



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΡΟΥΣΣΑΡΗ ΑΘΑΝΑΣΙΑ ΘΕΑΝΩ

A.E.M. 5466

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΣΤΟ
ΜΕΣΟΚΑΜΠΟ
(ΜΕΤΕΛΕΣ) ΤΟΥ ΥΣΤΕΡΟΜΥΚΗΝΑΙΚΟΥ ΟΙΚΙΣΜΟΥ ΚΑΣΤΡΟΥΛΙ
ΔΕΣΦΙΝΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2019





ΡΟΥΣΣΑΡΗ ΑΘΑΝΑΣΙΑ ΘΕΑΝΩ

ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ, Α.Ε.Μ. 5466

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΣΤΟ
ΜΕΣΟΚΑΜΠΟ
(ΜΕΤΕΛΕΣ) ΤΟΥ ΥΣΤΕΡΟΜΥΚΗΝΑΙΚΟΥ ΟΙΚΙΣΜΟΥ ΚΑΣΤΡΟΥΛΙ
ΔΕΣΦΙΝΑΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας,
Τομέα Γεωφυσικής

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ:

Επόπτης: Τσόκας Γρηγόριος, Καθηγητής ΑΠΘ
Συν-επιβλέποντες, Επιτροπή: Σταμπολίδης Αλέξανδρος, ΕΔΙΠ ΑΠΘ
Φίκος Ηλίας, ΕΔΙΠ ΑΠΘ
Λυριτζής Ιωάννης, Καθηγητής Πανεπιστήμιο Αιγαίου



1. Εισαγωγή.....	7
2. Περιοχή Μελέτης.....	9
2.1 Θέση Περιοχής Μελέτης.....	9
2.2 Γεωτοκτονική Εξέλιξη και Πλαιογεωγραφία	11
2.2.1 Εξωτερικές Ελληνίδες (Ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας)	11
2.2.2 Παλαιογεωγραφική και Γεωτεκτονική θέση Ζώνης Παρνασσού – Γκιώνας	15
2.2.3 Λιθοστροματογραφική Εξέλιξη Ζώνης Παρνασσού – Γκιώνας	15
2.2.4 Παλαιογεωγραφία και Τεκτορογενετική Εξέλιξη Ζώνης Παρνασσού - Γκιώνας.....	16
2.2.5 Γεωλογικός χάρτης περιοχής Δελφών	17
3. Παρουσίαση Γεωφυσικών Μεθόδων	19
3.1 Η Σημασία της Γεωφυσικής Διασκόπησης	19
3.2 Γεωφυσική και Γεωφυσικές Μέθοδοι	20
3.3 Γεωφυσικές Μέθοδοι στην Αρχαιολογία	21
3.4 Ηλεκτρικές Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης	22
3.4.1 Εισαγωγή.....	22
3.4.2 Ειδική Αντίσταση των Πετρωμάτων και Ορυκτών.....	23
3.4.3 Ροή Ρεύματος και ο Νόμος του Ohm σε Ομογενή και Ισότροπη Γη	25
3.4.4 Μια πρώτη εκτίμηση της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης.....	28
3.4.5 Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης.....	29
3.4.6 Φαινόμενη Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση	30
3.4.7 Τρόποι Διάταξης των Ηλεκτροδίων	32
3.4.7.α Διάταξη Wenner	33
3.4.7.β Διάταξη Schlumberger	34
3.4.7.γ Διάταξη Διπόλου – Διπόλου	37
3.4.7.δ Άλλες Είδη Διατάξεων.....	38
3.4.8 Μέθοδοι Έρευνας	38
3.4.9 Ηλεκτρική τομογραφία	41
3.4.9.α Ερμηνεία με Ψευδοτομή	42
3.4.9.β Ερμηνεία με Αντιστροφή	42
3.4.10 Εξοπλισμός που Χρησιμοποιείται.....	43



4. Λήψη μετρήσεων	48
5. Επεξεργασία Αποτελεσμάτων	52
5.1 Κατανομή της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης και Ερμηνεία	57
6. Συμπεράσματα.....	59
7. Οι Γεωηλεκτρικές Τομογραφίες στον Χώρο	60
8. Βιβλιογραφία	63
8.1 Διεθνής Βιβλιογραφία	63
8.2 Ελληνική Βιβλιογραφία.....	64
8.3 Ιστοσελίδες	64





1. Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας του τμήματος Γεωλογίας, τομέα Γεωφυσικής, από τη φοιτήτρια Ρούσσαρη Αθανασία Θεανώ υπό την εποπτεία του καθηγητή Τσόκα Γρηγόριου, του Δρ. του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής ΑΠΘ Σταμπολίδη Αλέξανδρου και του Δρ. Φίκου Ηλία.

Η διπλωματική εργασία έλαβε χώρα στο Νομό Φωκίδας του Δήμου Δελφών, στο Καστρούλι Δεσφίνας, με σκοπό να διερευνηθεί η παρουσία αρχαίας λίμνης στο οροπέδιο Μεσόκαμπος του Υστερομυκηναϊκού αρχαιολογικού οικισμού Καστρούλι Δεσφίνας (Φωκίδα) (1100-1300 πΧ). Πιο συγκεκριμένα, σε μια επιφάνεια που συγκεντρώνει βρόχινο νερό το χειμώνα και αποστραγγίζεται τον υπόλοιπο χρόνο του έτους.

Στα πλαίσια αυτά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης με εφαρμογή της μεθόδου ηλεκτρικής τομογραφίας και μετρήσεις θέσης με την χρήση GPS. Η διάταξη της ηλεκτρικής τομογραφίας ήταν διπόλου- διπόλου (Palmer). Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου θα αναλυθεί σε παρακάτω κεφάλαιο.

Συγκεκριμένα, οι ηλεκτρικές διασκοπήσεις, κάποιες από τις οποίες εφαρμόστηκαν στα πλαίσια αυτής της έρευνας, ανήκουν στο ευρύτερο γνωστικό πεδίο της Τηλεπισκόπησης ή Τηλεανίχνευσης (Remote Sensing) (Λυριτζής, 2005). Η Τηλεπισκόπηση αφορά τη συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση πληροφοριών που σχετίζονται με διάφορα αντικείμενα χωρίς να έρχονται σε επαφή με αυτά. Στην αρχαιολογία, η εφαρμογή της τηλεπισκόπησης περιλαμβάνει ένα πλήθος τεχνικών για τον εντοπισμό, την παρατήρηση και την χαρτογράφηση του πολιτισμικού τοπίου που βρίσκεται, είτε επιφανειακά είτε αρκετά εκατοστά ή μέτρα κάτω από το σημερινό επίπεδο του εδάφους (Λυριτζής, 2008). Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις συμβάλλουν στην συλλογική διερεύνηση μια θέσης ενδιαφέροντος, πριν ή ακόμα και χωρίς να γίνει ανασκαφή, τόσο επιφανειακά όσο και στρωματογραφικά.

Έχουν αναφερθεί πολλές εφαρμογές της αρχαιο-γεωφυσικής διασκόπησης στην διεθνή βιβλιογραφία. Το 1946, ο R.J.C. Atkinson εισήγαγε την χρήση της ηλεκτρικής διασκόπησης για την διερεύνηση αρχαιολογικών θέσεων. Το 1957, ο J.C. Belshé χρησιμοποίησε ένα πρωτονιακό μαγνητόμετρο για την διερεύνηση ενός ρωμαϊκού κλιβάνου. Παρόμοιες προσπάθειες είχαν ήδη πραγματοποιηθεί από το Lerici Foundation με την χρήση ηλεκτρικών διασκοπήσεων σε ετρουσκικά νεκροταφεία της Ιταλίας. Το 1970, οι A. Aspinall J. T. Lynam ανέπτυξαν την διάταξη δίδυμων ηλεκτροδίων για τις ηλεκτρικές διασκοπήσεις, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως ακόμα και σήμερα. Γενικότερα, παρατηρείται πως από το 1990 και μετά κυριαρχεί μια τάση αυτοματοποίησης και αύξησης των δυνατοτήτων των γεωφυσικών οργάνων. Αναπτύσσονται κινητά ή σύνθετα συστήματα ηλεκτρικών διασκοπήσεων, μαγνητομέτρων και γεωραντάρ, που



πολλές φορές αποτελούνται από πολλαπλούς αισθητήρες ή πολυπλέκτες και που στοχεύουν σε μια γρήγορη και αποτελεσματική κάλυψη εκτεταμένων εκτάσεων.

Στον ελλαδικό χώρο οι γεωφυσικές διακοπήσεις διεξάγονται συστηματικά από τα τέλη της δεκαετίας του 1980 από διάφορους ερευνητές. Σημαντικό ρόλο έχουν παίξει τα Γεωλογικά Τμήματα των Πανεπιστημίων Πατρών και Θεσσαλονίκης. Επίσης, το Εργαστήριο Γεωφυσικής-Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και Αρχαιοπεριβάλλοντος του Ινστιτούτου Μεσογειακών Σπουδών (ΙΜΣ-ΙΤΕ) από το 1996 έχει δραστηριοποιηθεί σε ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών με την χρήση επίγειων και δορυφορικών τεχνικών χαρτογράφησης και G.I.S.

Ο οικισμός του Καστρουλίου Δεσφίνας, που είναι και η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας, είχε αναφερθεί σε εργασίες από τους καθηγητές Λυριτζή και Σίδερη (2018) καθώς και από τους Thomas E. Levy και Σίδερης Α. (Sideris et al., 2017).

Το 2016 ο Καθηγητής Ιωάννης Λυριτζής ανέλαβε ερευνητικό πρόγραμμα αρχαιολογικής και αρχαιομετρικής έρευνας με έγκριση από το Υπουργείο Πολιτισμού για την μελέτη του Οικισμού. Διευθυντής της αρχαιολογικής ανασκαφής ήταν ο Καθ. Αθανάσιος Σίδερης (Τμήμα Μεσογειακών Σπουδών). Το πρόγραμμα αυτό ξεκίνησε το 2016 και εκτελείται κάθε καλοκαίρι. Η έρευνα διεξάγεται σε συνεργασία με Πανεπιστήμια των ΗΠΑ (Παν/μιο Καλιφόρνιας Σαν Ντιέγκο, Παν/μιο Brandies Μασαχουσέτη, Παν/μιο Wesleyan Κονέκτικατ) και ερευνητές ελληνικών ΑΕΙ/ΤΕΙ. Κατά της περίοδο ανασκαφών του 2016 και 2017 συμμετείχε η συντάκτρια της παρούσας εργασίας ως εθελόντρια στις ανασκαφικές και γεωφυσικές έρευνες.

Η παρούσα γεωφυσική έρευνα αφορά την διερεύνηση ύπαρξης ασβεστολιθικής λεκάνης στην περιοχή, η οποία σχημάτιζε φυσική λίμνη κατά το Ολόκαινο και κυρίως στην εποχή του οικισμού 1100-1300 π.Χ., την οποία φαίνεται ότι προσπάθησαν να αποξηράνουν οι αρχαίοι μυκηναίοι.

Η υποψία αυτή ενισχύεται από την παρατήρηση ορατών δόμων (καταβοθρών) στον κάμπο της περιοχής μελέτης. Η περιοχή διερεύνησης είναι εκτός αρχαιολογικής ζώνης του λόφου στο Καστρούλι, οπότε αποτελεί μια γεωφυσική-γεωλογική έρευνα. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης έρευνας, θα ακολουθήσει γεώτρηση για την μελέτη των ιζημάτων της λεκάνης.

Η διερεύνηση αρχαίων λιμνών στην περίοδο αυτή είναι σπάνια και μόνο στην Κωπαΐδα της Βοιωτίας αναφέρονται τα πρώτα υδραυλικά έργα από τους εκεί Μυκηναίους (Μινύες). Οι πρώτοι που αποξήραναν την λίμνη Κωπαΐδα ήταν οι αρχαίοι κάτοικοι του Ορχομενού, οι Μινύες. Οι Μινύες τον 16ο αιώνα π.Χ. περίπου πραγματοποιώντας εντυπωσιακά αρδευτικά έργα για την εποχή κατάφεραν να αποξηράνουν την λίμνη. Για τον σκοπό αυτό δημιούργησαν μία σειρά από σήραγγες και καταβόθρες διοχετεύοντας τελικά το νερό της λίμνης στον κόλπο της Λάρυμνας. Τα αρδευτικά αυτά έργα καταστράφηκαν μετά την παρακμή των Μινύων και την κάθοδο στην περιοχή των Βοιωτών. Στην καταστροφή των έργων συνέβαλαν και

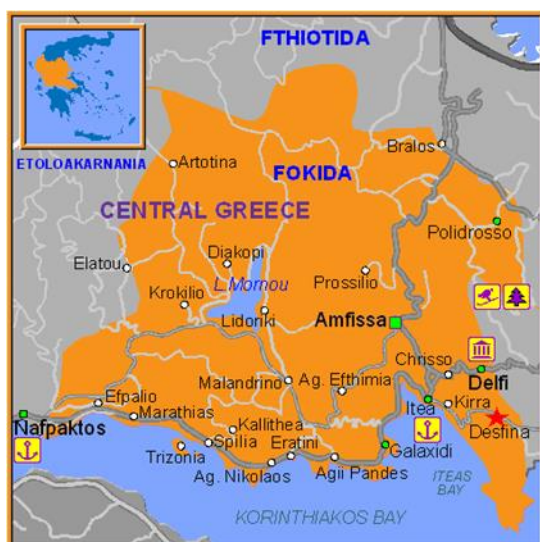
καταστρεπτικοί σεισμοί που σημειώθηκαν στην περιοχή. Έτσι, σταδιακά στις αρχές του 13ου π.Χ αιώνα, η περιοχή πλημμύρισε πάλι και ξανασηματίστηκε η λίμνη.

Η παρούσα εργασία αποτελεί ένα ερευνητικό έργο εφαρμογής της μεθόδου ηλεκτρικής διασκόπησης. Συνδιάζει δε την γεωλογική με την αρχαιολογική έρευνα και την γεωφυσική διακόπηση για τον εντοπισμό, την παρατήρηση και την χαρτογράφηση της περιοχής μελέτης. Με τον τρόπο αυτόν δίνεται ένα ολοκληρωμένο αποτέλεσμα με συνδιασμό των σύγχρονων τεχνολογιών που σχετίζονται με την σύνθετη διερεύνηση του υπεδάφους και του περιβάλλοντος χώρου των αρχαιολογικών θέσεων.

2. Περιοχή Μελέτης

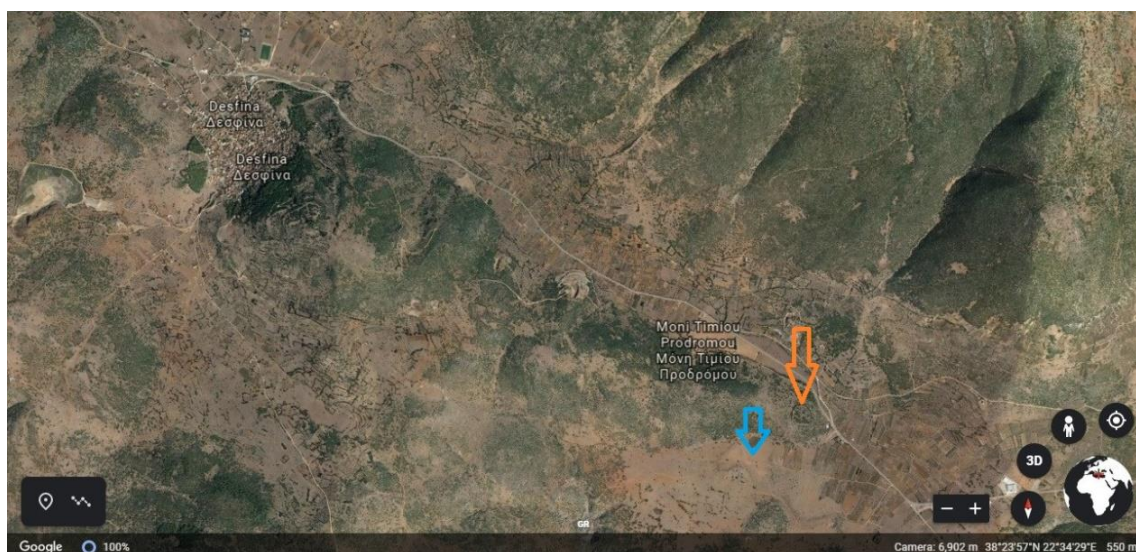
2.1 Θέση Περιοχής Μελέτης

Η περιοχή μελέτης εντάσσεται στον Νομό Φωκίδας (Σχήμα 1) και πιο συγκεκριμένα στον Δήμο Δεσφίνας. Ο Νομός Φωκίδας αποτελεί έναν από τους πέντε νομούς της Περιφέρειας Στερεάς Ελλάδος. Καταλαμβάνει το νότιο δυτικό τμήμα της περιφέρειας και συνορεύει βόρεια με το νομό Φθιώτιδας, ανατολικά με τους Νομούς Φθιώτιδας και Βοιωτίας, δυτικά με το νομό Αιτωλοακαρνανίας και νότια βρέχεται από τον Κορινθιακό κόλπο. Ο οικισμός της Δεσφίνας βρίσκεται στην Στερεά Ελλάδα ενώ διοικητικά ανήκει στο Νομό Φωκίδας του Δήμου Δελφών.



Σχήμα 1: Χάρτης Νομού Φωκίδας. Με τον κόκκινο αστερίσκο φαίνεται η θέση Δεσφίνα, όπου και βρίσκεται η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας.

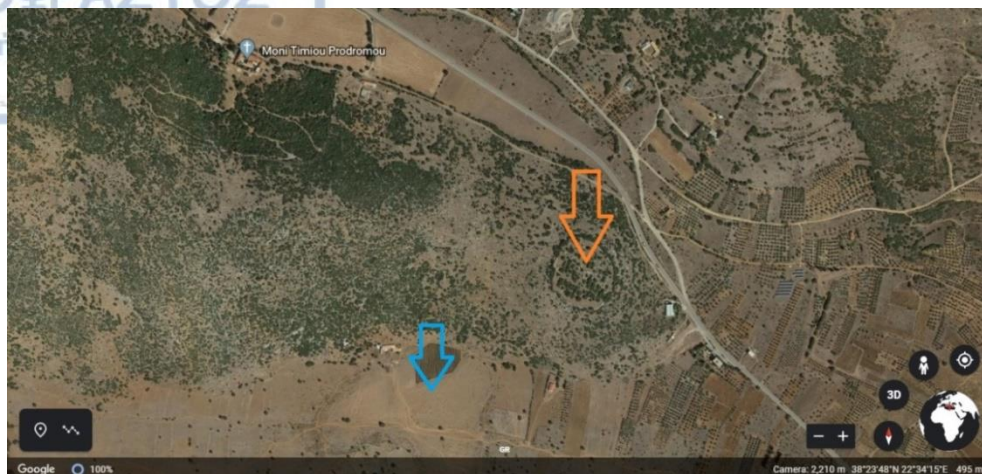
Η περιοχή έρευνας βρίσκεται εκτός του Δήμου Δεσφίνας, με ακριβή θέση $38^{\circ} 23' N$ και $22^{\circ} 34' E$ (Σχήμα 2). Η θέση των ηλεκτρικών τομογραφιών που πραγματοποιήθηκαν φαίνονται στα Σχήματα 2 και 3, και τα αποτελέσματα θα αναλυθούν παρακάτω.



Σχήμα 2: Δορυφορική φωτογραφία της ευρύτερης περιοχής της Δεσφίνας (Πορτοκαλί βέλος για την θέση Καστρούλι, γαλάζιο βέλος για την θέση εκτέλεσης της ηλεκτρικής τομογραφίας).

Οι ανασκαφές ξεκίνησαν το 2016 στη μυκηναϊκή περιοχή Καστρούλι, κοντά στην Δεσφίνα Φωκίδας, 11 χλμ. από τους Δελφούς. Ο χώρος έχει λεηλατηθεί τις τελευταίες δεκαετίες, ενώ έχει ανασκαφεί σε πολύ περιορισμένη κλίμακα από την Αρχαιολογική Υπηρεσία.

Βρίσκεται στην κορυφή ενός βραχώδους λόφου και οριοθετείται από ένα τείχος, πιθανώς κατασκευασμένο σε δύο φάσεις, η πρώτη από τις οποίες θα μπορούσε να είναι μυκηναϊκή. Ένας πέτρινος και κτισμένος θάλαμος, ανασκάφηκε στα δυτικά. Μέρος της οχυρωμένης περιοχής, περιείχε μια ταφή τουλάχιστον 15 ατόμων. Επίσης αξίζει να σημειωθεί πως το κύριο σχήμα κεραμικής είναι το αγγείο με βραχίονα και τα μικρά ευρήματα περιλαμβάνουν ειδώλια φίσχημα (Phi) και ψίχσχημα (Psi), χάντρες στεατίτη, και θραύσματα φύλλου χρυσού.



Σχήμα 3: Δορυφορική φωτογραφία της θέσης εκτέλεσης των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης (Πορτοκαλί βέλος για την θέση Καστρούλι, γαλάζιο βέλος για την θέση εκτέλεσης της ηλεκτρικής τομογραφίας).

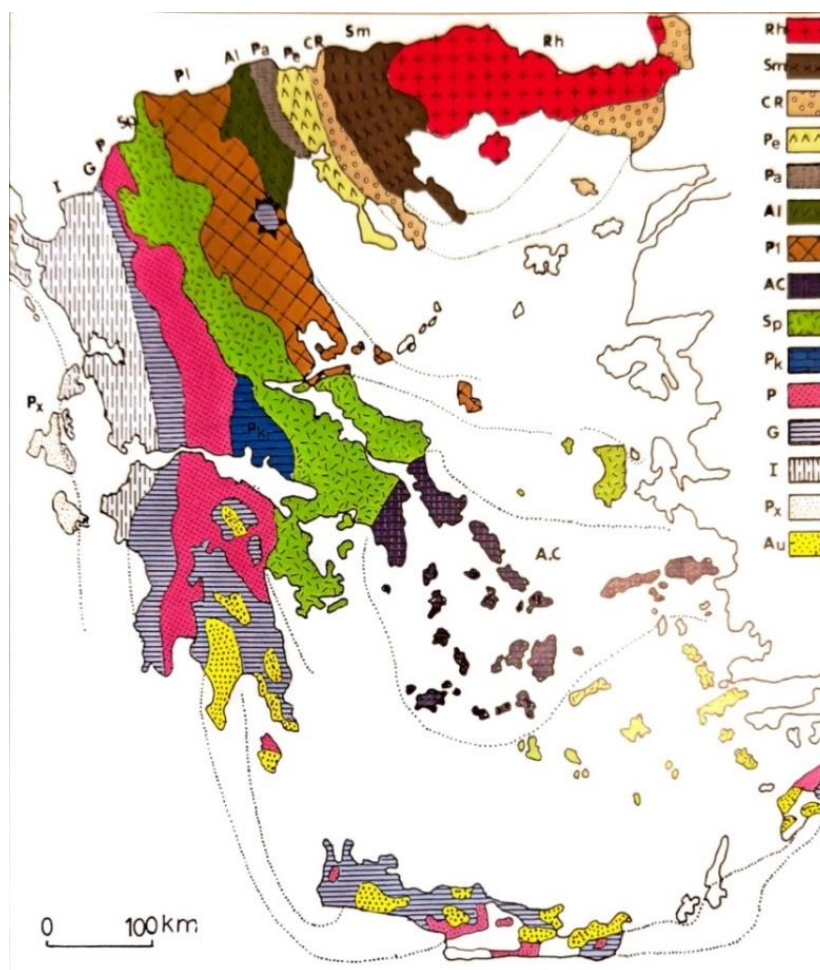
2.2 Γεωτοκτονική Εξέλιξη και Πλαιογεωγραφία

2.2.1 Εξωτερικές Ελληνίδες (Ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας)

Οι Ελληνικές οροσειρές υποδιαιρούνται σε γεωτεκτονικές ζώνες οι οποίες λέγονται «Ελληνίδες ζώνες» (Σχήμα 4). Κάθε γεωτεκτονική ζώνη συνίσταται από μια ορισμένη στρωματογραφική διαδοχή των ιζημάτων της, από τους ιδιαίτερους λιθολογικούς χαρακτήρες της και από την ιδιαίτερη τεκτονική της συμπεριφορά, στοιχεία γενικά που εξαρτώνται από την παλαιογεωγραφική της θέση αλλά κυρίως από την γεωτεκτονική της θέση, την γεωδυναμική κίνηση και την τεκτονική παραμόρφωση κάθε μίας.

Η πιο βασική διάκριση των γεωτεκτονικών ζωνών της Ελλάδας είναι σε «Εσωτερικές Ελληνίδες» και σε «Εξωτερικές Ελληνίδες». Οι ονομασίες αυτές οφείλονται στο ότι οι πρώτες κατέχουν τα εσωτερικά τόξα των Ελληνίδων οροσειρών, ενώ οι δεύτερες τα εξωτερικά. Ο διαχωρισμός όμως αυτός κυρίως οφείλεται στο γεγονός ότι οι Εσωτερικές Ελληνίδες υπέστησαν την δράση μιας Ανωιουρασικής – Κατωκρητιδικής, πρώιμης ορογενετικής δράσης η οποία δεν επέδρασε στις Εξωτερικές Ελληνίδες. Οι τελευταίες επηρεάστηκαν από την τελική ορογένεση του Τριτογενούς.

Πιο συγκεκριμένα, Εσωτερικές Ελληνίδες θεωρούνται οι ζώνες: Περιροδοπική, Αξιού, (Υποζώνες Παιονίας, Πάικου, Αλμωπία), Πελαγονική, Αττικοκυκλαδική και Υποπελαγονική, ενώ Εξωτερικές Ελληνίδες οι ζώνες Παρνασσού – Γκιώνας, Ωλονού – Πίνδου, Γαβρόβου – Τρίπολης, Ανδριατικοϊόνιος και Παξών. Τέλος οι μάζες Ροδόπης και Σερβομακεδονικής θεωρούνται ότι αποτελούν την «Ελληνική Ενδοχώρα».



Σχήμα 4: Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών. Rh: Μάζα της Ροδόπης, Sm: Σερβομακεδική μάζα, CR: Περιροδοπική ζώνη, (Pe: Υποζώνη Παιονίας, Pa: Υποζώνη Πάικου, Al: Υποζώνη Αλμωπίας) = Ζώνη Αξιού, Pl: Πελαγονική Ζώνη, Ac: Αττικό-Κυκλαδική Ζώνη, Sp: Υποπελαγονική Ζώνη, Pk: Ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας, P: Ζώνη Πίνδου, G: Ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης, I: Ιόνιος Ζώνη, Px: Ζώνη Παξών ή Προαπουλία, Au: Ενότητα «Πλακώδεις ασβεστόλιθοι – Ταλέα όρη» πιθανόν της Ιονίου Ζώνης. (Κατά Mountrakis et al 1983).

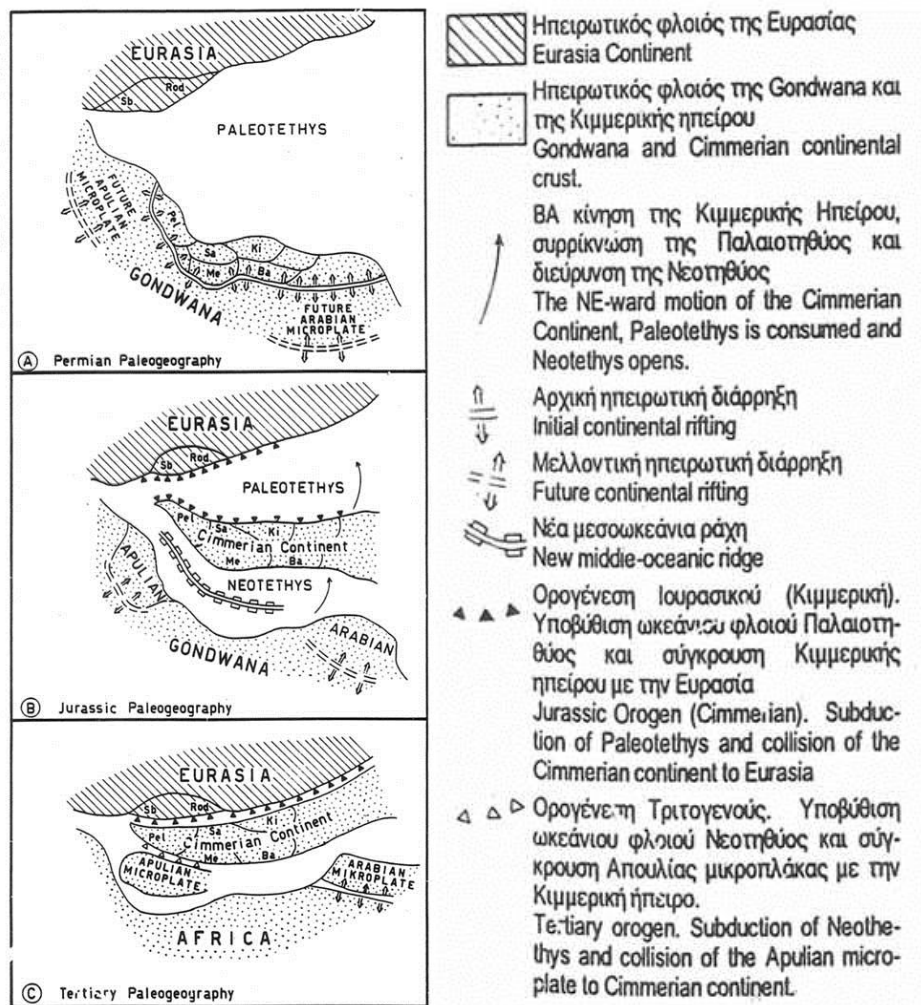
Πριν από τριάντα χρόνια προτάθηκε και μια άλλη διάκριση του Ελληνικού χώρου, εκτός από αυτή των Εσωτερικών και Εξωτερικών ζωνών, η οποία εξακολουθεί να θεωρείται βασική. Αυτός ο νέος διαχωρισμός του Ελληνικού Χώρου αναφέρεται μερικές φορές από ορισμένους συγγραφείς και περιλαμβάνει τις παρακάτω γεωτεκτονικές μονάδες:

1	Η «Ελληνική Ενδοχώρα» με τις κρυσταλλικές μάζες Ροδόπης και Σερβομακεδονικής.
2	Οι ζώνες Περιροδοπική και Αξιού με τις τρεις υποζώνες Παιονίας, Πάικου και Αλμωπίας.
3	Τα «Εσωτερικά Ελληνικά τεκτονικά καλύμματα» που είναι το σύνολο των οφειολιθικών εμφανίσεων της Ελλάδας.
4	Τα «Κεντρικά Ελληνικά τεκτονικά καλύμματα» που περιλαμβάνουν τις ζώνες Πελαγονική, Υποπελαγονική, Παρνασσού, Πίνδου, καθώς και μια Μεσαία κρυσταλλική ζώνη μέσα στην οποία εντάσσονται η Αττικοκυκλαδική μάζα με την προέκτασή της στην Μικρά Ασία και κάποιες ενότητες που χαρακτηρίζονται από την παρουσία γλαυκοφανιτικών σχιστόλιθων δηλαδή της Όσσας, του Πηλίου και της Νότιας Εύβοιας.
5	Τα «Δυτικά Ελληνικά τεκτονικά καλύμματα», στα οποία εντάσσονται οι ζώνες Γαβρόβου και Ανδριατικοϊόνιος.
6	Την αυτόχθονη περιοχή της προ-Απουλίας και των πλακωδών ασβεστόλιθων της Νότιας Πελοποννήσου και Κρήτης.

Η περιοχή μελέτης τοποθετείται γεωτεκτονικά στην Ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας των Εξωτερικών Ελληνίδων. Οι Εξωτερικές Ελληνίδες ζώνες ή Εξωτερικές Ελληνίδες, όπως προαναφέρθηκε, κατέχουν τα εξωτερικά (Δυτικά) τόξα των Ελληνίδων οροσειρών. Πιο αναλυτικά, τα Ιόνια νησιά, την Ήπειρο, τη Δυτική Στερεά Ελλάδα, ολόκληρη σχεδόν την Πελοπόννησο (εκτός από την Αργολίδα), την Κρήτη, την Κάρπαθο και την Ρόδο.

Σε αντίθεση με τις Εσωτερικές Ελληνίδες, οι Εξωτερικές δεν υπέστησαν τη δράση της πρώιμης ορογένεσης σε όλη τη διάρκεια των Αλπικών χρόνων, από το Τριαδικό μέχρι το Τριτογενές. Στο Τριτογενές πραγματοποιήθηκε η οριστική ανάδυση των Εξωτερικών ζωνών με τη δράση της τελικής ορογένεσης οπότε έγινε και η πτύχωση των σχηματισμών των ζωνών αυτών.

Η Αλπική ιζηματογένεση στις Εξωτερικές Ελληνίδες ήταν κυρίως ανθρακική με ασβεστόλιθους και δολομίτες από το Τριαδικό μέχρι το Ανώτερο Κρητιδικό και συμπληρώνεται με τον φλύσχη του Τριτογενούς. Χαρακτηρίζεται τύπου πλατφόρμας, στο μεγαλύτερο ποσοστό της νηριτική, και πιστεύεται ότι αποτέθηκε πάνω στην Απουλία μικροπλάκα. Η Απουλία αποσπάσθηκε από την Γκοντβάνα κατά το Τριαδικό και κινήθηκε προς τον Βορρά όπου και ενσωματώθηκε στην Ευρασία (Σχήμα 5). Κατά την κίνηση αυτή, από το Τριαδικό μέχρι το Τριτογενές, δεχόταν συνεχή ανθρακική ιζηματογένεση.



Σχήμα 5: Απόσπαση Απουλίας μικροπλάκας από την Γκοντβάνα, κίνησή της προς Βορρά και τελική ενσωμάτωσή της στην Ευρασία.

Ανάλογη ιζηματογένεση παρουσιάζουν οι ζώνες Γαβρόβου, Ιόνιος και Παξών και επομένως τοποθετούνται στην Απουλία πλάκα. Δεν ισχύει όμως το ίδιο για την ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας. Η τελευταία έχει συνεχή νηριτική ανθρακική ιζηματογένεση όμως δεν τοποθετείται στην Απουλία πλάκα αλλά ως τοπικά παρεμβαλλόμενο υφαλώδες φράγμα ή ύβωμα στον ωκεάνιο χώρο μεταξύ Απουλίας και Ευρασίας. Λόγω αυτής της συνεχούς ιζηματογένεσης η ζώνη αυτή ανήκει στις Εξωτερικές Ελληνίδες. Επίσης, όπως θα αναφερθεί στις επόμενες παραγράφους, παρουσιάζει στενή σχέση με τους οφειόλιθους της Υποπελαγονικής.

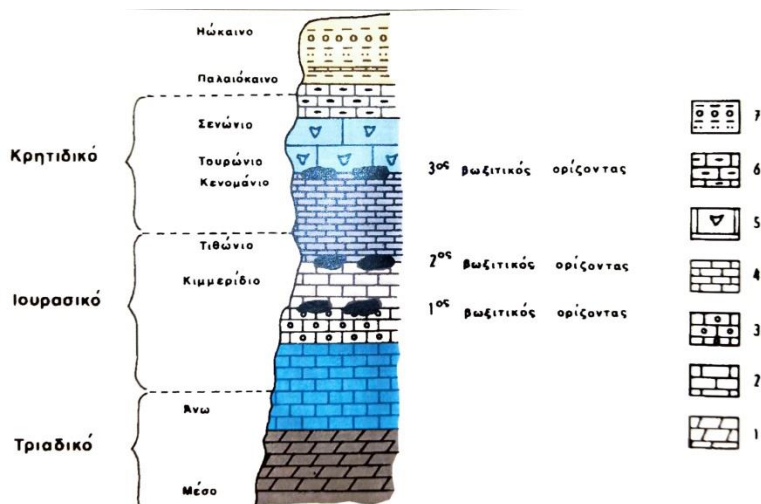
2.2.2 Παλαιογεωγραφική και Γεωτεκτονική θέση Ζώνης Παρνασσού – Γκιώνας

Η ονομασία της ζώνης δόθηκε από τα βουνά της Στερεάς Ελλάδας Παρνασσό και Γκιώνα. Σύμφωνα με το δυαδικό Αλπικό σύστημα εναλλασσομένων αυλάκων και ράχων θεωρήθηκε ως τοπικά παρεμβαλλόμενο ύβωμα μεταξύ της κατωφέρειας της Υποπελαγονικής ζώνης και της αύλακας της Πίνδου. Πιστεύεται ότι η ζώνη αυτή ήταν ένα υφαλώδες φράγμα ή τοπικά παρεμβαλλόμενο ύβωμα – μικρή πλατφόρμα μέσα στον ωκεανό της Νέο – Τηθύος, ανάμεσα στις ζώνες Πίνδου και Υποπελαγονικής, σε άμεση επαφή με την Υποπελαγονική ζώνη.

Όσο για την εξαφάνιση της προς τον Βορρά, θεωρείται πως έπαιξε σημαντικό ρόλο το μεγάλο ρήγμα της κοιλάδας του Σπερχειού ποταμού.

2.2.3 Λιθοστροματογραφική Εξέλιξη Ζώνης Παρνασσού – Γκιώνας

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της ζώνης είναι οι βωξίτες που βρίσκονται μέσα στους ασβεστόλιθους σε τρεις διαδοχικούς στρωματογραφικούς ορίζοντες.



Σχήμα 6 : Σχηματική στρωματογραφική στήλη της ζώνης Παρνασσού – Γκιώνας. (1: δολομίτες, 2: ασβεστόλιθοι παχυστρωματώδεις σκοτεινού χρώματος, 3: ωολιθικοί ασβεστόλιθοι, 4: ενδιάμεσοι λευκοί ασβεστόλιθοι, 5: ρουδιστοφόροι ασβεστόλιθοι, 6: κωνδυλώδεις ασβεστόλιθοι, 7: φλύσχης).

Αναλυτικά η στρωματογραφική στήλη από κάτω προς τα πάνω:

1. Το πρώτο αλπικό ίζημα είναι λευκός δολομίτης, που προς τα πάνω εξελίσσεται σε τεφρό και εναλλάσσεται με λεπτές ενστρώσεις ασβεστόλιθων. Η στήλη εξελίσσεται σε παχυστρωματώδη τεφρό ασβεστόλιθο ηλικίας Άνω Τριαδικού.
2. Από πάνω ακολουθεί ασβεστόλιθος σκοτεινού χρώματος ηλικίας Κάτω Ιουρασικού και μετά ωλιθικοί ασβεστόλιθοι Άνω Ιουρασικού.
3. Πάνω στους ωλιθικούς ασβεστόλιθους βρίσκεται ο 1^{ος} (κατώτερος) βωξιτικός ορίζοντας που καλύπτεται από σκοτεινόχρωμους ασβεστόλιθους του Άνω Ιουρασικού.
4. Στην συνέχεια, από πάνω βρίσκεται ο 2^{ος} (μεσαίος) βωξιτικός ορίζοντας, που καλύπτεται από ασβεστόλιθους Τιθωνίου (Ανώτατο Ιουρασικό) – Κενομανίου (Μέσο Κρητιδικό). Αυτοί οι ασβεστόλιθοι ονομάζονται ενδιάμεσοι επειδή μεσολαβούν μεταξύ δύο βωξιτικών οριζόντων, του 2^{ου} και του 3^{ου} και είναι κυρίως λευκοί ή τεφροί.
5. Πάνω στους ενδιάμεσους ασβεστόλιθους βρίσκεται ο 3^{ος} (ανώτερος) βωξιτικός ορίζοντας, ο οποίος καλύπτεται από μαύρους ρουδιστοφόρους ασβεστόλιθους του Τουρωνίου (Μέσου Κρητιδικού).
6. Προς τα πάνω συνεχίζεται η ιζηματογένεση με ασβεστόλιθους του Άνω Κρητιδικού που στην αρχή είναι λευκοί και εξελίσσονται προς τα πάνω σε κοκκινοπράσινους κονδυλώδεις.
7. Τέλος τοποθετείται ο φλύσχης ηλικίας Πάλαιοκάινου – Μέσου Ηωκάινου ο οποίος στα κατώτερα στρώματα στην επαφή του με τους ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους είναι ασβεστομαργαϊκός, με ένα χαρακτηριστικό χρώμα ερυθρής μάργας Παλαιοκάινου και εξελίσσεται σε ψαμμιτοπηλιτικό και κροκαλοπαγή.

2.2.4 Παλαιογεωγραφία και Τεκτοορογενετική Εξέλιξη Ζώνης Παρνασσού - Γκιώνας

Οι τρεις βωξιτικοί ορίζοντες είναι το πιο βασικό χαρακτηριστικό στην εξέλιξη της ζώνης Παρνασσού – Γκιώνας, οι οποίοι παρεμβάλλονται στη συνεχή ασβεστολιθική σειρά. Οι βωξίτες σχηματίζονται σε περιόδους χέρσευσης μιας περιοχής. Επομένως οι τρεις βωξιτικοί ορίζοντες αντιπροσωπεύουν τρεις διαδοχικές χερσεύσεις της ζώνης και τρεις διακοπές της ιζηματογένεσης, άρα συνδέονται με τρεις ορογενετικές ανυψώσεις.

Οι ασυμφωνίες που παρατηρούνται πάνω και κάτω από τους βωξίτες είναι βασικό επιχείρημα για τις διακοπές της ιζηματογένεσης. Και αφού λοιπόν η ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας δέχτηκε

την επίδραση των πρώιμων ορογενετικών κινήσεων θα πρέπει να τοποθετηθεί στις Εσωτερικές Ελληνίδες ζώνες και όχι στις Εξωτερικές όπου η ιζηματογένεση υπήρξε αδιατάρακτος. Όμως τα ιζήματα της ζώνης σχηματίζουν συνεχή στρωματογραφική στήλη από το Τριαδικό μέχρι το Μέσο – Άνω Ηώκαινο, χωρίς να παρατηρείται στρωματογραφικό κενό, τυπικό χαρακτηριστικό γνώρισμα των Εξωτερικών Ελληνίδων στις οποίες τελικά κατατάσσεται η ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας.

Η ζώνη μπορεί να ανήκει στις Εξωτερικές Ελληνίδες αλλά παλαιογεωγραφικά ήταν στην άμεσο γειτνίαση των Εσωτερικών ζωνών με αποτέλεσμα να δεχθεί τη μακρινή επίδραση των πρώιμων (παλαιοαλπικών) ορογενετικών φαινομένων που έπλητταν εκείνες κατά το Άνω Ιουρασικό – Κάτω Κρητιδικό. Η επίδραση αυτή μεταφράστηκε σε ανοδικές κινήσεις που δημιούργησαν παραλιακό περιβάλλον, κατάλληλο για την βωξιτογένεση αλλά και ικανό για να σχηματιστούν οι ιζηματολογικές ασυμφωνίες μεταξύ των ασβεστόλιθων χωρίς την ουσιαστική διακοπή της ιζηματογένεσης.

Η οριστική ανάδυση της ζώνης έγινε στο Άνω Ηώκαινο, όπως δείχνει η ηλικία του φλύσχη. Τα στρώματα της ζώνης Παρνασσού – Γκιώνας εμφανίζονται επωθημένα πάνω στα στρώματα του φλύσχη της ζώνης Πίνδου στην περιοχή του βουνού Βαρδούσια με κατεύθυνση από τα Ανατολικά στα Δυτικά. Πάνω στην ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας εμφανίζονται επωθημένα στρώματα της Υποπελαγονικής ζώνης και ιδιαίτερα της ζώνης Βοιωτίας.

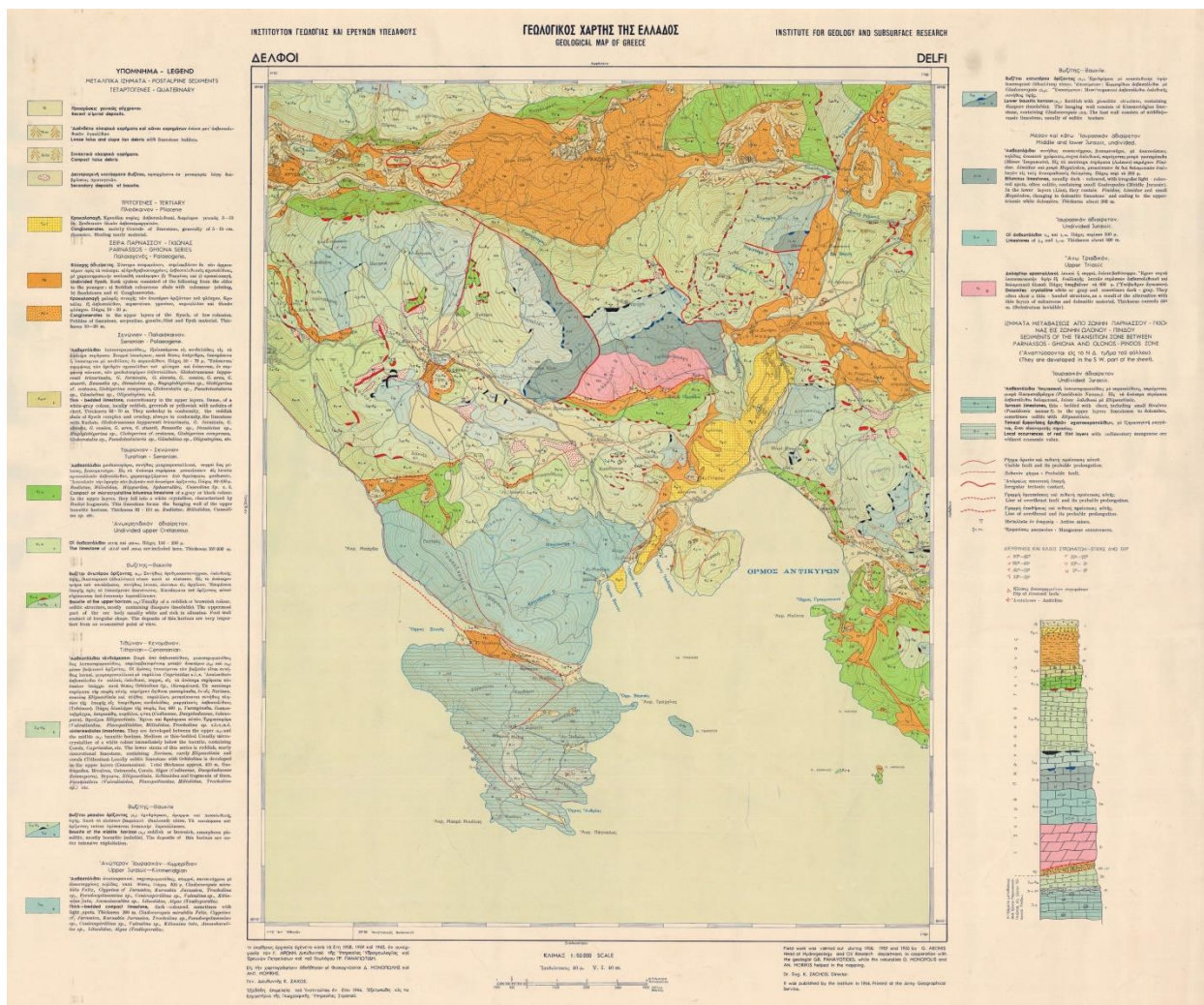
Στα στρώματα της ζώνης παρατηρούνται ανοιχτές πτυχές μεγάλου τύπου. Οι άξονες των πτυχών έχουν γενική διεύθυνση ΒΒΔ – ΝΝΑ. Σε ορισμένες περιοχές έχουν παρατηρηθεί και μεγάλες πτυχές με άξονες διεύθυνσης Α – Δ ή ΒΑ – ΝΔ. Αυτή η γενική τεκτονική εικόνα έχει χαρακτηριστεί σαν «τεκτονική βαρέως τύπου». Σχηματίστηκε λοιπόν μια σειρά από μέγα – αντίκλινα και μεγά – σύγκλινα που δεσπόζουν στα βουνά Παρνασσό και Γκιώνα.

2.2.5 Γεωλογικός χάρτης περιοχής Δελφών

Ο χάρτης που ακολουθεί (Σχήμα 7) δείχνει αναλυτικά την περιοχή μελέτης. Φαίνεται λοιπόν, από μια αρχική εκτίμηση του γεωλογικού χάρτη, ότι στην περιοχή που εξετάζουμε έχουμε τους παρακάτω σχηματισμούς:

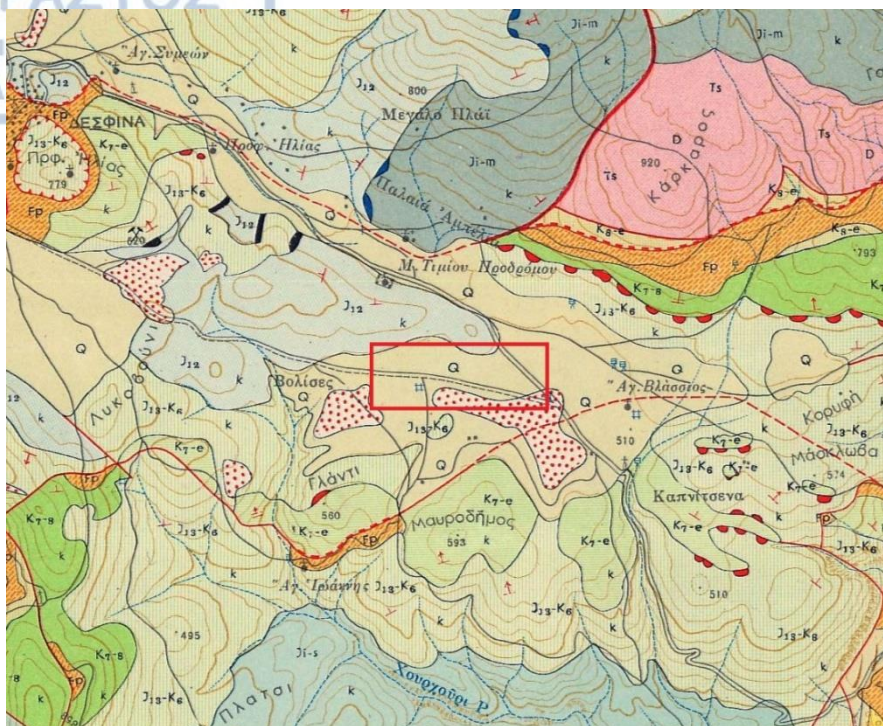
Από τα ανώτερα προς τα κατώτερα στρώματα, παρατηρούνται προσχώσεις γενικώς σύγχρονες που στον χάρτη συμβολίζονται ως Q. Από κάτω φαίνεται να υπάρχουν δευτερογενή κοιτάσματα βωξίτη προερχόμενα από μεταφορά λόγω διαβρώσεως πρωτογενών κοιτασμάτων

βωξίτη. Ακόμη πιο κάτω έχουμε τον σχηματισμό K_{7-e} . Πρόκειται για Άνω Κρητιδικούς ασβεστόλιθους πάχους 150 με 200m. Βαθύτερα έχουμε εμφάνιση του σχηματισμού $J_{13} - K_6$ δηλαδή ιζήματα μεταβάσεως από την Ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας στην Ζώνη Ωλονού – Πίνδου. Πιο συγκεκριμένα, είναι ενδιάμεσοι ασβεστόλιθοι, από μεσοστρωματώδεις εως λεπτοστρωματώδεις και παρεμβάλλονται μεταξύ του ανώτερου b_3 και του μέσου b_2 βωξιτικού οριζοντα. Τέλος στα βαθύτερα στρώματα φαίνεται να υπάρχει ο σχηματισμός J_{12} ένας Ανωϊουρασικός ασβεστόλιθος, παχυστρωματώδης με πάχος 300m.



Σχήμα 7: Χάρτης Δελφών από το Ινστιτούτο Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους.

Η περιοχή μελέτης φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 8. Πρόκειται για την περιοχή όπου έγιναν οι ηλεκτρικές τομογραφίες.



Σχήμα 8: Η ακριβής θέση στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι ηλεκτρικές τομογραφίες.

3. Παρουσίαση Γεωφυσικών Μεθόδων

3.1 Η Σημασία της Γεωφυσικής Διασκόπησης

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις εφαρμόζονται ευρέως στην απεικόνιση του υπεδάφους. Έχουν καθιερωθεί πλέον σε τομείς όπως η μεταλλευτική έρευνα, η αναζήτηση κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, η εφαρμοσμένη μηχανική, η αρχαιομετρία και πρόσφατα σε περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές εφαρμογές. Γεωφυσική διασκόπηση είναι η μελέτη της δομής των στρωμάτων του γήινου φλοιού, τα οποία δεν είναι προσιτά για άμεση παρατήρηση. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται με μετρήσεις των γεωφυσικών μεγεθών και με εφαρμογή θεμελιωδών νόμων της φυσικής. Οι μετρήσεις μεγεθών όπως οι χρόνοι διαδρομής των τεχνητά παραγόμενων ελαστικών κυμάτων, η ένταση του πεδίου βαρύτητας, η ένταση του μαγνητικού πεδίου, το δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου κλπ, γίνονται σε ορισμένη απόσταση από τη δομή που θέλουμε να καθορίσουμε και με διάφορα όργανα. Κάποια από αυτά είναι τα σεισμόμετρα, τα βαρυτόμετρα, τα μαγνητόμετρα, τα βολτόμετρα, κλπ.

Στην συνέχεια οι μετρήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό άλλων μεγεθών που αμέσως περιγράφουν τις φυσικές ιδιότητες των γήινων πετρωμάτων. Τα μεγέθη αυτά είναι η ταχύτητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων, η πυκνότητα των πετρωμάτων, η μαγνητική επιδεκτικότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα κλπ. Πρέπει να τονισθεί ότι, κατά την πραγματοποίηση της γεωφυσικής διασκόπησης δεν ενδιαφερόμαστε γι' αυτές τις ίδιες τιμές των διάφορων φυσικών μεγεθών, αλλά για τις μεταβολές τους.

Στην ουσία, η γεωφυσική διασκόπηση είναι η εφαρμογή των φυσικών μεθόδων (όπως η σεισμική, βαρυτικές, μαγνητικές, ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι) για τη μέτρηση των φυσικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων.

3.2 Γεωφυσική και Γεωφυσικές Μέθοδοι

Η εφαρμοσμένη γεωφυσική έχει μεγάλη πρακτική σημασία διότι με τις γεωφυσικές μεθόδους:

- Μελετάται η δομή και οι γεωδυναμικές διαδικασίες στο φλοιό και στον πάνω μανδύα της Γης που καθορίζουν τις θέσεις πολλών δομών οικονομικής σημασίας
- Εντοπίζονται στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης δομές που σχετίζονται με κοιτάσματα πετρελαίου ή φυσικών αερίων, με μεταλλεύματα, με πηγές γεωθερμικής ενέργειας, με ορυκτούς άνθρακες κλπ.
- Προσδιορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των επιφανειακών στρωμάτων της Γης που έχουν σχέση με την κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων όπως θεμελιώσεις γεφυρών φραγμάτων κλπ. (Boyd, 1999).

Η Γεωφυσική είναι μια από τις επιστήμες που με βάση τους νόμους της φυσικής χρησιμοποιείται για να μελετήσει τις φυσικές ιδιότητες της Γης. Ο όρος γεωφυσική όμως έχει ευρεία έννοια για αυτό το λόγο έχει επικρατήσει ο όρος αυτός να ταυτίζεται με την έρευνα του υπεδάφους ενώ για τις άλλες επιστήμες χρησιμοποιούνται πιο ειδικευμένοι όροι. Επομένως η γεωφυσική χρησιμοποιεί μεθόδους μέτρησης φυσικών μεγεθών στην επιφάνεια του εδάφους, χωρίς να το καταστρέφει. Όλες αυτές οι μέθοδοι της γεωφυσικής λέγονται "μη-καταστροφικές" και είναι συνεπώς φιλικές προς το περιβάλλον.

Εδώ μπαίνει η έννοια "γεωφυσικός στόχος". Οτιδήποτε αναζητείται κάτω από το έδαφος, χρησιμοποιώντας μετρήσεις στην επιφάνειά του εδάφους, χωρίς αυτές να το καταστρέφουν ονομάζεται "γεωφυσικός στόχος". Γεωφυσικοί στόχοι μπορούν να είναι το νερό μέσα στο υπέδαφος, ένα σπήλαιο, ένα ρήγμα που δεν φαίνεται στην επιφάνεια, ένα θαμμένο μέσα στους αιώνες αρχαιολογικό κτίσμα, μια ρωγμή επάνω στα θεμέλια μιας γέφυρας, ένα κοίτασμα πετρελαίου.

Η γεωφυσική έρευνα βασίζεται στη συλλογή, επεξεργασία και ερμηνεία των γεωφυσικών παρατηρήσεων που γίνονται απευθείας στη φύση με γεωφυσικά όργανα. Οι φυσικές παράμετροι του εδάφους είναι η ηλεκτρική του αντίσταση, η επιδεκτικότητα, η πυκνότητα, η θερμοκρασία, οι ελαστικές σταθερές, η πίεση κλπ. Μέσα από αυτές τις μετρήσεις και τον συνδυασμό τους αποκαλύπτεται σιγά σιγά η εικόνα του υπεδάφους δίνοντας μας πληροφορίες τόσο για την φυσική κατάσταση και σύσταση του υλικού και τις κινήσεις του, όσο και για τις συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό της Γης.

Η εφαρμοσμένη γεωφυσική έρχεται σήμερα να απαντήσει όλα τα ερωτήματα που έχουν να κάνουν με το υπέδαφος, δίνοντας μια γρήγορη και ακριβή εικόνα με ταυτόχρονα χαμηλό κόστος. Το μεγάλο πλεονέκτημά της είναι ότι δίνει πληροφορίες χωρίς καμία παρέμβαση επί του εδάφους (εκσκαφή, διάτρηση κ.α.) καθώς επίσης και συνεχή δεδομένα σε αντίθεση με εκείνα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων που αναφέρονται μόνο σε ένα σημείο.

Οι βασικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης διακρίνονται σε πέντε κατηγορίες. Αυτές είναι οι σεισμικές, που διακρίνονται στις μεθόδους διάθλασης και ανάκλασης, οι βαρυτομετρικές, οι μαγνητικές, οι ηλεκτρικές και οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι. Εκτός όμως από αυτές τις βασικές μεθόδους, σε ειδικές περιπτώσεις, εφαρμόζονται και άλλες μέθοδοι όπως είναι η ραδιομετρική και η θερμική μέθοδος.

Παρόλο που οι βασικές αρχές στις οποίες βασίζονται οι μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης είναι απλές, πολλές από αυτές είναι αρκετά πολύπλοκες και η εφαρμογή τους εμφανίζει σημαντικές δυσκολίες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η δομή των επιφανειακών στρωμάτων της Γης είναι πολύπλοκη.

3.3 Γεωφυσικές Μέθοδοι στην Αρχαιολογία

Από τη δεκαετία του 1940, οι γεωφυσικές μέθοδοι διασκόπησης εφαρμόζονται σε παγκόσμια κλίμακα στον εντοπισμό και τη χαρτογράφηση θαμμένων αρχαιοτήτων. Γνωρίζουμε πως οι αρχαιότητες αποτελούν τοπικές ανομοιογένειες στα επιφανειακότερα στρώματα του εδάφους,

επομένως το πιθανότερο είναι να προκαλέσουν μετρήσιμες ανωμαλίες σε φυσικά ή τεχνητά πεδία. Πάνω σε αυτό λοιπόν στηρίχθηκε η σχέση μεταξύ γεωφυσικών διασκοπήσεων και αρχαιολογίας. Στον εντοπισμό και στην απεικόνιση θαμμένων αρχαιοτήτων.

Κάνοντας μετρήσεις με όργανα υψηλής ακρίβειας στα φυσικά ή τεχνητά αυτά πεδία και με σχετικά πυκνή δειγματοληψία μπορούμε να καταγράψουμε αυτές τις ανωμαλίες. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας προχωρημένες μεθόδους γίνεται επεξεργασία των σημάτων αυτών και ακολουθεί η ερμηνεία τους. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια χαρτογράφηση των υπεδάφινων αρχαιοτήτων, η οποία αποτελεί βάση για τον υπεύθυνο αρχαιολόγο της ανασκαφής δίνοντας του τη δυνατότητα να κατευθύνει επιλεκτικά την ανασκαφική του έρευνα. Η εφαρμογή των μεθόδων αυτών γίνεται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και με μικρό κόστος. Καλύπτονται δε με τον τρόπο αυτό μεγάλες σχετικά εκτάσεις.

Στην παρούσα έρευνα, οι γεωφυσικές διακοπήσεις ήρθαν να βοηθήσουν στον εντοπισμό ενός υπόγειου χώρου όπου διοχετεύονταν τα νερά της βροχής. Πρόκειται για μία φιλόδοξη μηχανολογική κατασκευή, ένα μεγάλο υδρολογικό έργο που θυμίζει την λεκάνη της Κωπαΐδας. Το συγκεκριμένο επίτευγμα, όπως και τα «κυκλώπεια» τείχη της μυκηναϊκής ακρόπολης του Καστρουλίου (περίπου 1350-1000 π.Χ.), μαρτυρούν ένα σημαντικό επίπεδο κοινωνικοπολιτισμικής ανάπτυξης και πολυπλοκότητας της ευρύτερης περιοχής.

3.4 Ηλεκτρικές Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης

3.4.1 Εισαγωγή

Με τις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης με μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων στην επιφάνεια της Γης. Συνήθως η ποσότητα που μετράμε είναι η ηλεκτρική τάση, ενώ η ποσότητα που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Πιο συγκεκριμένα επιδιώκεται ο καθορισμός της και η μελέτη της κατανομής των τιμών της μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι μπορούν να διακριθούν σε δύο γενικές κατηγορίες. Στην πρώτη ανήκουν εκείνες που βασίζονται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών φυσικών ηλεκτρικών ρευμάτων ή πεδίων και στην δεύτερη εκείνες που βασίζονται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών τα οποία εξαρτώνται από παραγόμενα τεχνητά ηλεκτρικά ρεύματα ή πεδία.

Οι μέθοδοι των τελλουρικών ρευμάτων και του φυσικού δυναμικού ανήκουν στην πρώτη κατηγορία, ενώ οι μέθοδοι της ειδικής αντίστασης, των ισοδυναμικών γραμμών και της επαγόμενης πολικότητας ανήκουν στην δεύτερη κατηγορία.

Σκοπός της γεωηλεκτρικής μεθόδου διασκόπησης είναι να μετρηθεί η διαφορά δυναμικού που προκαλείται από την εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στην Γη. Η διαφορά δυναμικού που μετράται αντικατοπτρίζει την δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει στο υπέδαφος, δίνοντας έτσι μια ένδειξη για την ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους. Διαφορετικού γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν και διαφορετικές ηλεκτρικές αντιστάσεις. Η γνώση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έμμεση εύρεση της γεωλογικής δομής και δομών ενδιαφέροντος.

Χρησιμοποιούνται κυρίως στην αναζήτηση μεταλλευμάτων και γεωθερμικών πεδίων, στην υδρογεωλογία και στην τεχνική γεωλογία. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται πολύ λιγότερο στην διασκόπηση πετρελαίου, γιατί με αυτές μπορούμε να μελετήσουμε μόνο τα επιφανειακότερα στρώματα του φλοιού της Γης. Σε πολύ λίγες περιπτώσεις οι γεωηλεκτρικές μέθοδοι μπορούν να δώσουν πληροφορίες για βάθη μεγαλύτερα των 2000m.

3.4.2 Ειδική Αντίσταση των Πετρωμάτων και Ορυκτών

Η ειδική αντίσταση, ρ , είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την ηλεκτρική διασκόπηση. Εάν R είναι η ηλεκτρική αντίσταση ενός κομματιού πετρώματος σε σχήμα κυλίνδρου, διατομής S και μήκους l , τότε η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ορίζεται από την σχέση:

$$\rho = \frac{RS}{l}$$

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων, SI, είναι το $1\Omega m = 100\Omega cm$. Το αντίστροφο της ειδικής αντίστασης λέγεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του πετρώματος και δίνεται από την σχέση, $\sigma = 1/\rho$.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι μια από τις πιο μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων και ορυκτών. Οι τιμές της κυμαίνονται από $10^{-6}\Omega\text{m}$ σε ορισμένα ορυκτά,

όπως είναι ο γραφίτης, μέχρι $10^{15}\Omega\text{m}$ σε ορισμένα ξηρά χαλαζιακά πετρώματα. Καλοί αγωγοί θεωρούνται τα πετρώματα και ορυκτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^{-6} και $10^{-1}\Omega\text{m}$ και κακοί αγωγοί αυτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^8 και $10^{15}\Omega\text{m}$.

Μεταξύ των ειδικών αντιστάσεων μεταμορφωμένων και πλουτωνίων πετρωμάτων, δεν παρατηρείται συστηματική διαφορά. Όσο για τα ιζηματογενή πετρώματα, τα περισσότερα έχουν ειδικές αντιστάσεις ($1 - 10^3 \Omega\text{m}$) μικρότερες από τις ειδικές αντιστάσεις των πλουτωνίων και μεταμορφωμένων πετρωμάτων ($10^3 - 10^5 \Omega\text{m}$), αλλά ο συμπαγής ασβεστόλιθος έχει υψηλές τιμές ($> 10^5 \Omega\text{m}$).

Υλικό	Ειδική Αντίσταση ($\Omega\text{m}\cdot\text{meter}$)
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	$20 - 2 \times 10^3$
Δολομίτης	$100 - 10,000$
Άμμος	$1 - 1,000$
Άργιλος	$1 - 100$
Εδαφικό Νερό	$0.5 - 300$
Θαλασσινό Νερό	0.2

Πίνακας 1 : Τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε διαφορετικά ορυκτά και πετρώματα.

Αν και μερικά αμιγή μέταλλα καθώς και ο γραφίτης άγουν τον ηλεκτρισμό, τα περισσότερα πετρογενετικά ορυκτά είναι μονωτές. Η μετρούμενη ειδική αντίσταση των ορυκτών της Γης ελέγχεται κατά κύριο λόγο από την κίνηση των φορτισμένων ιόντων στα ρευστά των πόρων.

Παρόλο που και το καθαρό νερό δεν είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, το εδαφικό νερό περιέχει διαλυμένες ενώσεις οι οποίες αυξάνουν σημαντικά την ικανότητα του να άγει τον ηλεκτρισμό. Επομένως, το πορώδες και ο κορεσμός σε ρευστά παίζουν καθοριστικό ρόλο στις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης. Εκτός από το πορώδες, και οι ρωγμές εντός του πετρώματος μπορεί να οδηγήσουν σε χαμηλές ειδικές αντιστάσεις αν γεμίσουν με ρευστά.

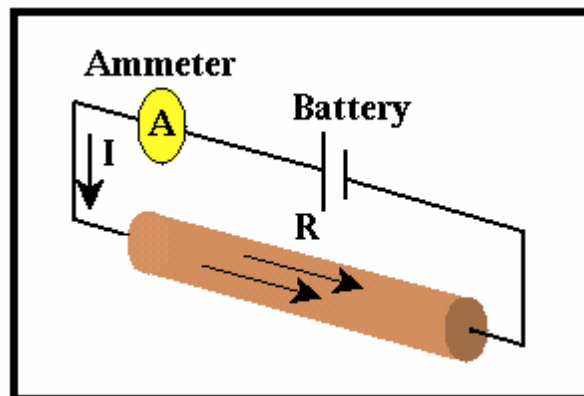
Όπως και με την μαγνητική επιδεκτικότητα, υπάρχει ένα μεγάλο εύρος τιμών ειδικής αντίστασης, όχι μόνο μεταξύ πετρωμάτων και ορυκτών αλλά και μεταξύ πετρωμάτων του ίδιου τύπου. Το εύρος αυτό εξαρτάται πρωταρχικά από το περιεχόμενο ρευστό. Συνεπώς, ένας συνήθης στόχος για μία ηλεκτρική διασκόπηση είναι η αναγνώριση των ζωνών κορεσμού σε ρευστά. Για παράδειγμα, οι μέθοδοι της ειδικής αντίστασης χρησιμοποιούνται συχνά στις μηχανικές και περιβαλλοντικές μελέτες για τον προσδιορισμό του υδροφόρου ορίζοντα.

3.4.3 Ροή Ρεύματος και ο Νόμος του Ohm σε Ομογενή και Ισότροπη Γη

Το 1827 ο Georg Ohm, όρισε μια εμπειρική σχέση μεταξύ του ρεύματος που διαρρέει ένα συμμάτινο καλώδιο και της διαφοράς δυναμικού (τάσης) που απαιτείται για να δημιουργηθεί το ρεύμα.

$$\Delta V = IR$$

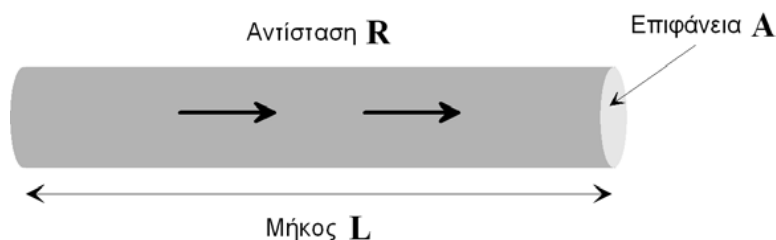
Ο Ohm βρήκε ότι η ένταση του ρεύματος, I , είναι ανάλογη της τάσης, ΔV , για μία μεγάλη κατηγορία υλικών τα οποία θα αποκαλούμε στο εξής ωμικά υλικά. Η σταθερά αναλογίας, R , καλείται ωμική αντίσταση (resistance) του υλικού και έχει ως μονάδα μέτρησης τη διαφορά δυναμικού (volt) ανά ένταση ρεύματος (ampere), δηλαδή το Ω (ohm).



Σχήμα 9 : Σχηματική αναπαράσταση του νόμου του Ohm.

Κατά κανόνα, είναι σχετικά απλό να μετρήσουμε την ωμική αντίσταση σε συρμάτινο καλώδιο. Συνδέουμε μια μπαταρία γνωστής τάσης σε ένα καλώδιο και στην συνέχεια μετρούμε το ρεύμα που διαρρέει το καλώδιο (Σχήμα 9). Η τάση δια το ρεύμα μας δίνει την αντίσταση του καλωδίου. Στην ουσία, αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο ένα πολύμετρο μετράει την αντίσταση.

Η έννοια της ηλεκτρικής αντίστασης περιγράφει την ιδιότητα του υλικού χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις διαστάσεις του.



Σχήμα 10 : Τρόπος υπολογισμού της ωμικής αντίστασης.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η χρήση των μετρήσεων της ωμικής αντίστασης παρουσιάζει πρόβλημα καθώς αυτή δεν εξαρτάται μόνο από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το συρμάτινο καλώδιο, αλλά και από τη γεωμετρία του καλωδίου. Αν, για παράδειγμα, μεγάλωνε το μήκος του συρματινίου καλωδίου (Σχήμα 10), τότε θα αυξανόταν και η μετρούμενη αντίσταση. Επίσης, αν μειωνόταν η διάμετρος του συρματινίου καλωδίου, η

μετρούμενη αντίσταση θα αυξανόταν. Έτσι λοιπόν ορίζεται μια ιδιότητα, η οποία περιγράφει την ικανότητα του υλικού να διαβιβάζει ηλεκτρικό ρεύμα και να είναι ανεξάρτητη των γεωμετρικών παραγόντων. Η γεωμετρικά ανεξάρτητη ποσότητα που χρησιμοποιούμε ονομάζεται ειδική αντίσταση (resistivity) και συνήθως συμβολίζεται με ρ .

Στην περίπτωση του συρμάτινου καλωδίου, η ειδική αντίσταση, ρ , ορίζεται ως η ωμική αντίσταση του καλωδίου, R , επί την επιφάνεια διατομής του, A , δια το μήκος, L , του καλωδίου:

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

Επομένως μονάδα της ειδικής αντίστασης είναι το $\Omega \cdot m$. Επειδή η Ωμική αντίσταση R όπως νωρίτερα είδαμε σούται με $R = \Delta V / I$, η ειδική αντίσταση ρ σύμφωνα με τη προηγούμενη σχέση θα είναι:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{A}{L} \Rightarrow \frac{\Delta V}{L} = \rho \frac{I}{A}$$

Η ειδική αντίσταση είναι μια θεμελιώδης παράμετρος που χαρακτηρίζει το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το συρμάτινο καλώδιο, και περιγράφει πόσο εύκολα μπορεί το καλώδιο να διαβιβάσει ηλεκτρικό ρεύμα. Υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης υποδηλώνουν ότι το υλικό είναι πολύ ανθεκτικό στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος (αντιστατικό υλικό). Χαμηλές τιμές υποδηλώνουν ότι το υλικό μεταδίδει το ηλεκτρικό ρεύμα πολύ εύκολα (αγώγιμο υλικό).

Οι παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι:

- α) Το πορώδες των πετρωμάτων και την περιεκτικότητα σε διαλυμένα άλατα. Συγκεκριμένα, όταν ελαττώνεται το πορώδες του πετρώματος, η ειδική αντίσταση αυξάνει.
- β) Η λιθολογία των πετρωμάτων και η γεωλογική ηλικία των πετρωμάτων. Τα μεγαλύτερης ηλικίας υποκείμενα στρώματα παρουσιάζουν συνήθως μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση.
- γ) Η θερμοκρασία των πετρωμάτων. Συνήθως με αύξησή της, η ειδική αντίσταση ελαττώνεται, καθώς αυξάνεται η ευκινησία των ιόντων.

Επιπλέον, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των υδροφόρων και μη σχηματισμών ελαττώνεται με την αύξηση:

- Του όγκου του νερού στο πέτρωμα
- Της περιεκτικότητας σε χλωριόντα ή ελεύθερα ιόντα του υπόγειου ύδατος
- Της περιεκτικότητας σε αργίλους
- Του βαθμού κορεσμού του διαλύματος στους πόρους του πετρώματος
- Της καρστικοποίησης
- Της εξαλλοίωσης

3.4.4 Μια πρώτη εκτίμηση της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

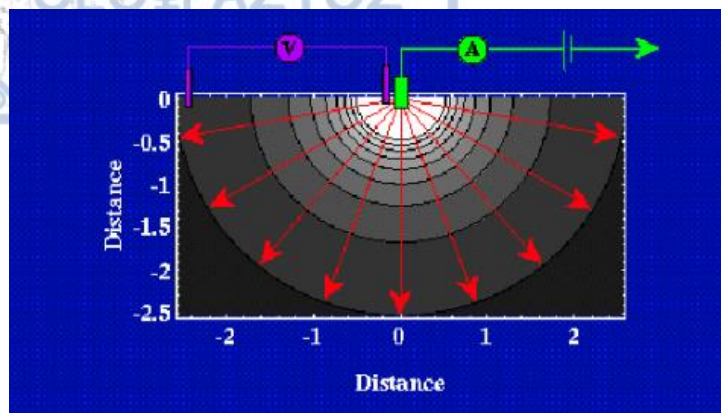
Το δυναμικό σε ένα σημείο του ημιχώρου, που θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει τη γη, λόγω της παρουσίας μίας σημειακής πηγής ρεύματος (ενός μοναδικού ηλεκτροδίου ρεύματος) σε κάποιο άλλο σημείο του ημιχώρου δίνεται από τη σχέση:

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

Στην έκφραση αυτή, V είναι το δυναμικό (ή τάση), I είναι η ένταση του ρεύματος, ρ είναι η ειδική αντίσταση του υλικού του ημιχώρου, και r είναι η απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου ρεύματος και του σημείου στο οποίο μετράμε την τάση. Παρατηρούμε ότι η σχέση αυτή δεν είναι τίποτε περισσότερο από το νόμο του Ohm, με την αντίσταση R ίση με ρ δια $2\pi r$.

Αν η Γη είχε σταθερή ειδική αντίσταση, θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε αυτήν την ειδική αντίσταση εκτελώντας το παρακάτω πείραμα (Σχήμα 11). Συνδέουμε στο καλώδιο που συνδέει την μπαταρία με το ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος ένα αμπερόμετρο με το οποίο μετράμε την ποσότητα ρεύματος που εισάγεται στη Γη. Τοποθετούμε ένα ηλεκτρόδιο που συνδέεται με ένα βολτόμετρο δίπλα στο ηλεκτρόδιο ρεύματος, ενώ τοποθετούμε το άλλο σε κάποια απόσταση, r , μακριά από το ηλεκτρόδιο και μετράμε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο θέσεων. Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση, υπολογίζουμε την ειδική αντίσταση, ρ .

Στην πράξη, το πείραμα αυτό είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί διότι τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος πρέπει να τοποθετηθούν σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους (συνήθως 10 φορές την απόσταση στην οποία μετράμε την τάση).

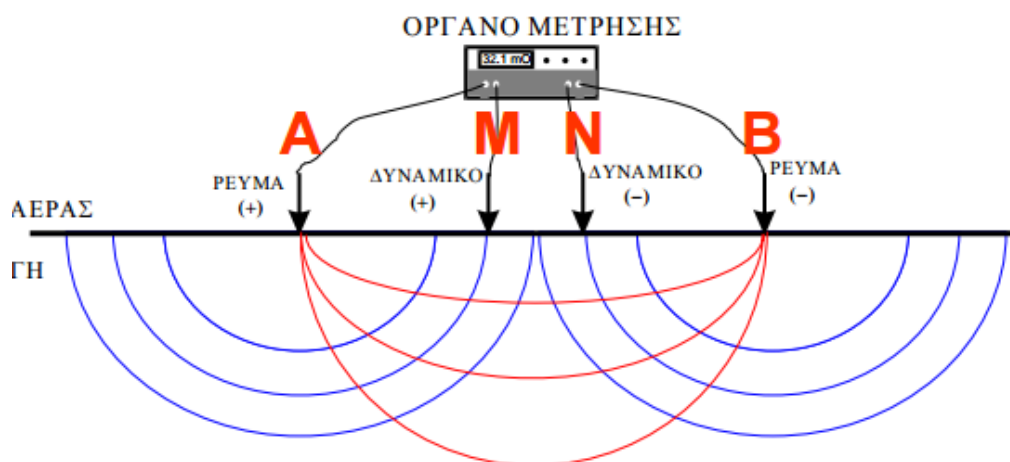


Σχήμα 11 : Διάταξη μέτρησης για την εύρεση της ειδικής αντίστασης σε ομογενή Γη.

Επομένως, γιατί να μην μειώσουμε απλά την απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων τάσης έτσι ώστε η απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος να παραμείνει μία πρακτική απόσταση; Το πρόβλημα είναι ότι όσο πιο κοντά βρίσκονται τα ηλεκτρόδια τάσης μεταξύ τους, τόσο πιο μικρή είναι η διαφορά δυναμικού που θα μετρηθεί. Επομένως, υπάρχει ένα πρακτικό όριο στο πόσο κοντά μπορούν να βρίσκονται τα δύο ηλεκτρόδια τάσης και κατά συνέπεια και πόσο κοντά μπορούν να βρίσκονται και τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος.

3.4.5 Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

Ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων κατά τις οποίες παράγεται στο έδαφος ηλεκτρικό πεδίο με τεχνητό τρόπο. Οι ιδιότητες του πεδίου αυτού διαμορφώνονται από την δομή του υπεδάφους και γι' αυτό ο καθορισμός των ιδιοτήτων αυτών με μετρήσεις του δυναμικού οδηγεί στον καθορισμό της δομής του υπεδάφους.



Σχήμα 12 : Εφαρμογή της μεθόδου ηλεκτρικής αντίστασης με διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων.

Μέσω δύο ηλεκτροδίων ρεύματος A, B (Σχήμα 12) διαβιβάζεται στο έδαφος ηλεκτρικό ρεύμα και σε διάφορες θέσεις του εδάφους μετρίεται το δυναμικό που δημιουργεί το ρεύμα αυτό με δύο ηλεκτρόδια δυναμικού M, N. Πραγματοποιούνται μετρήσεις τόσο της έντασης του ρεύματος, i , όσο και του δυναμικού (διαφοράς τάσης), ΔV , που παράγεται, με στόχο τον καθορισμό της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ρ , στο υπέδαφος. Αυτή η κατανομή της ειδικής αντίστασης στο υπέδαφος ονομάζεται γεωηλεκτρική δομή. Βρίσκεται έτσι για κάθε μέτρηση η ηλεκτρική αντίσταση ρ :

$$\rho = \frac{V_{MN}}{I_{AB}}$$

Κύριος στόχος της μεθόδου της ειδικής αντίστασης είναι ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους, ενώ τελικός στόχος είναι η γεωλογική ερμηνεία της δομής αυτής που παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες και συνήθως απαιτεί πρόσθετα στοιχεία (γεωλογικά, γεωφυσικά, κλπ).

3.4.6 Φαινόμενη Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση

Κατά τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης διαβιβάζεται ηλεκτρικό ρεύμα στο υπέδαφος. Για την βασική διαδικασία μέτρησης χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια (συνήθως μεταλλικοί πάσσαλοι) τα οποία εισάγονται στο έδαφος σε ένα βάθος μερικών εκατοστών (περίπου 10cm) και σε αποστάσεις μεταξύ τους που ποικίλουν από μερικά μέτρα μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα. Το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιείται, συνδέεται με τα ηλεκτρόδια μέσω καλωδίων. Έτσι διαβιβάζεται συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, έντασης I (ποικίλλει από μερικά milli-Ampere έως μερικά Ampere) μέσα στη Γη από δυο ηλεκτρόδια ρεύματος A, B. Σε δύο άλλα ηλεκτρόδια M, N (ηλεκτρόδια δυναμικού) μετράται στις διάφορες θέσεις η διαφορά δυναμικού V_{MN} .

Το βάθος διείσδυσης του ρεύματος, άρα και το βάθος της διασκόπησης, είναι ανάλογο με την απόσταση των ηλεκτροδίων. Σε μη ομοιογενή Γη, στόχος είναι να προσδιοριστεί με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια η ειδική αντίσταση των στρωμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων γείωσης για να αυξάνεται έτσι και το βάθος διείσδυσης του. Γενικότερα παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων, τόσο το ρεύμα διεισδύει βαθύτερα μέσα στην Γη.

Ο άμεσος υπολογισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δεν είναι πάντα εύκολος. Γι' αυτό αρχικά υπολογίζεται μια φυσικώς ανύπαρκτη ποσότητα η οποία ονομάζεται φαινόμενη ειδική αντίσταση, ρ_α , η οποία χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της πραγματικής ειδικής αντίστασης στους διάφορους σχηματισμούς (στρώματα, κλπ) του υπεδάφους.

Επειδή η Γη είναι γεωηλεκτρικά ανομοιογενής, η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση είναι συνάρτηση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους και της γεωμετρίας της μέτρησής μας (Θέσεις A, B, M, N). Για να λάβουμε υπόψη την επίδραση της γεωμετρίας εισάγεται ο όρος της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\rho_\alpha = \frac{V_{MN}}{I_{AB}} K$$

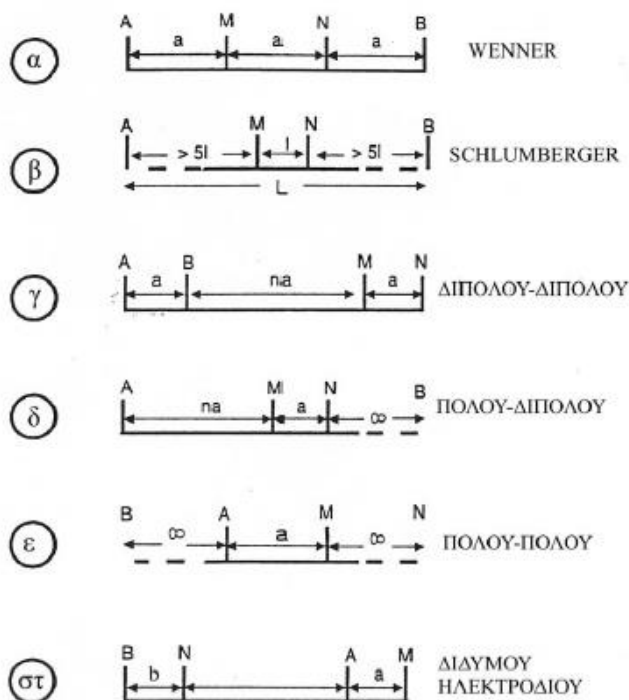
όπου K είναι ένας γεωμετρικός παράγοντας που καθορίζεται από τη διάταξη των ηλεκτροδίων, εξαρτάται από τις αποστάσεις AM, BM, AN, BN (βλέπε Σχήμα 12) και ισούται με $\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}$. Η σχέση που περιγράφει το K διαφέρει ανάλογα με τη διάταξη που εφαρμόζεται. Προκύπτει συνεπώς ότι :

$$\rho_\alpha = \frac{V_{MN}}{I} \left[\frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \right] = R$$

Επομένως η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση, ρ_α , αποτελεί ένα είδος μέσου όρου των ηλεκτρικών αντιστάσεων του ανομοιογενούς υπεδάφους. Άρα δεν δίνει ακριβώς την πραγματική αλλά μια "παραμορφωμένη" εικόνα της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους. Για αυτόν τον λόγο η απευθείας χρήση των μετρήσεων φαινόμενης αντίστασης για την εξαγωγή συμπερασμάτων είναι παρακινδυνευμένη. Η πραγματική αντίσταση μπορεί να βρεθεί μόνο μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Ο καθορισμός της πραγματικής αντίστασης από τις τιμές της φαινόμενης αντίστασης είναι η λύση του αντίστροφου προβλήματος.

3.4.7 Τρόποι Διάταξης των Ηλεκτροδίων

Για την πραγματοποίηση των γεωηλεκτρικών μετρήσεων έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι διάταξης, στην επιφάνεια της Γης, των ηλεκτροδίων ρεύματος του δυναμικού, ανάλογα με τον σκοπό της γεωηλεκτρικής διασκόπησης. Υπάρχουν πολλές διατάξεις ηλεκτροδίων που εφαρμόζονται σήμερα στην ύπαιθρο, ανάλογα με την περιοχή, το μέγεθος των δομών που αναμένονται, τον εξοπλισμό και την εξοικείωση του προσωπικού. Οι διατάξεις τεσσάρων ηλεκτροδίων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές επειδή ελαχιστοποιούν τα αποτελέσματα της αντίστασης επαφής, δηλαδή της ηλεκτρικής αντίστασης στη θέση του ηλεκτροδίου. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατά τους οποίους διατάσσονται τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται κάποιοι από αυτούς.



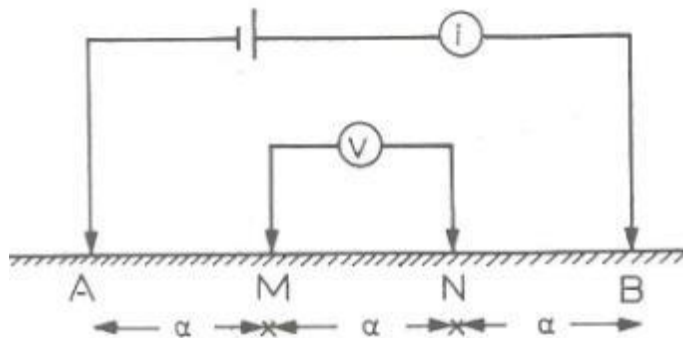
Σχήμα 13 : Διατάξεις ηλεκτροδίων.

Έχουν προταθεί πάρα πολλές διατάξεις με σχετικά θεωρητικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στην πράξη όμως χρησιμοποιούνται διατάξεις που έχουν εσωτερική συμμετρία και ελαχιστοποιούν τα απλωμένα καλώδια στο πεδίο. Οι πιο γνωστές από τις διατάξεις αυτές

θα αναλυθούν παρακάτω και είναι η διάταξη «Wenner», η διάταξη «Schlumberger» και η διάταξη «διπόλου – διπόλου».

3.4.7.α Διάταξη Wenner

Για μία διασκόπηση με τη μέθοδο Wenner, τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος (A, B) και τα δυο ηλεκτρόδια δυναμικού (M, N) τοποθετούνται σε μία ευθεία, σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους ($AM = MN = NB = \alpha$), με κέντρο της γραμμής σε κάποιο σημείο όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 14 : Σχηματική απεικόνιση της διάταξης Wenner. (Παπαζάχος 1986)

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση που υπολογίζεται από τις μετρήσεις της τάσης, ΔV , και του ρεύματος, i , δίνεται από την απλή εξίσωση :

$$\rho_{\alpha} = 2\pi\alpha R \Rightarrow \rho_{\alpha} = 2\pi\alpha \frac{\Delta V}{I}$$

Δηλαδή, στην περίπτωση αυτή ο γεωμετρικός συντελεστής είναι $K = 2\pi\alpha$. Η εξίσωση αυτή δεν είναι τίποτε περισσότερο από την έκφραση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που είδαμε προηγουμένως, όπου οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων είναι σταθερές και ίσες με α . Για να δημιουργήσουμε ένα διάγραμμα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης συναρτήσει της

απόστασης των ηλεκτροδίων, από το οποίο θα ερμηνεύσουμε τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης με το βάθος, πρέπει να υπολογίσουμε την φαινόμενη ειδική αντίσταση για διαφορές τιμές της απόστασης των ηλεκτροδίων, α. Δηλαδή, αφού ολοκληρώσουμε μια μέτρηση, πρέπει να μετακινήσουμε και τα τέσσερα ηλεκτρόδια σε νέες θέσεις.

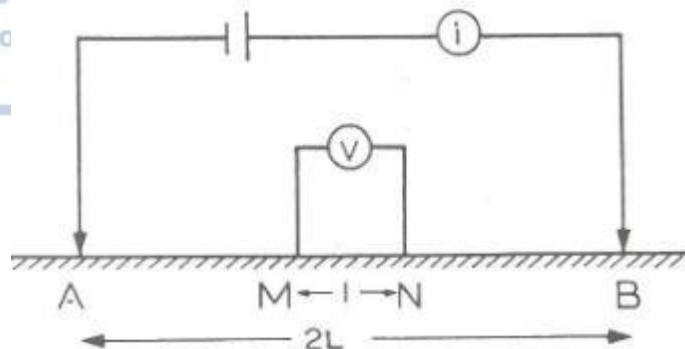
Η διάταξη Wenner, παρά την γεωμετρική της απλότητα παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Όπως προαναφέρθηκε, και τα τέσσερα ηλεκτρόδια, δύο ρεύματος και δύο δυναμικού, πρέπει να μετακινηθούν για την απόκτηση κάθε καταγραφής. Επίσης, λόγω αυτής της μετακίνησης των ηλεκτροδίων η μέθοδος αυτή είναι πιο επιδεκτική στις πλευρικές μεταβολές της ειδικής αντίστασης. Οι πλευρικές αυτές μεταβολές μπορεί να παρερμηνευτούν σημαντικά όσο αναφορά στις μεταβολές της ειδικής αντίστασης με το βάθος. Γενικά οι ερμηνείες που βασίζονται σε βαθυσκοπήσεις συνεχούς ρεύματος περιορίζονται σε απλές δομές οριζοντίων στρωμάτων.

Παρ'όλα αυτά για την μέθοδο αυτή απαιτούνται λιγότερο ευαίσθητα βολτόμετρα. Άλλο ένα θετικό στοιχείο της μεθόδου είναι πως η απόσταση ηλεκτροδίων δυναμικού αυξάνει καθώς αυξάνει η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος.

3.4.7.β Διάταξη Schlumberger

Για την διενέργεια μιας ηλεκτρικής βυθομέτρησης Schlumberger στο πεδίο τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού διατάσσονται στο έδαφος κατά μήκος ευθείας γραμμής σε συγκεκριμένες μεταξύ τους αποστάσεις (Σχήμα 15). Κατά την εφαρμογή της διάταξης για γεωηλεκτρική βαθυσκόπηση, τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά, ενώ η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται σταδιακά και συμμετρικά σχετικά με το κέντρο της διάταξης, ενώ κατά την εφαρμογή της διάταξης αυτής για γεωηλεκτρική χαρτογράφηση τα τέσσερα ηλεκτρόδια μετακινούνται πάνω στην τομή, ενώ η απόστασή τους παραμένει σταθερή όπως και στην διάταξη Wenner.

Τα ηλεκτρόδια ρεύματος όσο και τα ηλεκτρόδια δυναμικού είναι συμμετρικά τοποθετημένα ως προς ένα κέντρο συμμετρίας το οποίο ονομάζεται κέντρο της διάταξης. Όμως, τα τέσσερα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού δεν ισαπέχουν μεταξύ τους όπως στη διάταξη Wenner. Στην διάταξη αυτή η απόσταση, $MN = 2l$, μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση, $AB = 2L$, μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος ($L \gg l$).



Σχήμα 15 : Σχηματική απεικόνιση διάταξης Schlumberger. (Παπαζάχος 1986)

Διεξάγοντας βυθομετρήσεις με διάταξη ηλεκτροδίων κατά Schlumberger η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού M, N πρέπει πάντοτε να διατηρείται μικρότερη του 40% της απόστασης AB/2. Στις μετρήσεις πεδίου απομακρύνουμε διαδοχικά τα ηλεκτρόδια ρεύματος (αυξάνουμε την απόσταση AB) ενώ διατηρούμε σταθερή την απόσταση MN. Με αυτό το τρόπο έχουμε μια γρήγορη μείωση της διαφοράς δυναμικού στα άκρα των ηλεκτροδίων δυναμικού MN, όπου από κάποια στιγμή και μετά ο θόρυβος γίνεται μεγαλύτερος του μετρούμενου σήματος ΔV στα άκρα M, N και η μέτρηση του ΔV καθίσταται αδύνατη. Σ' αυτό το σημείο μία αύξηση της απόστασης MN θεωρείται απαραίτητη, τέτοια όμως ώστε να ισχύει ο περιορισμός η MN να παραμένει μικρότερη του 40% της απόστασης AB/2, και η έρευνα συνεχίζεται.

Για κάθε θέση των ηλεκτροδίων η φαινόμενη ειδική αντίσταση ρ_a υπολογίζεται από την σχέση:

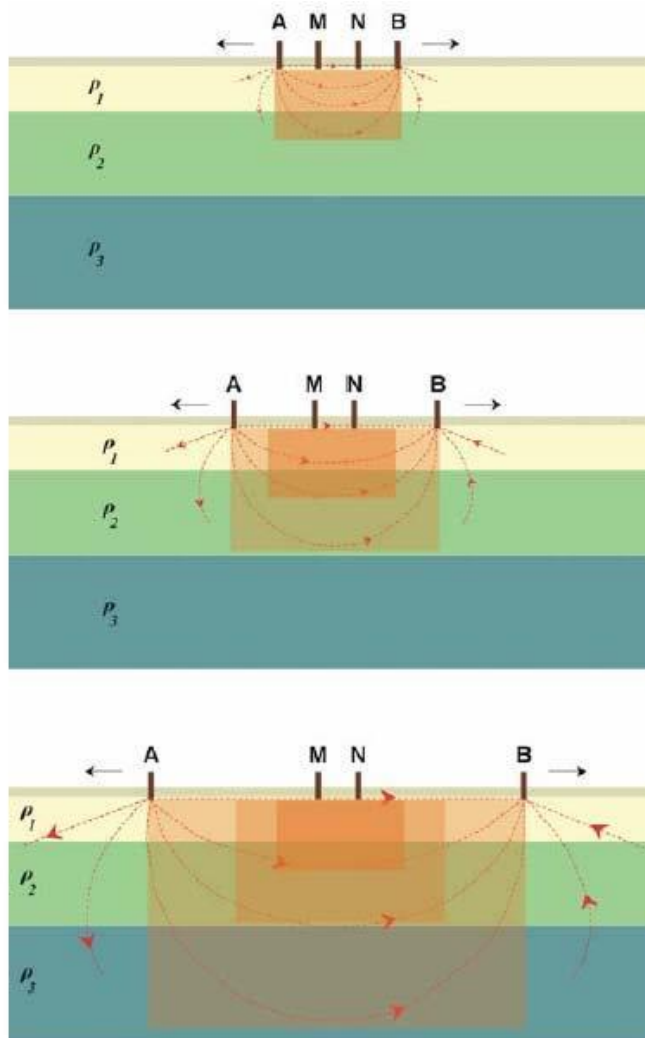
$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2l} \cdot \frac{\Delta V}{i},$$

όπου η ποσότητα $K = \pi L^2 / 2l$ είναι ο γεωμετρικός παράγοντας για την διάταξη Schlumberger.

Οι τιμές της ρ_a προβάλλονται ως συνάρτηση του ημι-αναπτύγματος AB/2 των ηλεκτροδίων ρεύματος σε διλογαριθμικούς άξονες δημιουργώντας έτσι την ηλεκτρική καμπύλη της βυθομέτρησης (sounding curve) η οποία αποτελεί το βασικό τεκμήριο για την ερμηνεία.

Καθώς η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνει ο συνολικός όγκος της Γης που ελέγχεται από την μέτρηση αυξάνει επίσης, τόσο σε βάθος όσο και πλευρικά. Δεδομένου ότι το κέντρο της διάταξης παραμένει σταθερό και εκείνο που αλλάζει είναι οι διαδοχικά διευρυνόμενες αποστάσεις AB είναι φανερό ότι οι διαδοχικά διευρυνόμενοι γήινοι όγκοι που ελέγχονται από τις μετρήσεις αλληλεπικαλύπτονται.

Η ειδική αντίσταση μπορεί μεν στην πραγματικότητα να μεταβάλλεται τόσο με το βάθος όσο και οριζόντια, όμως για την ερμηνεία των ηλεκτρικών βυθομετρήσεων η Γη θεωρείται οριζόντια στρωματωμένη, όπου μέσα στο κάθε στρώμα η ειδική αντίσταση παραμένει σταθερή (ομοιογενή στρώματα) και μεταβάλλεται μόνο με το βάθος όπου αλλάζει τιμή από στρώμα σε στρώμα. Γίνεται συνεπώς αντιληπτό ότι οι μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης με την διαδοχική αύξηση της απόστασης AB θα σχετίζονται αυστηρά μόνο με την σε βάθος αύξηση των αλληλεπικαλυπτόμενων γήινων όγκων που αναφέραμε προηγούμενα και όχι με την πλευρική αύξηση αυτών λόγω της παραδοχής που έχουμε κάνει για πλευρικά ομοιογενή και οριζόντια στρωματωμένη Γη. Έτσι, οι μετρούμενες τιμές της ειδικής αντίστασης είναι στη πραγματικότητα μέσες τιμές μεγάλων γήινων όγκων οι οποίοι συνεχώς εκτείνονται πλευρικά και σε βάθος (Σχήμα 16) λόγω της διαδοχικής αύξησης της απόστασης AB.



Σχήμα 16 : Αλληλεπικαλύψη των γήινων όγκων καθώς αυξάνεται το εύρος των ηλεκτροδίων.

Η διάταξη Schlumberger εφαρμόζεται περισσότερο από όλες τις άλλες διατάξεις για βαθυσκοπήσεις, επειδή παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως είναι το ότι απαιτείται να μετακινήσουμε μόνο τα ηλεκτρόδια ρεύματος για την γεωηλεκτρική βαθυσκόπηση. Αυτό μπορεί να μειώσει σημαντικά τον χρόνο που χρειάζεται για την απόκτηση της βαθυσκόπησης. Επίσης, επειδή τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά τοποθετημένα, οι επιδράσεις των πλευρικών μεταβολών της ειδικής αντίστασης κοντά στην επιφάνεια μειώνονται. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι το μεγαλύτερο μέρος του διαθέσιμου σήμερα βοηθητικού υλικού (καμπύλες, προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών) για την ερμηνεία των παρατηρήσεων έγινε με εφαρμογή σε διάταξη Schlumberger.

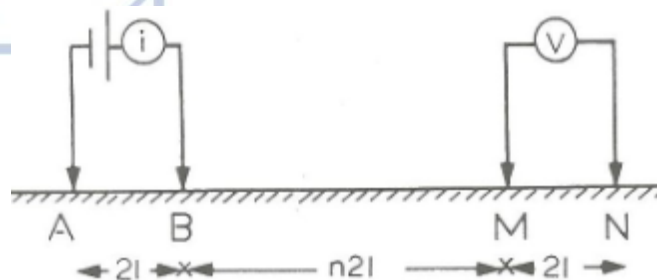
Από την άλλη, παρουσιάζει και μειονεκτήματα, όπως το ότι επειδή επειδή η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι μικρή σε σχέση με την απόσταση των ρεύματος, για μεγάλες αποστάσεις ηλεκτροδίων ρεύματος, απαιτούνται πολύ ευαίσθητα βολτόμετρα. Γενικά οι ερμηνείες που βασίζονται σε βαθυσκοπήσεις συνεχούς ρεύματος περιορίζονται σε απλές δομές οριζοντίων στρωμάτων.

3.4.7.γ Διάταξη Διπόλου – Διπόλου

Στη διάταξη διπόλου - διπόλου τα ηλεκτρόδια ρεύματος A, B και δυναμικού M, N διατάσσονται κατά τη σειρά ABMN κατά μήκος της διεύθυνσης (γραμμής) που πρόκειται να ερευνηθεί (Σχήμα 17). Εν γένει τα μήκη AB και MN είναι ίσα μεταξύ τους. Τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος βρίσκονται σε μικρή απόσταση $AB = 2l$, μεταξύ τους, αλλά είναι απομακρυσμένα από τα ηλεκτρόδια δυναμικού, δηλαδή απέχουν απ' αυτά σημαντική απόσταση, $BM = n2l$, ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού απέχουν, συνήθως, την ίδια μικρή απόσταση, $MN = 2l$. Στην περίπτωση αυτή ($n \gg 1$) φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{\alpha} = 2\pi n (n + 1) (n + 2) l \frac{\Delta V}{i}$$

Η διάταξη αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι η απόσταση, $2pl$, μεταξύ του διπόλου ρεύματος και του διπόλου δυναμικού μπορεί να αυξηθεί σημαντικά και περιορίζεται μόνο από τον εδαφικό θόρυβο και από την δυνατότητα των οργάνων να καταγράψουν την τάση και όχι από την απαίτηση για μεγάλα μήκη καλωδίων, όπως συμβαίνει στις διατάξεις Wenner και Schlumberger. Οι μετρήσεις κατά την εφαρμογή της μεθόδου γίνονται με αύξηση του n κατά βήματα.



Σχήμα 17 : Σχηματική απεικόνιση διάταξης διπόλου- διπόλου. (Παπαζάχος 1986)

3.4.7.δ Άλλες Είδη Διατάξεων

Εκτός από τις τρεις βασικές διατάξεις που αναλύθηκαν παραπάνω υπάρχουν και άλλες διατάξεις που εξυπηρετούν στην μέτρηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, στις οποίες τα ηλεκτρόδια βρίσκονται στην ίδια γραμμή (τομή) αλλά χρησιμοποιούνται λιγότερο. Μία από αυτές είναι η Διάταξη Lee η οποία είναι όμοια με την διάταξη Wenner με την διαφορά ότι σ' αυτή χρησιμοποιείται και πέμπτο ηλεκτρόδιο που τοποθετείται στο μέσο της απόστασης MN και η Διάταξη Τριών Σημείων στην οποία το ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετείται σε μεγάλη απόσταση από τα άλλα τρία ηλεκτρόδια.

Υπάρχουν επίσης και μη γραμμικές διατάξεις, δηλαδή διατάξεις στις οποίες τα ηλεκτρόδια δεν βρίσκονται στην ίδια γραμμή. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται διάταξη στην οποία εφαρμόζεται η αρχή της διπόλου – διπόλου αλλά τα δύο δίπολα δεν βρίσκονται στην ίδια γραμμή, ενώ εφαρμόζεται και η Τετραγωνική Διάταξη στην οποία τα τέσσερα ηλεκτρόδια βρίσκονται στις κορυφές τετραγώνου και για κάθε νέα μέτρηση μεταβάλλεται η πλευρά του τετραγώνου.

3.4.8 Μέθοδοι Έρευνας

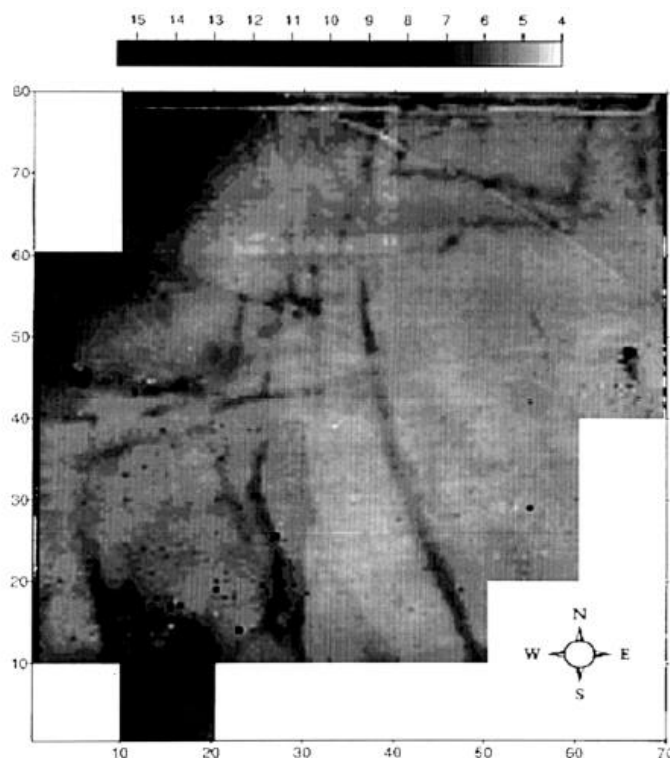
Βυθοσκόπηση (Sounding)

Σκοπός αυτής της μεθόδου είναι να καθοριστεί η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε συνάρτηση με το βάθος. Το κέντρο της διάταξης παραμένει σταθερό και με την συνεχή αύξηση της

απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος, αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης του ρεύματος και διαρρέονται βαθύτεροι σχηματισμοί. Στην περίπτωση των βυθοσκοπήσεων χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά η διάταξη Schlumberger. Έτσι, μετράται η κατακόρυφη κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων. Η ερμηνεία των βυθοσκοπήσεων γίνεται θεωρώντας ύπαρξη οριζόντιων στρωμάτων για αυτό και εφαρμόζεται κυρίως σε ιζηματογενείς λεκάνες (μονοδιάστατη γεωηλεκτρική δομή). Κλασικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου αυτής αποτελεί η έρευνα για τον εντοπισμό υδροφόρων σχηματισμών.

Όδευση (Profiling)

Χρησιμοποιείται για να εντοπίζει πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίθετα με τη βυθοσκόπηση, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές και λαμβάνεται μια σειρά μετρήσεων με πλευρική μετακίνηση της διάταξης των ηλεκτροδίων ως συνόλου με σταθερό βήμα.

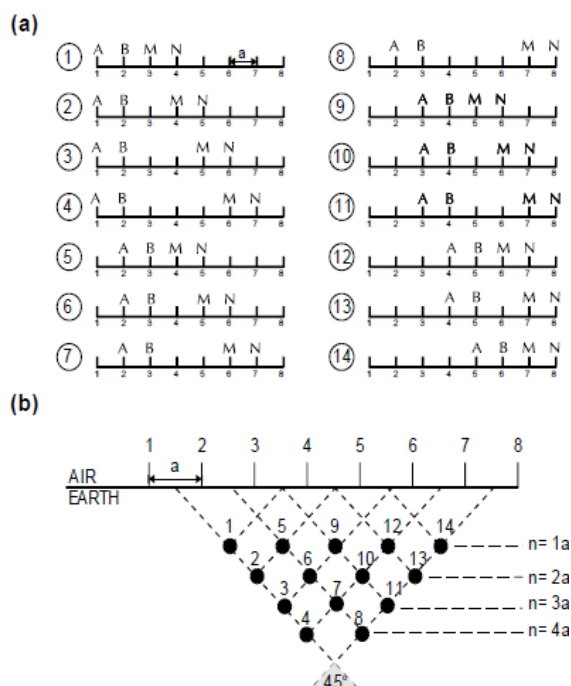


Σχήμα 18 : Οριζόντια κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στη περιοχή του ιερού της Εύκλειας στην ευρύτερη περιοχή του αρχαιολογικού χώρου της Βεργίνας. Παρατηρούνται διάφορα γραμμικά στοιχεία που αποτελούν ίχνη θεμελίων (Tsokas et al., 2006)

Έτσι, χαρτογραφούνται οι μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σταθερό βάθος κατά μήκος μιας όδευσης και εντοπίζονται δομές που παρουσιάζουν διαφορετική αντίσταση με το περιβάλλον τους. Στη γεωλογία χρησιμοποιείται στον εντοπισμό ρηγμάτων, φακών άμμου ή χαλικιών, επαφών, κενών κ.α., ενώ η χρήση της είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη στην αρχαιομετρία.

Δισδιάστατη διασκόπηση (Συνδυασμός sounding και profiling)

Με την ηλεκτρική τομογραφία, (συνδυασμός όδευσης και βυθοσκόπησης), είναι δυνατό να πάρουμε πληροφορίες τόσο για την πλευρική όσο και για την σε βάθος μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτό γίνεται για παράδειγμα, με διαδοχικές οδεύσεις πάνω από την περιοχή μελέτης, με συνεχή αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων. Με τον τρόπο αυτό παίρνουμε μια δισδιάστατη εικόνα της ερευνηθείσας περιοχής. Σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνικές, η ηλεκτρική τομογραφία απαιτεί έναν μεγάλο αριθμό μετρήσεων, επομένως αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και η ανάλυση της ηλεκτρικής μεθόδου. Παράδειγμα εφαρμογής της δισδιάστατης διασκόπησης με τη μέθοδο διπόλου-διπόλου, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 19 : Δυσδιάστατη διασκόπηση με τη μέθοδο διπόλου-διπόλου (α) Τρόπος διάταξης ηλεκτροδίων κατά τη συλλογή των δεδομένων με 8 ηλεκτρόδια και μέγιστο $n=4$ (β) Τρόπος τοποθέτησης των μετρήσεων κατά την απεικόνιση με τη μέθοδο της ψευδοτομής (Tsourlos 1995).

3.4.9 Ηλεκτρική τομογραφία

Ο όρος ηλεκτρική τομογραφία (ΗΤ) περιγράφει γενικά έναν τύπο μετρήσεων της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός δύο “παραδοσιακών” τεχνικών μέτρησης: της όδευσης και της βυθοσκοπήσης. Ειδικότερα, η ηλεκτρική τομογραφία μπορεί να περιγραφεί ως μία σειρά από συνεχόμενες ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις κατά μήκος της γραμμής έρευνας ή ως μία σειρά από οδεύσεις πάνω από την ίδια περιοχή με διαδοχικά αυξανόμενες αποστάσεις ηλεκτροδίων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η λήψη πληροφορίας τόσο για την κατακόρυφη όσο και για την οριζόντια μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή μελέτης και έτσι λαμβάνεται μία πληρέστερη “εικόνα” του υπεδάφους.

Πρόδρομος της Ηλεκτρικής Τομογραφίας είναι η μέθοδος της “ψευδοτομής” που έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στην χαρτογράφηση μεταλλευμάτων (Edwards 1977) αλλά και σε διάφορες άλλες εφαρμογές (π.χ. υδρογεωλογικές, Griffiths et al., 1990). Στην διαδικασία της “ψευδοτομής” μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων (διπόλου-διπόλου, Wenner, πόλου-διπόλου). Η Ηλεκτρική Τομογραφία όμως είναι πιο γενικευμένος όρος που περιλαμβάνει και μετρήσεις με μη συμβατικές διατάξεις καθώς επίσης και μετρήσεις που λαμβάνονται με ηλεκτρόδιασεγεωτρήσεις (π.χ. Shima 1992).

Ενα από τα κύρια χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι ότι σε σύγκριση με τις άλλες τεχνικές λαμβάνεται ένας αρκετά μεγάλος αριθμός μετρήσεων (άρα και χρήσιμης πληροφορίας). Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και ανάλυση της γεωηλεκτρικής μεθόδου. Παράλληλα όμως, λόγω του μεγάλου αριθμού τους, οι μετρήσεις είναι δύσκολο να ληφθούν με χειροκίνητη αλλαγή των ηλεκτροδίων, και γι' αυτό χρησιμοποιούνται συστήματα αυτοματοποιημένων πολυπλεκτών. Πολλά τέτοια εμπορικά συστήματα έχουν αναπτυχθεί και κυκλοφορούν στην αγορά από το 1990 και μετά, γεγονός ενδεικτικό της ανάπτυξης της Ηλεκτρικής Τομογραφίας. Βέβαια πρέπει να τονιστεί ότι η χρήση αυτών των οργάνων αυξάνει αναπόφευκτα το κόστος εφαρμογής της μεθόδου.

Από την άλλη, οι παραδοσιακές διδιάστατες μετρήσεις παρουσιάζουν δυο προβλήματα. Αργή και επίπονη λήψη μετρήσεων στο ύπαιθρο και δυσκολία στην ερμηνεία (η ψευδοτομή δίνει μια “παραμορφωμένη” εικόνα της πραγματικής γεωηλεκτρικής αντίστασης). Προκύπτουν όμως δυο νέες εξελίξεις, ο συνδιασμός των οποίων χαρακτηρίζεται ως Ηλεκτρική Τομογραφία. Αυτές είναι η δημιουργία οργάνων μέτρησης που επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη λήψη μετρήσεων, αλλά και η εξέλιξη αυτοματοποιημένων τεχνικών ερμηνείας που επιτρέπουν την ακριβή απεικόνιση των γεωηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους.

3.4.9.α Ερμηνεία με Ψευδοτομή

Η ερμηνεία των μετρήσεων σε πρώτο στάδιο γίνεται με τη μέθοδο της ψευδοτομής. Αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ των διπόλων ρεύματος και δυναμικού, η τιμή της διαφοράς δυναμικού που μετράται επηρεάζεται από βαθύτερα στρώματα. Ετσι, στην περίπτωση της διάταξης διπόλου-διπόλου (η οποία και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη) κάθε μέτρηση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αποδίδεται, κατά προσέγγιση, στο σημείο τομής των δύο ευθειών που ξεκινάνε με γωνία 45ο από το μέσο της απόστασης AB και το μέσο της απόστασης MN.

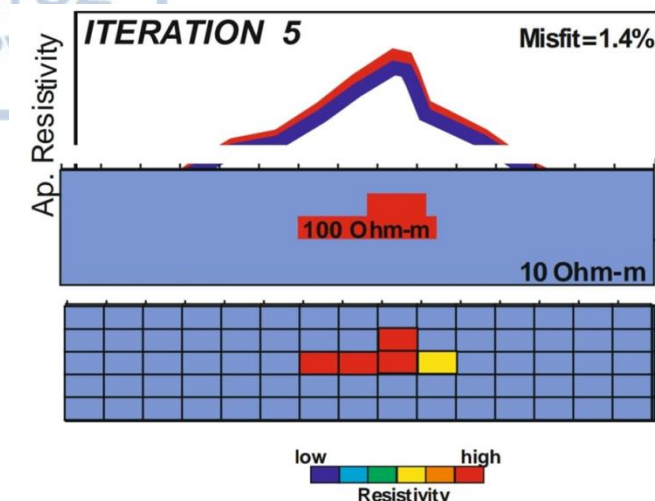
Η ερμηνεία όμως με τη μέθοδο της ψευδοτομής είναι ιδιαίτερα δύσκολη και επισφαλής γιατί η εικόνα της κατανομής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι μια παραμορφωμένη εικόνα της πραγματικής κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή έρευνας.

Για αυτόν τον λόγο νέες τεχνικές ερμηνείας και επεξεργασίας έχουν προταθεί. Οι τεχνικές αυτές επιδιώκουν την επίλυση του αντιστροφικού γεωηλεκτρικού προβλήματος είτε με χρήση προσεγγιστικών μεθόδων, π.χ. μέθοδος Zhody-Barker, (Barker 1992), μέθοδος οπισθοπροβολής (Tsourlos et al., 1993), είτε με τη χρήση υπαρχόντων μη γραμμικών τεχνικών αντιστροφής (π.χ. Tripp et al., 1984) που προσαρμόζονται στο πρόβλημα της HT (Shima 1990, Tsourlos et al., 1995).

3.4.9.β Ερμηνεία με Αντιστροφή

Η πλέον δημοφιλής τεχνική για την αποκατάσταση της πραγματικής εικόνας της γεωηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους είναι αυτή της αντιστροφής. Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο αντίστασης που να δίνει μετρήσεις που είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές. Προϋπόθεση η ύπαρξη μεθόδου επίλυσης του ευθέως προβλήματος, δηλαδή, να βρεθούν οι μετρήσεις δοθείσης της κατανομής της αντίστασης.

Ένα παράδειγμα του πως λειτουργεί η διαδικασία της αντιστροφής δίνεται παρακάτω, στο (Σχήμα 20). Στο πάνω μέρος του σχήματος βλέπουμε τις μετρήσεις που πήραμε για την πραγματική δομή, η οποία φαίνεται από κάτω, στο πλαίσιο με τα κουτάκια. Η διαδικασία της αντιστροφής είναι ότι αγνοούμε την δομή και κρατάμε τις μετρήσεις και στην ουσία προσπαθούμε να βρούμε ποιά είναι η δομή του εδάφους που μας έδωσε αυτές τις μετρήσεις.



Σχήμα 20 : Παράδειγμα αντιστροφής. Στο πλαίσιο με τα κουτάκια φαίνεται η πραγματική δομή και επάνω έχουμε τις μετρήσεις που πήραμε για την συγκεκριμένη δομή.

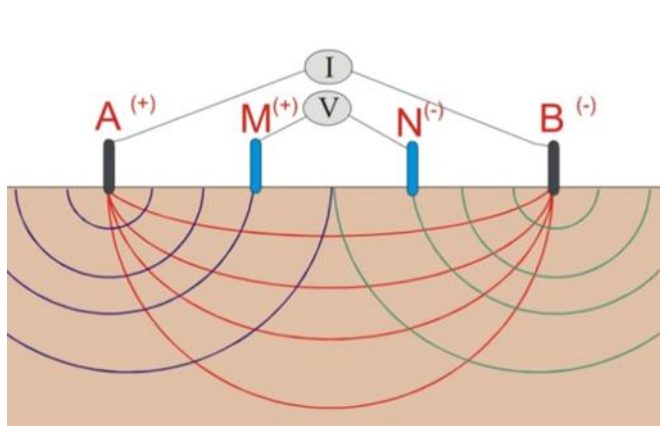
Φυσικά αυτό δεν μπορούμε να το βρούμε απ' ευθείας επομένως κάνουμε μια επαναληπτική διαδικασία. Επαναληπτικά ξεκινάμε με μια υπόθεση μοντέλου, για παράδειγμα ότι η Γη είναι ομογενής. Εάν η Γη ήταν ομογενής τότε θα έπρεπε να έχουμε τις μετρήσεις της μπλε γραμμής. Βέβαια οι δικές μας μετρήσεις φαίνονται στην κόκκινη γραμμή.

Ένα κριτήριο του πόσο έχουμε πετύχει την διαδικασία της αντιστροφής είναι το πόσο η μπλε γραμμή (δηλαδή ο υπολογισμός της απόκρισης του μοντέλου) απέχει από την κόκκινη γραμμή (οι πραγματικές μετρήσεις). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, εάν αρχικά θεωρήσουμε ότι η Γη είναι ομογενής, το σφάλμα (misfit) είναι 20%. Στη συνέχεια δημιουργείται ένα άλλο μη ομογενές μοντέλο και υπολογίζεται πάλι η απόκρισή του. Αυτό γίνεται με συγκεκριμένα μαθηματικά κριτήρια. Ουσιαστικά, με την διαδικασία της αντιστροφής, αντιστρέφουμε μαθηματικά έναν πίνακα και βρίσκουμε μια αρχική βελτιωμένη λύση (ένα μοντέλο το οποίο είναι διαφορετικό από το ομογενές) και από την πρώτη κιόλας επανάληψη το σφάλμα μειώνεται. Η αντιστροφή ποτέ δεν μας δίνει το πραγματικό μοντέλο. Μας δίνει συνθετικά δεδομένα (μπλε γραμμή) τα οποία όμως είναι πάρα πολύ κοντά στα πραγματικά δεδομένα (κόκκινη γραμμή).

3.4.10 Εξοπλισμός που Χρησιμοποιείται

Ο εξοπλισμός για τις μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης περιλαμβάνει μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, το κύκλωμα ρεύματος AB το οποίο εισάγει στο έδαφος μιας ελεγχόμενης έντασης ρεύμα, το κύκλωμα δυναμικού MN το οποίο μετρά τη διαφορά

δυναμικού (πτώση τάσης) μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού, καλώδια και ηλεκτρόδια (Σχήμα 21). Για καλύτερα αποτελέσματα τα δύο αυτά κυκλώματα θα πρέπει να είναι ανεξάρτητα και σε απόσταση μεταξύ τους.

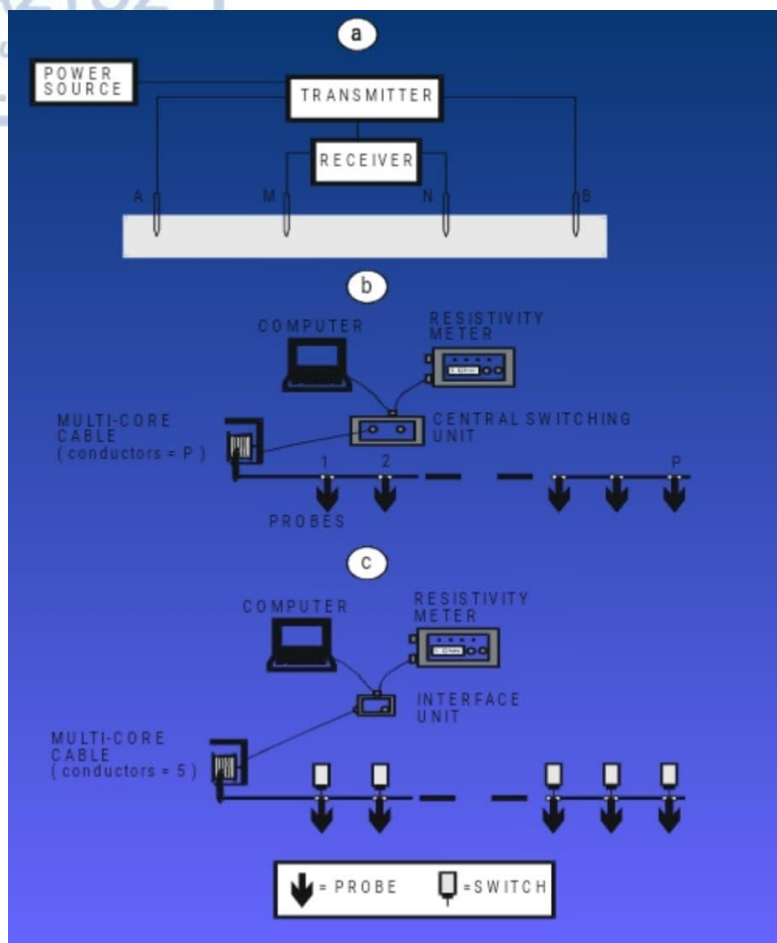


Σχήμα 21 : Εφαρμογή της μεθόδου ηλεκτρικής αντίστασης με διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων. Διαβιβάζεται συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I μέσα στη Γη με δυο ηλεκτρόδια ρεύματος A, B και μετράται σε διάφορες θέσεις η διαφορά δυναμικού VMN μεταξύ δυο ηλεκτροδίων δυναμικού M, N . Βρίσκεται έτσι για κάθε μέτρηση η ηλεκτρική αντίσταση R .

Το κύκλωμα ρεύματος AB : Το κύκλωμα που παρέχει ρεύμα στα ηλεκτρόδια ρεύματος AB αποτελείται από την πηγή ρεύματος, μια μονάδα ελέγχου η οποία περιλαμβάνει ένα αμπερόμετρο για την μέτρηση του ρεύματος εκπομπής και ένα διακόπτη, καλώδια και ηλεκτρόδια (Σχήμα 22).

Πηγή Ρεύματος (Current Source): Απαιτείται μία πηγή συνεχούς ρεύματος η οποία ποικίλει ανάλογα με το είδος του υπό διερεύνηση προβλήματος (στόχου). Για συνήθη αναπτύγματα ηλεκτροδίων ρεύματος ($AB < 1000$ μέτρα) οι κατεξοχήν πηγές είναι οι συσσωρευτές. Για μεγαλύτερα αναπτύγματα χρησιμοποιούνται πηγές μεγάλης ισχύος όπως είναι οι βενζινοκίνητες γεννήτριες ρεύματος.

Αμπερόμετρο (Ammeter): Για τη μέτρηση του ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα απλό αμπερόμετρο. Ο μοναδικός περιορισμός είναι να μπορεί το όργανο να μετρήσει ποσότητα ρεύματος από λίγα milliamps έως περίπου 0.5amp με ακρίβεια καλύτερη του 2% στη πλήρη κλίμακα. Πολλά από τα σύγχρονα όργανα ρυθμίζονται έτσι ώστε να ο χειριστής να καθορίζει την ποσότητα ρεύματος που διοχετεύεται στο έδαφος και το όργανο να επιχειρεί να την αποδώσει. Αν το όργανο δεν μπορεί να αποδώσει την καθορισμένη ποσότητα, είτε γιατί το υπέδαφος κοντά στην επιφάνεια έχει πολύ μεγάλη αντίσταση ή επειδή τα ηλεκτρόδια είναι πολύ απομακρυσμένα, το όργανο προειδοποιεί τον χειριστή (Εικόνα 3).



Σχήμα 22 : Όργανα που χρησιμοποιούνται: Βολτόμετρο για την μέτρηση της τάσης. Πηγή ηλεκτρικού ρεύματος με αμπερόμετρο για να διαβιβάζεται στο έδαφος τεχνητά παραγόμενο ρεύμα. Οι συσκευές ηλεκτρικής διασκόπησης περιλαμβάνουν καλώδια, ηλεκτρόδια κλπ.

Καλώδια: Για να συνδέσουμε τα ηλεκτρόδια με τα διάφορα ηλεκτρικά εξαρτήματα, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε καλώδια (Εικόνες 1 και 2). Αν και είναι πιθανό να πρέπει να χρησιμοποιηθούν καλώδια πολύ μεγάλου μήκους, συγκριτικά με την πολύ υψηλή ειδική αντίσταση του εδάφους, η αντίσταση των καλωδίων θεωρείται κατά κανόνα αμελητέα. Για εύκολη τοποθέτηση, τα καλώδια συνήθως τυλίγονται σε καρούλια. Τα καλώδια παροχής ρεύματος θα πρέπει να επιλεγούν με προσοχή έτσι ώστε να εξασφαλίζουν την μέγιστη παροχή ισχύος της πηγής στα ηλεκτρόδια Α και Β ή αλλιώς να ελαχιστοποιούν την απώλεια ισχύος λόγω μετατροπής μέρους της ενέργειας της πηγής σε άλλες μορφές ενέργειας (θερμότητα). Επιπλέον θα πρέπει να παρέχουν υψηλή μόνωση εξασφαλίζοντας κατ' αυτό το τρόπο αξιοπιστία των μετρήσεων δυναμικού στο κύκλωμα δυναμικού ΜΝ.

Για την εξασφάλιση των παραπάνω συνθηκών θα πρέπει να ικανοποιούν τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Η ωμική αντίσταση των καλωδίων να είναι χαμηλή ιδιαίτερα για τα μεγάλα αναπτύγματα. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρησιμοποίηση πολύκλωνων καλωδίων και με την αύξηση των συρμάτων κλώνων χαλκού εις βάρος όμως της ευκινησίας τους κατά το άπλωμα και την έλξη τους δεδομένου ότι καθίστανται βαρύτερα.
- Η μηχανική αντοχή τους στις έλξεις να είναι μεγάλη. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη συρμάτων κλώνων από ατσάλι.
- Η μόνωση τους να είναι ισχυρή.
- Να είναι ελαφρά διευκολύνοντας έτσι τον χειρισμό τους στο πεδίο.



Εικόνες 1 και 2 : Μια σειρά από ηλεκτρόδια τοποθετούνται στην επιφάνεια του εδάφους και μέσω ενός πολυκάναλου καλωδίου και ενός συστήματος πολυπλεξίας λαμβάνονται αυτόματα μετρήσεις οδεύσεως πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος με συνεχώς αυξανόμενες αποστάσεις ηλεκτροδίων.

Ηλεκτρόδια: Για να αποφευχθούν προβλήματα ψευδών δυναμικών που σχετίζονται με τα ηλεκτρόδια δυναμικού, χρησιμοποιούνται εξειδικευμένα ηλεκτρόδια γνωστά ως πορώδη δοχεία (porous pots). Όμως, επειδή τα ψευδή δυναμικά μπορούν να μετρηστούν με χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας, τα ηλεκτρόδια αυτά συνήθως δεν χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις ειδικής αντίστασης συνεχούς ρεύματος. Αν οι συνθήκες της διασκόπησης είναι υπερβολικά ξηρές και η επαφή του ηλεκτροδίου με το έδαφος δεν μπορεί να διατηρηθεί, τότε μπορεί κανείς να επιλέξει να χρησιμοποιήσει τα πορώδη δοχεία.

Για τις διασκοπήσεις ειδικής αντίστασης, τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται συνήθως, δεν είναι τίποτε περισσότερο από ράβδους αλουμινίου, χαλκού ή ατσάλινες μήκους περίπου 60 εκατοστών. Οι ράβδοι αυτές καρφώνονται στο έδαφος και συνδέονται με καλώδια με την πηγή του ρεύματος ή το βολτόμετρο (Εικόνα 4). Κάτω από ξηρές συνθήκες, η επαφή μεταξύ της ράβδου και του εδάφους μπορεί να ενισχυθεί αν διαβρέξουμε το έδαφος που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο. Ακόμα καλύτερα αποτελέσματα μπορούν να διασφαλιστούν εαν διαβρέξουμε τα ηλεκτρόδια με αλατόνερο.



Εικόνα 3 : Φωτογραφικό υλικό από την θέση Καστρούλι, Δεσφίνας. Οι Δρ. Φίκος Ηλίας και Σταμπολίδης Αλέξανδρος με το όργανο μέτρησης επιβλέπουν τα αποτελέσματα που δίνονται από τον μετρητή αντίστασης.

Το κύκλωμα δυναμικού MN: Το κύκλωμα MN αποτελείται από ένα υψηλής εμπέδησης βολτόμετρο, συζευγμένο με ένα καταγραφικό σύστημα στις περιπτώσεις που το μετρούμενο δυναμικό ΔV καθίσταται πολύ μικρό, ένα σύστημα αντιστάθμισης, καλώδια και ηλεκτρόδια. Τα σύγχρονα υψηλής ακρίβειας βολτόμετρα έχουν αντιστάσεις εισόδου της τάξης των 10 ή και περισσότερων M. Και είναι ικανά να μετρούν δυναμικά από 10 μV μικρά έως μερικά volts.

Ο αντισταθμιστής συνδέεται σε σειρά με το βολτόμετρο και χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση ανεπιθύμητων φυσικών δυναμικών προερχόμενων από άλλες φυσικές ή τεχνητές πηγές τα οποία υπεισέρχονται σαν θόρυβος στις μετρήσεις. Τα κριτήρια επιλογής των καλωδίων για το κύκλωμα δυναμικού MN είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά των καλωδίων του κυκλώματος ρεύματος.



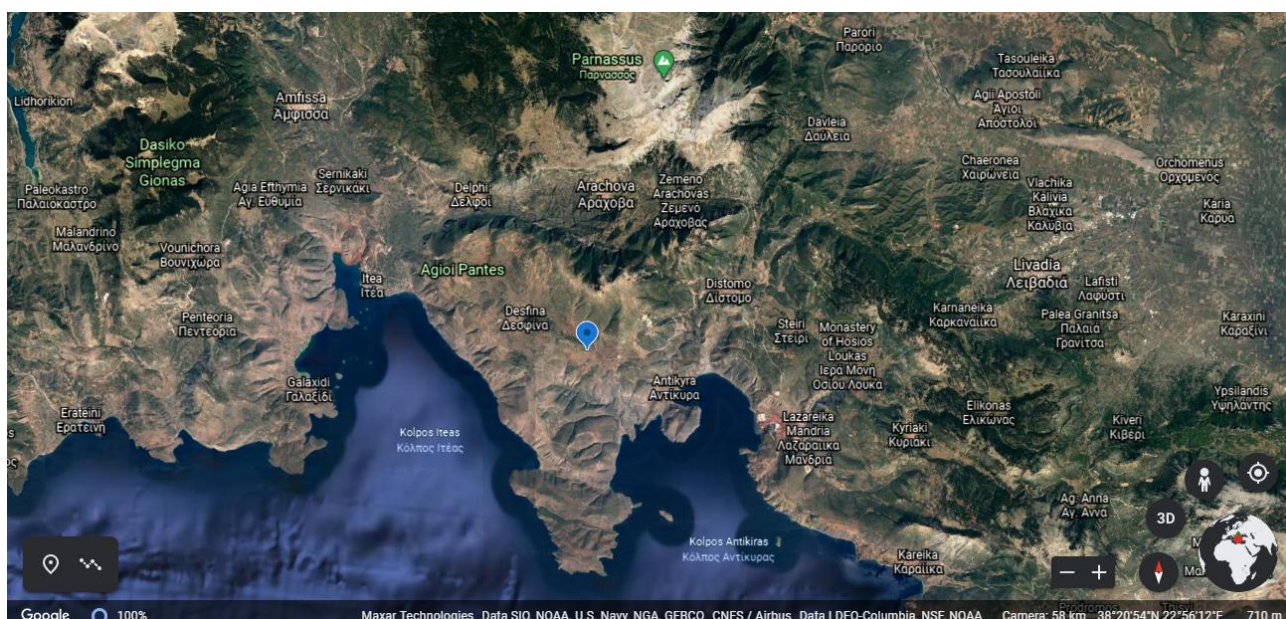
Εικόνα 4 : Φωτογραφικό υλικό από την θέση Καστρούλι, Δεσφίνας. Στο κέντρο της εικόνας διακρίνεται μια σειρά από ηλεκτρόδια τοποθετημένα στην επιφάνεια του εδάφους και μέσω ενός πολυκάναλου καλωδίου λαμβάνονται αυτόματα οι μετρήσεις.

4. Λήψη μετρήσεων

Τα πειράματα έγιναν στις 22 Αυγούστου του 2019 κοντά στο ύψωμα Καστρούλι, στα Ανατολικά της Δεσφίνας του Νομού Φωκίδας. Πιο συγκεκριμένα βρεθήκαμε ΝΑ του αρχαιολογικού χώρου του υψώματος Καστρούλι, σε υψόμετρο περίπου 495 μέτρων (Σχήμα 23). Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν της γεωηλεκτρικής τομογραφίας η οποία έχει την δυνατότητα να μας δείχνει μια πρώτη “εικόνα” του υπεδάφους και παράλληλα μας παρέχει μεγάλη διακριτική ικανότητα. Ο εξοπλισμός αποτελείται από ένα πλήρες σύστημα εκτέλεσης

γεωηλεκτρικής τομογραφίας 12 καναλιών με σκοπό την απεικόνιση της γεωηλεκτρικής δομής (Όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης SYSCAL Pro της εταιρείας IRIS), μια μεγάλη δωδεκάβολτη μπαταρία, από δύο καρούλια όπου είναι τυλιγμένα τα καλώδια, 48 μεταλλικά ηλεκτρόδια, και τους συνδετήρες καλωδίων και ηλεκτροδίων (Εικόνα 5).

Η μεταφορά του εξοπλισμού δεν αποτέλεσε πρόβλημα μιας και το έδαφος ήταν αρκετά επίπεδο. Αφού φτάσαμε στο επιλεγμένο σημείο, απλώσαμε τα ηλεκτρόδια της ηλεκτρικής τομογραφίας και ξεκίνησε η διαδικασία καταγραφής των δεδομένων.



Σχήμα 23 : Δορυφορική φωτογραφία όπου εμφανίζεται με μπλε βέλος η περιοχή στην οποία έγιναν τα πειράματα.

Το πρώτο βήμα που έγινε ήταν η μέτρηση για την εύρεση των αποστάσεων στην συγκεκριμένη περιοχή για να τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η επιλογή της θέσης είναι πολύ σημαντική υπόθεση αφού προτιμάται μια περιοχή που να έχει όσο το δυνατόν λιγότερα εμπόδια. Αυτό βοηθάει καταλυτικά στην ποιότητα των αποτελεσμάτων αφού όσο μικρότερες είναι οι αποκλίσεις των ηλεκτροδίων από την ευθεία γραμμή που έχει χαραχθεί από το μέτρο, τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματα. Επιλέχθηκαν λοιπόν δύο ευθείες γραμμές πάνω στις οποίες θα τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια και θα μπορέσουμε να συνεχίσουμε έτσι την διαδικασία.

Το επόμενο βήμα είναι το κάρφωμα των ηλεκτροδίων, με οδηγό το μέτρο που έχει απλωθεί στο έδαφος. Για την πρώτη τομογραφία ορίστηκε μια απόσταση των 6 μέτρων μεταξύ των ηλεκτροδίων, ενώ για την δεύτερη η απόσταση των ηλεκτροδίων ήταν στα 11 μέτρα. Αυτό σημαίνει ότι στην πρώτη περίπτωση τα ηλεκτρόδια απέχουν μεταξύ τους 6 μέτρα, ενώ στην δεύτερη περίπτωση απέχουν 11 μέτρα. Όταν είναι αδύνατη η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων σε μια ευθεία γραμμή, λόγω παρουσίας ενός μεγάλου θάμνου ή ενός μεγάλου βράχου τότε μπορούμε να παρεκκλίνουμε λίγο από την ευθεία που έχει χαραχθεί. Στην συνέχεια απλώνονται κατά μήκος τα ειδικά καλώδια και παράλληλα γίνεται η σύνδεση τους με τα ηλεκτρόδια. Όταν πλέον τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα στο έδαφος, παίρνουμε τις θέσεις τους αλλά και τις θέσεις των sink holes (των καταβοθρών), με ένα GPS ακριβείας.



Εικόνα 5 : Πλήρες σύστημα εκτέλεσης γεωηλεκτρικής τομογραφίας 48 καναλιών και δωδεκάβολτη μπαταρία.

Αφού ολοκληρωθούν όλες οι συνδέσεις, των καλωδίων με τον καταγραφέα, του καταγραφέα με την μπαταρία και των καλωδίων με τα ηλεκτρόδια, επιλέγεται το είδος της διασκόπησης που θέλουμε να πραγματοποιηθεί και ο αριθμός των ηλεκτροδίων. Στην παρούσα εργασία η διάταξη είναι της μορφής διπόλου – διπόλου. Υστέρα γίνεται έλεγχος εάν η διάταξη έχει συνδεθεί σωστά από τον καταγραφέα. Μπορεί για παράδειγμα να εντοπιστεί εάν κάποιο

ηλεκτρόδιο δεν έχει καρφωθεί σωστά ή αν έχει φύγει από την θέση του. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να βρούμε το "προβληματικό" ηλεκτρόδιο και να το καρφώσουμε καλύτερα στο έδαφος ή να το βρέξουμε με αλατόνερο έτσι ώστε να μας δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Εδώ θα πρέπει να προσθέσουμε ότι ο καταγραφέας έχει δικιά του μπαταρία και απλός ο ρόλος του άλλου συσσωρευτή είναι ενισχυτικός.



Εικόνα 6 : Φωτογραφία από την περιοχή όπου διεξήχθησαν τα πειράματα την στιγμή που η διάταξη της ηλεκτρικής τομογραφίας κατέγραφε τις μετρήσεις.

Τέλος, αφού ολοκληρωθεί ο έλεγχος αρχίζει να γίνεται η ροή του ρεύματος στο έδαφος και η καταγραφή των μετρήσεων (Εικόνα 6). Αυτή η διαδικασία διαρκεί περίπου μια ώρα για κάθε ηλεκτρική τομογραφία (Εικόνα 7). Μόλις τελειώσει η καταγραφή γίνεται εισαγωγή των μετρήσεων σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος τις επεξεργάζεται και έτσι εξάγεται το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής τομογραφίας.



Εικόνα 7 : Έλεγχος λειτουργίας του καταγραφέα και προσδιορισμός του χρόνου ολοκλήρωσης των μετρήσεων.

5. Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

Η επεξεργασία των δεδομένων ξεκινάει με το πρόγραμμα Prosys II. Βλέπουμε με πιο μεγάλη λεπτομέρεια τις αντιστάσεις που μέτρησε το όργανο, την απόκλιση από τις μετρήσεις που πήρε καθώς και το φυσικό δυναμικό. Μας δίνει επίσης πληροφορίες για το τι ρεύμα στείλαμε, τι δυναμικό μετρήσαμε, και επειδή ξέρει τις αποστάσεις, κατευθείαν υπολογίζει τον γεωμετρικό παράγοντα και μας δίνει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση που μέτρησε. Αυτό λοιπόν το κάνει για όλες τις μετρήσεις, αλλά και για κάθε μια από τις δύο τομογραφίες. Μέσα από αυτό το πρόγραμμα κάνουμε και ένα βασικό filtering για να δούμε την ποιότητα των δεδομένων μας. Στην ουσία το πρόγραμμα αυτό μας δίνει μια εικόνα της ψευδοτομής, ενώ τα αποτελέσματα είναι σε apparent resistivity και όχι σε V/I , για να μην χρειαστεί να κάνουμε ξανά τον πολλαπλασιασμό.

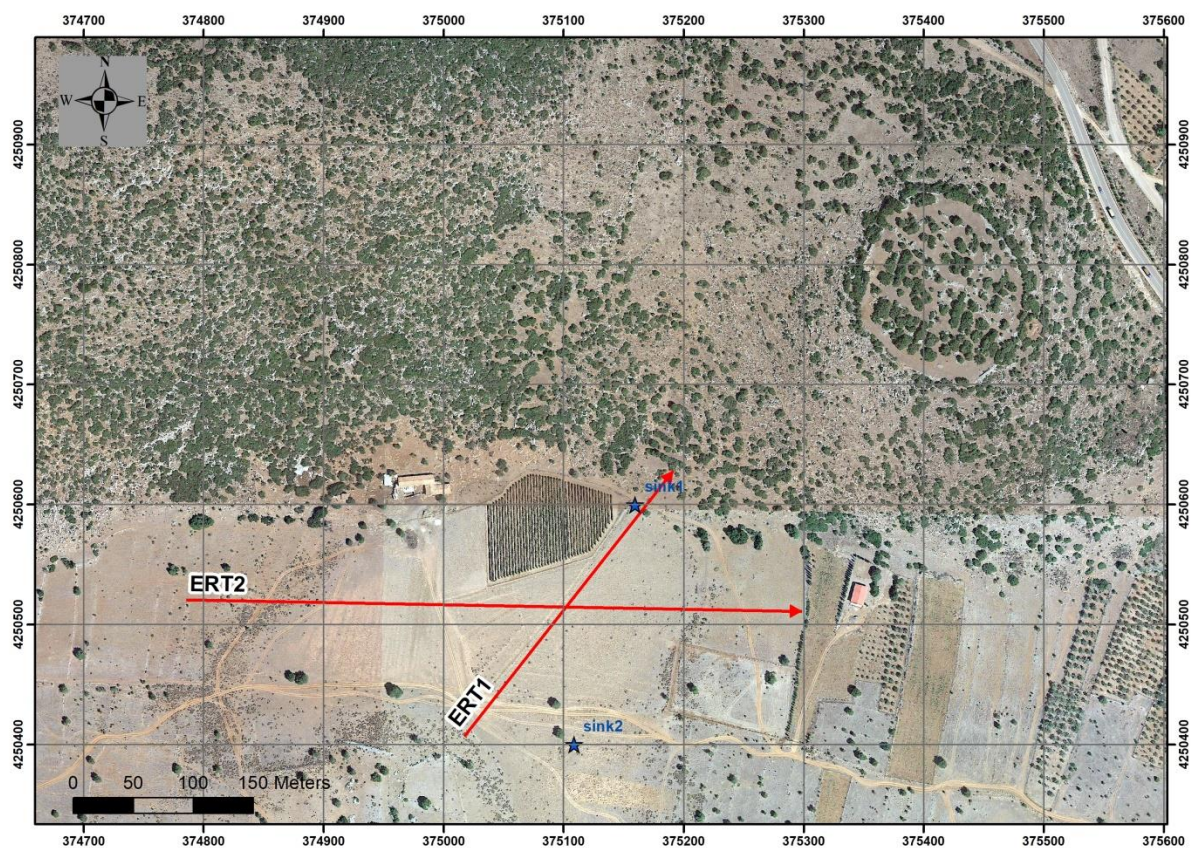
Η διαδικασία της αντιστροφής γίνεται με το πρόγραμμα DC_2dPro. Πλέον τα ηλεκτρόδια έχουν μια ταυτότητα. Μέσα από το πρόγραμμα αυτό βλέπουμε ξεκάθαρα, για κάθε μια από τις ηλεκτρικές τομογραφίες, το συνολικό τους μήκος, τις θέσεις των ηλεκτροδίων άλλα και το βάθος. Το πρόγραμμα ουσιαστικά χωρίζει τον χώρο για τον οποίο θέλουμε να μετρήσουμε αντιστάσεις σε κελιά, και το κάθε ένα από αυτά τα κελιά λέγεται παράμετρος, και μέσα σε κάθε παράμετρο έχει μικρότερα κουτάκια που λέγονται cells. Η διαδικασία της αντιστροφής είναι μια μαθηματική διαδικασία η οποία δεν μας δίνει μοναδικές λύσεις, αλλά άπειρες. Χαρακτηρίζεται από αυτό που λέμε, μη μοναδικότητα της λύσης. Άρα το πρόβλημα είναι μη γραμμικό, και επειδή το πρόγραμμα δεν μπορεί να λύσει μη γραμμικές εξισώσεις, μοιράζει όπως είπαμε τον χώρο σε πολύ μικρά κουτάκια και για κάθε ένα από αυτά λέει ότι ισχύει μια γραμμική εξίσωση. Φτιάχνει λοιπόν ένα σύνολο χιλιάδων γραμμικών εξισώσεων τις οποίες στην συνέχεια λύνει σαν σύστημα. Αυτή η διαδικασία λέγεται αντιστροφή.

Για να το κάνει λοιπόν αυτό χωρίζει τον χώρο σε παραμέτρους και πρέπει να ξεκινήσει από μια αρχική δομή. Ένα αρχικό μοντέλο μπορεί να είναι μια ομογενής Γη ή μια Γη στην οποία ανεβαίνουν οι τιμές της αντίστασης με το βάθος. Το δεύτερο μοντέλο είναι αυτό που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα κατά κανόνα.

Επίσης το πρόγραμμα υπολογίζει τις διαστάσεις που μετρήσαμε, αλλά και μέχρι ποιο βάθος φτάνει η πληροφορία μας. Βέβαια να σημειωθεί πως με το βάθος χάνουμε σε διακριτική ικανότητα, γι' αυτό το πάχος των παραμέτρων αυξάνει καθώς κατεβαίνουμε. Δηλαδή περισσότερος χώρος περιγράφεται από μια τιμή, γιατί οι τιμές που έχω εκεί κάτω είναι λιγότερες από αυτές που έχω πιο κοντά στην επιφάνεια. Επομένως έχω λιγότερη πληροφορία σε αυτές τις περιοχές και για να το χρησιμοποιήσει αυτό, το πρόγραμμα αναγκάζεται να κάνει μεγαλύτερες παραμέτρους.

Αφού λοιπόν γίνουν όλες οι απαραίτητες αλλαγές και διορθώσεις, ξεκινάει η διαδικασία επίλυσης όλων αυτών των εξισώσεων και το πρόγραμμα βγάζει την τελική κατανομή του μοντέλου. Κάνει δηλαδή την αντιστροφή. Ακόμη, μετράει τις συνθετικές τιμές, τις συγκρίνει με τις πραγματικές, και βγάζει τις αποκλίσεις. Όταν από αντιστροφή σε αντιστροφή δεν παρουσιάζεται μεγάλη αλλαγή, τότε σταματάει την διαδικασία και δίνει το τελικό αποτέλεσμα.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων ολοκληρώνεται με ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών που ονομάζεται QGIS. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα με ισχυρές δυνατότητες ψηφιοποίησης δεδομένων χάρτη. Εισάγω σε αυτό, τον γεωλογικό χάρτη Δελφών, τα δεδομένα του GPS (τις θέσεις για κάθε ένα από τα ηλεκτρόδια αλλά και τις θέσεις από τις καταβόθρες), έναν γεωφυσικό χάρτη της περιοχής μελέτης και τέλος τα αποτελέσματα της αντιστροφής και για τις δύο τομογραφίες. Το μόνο που μένει τώρα είναι η ερμηνεία των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 8 : Η ακριβής θέση της περιοχής μελέτης. Με κόκκινο φαίνονται οι ηλεκτρικές τομογραφίες ERT1 και ERT2. Οι θέσεις των καταβοθρών (sink holes 1 και 2) συμβολίζονται με μπλε αστερίσκο. Στα ΒΑ διακρίνεται και ο λόφος Καστρούλι που παρουσιάζει αρχαιολογικό ενδιαφέρον.



Εικόνα 9 : Φωτογραφία μου στο πεδίο με το GPS ακριβείας καθώς καταγράφω τις θέσεις των τελευταίων ηλεκτροδίων της δεύτερης τομογραφίας (ERT2).

Στην (Εικόνα 8) βλέπουμε τις δύο ευθείες γραμμές πάνω στις οποίες τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρόδια. Η πρώτη ηλεκτρική τομογραφία με απόσταση 6m μεταξύ των ηλεκτροδίων συμβολίζεται ως ERT1, ενώ η δεύτερη με απόσταση ηλεκτροδίων 11m συμβολίζεται ως ERT2. Και οι δύο ηλεκτρικές τομογραφίες έχουν από ένα βελάκι με το οποίο υποδεικνύεται η κατεύθυνση τοποθέτησης των ηλεκτροδίων στο ύπαιθρο. Εύκολα λοιπόν εντοπίζουμε που βρίσκεται το πρώτο ηλεκτρόδιο αλλά και το τελευταίο για κάθε μία από τις ηλεκτρικές τομογραφίες ERT1 και ERT2. Επίσης είναι σημειωμένες με αστερίσκο και οι θέσεις των καταβοθρών, μέσα στις οποίες πιθανολογείται πως γινόταν συλλογή νερού και στην συνέχεια χρήση του από τους κατοίκους του οικισμού στον λόφο Καστρούλι. Η καταγραφή των θέσεων των ηλεκτροδίων αλλά και των καταβοθρών έγινε με GPS ακριβείας (Εικόνα 9).

Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 10) είναι κυκλωμένες οι θέσεις των δύο καταβοθρών (sink holes). Η πρώτη (sink1) (Εικόνα 11) είναι βόρεια και πιο κοντά στην πρώτη τομογραφία (ERT1) ενώ η δεύτερη (sink2) (Εικόνες 12 και 13) είναι πιο νότια και πιο κοντά στην δεύτερη τομογραφία (ERT2). Στο σημείο αυτό να πούμε πως καταβόθρα ονομάζεται ο φυσικός σχηματισμός σε μορφή αγωγού ο οποίος καταλήγει σε άνοιγμα στο έδαφος, από τον οποίο διέρχεται νερό.

Μια καταβόθρα μπορεί να είναι μικρή σε μέγεθος, όπως ακριβώς συμβαίνει και με τις καταβόθρες που μελετάμε. Τέλος, σχηματίζονται από τη διάβρωση που δημιουργεί η ροή υπόγειων υδάτων συνήθως σε ασβεστολιθικά πετρώματα.



Εικόνα 10 : Μέσα σε κόκκινο κύκλο φαίνονται οι θέσεις των δύο καταβοθρών.

Το ζητούμενο στην παρούσα εργασία είναι εάν στην περιοχή μελέτης υπήρξε μια παλιά λεκάνη και πως αυτή λειτούργησε. Ερωτήματα δημιουργούνται και για τον τρόπο λειτουργίας των δύο καταβοθρών. Οι εικόνες της αντιστροφής που έγιναν για τις δύο τομογραφίες, και που αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο, θα μας δώσουν πληροφορίες για την δομή του υπεδάφους και θα δώσουν απαντήσεις σε αυτά τα ερωτήματα.



Εικόνα 11 : Φωτογραφία από την καταβόθρα που βρίσκεται στο βόρειο κομμάτι την περιοχής ερευνών (sink1).



Εικόνες 12 και 13 : Φωτογραφίες από την καταβόθρα που βρίσκεται στο νότιο κομμάτι της περιοχής ερευνών (sink2).

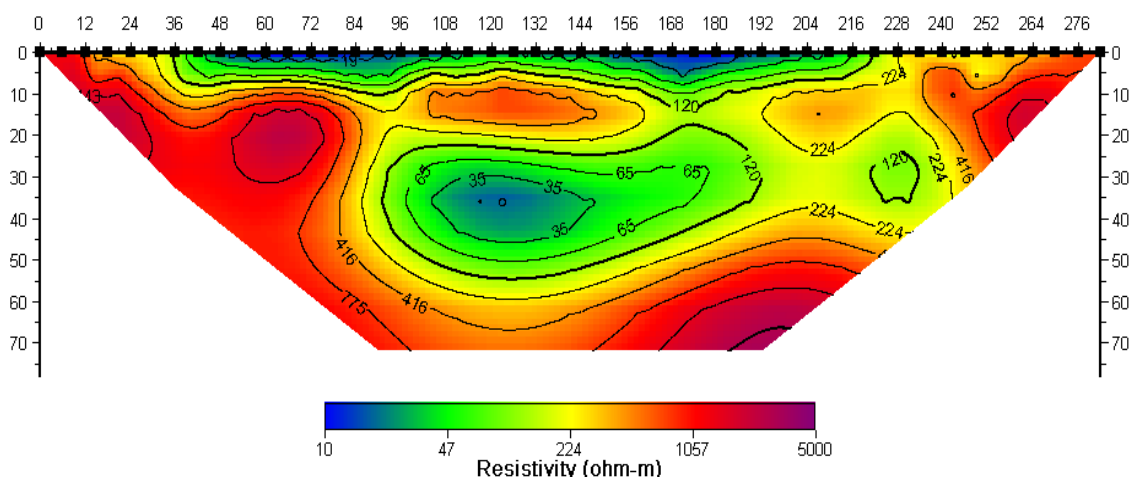
5.1 Κατανομή της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης και Ερμηνεία

Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων πάρθηκαν κάποιες μετρήσεις και η επεξεργασία των μετρήσεων έβγαλε τα εξής αποτελέσματα.

Στα σχήματα 24 και 25 βλέπουμε τις διαφορετικές τιμές της ειδικής αντίστασης με διαφορετικό χρώμα. Η λογαριθμική κλίμακα της ειδικής αντίστασης είναι σε $\Omega m \cdot m$ και φαίνεται παρακάτω. Με μπλε χρώμα φαίνονται οι περιοχές για τις οποίες οι τιμές της ειδικής αντιστάσεις είναι χαμηλές. Οι μικρές αντιστάσεις γεωλογικά μεταφράζονται ως χαλαρά ιζήματα και αργιλικά υλικά. Βλέπουμε ξεκάθαρα ότι τέτοιες περιοχές και στις δύο τομές είναι αυτές που είναι στην επιφάνεια του εδάφους, λόγω του κορεσμού από τις βροχοπτώσεις. Δηλαδή έχουμε χαμηλή ειδική αντίσταση και κατά συνέπεια μεγάλη αγωγιμότητα. Με κόκκινο χρώμα φαίνονται οι περιοχές για τις οποίες οι ειδική αντίσταση είναι πολύ μεγάλη. Οι μεγάλες αντιστάσεις παραπέμπουν σε βραχώδεις, συμπαγείς σχηματισμούς. Σε αυτή την περίπτωση η ειδική αντίσταση είναι πολύ μεγάλη και η αγωγιμότητα σχεδόν μηδενική.

Στην πρώτη τομή χρησιμοποιήθηκαν 48 ηλεκτρόδια με 6m απόσταση μεταξύ τους και έτσι η τομογραφία αυτή (ERT1) έχει συνολικό μήκος 282m. Όπως φαίνεται και στο (Σχήμα 24), στα πρώτα 6m έχουμε αγωγή, χαλαρά, αργιλικά υλικά, ίσως διαβρωμένα υλικά από τον ασβεστόλιθο. Στα 60m μήκος ο ασβεστόλιθος βυθίζεται περίπου μέχρι τα 35m βάθος. Ο γεωλογικός χάρτης δεν θα δίνει πληροφορίες για κάποιο ρήγμα ή για κάποιον δευτερογενή βωξίτη που θα μπορούσε να δώσει εξήγηση σε αυτό το γεγονός. Η λεκάνη ξεκινάει κάπου

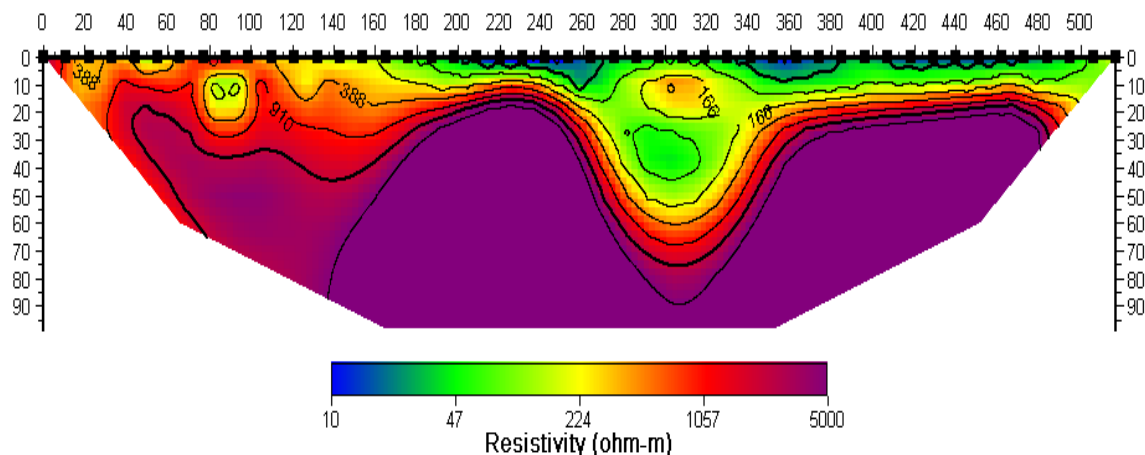
κοντά στα 96m και τελειώνει στα 156m, ενώ φαίνεται να φτάνει μέχρι το βάθος των 40m. Όπως είπαμε και προηγουμένως, στα πρώτα 5 με 6 μέτρα έχουμε αγώγιμα υλικά τα οποία είναι πιο λεπτομερή και στεγνά, ενώ από κάτω υπάρχει ένα αντιστατικό κάλυμμα στο οποίο πιθανότατα υπάρχει υδροφορία. Η ύπαρξη της καταβόθρας μπορεί να συνδέεται με αυτό το υδροφόρο στρώμα, αλλά οι μετρήσεις μας είναι λίγες και ίσως μια γεώτρηση μας έδινε περισσότερες πληροφορίες.



Σχήμα 24 : Ψευδοτομή 1 για την πρώτη ηλεκτρική τομογραφία (ERT1).

Υπάρχει μια βύθιση συνολικά σε όλη την περιοχή, στις θέσεις όμως των καταβοθρών βλέπουμε κάτι άλλο. Μέσω παρατήρησης στο ύπαιθρο, μπορούμε με σιγουριά να πούμε πως οι καταβόθρες βρίσκονται σε ελαφρώς μεγαλύτερο υψόμετρο σε σχέση με την λεκάνη. Πιθανά να επηρεάζεται αυτό, ακριβώς από την ύπαρξη της ζώνης μέσα στην οποία συσσωρεύονται αγώγιμα υλικά.

Στην δεύτερη τομή (Σχήμα 25) διακρίνουμε και πάλι την λεκάνη η οποία ξεκάθαρα φαίνεται να φτάνει μέχρι το βάθος των 40m. Να πούμε βέβαια ότι και σε αυτή την τομή χρησιμοποιήθηκαν 48 ηλεκτρόδια όμως αυτή την φορά με 11m απόσταση μεταξύ τους και έτσι η δεύτερη τομογραφία (ERT2) έχει συνολικό μήκος 517m. Η λεκάνη λοιπόν φαίνεται να ξεκινάει από το 260m και φτάνει μέχρι το 340 – 350m μήκος. Και εδώ στα πρώτα μέτρα βλέπουμε τα αγώγιμα, χαλαρά υλικά ενώ πιο βαθιά πιθανολογείται η ύπαρξη ενός αντιστατικού, υδροφόρου καλύμματος.



Σχήμα 25 : Ψευδοτομή 2 για την δεύτερη ηλεκτρική τομογραφία (ERT2).

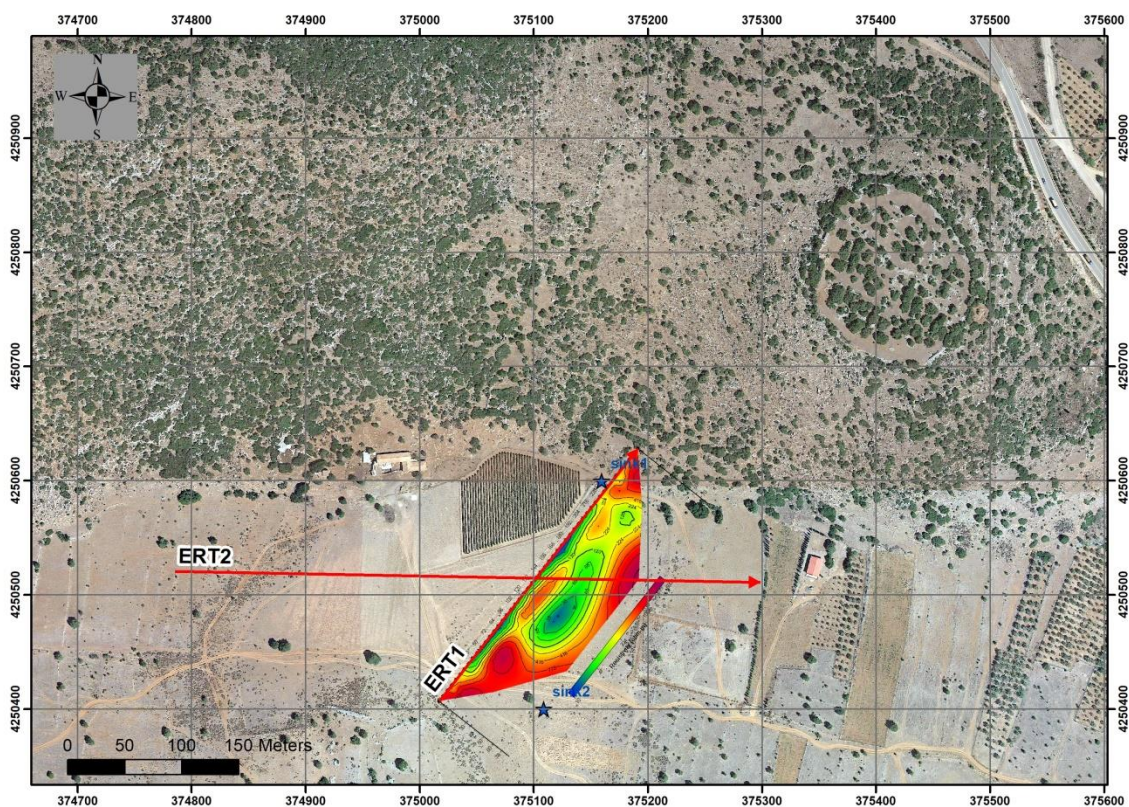
6. Συμπεράσματα

Μετά από όλα αυτά τα δεδομένα μπορούμε με σιγουριά να πούμε πως στην περιοχή μελέτης λειτούργησε μια λεκάνη με συνολικό μήκος κοντά στα 100m και βάθος κάπου μεταξύ 40 και 50 m. Πρόκειται λοιπόν για μια μικρή λεκάνη, με δύο καταβόθρες κοντά της, οι οποίες στραγγίζουν το νερό. Εάν όμως η βροχόπτωση είναι αυξημένη ίσως να μην μπορούν γρήγορα να την αποστραγγίσουν.

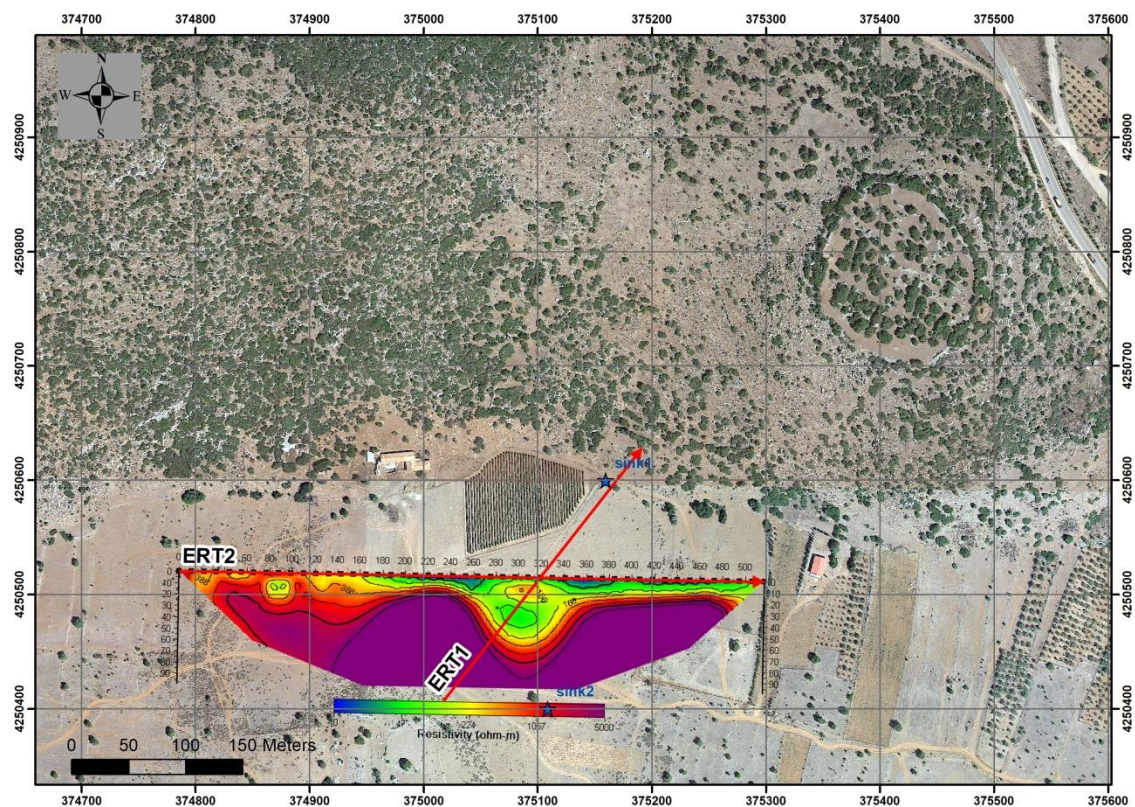
Τέλος, πιθανολογούμε ότι λειτουργούσε ένα σπήλαιο στην περιοχή, το οποίο ίσως από την δράση κάποιου ρήγματος κατέρρευσε, έκανε αυτή την κοιλότητα και συσσωρεύτηκαν τα υλικά. Και πάλι όμως, μόνο η ύπαρξη κάποιου ρήγματος θα μπορούσε να εξηγήσει την σπηλαιώση. Οτι δηλαδή το νερό βρήκε δρόμο, και δημιούργησε το σπήλαιο. Τέτοια όμως πληροφορία δεν μας δίνεται από την γεωλογία της περιοχής.

7. Οι Γεωηλεκτρικές Τομογραφίες στον Χώρο

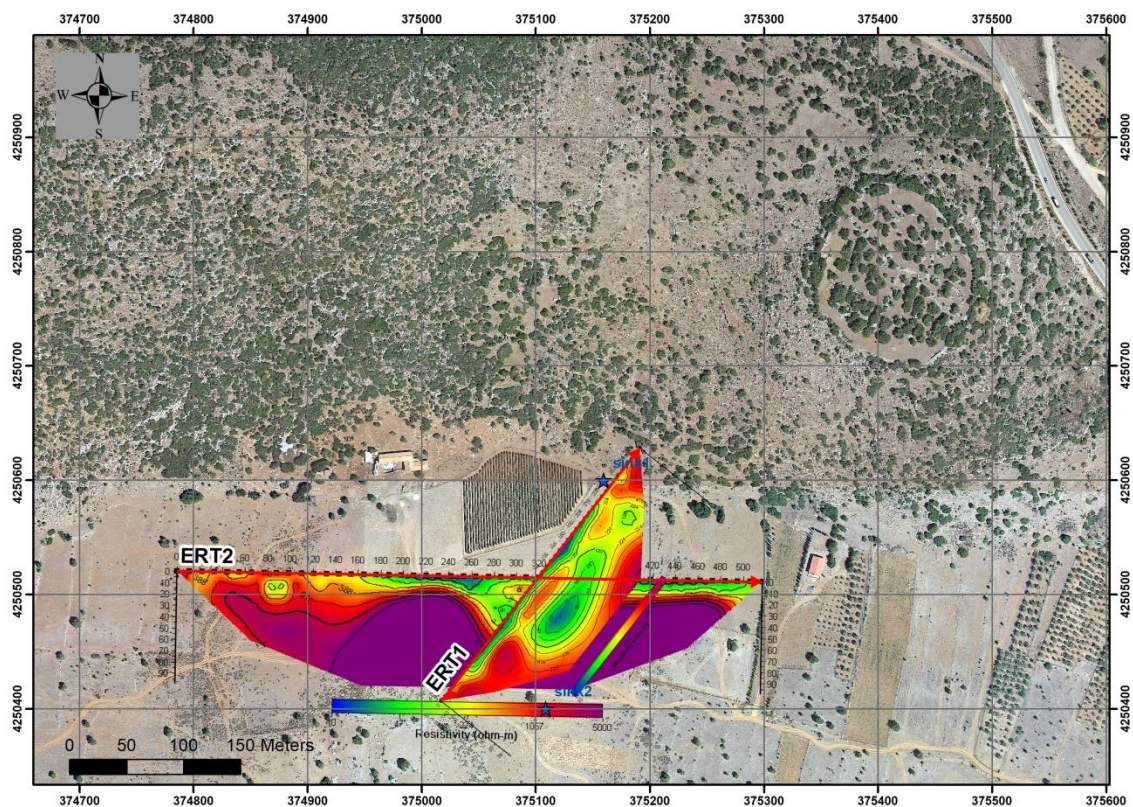
Στις εικόνες που ακολουθούν βλέπουμε τις ηλεκτρικές τομογραφίες στην περιοχή έρευνας. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα της πρώτης ηλεκτρικής τομογραφίας (Εικόνα 14), της δεύτερης (Εικόνα 15), αλλά και των δύο μαζί (Εικόνα 16).



Εικόνα 14 : Τα αποτελέσματα της πρώτης ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT1) στην περιοχή μελέτης.



Εικόνα 15 : Τα αποτελέσματα της δεύτερης ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT2) στην περιοχή μελέτης.



Εικόνα 16 : Τα αποτελέσματα και των δύο ηλεκτρικών τομογραφιών (ERT1 και ERT2) στην περιοχή μελέτης.

8.1 Διεθνής Βιβλιογραφία

Barker, D. R., (1992), *A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface*.

Boyd, M. T., (1999), *Introduction to Geophysical Exploration*.

Edwards, T. J., and Hillel, J. A., (1977), *The electrical resistivity of G. P. Zones*.

Papadopoulos, G. N., Tsourlos, P., Tsokas, N. G., Sarris, A., (2006), *Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation*.

Peucat, J. J., Bernard-Griffiths, J., Gillbarguchi, I. J., Dallmeyer, D. R., Menot, P. R., Cornichet, J., Iglesias, M., (1990), *Geochemical and geochronological cross section of the deep Variscan crust: The Cabo Ortegal high-pressure nappe (northwestern Spain)*.

Saito, H., Shima, H., Toshioka, T., Kaino, S., and Ohtomo, H., (1990), "A Case Study of Geotomography Applied to a Detailed Investigation of a Highway Bridge Foundation," in *Geophysical Applications for Geotechnical Investigations*, ed. F. Paillet and W. Saunders (West Conshohocken, PA: ASTM International, 1990), 17-34.

Sarris, A., and Jones, R., (2000), *Geophysical and related techniques applied to archeological survey in the Mediterranean: A review*, *Journal of Mediterranean Archeology* 13(1): 3-75.

Shima, H., (1992), *2-D and 3-D resistivity image reconstruction using crosshole data*.

Sideris, A., Liritzis, I., Liss B., Howland, D. M., Levy, E. T., (2017), *At-risk cultural heritage: New excavations and finds from the Mycenaean site of Kastrouli, Phokis, Greece*, *Mediterranean Archeology and Archeometry*, Greece.

Sideris, A., Liritzis, I., (2018), *The Mycenaean site of Kastrouli, Phokis, Greece: Secon excavation season, July 2017*, *Mediterranean Archeology and Archeometry*, Greece.

Szymanski, E. J., and Tsourlos, P., (1993), *Inversion of geophysical data sets arising from electrical resistivity tomography*, *European Association of Geoscientists & Engineers*.

Tripp, A. C., Hohmann, G. W., and Swift, C. M., (1984), *Two-dimensional resistivity inversion*.

Tsourlos, P., (1995), *Modelling interpretation and inversion of multielectrode resistivity survey data*. Unpublished PhD thesis, University of York. 19. Stepisnik, U. (2008).

Tsourlos, I. P., Szymanski, E. J., Tsokas, N. G., (1999), *The effect of terrain topography on commonly used resistivity arrays*.

8.2 Ελληνική Βιβλιογραφία

Καραϊνδρου, Ε. Ι., Τρικούζας, Δ., Φαρέας, Κ., (2010), *Διερεύνηση Περιβαλλοντικών Θεμάτων Νομού Φωκίδας*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας - Τμήμα Ανατολικής Στερεάς, Λαμία.

Λυριτζής, Ι., (2008), *Νέες Τεχνολογίες στις Αρχαιολογικές Επιστήμες*, Gutenberg, Αθήνα.

Λυριτζής, Ι., (2005), *Φυσικές Επιστήμες στην Αρχαιολογία*. Τυπωθήτω – Γιώργος Δαρδανός, 2^η έκδοση, Αθήνα.

Μουντράκης, Μ. Δ, (2010), *Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας*, University Studio Press, Θεσσαλονίκη.

Παπαζάχος, Κ. Β., (1996), *Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Τσόκας, Γ., Βαργεμέζης, Γ., Τσούρλος, Π., Δρούρου, Σ., και Σαλτσόγλου, Πάλια, Δελή, Χ., (2006), *Αρχαιολογία και Γεωφυσική. Εξερευνώντας τον Αρχαιολογικό Χώρο της Βεργίνας (1984-2004)*, University Studio Press, Θεσσαλονίκη.

8.3 Ιστοσελίδες

Map of Desfina, Fokida, Central Greece, Greece, (2005 – 2021), https://www.travel-greece.org/greece.php?loc1=central_greece&loc2=fokida&loc3=desfina&pagetype=map

Γεωδυναμική και Γεωτεκτονική Εξέλιξη του Αλπικού Συστήματος στον Ελληνικό Χώρο, <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg871y/ch3.htm>

Γεωφυσικές μέθοδοι διασκόπησης: Από τον εντοπισμό και την απεικόνιση θαμμένων αρχαιοτήτων ως τη συνεισφορά στην προστασία και συντήρηση των μνημείων, http://www.academy.edu.gr/files/08_el.pdf

Εισαγωγή στην Γεωφυσική, <http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp319y/htm/lessons.htm>



Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών, Γεωφυσικές Διασκοπήσεις, (2018),
<https://ims.forth.gr/el/page/view?id=50>

Καταβόθρα, (2020),
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9ACE%B1%CF%84%CE%B1%CE%B2%CF%8C%CE%B8%CF%81%CE%B1>

Κωπαΐδα, (2021),
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9ACE%89%CF%80%CE%B1%CE%90%CE%B4%CE%B1>

Πανεπιστημιακή Ανασκαφή, Κυβερνοαρχαιολογία στο Καστρούλι, Δεσφίνα (Δελφοί, Φωκίδας),
(2016 – 2020), <http://archsci.aegean.gr/index.php/excavation/>