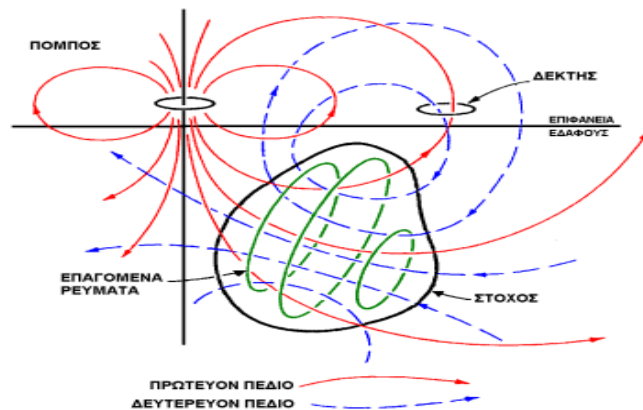


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Γεωργία ακριβείας και μελέτη χαρακτηριστικών
εδάφους»



Του φοιτητή

Παύλου Ποτόλια

518120

Επιβλέπων

Δρ. Τσιακμάκης Κυριάκος

Ιούνιος 2025

Τίτλος Δ.Ε. Γεωργία ακριβείας και μελέτη χαρακτηριστικών εδάφους
Κωδικός Δ.Ε. 24305
Ονοματεπώνυμο φοιτητή Παύλος Ποτόλιας
Ονοματεπώνυμο εισηγητή Τσιακμάκης Κυριάκος
Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε 31-10-2024
Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 31-5-2025

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Ποτόλια Παύλου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Στους φίλους μου, για τη σταθερή και ανιδιοτελή στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου ,στην οικογένεια μου και στον Bombardino Crocodilo, για την πολύτιμη ψυχολογική υποστήριξη που μου προσέφερε στις δύσκολες στιγμές αυτής της εργασίας.»

Πρόλογος

Διάλεξα αυτή τη διπλωματική εργασία επειδή με ενδιέφερε να συνδυάσω θεωρητική φυσική, ηλεκτρομαγνητισμό και πρακτική εφαρμογή σε ένα πραγματικό πρόβλημα μέτρησης στο έδαφος. Η μελέτη και κατασκευή ενός τέτοιου εργαλείου για την επαγωγική μέτρηση της αγωγιμότητας εδάφους μου έδωσε την ευκαιρία να εμβαθύνω σε ένα διαφορετικό στοιχείο γνώσης που προς το τέλος αυτού του ταξιδιού κατάλαβα ότι είναι υπερβολικά ενδιαφέρον. Παράλληλα, έπρεπε να αντιμετωπίσω τεχνικές προκλήσεις, όπως η σταθερή ενίσχυση πολύ μικρών σημάτων χωρίς παραμόρφωση της φάσης, και να επιλέξω κατάλληλες συχνότητες ώστε το σύστημα να ανταποκρίνεται με ακρίβεια. Επιπλέον, το πεδίο της γεωφυσικής μέτρησης έχει σημαντικές εφαρμογές στη γεωργία, στην περιβαλλοντική παρακολούθηση και στη χαρτογράφηση εδαφών. Το γεγονός ότι μπορούσα να κατασκευάσω ο ίδιος την πειραματική διάταξη, να σχεδιάσω πηνία, να μετρήσω φάση και πλάτος και να υπολογίσω αγωγιμότητα βάσει αυτών, έκανε τη διαδικασία ουσιαστική, δημιουργική και εκπαιδευτική. Θεωρώ ότι η εργασία αυτή συνδυάζει ιδανικά τη φυσική, την ηλεκτρονική και την πειραματική προσέγγιση, και με βοήθησε να αποκτήσω βαθύτερη κατανόηση του τρόπου που τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία αλληλοεπιδρούν με την ύλη.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στο ευρύτερο πεδίο της γεωργίας ακριβείας καθώς και γεωφυσικής και έχει ως στόχο τη μελέτη και κατασκευή συστήματος για την εκτίμηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των χωμάτων μέσω επαγωγικής μεθόδου. Η αγωγιμότητα αποτελεί σημαντική παράμετρο, καθώς σχετίζεται άμεσα με την περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία και άλατα, επηρεάζοντας την ανάπτυξη των καλλιεργειών και τη βέλτιστη διαχείριση άρδευσης και λίπανσης. Η μέθοδος που εφαρμόζεται βασίζεται στη χρήση δύο πηνίων ενός πομπού (Tx) και ενός δέκτη (Rx) για τη δημιουργία και ανίχνευση μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου χωρίς την ανάγκη άμεσης επαφής με το έδαφος. Το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας στηρίζεται στις φυσικομαθηματικές εξισώσεις του Maxwell και στην ανάλυση του αριθμού επαγωγής καθώς και στα μοντέλα του McNeill, ο οποίος καθορίζει τη σχέση μεταξύ βάθους διείσδυσης και γεωμετρικών παραμέτρων του συστήματος. Επιπλέον Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μελέτη του φαινομένου του skin effect και πως συνδέεται με το πλάτος και της φάση του σήματος ώστε να βρεθεί η φαινόμενη αγωγιμότητα. Στην πειραματική προσέγγιση, κατασκευάστηκε σύστημα μέτρησης 2 πηνίων, με στόχο την ανίχνευση των μαγνητικών ρευμάτων συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με ένα εμπορικό εργαλείο της αγοράς που με διαφορετικό τρόπο βρίσκει την αγωγιμότητα. Η εργασία συνδυάζει θεωρητική και πρακτική προσέγγιση, με στόχο την ανάπτυξη ενός χαμηλού κόστους φορητού αισθητήρα, κατάλληλου για εφαρμογές πεδίου. Βοηθάει στην ενίσχυση της αγροκαλλιέργειας ώστε να έχουμε πιο ακριβές μετρήσεις ώστε το να μπορούμε να έχουμε ένα πιο βιώσιμο έδαφος και να ξέρουμε σε πιο κομμάτι της γης είναι καλύτερο για να φυτέψουμε τα φυτά μας.

«Precision Agriculture and Soil Properties Analysis»

«Pavlos Potolias»

Abstract

This thesis is part of the broader field of precision agriculture and geophysics and aims to study and build a system for estimating the electrical energy of soils through an inductive method. Conductivity is an important parameter as it is directly related to the sensitivity of the soil to moisture and others, affecting the development of crops and the management of irrigation and fertilization. The method created is based on the use of two coils of a transmitter (Tx) and a receiver (Rx) for and detection of a changing magnetic field without the need for direct contact with the soil. The theoretical background of the work is based on Maxwell's mathematical explanations and the analysis of the induction number as well as McNeill's models, which determines the relationship between penetration depth and geometric parameters of the system. In addition, special emphasis is given to the study of the skin effect phenomenon and how it is linked to the amplitude and phase of the signal in order to find the apparent conductivity. In the experimental approach, a 2-coil measurement system was constructed, aiming to detect magnetic currents, comparing the results with a commercial tool on the market that finds conductivity in a different way. The work combines the practical and practical approach, aiming to develop a low-cost portable sensor, suitable for field applications. It helps to enhance agriculture so that we have more accurate measurements so that we can have a more sustainable soil and know in which part of the earth it is better to plant our plants.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κυριάκο Τσιακμάκη, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την υποστήριξη και το ενδιαφέρον που έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αργύριο Χατζόπουλο για τις χρήσιμες παρατηρήσεις, τις τεχνικές συμβουλές και την πρόθυμη βοήθειά του σε κρίσιμα στάδια του πειραματικού σκέλους της εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους φίλους μου, Κουνατίδη Γ. και Κουφωγιώργο Β, οι οποίοι με τις ιδέες τους και τη διάθεσή τους για συζήτηση συνέβαλαν ουσιαστικά στην πρόοδό μου και στην αντιμετώπιση τεχνικών και θεωρητικών δυσκολιών κατά τη διάρκεια της εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους καθηγητές της Γεωλογίας για τη χρήσιμη βοήθεια που μου παρείχαν, προσφέροντάς μου πολύτιμες γνώσεις και πρακτικές συμβουλές σχετικά με τον σωστό τρόπο χρήσης γεωφυσικών εργαλείων μέτρησης, καθώς και για τα χρήσιμα "tips" που με βοήθησαν να βελτιώσω τη μεθοδολογία μου. Ευχαριστώ επίσης τον Dr. Dorijan Špikić για τις χρήσιμες πληροφορίες και την καθοδήγηση που μου προσέφερε, οι οποίες συνέβαλαν ουσιαστικά στην κατανόηση θεωρητικών και πειραματικών ζητημάτων που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της μελέτης. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου για την αδιάκοπη στήριξη, την υπομονή και την ενθάρρυνσή της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη.....	vi
Abstract	vii
Ευχαριστίες	viii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xii
Κατάλογος Πινάκων.....	xiii
Συνομογραφίες.....	xiv
Εισαγωγή.....	15
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή στα είδη εδάφους	16
1.1 Εισαγωγή στο έδαφος και τα χαρακτηριστικά του.....	16
1.2 Εισαγωγή στο Unified Soil Classification System (USCS)	16
1.2.1 Αμμόδες έδαφος.....	17
1.2.2 Ιλυώδη Εδάφη (Silt Soils)	18
1.2.3 αργιλώδη εδάφη (clay soils).....	18
1.2.4 Πηλώδη Εδάφη (Loamy Soils).....	19
1.3 Φυσικές ιδιοτητες του εδαφους.....	20
1.3.1 Υφή του εδάφους.....	20
1.3.2 Δομή του Εδάφους.....	20
1.3.3 Πορώδες και Υδατοδιαπερατότητα	21
1.3.4 Θερμοκρασία εδάφους.....	21
1.3.5 Χημικές Ιδιότητες του Εδάφους	22
1.3.6 pH του Εδάφους	23
1.3.7 Θρεπτικά συστατικά	23
1.4 Ηλεκτρική αγωγιμότητα.....	24

1.4.1	Ηλεκτρική Διαπερατότητα και Σχέση με την Αγωγιμότητα	24
1.4.2	Αλατότητα	25
1.5	Μαγνητικής Επιδεκτικότητα	25
Κεφάλαιο 2ο: Μεθοδολογίες		26
2.1	Εισαγωγή.....	26
2.2	Μέθοδος Wenner.....	26
2.3	Μέθοδος FDR (Frequency Domain Reflectometry)[25].....	27
2.4	Μέθοδος TDR (Time Domain Reflectometry)[26]	28
2.5	Η επαγωγική Μέθοδος	29
2.5.1	Χρήσεις της επαγωγικής μεθόδου	29
2.5.2	Τεχνικές Διαφορές.....	31
2.5.3	Διαφορές Συχνότητας Λειτουργίας	31
Κεφάλαιο 3ο: Γεωφυσική		32
3.1	Μοντέλο του McNeill	32
3.1.1	Μαθηματική μοντελοποίηση	32
3.2	Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία στο Έδαφος	32
3.3	Επαγόμενα ρεύματα (eddy currents)	34
3.4	Βάθος διείσδυσης (Skin Depth)	35
3.5	Περιορισμοί και Όρια Εφαρμογής της Επαγωγικής Μεθόδου.....	36
3.6	In phase, quadrature component.....	36
3.7	Μέτρηση της αγωγιμότητας	37
Κεφάλαιο 4ο: Υλοποίηση		38
4.1	Υλοποίηση Πηγών	39
4.2	Κατανομή ευαισθησίας	41
4.2.1	κάθετη διάταξη πηγών (vertical dipole)	42
4.2.2	οριζόντια διάταξη πηγών (horizontal dipole)[1]	42
4.3	Αθροιστική απόκριση $R(z)$ [1].....	42
4.3.1	Για κάθετη διάταξη.....	42

4.3.2	Για οριζόντια διάταξη [1]	43
4.4	Αποτέλεσμα Κατανομής ευαισθησίας.....	43
4.4.1	Παράδειγμα με διαφορετικές αποστάσεις πηνίων	44
Κεφάλαιο 5ο:	Πειραματική εφαρμογή.....	46
5.1	Υλικά και Πειραματικές Συνθήκες.....	46
5.2	Χώμα ‘Πεύκα διπλανό’	48
5.2.1	Μετρήσεις εργαλείου αναφοράς.....	50
5.2.2	Μετρήσεις με το εργαλείο αγωγιμότητας.....	51
5.2.3	Τυπική απόκλιση	54
5.2.4	Χώμα ‘Πλαγιάρι’	54
5.2.5	Χώμα ‘φυτόχωμα ΒΙΟΦΥΤ’	58
5.3	Συμπεράσματα μετρήσεων.....	65
Κεφάλαιο 6ο:	Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης	67
6.1	Ηλεκτρονικό κύκλωμα	67
6.1.1	Ενδεικτικό κύκλωμα.....	67
6.2	Πειραματικές διαδικασίες	68
6.3	Σχεδιαστικές βελτιώσεις.....	68
Bibliography	69
Παράρτημα Α	71

Κατάλογος Σχημάτων

1.2.1.1 Σωματίδια άμμου.[17]	18
Σχήμα 1.2.2.1 Σωματίδια ιλύς.[17]	18
Σχήμα 1.2.3.1 Σωματίδια αργίλου[17]	19
Σχήμα 1.2.4.1 Σωματίδια πηλώδες εδάφους.[17].....	19
Σχήμα 1.4.2.1 FDR αισθητήρας.[25]	27
Σχήμα 1.4.2.1 TDR αισθητήρας Acclima TDR-315L.....	28
Σχήμα 1.4.2.1 Αρχές ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (Telford et al., 1990).	29
3.1.1.1 Νόμος του Snell Διάθλαση, κρίσιμη γωνία και ολική εσωτερική ανάκλαση σε μια διεπαφή [30]	33
Σχήμα 3.1.1.2Επαγόμενη ροή ρεύματος (ομογενές μισό διάστημα) [9]	34
Σχήμα 3.1.1.1 Πλαϊνή εικόνα πηνίου	39
Σχήμα 3.1.1.2 Πηνίο κάτω μέρος.....	40
Σχήμα 3.1.1.3 Πηνίο με τις σπείρες του	40
Σχήμα 3.1.1.4 Πάνω μεριά	40
Σχήμα 3.1.1.5 Τελική κατασκευή.....	41
Βάθος (cm)	
Σχήμα 4.3.2.1 Κατανομή ευαισθησίας της κατασκευής μου με S =25cm	43
Σχήμα 4.3.2.2 Αθροιστική συνεισφορά βάθους.....	44
Σχήμα 4.4.1.1 Απιονισμένο νερό	47
Σχήμα 4.4.1.2 Συσκευή μέτρησης υγρασίας	47
Σχήμα 4.4.1.3 Τσιμπίδα εξωτερικό μέρος της συνολικής συσκευής	48
Σχήμα 4.4.1.1 Χώμα ‘Πεύκα διπλανό’	48
Σχήμα 4.4.1.2 Δοκιμή τεστ χωρίς κίνδυνο θορύβου από μέταλλά.....	49
5.2.5.1 Χώμα ΒΙΟΦΥΤ	59
5.2.5.2 Χώμα στο δοχείο	59
Σχήμα 5.2.5.3 Μέτρηση στον αέρα ξανά	60
Σχήμα 5.2.5.4 Μέτρηση στον αέρα.....	61

Σχήμα 5.2.5.5 Μέτρηση στο χώμα VCP	62
Σχήμα 5.2.5.6 μέτρηση στο χώμα VCP.....	62
Σχήμα 5.2.5.2.5.5.7 Μέτρηση στο υγρό χώμα VCP.....	64
Σχήμα 6.1.1.1 Ενδεικτικό κύκλωμα	67

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.2.1 Έιδη εδάφους	17
Πίνακας 1.2.2 Κατάσταση εδάφους	17
Πίνακας 5.2.1 Μετρήσεις αναφοράς 'Πεύκα διπλανό'	51
Πίνακας 5.2.2 Μετρήσεις για πεύκα διπλανό με τον αισθητήρα αγωγιμότητας στον αέρα	51
Πίνακας 5.2.3 Μετρήσεις για πεύκα διπλανό με το εργαλείο στο στεγνό χώμα.....	51
Πίνακας 5.2.4	55
Πίνακας 5.2.5 Μετρήσεις για Πλαγιάρι με τον αισθητήρα αγωγιμότητας στο ΥΧ.....	58

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
Η.Μ.	Ηλεκτρομαγνητικό
Ε.Μ.	ElectroMagnetic
ΣΧ	Στεγνό Χώμα
ΥΧ	Υγρό Χώμα

Εισαγωγή

Η μελέτη και καταγραφή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους αποτελεί ένα κρίσιμο εργαλείο για εφαρμογές όπως η γεωργία ακριβείας, η περιβαλλοντική παρακολούθηση, η γεωτεχνική έρευνα και η υδρογεωλογία. Η αγωγιμότητα σχετίζεται άμεσα με ιδιότητες του εδάφους όπως η περιεκτικότητα σε νερό, η συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων, η θερμοκρασία και η υφή, καθιστώντας την ιδιαίτερα χρήσιμη για την κατανόηση της κατάστασης και της δομής του υπεδάφους.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην ανάπτυξη ενός αισθητήρα αγωγιμότητας που βασίζεται στην **επαγωγική μέθοδο**, δηλαδή χωρίς άμεση επαφή με το έδαφος, αξιοποιώντας το φαινόμενο των **επαγόμενων ρευμάτων (eddy currents)**. Το σύστημα αποτελείται από ένα **πηνίο εκπομπής (Tx)** και **πηνίο λήψης (Rx)**, τα οποία ανιχνεύουν τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου που προκαλούνται από τις αγώγιμες ιδιότητες του εδάφους. Η επιλογή της συχνότητας του αισθητήρα είναι περίπου στα **1 MHz**, ενώ η επιλογή των γεωμετρικών πηνίων, της συχνότητας και της μεταξύ τους απόστασης έγινε με γνώμονα τη πρακτικότητα και την βέλτιστη διείσδυση του μαγνητικού πεδίου και την ακρίβεια των μετρήσεων. Η διαφορά φάσης και πλάτους των σημάτων στα πηνία λήψης αξιοποιείται για την εκτίμηση της αγωγιμότητας του εδάφους, μέσω κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων και πειραματικής βαθμονόμησης με την χρήση παλμογράφου και γεννήτριας. Στόχος της εργασίας είναι τόσο η **κατασκευή και λειτουργική αξιολόγηση** του αισθητήρα, όσο και η **ανάπτυξη μεθοδολογίας υπολογισμού της ηλεκτρικής αγωγιμότητας** με βάση τις ηλεκτρομαγνητικές αρχές. Η τελική υλοποίηση θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση για φορητές, μη καταστροφικές συσκευές μέτρησης πεδίου σε εφαρμογές πραγματικού κόσμου. Στο **Κεφάλαιο 1ο** παρουσιάζονται τα διάφορα είδη εδαφών που μπορεί να συναντήσει κανείς και εξηγώ γιατί είναι σημαντικά όταν μιλάμε για μετρήσεις αγωγιμότητας. Κάθε χώμα έχει τα δικά του χαρακτηριστικά, όπως το πόσο νερό ή άλατα κρατάει, και αυτό παίζει ρόλο στο πώς επηρεάζει τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που χρησιμοποιούμε στις μετρήσεις.

Στο **Κεφάλαιο 2ο** Εξηγούνται τι είναι το σύστημα ταξινόμησης USCS και γιατί μας βοηθάει να καταλάβουμε καλύτερα τι χώμα έχουμε μπροστά μας. Το USCS είναι ένα σύστημα που χρησιμοποιούν οι γεωλόγοι και οι μηχανικοί για να χαρακτηρίζουν το έδαφος ανάλογα με τη σύστασή του, κάτι που είναι πολύ χρήσιμο για να ξέρουμε πώς θα συμπεριφερθεί στις μετρήσεις μας.

Στο **Κεφάλαιο 3ο** Σε αυτό το μέρος παρουσιάζω τις βασικές μεθόδους που υπάρχουν για να μετρήσουμε την αγωγιμότητα του εδάφους. Αναφέρομαι τόσο στις μεθόδους που χρειάζονται άμεση επαφή με το έδαφος, όσο και στην επαγωγική μέθοδο που είναι πιο "έξυπνη", αφού δεν χρειάζεται να ακουμπήσεις το έδαφος. Στόχος είναι να δείξω ποια μέθοδος ταιριάζει καλύτερα σε κάθε περίπτωση.

Στο **Κεφάλαιο 4ο** Εδώ εξηγώ τι είναι η γεωφυσική μέθοδος που χρησιμοποίησα και πώς λειτουργεί το μοντέλο του McNeill, που είναι το πιο γνωστό για τέτοιου είδους μετρήσεις. Αναλύω βασικές έννοιες όπως το βάθος διείσδυσης και την κατανομή ευαισθησίας, για να καταλάβουμε πώς επηρεάζεται το σήμα που μετράμε από το έδαφος.

Στο **Κεφάλαιο 5ο** Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει τη διαδικασία των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν, τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν και τις συνθήκες του πειράματος. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, συγκρίνονται με τις ενδείξεις ενός εμπορικού αισθητήρα και αναλύονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν για την αξιοπιστία και τη βελτιστοποίηση της προτεινόμενης διάταξης.

Στο **Κεφάλαιο 6ο** Σε αυτό το τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις δυνατότητες εξέλιξης και βελτιστοποίησης της μεθόδου και της διάταξης που αναπτύχθηκε, με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας, της σταθερότητας και της πρακτικής αξιοπιστίας της. Παράλληλα, διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις και τεχνολογικές αναβαθμίσεις που θα μπορούσαν να καταστήσουν τη μέθοδο πιο κατάλληλη για εφαρμογές πεδίου και πιο ανταγωνιστική σε σχέση με τις υπάρχουσες εμπορικές λύσεις

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή στα είδη εδάφους

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους αποτελεί μία από τις σημαντικότερες φυσικές ιδιότητες που επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα κρίσιμες γεωργικές, περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές εφαρμογές. Η αγωγιμότητα σχετίζεται με χαρακτηριστικά όπως η υγρασία, η περιεκτικότητα σε άλατα, η δομή και η σύσταση του εδαφικού υλικού, καθώς και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η ακριβής μέτρηση της αγωγιμότητας επιτρέπει την αξιολόγηση της υγείας του εδάφους, την ανίχνευση ρύπανσης, τη διαχείριση της άρδευσης και την υποστήριξη γεωργίας ακριβείας. Για τον σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές μέτρησης. Αυτές χωρίζονται σε:

- Άμεσης επαφής
- TDR (Time Domain Reflectometry)
- FDR (Frequency Domain Reflectometry)
- Μη-επαφικής (Non invasive)
- Επαγωγική μέθοδος (EMI)
- Έμμεση επαφή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το φυσικό υπόβαθρο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο έδαφος, αναλύονται οι βασικοί μηχανισμοί που επηρεάζουν την ηλεκτρική συμπεριφορά του, και εισάγονται οι κύριες κατηγορίες τεχνικών μέτρησης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις επαγωγικές μεθόδους, οι οποίες αποτελούν αντικείμενο μελέτης και εφαρμογής στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.1 Εισαγωγή στο έδαφος και τα χαρακτηριστικά του

Το έδαφος αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους και πιο πολύπλοκους φυσικούς πόρους του πλανήτη, καθώς διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην υποστήριξη της φυτικής ζωής, τη ρύθμιση του κύκλου του νερού και των θρεπτικών στοιχείων, καθώς και στη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας. Η κατανόηση της συμπεριφοράς και της κατάστασης του εδάφους είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη βιώσιμων γεωργικών πρακτικών, την προστασία του περιβάλλοντος και την ορθολογική διαχείριση των φυσικών πόρων. Για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ποιότητας και της παραγωγικότητας ενός εδαφικού συστήματος, απαιτείται η ανάλυση τόσο των φυσικών όσο και των χημικών του ιδιοτήτων. Κρίσιμες παράμετροι όπως η **υφή**, η **δομή**, η **υγρασία**, η **θερμοκρασία** και η **ηλεκτρική αγωγιμότητα**, συνδέονται άμεσα με τη γονιμότητα του εδάφους, την κατακράτηση και κίνηση του νερού, καθώς και τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων για τα φυτά. Ειδικότερα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα αποτελεί έναν σημαντικό δείκτη που σχετίζεται με τη συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων και την υγρασία, επηρεάζοντας έτσι την ανάπτυξη των καλλιεργειών και την ανάγκη για άρδευση ή λίπανση. Η παρακολούθηση των ιδιοτήτων αυτών με ακρίβεια και αξιοπιστία αποτελεί απαραίτητο εργαλείο για την εφαρμογή γεωργίας ακριβείας, τη διαχείριση εδαφικών συστημάτων και την πρόληψη της υποβάθμισης των γεωργικών εδαφών.

1.2 Εισαγωγή στο Unified Soil Classification System (USCS)

Η κατηγοριοποίηση των εδαφών αποτελεί θεμέλιο λίθο στη γεωτεχνική μηχανική, καθώς επιτρέπει την πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς των γεωυλικών και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σε έργα θεμελίωσης, σταθερότητας πρανών, οδοποιίας και υδραυλικών κατασκευών. Για τον σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα ταξινόμησης, εκ των οποίων το Unified Soil Classification System (USCS) είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα διεθνώς. Το USCS αναπτύχθηκε αρχικά από τον Arthur Casagrande για το Σώμα Μηχανικών του Στρατού των ΗΠΑ και έκτοτε έχει υιοθετηθεί ευρέως από μηχανικούς, γεωλόγους και ερευνητές. Η ταξινόμηση βασίζεται κυρίως σε κοκκομετρικά (π.χ. μέγεθος κόκκων) και πλαστικά χαρακτηριστικά του εδάφους, προσδιοριζόμενα μέσω εργαστηριακών δοκιμών όπως η κοσκίνιση και οι δοκιμές Atterberg. Το σύστημα κατατάσσει τα εδάφη σε τρεις βασικές κατηγορίες: χονδρόκοκκα εδάφη (άμμος και χαλίκι), λεπτόκοκκα εδάφη (ίλύς και άργιλος) και υψηλά οργανικά εδάφη, με περαιτέρω υποκατηγορίες ανάλογα με τη σύσταση και τη συμπεριφορά τους. Η κωδικοποίηση γίνεται με διαγράμματα συμβολισμό (π.χ. CL, SM, GW), που

επιτρέπει συνοπτική και εύκολη αναγνώριση των χαρακτηριστικών του εδαφικού δείγματος. Η χρήση του USCS προσφέρει σαφήνεια και σταθερότητα στην επικοινωνία μεταξύ μελετητών και τεχνικών φορέων, ενώ συμβάλλει σημαντικά στην ασφαλή και οικονομική σχεδίαση τεχνικών έργων. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά οι κύριες κατηγορίες του συστήματος, καθώς και η ερμηνεία των βασικών συμβολισμών. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο πίνακες που περιλαμβάνουν τα αρχικά σύμβολα των κωδικών ταξινόμησης του συστήματος USCS, μαζί με την αντίστοιχη ερμηνεία τους[3].

Πίνακας 1.2.1 Έιδη εδάφους

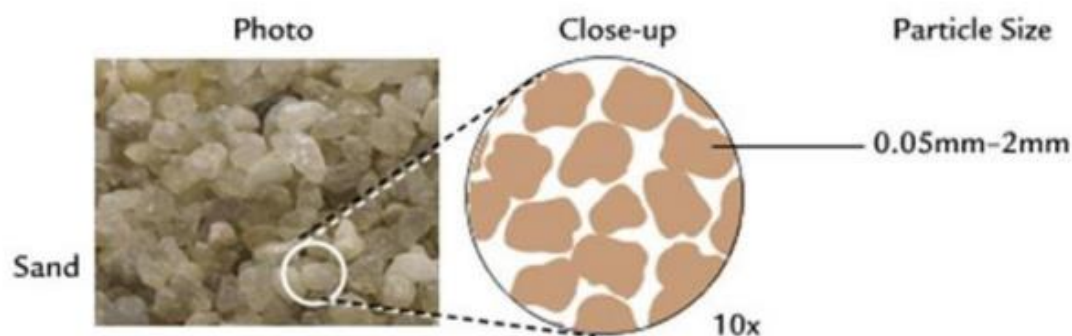
LETTER	DEFINITION
G	Gravel
S	Sand
M	Silt
C	Clay
O	Organic
PT	peat

Πίνακας 1.2.2 Κατάσταση εδάφους

Letter	Definition
P	poorly graded
W	well-graded
H	high liquid limit
L	Low liquid limit

1.2.1 Αμμώδες έδαφος

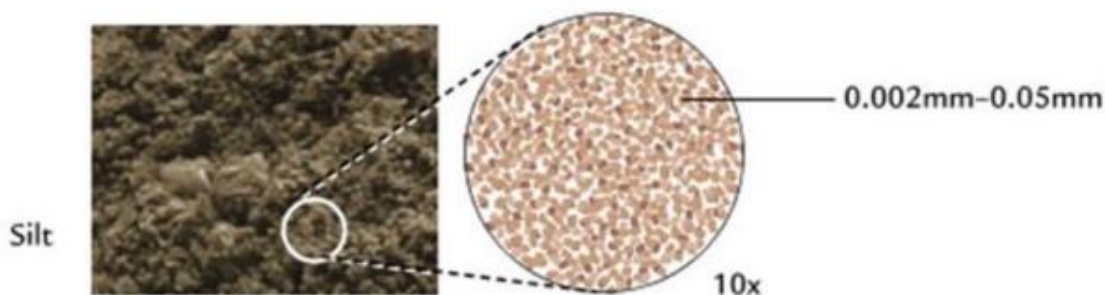
Τα αμμώδη έδαφη αποτελούν μία από τις βασικές κατηγορίες εδαφικών υλικών, χαρακτηριζόμενα από την κυριαρχία σωματιδίων άμμου στη σύστασή τους. Η άμμος ορίζεται ως ανόργανο υλικό με κοκκομετρική διάμετρο μεταξύ περίπου 0.06 mm και 2 mm, σύμφωνα με τις διεθνείς γεωτεχνικές προδιαγραφές. Η υφή του αμμώδους εδάφους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αναλογία των συστατικών του (άμμος, ιλύς, άργιλος), την κοκκομετρική κατανομή και τη διαβάθμισή του. Από φυσικής και μηχανικής άποψης, τα αμμώδη έδαφη διακρίνονται για την υψηλή διαπερατότητά τους, που διευκολύνει την ταχεία αποστράγγιση του νερού, αλλά και για τη χαμηλή ικανότητα κατακράτησης υγρασίας και θρεπτικών στοιχείων. Αυτά τα χαρακτηριστικά τα καθιστούν ευνοϊκά για ορισμένες γεωτεχνικές εφαρμογές, αλλά λιγότερο κατάλληλα για γεωργική χρήση, εφόσον δεν εμπλουτιστούν με οργανική ύλη ή άργιλο. Στη γεωτεχνική μηχανική, η συμπεριφορά των αμμοδών εδαφών επηρεάζεται σημαντικά από τη διαβάθμιση των κόκκων. Ένα καλά διαβαθμισμένο (well-graded) αμμώδες υλικό έχει κόκκους διαφόρων μεγεθών που τείνουν να πλησιάζουν μεταξύ τους με χαμηλό κενό πορώδες, ενώ σε κακώς διαβαθμισμένα (poorly graded) υλικά οι κόκκοι έχουν παρόμοιο μέγεθος, οδηγώντας σε χαμηλότερη πυκνότητα και σταθερότητα.



1.2.1.1 Σωματίδια άμμου.[17]

1.2.2 Ιλυώδη Εδάφη (Silt Soils)

Ιλυώδη Εδάφη (Silt Soils) Τα ιλυώδη εδάφη (silt soils) αποτελούν μία ενδιάμεση κατηγορία εδαφικών υλικών μεταξύ της άμμου και της αργίλου, τόσο ως προς το μέγεθος των κόκκων όσο και ως προς τις φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες. Η ιλύς (silt) περιλαμβάνει ανόργανα σωματίδια με διάμετρο περίπου από 0.002 mm έως 0.06 mm, μικρότερα από της άμμου αλλά μεγαλύτερα από της αργίλου. Χαρακτηρίζεται από την απαλή, σαπωνώδη υφή της και από την ικανότητα να σχηματίζει λάσπη όταν αναμιγνύεται με νερό, χωρίς όμως να εμφανίζει πλαστικότητα όπως η άργιλος. Από γεωτεχνική σκοπιά, τα ιλυώδη εδάφη παρουσιάζουν μέτρια ικανότητα κατακράτησης νερού και μέτρια διαπερατότητα, ενώ μπορεί να είναι ευαίσθητα σε μεταβολές της υγρασίας, οδηγώντας σε προβλήματα καθίζησης ή μεταβολής της αντοχής. Επίσης, σε υγρή μορφή γίνονται εύκολα συμπαγή και δύσκολα αποστραγγίζονται, ενώ σε ξηρή μορφή μπορεί να γίνουν σκόνη[17].

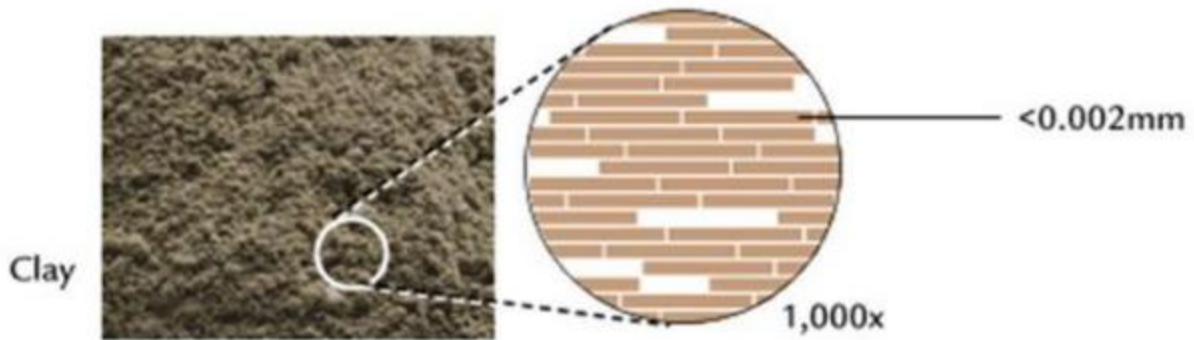


Σχήμα 1.2.2.1 Σωματίδια ιλύς.[17]

1.2.3 αργιλώδη εδάφη (clay soils)

Τα αργιλώδη εδάφη (clay soils) αποτελούν μια από τις πλέον σημαντικές και ιδιαίτερες κατηγορίες εδαφών, τόσο από γεωτεχνική όσο και από γεωργική άποψη. Η άργιλος (clay) περιλαμβάνει πολύ λεπτόκοκκα σωματίδια, με διάμετρο μικρότερη από 0.002 mm, τα οποία έχουν μεγάλη επιφάνεια επαφής σε σχέση με τον όγκο τους και ισχυρές διαμοριακές δυνάμεις. Λόγω της δομής των κόκκων της και της παρουσίας ηλεκτρικών φορτίων στην επιφάνειά τους, η άργιλος έχει την ικανότητα να κατακρατά νερό και θρεπτικά στοιχεία, καθιστώντας την σημαντική για τη γεωργική παραγωγή. Ωστόσο, η ίδια της η φύση καθιστά τη συμπεριφορά της μη προβλέψιμη σε πολλές περιπτώσεις:

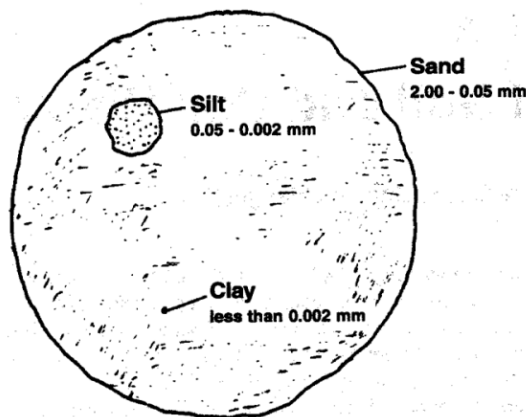
παρουσιάζει πλαστικότητα όταν είναι υγρή, συρρίκνωση και ρωγμές όταν ξηραίνεται, και διογκώνεται σε επαφή με νερό (ιδιαίτερα οι αργίλοι με μοντμοριλλονίτη)[17].



Σχήμα 1.2.3.1 Σωματίδια αργίλου[17]

1.2.4 Πηλώδη Εδάφη (Loamy Soils)

Τα **πηλώδη εδάφη** (loamy soils) αποτελούν μία από τις πιο ισορροπημένες και γόνιμες κατηγορίες εδαφών, καθώς συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των τριών κύριων συστατικών: **άμμου**, **ιλύος** και **αργίλου**. Ο όρος "πηλώδες" αναφέρεται σε εκείνο το έδαφος το οποίο περιέχει τα παραπάνω στοιχεία σε **σχετικά ισομερή αναλογία**, χωρίς κάποιο από αυτά να κυριαρχεί απόλυτα. Αυτή η ισορροπημένη σύνθεση χαρίζει στο έδαφος εξαιρετικές φυσικές ιδιότητες τόσο για γεωργικές όσο και για τεχνικές εφαρμογές[17]. Οι πηλοί συνδυάζουν τη **στραγγιστική ικανότητα της άμμου**, τη **συγκράτηση υγρασίας και θρεπτικών στοιχείων της ιλύος**, και τη **συνοχή και πλαστικότητα της αργίλου**. Το αποτέλεσμα είναι ένα έδαφος με **καλή δομή**, **επαρκές πορώδες**, και **σταθερή υδατική συμπεριφορά**, που ευνοεί τη ριζική ανάπτυξη των φυτών και διευκολύνει την κατεργασία[17].



Σχήμα 1.2.4.1 Σωματίδια πηλώδες εδάφους.[17]

1.3 Φυσικές ιδιότητες του εδάφους.

Οι φυσικές ιδιότητες καθορίζουν το πώς το έδαφος συμπεριφέρεται σαν μέσο υποδοχής νερού, θρεπτικών, ριζών και φορτίων. Είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τις ηλεκτρικές και μηχανικές μετρήσεις που γίνονται στο πεδίο, και επηρεάζουν σημαντικά την αγωγιμότητα, την διηλεκτρική σταθερά, και την απόκριση αισθητήρων. Ορισμένες από τις ιδιότητες θα αναλυθούν εκτενέστερα σε επόμενες ενότητες της εργασίας.

1.3.1 Υφή του εδάφους

Η υφή του εδάφους αναφέρεται στο μέγεθος, το σχήμα και την κατανομή των στερεών σωματιδίων που το αποτελούν. Αποτελεί μία από τις σημαντικότερες φυσικές ιδιότητες του εδάφους, καθώς επηρεάζει καθοριστικά τη διαπερατότητα, την ικανότητα συγκράτησης νερού και θρεπτικών στοιχείων, καθώς και τη συμπεριφορά του εδάφους σε γεωργικές και τεχνικές εφαρμογές. Οι τρεις βασικές υφές που τις αναφέραμε στο προηγούμενο κείμενο είναι η άμμος, η ιλύς και ο πηλός (άργιλος), οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το μέγεθος των κόκκων και τη μεταξύ τους συνοχή.

Άμμος: Τα αμμώδη εδάφη αποτελούνται από χονδρόκοκκα σωματίδια με χαλαρή δομή, επιτρέποντας τη γρήγορη διείσδυση του νερού και του αέρα. Αν και αυτό διευκολύνει την αποστράγγιση, οδηγεί παράλληλα σε ταχεία απώλεια υγρασίας και εκχύλιση θρεπτικών συστατικών, γεγονός που απαιτεί συχνότερη άρδευση και λίπανση. Ωστόσο, τα αμμώδη εδάφη έχουν το πλεονέκτημα ότι θερμαίνονται γρήγορα, κάτι που ευνοεί την πρωιμότητα της σποράς, ιδιαίτερα σε ψυχρές περιοχές[17].

Ιλύς: Τα ιλυώδη εδάφη διαθέτουν μεσαίου μεγέθους σωματίδια και προσφέρουν ισορροπία μεταξύ αποστράγγισης και συγκράτησης νερού. Ο καλός αερισμός και η σταθερή υγρασία τα καθιστούν ιδανικά για πολλές καλλιέργειες, ενώ η υφή τους διευκολύνει την κατεργασία του εδάφους.

Άργιλος (Πηλός): Τα αργιλώδη εδάφη περιέχουν πολύ μικρά και συμπαγή σωματίδια, τα οποία έχουν μεγάλη επιφάνεια και ισχυρή συνοχή. Αυτό προσδίδει υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού και θρεπτικών ουσιών, αλλά περιορίζει την αποστράγγιση και τον αερισμό. Σε υγρή μορφή εμφανίζουν πλαστικότητα, ενώ σε ξηρή κατάσταση σκληραίνουν. Η βελτίωση της δομής τους απαιτεί συνήθως την προσθήκη οργανικής ύλης ή άμμου.[20]

Η υφή του εδάφους επηρεάζει άμεσα την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), καθώς αυτή σχετίζεται με τη διαθεσιμότητα νερού και διαλυμένων ιόντων. Εδάφη με λεπτόκοκκη υφή, όπως οι άργιλοι, έχουν την ικανότητα να συγκρατούν περισσότερο νερό και ιόντα, οδηγώντας σε υψηλότερες τιμές αγωγιμότητας. Αντίθετα, τα αμμώδη εδάφη έχουν μικρότερη ικανότητα συγκράτησης και τείνουν να εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές EC, εκτός αν είναι πολύ υγρά ή πλούσια σε άλατα[19].

1.3.2 Δομή του Εδάφους

Η δομή του εδάφους αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο τα μεμονωμένα σωματίδια (άμμος, ιλύς, άργιλος) συνδέονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν συσσωματώματα (aggregates) ή συστάδες. Αυτή η χωρική οργάνωση των κόκκων καθορίζει το μέγεθος, το σχήμα και τη διάταξη των πόρων μεταξύ των σωματιδίων και επηρεάζει κρίσιμες λειτουργίες του εδάφους όπως η διαπερατότητα του νερού, ο αερισμός, η ικανότητα συγκράτησης υγρασίας και η ανθεκτικότητα στη διάβρωση.[20] Ανάλογα με τον τρόπο διάταξης των κόκκων, διακρίνονται διαφορετικοί τύποι δομής, καθένας εκ των οποίων έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και επιπτώσεις στην εδαφική λειτουργία:

Σφαιρική δομή (granular): Θεωρείται ιδανική για τις περισσότερες καλλιέργειες, καθώς επιτρέπει άριστο αερισμό και διήθηση του νερού. Ευνοεί την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος και ενισχύει τη βιολογική δραστηριότητα στο έδαφος [1].

Κυβική ή μπλοκική δομή (blocky): Παρέχει ικανοποιητική συγκράτηση νερού και σταθερότητα. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιοχές με χαμηλές βροχοπτώσεις, καθώς συμβάλλει στη μείωση των απωλειών υγρασίας[1].

Πλακώδης δομή (platy): Τα σωματίδια διατάσσονται σε οριζόντια στρώματα, περιορίζοντας την κάθετη κίνηση του νερού και των ριζών. Συχνά σχετίζεται με συμπιεσμένα ή υποβαθμισμένα εδάφη και απαιτεί παρέμβαση (π.χ. βαθιά κατεργασία) για τη βελτίωση της φυσικής δομής[1]. Η δομή του εδάφους επηρεάζει έμμεσα και την ηλεκτρική του αγωγιμότητα (EC). Εδάφη με καλή δομή και υψηλό πορώδες επιτρέπουν την αποστράγγιση και τον αερισμό, μειώνοντας τη συγκέντρωση διαλυμένων ιόντων που συμβάλλουν στην αγωγιμότητα. Αντιθέτως, συμπαγή ή σωματοποιημένα εδάφη μπορεί να οδηγήσουν σε συσσώρευση ιόντων λόγω περιορισμένης απορροής, αυξάνοντας την τιμή της EC[1].

1.3.3 Πορώδες και Υδατοδιαπερατότητα

Το πορώδες του εδάφους αναφέρεται στο σύνολο των κενών χώρων (πόρων) που υπάρχουν μεταξύ των στερεών σωματιδίων. Οι πόροι αυτοί γεμίζουν είτε με νερό είτε με αέρα και διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη συγκράτηση υγρασίας, στον αερισμό της ριζόσφαιρας, αλλά και στη μεταφορά ιόντων και θρεπτικών συστατικών. Το πορώδες επηρεάζει άμεσα την ικανότητα του εδάφους να υποστηρίζει τη φυτική ανάπτυξη και σχετίζεται άμεσα με τη δομή και την υφή του εδάφους.

Σύσταση και Δομή του Εδάφους παρατηρείται σε εδάφη με καλή δομή και αφράτη σύσταση. Αυτά τα εδάφη επιτρέπουν επαρκή αερισμό, καλή αποστράγγιση και ελαχιστοποίηση του κινδύνου υπεράρδευσης, προάγοντας την υγιή ανάπτυξη των ριζών και τη βιολογική δραστηριότητα[18].

Χαμηλά πορώδες συνδέεται συχνά με συμπιεσμένα ή βαριά αργιλώδη εδάφη, στα οποία οι πόροι είναι περιορισμένοι και εμποδίζεται η ροή του νερού και του αέρα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε κατακράτηση νερού, ασφυξία των ριζών και αυξημένη ευπάθεια σε μυκητολογικές και βακτηριακές ασθένειες. Σε τέτοιες περιπτώσεις απαιτούνται παρεμβάσεις βελτίωσης της δομής του εδάφους (όπως η ενσωμάτωση οργανικής ύλης ή άμμου)[18].

Η υδατοδιαπερατότητα του εδάφους περιγράφει την ικανότητα του εδάφους να επιτρέπει τη ροή του νερού διαμέσου των πόρων. Εδάφη με υψηλή διαπερατότητα επιτρέπουν την εύκολη διείσδυση και αποστράγγιση του νερού, περιορίζοντας τη συσσώρευση υγρασίας στην επιφάνεια και βελτιώνοντας τη ριζική ανάπτυξη. Αντιθέτως, εδάφη με χαμηλή διαπερατότητα ενδέχεται να προκαλέσουν υπεράρδευση, μειωμένο αερισμό και αναστολή της ριζικής ανάπτυξης. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους (EC) σχετίζεται άμεσα με το πορώδες και την υδατοδιαπερατότητα, καθώς και οι δύο αυτές ιδιότητες επηρεάζουν τη διακίνηση και τη συγκέντρωση των διαλυμένων ιόντων στο εδαφικό διάλυμα. Εδάφη με επαρκές πορώδες και καλή αποστράγγιση επιτρέπουν τη μετακίνηση των ιόντων και την ανανέωση του εδαφικού διαλύματος, διευκολύνοντας τη μέτρηση της αγωγιμότητας και προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για τη γονιμότητα και την υγεία του εδάφους.

1.3.4 Θερμοκρασία εδάφους

Η θερμοκρασία του εδάφους αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές φυσικές παραμέτρους, καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τόσο τη φυτική ανάπτυξη όσο και τη βιολογική και χημική δραστηριότητα του εδαφικού οικοσυστήματος. Επηρεάζει κρίσιμες διεργασίες όπως η βλάστηση των σπόρων, η απορρόφηση νερού και θρεπτικών στοιχείων, η δραστηριότητα των μικροοργανισμών, καθώς και η διάσπαση οργανικής ύλης και η απελευθέρωση ανόργανων ενώσεων[18]. Κάθε καλλιέργεια θέλει ειδικές θερμοκρασίες για τη καλύτερη ανάπτυξη, με την πρώιμη βλάστηση και η εγκατάσταση του ριζικού συστήματος να εξαρτώνται άμεσα από τη θερμική κατάσταση του εδάφους. Θερμοκρασίες εκτός του ιδανικού εύρους ενδέχεται να οδηγήσουν σε καθυστέρηση ή αποτυχία βλάστησης, μειώνοντας την αποδοτικότητα της καλλιέργειας[5]. Παράλληλα, η θερμοκρασία επηρεάζει τη διαθεσιμότητα και την κινητικότητα των θρεπτικών στοιχείων, καθώς και την ικανότητα των ριζών να τα απορροφούν. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, μειώνεται η διαλυτότητα βασικών ιχνοστοιχείων και

επιβραδύνεται η κυκλοφορία των ιόντων στο εδαφικό διάλυμα. Αντίθετα, σε θερμοκρασίες εντός των κατάλληλων ορίων, οι μεταβολικές και μικροβιακές δραστηριότητες εντείνονται, ενισχύοντας τη γονιμότητα του εδάφους. Επιπροσθέτως, η θερμοκρασία επηρεάζει τις χημικές μεταβολές του εδάφους, όπως τη διάσπαση οργανικής ύλης, την απελευθέρωση αζώτου, καθώς και την νιτροποίηση και αμμωνιοποίηση, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την παραγωγικότητα των φυτών. Παρ' όλα αυτά, υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες ενδέχεται να επιταχύνουν τις απώλειες θρεπτικών συστατικών μέσω εξάτμισης ή πτητικοποίησης. Παρότι η θερμοκρασία αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη συνολική λειτουργία του εδάφους, στην παρούσα διπλωματική εργασία, η εφαρμοζόμενη επαγωγική μέθοδος μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας δεν απαιτεί τη μέτρηση της θερμοκρασίας του εδάφους. Η προσέγγιση που ακολουθείται βασίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρομαγνητικής απόκρισης λόγω διαφορών αγωγιμότητας, ανεξάρτητα από τις θερμοκρασιακές μεταβολές, καθιστώντας τη μέθοδο απλούστερη και πρακτικότερη σε επίπεδο πεδίου.

1.3.5 Χημικές Ιδιότητες του Εδάφους

Οι χημικές ιδιότητες του εδάφους αποτελούν θεμελιώδη παράγοντα για την κατανόηση της γονιμότητας και της ικανότητάς του να υποστηρίζει την ανάπτυξη των φυτών. Οι ιδιότητες αυτές καθορίζουν το χημικό περιβάλλον της γης, επηρεάζοντας άμεσα τη διαθεσιμότητα του νερού και των θρεπτικών συστατικών, καθώς και τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών που επιτελούν κρίσιμες βιολογικές διεργασίες.[21]

Η ανάλυση των χημικών ιδιοτήτων παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη φυσική και βιολογική λειτουργία του εδάφους και επιτρέπει την αξιολόγηση της ικανότητάς του να υποστηρίζει υγιή και παραγωγικά φυτά. Μεταξύ των βασικότερων χημικών ιδιοτήτων συγκαταλέγονται:

- **Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC):** Αποτελεί δείκτη της συγκέντρωσης διαλυμένων αλάτων στο εδαφικό διάλυμα και σχετίζεται άμεσα με την αλατότητα, καθώς και με την ικανότητα του εδάφους να διατηρεί και να μεταφέρει θρεπτικά συστατικά.
- **pH του εδάφους:** Καθορίζει το όξινο ή αλκαλικό περιβάλλον και επηρεάζει τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων, την απορρόφησή τους από τις ρίζες και τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών. Η διατήρηση του pH εντός κατάλληλων ορίων είναι ζωτικής σημασίας για τη βιολογική ισορροπία του εδάφους.
- **Περιεκτικότητα σε οργανική ύλη:** Η παρουσία οργανικής ύλης βελτιώνει τη δομή του εδάφους, αυξάνει τη συγκράτηση νερού και θρεπτικών, και ενισχύει τη βιολογική δραστηριότητα μέσω της υποστήριξης του μικροβιακού πληθυσμού.
- **Ικανότητα Ανταλλαγής Κατιόντων (CEC – Cation Exchange Capacity):** Εκφράζει την ικανότητα του εδάφους να δεσμεύει και να ανταλλάσσει κατιόντα, όπως ασβέστιο, μαγνήσιο, κάλιο, τα οποία είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών. Εδάφη με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα μπορούν να συγκρατήσουν περισσότερα θρεπτικά στοιχεία.
- **Θρεπτικά συστατικά και ιχνοστοιχεία:** Η παρουσία μακροθρεπτικών στοιχείων όπως το άζωτο (N), ο φώσφορος (P) και το κάλιο (K), καθώς και ιχνοστοιχείων όπως ο σίδηρος (Fe), ο ψευδάργυρος (Zn) και το μαγγάνιο (Mn), είναι απαραίτητα για τη φυσιολογική λειτουργία των φυτών και τη σωστή ανάπτυξη των καλλιεργειών.

Η ολιστική κατανόηση και παρακολούθηση των χημικών παραμέτρων του εδάφους αποτελεί προϋπόθεση για την ορθολογική διαχείριση των εδαφικών πόρων και τη βελτιστοποίηση των γεωργικών πρακτικών. Μέσω τακτικών αναλύσεων και προσαρμοσμένων επεμβάσεων (όπως λίπανση, ασβέστωση ή προσθήκη οργανικής ύλης), είναι δυνατή η αντιμετώπιση προβλημάτων όπως η αλατότητα ή η ανεπάρκεια θρεπτικών, συμβάλλοντας έτσι στη διατήρηση της εδαφικής υγείας και στη μακροχρόνια αύξηση της παραγωγικότητας[21].

1.3.6 pH του Εδάφους

Το pH του εδάφους αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους δείκτες που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων, τη βιολογική δραστηριότητα και, κατ' επέκταση, την υγεία και παραγωγικότητα των φυτών. Εκφράζει τη συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου (H^+) στο εδαφικό διάλυμα και κατατάσσει το έδαφος ως όξινο ($pH < 7$), ουδέτερο ($pH = 7$) ή αλκαλικό ($pH > 7$). Οι περισσότερες καλλιέργειες αναπτύσσονται καλύτερα σε έδαφος με pH μεταξύ 6.0 και 7.5, εύρος στο οποίο τα περισσότερα μακροθρεπτικά και ιχνοστοιχεία είναι διαθέσιμα προς απορρόφηση από τις ρίζες. Εκτός αυτού του εύρους, πολλά στοιχεία καθίστανται λιγότερο διαθέσιμα ή ακόμη και τοξικά, οδηγώντας σε ανεπάρκειες ή φυτοτοξικότητα. Σε όξινα εδάφη (χαμηλό pH), μειώνεται η διαθεσιμότητα στοιχείων όπως ο φώσφορος, το κάλιο και το ασβέστιο, ενώ ενδέχεται να αυξηθεί η διαλυτότητα τοξικών ιόντων όπως το αλουμίνιο (Al^{3+}) και το μαγγάνιο (Mn^{2+}), τα οποία μπορεί να βλάψουν το ριζικό σύστημα. Αντιθέτως, σε αλκαλικά εδάφη (υψηλό pH), περιορίζεται η προσβασιμότητα θρεπτικών όπως ο σίδηρος, ο ψευδάργυρος, το μαγγάνιο, ο χαλκός και το βόριο, οδηγώντας σε ανεπάρκειες και κίτρινίσματα (χλωρώση) στα φύλλα. Η ρύθμιση του pH αποτελεί βασικό μέτρο εδαφοβελτίωσης. Για την αύξηση του pH σε όξινα εδάφη εφαρμόζεται ασβέστιο (π.χ. ασβεστόλιθος ή υδράσβεστος), ενώ για τη μείωση του pH σε αλκαλικά εδάφη χρησιμοποιούνται θειούχα υλικά, όπως θειικό σίδηρο ή θειικό αργίλιο. Οι παρεμβάσεις αυτές πρέπει να βασίζονται σε αναλύσεις εδάφους και να εφαρμόζονται με προσοχή, ώστε να επιτευχθεί ισορροπημένο pH χωρίς ανεπιθύμητες παρενέργειες. Επιπλέον, το pH επηρεάζει και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους (EC), καθώς μεταβάλλει τη διαλυτότητα των ιόντων. Σε όξινα εδάφη, η αυξημένη διαλυτότητα ορισμένων στοιχείων μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της EC, ενώ σε αλκαλικά εδάφη, η μειωμένη διαλυτότητα μπορεί να μειώσει την αγωγιμότητα. Για παράδειγμα, η αύξηση της διαλυτότητας του αργιλίου σε όξινα περιβάλλοντα μπορεί να προσθέσει ιόντα στο εδαφικό διάλυμα, ενισχύοντας την αγωγιμότητα. Η τακτική παρακολούθηση του pH, σε συνδυασμό με την EC, αποτελεί αναπόσπαστο εργαλείο για την αξιολόγηση της γονιμότητας και την ορθολογική διαχείριση των εισροών (λίπανση, άρδευση). Η εκπαίδευση των αγροτών ως προς τη σημασία του pH και τις τεχνικές ρύθμισής του, μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη βελτίωση της υγείας του εδάφους και στη βιωσιμότητα της γεωργικής παραγωγής.[22]

Εύρος pH	Διαθεσιμότητα Θρεπτικών Στοιχείων
< 5.0	Πολύ χαμηλή διαθεσιμότητα των P, Ca, Mg Τοξικά επίπεδα Al, Mn
5.0 - 5.5	Χαμηλή διαθεσιμότητα των P, Ca, Mg. Ελαφρώς τοξικά επίπεδα Al, Mn
5.5 - 6.0	Μέτρια διαθεσιμότητα των P; Βέλτιστη διαθεσιμότητα για Fe, Mn, Zn, Cu. Χαμηλή διαθεσιμότητα των Ca, Mg
6.0 - 6.5	Καλή διαθεσιμότητα των P; Βέλτιστη για τα περισσότερα θρεπτικά συστατικά
6.5 - 7.0	Βέλτιστη διαθεσιμότητα για τα περισσότερα θρεπτικά συστατικά
7.0 - 7.5	Καλή διαθεσιμότητα των περισσότερων θρεπτικών συστατικών. Μείωση διαθεσιμότητας για Fe, Mn, Zn, Cu
> 7.5	Χαμηλή διαθεσιμότητα των P, Fe, Mn, Zn, Cu. Υψηλή διαθεσιμότητα του Mo

Σχήμα 1.3.6.1 εύρος pH .[22]

1.3.7 Θρεπτικά συστατικά

Τα θρεπτικά συστατικά και τα ιχνοστοιχεία αποτελούν θεμελιώδη στοιχεία για την ανάπτυξη, υγεία και παραγωγικότητα των φυτών. Διακρίνονται σε μακροθρεπτικά (απαιτούνται σε μεγάλες ποσότητες) και μικροθρεπτικά ή ιχνοστοιχεία (απαιτούνται σε πολύ μικρές ποσότητες), ωστόσο και οι δύο ομάδες είναι εξίσου απαραίτητες για την ολοκληρωμένη φυσιολογική λειτουργία των φυτών. Ανάλογα το λίπασμα θα έχει ως αποτέλεσμα διαφορετική αγωγιμότητα στο έδαφος[22].

1.4 Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους (Electrical Conductivity – EC) είναι μία φυσικοχημική ιδιότητα που εκφράζει την ικανότητα του εδάφους να μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα, και σχετίζεται άμεσα με την παρουσία διαλυμένων ιόντων στο εδαφικό διάλυμα. Αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς δείκτες της αλατότητας, της γονιμότητας, και της γενικής υγείας του εδάφους, καθώς επηρεάζει την πρόσληψη νερού και θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά[1]. Υψηλές τιμές αγωγιμότητας υποδηλώνουν αυξημένη συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει ωσμωτικό στρες στα φυτά, η υψηλή αλατότητα δυσκολεύει την απορρόφηση νερού και ιχνοστοιχείων από το ριζικό σύστημα, επηρεάζοντας την ανάπτυξη και την απόδοση. Για τον λόγο αυτό, η παρακολούθηση της EC αποτελεί βασικό εργαλείο στη διαχείριση της άρδευσης και της λίπανσης, αλλά και στον εντοπισμό υποβαθμισμένων ή προβληματικών εδαφών. Η μέτρηση της αγωγιμότητας σε διαφορετικά βάθη επιτρέπει την ανάλυση της κατακόρυφης κατανομής υγρασίας και αλάτων, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για τη λήψη στοχευμένων γεωργικών επεμβάσεων. Η EC επηρεάζεται από διάφορους φυσικούς και χημικούς παράγοντες, με κυριότερους τους εξής[1]:

- **Υγρασία:** Η παρουσία νερού αυξάνει την αγωγιμότητα, καθώς το **νερό δρα ως αγωγικό μέσο**, μεταφέροντας ιόντα. Όσο περισσότερη η υγρασία, τόσο μεγαλύτερη η ικανότητα του εδάφους να μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα και πεδίο.
- **Αλατότητα:** Τα διαλυμένα άλατα (Na^+ , Cl^- , K^+ , Ca^{2+} κ.λπ.) είναι οι φορείς του ηλεκτρικού φορτίου. Όσο περισσότερα ιόντα υπάρχουν στο εδαφικό διάλυμα, τόσο υψηλότερη η αγωγιμότητα και διαπερατότητα.
- **Σύσταση και Δομή του Εδάφους:** Αργιλώδη εδάφη έχουν υψηλότερη ειδική επιφάνεια που θα πει υψηλότερη ικανότητα συγκράτησης ιόντων δηλαδή συνήθως υψηλότερη EC. Αμμώδη εδάφη έχουν χαμηλότερη ικανότητα συγκράτησης άρα συνήθως χαμηλότερη EC.
- **Οργανική ύλη:** Η οργανική ύλη μπορεί να βελτιώσει την αγωγιμότητα, ιδίως μέσω της ικανότητας συγκράτησης κατιόντων (CEC). Ωστόσο, η επίδρασή της είναι συνήθως μικρότερη από αυτή της υγρασίας και της αλατότητας.
- **Θερμοκρασία:** Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μεγαλύτερη κινητικότητα ιόντων και σε αυξημένη διαλυτότητα των αλάτων, με αποτέλεσμα την ενίσχυση της αγωγιμότητας. Η EC επομένως μεταβάλλεται ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες, και η κατανόηση αυτής της σχέσης είναι κρίσιμη για σωστή ερμηνεία των μετρήσεων.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας με ενδεικτικές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC)

EC (dS/m)	κατάσταση εδάφους	Επίδραση στις καλλιέργειες
< 0.2	Πολύ χαμηλή αλατότητα	Πιθανή έλλειψη θρεπτικών λόγω έκπλυσης
0.2 - 0.8	Χαμηλή αλατότητα	Καλή ανάπτυξη και ισορροπία θρεπτικών
0.8 - 2.0	Αυξημένη αλατότητα	Μερικές ευαίσθητες καλλιέργειες επηρεάζονται
2.0 - 4.0	πολύ υψηλή αλατότητα	Απαιτείται διαχείριση άρδευσης και επιλογή ανθεκτικών ειδών
> 4	Ακατάλληλα υψηλή αλατότητα	Σοβαρή αναστολή ανάπτυξης ή καταστροφή καλλιέργειας

Πίνακας 1.4.1 επίδραση καλλιέργειας ανάλογα με αγωγιμότητα [22]

και την αντίστοιχη επίδρασή τους στο έδαφος και στην ανάπτυξη των καλλιεργειών.

1.4.1 Ηλεκτρική Διαπερατότητα και Σχέση με την Αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική διαπερατότητα είναι μια συγγενής έννοια, που εκφράζει την ικανότητα του εδάφους να επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρικού πεδίου. Αν και επηρεάζεται από την διηλεκτρική σταθερά των

συστατικών του εδάφους, η διαπερατότητα συσχετίζεται με την αγωγιμότητα, καθώς και οι δύο παράμετροι εξαρτώνται από την υγρασία, τη δομή και τη σύσταση. Υψηλή αγωγιμότητα συνεπάγεται συνήθως και αυξημένη ηλεκτρική απόκριση, η οποία αξιοποιείται σε μεθόδους αισθητήρων εδάφους όπως οι επαγωγικοί και διηλεκτρικοί αισθητήρες[4].

1.4.2 Αλατότητα

Η αλατότητα εκφράζει τη συνολική ποσότητα διαλυμένων αλάτων σε ένα υγρό μέσο, όπως το νερό ή το εκχύλισμα εδάφους, και συνήθως μετριέται σε μονάδες γραμμαρίων ανά λίτρο (g/L) ή χιλιοστογράμμων ανά λίτρο (mg/L). Αν και μπορεί να προσδιοριστεί με άμεσες χημικές αναλύσεις, στην πράξη εκτιμάται συχνά έμμεσα μέσω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), η οποία μετρά την ικανότητα του διαλύματος να άγει ηλεκτρικό ρεύμα. Η αγωγιμότητα επηρεάζεται κυρίως από τη συγκέντρωση και το είδος των ιόντων, και επομένως αποτελεί έναν αξιόπιστο δείκτη για την αλατότητα. Χρησιμοποιώντας εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν τις δύο ποσότητες, μπορούμε να υπολογίσουμε την αλατότητα από μετρήσεις EC, υπό την προϋπόθεση ότι η θερμοκρασία έχει διορθωθεί στους 25°C και το διάλυμα έχει γνωστά χαρακτηριστικά. Συνήθως χρησιμοποιείται προσεγγιστικά ο τύπος[23] :

$$TDS(ppm) = Salinity \left(\frac{g}{L} \right) \approx 0.64 \cdot EC \left(\frac{\mu S}{m} \right) \quad (1.4.2.1)$$

Το TDS αποτελεί έναν δείκτη αλατότητα (μμεταλλικότητας) και συνδέεται με την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) [23]

1.5 Μαγνητικής Επιδεκτικότητα

Σε πολλές γεωφυσικές εφαρμογές, εκτός από την ηλεκτρική αγωγιμότητα, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η μαγνητική επιδεκτικότητα του υπεδάφους. Η μαγνητική επιδεκτικότητα εκφράζει την ικανότητα ενός υλικού να ενισχύει ή να τροποποιεί το μαγνητικό πεδίο στο οποίο υπόκειται. Η μέτρηση αυτής της ιδιότητας μπορεί να προσφέρει πληροφορίες για την παρουσία μαγνητικών ορυκτών, τη γεωλογική σύσταση του υπεδάφους και, σε κάποιες περιπτώσεις, για περιβαλλοντικά ζητήματα όπως η ρύπανση από βαρέα μέταλλα. Αν και στις γεωργικές εφαρμογές η μαγνητική επιδεκτικότητα δεν αποτελεί βασικό δείκτη, η αξιολόγησή της μπορεί να συνεισφέρει στη συνολικότερη κατανόηση της δομής και της σύνθεσης του εδάφους, ειδικά σε γεωφυσικές έρευνες ή αρχαιολογικές μελέτες.[28]

Κεφάλαιο 2ο: Μεθοδολογίες

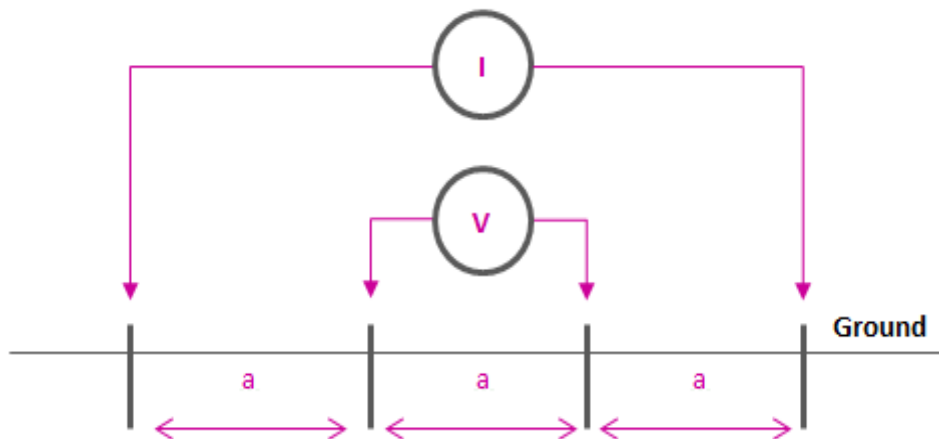
2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι κυριότερες μέθοδοι μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους που είναι διαθέσιμες στην αγορά, μαζί με την αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών κάθε προσέγγισης. Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στις τεχνικές TDR (Time Domain Reflectometry) και FDR (Frequency Domain Reflectometry), οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές γεωργίας ακριβείας και παρακολούθησης της υγρασίας και της αγωγιμότητας του εδάφους. Επιπλέον, θα πραγματοποιηθεί εκτενής συγκριτική ανάλυση μεταξύ των παραπάνω μεθόδων και της επαγωγικής μεθόδου μέτρησης, η οποία αποτελεί και το επίκεντρο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Μέσα από αυτήν την προσέγγιση θα αναδειχθούν τα διαφορετικά φυσικά φαινόμενα στα οποία βασίζεται κάθε τεχνική, καθώς και η καταλληλότητά τους για διαφορετικούς τύπους εφαρμογών και περιβαλλοντικών συνθηκών. Ο πιο συχνός αισθητήρας ηλεκτρικής αγωγιμότητας βασίζεται στη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους μεταξύ δύο ή περισσότερων ηλεκτροδίων (μέθοδος Wenner). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ) είναι το αντίστροφο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ρ) και εκφράζει την ικανότητα του υλικού να μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα. Η σχέση μεταξύ των δύο ποσοτήτων δίνεται από τη θεμελιώδη εξίσωση:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.1.1)$$

2.2 Μέθοδος Wenner

Η μέθοδος Wenner αποτελεί μία από τις πιο κλασικές και ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές γεωηλεκτρικής διασκόπησης για τη μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ή ειδικής αγωγιμότητας του υπεδάφους. Στηρίζεται στην τοποθέτηση τεσσάρων ηλεκτροδίων σε γραμμική διάταξη με ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Τα δύο εξωτερικά ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για την διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος, ενώ τα δύο εσωτερικά για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού. Η μέθοδος βασίζεται στον νόμο του Ohm και επιτρέπει τον υπολογισμό της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους, από την οποία μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες για τη δομή και τη σύσταση των γεωλογικών στρωμάτων. Η μέθοδος Wenner είναι απλή στην εφαρμογή, ιδιαίτερα αποτελεσματική για οριζόντια στρωματοποιημένα εδάφη και χρησιμοποιείται σε περιβαλλοντικές, γεωτεχνικές και αρχαιολογικές μελέτες



Σχήμα 2.2.1 Μέθοδος Wenner[24]

2.3 Μέθοδος FDR (Frequency Domain Reflectometry)[25]

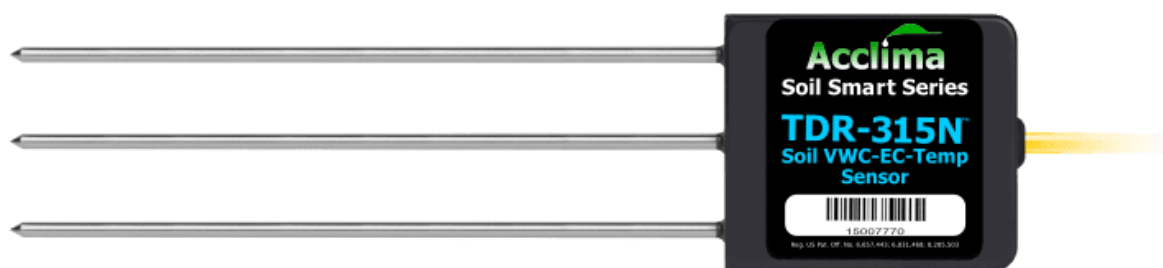
Η μέθοδος FDR (Frequency Domain Reflectometry) αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες τεχνικές για τη μέτρηση της υγρασίας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους, κυρίως σε εφαρμογές γεωργίας και περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Η τεχνολογία FDR βασίζεται στην αρχή της μέτρησης της διηλεκτρικής σταθερά του εδάφους μέσω συχνότητας συντονισμού σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας-ταλαντωτής, του οποίου η συχνότητα ταλάντωσης μεταβάλλεται ανάλογα με τη διηλεκτρική σταθερά του περιβάλλοντος μέσου. Καθώς η διηλεκτρική σταθερά επηρεάζεται κυρίως από την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, η μέθοδος FDR επιτρέπει την έμμεση, αλλά ιδιαίτερα ευαίσθητη εκτίμηση της υγρασίας. Επιπλέον, μέσω της ανάλυσης των μεταβολών του σήματος, μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες και για την αγωγιμότητα, όταν οι κατάλληλες συνθήκες και βαθμονόμηση το επιτρέπουν. Η FDR διακρίνεται για την ταχύτητα, την ακρίβεια και τη δυνατότητα συνεχούς καταγραφής δεδομένων, ενώ υποστηρίζει τόσο σημειακές μετρήσεις όσο και συνεχείς εφαρμογές πεδίου με εγκατεστημένους αισθητήρες. Παρότι παρουσιάζει κάποια ευαισθησία σε παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η σύσταση του εδάφους, παραμένει μια αξιόπιστη και ευρέως αποδεκτή τεχνολογία για την παρακολούθηση εδαφικών παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 2.3.1 FDR αισθητήρας.[25]

2.4 Μέθοδος TDR (Time Domain Reflectometry)[26]

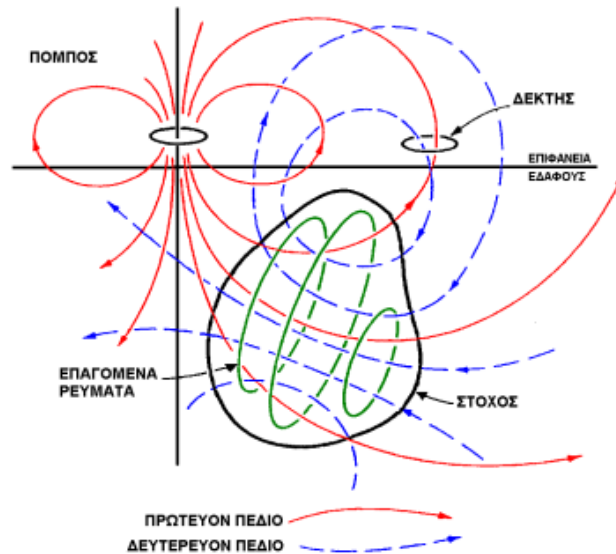
Η μέθοδος TDR (Time Domain Reflectometry) αποτελεί μία από τις πλέον αξιόπιστες τεχνικές για τη μέτρηση της υγρασίας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους, με ευρεία εφαρμογή σε γεωργία, περιβαλλοντική παρακολούθηση και γεωτεχνικές μελέτες. Η τεχνολογία TDR βασίζεται στη διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού παλμού μέσα από ειδικά ηλεκτρόδια (αισθητήρες), που είναι τοποθετημένα στο έδαφος. Ο παλμός ταξιδεύει κατά μήκος των αγωγών και ανακλάται μερικώς ή ολικώς όταν συναντά αλλαγές στη διηλεκτρική σταθερά ή/και την αγωγιμότητα του μέσου. Η χρονική καθυστέρηση και η μορφή της αντανάκλασης αναλύονται ώστε να εξαχθούν πληροφορίες σχετικά με τη διηλεκτρική σταθερά (σχετιζόμενη με την υγρασία) και την απώλεια ενέργειας (σχετιζόμενη με την αγωγιμότητα). Η TDR είναι ιδιαίτερα ακριβής, σταθερή και μη καταστροφική μέθοδος, προσφέροντας υψηλή ανάλυση σε βάθος και τη δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης στο πεδίο. Είναι σχετικά ανεπηρέαστη από εξωτερικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία ή η σύσταση του εδάφους, όταν έχει πραγματοποιηθεί κατάλληλη βαθμονόμηση. Παρότι η εγκατάσταση των αισθητήρων μπορεί να είναι πιο απαιτητική σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, η TDR θεωρείται τεχνολογία αναφοράς για την ακρίβεια στις μετρήσεις εδαφικής υγρασίας και αλατότητας.



Σχήμα 2.4.1 TDR αισθητήρας Acclima TDR-315L

Η επαγωγική μέθοδος μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους (electromagnetic induction method) αποτελεί μια μη καταστροφική δηλαδή χωρίς φυσική επαφή τεχνική, η οποία αξιοποιείται ευρέως στη γεωργία ακριβείας, στη γεωφυσική και στη χαρτογράφηση εδαφικών ιδιοτήτων. Σε αντίθεση με τις μεθόδους TDR και FDR που απαιτούν εισαγωγή αισθητήρων στο έδαφος, η επαγωγική μέθοδος βασίζεται στη γεννήτρια και ανίχνευση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, επιτρέποντας μετρήσεις επιφανειακές ή με εμβάθυνση, χωρίς να διαταράσσεται το εδαφικό προφίλ. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου στηρίζεται στη δημιουργία ενός εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου από ένα πηνίο εκπομπής (Tx), το οποίο επάγει κυκλικά ρεύματα (eddy currents) στο αγώγιμο εδαφικό υλικό. Αυτά τα ρεύματα παράγουν το δικό τους μαγνητικό πεδίο, το οποίο ανιχνεύεται από ένα ή περισσότερα πηνία λήψης (Rx). Η ένταση και η φάση του σήματος που ανιχνεύεται σχετίζονται άμεσα με την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υπεδάφους, ενώ η γεωμετρία και η συχνότητα των πηνίων επηρεάζουν το βάθος διείσδυσης.

2.5 Η επαγωγική Μέθοδος

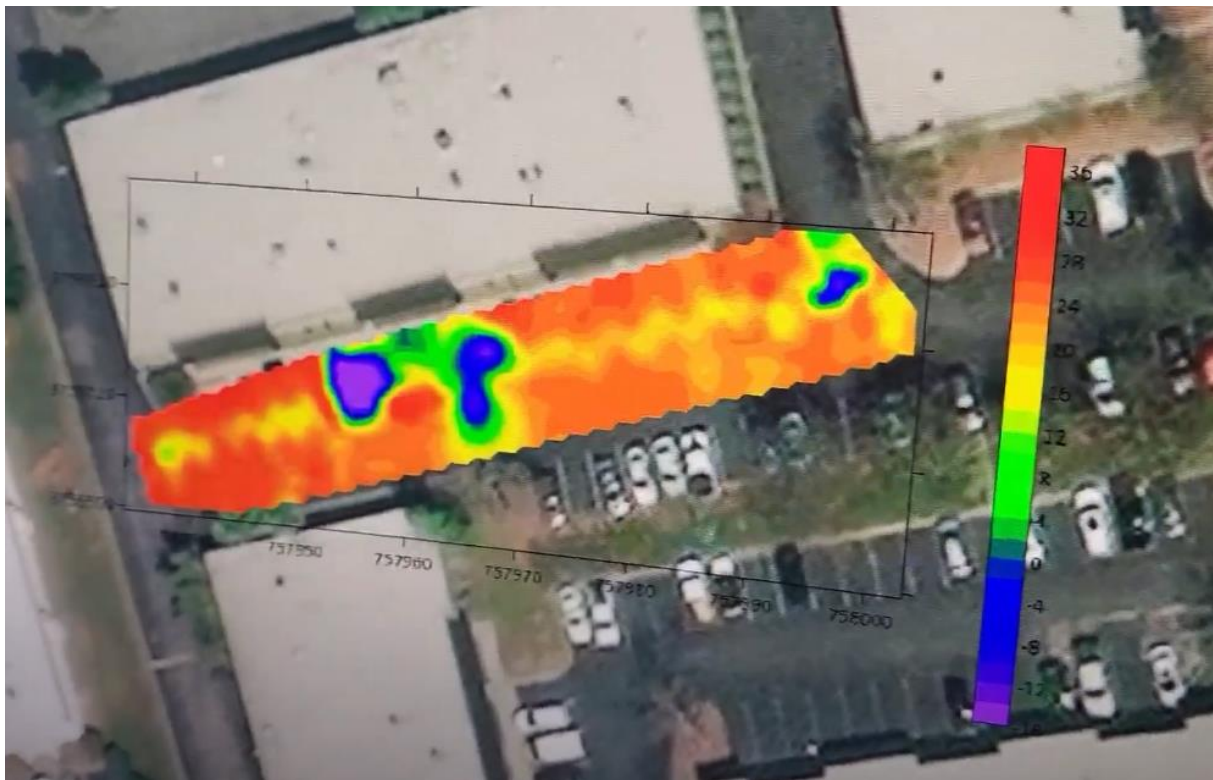


Σχήμα 2.5.1 Αρχές ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (Telford et al., 1990).

Η επαγωγική μέθοδος προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως η ταχεία συλλογή δεδομένων, η δυνατότητα συνεχούς χαρτογράφησης, και η λειτουργία ακόμα και σε ξηρά, συμπαγή ή ακατέργαστα εδάφη. Παράλληλα, επιτρέπει μετρήσεις σε διαφορετικά βάρη, αναλόγως της διάταξης των πηνίων και της συχνότητας λειτουργίας. Ωστόσο, η μέθοδος απαιτεί κατάλληλη βαθμονόμηση και η ακρίβεια των μετρήσεων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως η απόσταση των πηνίων, η παρουσία μεταλλικών αντικειμένων και οι εδαφικές ανομοιομορφίες.[1] Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η επαγωγική μέθοδος αποτελεί τον βασικό μηχανισμό μέτρησης της αγωγιμότητας του εδάφους, με στόχο την ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός αισθητήρα χαμηλού κόστους, που θα μπορεί να λειτουργεί χωρίς άμεση επαφή με το έδαφος και να παρέχει αξιόπιστες ενδείξεις για τη γονιμότητα και τη φυσική του κατάσταση. Την λειτουργία του θα την αναλύσουμε στο επόμενο κεφάλαιο εκτενέστερα.

2.5.1 Χρήσεις της επαγωγικής μεθόδου

Οι επαγωγικές μέθοδοι μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υπεδάφους αποτελούν ένα από τα πιο διαδεδομένα εργαλεία στη σύγχρονη γεωφυσική διασκόρπιση. Χρησιμοποιούνται ευρέως για τη **μη καταστροφική διερεύνηση του υπεδάφους**, προσφέροντας πληροφορίες που σχετίζονται με τη σύσταση, την υγρασία, την αλατότητα και τη δομή του εδάφους. Οι εφαρμογές τους εκτείνονται από τη **γεωργία**, για τη χαρτογράφηση περιοχών με διαφορετική αλατότητα ή υγρασία, έως την **αρχαιολογία και τη γεωτεχνική έρευνα**, όπου χρησιμοποιούνται για την **ανίχνευση ταφικών δομών, κενών, σπηλαίων ή σπηλαίων**. Ειδικότερα, μεταβολές στην ηλεκτρική αγωγιμότητα μπορούν να αποκαλύψουν την παρουσία **υπόγειων κοιλοτήτων ή σπηλαίων**, καθώς οι κενές περιοχές εμφανίζουν διαφορετική ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά σε σχέση με το συμπαγές έδαφος που τις περιβάλλει. Παράλληλα, οι μέθοδοι αυτές βρίσκουν εφαρμογή σε περιβαλλοντικές μελέτες, στη διαχείριση υδάτινων πόρων, καθώς και στην ανίχνευση ρύπανσης ή άλλων γεωλογικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους (όπως το να βλέπουν που έχει σωλήνες κάτω από το έδαφος και άλλα).



Σχήμα 2.5.1.1 Χαρτογράφηση εδάφους από μωβ περισσότερο αγώγιμο έως κόκκινο λιγότερο αγώγιμο[27]

Πολλοί θα έκαναν την ερώτηση ‘Τι διαφορά έχει με έναν ανιχνευτή μετάλλων τότε?’. Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν οι βασικές διαφορές μεταξύ ενός επαγωγικού μετρητή ηλεκτρικής αγωγιμότητας και ενός συμβατικού ανιχνευτή μετάλλων. Παρόλο που και οι δύο τεχνολογίες βασίζονται στη χρήση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και στη δημιουργία δευτερογενών ρευμάτων (eddy currents) σε αγώγιμα υλικά, οι στόχοι και οι αρχές λειτουργίας τους διαφέρουν σημαντικά. Ο επαγωγικός μετρητής αγωγιμότητας στοχεύει στη χαρτογράφηση της συνολικής αγωγιμότητας του υπεδάφους ή άλλων υλικών, προσφέροντας ποσοτική εκτίμηση φυσικών ιδιοτήτων. Αντίθετα, ο ανιχνευτής μετάλλων επικεντρώνεται στην ανίχνευση της παρουσίας μεμονωμένων μεταλλικών αντικειμένων, χωρίς να παρέχει άμεση πληροφορία για τη μαζική αγωγιμότητα ή άλλες φυσικές Παραμέτρους του περιβάλλοντος μέσου. Στις επόμενες ενότητες αναλύονται αναλυτικά οι διαφορές στις τεχνικές, τις συχνότητες λειτουργίας και τις δυνατότητες εφαρμογής των δύο τεχνολογιών[1].



Σχήμα 2.5.1.2 εμπορικός ανιχνευτής μετάλλου [33]

2.5.2 Τεχνικές Διαφορές

Η βασική τεχνική διαφορά μεταξύ ενός επαγωγικού μετρητή αγωγιμότητας και ενός ανιχνευτή μετάλλων έγκειται στο πώς επεξεργάζονται το σήμα που λαμβάνουν. Ο επαγωγικός μετρητής εφαρμόζει χαμηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικά πεδία και καταγράφει το δευτερογενές πεδίο που προκύπτει από την αγωγιμότητα του περιβάλλοντος μέσου. Η ανάλυση του σήματος γίνεται συνήθως σε επίπεδο πλάτους και φάσης, επιτρέποντας τον υπολογισμό της φαινομένης ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Αντίθετα, οι ανιχνευτές μετάλλων βασίζονται στην ανίχνευση απότομων αλλαγών στο σήμα που προκαλούνται από την παρουσία συμπαγών μεταλλικών αντικειμένων. Το σήμα επεξεργάζεται κυρίως εμπειρικά μέσω προκαθορισμένων δεικτών (target ID), χωρίς να παρέχεται ποσοτική μέτρηση φυσικών ιδιοτήτων[1].

2.5.3 Διαφορές Συχνότητας Λειτουργίας

Οι επαγωγικοί μετρητές αγωγιμότητας λειτουργούν συνήθως σε συχνότητες που κυμαίνονται από λίγα kHz έως μερικές εκατοντάδες kHz, με στόχο τη μέγιστη δυνατή διείσδυση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο υπέδαφος. Αντίθετα, οι ανιχνευτές μετάλλων χρησιμοποιούν συχνότητες από λίγα kHz έως και 1 MHz, προκειμένου να αυξήσουν την ευαισθησία σε μικρά μεταλλικά αντικείμενα που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια. Συνεπώς, οι ανιχνευτές μετάλλων είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν πιο επιφανειακά, ενώ οι επαγωγικοί μετρητές στοχεύουν σε μεγαλύτερα βάθη μέσω χαμηλότερων συχνοτήτων.

Κεφάλαιο 3ο: Γεωφυσική

3.1 Μοντέλο του McNeill

Η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με επαγωγική μέθοδο μέσω συζευγμένων πηνίων αποτελεί μία από τις πλέον αξιόπιστες τεχνικές για τη μη-παρεμβατική αξιολόγηση των εδαφικών ιδιοτήτων. Η τεχνική βασίζεται στη χρήση ενός πομπού (Tx), που δημιουργεί ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, και ενός ή περισσοτέρων πηνίων λήψης (Rx), τα οποία ανιχνεύουν το δευτερογενές μαγνητικό πεδίο που προκαλείται από τα επαγόμενα ρεύματα (eddy currents) στο αγωγίμο έδαφος. Η διαφορά φάσης και πλάτους μεταξύ του πρωτογενούς και του δευτερογενούς πεδίου σχετίζεται άμεσα με την φαινόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα του υπεδάφους[9][1]. Το μοντέλο του McNeill (1980)[1] προσφέρει ένα απλοποιημένο θεωρητικό πλαίσιο για την ερμηνεία των μετρήσεων επαγωγικής αγωγιμότητας. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην προσέγγιση "low induction number", σύμφωνα με την οποία το δευτερογενές μαγνητικό πεδίο είναι γραμμικά ανάλογο της φαινόμενης αγωγιμότητας και επιτρέπει γρήγορους υπολογισμούς χωρίς τη χρήση πολύπλοκων αριθμητικών μοντέλων. Η συμβολή του McNeill υπήρξε καθοριστική στην ανάπτυξη φορητών επαγωγικών οργάνων μέτρησης, όπως το EM38 και EM31, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στη γεωργία ακριβείας και στη γεωφυσική χαρτογράφηση. Η μέθοδος αυτή προσφέρει το πλεονέκτημα της μη επαφικής μέτρησης, καθιστώντας την ιδανική για ταχύτατες επιφανειακές ή ημιβαθείς μετρήσεις σε εκτεταμένες γεωργικές εκτάσεις, χωρίς την ανάγκη εισαγωγής ηλεκτροδίων στο έδαφος.

3.1.1 Μαθηματική μοντελοποίηση

Η βασική εξίσωση του McNeill περιγράφει τη σχέση μεταξύ του σήματος που μετράται από έναν αισθητήρα ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (EMI) και της φαινομενικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC_a του υπεδάφους. Υπό την παραδοχή ότι το υπέδαφος είναι ομοιογενές και ότι ισχύει το καθεστώς χαμηλού αριθμού επαγωγής (Low Induction Number – LIN), ο McNeill απλοποίησε την περίπλοκη αλληλεπίδραση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, καθιστώντας εφικτό τον άμεσο υπολογισμό της αγωγιμότητας από τις μετρήσεις του αισθητήρα. Η θεμελιώδης εξίσωση βασίζεται στην αναλογία του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου H_s , που παράγεται από ρεύματα επαγωγής στο υπέδαφος, προς το πρωτογενές μαγνητικό πεδίο H_p που παράγεται από τον πομπό. Αυτό μπορεί να μοντελοποιηθεί με τον παρακάτω μαθηματικό τύπο[10-12]:

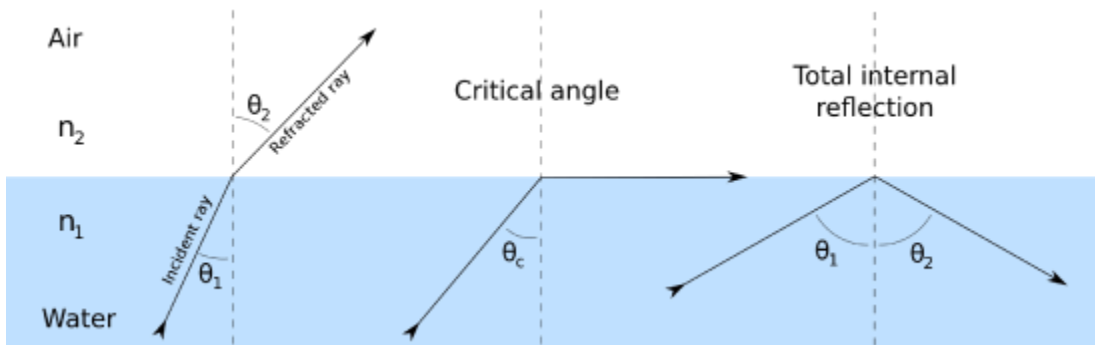
$$EC_a = \frac{4}{2\pi f \mu_0 S^2} \cdot IM \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \quad (3.1.1)$$

Όπου $S(m)$ η απόσταση πομπού - δέκτη

3.2 Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία στο Έδαφος

Ο άμεσος στόχος μιας γεωφυσικής μελέτης είναι η εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τη χωρική κατανομή μίας ή περισσότερων φυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους, βασισμένη σε ένα περιορισμένο σύνολο μετρήσεων ενός σχετικού φυσικού πεδίου στην επιφάνεια της Γης ή σε άλλο προσβάσιμο σημείο. Στην περίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής (EM) επαγωγικής μεθόδου, η κυριότερη φυσική ιδιότητα που μας ενδιαφέρει είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία ανιχνεύεται μέσω της αλληλεπίδρασης με χρονικά μεταβαλλόμενα μαγνητικά ή/και ηλεκτρικά πεδία. Η διαδικασία μετατροπής των μετρήσεων πεδίου σε μια εκτίμηση της χωρικής κατανομής ιδιοτήτων ονομάζεται μοντελοποίηση ή ερμηνεία, ενώ η επίσημη μαθηματική διαδικασία που υποστηρίζει αυτή τη μετατροπή ονομάζεται αντιστροφή. Ωστόσο, η γεωφυσική αντιστροφή είναι εκ φύσεως δύσκολη, λόγω της ύπαρξης πολλών αμφισημιών. Στην περίπτωση των EM μεθόδων, αν και οι βασικές εξισώσεις που διέπουν το φαινόμενο (εξισώσεις του Maxwell) είναι γνωστές και επιτρέπουν την ποσοτική περιγραφή σε απλοποιημένες περιπτώσεις, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί στις πρακτικές

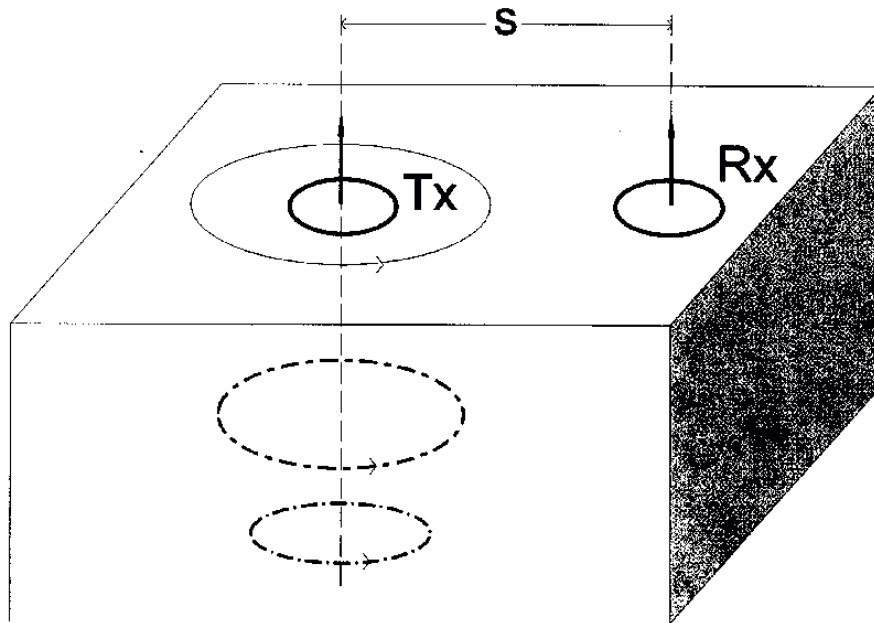
δυνατότητες μοντελοποίησης, ειδικά όταν πρόκειται για γεωλογικά περιβάλλοντα με πολύπλοκη δομή. Στην πραγματικότητα, λίγα γεωλογικά σενάρια μπορούν να περιγραφούν επαρκώς με απλές γεωμετρικές μορφές, όπως επίπεδα και οριζόντια στρώματα. Για τον λόγο αυτό, η μετάβαση από τις μετρήσεις πεδίου σε μια αξιόπιστη απεικόνιση της υπεδάφους δομής απαιτεί τη συμβολή του ανθρώπινου διερμηνέα, ο οποίος καθοδηγεί την ερμηνευτική διαδικασία, στηριζόμενος σε ποιοτική κατανόηση των φυσικών μηχανισμών που αλληλοεπιδρούν με τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ο διερμηνέας καλείται να διακρίνει τα σημαντικά χαρακτηριστικά των δεδομένων από τα λιγότερο σημαντικά και να εξάγει νοητικά μοντέλα που υπερβαίνουν τις υπολογίσιμες περιπτώσεις. Η νοητική απεικόνιση των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων είναι ιδιαίτερα απαιτητική, σε αντίθεση με μεθόδους όπως η βαρύτητα ή το μαγνητικό πεδίο, όπου οι γεωφυσικοί μπορούν να οπτικοποιήσουν εύκολα το δυναμικό πεδίο γύρω από μία πηγή. Στις EM μεθόδους, η ανάλυση περιπλέκεται επειδή απαιτεί την ταυτόχρονη κατανόηση δύο διανυσματικών πεδίων (ηλεκτρικού και μαγνητικού), καθώς και τη χρονική εξάρτηση της απόκρισης. Επιπλέον, επειδή οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με κινητή πηγή, συνήθως υπάρχουν ελάχιστα σημεία παρατήρησης για κάθε διαμόρφωση του πεδίου, δυσκολεύοντας περαιτέρω τη διαδικασία ερμηνείας. Ιδιαίτερη δυσκολία παρουσιάζει και η διάχυση του πεδίου σε χαμηλές συχνότητες, η οποία δεν ακολουθεί απλούς κανόνες, όπως η διάδοση κυμάτων σε υψηλές συχνότητες, όπου η θεωρία του Snell προσφέρει μία προσεγγιστική κατανόηση.



3.1.1 Νόμος του Snell Διάθλαση, κρίσιμη γωνία και ολική εσωτερική ανάκλαση σε μια διεπαφή [30]

Αν και η μαθηματική θεωρία είναι απαραίτητη για τη μοντελοποίηση των EM πεδίων, η υπερβολική προσήλωση στις μαθηματικές λεπτομέρειες μπορεί να αποσπάσει τον ερευνητή από τη φυσική κατανόηση των φαινομένων, η οποία είναι απαραίτητη για την ορθή ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων και να βρεθεί σε δυσκολίες όπως εγώ στο πειραματικό στάδιο. Η επαγωγική μέθοδος μέτρησης αγωγιμότητας βασίζεται στη **διάδοση και αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων** με το υπέδαφος. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο δημιουργείται από το **πηνίο εκπομπής (Tx)**, το οποίο διαρρέεται από **εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας**. Το ταλαντευόμενο ρεύμα αυτό δημιουργεί ένα **πρωτογενές μαγνητικό πεδίο**, το οποίο μεταβάλλεται

χρονικά και εισχωρεί στο έδαφος. Καθώς το πρωτογενές πεδίο εισέρχεται σε αγώγιμο μέσο, όπως το έδαφος, επάγει τοπικά **κυκλικά ρεύματα (eddy currents)**, τα οποία με τη σειρά τους δημιουργούν **δευτερογενές μαγνητικό πεδίο**. Η συνολική απόκριση που ανιχνεύεται από το πηνίο λήψης (**Rx**) αποτελεί το άθροισμα του πρωτογενούς και του δευτερογενούς πεδίου[1].



Σχήμα 3.1.1.1 Επαγόμενη ροή ρεύματος (ομογενές μισό διάστημα) [9]

Η ένταση και η φάση του δευτερογενούς πεδίου σχετίζονται άμεσα με την **ηλεκτρική αγωγιμότητα** των στρωμάτων του εδάφους. Όσο **πιο αγώγιμο είναι το έδαφος**, τόσο **εντονότερα είναι τα επαγόμενα ρεύματα**, και άρα **ισχυρότερο το δευτερογενές πεδίο** που ανιχνεύεται από τον δέκτη. Στην ουσία το βάθος διείσδυσης και η ευαισθησία της μέτρησης εξαρτάται από 4 παράγοντες που θα εξηγήσω παρακάτω.[9]

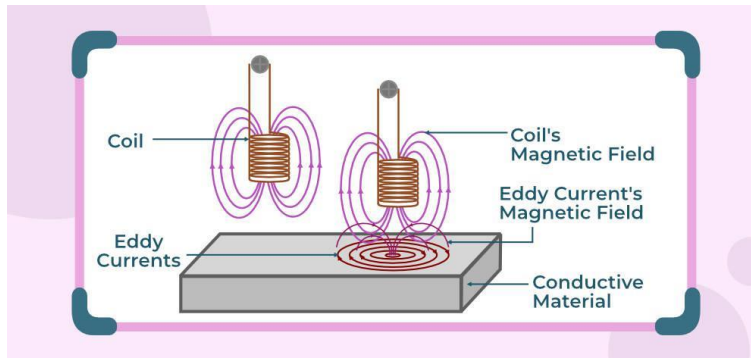
- Βάθος διείσδυσης
- Απόσταση μεταξύ των κέντρων από τα πηνία
- Συχνότητα λειτουργίας
- Επαγόμενα ρεύματα

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο αυτή ανήκουν συνήθως στο ραδιοφωνικό φάσμα (10KHz – 1.5MHz) και η συμπεριφορά τους στο υπέδαφος περιγράφεται με προσεγγίσεις των εξισώσεων του Maxwell υπό την παραδοχή του χαμηλού αριθμού επαγωγής. Σε αυτή την περίπτωση, το μαγνητικό πεδίο θεωρείται ψευδό στατικό, γεγονός που επιτρέπει απλοποιημένη θεωρητική ανάλυση και χρήση ευθέων αναλογιών μεταξύ σήματος και αγωγιμότητας[1].

3.3 Επαγόμενα ρεύματα (eddy currents)

Τα **επαγόμενα ρεύματα (eddy currents)** είναι το βασικό φυσικό φαινόμενο που αξιοποιείται στην επαγωγική μέθοδο μέτρησης της αγωγιμότητας. Πρόκειται για **κλειστά κυκλικά ρεύματα**, τα οποία δημιουργούνται μέσα σε ένα αγώγιμο μέσο (όπως το έδαφος) όταν αυτό εκτίθεται σε **μεταβαλλόμενο**

μαγνητικό πεδίο. Η δημιουργία τους περιγράφεται από τον **νόμο του Faraday**, σύμφωνα με τον οποίο κάθε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει ηλεκτρικό ρεύμα στο αγωγίμο υλικό.[2]



Σχήμα 3.1.1 Ρεύματα Φουκό [31]

Όταν το εναλλασσόμενο ρεύμα διαρρέει το πηνίο εκπομπής (Tx), το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται **μεταβάλλεται με τη συχνότητα λειτουργίας** της διάταξης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την **επαγωγή ρευμάτων εντός του εδάφους**, των οποίων η ένταση εξαρτάται από την τοπική **αγωγιμότητα** και από την **ένταση του αρχικού πεδίου**. Τα επαγόμενα ρεύματα κυκλοφορούν κάθετα στις γραμμές του μαγνητικού πεδίου και **δημιουργούν το δικό τους μαγνητικό πεδίο**, το οποίο ανιχνεύεται από το πηνίο λήψης (Rx). Το **πλάτος και η φάση** του δευτερογενούς αυτού πεδίου περιέχουν πληροφορίες για την αγωγιμότητα του εδάφους και τη **κατανομή της σε βάθος**. Όσο πιο αγωγίμο είναι το υπόστρωμα, τόσο ισχυρότερα είναι τα ρεύματα και άρα πιο έντονο το ανιχνευόμενο πεδίο[7,1]. Στην πράξη, η ένταση των eddy currents **μειώνεται εκθετικά με το βάθος**, καθώς το μαγνητικό πεδίο εξασθενεί και η ενέργεια που απορροφάτε αυξάνεται. Αυτό το φαινόμενο αποτελεί και τη βάση για την έννοια του **βάθους διείσδυσης (skin depth)**, το οποίο εξετάζεται στην επόμενη ενότητα.

3.4 Βάθος διείσδυσης (Skin Depth)

Το βάθος διείσδυσης ή skin depth είναι μία φυσική ποσότητα που περιγράφει το μέγιστο αποτελεσματικό βάθος στο οποίο ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να εισχωρήσει μέσα σε ένα αγωγίμο μέσο, όπως το έδαφος, πριν εξασθενήσει σημαντικά. Με απλά λόγια, είναι το βάθος στο οποίο η ένταση του πεδίου μειώνεται στο $1/e$ (περίπου 37%) της αρχικής του τιμής στην επιφάνεια[1].

Η μαθηματική εξίσωση για το βάθος διείσδυσης δίνεται από:

$$\delta(m) = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\sigma F\pi}} \quad (3.4.1)$$

Όπου :

- δ είναι το βάθος διείσδυσης (σε μέτρα)
- μ η μαγνητική διαπερατότητα (συνήθως θέτουμε $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$)
- σ η ηλεκτρική αγωγιμότητα (S/m)
- $\omega = 2\pi f \frac{rad}{sec}$ η κυκλική συχνότητα

3.5 Περιορισμοί και Όρια Εφαρμογής της Επαγωγικής Μεθόδου

Παρότι αυτή η μέθοδος αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για τη μη παρεμβατική εκτίμηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους, παρουσιάζει ορισμένους **τεχνικούς και φυσικούς περιορισμούς**, οι οποίοι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία των μετρήσεων και τη σχεδίαση της διάταξης. Ένας από τους βασικότερους περιορισμούς αφορά το **βάθος διείσδυσης**, το οποίο εξαρτάται από τη **συχνότητα λειτουργίας** και την **τοπική αγωγιμότητα** του εδάφους, όπως περιεγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Συγκεκριμένα:

- Σε **υψηλές συχνότητες** και **αγώγιμα εδάφη**, το βάθος από το οποίο προέρχεται το σήμα είναι **πολύ ρηχό**, περιορίζοντας την πληροφορία σε επιφανειακά στρώματα.
- Αντίθετα, **πολύ χαμηλές συχνότητες** αυξάνουν το βάθος, αλλά μειώνουν την **ευαισθησία** και την **ανάλυση**.

Επιπλέον, η μέθοδος βασίζεται στην παραδοχή ότι το μέσο είναι **ομοιογενές και ισοτροπικό**, κάτι που δεν ισχύει σχεδόν πάντα στην πράξη. Στο πεδίο το έδαφος έχει **Ανομοιογένειες**, μερικά παραδείγματα είναι οι στρώσεις με διαφορετική αγωγιμότητα που επηρεάζονται από βράχους, ρίζες ή σωλήνες, τέτοιοι παράγοντες μπορούν να προκαλέσουν **παραμορφώσεις στο σήμα** και να οδηγήσουν σε λανθασμένη ερμηνεία[1].

Άλλοι πρακτικοί περιορισμοί περιλαμβάνουν:

- Την **παρουσία μεταλλικών αντικειμένων** ή καλωδιώσεων κοντά στη διάταξη, που επηρεάζουν τα πεδία.
- Την **απόσταση μεταξύ των πηνίων** Αν είναι πολύ μικρή, μειώνεται η ευαισθησία· αν είναι πολύ μεγάλη, μειώνεται η ακρίβεια.
- Την **αδυναμία διάκρισης μεταξύ διαφορετικών μη αγώγιμων στρωμάτων** (π.χ. χαλίκια ή άμμος χαμηλής αγωγιμότητας), καθώς η μέθοδος ανιχνεύει κυρίως αγώγιμες δομές.
- Την **ευαισθησία σε εξωτερικό ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο**, ειδικά σε αστικές ή βιομηχανικές περιοχές.

Τέλος, σημαντικό ρόλο παίζει και η **θερμοκρασία**, καθώς αυτή αλλάζει την χημεία του εδάφους δηλαδή την διαλυτότητα των ιόντων και άρα την τιμή της φαινόμενης αγωγιμότητα αν και αυτός ο παράγοντας δεν είναι καθοριστικός για επιφανειακές εφαρμογές μικρού εύρους.

3.6 In phase, quadrature component

Στις ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις, το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης αποτελείται από δύο βασικά μέρη: την **in-phase** και την **quadrature** συνιστώσα.

$$V(t) = A_{in} \cdot \cos(\omega t) + A_Q \cdot \sin(\omega t) \quad (3.6.1)$$

Αυτές οι δύο συνιστώσες προκύπτουν από τη **φασική σχέση** του δευτερογενούς σήματος (που προκαλείται από το έδαφος) σε σχέση με το πρωτογενές σήμα που εκπέμπει ο πομπός.

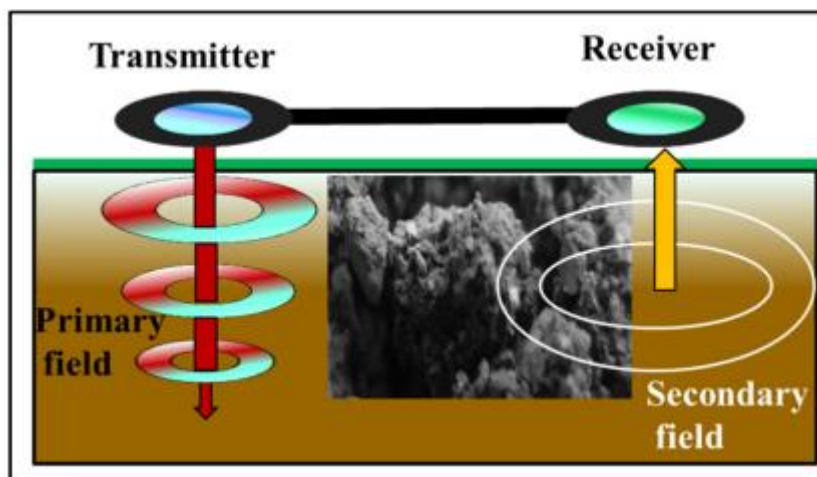
- Η **in-phase** συνιστώσα είναι το μέρος του σήματος που είναι **στην ίδια φάση** με το πρωτογενές πεδίο. Συνήθως σχετίζεται με **μαγνητικές ιδιότητες** του εδάφους, όπως η **μαγνητική επιδεκτικότητα**.
- Η **quadrature** συνιστώσα είναι το μέρος του σήματος που είναι **καθυστερημένο κατά 90 μοίρες** σε σχέση με το πρωτογενές πεδίο. Αυτή η συνιστώσα σχετίζεται άμεσα με την **ηλεκτρική αγωγιμότητα**, δηλαδή την ικανότητα του εδάφους να επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω των διαλυμένων αλάτων και της υγρασίας που περιέχει.

Αναλύοντας αυτές τις δύο συνιστώσες, μπορούμε να εξάγουμε πολύτιμες πληροφορίες τόσο για τις ηλεκτρικές όσο και για τις μαγνητικές ιδιότητες του υπεδάφους, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε γεωργικές, περιβαλλοντικές και γεωφυσικές εφαρμογές[1].

3.7 Μέτρηση της αγωγιμότητας

Η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί με επαγωγική μέθοδο, η οποία βασίζεται στη δημιουργία και ανίχνευση δευτερευόντων μαγνητικών πεδίων που προκαλούνται από ρεύματα Foucault στο αγώγιμο υπόστρωμα. Η τυπική διάταξη περιλαμβάνει δύο ομοαξονικά πηνία (πομπό και δέκτη), με σταθερή μεταξύ τους απόσταση s . Το πηνίο εκπομπού διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας F , το οποίο δημιουργεί πρωτεύον μαγνητικό πεδίο H_p . Το πεδίο αυτό επάγει κυκλικά ρεύματα στο υπέδαφος, τα οποία με τη σειρά τους δημιουργούν δευτερεύον πεδίο H_s . Ο δέκτης ανιχνεύει το συνολικό πεδίο

$$H_{total} = H_p + H_s \quad (3.7.1)$$



Σχήμα 3.7.1 Σχηματική κατασκευή της αρχής μέτρησης EM38 (πομπός, δέκτης, πρωτεύον και δευτερεύον πεδίο)[27].

Σε καθεστώς χαμηλού αριθμού επαγωγής (Low Induction Number, $\beta = \omega \mu_0 s^2 \ll 1$), το δευτερεύον πεδίο είναι γραμμικά ανάλογο της φαινόμενης αγωγιμότητας του μέσου σ . Η συσχέτιση δίνεται από τη σχέση[1,7,8,9]:

$$\sigma = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \cdot \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \quad (3.7.2)$$

Στην πράξη, τα μεγέθη H_s και H_p δεν μετρούνται άμεσα, αλλά εκτιμώνται μέσω των τάσεων που παράγονται στα πηνία του δέκτη και του πομπού. Η σχέση εκφράζεται ως εξής:

$$quadtrature\ component = \frac{H_s}{H_p} \approx \frac{V_S}{V_P} \cdot Si n(\Phi) \quad (3.7.3)$$

Η διαφορά φάσης $\Delta\phi$ είναι σημαντική καθώς διορθώνει τη συνιστώσα του δευτερογενούς πεδίου που είναι κάθετη στο πρωτογενές πεδίο, επιτρέποντας την εκτίμηση της αγωγιμότητας μέσω της quadrature συνιστώσας (το μέρος του σήματος που καθυστερεί 90°). Αντίστοιχα, η in-phase συνιστώσα (το μέρος που είναι στη φάση με το πρωτογενές σήμα) είναι ανάλογη της μαγνητικής επιδεκτικότητας του μέσου, που εκφράζει την ικανότητα του υλικού να ενισχύει το μαγνητικό πεδίο.

$$In - phase = \frac{H_s}{H_p} \approx \frac{V_s}{V_p} \cdot \cos(\Phi) \quad (3.7.4)$$

Η διαφορά φάσης ϕ χρησιμεύει για τη διόρθωση της προβολής του H_s στην κατεύθυνση του H_p , καθώς το σήμα του δέκτη μετρά μόνο τη συνιστώσα $H_s[1]$. Οπότε για να μετρήσουμε την αγωγιμότητα χρησιμοποιούμε τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$\sigma = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \cdot IM\left(\frac{H_s}{H_p}\right) = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \cdot \frac{V_s}{V_p} \cdot \sin(\Phi) \quad (3.7.5)$$

Κεφάλαιο 4ο: Υλοποίηση

4.1 Υλοποίηση Πηνίων

Κάθε πραγματικό πηνίο παρουσιάζει, εκτός από επαγωγή, και παρασιτική χωρητικότητα λόγω της φυσικής του κατασκευής. Η αλληλεπίδραση αυτών των δύο στοιχείων οδηγεί στο σχηματισμό ενός συντονιστικού κυκλώματος LC, το οποίο εμφανίζει χαρακτηριστική συχνότητα συντονισμού:

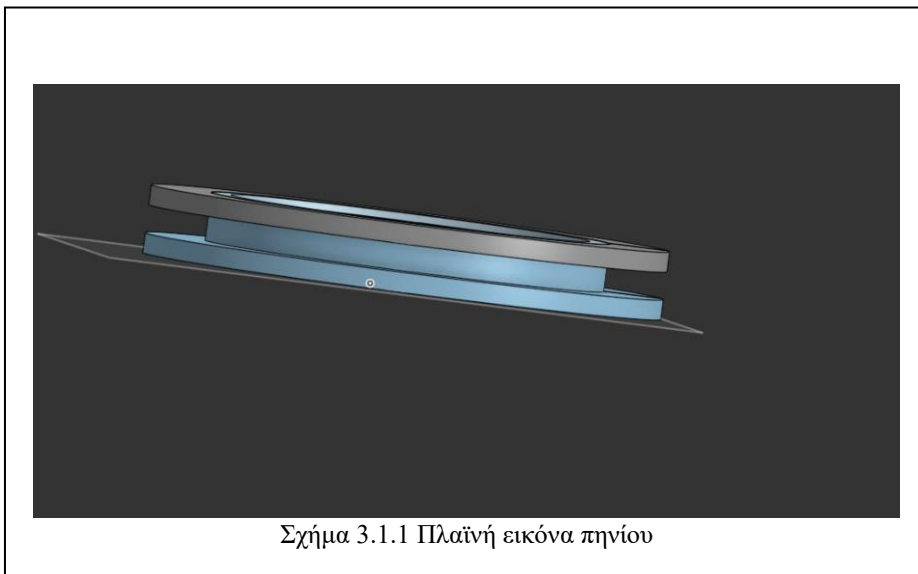
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_p}} \quad (4.1.1)$$

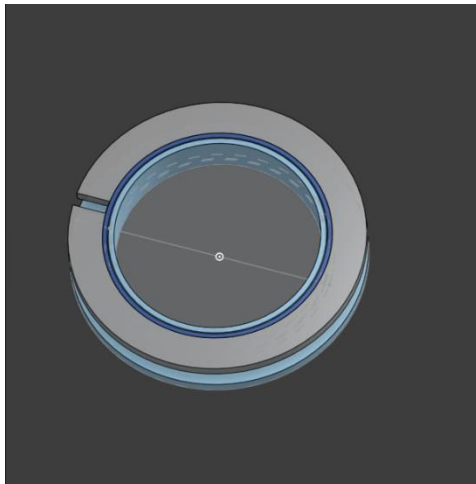
Στη συχνότητα αυτή, το κύκλωμα παρουσιάζει μέγιστη απόκριση πλάτους και απότομη αλλαγή στη φασική συμπεριφορά, μεταβαίνοντας από επαγωγική σε χωρητική συμπεριφορά. Αν και αυτή η ενίσχυση μπορεί να φαίνεται επιθυμητή, στην πράξη καθιστά το κύκλωμα εξαιρετικά ευαίσθητο σε μικρές μεταβολές εξωτερικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η χωρητικότητα σύνδεσης, ή ακόμα και μικρές γεωμετρικές αλλαγές.

Επιπλέον, κοντά στη συχνότητα συντονισμού, η φασική συμπεριφορά του κυκλώματος κυριαρχείται από τα εσωτερικά χαρακτηριστικά του πηνίου και όχι από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού που μελετάται. Αυτό καθιστά τη μέτρηση αναξιόπιστη, καθώς οι μεταβολές στην απόκριση δεν σχετίζονται απαραίτητα με το δείγμα αλλά με το ίδιο το κύκλωμα.[5]

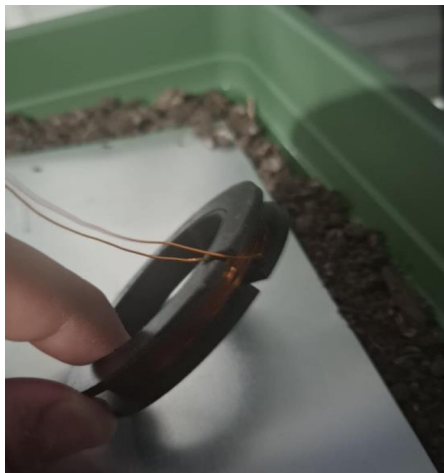
Για τον λόγο αυτό, η συχνότητα λειτουργίας θα πρέπει να επιλέγεται σημαντικά χαμηλότερη από τη συχνότητα συντονισμού του πηνίου (τουλάχιστον κατά έναν παράγοντα δύο ή τρία), ώστε να εξασφαλίζεται σταθερή και φυσικά ερμηνεύσιμη συμπεριφορά. Με τον τρόπο αυτό, η φασική και η πλεγματική απόκριση του αισθητήρα σχετίζονται αξιόπιστα με τις ηλεκτρικές ιδιότητες του δείγματος, όπως η αγωγιμότητα.[1,6] Για την υλοποίηση της πειραματικής διάταξης κατασκευάστηκαν συνολικά τέσσερα πηνία, χρησιμοποιώντας τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing) με υλικό PLA. Τα δύο πρώτα πηνία είχαν εξωτερική διάμετρο 5 cm και πάχος τοιχώματος 1 mm. Κατασκευάστηκαν συμμετρικά ώστε να χρησιμοποιηθούν ως πομπός και δέκτης, και σε καθένα τυλίχθηκαν **60 σπείρες** από μονωμένο χαλκό σύρμα, διαμέτρου 0.4 mm με αυτεπαγωγή 315uH. Η επιλογή αυτής της διαμέτρου και του αριθμού σπειρών έγινε με στόχο τη βελτιστοποίηση του σήματος σε ρηχό βάθος (~5–10 cm), διατηρώντας παράλληλα μικρό μέγεθος και επαγωγή συμβατή με τις επιθυμητές συχνότητες λειτουργίας (20–50 kHz).

Η μηχανική κατασκευή των πηνίων, η γεωμετρία τους και ο τρόπος περιέλιξης απεικονίζονται στις παρακάτω φωτογραφίες.

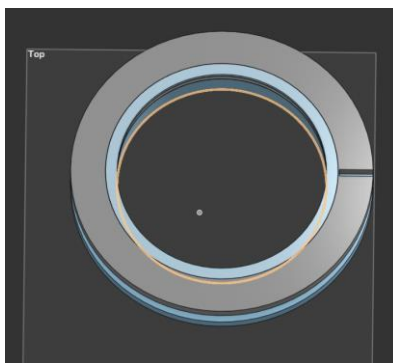




Σχήμα 3.1.1.1 Πηνίο κάτω μέρος



Σχήμα 3.1.1.2 Πηνίο με τις σπείρες του



Σχήμα 3.1.1.3 Πάνω μεριά

Και η τελική κατασκευή :



Σχήμα 3.1.1.4 Τελική κατασκευή

4.2 Κατανομή ευαισθησίας

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται συχνά ένας εμπειρικός κανόνας για την εκτίμηση του βάθους διερεύνησης επαγωγικών διατάξεων, σύμφωνα με τον οποίο:

- η μέγιστη ευαισθησία καταγράφεται περίπου στο $0.5 \times S$
- ενώ το μέγιστο βάθος διερεύνησης φθάνει έως και το $1.5 \times S$ όπου S είναι η απόσταση μεταξύ των πηνίων.

Ο εμπειρικός αυτός νόμος παρέχει μια πρώτη εκτίμηση του βάθους στο οποίο η συσκευή παρουσιάζει σημαντική απόκριση, και χρησιμοποιείται ευρέως ως οδηγός στον σχεδιασμό και την ερμηνεία επαγωγικών μετρήσεων. Αυτή η συνάρτηση δείχνει πόσο έντονα συμβάλλει κάθε σημείο βάθους z στο τελικό σήμα που ανιχνεύεται από τον δέκτη. Αυτός ο τύπος είναι **χωρίς μονάδες** και προέρχεται από την προσέγγιση του **McNeill (1980)** υπό την προϋπόθεση ότι είμαστε σε συνθήκες **χαμηλού επαγωγικού αριθμού (Low Induction Number)**.

$$Z = \frac{Z_{\text{πραγματικό}}}{S} \quad (4.2.1)$$

- Z πραγματικό : πραγματικό βάθος (σε όποια μονάδα έχουμε και το S),
- s : απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη (σε ίδια μονάδα με το z).

4.2.1 κάθετη διάταξη πηνίων (vertical dipole)

Στην κάθετη διάταξη (vertical dipole), ο πομπός και ο δέκτης τοποθετούνται κάθετα στο έδαφος και ευθυγραμμίζονται ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Η κατανομή ευαισθησίας για αυτή τη διάταξη δίνεται από την εξίσωση:

$$\Phi_v(z) = \frac{4z}{(4z^2+1)^{\frac{3}{2}}} \quad (4.2.1.1)$$

Η παραπάνω συνάρτηση περιγράφει πόσο έντονα επηρεάζει το κάθε βάθος z τη μέτρηση της φαινομένης αγωγιμότητας. Η μέγιστη ευαισθησία εμφανίζεται περίπου στο μισό της απόστασης s μεταξύ πομπού και δέκτη. Για παράδειγμα, με $s=20$ cm, η μέγιστη τιμή εμφανίζεται περίπου στα 10 cm βάθος. Η κατανομή έχει καμπανοειδή μορφή και συγκεντρώνεται στα ρηχά στρώματα του εδάφους, καθιστώντας αυτή τη διάταξη κατάλληλη για επιφανειακή διερεύνηση.

4.2.2 οριζόντια διάταξη πηνίων (horizontal dipole)[1]

Στην οριζόντια διάταξη, τα δύο πηνία τοποθετούνται παράλληλα στο έδαφος και συνήθως ευθυγραμμίζονται στον ίδιο οριζόντιο άξονα. Η κατανομή ευαισθησίας σε αυτή την περίπτωση δίνεται από τη συνάρτηση:

$$\Phi_H(z) = 2 - \frac{4z}{(4z^2+1)^{\frac{1}{2}}} \quad (4.2.2.1)$$

Η ευαισθησία εδώ είναι λιγότερο συγκεντρωμένη σε επιφανειακά στρώματα και κατανομημένη σε μεγαλύτερο βάθος. Αυτό καθιστά την οριζόντια διάταξη πιο κατάλληλη για βαθύτερες μετρήσεις, αν και η διακριτική ικανότητα στα ρηχά στρώματα είναι μικρότερη.

4.3 Αθροιστική απόκριση $R(z)$ [1]

Οι συναρτήσεις $R(z)$ εκφράζουν τη συνολική συνεισφορά στο σήμα από όλα τα βάθη από την επιφάνεια μέχρι το βάθος Z . Δηλαδή, περιγράφουν το ποσοστό του σήματος που έχει ήδη "συλληχθεί" μέχρι το βάθος αυτό.

4.3.1 Για κάθετη διάταξη

Η αντίστοιχη αθροιστική απόκριση για την οριζόντια διάταξη είναι:

$$R_V(z) = \frac{1}{\sqrt{4z^2+1}} \quad (4.3.1.1)$$

Σε αυτή την περίπτωση, η συνεισφορά από μεγαλύτερα βάθη παραμένει σημαντική για μεγαλύτερο εύρος τιμών του z . Αυτό σημαίνει ότι η οριζόντια διάταξη "βλέπει" βαθύτερα, αλλά με μικρότερη ανάλυση κοντά στην επιφάνεια.

4.3.2 Για οριζόντια διάταξη [1]

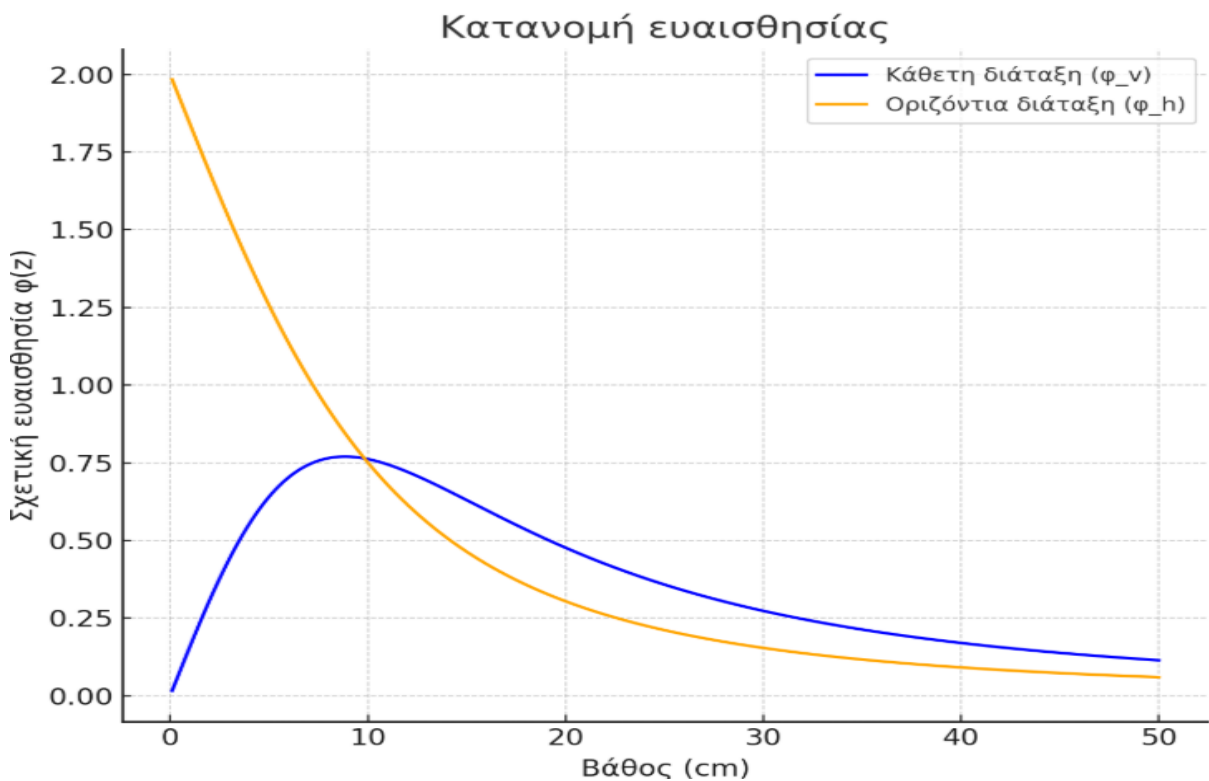
Η αντίστοιχη αθροιστική απόκριση για την οριζόντια διάταξη είναι:

$$R_H(z) = \sqrt{4Z^2 + 1} - 2Z \quad (4.3.2.1)$$

Σε αυτή την περίπτωση, η συνεισφορά από μεγαλύτερα βάθη παραμένει σημαντική για μεγαλύτερο εύρος τιμών του z . Αυτό σημαίνει ότι η οριζόντια διάταξη “βλέπει” βαθύτερα, αλλά με μικρότερη ανάλυση κοντά στην επιφάνεια.

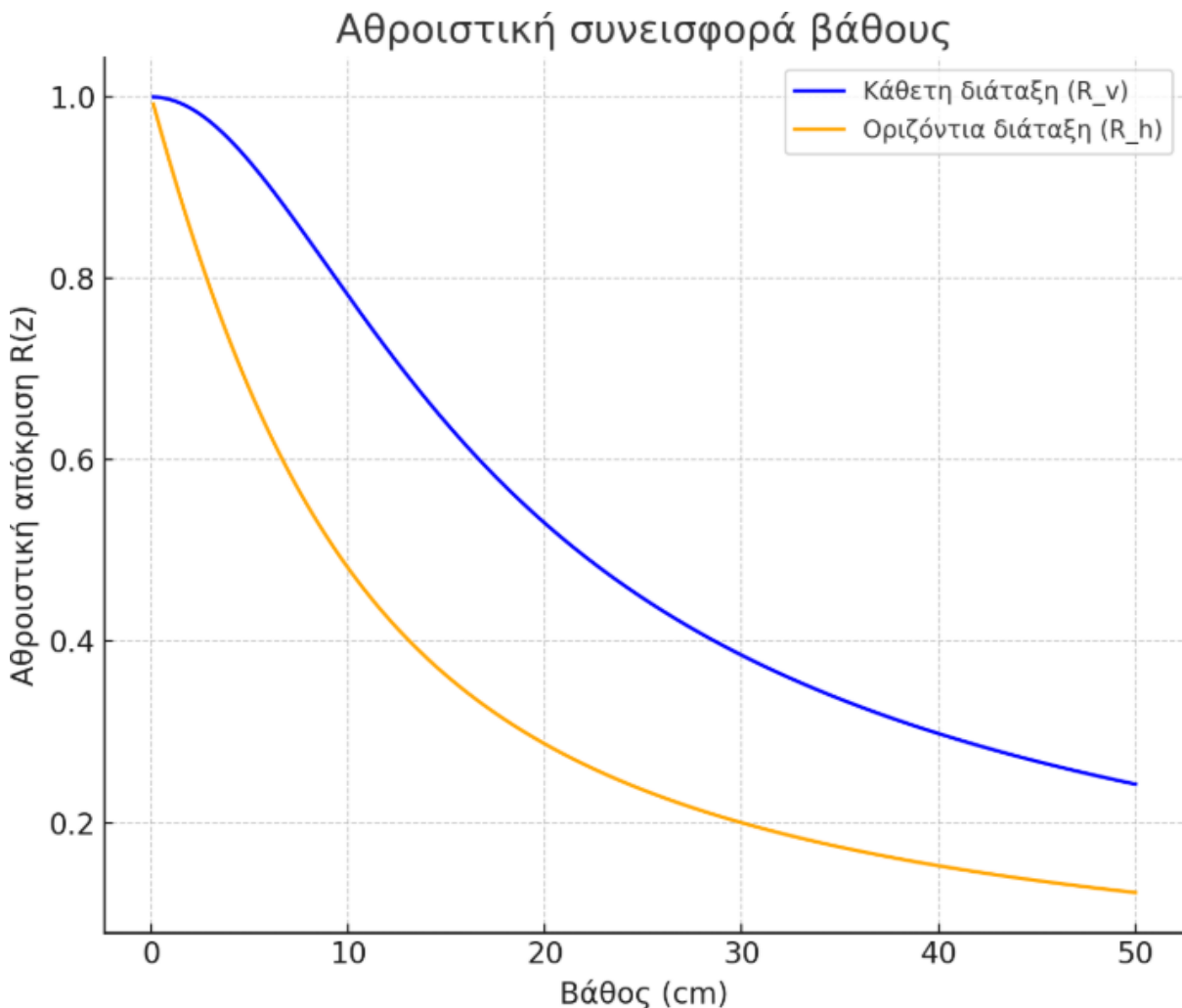
4.4 Αποτέλεσμα Κατανομής ευαισθησίας

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η σχετική ευαισθησία σε συνάρτηση με το βάθος, για κάθετη και οριζόντια διάταξη πηνίων με απόσταση $S=25\text{cm}$. Για την απεικόνιση των θεωρητικών καμπυλών της σχετικής κατανομής ευαισθησίας και της αθροιστικής απόκρισης ως προς το βάθος, χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Python. Με βάση τους μαθηματικούς τύπους που προκύπτουν από τη θεωρία του McNeill (1980), υπολογίστηκαν οι συναρτήσεις για διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη, και δημιουργήθηκαν διαγράμματα που αποτυπώνουν τη μεταβολή της ευαισθησίας σε σχέση με το βάθος για κάθε διάταξη (κάθετη και οριζόντια). Παρατηρούμε ότι η κάθετη διάταξη (μπλε καμπύλη) έχει μέγιστο περίπου στα 12.5 cm, δηλαδή στο μισό της απόστασης των πηνίων, όπως προβλέπει η θεωρία. Η οριζόντια διάταξη (πορτοκαλί) καταγράφει πιο αμβλεία κατανομή και είναι πιο ευαίσθητη σε βαθύτερα στρώματα. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει την αναμενόμενη συμπεριφορά των διατάξεων και αναδεικνύει τη σημασία της επιλογής γεωμετρίας ανάλογα με το επιθυμητό βάθος διερεύνησης.



Σχήμα 4.3.24.1 Κατανομή ευαισθησίας της κατασκευής μου με $S = 25\text{cm}$

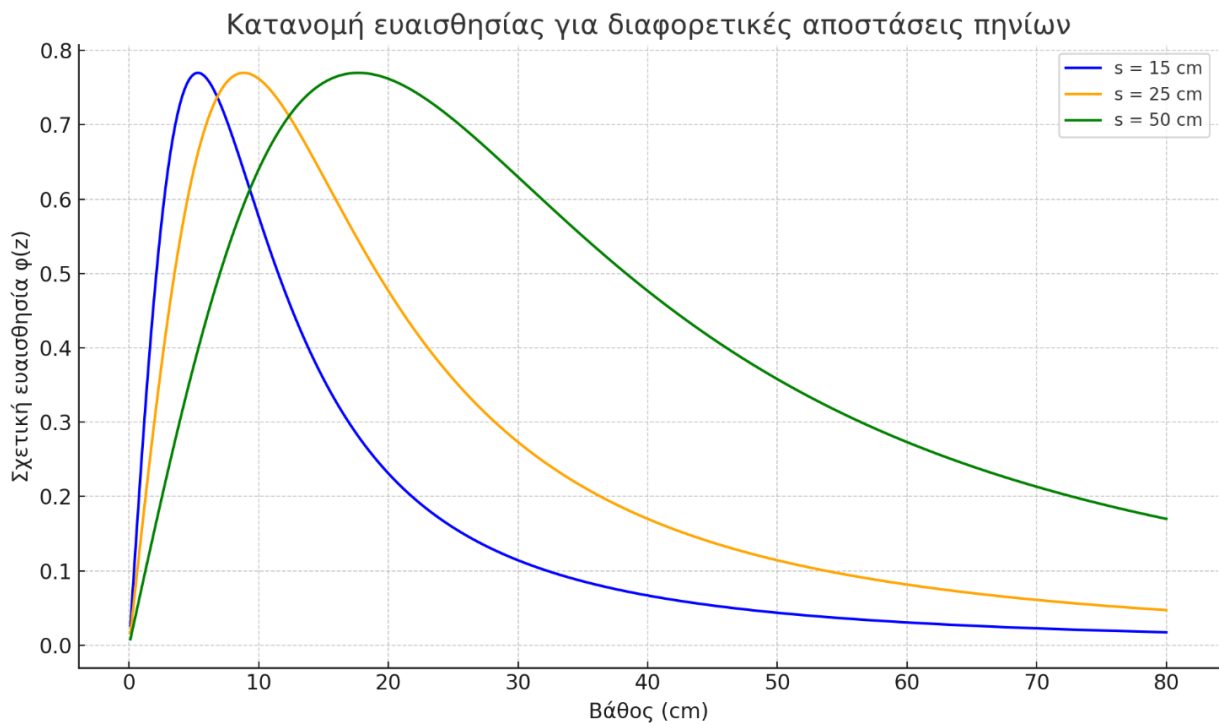
Το παρακάτω γράφημα απεικονίζει την αθροιστική απόκριση ως προς το βάθος για τις δύο γεωμετρικές διατάξεις. Όπως φαίνεται, η κάθετη διάταξη συγκεντρώνει το μεγαλύτερο μέρος του σήματος σε μεγάλα βάθη, ενώ η οριζόντια συνεχίζει να συγκεντρώνει σημαντική συνεισφορά και από επιφανειακά στρώματα. Αυτό το αποτέλεσμα αναδεικνύει το βάθος διείσδυσης κάθε διάταξης και βοηθά στην κατανόηση της προέλευσης του σήματος σε πραγματικές μετρήσεις.



Σχήμα 4.3.2 Αθροιστική συνεισφορά βάθους

4.4.1 Παράδειγμα με διαφορετικές αποστάσεις πηνίων

Παρακάτω παρουσιάζεται η επίδραση της απόστασης μεταξύ των πηνίων στην κατανομή ευαισθησίας του αισθητήρα. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται οι συναρτήσεις ευαισθησίας για αποστάσεις $s=15\text{cm}$, $s=25$, $s=50$ με σκοπό να φανεί πώς μεταβάλλεται το βάθος στο οποίο η διάταξη παρουσιάζει μέγιστη ευαισθησία. Μέσω της γραφικής απεικόνισης γίνεται φανερό ότι όσο αυξάνεται η απόσταση s , η καμπύλη μετατοπίζεται προς μεγαλύτερα βάθη, γεγονός που δείχνει τη δυνατότητα ρύθμισης του "βάθους διείσδυσης" ανάλογα με τη γεωμετρία της διάταξης



Σχήμα 4.4.1.1 Κατανομή ευαισθησίας για διαφορετικές αποστάσεις πηνίων

Η διαφορά που βλέπουμε ότι δηλαδή η μέγιστη ευαισθησία εμφανίζεται **περίπου στο μισό της απόστασης μεταξύ των πηνίων δεν είναι τυχαία**, αλλά είναι απόλυτα φυσική συνέπεια της γεωμετρίας και της θεωρίας επαγωγής που περιγράφει το σύστημα.

Κεφάλαιο 5ο: Πειραματική εφαρμογή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε, οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτές. Τέλος, αναλύονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την αξιολόγηση των μετρήσεων και συζητούνται οι παρατηρήσεις που ενισχύουν ή περιορίζουν την αξιοπιστία του πειράματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι, λόγω της διαφορετικής γεννήτριας σήματος που χρησιμοποιήθηκε κατά τις μετρήσεις στο σπίτι, παρατηρείται απόκλιση τόσο στη φάση όσο και στην τάση των σημάτων όπως φαίνεται και στα διαγράμματα που αφορούν το ΒΙΟΦΥΤ. Ωστόσο, αυτή η απόκλιση δεν επηρεάζει ουσιαστικά το τελικό αποτέλεσμα, καθώς η μέτρηση βασίζεται στη διαφορά φάσης μεταξύ αέρα και εδάφους, η οποία παραμένει έγκυρη ανεξαρτήτως της απόλυτης φάσης ή τάσης της πηγής. Επιπλέον ως μέθοδο καλιμπραρίσματος πολλαπλασιάζω το αποτέλεσμα με ένα Κ ίσο με 0.015

5.1 Υλικά και Πειραματικές Συνθήκες

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται τα δείγματα εδάφους που συλλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Τα δείγματα αυτά επιλέχθηκαν ώστε να καλύπτουν διαφορετικά επίπεδα υγρασίας, αγωγιμότητας και σύστασης χώματος, προκειμένου να αξιολογηθεί η απόκριση του αισθητήρα σε διαφορετικές φυσικές συνθήκες. Για την αξιολόγηση των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τις ενδείξεις ενός εμπορικού αισθητήρα μέτρησης αγωγιμότητας, του ECH2O 5TM της METER Group (παλαιότερα γνωστή ως Decagon Devices). Ο αισθητήρας αυτός αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο που χρησιμοποιείται ευρέως για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους (EC), της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Η σύγκριση με το ECH2O 5TM επέτρεψε την εκτίμηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της παρούσας μεθόδου, προσφέροντας ένα σημείο αναφοράς με βάση μία καθιερωμένη εμπορική λύση. Η περιγραφή των δειγμάτων συνοδεύεται από τις βασικές ιδιότητές τους, όπως η υγρασία, η αλατότητα και η συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Στην συνέχεια προσθέτω απιονισμένο νερό στο χώμα το ανακατεύω ώστε να είναι ομοιογενές και επαναλαμβάνω την διαδικασία εκτέλεσης του πειράματος ώστε να δω ότι τα αποτελέσματα είναι βάσιμα. Το νερό που χρησιμοποίησα αποτελεί προϊόν οπού ο καθένας μπορεί να το προμηθευτεί σε κάποιο σούπερ μάρκετ και η συχνότητα που λειτούργησα ήταν στα 1MHz και τέλος μετρώ την τυπική απόκλιση με γνώμονα το εργαλείο αναφοράς με τον παρακάτω τύπο

$$Error = \frac{|Μετρούμενη τιμή - Τιμή αναφοράς|}{Τιμή αναφοράς} \cdot 100\% \quad (5.1.1)$$



Σχήμα 4.4.1 Τσιμπίδα εξωτερικό μέρος της συνολικής συσκευής

5.2 Χώμα ‘Πεύκα διπλανό’

Η διαδικασία μέτρησης με τον αισθητήρα αναφοράς πραγματοποιήθηκε ως εξής: Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δώδεκα διαφορετικά σημεία του δείγματος και στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών που καταγράφηκαν. Παρόλο που οι ακραίες τιμές θεωρούνται ανεπιθύμητες, διατηρήθηκαν στο σύνολο των αποτελεσμάτων για λόγους πληρότητας και διαφάνειας στην παρουσίαση της μεθοδολογίας και της ανάλυσης. Η ονομασία του δείγματος προέρχεται από την τοποθεσία συλλογής του, η οποία βρίσκεται στην περιοχή Πεύκα, δίπλα από μια εκκλησία. Λόγω της παρουσίας ηλεκτρομαγνητικού θορύβου στο εργαστήριο, ο οποίος προερχόταν κυρίως από τις φωτεινές πηγές και τον μεταλλικό σκελετό του θρανίου, δοκίμασα έναν πρακτικό τρόπο περιορισμού αυτών των παρεμβολών. Τοποθέτησα τη διάταξη πάνω σε χάρτινες κούτες, ώστε να απομακρυνθεί από τις άμεσες πηγές θορύβου και να περιοριστούν τα ανεπιθύμητα επαγόμενα σήματα. Επιπλέον, το δοχείο μέτρησης ήταν σημαντικά μικρότερο από το θεωρητικά μετρήσιμο βάθος της διάταξης (περίπου 10cm έναντι της δυνατότητας μέτρησης έως και 37cm για ncr και 12.5cm για hcr). Παρ’ όλα αυτά, οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν παρουσίασαν ικανοποιητική σταθερότητα και δεν επηρεάστηκαν σημαντικά από σφάλματα λόγω γεωμετρικών ή περιβαλλοντικών περιορισμών.



Σχήμα 5.2.1 Χώμα ‘Πεύκα διπλανό’



Σχήμα 4.4.1.2 Δοκιμή τεστ χωρίς κίνδυνο θορύβου από μέταλλά



Σχήμα 5.2.3 Μέτρηση χόματος HCP

Παρακάτω δείχνω τις μετρήσεις που πήρα με το εργαλείο αναφοράς για να έχω μια αναφορά της αγωγιμότητας ώστε να ξέρω ότι η κατασκευή μου λειτουργεί σωστά και να μπορέσω να υπολογίσω πόσο ακρίβεια έχει από το εργαλείο.

5.2.1 Μετρήσεις εργαλείου αναφοράς

Επειδή κάθε σημείο που μετρήσαμε είχε διαφορετική ένδειξη αγωγιμότητας πήραμε πολλά δείγματα από διάφορες μεριές του δείγματος ώστε να βγάλουμε τον μέσο όρο. Παρακάτω φαίνονται οι μετρήσεις που πήραμε και στο τέλος ο μέσος όρος και χωρίς νερό και με 100g προσθετικού νερού.

Πίνακας 5.2.1 Μετρήσεις αναφοράς 'Πεύκα διπλανό'

Δείγμα χωρίς νερό (ds/m)	Δείγμα με 100 g νερό (ds/m)
0.04	0.22
0.01	0.12
0.02	0.13
0.02	0.15
0.01	0.09
0.02	0.09
0.02	0.16
0.02	0.09
M.O \approx 0.02 ds/m	M.O \approx 0.13125 ds/m

5.2.2 Μετρήσεις με το εργαλείο αγωγιμότητας

Στην συνέχεια έβαλα το εργαλείο στον αέρα ώστε να έχω την αναφορά για το V_p και να μπορώ να υπολογίσω την αγωγιμότητα όταν μετρήσω και στο χώμα.

Πίνακας 5.2.2.1 Μετρήσεις για πεύκα διπλανό με τον αισθητήρα αγωγιμότητας στον αέρα

Διαφορά φάσης στον αέρα $\Delta\phi$	Πλάτος mV
345°	84 mV
344°	84 mV
344°	85 mV
344°	83 mV
344°	84 mV
344°	84 mV
344°	84 mV
343.7°	84 mV
M.O \approx 344°	M.O \approx 84mV

και όταν μετρήσα στο στεγνό χώμα:

Πίνακας 5.2.2.2 Μετρήσεις για πεύκα διπλανό με το εργαλείο στο στεγνό χώμα

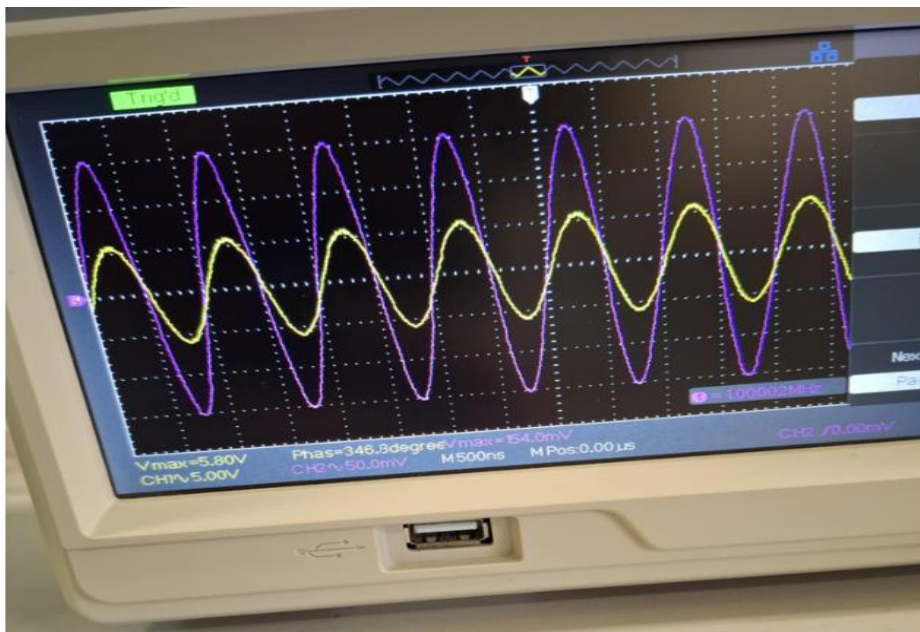
VCP		HCP	
Διαφορά φάσης στον χώμα $\Delta\Phi$	Πλάτος	Διαφορά φάσης στον χώμα $\Delta\Phi$	Πλάτος
345°	101 mV	344°	94mV
344°	100 mV	344°	93mV
344°	100 mV	344°	90mV
345°	101 mV	345°	90mV
346°	100 mV	346°	80mV
346°	99 mV	346°	95mV
345°	100 mV	345°	85mV
345.7°	100 mV	346°	93mV
M.O \approx 345°	M.O \approx 100mV	M.O \approx 345°	M.O \approx 90mV

Άρα η αγωγιμότητα του δείγματος μπορεί να υπολογιστεί με τον παρακάτω τύπο:

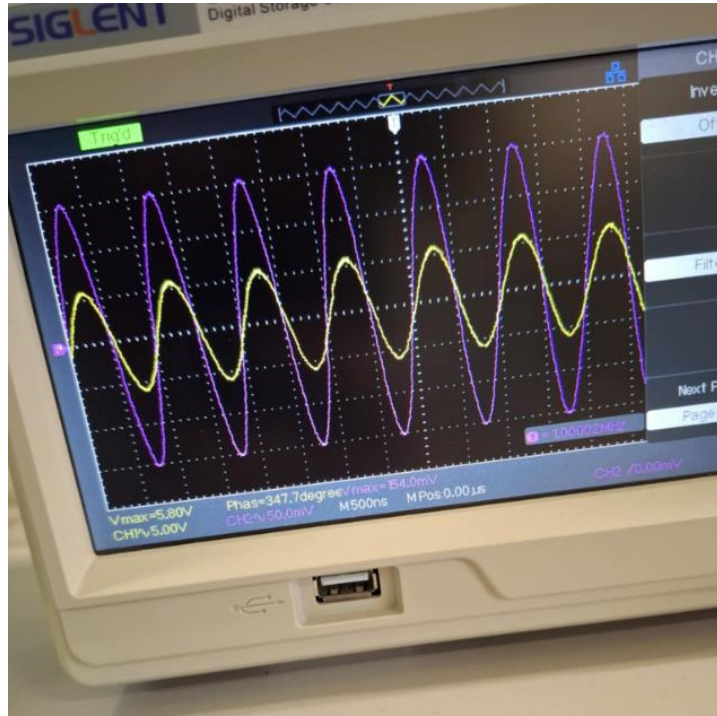
$$\sigma_{VCP} = \frac{4}{2\pi f \mu_0 S^2} \cdot \left(\frac{H_s}{H_p}\right) * K = 8.1 \cdot \sin(345 - 344) \cdot \frac{V_s}{V_p} K = 0.127 \cdot 1.19 \cdot 0.015 = \frac{0.022ds}{m} \quad (5.2.2.1)$$

$$\sigma_{HCP} = \frac{4}{2\pi f \mu_0 S^2} \cdot \left(\frac{H_s}{H_p}\right) * K = 8.1 \cdot \sin(345 - 344) \cdot \frac{V_s}{V_p} K = 0.127 \cdot 1.07 \cdot 0.015 = \frac{0.024ds}{m} \quad (5.2.2.2)$$

Και όταν πήρα μετρήσεις για το υγρό χρώμα Vs:



Σχήμα 5.2.2.1 δείγμα μέτρησης στο υγρό χρώμα HCP



Σχήμα 5.2.2.2 δείγμα μέτρησης στο υγρό χώμα VCP

Πίνακας 5.2.2.3 Μετρήσεις για πεύκα διπλανό με τον αισθητήρα αγωγιμότητας στο χώμα

VCP		HCP	
Δφ στο χώμα	Πλάτος	Δφ στο χώμα	Πλάτος
346.3°	154	346.8°	154mV
346°	155	346.9°	155mV
347.7°	156	347.7°	156mV
346°	153	346°	155mV
347°	154	347°	162mV
347.3°	154	347.3°	154mV
345°	154	346°	154mV
346.5°	154	346.5°	164mV
M.O ≈ 347°	M.O ≈ 154mV	M.O ≈ 346.8°	M.O ≈ 156.75mV

$$\sigma_{VCP} = \frac{4}{2\pi f \mu_0 s^2} \cdot \left(\frac{H_s}{H_p}\right) * K = 8.1 \cdot \sin(347 - 344) \cdot \frac{V_S}{V_P} = 1.14 \cdot 1.833 \cdot 0.015 = 0.118 \frac{ds}{m} \quad (5.2.2.3)$$

$$\sigma_{HCP} = \frac{4}{2\pi f \mu_0 s^2} \cdot \left(\frac{H_s}{H_p}\right) * K = 8.1 \cdot \sin(346.8 - 344) \cdot \frac{V_S}{V_P} = 2.7 \cdot 1.866 \cdot 0.015 = 0.08 \frac{ds}{m} \quad (5.2.2.4)$$

5.2.3 Τυπική απόκλιση

Με τελική απόκλιση error :

$$VCP Error_{\Sigma X} = \left| \frac{0.022-0.02}{0.02} \right| \cdot 100\% = 10\% \quad (5.2.3.1)$$

$$HCP Error_{\Sigma X} = \left| \frac{0.024-0.02}{0.02} \right| \cdot 100\% = 20\% \quad (5.2.3.2)$$

Και για Υγρό Χώμα :

$$VCP Error_{\gamma X} = \left| \frac{0.118-0.1312}{0.1312} \right| \cdot 100\% = 10\% \quad (5.2.3.3)$$

$$HCP Error_{\gamma X} = \left| \frac{0.08-0.1312}{0.1312} \right| \cdot 100\% = 38.7\% \quad (5.2.3.4)$$

5.2.4 Χώμα ‘Πλαγιάρι’

Η ονομασία του δείγματος «Πλαγιάρι» επιλέχθηκε λόγω της προέλευσής του από την ομώνυμη περιοχή, όπως είναι και αναμενόμενο. Το συγκεκριμένο χώμα ανήκει στο είδος αργίλου χώματος το οποίο περιμένουμε να είναι αρκετά πιο αγωγίμο.



Σχήμα 5.2.4.1 Χώμα ‘Πλαγιάρι’

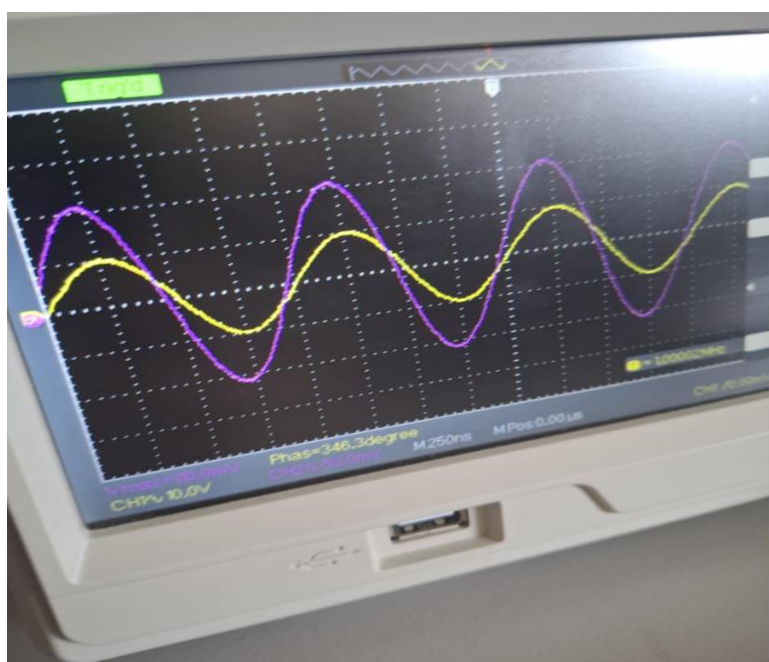
5.2.4.1 Μετρήσεις με το εργαλείο αναφοράς για πλαγιάρι

Τα δείγματα που πήρα με το εργαλείο αναφοράς είναι τα εξής:

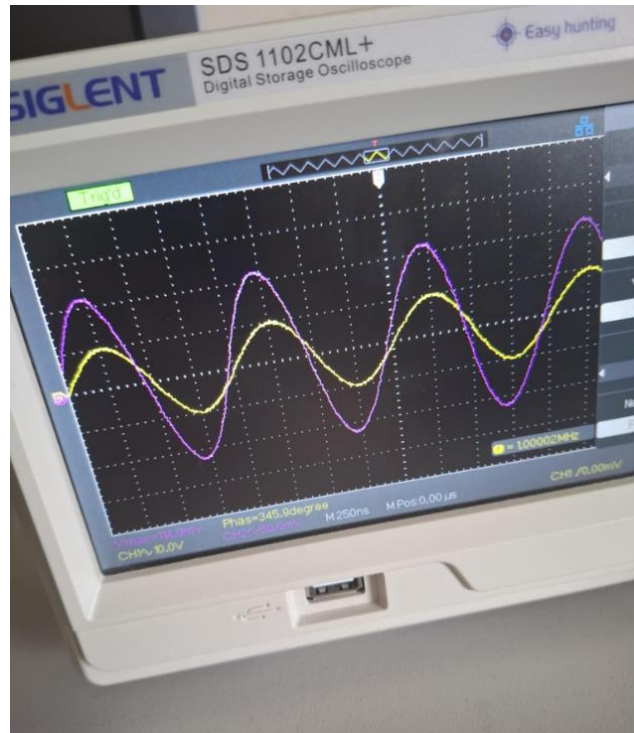
Πίνακας 5.2.3.1.1

Δείγμα με 100g νερό (ds/m)
0.01
0.04
0.01
0.045
0.1
0.1
0.26
M.O \approx 0.08

5.2.4.2 Μετρήσεις με τον αισθητήρα αγωγιμότητας



Σχήμα 5.2.4.2.1 Ενδεικτική μέτρηση για YX πλαγάρι VCP



Σχήμα 5.2.4.2.2 Ενδεικτική μέτρηση για ΥΧ πλαγάρι HCP



Σχήμα 5.2.4.2.3 μέτρηση χωμάτος HCP



Σχήμα 5.2.4.2.4 Μέτρηση VCP Πλαγιάρι

Πίνακας 5.2.4.2.1 Μετρήσεις για Πλαγιάρι με τον αισθητήρα αγωγιμότητας στο ΣΧ

VCP		HCP	
Δφ στο χώμα	Πλάτος	Δφ στο χώμα	Πλάτος
347.2°	110	345.9°	114mV
347°	109	346°	113mV
346.5°	111	345°	114mV
345°	109	346°	115mV
345°	110	347°	120mV
346°	110	347.3°	116mV
345°	108	346°	114mV
346°	110	345.5°	117mV
M.O ≈ 346.5 °	M.O ≈ 110mV	M.O ≈ 346°	M.O ≈ 117mV

$$\sigma_{VCP} = \frac{4}{2\pi f \mu_0 S^2} \cdot \left(\frac{H_s}{H_p}\right) * K = 8.1 \cdot \sin(346.5 - 344) \cdot \frac{V_s}{V_p} K = 0.31 \cdot 1.3333 \cdot 0.015 = \frac{0.07ds}{m} \quad (5.2.4.2.1)$$

$$\sigma_{HCP} = \frac{4}{2\pi f \mu_0 S^2} \cdot \left(\frac{H_s}{H_p}\right) * K = 8.1 \cdot \sin(346 - 344) \cdot \frac{V_s}{V_p} K = 0.00215 \cdot 1.392 \cdot 0.015 = \frac{0.06ds}{m} \quad (5.2.3.2.2)$$

Πίνακας 5.2.4.2.2 Μετρήσεις για Πλαγάρι με τον αισθητήρα αγωγιμότητας στο ΥΧ

VCP		HCP	
Δφ στο χώμα	Πλάτος	Δφ στο χώμα	Πλάτος
357.1°	220	357.1	
357°	215	357°	223
355°	222	357°	222
360°	220	360°	220
355°	225	354°	225
355°	220	355°	220
354°	220	355°	220
355°	215	360°	215
M.O ≈ 356 °	M.O≈219.6mV	M.O ≈ 357°	M.O ≈ 220.6mV

$$\sigma_{VCP} = \frac{4}{2\pi f \mu_0 S^2} \cdot \left(\frac{H_s}{H_p}\right) * K = 8.1 \cdot \sin(356 - 344) \cdot \frac{V_S}{V_P} K = 0.00215 \cdot 2.6 * 0.015 = \frac{0.66ds}{m} \quad (5.2.4.2.3)$$

$$\sigma_{HCP} = \frac{4}{2\pi f \mu_0 S^2} \cdot \left(\frac{H_s}{H_p}\right) * K = 8.1 \cdot \sin(357 - 344) \cdot \frac{V_S}{V_P} K = 0.00215 \cdot 2.62 * 0.015 = \frac{0.72ds}{m} \quad (5.2.4.2.4)$$

5.2.4.3 Τυπική απόκλιση

Με τελική απόκλιση error :

$$VCP Error_{\Sigma X} = \left| \frac{0.066-0.08}{0.08} \right| \cdot 100\% = 17.5\% \quad (5.2.4.3.1)$$

$$HCP Error_{\Sigma X} = \left| \frac{0.06-0.08}{0.08} \right| \cdot 100\% = 25\% \quad (5.2.4.3.2)$$

Και μετά την προσθήκη νερού

$$VCP Error_{\Sigma X} = \left| \frac{0.68-0.9}{0.9} \right| \cdot 100\% = 24.4\% \quad (5.2.4.3.3)$$

$$HCP Error_{\Sigma X} = \left| \frac{0.72-0.9}{0.9} \right| \cdot 100\% = 20\% \quad (5.2.4.3.4)$$

5.2.5 Χώμα ‘φυτόχωμα ΒΙΟΦΥΤ’

Το συγκεκριμένο δείγμα αποτελεί μέρος έτοιμου φυτοχώματος τύπου **ΒΙΟΦΥΤ**, ενός εμπορικά διαθέσιμου προϊόντος. Το συγκεκριμένο είδος φυτοχώματος μπορεί να προμηθευτεί εύκολα

οποιοσδήποτε, καθώς διατίθεται σε συσκευασίες λιανικής πώλησης στα ράφια των περισσότερων σούπερ μάρκετ. Το παρόν πείραμα το έκανα στο σπίτι μου με δικό μου παλμογράφο και στις κυματομορφές φαίνεται η διαφορά στο μέγεθος της συχνότητας και του πλάτους καθώς επηρεαστήκαν πολύ από τα χωρητικά φαινόμενα των probes καθώς και του ίδιου του παλμογράφου.



5.2.5.1 Χώμα ΒΙΟΦΥΤ



5.2.5.2 Χώμα στο δοχείο

5.2.5.1 Μετρήσεις με το εργαλείο αναφοράς

Βάζοντας όπως στα προηγούμενα παραδείγματα το εργαλείο αναφοράς στο χώμα και παίρνοντας μερικές μετρήσεις βγάξω το μέσο όρο των μετρήσεων, τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

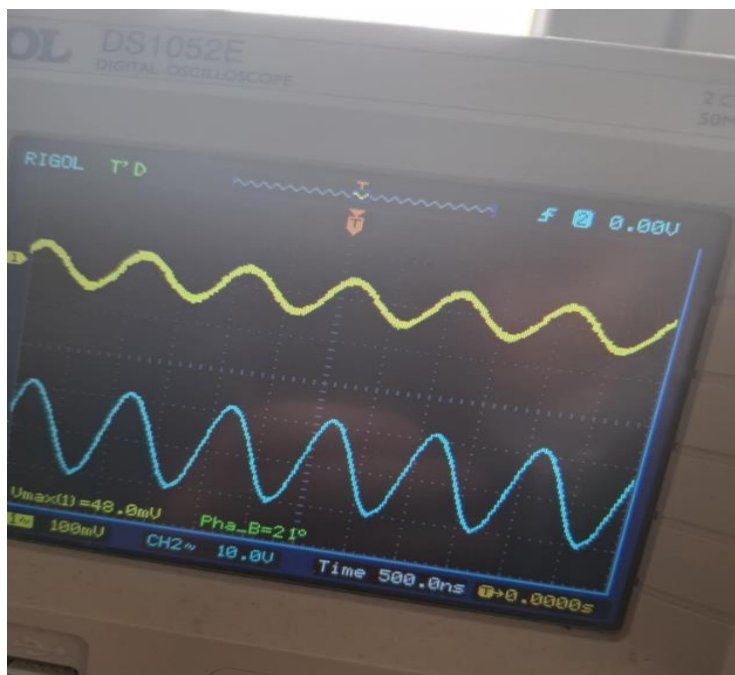
Πίνακας 5.2.5.1.1 Δείγματα από εργαλείο αναφοράς για στεγνό χόμα

Δείγματα στεγνό χόμα ds/m	Δείγματα υγρό χόμα ds/m
0.05	0.2
0.05	0.12
0.04	0.3
0.03	0.3
0.03	0.16
0.04	0.4
M.O. ≈ 0.04 ds/m	AVERAGE ≈ 0.246 ds/m

5.2.5.2 Μετρήσεις με τον αισθητήρα αγωγιμότητα



Σχήμα 5.2.5.2.1 Μέτρηση στον αέρα ξανά



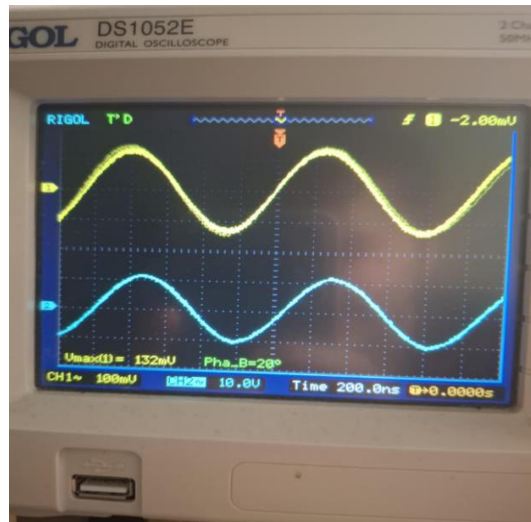
Σχήμα 5.2.5.2.2 Μέτρηση στον αέρα

επειδή υπήρχε αρκετός θόρυβος πήρα 10 μετρήσεις στον αέρα για να έχουμε σαν αναφορά για τον υπολογισμό του V_p στον παρακάτω πίνακα

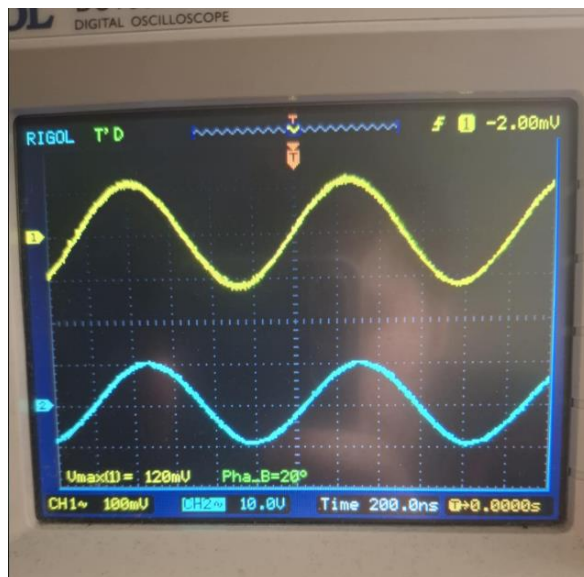
Πίνακας 5.2.5.2.1 Δείγματα αναφοράς μέτρηση αέρα

Φάση	Πλάτος
20°	47mV
20°	55 mV
20°	58 mV
19°	55 mV
21°	59 mV
20°	55 mV
18°	59 mV
20°	49 mV
20°	50 mV
21°	48 mV
20°	55 mV
M.O ΔΦ ≈ 20°	M.O VP ≈ 55 mV

συνολικά πήρα 10 μετρήσεις στον αέρα 20 δευτερολέπτων η κάθε μια ο παρακάτω πίνακας δείχνει τις μετρήσεις και το μέσο ορό της φάσης και του πλάτους.



Σχήμα 5.2.5.2.3 Μέτρηση στο χόμα VCP



Σχήμα 5.2.5.2.4 μέτρηση στο χόμα VCP

Πίνακας 5.2.5.2.2 Τιμές για τάση στο χόμα

VCP		HCP	
Φάση	πλάτος	Φάση	πλάτος
20°	132mV	20°	120mV
21°	115 mV	21°	115mV
21°	120 mV	21°	120mV
21°	119 mV	21°	119mV
22°	129 mV	22°	125mV
21°	150 mV	21°	120mV
21°	159 mV	21°	130mV
21°	155 mV	21°	120mV
20°	125 mV	20°	125mV
21°	115 mV	21°	115mV
21°	124 mV	21°	124mV
Average $\Delta\Phi \approx 21^\circ$	AVERAGE VS ≈ 130 mV	Average $\Delta\Phi \approx 21^\circ$	Average VS ≈ 120.45mV

Χρησιμοποιώντας τον τύπο της αγωγιμότητας:

$$\sigma_{VCP} = \frac{4}{2\pi f \mu_0 S^2} \cdot \left(\frac{H_s}{H_p}\right) = 8.1 \cdot \sin(21 - 20) \cdot \frac{V_s}{V_p} K = 0.00215 \cdot 2.363 \cdot 0.015 = \frac{0.05 ds}{m} \quad (5.2.5.2.1)$$

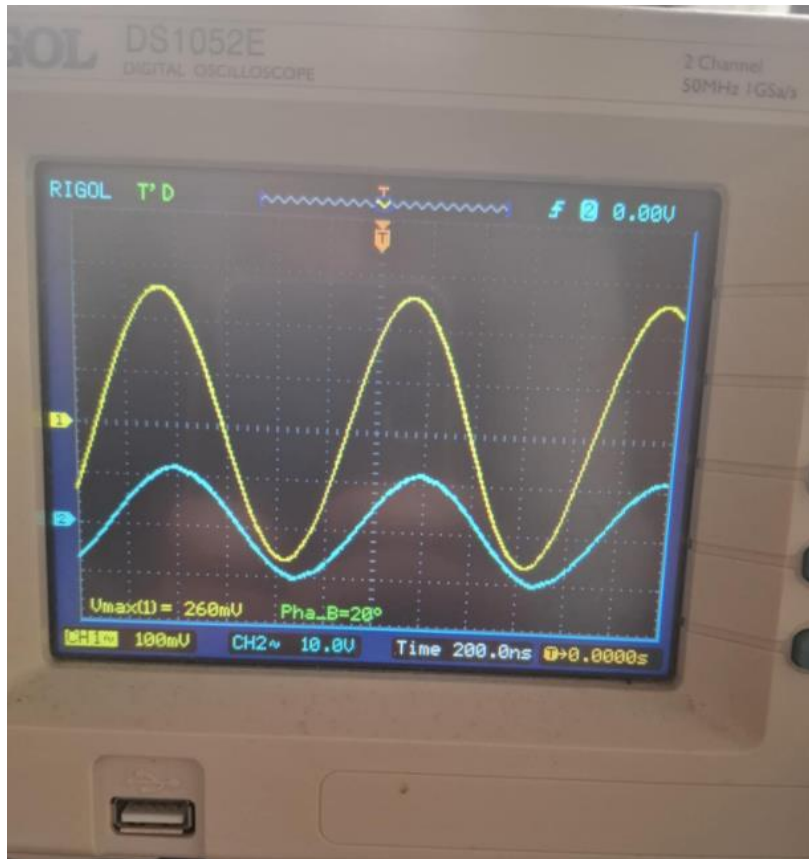
$$\sigma_{HCP} = \frac{4}{2\pi f \mu_0 S^2} \cdot \left(\frac{H_s}{H_p}\right) = 8.1 \cdot \sin(21 - 20) \cdot \frac{V_s}{V_p} K = 0.00215 \cdot 2.1818 \cdot 0.015 = \frac{0.047 ds}{m} \quad (5.2.4.)$$

Έπειτα πρόσθεσα 1 λίτρο νερό στα 20L χώμα ώστε να μπορέσω να δω πόσο θα αλλάξει το πλάτος της κυματομορφής με αποτέλεσμα να δω ότι θα αλλάξει και η αγωγιμότητα.

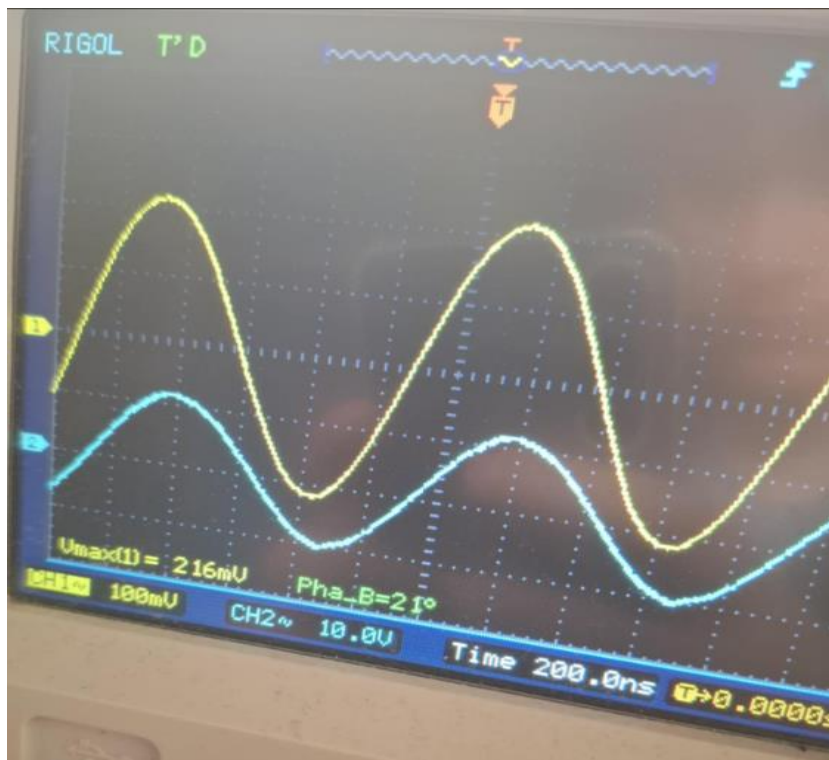
Και πήρα ξανά μετρήσεις στο υγρό πλέον χώμα πρώτα με το εργαλείο αναφοράς και μετά με το εργαλείο μου

Πίνακας 5.2.5.2.3 Δείγματα από εργαλείο αναφοράς για υγρό χώμα

Δείγματα ds/m
0.2
0.12
0.3
0.3
0.16
0.4
AVERAGE \approx 0.246 ds/m



Σχήμα 5.2.5.2.5 Μέτρηση στο υγρό χόμα VCP



Σχήμα 5.2.5.2.6 μετρηση στο υγρο χόμα HCP

Πίνακας 5.2.5.2.4 Μετρήσεις στο υγρό χώμα

VCP		HCP	
ΔΦ	Πλάτος	ΔΦ	Πλάτος
22°	260mV	23°	220mV
21°	262mV	21°	212mV
21°	267 mV	21°	210mV
22°	255 mV	22°	230mV
22°	265 mV	21°	220mV
21°	265 mV	23°	220mV
21°	268 mV	21°	216mV
21°	261 mV	21°	233mV
22°	262 mV	23°	235mV
21°	256 mV	21°	216mV
23°	260 mV	23°	220mV
Average ΔΦ ≈ 22°	AVERAGE VS ≈ 260 mV	Average ΔΦ ≈ 22°	AVERAGE VS ≈ 221 mV

$$\sigma_{VCP} = \frac{4}{2\pi f \mu_0 s^2} \cdot \left(\frac{H_s}{H_p}\right) * K = 8.1 \cdot \sin(22 - 20) \cdot \frac{V_S}{V_P} * K = 0.035 \cdot 4.72 * 0.015 * 0.015 = \frac{0.2ds}{m} \quad (5.2.5.2.3)$$

$$\sigma_{HCP} = \frac{4}{2\pi f \mu_0 s^2} \cdot \left(\frac{H_s}{H_p}\right) * K = 8.1 \cdot \sin(22 - 20) \cdot \frac{V_S}{V_P} * K = 0.0349 \cdot 4 * 0.015 = \frac{0.17ds}{m} \quad (5.2.5.2.4)$$

5.2.5.3 Τοπική απόκλιση

Με αυτά τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι το συνολικό error από το εργαλείο αναφοράς μας για Στεγνό Χώμα είναι:

$$HCP Error_{\Sigma X} = \left| \frac{0.05 - 0.04}{0.04} \right| \cdot 100\% = 17.5\% \quad (5.2.5.3.1)$$

$$VCP Error_{\Sigma X} = \left| \frac{0.047 - 0.04}{0.04} \right| \cdot 100\% = 25\% \quad (5.2.5.3.2)$$

Και για Υγρό Χώμα :

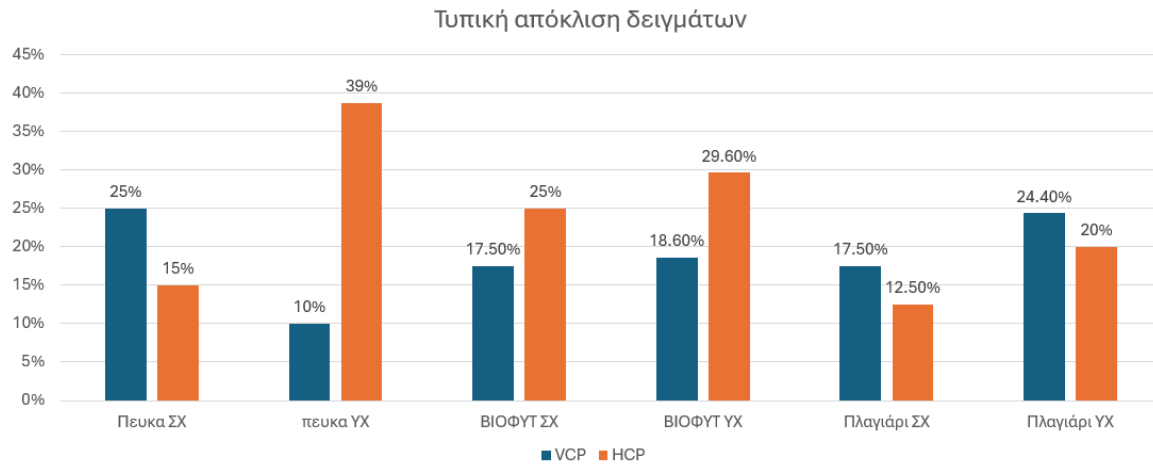
$$HCP Error_{\gamma X} = \left| \frac{0.17 - 0.24}{0.24} \right| \cdot 100\% = 29\% \quad (5.2.5.3.36)$$

$$VCP Error_{\gamma X} = \left| \frac{0.2 - 0.246}{0.246} \right| \cdot 100\% = 18.6\% \quad (5.2.7.3.4)$$

5.3 Συμπεράσματα μετρήσεων

Φαίνεται ότι το HCP αποδίδει καλύτερα σε δείγματα με χαμηλότερη αγωγιμότητα, ενώ το VCP παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία σε πιο αγώγιμα δείγματα.

Αποτελέσματα



Σχήμα 5.3.1 Αποτελέσματα πειράματος

Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

αρά τις δυσκολίες και τις μη ιδανικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, όπως το γεγονός ότι οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν εντός εργαστηριακού χώρου και όχι σε ανοικτό περιβάλλον χωρίς τα προβλήματα από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, καθώς και το γεγονός ότι το δείγμα του εδάφους ήταν περιορισμένου μεγέθους σε σύγκριση με το ιδανικό που θα ήταν να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις σε πραγματικό έδαφος, όπως σε έναν κήπο ή έναν ανοικτό εξωτερικό χώρο κατόρθωσα να ολοκληρώσω τη συγκριτική διαδικασία και να εξάγω ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω, εφόσον πραγματοποιηθούν οι κατάλληλες διορθώσεις και βελτιστοποιήσεις στις πειραματικές συνθήκες. Τέλος έχω να πω ότι το εργαλείο δεν είναι πολύ βολικό για χρήση από την στιγμή που χρειάζεται να ολοκληρωθεί το κύκλωμα και να εξαλειφθεί ο θόρυβος οπότε είναι προτιμότερο μέχρι τότε να χρησιμοποιηθεί κάποιο εμπορικό εργαλείο FDR, TDR όπου δίνει πιο άμεσα αποτελέσματα.

Στη συνέχεια, το κεφάλαιο αυτό δομείται σε επιμέρους ενότητες, οι οποίες καλύπτουν:

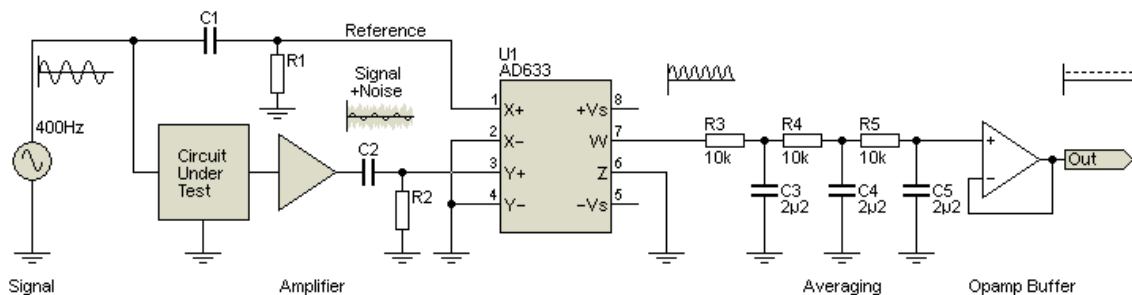
- Τεχνικά ζητήματα, όπως η κατασκευή του ηλεκτρονικού κυκλώματος
- Πειραματικές διαδικασίες, όπως η μεθοδολογία μέτρησης σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο
- Σχεδιαστικές βελτιώσεις, όπως οι προτάσεις για τη βελτιστοποίηση της κατασκευής της συσκευής.

6.1 Ηλεκτρονικό κύκλωμα

Μία από τις βασικές βελτιώσεις που προτείνεται να εξεταστούν σε μελλοντικές εκδόσεις της συσκευής είναι η ενσωμάτωση εξειδικευμένης γεννήτριας σήματος, όπως ο AD9833, ο οποίος προσφέρει μεγαλύτερη σταθερότητα συχνότητας, δυνατότητα επιλογής διαφορετικών κυματομορφών και ψηφιακό έλεγχο συχνότητας μέσω μικροελεγκτή. Επιπλέον, η προσθήκη σταδίου ενίσχυσης με τη χρήση ενισχυτή λειτουργίας (op-amp) θα μπορούσε να αυξήσει την ευαισθησία της συσκευής, ενισχύοντας το σήμα από τον δέκτη και βελτιώνοντας το λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR).

Περαιτέρω, η ενσωμάτωση φίλτρων διέλευσης ζώνης (bandpass filters) θα μπορούσε να βοηθήσει στην απομόνωση της επιθυμητής συχνότητας λειτουργίας, περιορίζοντας τον ανεπιθύμητο θόρυβο. Τέλος, η χρήση ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP) μέσω μικροελεγκτή ή υπολογιστή, με τεχνικές όπως **ψηφιακό lock-in amplifier**, θα προσέφερε ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια στις φασικές και πλεγματικές μετρήσεις.

6.1.1 Ενδεικτικό κύκλωμα



Σχήμα 6.1.1.1 Ενδεικτικό κύκλωμα

Το κύκλωμα που παρουσιάζεται παραπάνω υλοποιεί έναν ανιχνευτή φάσης και πλάτους βασισμένο στη χρήση ενός αναλογικού πολλαπλασιαστή (AD633), με σκοπό την απομόνωση της εντός φάσης συνιστώσας (in-phase) ενός ασθενικού σήματος που είναι βυθισμένο σε θόρυβο. Η διάταξη λαμβάνει ως είσοδο ένα καθαρό ημιτονικό σήμα αναφοράς στα όσα Hz επιθυμούμε, το οποίο τροφοδοτεί το υπό δοκιμή κύκλωμα (π.χ. έναν αισθητήρα ή υλικό προς μέτρηση όπως το πηνίο). Το εξερχόμενο σήμα από

το κύκλωμα περιέχει τόσο την πληροφορία όσο και ανεπιθύμητο θόρυβο, και ενισχύεται κατάλληλα πριν οδηγηθεί στον πολλαπλασιαστή. Το AD633 πραγματοποιεί τον πολλαπλασιασμό του σήματος μέτρησης με το γνωστό αναφοράς σήμα, παράγοντας ένα αποτέλεσμα που περιλαμβάνει τόσο συνιστώσες χαμηλής συχνότητας (σχετικές με τη διαφορά φάσης) όσο και γρήγορες ταλαντώσεις διπλάσιας συχνότητας. Στη συνέχεια, ένα στάδιο χαμηλοπερατού φίλτρου (δικτύωμα R3-C3 έως R5-C5) απομακρύνει τις υψηλές συχνότητες, επιτρέποντας μόνο τη μέση τιμή του σήματος (DC) που σχετίζεται άμεσα με το πλάτος και τη φάση του αρχικού σήματος εισόδου. Τέλος, ένας απομονωτής (buffer op-amp) διασφαλίζει τη σωστή οδήγηση της εξόδου προς μεταγενέστερα συστήματα ανάλυσης ή καταγραφής. Το κύκλωμα αυτό αποτελεί τυπική υλοποίηση ανίχνευσης in-phase συνιστωσών, με δυνατότητα επέκτασης σε πλήρη I/Q ανάλυση με την προσθήκη δεύτερου καναλιού με αναφορά φασικά μετατοπισμένη κατά 90°, καλύπτοντας έτσι απαιτήσεις εφαρμογών όπως η μέτρηση αγωγιμότητας ή η ραδιοσυχνική ανίχνευση.

6.2 Πειραματικές διαδικασίες

Η σημασία της διεξαγωγής των μετρήσεων σε κατάλληλα διαμορφωμένο και ηλεκτρομαγνητικά ελεγχόμενο περιβάλλον είναι κρίσιμη, καθώς ο περιβαλλοντικός ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος μπορεί να επηρεάσει δραστικά την ποιότητα των αποτελεσμάτων. Στα περισσότερα συμβατικά εργαστήρια, ιδιαίτερα σε χώρους όπου λειτουργούν πλήθος ηλεκτρονικών συσκευών και φωτιστικών σωμάτων, παρατηρείται έντονη παρουσία χαμηλής συχνότητας θορύβου (50/60 Hz) και των αρμονικών του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το κτήριο της Ηλεκτρονικής, όπου ο θόρυβος από τον φωτισμό και τις ηλεκτρονικές συσκευές επιδρά εμφανώς στο δίκτυο μετρήσεων, οδηγώντας σε επίπεδα θορύβου σημαντικά υψηλότερα από τα επιτρεπτά όρια για ευαίσθητες φασικές και πλεγματικές μετρήσεις. Η παρουσία αυτού του θορύβου μπορεί να καλυφθεί μερικώς μέσω της χρήσης κατάλληλων φίλτρων ή τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, ωστόσο η επιλογή ενός ήσυχου ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντος, όπως ένας ανοιχτός εξωτερικός χώρος χωρίς πηγές παρεμβολών, παραμένει η πλέον αξιόπιστη λύση για τη βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων.

6.3 Σχεδιαστικές βελτιώσεις

Θα μπορούσα να σχεδιάσω ένα βελτιωμένο προστατευτικό κάλυμμα, το οποίο θα επιτρέπει την εύκολη και ασφαλή μεταφορά της συσκευής, ενσωματώνοντας χειρολαβή τύπου βαλίτσας, παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται σε εμπορικά φορητά εργαλεία μέτρησης.

Όπως παράδειγμα την παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 6.3.1 Ε Μ38-ΜΚ εμπορικό αισθητήριο αγωγιμότητας [36]

Bibliography

- [1] Electromagnetic Methods in Applied Geophysics—Applications: Part A and Part B
- [2] Wolf, L.; Flores Orozco, A. Design, Development and Application of a Modular Electromagnetic Induction (EMI) Sensor for Near-Surface Geophysical Surveys. *Sensors* 2024, 24, 4159. <https://doi.org/10.3390/s24134159>
- [3] California Department of Transportation | Caltrans (.gov) <https://dot.ca.gov>
- [4] Ratshiedana, P.E.; Abd Elbasit, M.A.M.; Adam, E.; Chirima, J.G.; Liu, G.; Economon, E.B. Determination of Soil Electrical Conductivity and Moisture on Different Soil Layers Using Electromagnetic Techniques in Irrigated Arid Environments in South Africa. *Water* 2023, 15, 1911. <https://doi.org/10.3390/w15101911>
- [5] Kessouri, P., Flageul, S., Vitale, Q., Buvat, S., Rejiba, F., & Tabbagh, A. (2015). Medium-frequency electromagnetic device to measure electric conductivity and dielectric permittivity of soils. *Geophysics*, 81(1), E1–E16. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0468.1>
- [6] Špikić, D., Švraka, M., & Vasić, D. (2023). Electromagnetic Induction Sensing of Soil Dielectric Permittivity and Electrical Conductivity from 10 MHz to 30 MHz. *2022 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/i2mtc53148.2023.10176087>
- [7] Beamish, D. (2011). Low induction number, ground conductivity meters: A correction procedure in the absence of magnetic effects. *Journal of Applied Geophysics*, 75(2), 244–253. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.07.005>
- [8] Petsetidi, P.A.; Kargas, G. Assessment and Mapping of Soil Salinity Using the EM38 and EM38MK2 Sensors: A Focus on the Modeling Approaches. *Land* 2023, 12, 1932. <https://doi.org/10.3390/land12101932>
- [9] Technical Note TN-6 ELECTROMAGNETIC TERRAIN CONDUCTIVITY MEASUREMENT AT LOW INDUCTION NUMBERS
- [10] Technical Note TN-5 ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF SOILS AND ROCKS
- [11] Technical Note TN-7 APPLICATIONS OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC TECHNIQUES
- [12] Technical Note TN-31 APPLICATION OF “DIPOLE-DIPOLE” ELECTROMAGNETIC SYSTEMS FOR GEOLOGICAL DEPTH SOUNDING
- [13] Technical Note TN-30 WHY DOESN'T GEONICS LIMITED BUILD A MULTI-FREQUENCY EM31 OR EM38?
- [14] McNeill, J. D. (1980). Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers. Geonics Ltd., Technical Note TN-6.
- [15] Won, I. J., Keiswetter, D. A., Fields, G. R. A., & Sutton, L. C. (1996). *GEM-2: A New Multifrequency Electromagnetic Sensor*. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 1(2), 129–137. doi:10.4133/jeeeg1.2.129
- [16] A. Singh, K. Gaurav, G. K. Sonkar and C. -C. Lee, "Strategies to Measure Soil Moisture Using Traditional Methods, Automated Sensors, Remote Sensing, and Machine Learning Techniques: Review, Bibliometric Analysis, Applications, Research Findings, and Future Directions," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 13605-13635, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3243635.
- [17] Διάλεξη 1-Το έδαφος γενικά και οι φυσικές του ιδιότητες.pdf
- [18] https://eclass.hmu.gr/modules/document/file.php/TGH222/Lecture_1_Ardeuseis_2019.pdf
- [19] **Oliver, D.P., Bramley, R.G.V., Riches, D., Porter, I.J., & Edwards, J. (2013).** Review: Soil physical and chemical properties as indicators of soil quality in Australian viticulture. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 19(2), 129–139
- [20] "Physical properties of soil," Wikipedia. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Physical_properties_of_soil.
- [21] Soil chemistry," Wikipedia. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Soil_chemistry.
- [22] ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ «Μελέτη και υλοποίηση αισθητήρα μέτρησης χαρακτηριστικών εδάφους»
- [23] Διάλεξη μεσογειακού πανεπιστημίου γεωπονίας
- [24] <https://greymattersglobal.com/wenner-4-probe/>
- [25] <https://soilsensor.com/articles/capacitance-frequency-frequency-domain-reflectometry-fdr/>

- [26] <https://soilsensor.com/articles/time-domain-reflectometry-tdr/>
- [27] Theory and Guidelines for the Application of the Geophysical Sensor EM38 <https://doi.org/10.3390/s19194293>
- [28] Wikipedia *Μαγνητική επιδεκτικότητα* https://el.wikipedia.org/wiki/Μαγνητική_επιδεκτικότητα
- [29] **Allen, D. A.** (2008). *A review of geophysical equipment applied to groundwater and soil investigation*. Land and Water Australia.
- [30] Wikipedia Snell law https://en.wikipedia.org/wiki/Snell%27s_law
- [31] What are Eddy Currents? <https://www.geeksforgeeks.org/what-are-eddy-currents/>
- [32] Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (1990) Resistivity Methods. In: Applied Geophysics, 2nd Edition, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 353-358. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139167932.012>
- [33] metal detector <https://www.mercadolibre.com.co/metal-detector-underground-metal-finder-gold-detector/p/MCO2008592658>
- [34] Ground-Based Soil Moisture Determination
- [35] CMD2 http://www.gfinstruments.cz/index.php?menu=gi&cont=cmd_ov
- [36] em38 mk <https://www.geomatrix.co.uk/land-products/electromagnetic/geonics-em38mk2/>

Παράρτημα Α

Κωδικας python για ευρεση της αγωγιμοτητας:

```
import math

import cmath

MU_0 = 4 * math.pi * 1e-7 # magnetic permeability of free space (H/m)

def deg_to_rad(deg):

    return deg * math.pi / 180

def compute_Hs_over_Hp(v_soil, phase_soil_deg, v_air, phase_air_deg):

    # μετατροπη φασε σε rad

    phi_soil = deg_to_rad(phase_soil_deg)

    phi_air = deg_to_rad(phase_air_deg)

    # Convert measurements to complex phasors

    H_measured = cmath.rect(v_soil, phi_soil) # V_soil * e^(i * phi_soil)

    H_p = cmath.rect(v_air, phi_air)      # V_air * e^(i * phi_air)

    # Compute H_s = H_measured - H_p

    H_s = H_measured - H_p

    # Compute complex ratio R = H_s / H_p

    R = H_s / H_p
```

```

return R

def compute_conductivity(im_R, frequency_hz, h_m):

    omega = 2 * math.pi * frequency_hz

    numerator = 4 * im_R

    denominator = MU_0 * omega * h_m**2

    sigma_s_per_m = numerator / denominator

    sigma_ds_per_m = sigma_s_per_m * 10    # 1 S/m = 10 dS/m

    sigma_ds_per_cm = sigma_ds_per_m / 100    # 1 dS/cm = 100 dS/m

    return sigma_s_per_m, sigma_ds_per_m, sigma_ds_per_cm

def run_conductivity_estimation(vs, phi_s, vp, phi_p, freq_hz, h_m):

    print("\n Calculating complex ratio Hs/Hp:")

    R = compute_Hs_over_Hp(vs, phi_s, vp, phi_p)

    print(f" Hs/Hp = {R.real:.4f} + {R.imag:.4f}j")

    print(f" â†’ Magnitude = {abs(R):.4f}, Phase = {math.degrees(cmath.phase(R)):.2f}Â°")

    print(f" â†’ Imaginary part (for conductivity) = {R.imag:.4f}")

    print("\nCalculating apparent conductivity (McNeill):")

    sigma_s_per_m, sigma_ds_per_m, sigma_ds_per_cm = compute_conductivity(R.imag, freq_hz, h_m)

    print(f" Conductivity = {sigma_s_per_m:.4f} S/m")

    print(f"          = {sigma_ds_per_m:.4f} dS/m")

    print(f"          = {sigma_ds_per_cm:.4f} dS/cm")

    return sigma_s_per_m, sigma_ds_per_m, sigma_ds_per_cm

```

```

# === Inputs ===

vs = 320    # mV on soil

vp = 12     # mV in air

phi_s = 165 # degrees

phi_p = 130 # degrees

freq_hz = 900000 # Hz (900 kHz)

h_m = 0.25  # coil spacing in meters

# === Run Calculation ===

run_conductivity_estimation(vs, phi_s, vp, phi_p, freq_hz, h_m)

Κώδικας python για την ευρεση κατανομής με διαφορετικες αποστασεις πηνιων:

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Βάθος σε cm
z_cm = np.linspace(0.1, 80, 800)

# Λίστα με αποστάσεις πηνίων (σε cm)
s_values = [15, 25, 50]
colors = ['blue', 'orange', 'green']
labels = [f's = {s} cm" for s in s_values]

# Δημιουργία γραφήματος
plt.figure(figsize=(10, 6))

for s, color, label in zip(s_values, colors, labels):
    z_norm = z_cm / s
    phi = 4 * z_norm / (4 * z_norm**2 + 1)**(1.5) # Κανονικοποιημένο βάθος
    # Κατανομή ευαισθησίας
    plt.plot(z_cm, phi, label=label, color=color)

plt.xlabel("Βάθος (cm)")
plt.ylabel("Σχετική ευαισθησία φ(z)")
plt.title("Κατανομή ευαισθησίας για διαφορετικές αποστάσεις πηνίων")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()

```