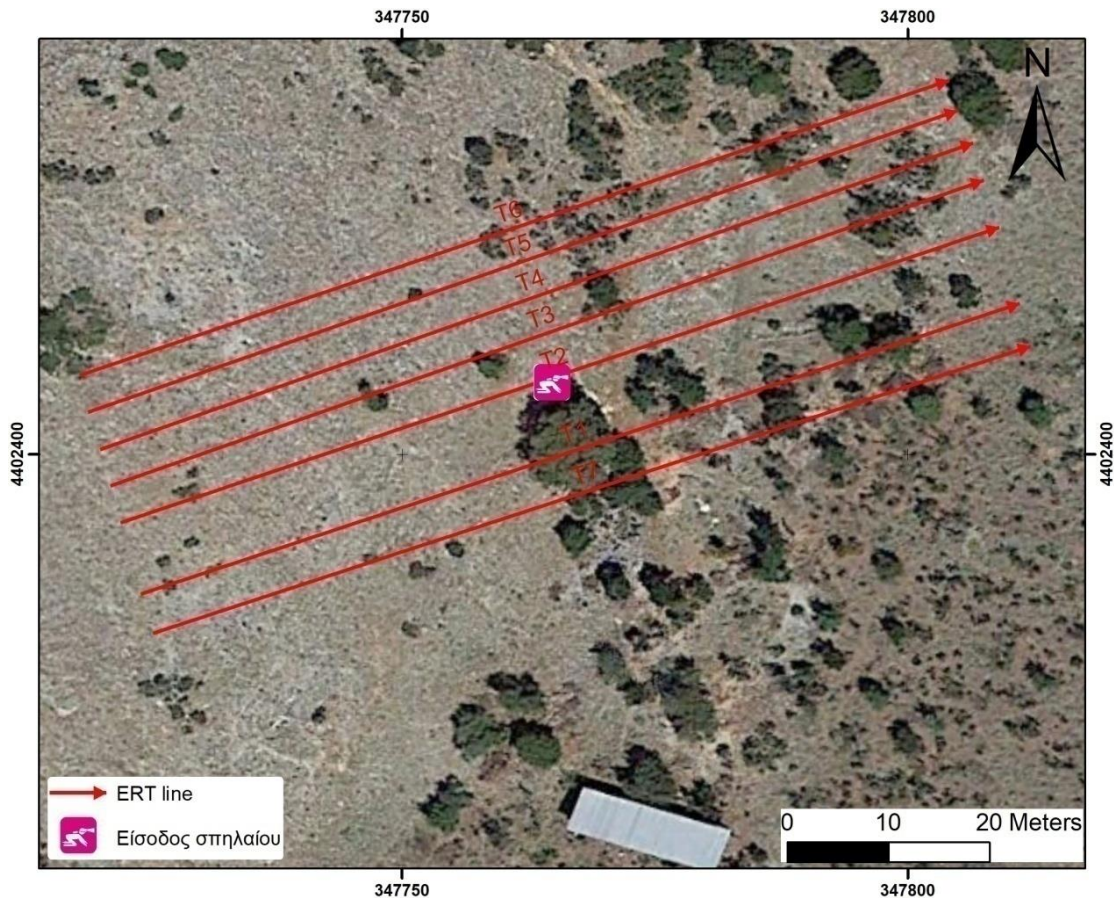
Μετά την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων, σειρά είχε ο έλεγχος μέσω του οργάνου για το αν όλα τα ηλεκτρόδια έχουν καλή επαφή με το έδαφος. Για να επιτευχθεί η καλύτερη επαφή όπου αυτό κρινόταν αναγκαίο, γινόταν ρίψη νερού περιμετρικά των ηλεκτροδίων ή και ανατοποθέτησή τους.

Μετά τις παραπάνω εργασίες διάρκειας 15-20 λεπτών για κάθε τομογραφία και αφού απομακρυνόμασταν από τα καλώδια, ενεργοποιούσαμε το όργανο, το οποίο διοχέτευε ρεύμα και μετρούσε διαφορά δυναμικού κατά ζεύγη ηλεκτροδίων, ρεύματος και δυναμικού αντίστοιχα, με βάση το πρωτόκολλο της διάταξης Δίπολου – Δίπολου, και αφού αποσυνέδεε τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια. Οι μετρήσεις συνεχίζονταν και είχαν συνολική διάρκεια περίπου 15 λεπτά, έως ότου να πραγματοποιηθούν όλοι οι επιθυμητοί συνδυασμοί ηλεκτροδίων ρεύματος – δυναμικού, για κάθε τομογραφία.

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων της κάθε τομογραφίας, συνεχίσαμε στην επόμενη, επαναλαμβάνοντας τις παραπάνω εργασίες και φροντίζοντας με εμπειρικές μεθόδους να διατηρηθεί όσον το δυνατόν καλύτερα η παραλληλότητα μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό και μέσα σε περίπου 4 ώρες είχαμε ολοκληρώσει τις μετρήσεις και βλέπαμε ήδη τις ψευδοτομές της κάθε τομογραφίας στην οθόνη ηλεκτρονικού υπολογιστή συνδεδεμένου με το όργανο.

5.3.Αποτελέσματα Έρευνας

Στην παρακάτω εικόνα (5.3.1) παρουσιάζεται η θέση των διαδοχικών παράλληλων ηλεκτρικών τομογραφιών που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή μελέτης, η αρίθμησή τους, καθώς επίσης και η θέση της εισόδου του σπηλαίου.



Εικόνα 5.3.1. Η χωρική κάλυψη της περιοχής μελέτης του σπηλαίου από τις διαδοχικές ηλεκτρικές τομογραφίες.

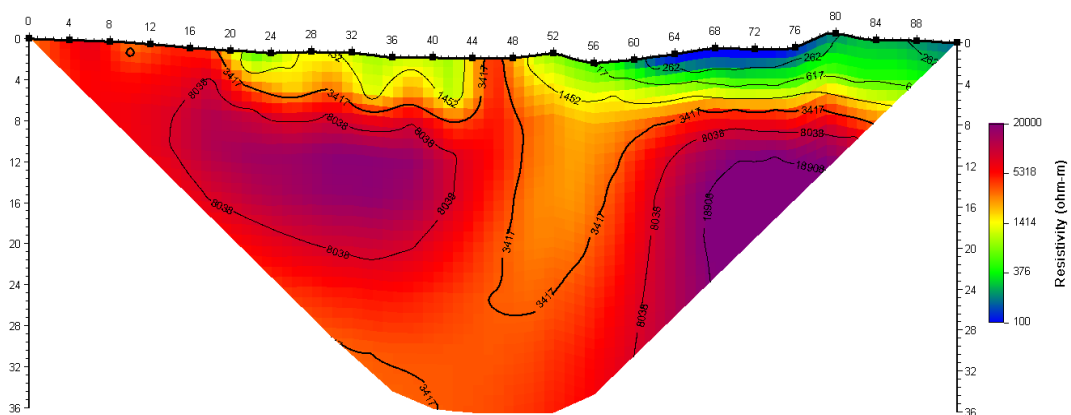
Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετά την αντιστροφή των δεδομένων και αποτυπώνονται τα πραγματικά βάθη και οι πραγματικές τιμές ηλεκτρικών αντιστάσεων των υπεδάφινων σχηματισμών στην περιοχή μελέτης.

Όλα τα δισδιάστατα μοντέλα που προέκυψαν μετά την διαδικασία της αντιστροφής παρουσιάζονται με χρωματική κλίμακα, η οποία διακρίνεται στο δεξί μέρος της κάθε εικόνας. Οι αντιστατικοί σχηματισμοί (καρστικοποιημένη βραχώμαζα) και δομές (έγκοιλα, ζώνες ρήγματος) παρουσιάζονται με τα πιο θερμά χρώματα (μωβ, κόκκινο, πορτοκαλί), ενώ οι πιο αγώγιμοι σχηματισμοί (συνεκτική βραχώμαζα) παρουσιάζονται με τα πιο ψυχρά χρώματα (μπλε, πράσινο, κίτρινο).

Τομή 1

Η τομή T1 πραγματοποιήθηκε πρώτη, 8 μέτρα νότια της εισόδου του σπηλαίου. Ο λόγος που έγινε η μέτρηση θεωρητικά εκτός της χαρτογραφημένης εμβέλειας του σπηλαίου ήταν κυρίως η βαθμονόμηση των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του ασβεστόλιθου, αλλά και η πιθανή διαπίστωση συνέχειάς του προς τον Νότο.

Οι διαφοροποιήσεις στις τιμές των ηλεκτρικών αντιστάσεων παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον σε αυτήν την περίπτωση.



Εικόνα 5.3.8. Ηλεκτρική Τομογραφία T1.

Αρχικά, γνωρίζοντας ότι η είσοδος του σπηλαίου είναι στο μήκος 45 με 47 και 8 μέτρα πιο πάνω από την τομή T1, παρατηρούμε μία μικρή κατακόρυφη ζώνη ενδιάμεσων τιμών ηλεκτρικής αντίστασης (>3400ohmm). Η ζώνη αυτή αντικατοπτρίζει το διερρηγμένο περιβάλλοντα χώρο της εισόδου του σπηλαίου.

Από το μήκος 14 έως 44 και από το βάθος 4 έως 20 μέτρα παρατηρούνται αρκετά μεγάλες τιμές ηλεκτρικών αντιστάσεων (>8000ohm) που προσδίδουν χαρακτηριστικά καρστικοποιημένης βραχώμαζας. Επίσης, από το μήκος 60 έως 90 και για βάθη μεγαλύτερα των 9 μέτρων παρατηρούνται ξανά υψηλές τιμές ηλεκτρικών αντιστάσεων (>8000ohm), πιθανόν λόγω ύπαρξης εγκοίλου.

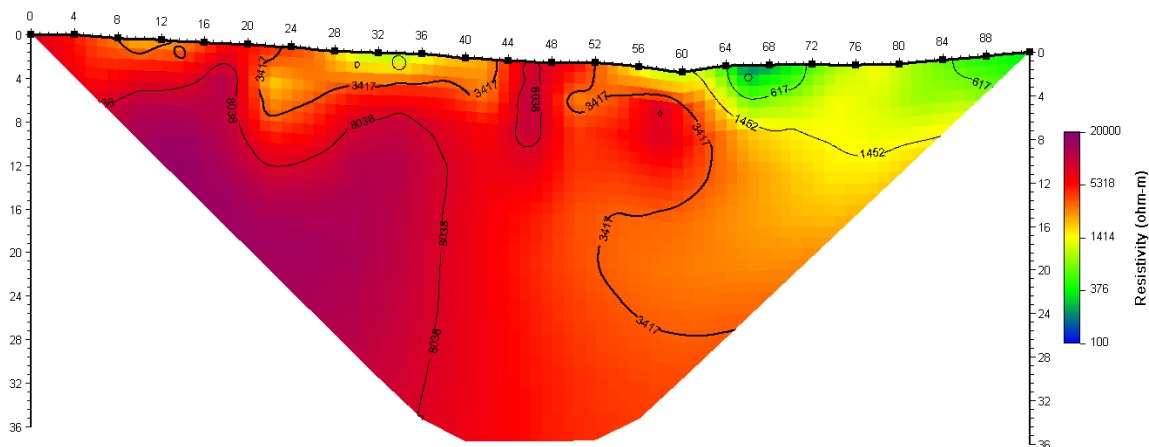
Ανάμεσα στις δύο αυτές περιοχές υψηλών τιμών ηλεκτρικής αντίστασης μεσολαβεί μία πιο αγωγίμη (<3400ohm) περιοχή με σχεδόν κατακόρυφη διάταξη στο χώρο, από το μήκος 47 έως περίπου 57 μέτρα. Η περιοχή αυτή θεωρείται ότι αντανακλά την συμπαγή ασβεστολιθική βραχώμαζα με αναμενόμενη φυσιολογική τιμή ηλεκτρικής αντίστασης μεταξύ 2000 και 4000ohm.

Τέλος, από το μήκος 60 έως το μήκος 80 και κοντά στην επιφάνεια του εδάφους παρατηρείται ένα πολύ αγωγίμο στρώμα (<250ohm) πάχους 2 μέτρων.

Σύμφωνα με την πρώτη τομογραφία βαθμονόμησης, οι περιοχές με τιμές από 2000 έως 4000ohm μπορούν να ερμηνευτούν σαν συμπαγής ασβεστόλιθος, ενώ μεγαλύτερες τιμές πιθανά δηλώνουν παρουσία εγκοίλων, χωρίς όμως να αποκλείεται να δείχνουν ακόμα πιο συμπαγείς ασβεστολιθικές δομές.

Τομή T2

Η τομή T2 τοποθετήθηκε βόρεια της εισόδου του σπηλαίου και όσο το δυνατόν πιο κοντά σε αυτήν.



Εικόνα 5.3.2. Ηλεκτρική τομογραφία T2, η οποία τέμνει την είσοδο του σπηλαίου.

Παρατηρούμε το πρώτο σημείο ενδιαφέροντος στο κέντρο της τομής, από το μήκος 45 έως 47 και σε βάθος από την επιφάνεια μέχρι τα 8 περίπου μέτρα. Στο χώρο αυτό αποτυπώνεται με υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής αντίστασης

(>8000ohm) μία κατακόρυφη αντιστατική δομή που αντιστοιχεί στην είσοδο του σπηλαιίου.

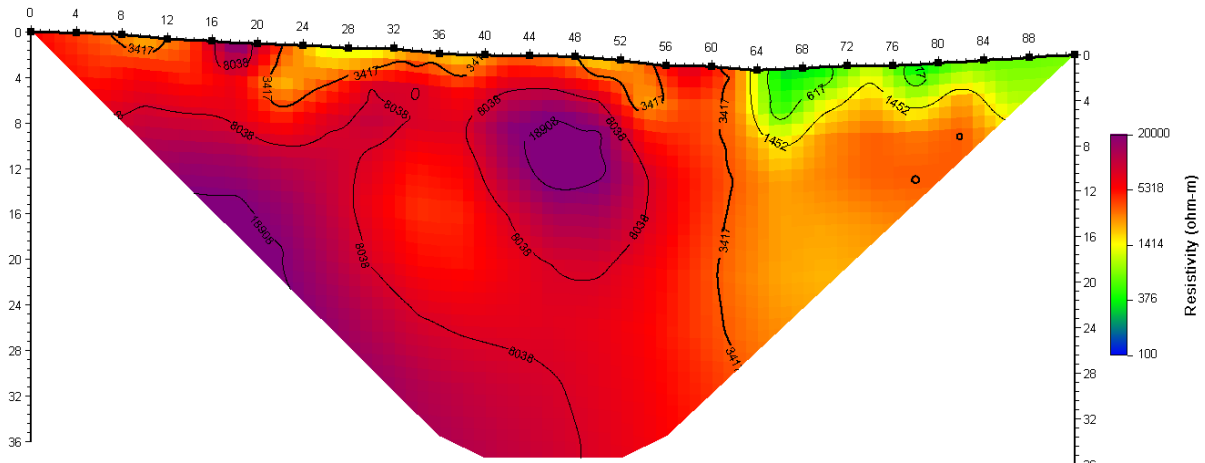
Από το αρχικό μήκος 0 μέχρι και το μήκος 62 και σε βάθη από 3 μέτρα και κάτω παρατηρούμε μια μεγάλη περιοχή υψηλής αντίστασης (>8000ohm) που πιθανόν αντιστοιχεί σε ισχυρά καρστικοποιημένη βραχώμαζα και η οποία περικλείεται από μία ζώνη χαμηλότερων τιμών αντίστασης (>3000ohm), που αντιστοιχεί στον συμπαγή ασβεστόλιθο.

Τέλος, από το μήκος 62 μέχρι και το μήκος 90 και σε βάθη από την επιφάνεια μέχρι και τα 10 περίπου μέτρα παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές ηλεκτρικής αντίστασης (<1400ohm) που πιθανόν αντιστοιχούν σε πιο συνεκτική ασβεστολιθική βραχώμαζα ή διερρηγμένη και πληρωμένη με αργιλικό υλικό.

Τομή T3

Στην αμέσως επόμενη τομή T3, που τοποθετήθηκε 4 μέτρα πιο βόρεια από την προηγούμενη, φαίνεται ξεκάθαρα ο χώρος του σπηλαιίου που χαρτογραφήθηκε μετά την είσοδό μας σε αυτό.

Αυτό αντικατοπτρίζεται από την ισχυρά αντιστατική δομή (>18000ohm) από το μήκος 44 μέχρι και το μήκος 51 και από τα 8 μέχρι τα 13 μέτρα βάθος. Γύρω από την περιοχή αυτή διακρίνεται μία ζώνη υψηλής ηλεκτρικής αντίστασης (>8000ohm) που αντιστοιχεί στον καρστικοποιημένο περιβάλλοντα χώρο του σπηλαιίου.



Εικόνα 5.3.3. Ηλεκτρική Τομογραφία T3.

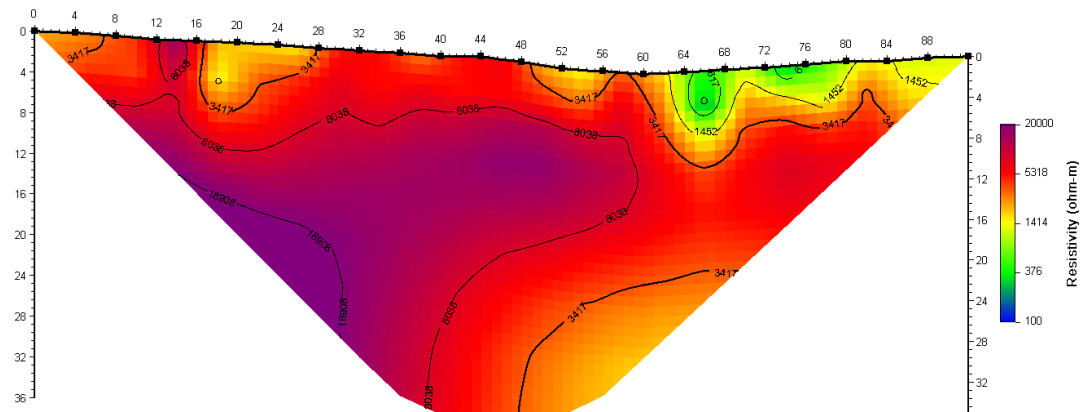
Και στην τομή αυτή παρατηρούνται υψηλές τιμές αντίστασης (>8000ohm) από το μήκος 0 μέχρι και το μήκος 50 και από τα 5 μέτρα βάθος και κάτω, οι οποίες καταδεικνύουν την ύπαρξη καρστικοποιημένου ασβεστόλιθου.

Επίσης, και στην τομή αυτή παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές ηλεκτρικής αντίστασης (<1400ohm) από το μήκος 64 έως 90 και μέχρι τα 8 περίπου μέτρα βάθος καταδεικνύοντας συνεκτικό ασβεστόλιθο.

Η πλευρική μετάβαση σε χαμηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο ανατολικό - δεξιά τμήμα της τομογραφίας δείχνει την πιθανή παρουσία ρηξιγενούς ζώνης, που έχει προκαλέσει τον κατακερματισμό του ασβεστόλιθου μετά το 64 μέτρο της τομογραφίας.

Τομή T4

Στην επόμενη τομή T4 παρατηρούμε ότι ο έντονα καρστικοποιημένος χώρος του σπηλαίου και του περιβάλλοντα χώρου του που βρίσκεται σε βάθη μεγαλύτερα των 7 μέτρων συνεχίζεται ή αποτελεί συνέχεια του αντιστατικού χώρου (>8000ohm) που διακρίνεται από το μήκος 0 μέχρι το μήκος 60.

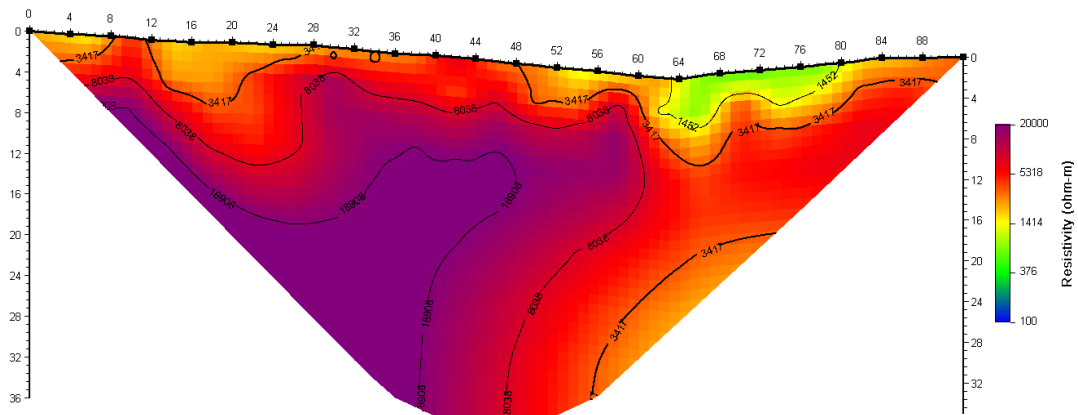


Εικόνα 5.3.4. Ηλεκτρική Τομογραφία T4.

Επίσης, σε σχέση με τις δύο προηγούμενες τομές παρατηρούμε ότι η καρστικοποίηση έχει συνεχιστεί και μετά το μήκος των 60 μέτρων κάτω από τα 8 περίπου μέτρα βάθος, με ενδιάμεσες τιμές ηλεκτρικής αντίστασης (>3400ohm).

Τομή T5

Στην τομή T5 γίνεται εμφανές ότι οι πολύ μεγάλες τιμές ηλεκτρικής αντίστασης (>18000ohm) κυριαρχούν στο μοντέλο του υπεδάφους από το μήκος 0 έως το μήκος 61 και από τα 5 περίπου μέτρα βάθος και κάτω.



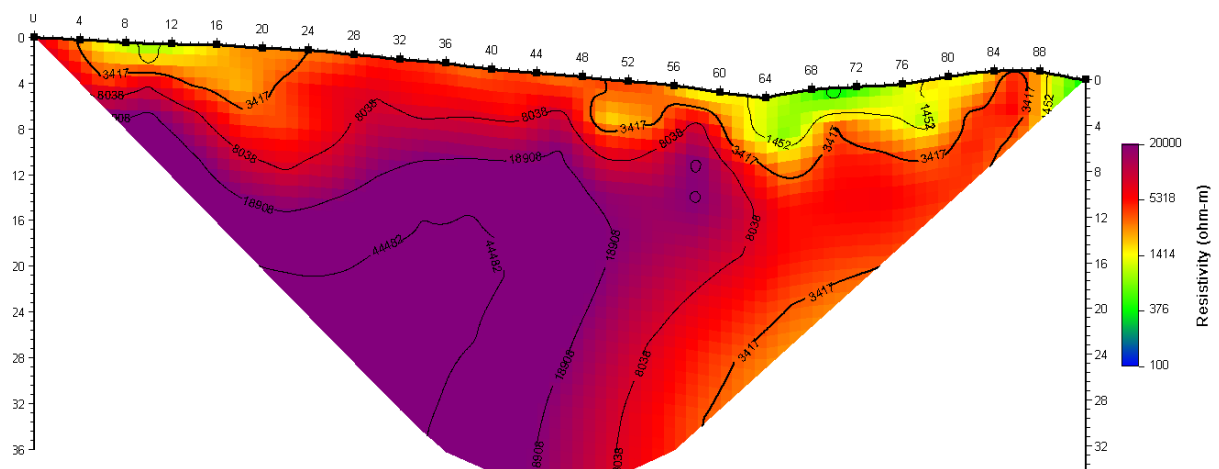
Εικόνα 5.3.5. Ηλεκτρική Τομογραφία T5.

Από τα 62 μέτρα μήκος και μέχρι τα 80 οι ηλεκτρικές αντιστάσεις είναι αρκετά μικρότερες (<1400ohm) από τα 5 μέτρα βάθος και πάνω.

Τομή T6

Στην βορειότερη τομή T6 και τελευταία που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή ανάντη της εισόδου του σπηλαίου, η εικόνα των τιμών των ηλεκτρικών αντιστάσεων είναι αρκετά όμοια με αυτήν της προηγούμενης τομής T5.

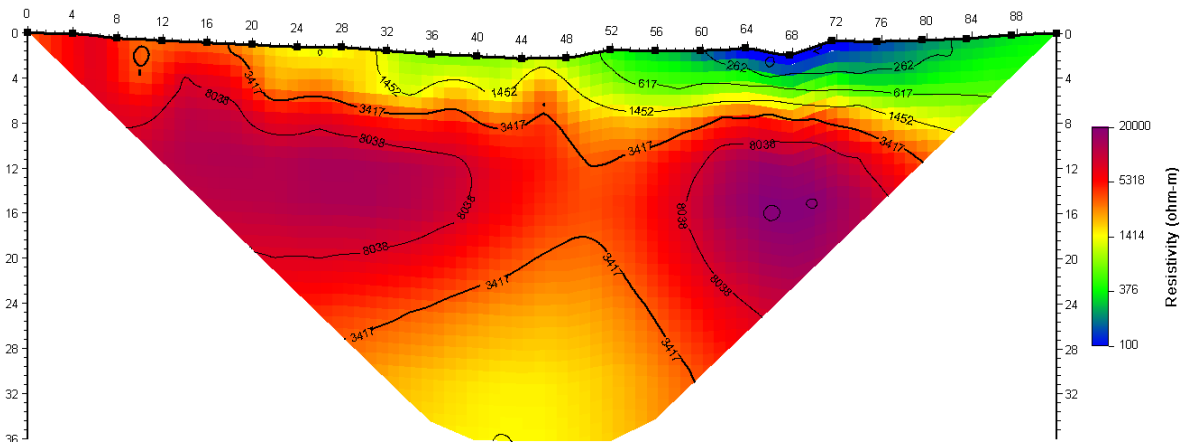
Η διαφορά έγκειται μόνο στο ότι οι ηλεκτρικές αντιστάσεις από το μήκος 0 μέχρι το μήκος 44 και από το βάθος των 16 μέτρων και κάτω αποκτούν θεωρητικά άπειρες τιμές.



Εικόνα 5.3.6. Ηλεκτρική Τομογραφία T6.

Τομή T7

Στην τελευταία και νοτιότερη τομή που πραγματοποιήθηκε προσπαθήσαμε να εντοπίσουμε πιθανή συνέχεια του σπηλαιίου προς τα κατάντη.



Εικόνα 5.3.7. Ηλεκτρική Τομογραφία T7.

Η εικόνα της τομής T7 μοιάζει πολύ με αυτήν της αμέσως προηγούμενης τομής T1 με μόνη διαφορά τα ύψη των τιμών των ηλεκτρικών αντιστάσεων στις δύο καρστικοποιημένες περιοχές που αναφέρθηκαν και προηγουμένως.

6. Συμπεράσματα

Καταλήγοντας, η επιλογή της μεθόδου της Ηλεκτρικής Τομογραφίας, στο στάδιο του σχεδιασμού της γεωφυσικής μελέτης που πραγματοποιήσαμε με σκοπό την απεικόνιση πιθανού σπηλαιίου σε περιοχή πλησίον του Τυρνάβου, έγινε με κύριο γνώμονα την επιτυχή εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου σε παλαιότερες παρόμοιες συνθήκες και προβλήματα. Αυτό συμβαίνει διότι, οι ηλεκτρικές αντιστάσεις των κενών χώρων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους αποκτούν πολύ μεγάλες τιμές (θεωρητικά άπειρες) συγκριτικά με τα περιβάλλοντα ανθρακικά πετρώματα των καρστικών σπηλαίων. Επομένως, στις παραγόμενες δισδιάστατες ή και τρισδιάστατες τομές που προκύπτουν από τις ηλεκτρικές τομογραφίες φαίνονται ξεκάθαρα οι διαφοροποιήσεις των τιμών των ηλεκτρικών αντιστάσεων, που αντικατοπτρίζουν τις περιοχές υγιούς βράχου και κενού χώρου.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές των ηλεκτρικών αντιστάσεων που καταγράφηκαν στην περιοχή μελέτης και οι γεωλογικοί σχηματισμοί που αντικατοπτρίζουν.

Τιμές Ηλεκτρικών
Αντιστάσεων (ohm)

Γεωλογικοί Σχηματισμοί

1 – 1000	➤ Χαλαρό Εδαφικό Κάλυμμα ή Κατακερατισμένος Ασβεστόλιθος με Πλήρωση από Terra Rossa
1000 – 5000	➤ Συμπαγής Ασβεστόλιθος
5000 – 8000	➤ Ρηγματωμένος Ασβεστόλιθος με Ανοιχτές Διακλάσεις
> 8000	➤ Πιθανό Έγκοιλο

Πίνακας 6.1. Ηλεκτρικές αντιστάσεις των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης.

Όπως παρατηρήσαμε αρχικά, στην περιοχή μελέτης υπήρχε σπήλαιο με φυσική είσοδο και αρκετά μεγάλο εσωτερικό χώρο. Έπειτα, μετά την πραγματοποίηση των ηλεκτρικών τομογραφιών στο πεδίο και την επεξεργασία των δεδομένων που λάβαμε στο εργαστήριο, αναγνωρίσαμε στην τομή T3 τον εσωτερικό κενό χώρο του σπηλαίου που χαρτογραφήσαμε προηγουμένως, με αρκετά μεγάλη ακρίβεια.

Η επιβεβαίωση αυτή, της καταγραφής του γνωστού σπηλαίου σαν ξεκάθαρη γεωηλεκτρική δομή, μας επιτρέπει να εξάγουμε περισσότερα συμπεράσματα σχετικά με τις άλλες γεωηλεκτρικές δομές που διαφαίνονται και στις άλλες τομές. Με τον τρόπο αυτό επιβεβαιώνεται η συνέχεια του γνωστού σπηλαίου προς τα βόρεια και η επικοινωνία του με άλλα έγκοιλα.

7.Βιβλιογραφία

BIBΛΙΑ

- a. *‘Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική’*, Παπαζάχος Β. Κ., Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 1996.
- b. *‘Εφαρμοσμένη Γεωφυσική’*, Τζελέντης Άκης, Παρασκευόπουλος Π., Εκδόσεις LiberalBooks, Αθήνα 2013.
- c. *‘Εισαγωγή στη Γεωφυσική’*, Παπαζάχος Κ., Παπαζάχος Β., Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2008.
- d. *‘Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας’*, Μουντράκης Δ. Μ., Εκδόσεις UniversityStudioPress, Θεσσαλονίκη 2010.
- e. *‘Τεχνική Υδρογεωλογία’*, Βουδούρης Κ., Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2013.
- f. *‘Φυσική Γεωγραφία’*, Βουβαλίδης Κ., Εκδόσεις Δίσιγμα, 2011.



- g. *'Karst Geomorphology and Hydrology'*, Ford, D.C., Williams, P.W., Unwin Hyman, London 1989.
- h. *'Encyclopedia of Caves and Karst Science'*, John Gunn, 2004.
- i. *'Encyclopedia of Caves, Second Edition'*, William B. White, David C. Culver, 2012.
- j. *'Εισαγωγικά Μαθήματα στην Διερευνητική Γεωφυσική'*, Ιωάννης Φ. Λούης, Αθήνα 2004.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

- a. *'Applications of Electrical Resistivity Tomography to the Detection of the Ermakia Cavity System'*, Βαργεμέζης Γ., Τσούρλος Π., Παπαζάχος Κ., Κωστόπουλος Δ., Μάιος 2007.
- b. *'Analysis of different geophysical methods in the detection of an underground opening at a controlled test site'*, Ορφανός Χ., Αποστολόπουλος Γ., Μάρτιος 2012.
- c. *'Integrated Ground Penetrating Radar, Electrical Resistivity Tomography and Multichannel Analysis of Surface Waves for Detecting Near-Surface Caverns at Duqm Area, Sultanate of Oman'*, A.M.E. Mohamed, I. El-Hussain, A. Deif, S.A.S. Araffa, K. Mansour, G. Al-Rawas, June 2018.
- d. *'Contribution of geophysical methods to karst system exploration: An overview'*, Chalikakis, Plagnes, Guerin et al. Hydrogeol J (2011).
- e. *'Site-specific shear wave velocity investigation for geotechnical engineering applications using seismic refraction and 2D multi-channel analysis of surface waves'*, Adel Mohamed, Taha (2013).

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΕΣ

- a. *'Συμβολή των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφορικής και της Τηλεπισκόπησης στην Υδρογεωλογία της Περιοχής Λάρισας-Τυρνάβου'*, Δημογιάννη Σ., 2014.
- b. *'Η Διακύμανση της Στάθμης και η Ποιότητα των Νερών των Υδροφόρων Στρωμάτων της Περιοχής του Τυρνάβου'*, Καραμουχτάρη Α., 2006.
- c. *'Τεκτονικές Συνθήκες Σπηλαιογένεσης στο Σπήλαιο Μελισσότροπα Κεφαλόβρυσου Ελασσόνας'*, Βαξεβανόπουλος, 2006.
- d. *'Βελτιστοποίηση μετρήσεων ηλεκτρική τομογραφίας στο πλαίσιο εφαρμογής της διαχρονικής παρακολούθησης φαινομένων'*, Τσακιρμπάλογκου, 2016.



ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

- a. www.iris-instruments.com/syscal-pro.html
- b. 'Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Δήμου Τυρνάβου 2015-2019', tirnavos.gr