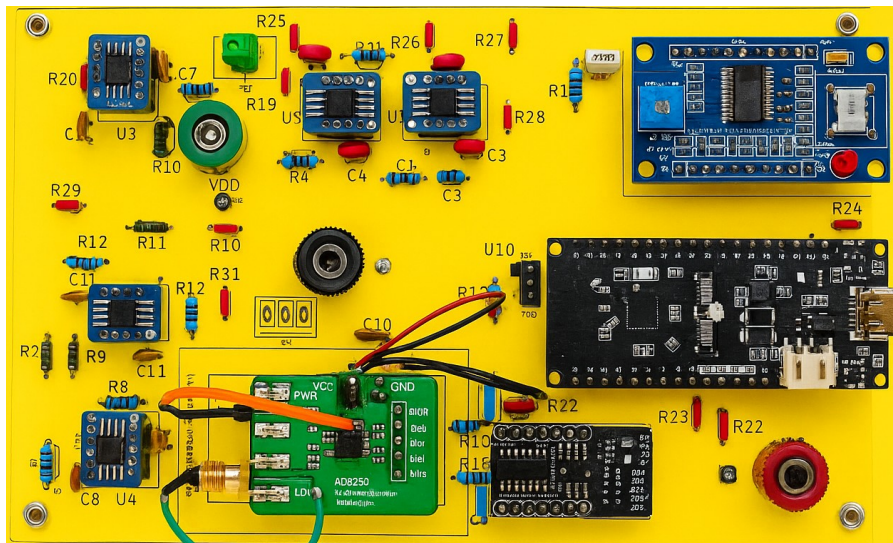


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ



Του φοιτητή
Κουφογεώργου Βασιλείου Ρωμανού
Αρ. Μητρώου: 52205m

Επιβλέπων
Χατζόπουλος Αργύριος
Αναπληρωτής Καθηγητής

Οκτώβριος 2025

Τίτλος Δ.Ε. : Μελέτη, σχεδίαση και υλοποίηση αισθητήρα προσδιορισμού ποιότητας εδάφους

Κωδικός Δ.Ε. : 52205m

Όνοματεπώνυμο φοιτητή : Βασίλειος - Ρωμανός Κουφογεώργος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή : Χατζόπουλος Αργύριος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. : 31-10-2023

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. : 25-09-2025

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 διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Κουφογεώργου Βασιλείου Ρωμανού 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 διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε κατά την περίοδο των ακαδημαϊκών ετών 2024-25 στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών “Εφαρμοσμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα” του τμήματος “Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων” του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος υπό την επίβλεψη του κ. Αργυρίου Χατζόπουλου, Επίκουρου καθηγητή του τμήματος. Στην εργασία προσπάθησα να υλοποιήσω έναν αισθητήρα ποιότητας εδάφους. Η επιλογή μου για το θέμα αυτό έγινε από το ενδιαφέρον σύνδεση του αναλογικού κόσμου στο ψηφιακό, στην γεωργία ακριβείας, στην δημιουργία αισθητήρων, αλλά και από τον βαθμό δυσκολίας που έχει αυτό το θέμα. Κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας εφόρμισα τις θεωρητικές γνώσεις και τις εργαστηριακές δεξιότητες που απέκτησα κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Επιπλέον, απέκτησα σημαντική εργαστηριακή εμπειρία και εξειδικευμένη γνώση σχετικά με την ανάπτυξη και τη λειτουργία αισθητήρων ποιότητας εδάφους σε πραγματικές συνθήκες. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κλήθηκα να αντιμετωπίσω πρακτικές δυσκολίες και πειραματικούς περιορισμούς, οι οποίοι δεν αναφέρονται στη βιβλιογραφία ή στα εγχειρίδια, γεγονός που συνέβαλε ουσιαστικά στην εμπάθυνση της κατανόησής μου πάνω στο αντικείμενο.

Περίληψη

Σχεδίαση, προσομοίωση και υλοποίηση κυκλώματος και αισθητήρα μέτρησης χαρακτηριστικών του εδάφους που έχουν σαν αποτέλεσμα τον προσδιορισμό της ποιότητάς του. Ο αισθητήρας θα μετρά την αγωγιμότητα, την ηλεκτρική διαπερατότητα και το pH, με τα οποία θα προσεγγίζει την αλατότητα, την υγρασία του χώματος και την περιεκτικότητα θρεπτικών συστατικών, που θα απεικονίζονται σε οθόνη. Ο αισθητήρας θα έχει τη δυνατότητα αποστολής των μετρήσεων σε πρόγραμμά τύπου SCADA ή στο LabView όπου θα απεικονίζονται αυτά.

«Study and implementation of a soil quality sensor»

«Vasilios Romanos Koufogeorgos»

Abstract

Design, simulation, and implementation of a circuit and sensor for measuring soil characteristics that determine its quality. The sensor will measure conductivity, electrical permeability, and pH, which will be used to estimate salinity, soil moisture, and nutrient content, which will be displayed on a screen. The sensor will be able to send the measurements to a SCADA-type program or to LabView, where they will be displayed.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μητέρα μου και την αδερφή που με στήριξαν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής, καθώς επίσης τον καθηγητή κύριο Αργύριο Χατζόπουλο για την βοήθεια που μου πρόσφερε.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	4
Περίληψη.....	5
Abstract.....	6
Ευχαριστίες.....	7
Περιεχόμενα.....	8
Κατάλογος Σχημάτων.....	11
Κατάλογος Πινάκων.....	13
Συνομογραφίες.....	14
Κεφάλαιο 1ο: Σκοποί και Στόχοι Διπλωματικής.....	15
1.1 Λόγοι Προσδιορισμού Ποιότητας Χώματος.....	15
1.2 Μεθοδολογία.....	15
1.3 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 1.....	16
Κεφάλαιο 2ο: Ηλεκτρικές Ιδιότητες Εδάφους.....	17
2.1 Ηλεκτρικές Ιδιότητες.....	17
2.1.1 Ειδική Αντίσταση - Αγωγιμότητα Εδάφους.....	17
2.1.2 Σχετική Διηλεκτρική Διαπερατότητα - Χωρητικότητα Εδάφους.....	18
2.1.3 Συνθέτη Διηλεκτρική Διαπερατότητα.....	20
2.2 Τρόποι Μέτρησης Ηλεκτρικών Ιδιοτήτων Εδάφους.....	21
2.2.1 Μέθοδος Wenner.....	22
2.2.2 Αισθητήρας Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής.....	23
2.2.3 Χωρητικό Αισθητήριο Ηλεκτρικής Διαπερατότητας.....	24
2.2.4 TDR Μέτρηση Ανάκλασης στο Πεδίο του Χρόνου.....	25
2.2.5 FDR Μέτρηση Ανάκλασης στο Πεδίο της Συχνότητας.....	26
2.2.6 Αισθητήρας Προσδιορισμού Μιγαδικής Αντίστασης Εδάφους.....	27
2.3 Προσδιορισμός Ποιότητας Εδάφους.....	29
2.3.1 Αλατότητα.....	29
2.3.2 Υγρασία.....	29

2.3.3 Θερμοκρασία.....	29
2.3.4 Υφή.....	30
2.3.5 Χημική σύσταση.....	30
2.3.6 Βιολογική σύσταση.....	30
2.4 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 2.....	31
2.5 Κατάλογος Συμβόλων και Εξισώσεων Κεφαλαίου 2.....	32
Κεφάλαιο 3ο: Πειραματική Διάταξη Μέτρησης Ηλεκτρικών Ιδιοτήτων Εδάφους : Μέθοδος Wenper.....	35
3.1 Διάταξη Wenper.....	35
3.1.1 Σχέδιο Διάταξης.....	36
3.1.2 Κύκλωμα Διάταξης.....	36
3.1.3 Μέθοδος Πειραματικής Μέτρησης.....	38
3.2 Αποτελέσματα.....	42
3.3 Συμπεράσματα.....	45
3.4 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 3.....	46
3.5 Κατάλογος Συμβόλων και Εξισώσεων Κεφαλαίου 3.....	47
Κεφάλαιο 4ο: Πειραματική Διάταξη Ενισχυτή Σύνθετης Εμπέδησης και Μέτρησης.....	48
4.1 Ενισχυτής Σύνθετης Εμπέδησης.....	48
4.1.1 Σχέδιο Διάταξης.....	49
4.1.2 Προσομοίωση Διάταξης.....	50
4.1.3 Κύκλωμα Διάταξης.....	54
4.1.3.1 Γεννήτρια DDS.....	54
4.1.3.2 Κύκλωμα Υψηλερατού Φίλτρου.....	55
4.1.3.3 Ηλεκτρόδια.....	56
4.1.3.4 Ενισχυτής Εμπέδησης.....	57
4.1.3.5 Μονάδας Ανίχνευσης Φάσης και Κέρδους.....	59
4.1.3.6 Εξωτερική μονάδα ADC.....	60
4.1.3.7 Μικροελεγκτής και Αισθητήρας Θερμοκρασίας.....	61
4.1.4 Πλακέτα (PCB) Διάταξης.....	62
4.1.5 Κώδικας Μικροελεγκτή και Προγράμματα Απεικόνισης.....	66

4.1.5.1 Πρωτόκολλο MODBUS.....	67
4.1.5.2 Κώδικας Μικροελεγκτή.....	67
4.1.5.3 Πρόγραμμα LabView.....	75
4.1.5.4 Πρόγραμμα PROMOTIC.....	78
4.2 Μετρήσεις.....	80
4.2.1 Μέθοδος Πειραματικής Μέτρησης.....	80
4.3 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 4.....	88
4.4 Κατάλογος Συμβόλων και Εξισώσεων Κεφαλαίου 4.....	89
Κεφάλαιο 5ο: Αποτελέσματα και Βελτιώσεις.....	90
5.1 Αποτελέσματα.....	90
5.2 Συμπεράσματα.....	94
5.3 Βελτιώσεις.....	95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικας Διάταξης Wenner.....	96
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Κώδικας Διάταξης Ενισχυτή Εμπέδισης.....	97
.....	98

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1: Ειδική αντίσταση στερεού υλικού.....	17
Εικόνα 2: Ηλεκτρόδια βυθισμένα στο χώμα.....	18
Εικόνα 3: Πυκνωτής παράλληλων πλακών.....	19
Εικόνα 4: Απόκριση συχνότητας διαπερατότητας υλικού [5].....	20
Εικόνα 5: Μοντέλο κυκλώματος εδάφους.....	21
Εικόνα 6: Διαδρομές ηλεκτρικής αγωγιμότητας για ECa[2].....	22
Εικόνα 7: Μέθοδος Wenner.....	22
Εικόνα 8: Σχηματικό συσκευής - αισθητήρας ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής μέτρησης αγωγιμότητας εδάφους[2][6]...23	23
Εικόνα 9: Γράφημα αισθητήρα σχετικής διαπερατότητα εδάφους.....	24
Εικόνα 10: Γράφημα αισθητήρα σχετικής διαπερατότητα εδάφους.....	25
Εικόνα 11: Γράφημα ηλεκτροδίων TDR.....	25
Εικόνα 12: Αισθητήρας προσδιορισμού μιγαδικής αντίστασης εδάφους.....	27
Εικόνα 13: Σχέδιο προσδιορισμού σύστασης εδάφους.....	30
Εικόνα 14: Διάταξη Wenner.....	35
Εικόνα 15: Block διάγραμμα κυκλώματος Wenner.....	36
Εικόνα 16: Σχηματικό κυκλώματος Wenner.....	37
Εικόνα 17: Υπολογισμένη έναντι προσομοιωμένης ηλεκτρικής αγωγιμότητας.....	38
Εικόνα 18: Κατασκευή Ηλεκτροδίων.....	39
Εικόνα 19: LCR200 και 5TE.....	39
Εικόνα 20: Διάγραμμα ροής διάταξης Wenner.....	40
Εικόνα 21: Στάδια πειράματος με διάταξη Wenner.....	41
Εικόνα 22: Αποτελέσματα δείγματος εδάφους A.....	42
Εικόνα 23: Αποτελέσματα δείγματος εδάφους B.....	43
Εικόνα 24: Αποτελέσματα δείγματος εδάφους Γ.....	44
Εικόνα 25: Probe μέτρησης αγωγιμότητας εδάφους, C1 και C2 πολώνουν το έδαφος, P1 και P2 μετράνε την τάση που αναπτύσσεται και TH ο αισθητήρας θερμοκρασίας.....	45
Εικόνα 26: Βασικό κύκλωμα ενισχυτή σύνθετης αντίστασης.....	48
Εικόνα 27: Block διάγραμμα διάταξης.....	50
Εικόνα 28: Κύκλωμα προσομοίωσης.....	50
Εικόνα 29: Αποτελέσματα δοκιμών διακριτών πυκνωτών.....	53
Εικόνα 30: Αποτελέσματα δοκιμών διακριτών αντιστάσεων.....	53
Εικόνα 31: Κύκλωμα διάταξης.....	54
Εικόνα 32: Μονάδα και σχήμα AD9850.....	55
Εικόνα 33: Κύκλωμα υπερπερατού φίλτρου.....	56
Εικόνα 34: Ηλεκτρόδια.....	57
Εικόνα 35: Σχέδιο ενισχυτή εμπέδησης.....	58
Εικόνα 36: Μονάδα και σχέδιο ανιχνευτή φάσης και κέρδους AD8302.....	59
Εικόνα 37: Συνάρτηση μεταφοράς εξόδων AD8302[10].....	60

Εικόνα 38: Μονάδα και σχέδιο ADC MCP3424.....	61
Εικόνα 39: Σχέδιο μικροελεγκτή ESP32 C6 και αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20.....	62
Εικόνα 40: Σχεδιασμός PCB στο KiCad.....	63
Εικόνα 41: Εκτύπωση σχεδίου πλακέτας PCB σε διαφανές χαρτί.....	63
Εικόνα 42: Επικασσιτερωμένη πλακέτα.....	64
Εικόνα 43: "Πρόσοψη" πλακέτας.....	64
Εικόνα 44: Πλακέτα με τα εξαρτήματα τοποθετημένα.....	65
Εικόνα 45: Πλακέτα με οθόνη.....	65
Εικόνα 46: Διάγραμμα ροής προγράμματος.....	66
Εικόνα 47: Κώδικας προγράμματος 1 : δήλωση μεταβλητών.....	68
Εικόνα 48: Κώδικας προγράμματος 2 : συνάρτηση setup().....	69
Εικόνα 49: Κώδικας προγράμματος 3 : συνάρτηση loop().....	70
Εικόνα 50: Κώδικας προγράμματος 4 : συνάρτηση adc_read.....	72
Εικόνα 51: Κώδικας προγράμματος 5 : συνάρτηση vals_conv.....	73
Εικόνα 52: Κώδικας προγράμματος 6: συνάρτηση complex_vals.....	74
Εικόνα 53: Κώδικας προγράμματος 7: συνάρτηση tempTask.....	74
Εικόνα 54: Front Panel.....	75
Εικόνα 55: Block Diagram.....	76
Εικόνα 56: Block Diagram διάγραμμα 2.....	76
Εικόνα 57: Block Diagram διάγραμμα 3.....	77
Εικόνα 58: Block Diagram διάγραμμα 4.....	77
Εικόνα 59: Αναπτυξιακό περιβάλλον του PROMOTIC.....	78
Εικόνα 60: Κεντρικό πάνελ PROMOTIC.....	79
Εικόνα 61: Πάνελ διαγραμμάτων PROMOTIC.....	79
Εικόνα 62: Αποτελέσματα μετρήσεων ECa δείγματος εδάφους A.....	85
Εικόνα 63: Αποτελέσματα μετρήσεων VWC δείγματος εδάφους A.....	85
Εικόνα 64: Αποτελέσματα μετρήσεων ECa δείγματος εδάφους B.....	86
Εικόνα 65: Αποτελέσματα μετρήσεων VWC δείγματος εδάφους B.....	86
Εικόνα 66: Μέσο γενικό σφάλμα συστήματος ανά έκδοση.....	90
Εικόνα 67: Μέσο σφάλμα ECa και VWC ανά έκδοση.....	91
Εικόνα 68: Μέσο σφάλμα ECa όλων των εδαφών ανά έκδοση.....	91
Εικόνα 69: Μέσο σφάλμα VWC όλων των εδαφών ανά έκδοση.....	92
Εικόνα 70: Τερματικός σύνδεσμος καλωδίου ηλεκτροδίων.....	94

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 : Δείγμα εδάφους Α.....	42
Πίνακας 2: Δείγμα εδάφους Β.....	43
Πίνακας 3: Δείγμα εδάφους Γ.....	44
Πίνακας 4: Αποτελέσματα δοκιμών διακριτών εξαρτημάτων.....	51
Πίνακας 5: Μέσο σφάλμα Αποτελέσματα δοκιμών διακριτών εξαρτημάτων.....	51
Πίνακας 6: Διευθύνσεις MODBUS.....	69
Πίνακας 7: Αποτελέσματα δείγματος Α με όργανα εργαστηρίου.....	81
Πίνακας 8: Αποτελέσματα δείγματος Β με όργανα εργαστηρίου.....	81
Πίνακας 9: Αποτελέσματα δείγματος Γ με όργανα εργαστηρίου.....	81
Πίνακας 10: Αποτελέσματα δείγματος Α με AD8302.....	82
Πίνακας 11: Αποτελέσματα δείγματος Β με AD8302.....	82
Πίνακας 12: Αποτελέσματα δείγματος Γ με AD8302.....	82
Πίνακας 13: Αποτελέσματα δείγματος Α με μικροελεγκτή.....	83
Πίνακας 14: Αποτελέσματα δείγματος Β με μικροελεγκτή.....	83
Πίνακας 15: Αποτελέσματα δείγματος Γ με μικροελεγκτή.....	83
Πίνακας 16: Αποτελέσματα δείγματος Α με PCB.....	84
Πίνακας 17: Αποτελέσματα δείγματος Β με PCB.....	84
Πίνακας 18: Αποτελέσματα δείγματος Γ με PCB.....	84
Πίνακας 19: Αποτελέσματα δείγματος πηλώδους χόματος.....	93

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
SI	International System of Units
EC	Electric Conductivity of soil
ECa	Electric Conductivity Apprent of soil
ECb	Electric Conductivity Bulk of soil
FDR	Frequency Domain Reflectometry
TDR	Time Domain Reflectometry
VWC	Volumetric Water Content
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
HMI	Human Machine Interface

Κεφάλαιο 1ο: Σκοποί και Στόχοι Διπλωματικής

Σκοπός της διπλωματικής είναι η σχεδίαση και υλοποίηση αισθητήρα προσδιορισμού της ποιότητας εδάφους. Ο αισθητήρας θα πρέπει να μπορεί να μετρήσει κάποια από τα χαρακτηριστικά του εδάφους (τα οποία θα περιγραφούν σε επόμενο κεφάλαιο), να είναι εύκολος στην χρήση του ώστε να μπορεί να χρησιμοποιείται στο πεδίο-χωράφι, απλός στην κατασκευή, να επιδιορθώνεται, να συντηρείται εύκολα και να είναι φορητός .

1.1 Λόγοι Προσδιορισμού Ποιότητας Χώματος

Η έλλειψη πόσιμου νερού είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα. Οι δραστηριότητες που καταναλώνουν περισσότερο νερό σχετίζονται με την άρδευση γεωργικών εκτάσεων, η οποία έχει να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις της αύξησης της παραγωγής, μειώνοντας ταυτόχρονα την κατανάλωση νερού και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Εξαιτίας αυτού, είναι πολύ σημαντικό να αναπτυχθούν και να εφαρμοστούν τεχνολογίες που θα επιτρέψουν γεωργία ακριβείας. Η μέτρηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους είναι μια εναλλακτική λύση για την εκτίμηση ορισμένων φυσικοχημικών ιδιοτήτων του, οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν στη διαχείριση της άρδευσης και της χρήσης λιπασμάτων, καθιστώντας το κατάλληλο για καλλιέργεια. [1]

1.2 Μεθοδολογία

Αρχικά, θέσαμε τα χαρακτηριστικά του εδάφους που θέλαμε να μετρήσουμε ώστε να προσδιορίσουμε την ποιότητά του, δηλαδή: αλατότητα, ποσότητα νερού και pH. Υποθέσαμε ότι μπορούμε να εκμαιεύσουμε την ποιότητα του εδάφους αποκλειστικά μέσω της αλατότητας επειδή τα παραπάνω χαρακτηριστικά αλληλοεπηρεάζονται εφαρμόζοντας πειραματικά την <<Μέθοδο των Τεσσάρων Πόλων>> ή <<Wenner Array>>. Διαπιστώσαμε όμως, ότι δεν είναι επαρκής για όλους τους στόχους μας. [2][3] Ακολούθως, βασιζόμενοι κυρίως στις [1] , [4] και [5], εφαρμόσαμε πειραματικά το κύκλωμα του ενισχυτή σύνθετης εμπέδησης (Transimpedance Amplifier) με το οποίο μετρήσαμε την αλατότητα και την ποσότητα του νερού, με την οποία μέθοδο συνεχίσαμε και υλοποιήσαμε καθώς κάλυπτε δυο από τους τρεις τύπους μετρήσεων που θέλαμε.

Τέλος, δεν καταφέραμε να μετρήσουμε το pH λόγω περιπλοκότητας της μεθόδου μέτρησης η οποία θα ακολουθούσε τους παραπάνω στόχους .

1.3 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 1

- [1] Rêgo Segundo, A.K.; Martins, J.H.; Monteiro, P.M.d.B.; De Oliveira, R.A.; Freitas, G.M. A Novel Low-Cost Instrumentation System for Measuring the Water Content and Apparent Electrical Conductivity of Soils. *Sensors* 2015, 15, 25546-25563. <https://doi.org/10.3390/s151025546>
- [2] F. A. Cuéllar Torres, J. David Colorado Montaña and M. S. Narducci Marín, "Design, Manufacturing, and Calibration of a Conductivity Sensor for Precision Agriculture," 2023 IEEE Colombian Caribbean Conference (C3), Barranquilla, Colombia, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/C358072.2023.10436198.
- [3] Corwin, Dennis & Yemoto, Kevin. (2017). Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. 10.2136/msa2015.0039.
- [4] TIDA-060029 LCR Meter Analog Front End Reference Design. (n.d.). Retrieved from <https://www.ti.com/lit/ug/tida06029/tida06029.pdf>
- [5] V. D. Koufogeorgos, A. T. Hatzopoulos, K. Tsiakmakis, V. Vassios, M. S. Papadopoulou and D. K. Papakostas, "Design and Development of a Low-Cost Circuit for Soil Electrical Conductivity Measurement Using the Wenner Array Method," 2025 14th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Dresden, Germany, 2025, pp. 1-5, doi: 10.1109/MOCASST65744.2025.11083912.

Κεφάλαιο 2ο: Ηλεκτρικές Ιδιότητες Εδάφους

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η περιγραφή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων εδάφους που μετρήσαμε, ώστε να προσδιορίσουμε την ποιότητά του, καθώς και τα χαρακτηριστικά που είναι συνδεδεμένα μαζί τους. Στη συνέχεια, θα περιγράψουμε κάποιους από τους τρόπους μέτρησής τους.

2.1 Ηλεκτρικές Ιδιότητες

2.1.1 Ειδική Αντίσταση - Αγωγιμότητα Εδάφους

Η ηλεκτρική αντίσταση είναι το μέγεθος με το οποίο μετράμε τη δυσκολία του ηλεκτρικού ρεύματος να περάσει μέσα από έναν αγωγό. Συμβολίζεται με R , με μονάδα στο SI Ω (Ομ) και είναι ίση με :

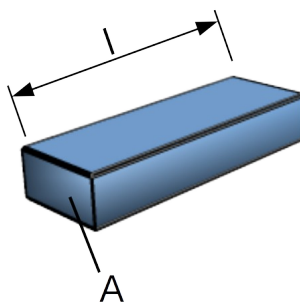
$$R = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

όπου V η διαφορά του δυναμικού στα άκρα του αγωγού και I το ρεύμα που τον διαρρέει.[1]

Η αντίσταση ενός αγωγού όμως εξαρτάται από τη γεωμετρία του και είναι συνδεδεμένος με τη διατομή και το μήκος του. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται ειδική αντίσταση, συμβολίζεται με ρ και μονάδα στο SI Ωm (Ομ-Μετρο), είναι ίση με :

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} \quad (2.2)$$

όπου R την ηλεκτρική αντίσταση ενός αγωγού, A τη διατομή του στερεού και l το μήκος του, όπως φαίνεται στη εικόνα 1.[1]



Εικόνα 1: Ειδική αντίσταση στερεού υλικού

Το ανάστροφο μέγεθος της ηλεκτρικής αντίστασης είναι η αγωγιμότητα, μετράμε την ευκολία του ηλεκτρικού ρεύματος να περάσει μέσα από έναν αγωγό, συμβολίζεται με S , με μονάδα στο SI S (Ζίμενς) και είναι ίση με :

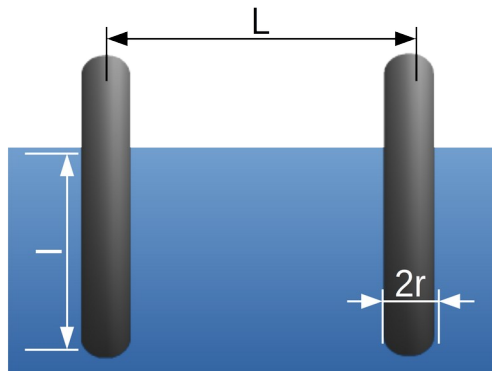
$$S = \frac{1}{R} \quad (2.3)$$

Κεφάλαιο 2ο:

Η ειδική αγωγιμότητα είναι το ανάστροφο μέγεθος της ειδικής αντίστασης, συμβολίζεται με σ και μονάδα στο SI $S \cdot m^{-1}$ (Ζίμενος Μέτρο στην μείον ένα), είναι ίση με :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.4)$$

Μέσω της αγωγιμότητας του εδάφους μπορούμε να προσδιορίσουμε τις συγκεντρώσεις των αλάτων στο νερό του εδάφους άρα και τη αλατότητά του. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται αγωγιμότητα εδάφους, συμβολίζεται EC με μονάδα στο SI S/m (Ζίμενος ανά Μέτρο). Εξαρτάται από τη γεωμετρία των στοιχείων μέτρησης (πχ. πλάκες, κύλινδροι), τον τύπο του εδάφους και την ποσότητα του νερού.[2]



Εικόνα 2: Ηλεκτρόδια βυθισμένα στο χώμα

Ο προσδιορισμός της EC περιλαμβάνει τη μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους και της θερμοκρασίας. Ένας γενικός τύπος της ειδικής αγωγιμότητας εδάφους, θεωρώντας ότι έχουμε ομοιόμορφο χώμα και τα στοιχεία μέτρησης, είναι δυο κύλινδροι :

$$EC = \frac{(R \cdot \pi)}{\left(\frac{2 \cdot l}{r} - \frac{2 \cdot l}{L - r} \right)} \quad (2.5)$$

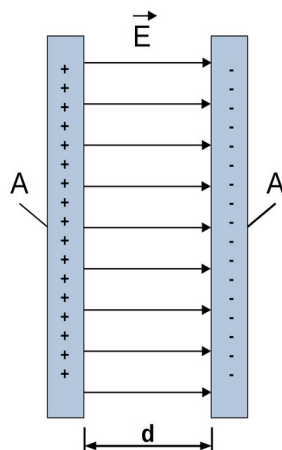
όπου R την ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους, l το ύψος του κυλίνδρου, r η διάμετρος του και L η απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων.[3]

2.1.2 Σχετική Διηλεκτρική Διαπερατότητα - Χωρητικότητα Εδάφους

Χωρητικότητα είναι η ικανότητα ενός στερεού να συλλέγει και να αποθηκεύει ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρικού φορτίου. Εάν περάσει ηλεκτρικό φορτίο μεταξύ δύο αρχικά αφόρτιστων αγωγών και οι δύο θα φορτιστούν ίσα, ο ένας θετικά και ο άλλος αρνητικά, δημιουργείται διαφορά δυναμικού μεταξύ τους. Συμβολίζεται με C , με μονάδα στο SI F (Φαραντ) και είναι ίση με :

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.6)$$

όπου Q το φορτίο κάθε αγωγού και V την τάση μεταξύ τους. Το μέγεθος της χωρητικότητας (η τιμή του πυκνωτή) δεν εξαρτάται από τα φορτία και το δυναμικό, αλλά από τη γεωμετρία των αγωγών (μέγεθος, σχήμα, σχετική θέση) και το υλικό με το οποίο διαχωρίζονται, δηλαδή το διηλεκτρικό. [1]



Εικόνα 3: Πυκνωτής παράλληλων πλακών

Όπως φαίνεται από την εικόνα 3 η χωρητικότητα εξαρτάται από τη γεωμετρία του πυκνωτή :

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \quad (2.7)$$

όπου \vec{E} το ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στις πλάκες, A το εμβαδόν τους, d η απόσταση μεταξύ τους και ϵ_0 η διαπερατότητα του κενού.[1]

Το διηλεκτρικό είναι το υλικό που διαχωρίζει τις πλάκες του πυκνωτή, χρησιμοποιείται γενικά για να πολλαπλασιάσουμε τη χωρητικότητα του. Η ικανότητα ενός διηλεκτρικού υλικού να πολώνεται από ηλεκτρικό πεδίο ονομάζεται ηλεκτρική διαπερατότητα. Εξαρτάται από τη συχνότητα, το μέγεθος και την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Συμβολίζεται με ϵ με μονάδα στο SI σε F/m (Φαραντ ανά μέτρο):

$$\epsilon = \frac{E}{D} \quad (2.8)$$

όπου E το ηλεκτρικό πεδίο και D ηλεκτρικό πεδίο μετατόπισης, είναι ένα διανυσματικό μέγεθος που χρησιμοποιείται στην ηλεκτροδυναμική για να περιγράψει τη συμπεριφορά του ηλεκτρικού πεδίου μέσα σε διηλεκτρικά υλικά. Στην περίπτωση όπως στην εικόνα 3 ,δηλαδή ένας πυκνωτής αποτελούμενος από παράλληλες πλάκες και κάποιο διηλεκτρικό υλικό ανάμεσα τους, τότε έχουμε :

$$C = K \cdot C_0 \quad (2.9)$$

όπου K η σχετική διηλεκτρική σταθερά, C_0 η χωρητικότητα του πυκνωτή χωρίς κάποιο διηλεκτρικό υλικό και C η πολλαπλασιασμένη κατά K χωρητικότητα, συνεπώς οι (2.7) και (2.9) για έναν πυκνωτή όπως της εικόνας 3 θα έχουμε :

$$C = K \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \quad (2.10)$$

όπου:

$$\epsilon = K \cdot \epsilon_0 \quad (2.11)$$

που ονομάζεται διηλεκτρική σταθερά ή διαπερατότητα.[1]

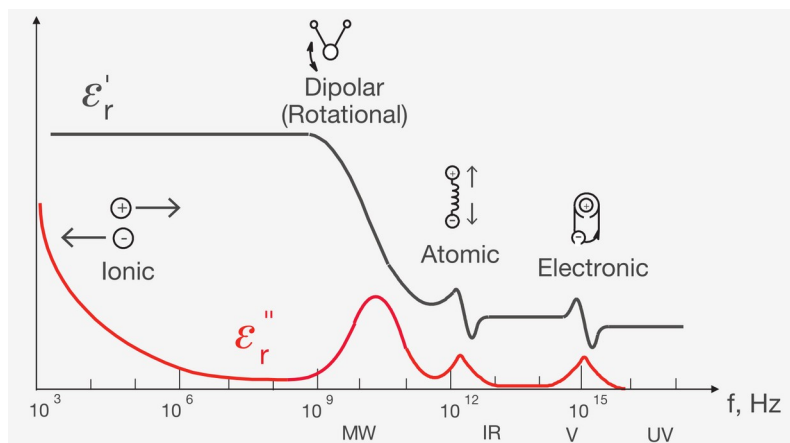
Ένας άλλος τρόπος προσδιορισμού της διαπερατότητας είναι η σχετική διαπερατότητα, που είναι ο λόγος της διαπερατότητας του υλικού προς τη διαπερατότητα του κενού. Η σχετική διαπερατότητα είναι μιγαδικό μέγεθος χωρίς διαστάσεις :

$$\epsilon_r(\omega) = \frac{\epsilon(\omega)}{\epsilon_0} \quad (2.12)$$

όπου $\epsilon(\omega)$ η εξαρτώμενη από τη συχνότητα μιγαδική διαπερατότητα του υλικού, ϵ_0 η διαπερατότητα του κενού και ω η γωνιακή συχνότητα. Το νερό παρουσιάζει διηλεκτρική ικανότητα, η ποσότητά του στο έδαφος είναι ανάλογη με την αυξομείωση ενός διηλεκτρικού υλικού ανάμεσα στις πλάκες ενός πυκνωτή, δηλαδή χρησιμοποιούμε τη σχετική διαπερατότητα για να υπολογίσουμε την ποσότητα του νερού.[4]

2.1.3 Συνθέτη Διηλεκτρική Διαπερατότητα

Κάθε υλικό έχει ένα σύνολο ηλεκτρικών χαρακτηριστικών που εξαρτώνται από τις διηλεκτρικές του ιδιότητες. Αυτές μπορούν να αλλάξουν ανάλογα με τη συχνότητα, τη θερμοκρασία, τον προσανατολισμό, το μείγμα, την πίεση και τη μοριακή δομή του υλικού. Η σύνθετη διηλεκτρική διαπερατότητα είναι ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται στον ηλεκτρομαγνητισμό για να περιγράψει την απόκριση ενός υλικού σε ένα εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Πρόκειται για ένα σύνθετο μέγεθος που λαμβάνει υπόψη τόσο την αποθήκευση όσο και τη διάχυση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας εντός ενός υλικού. Στις παραπάνω υποενότητες περιγράψαμε τα μεγέθη του ξεχωριστά που περιγράφουν την σύνθετη διηλεκτρική διαπερατότητα.[5]



Εικόνα 4: Απόκριση συχνότητας διαπερατότητας υλικού [5]

Όπως αναφέραμε είναι μιγαδικό μέγεθος χωρίς διαστάσεις και εξαρτάται από τη συχνότητα πόλωσης του υλικού και μπορεί να γραφτεί ως:

$$\epsilon_\alpha(\omega) = \epsilon'_r(\omega) - j \cdot \epsilon''_r(\omega) \quad (2.13)$$

όπου το πραγματικό μέρος της διαπερατότητας $\epsilon'_r(\omega)$ είναι το μέτρο της πόσης ενέργειας αποθηκεύεται από ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο σε ένα υλικό. Το φανταστικό μέρος της διαπερατότητας $j\epsilon''_r(\omega)$ ονομάζεται συντελεστής απωλειών και είναι οι απώλειες που υφίσταται ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο μέσα στο υλικό και ω η γωνιακή συχνότητα.

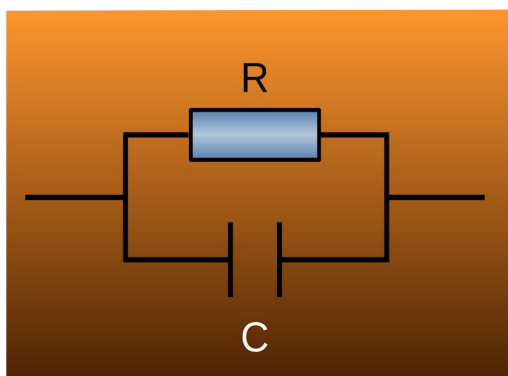
Το έδαφος είναι όμως ένα υλικό το οποίο παρουσιάζει απώλειες, η (2.13) μπορεί να γραφτεί ως φαινόμενη σύνθετη διηλεκτρική διαπερατότητα :

$$\epsilon_a = \epsilon'_r - \frac{j \cdot \sigma}{\omega \cdot \epsilon_0} \quad (2.14)$$

όπου ϵ'_r η σχετική διαπερατότητα και σ η αγωγιμότητα του υλικού.[4]

Από τη φαινόμενη σύνθετη διηλεκτρική διαπερατότητα υπολογίζουμε την ποσότητα του νερού στο έδαφος, με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με την σχετική διαπερατότητα.

2.2 Τρόποι Μέτρησης Ηλεκτρικών Ιδιοτήτων Εδάφους

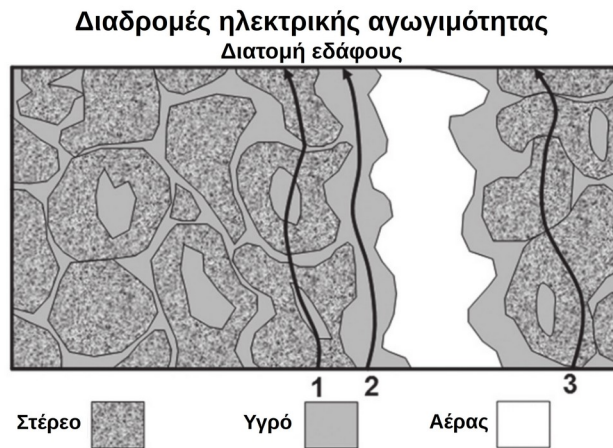


Εικόνα 5: Μοντέλο κυκλώματος εδάφους

Όπως αναφέραμε παραπάνω, το έδαφος έχει διηλεκτρικές ιδιότητες, για να μπορέσουμε να τις μετρήσουμε θεωρούμε το έδαφος σαν ένα ομοιόμορφο υλικό, καθώς επίσης θεωρούμε ότι το έδαφος μπορεί να προσδιοριστεί σαν ένα κύκλωμα μιας αντίστασης παράλληλης με έναν πυκνωτή. Οπότε οι μέθοδοι μέτρησης θα μετράνε είτε ένα από τα δυο στοιχεία του κυκλώματος είτε από τον συνδυασμό τους.

Μέσω του πυκνωτή μπορούμε να προσδιορίζουμε την υγρασία του χώματος από την ογκομετρική ή από την βαριομετρική περιεκτικότητα σε νερό που υπάρχει στο έδαφος, διότι υπάρχει άμεση σχέση με το διηλεκτρικό του νερού με το διηλεκτρικό που μπορεί να μετρηθεί.[4][7]

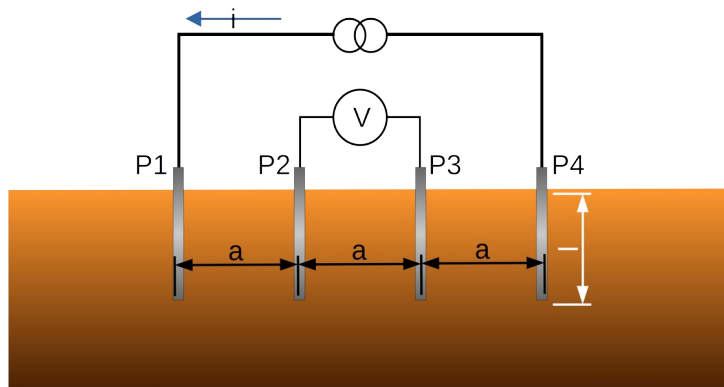
Μέσω της αντίστασης θα προσδιορίζουμε τη φαινόμενη αγωγιμότητα (apprent soil conductivity) EC_a δηλαδή, μετριούνται συμπεριλαμβανομένου του νερού, των αλάτων, των εδαφικών σωματιδίων και των οργανικών ουσιών στο έδαφος. Είναι η αγωγιμότητα στην περιοχή του αισθητήρα, όπως φαίνεται στη εικόνα 6. Ένας άλλος προσδιορισμός είναι της χύμα αγωγιμότητας (bulk soil conductivity) EC_b που αντιπροσωπεύει την εγγενή αγωγή ιδιότητα του εδάφους.[2]



Εικόνα 6: Διαδρομές ηλεκτρικής αγωγιμότητας για ECa[2]

2.2.1 Μέθοδος Wenner

Η μέθοδος Wenner ή μέθοδος τεσσάρων ηλεκτροδίων (four pole method), βασίζεται στην πόλωση του χώματος από μια πηγή ρεύματος και τη μέτρηση της τάσης που αναπτύσσεται στο έδαφος. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί το έδαφος ως αισθητήριο αντίστασης – αγωγιμότητας.



Εικόνα 7: Μέθοδος Wenner

Τοποθετούνται σε ευθεία γραμμή τέσσερα ηλεκτρόδια σε ίση απόσταση μεταξύ τους, κάθετα στο χώμα με a την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και l το μήκος των ηλεκτροδίων που έρχονται σε επαφή με το χώμα. Το P1, P4 πολώνουν το έδαφος και τα P2, P3 μετράνε την τάση που αναπτύσσεται όπως φαίνεται στην εικόνα 7, εφαρμόζοντας τον νόμο του Ohm μετράμε την αντίσταση του εδάφους :

$$R = \frac{V}{i} \quad (2.15)$$

όπου V την τάση ανάμεσα στα P2, P3 και i η ένταση του ρεύματος. Παίρνοντας υπόψιν την απόσταση και το μήκος των ηλεκτροδίων έχουμε :

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot R}{1 + \left(\frac{2 \cdot \alpha}{\sqrt{\alpha^2 + 4l^2}} \right) - \left(\frac{2 \cdot \alpha}{\sqrt{4\alpha^2 + 4l^2}} \right)} \quad (2.16)$$

όπου αποτέλεσμα θα είναι στο SI Ω/m (Ομ ανά μέτρο), για να πάρουμε την αγωγιμότητα αναστρέφουμε τον όρο της R :

$$EC_a = \frac{4 \cdot \pi \cdot \alpha}{\left(1 + \left(\frac{2 \cdot \alpha}{\sqrt{\alpha^2 + 4l^2}} \right) - \left(\frac{2 \cdot \alpha}{\sqrt{4\alpha^2 + 4l^2}} \right) \right)} R \quad (2.17)$$

όπου το αποτέλεσμα στο SI είναι σε S/m (Ζίμενς ανά μέτρο) οι (2.16) και (2.17) χρησιμοποιούνται μόνο στην μέθοδο Wenner (ισόποση απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίων). Υπάρχουν και άλλες εξίσωση που περιγράφουν την μέθοδο Wenner, με μικρές διαφορές μεταξύ τους. Εμείς χρησιμοποιήσαμε μια άλλη παρόμοια εξίσωση με την (2.17) για τα πειράματά μας.

Η μέθοδος αυτή δεν μετράει σε κύκλο γύρω από τα ηλεκτρόδια άλλα σε ευθεία γραμμή, είναι δηλαδή δισδιάστατη μέτρηση, με βάθος :

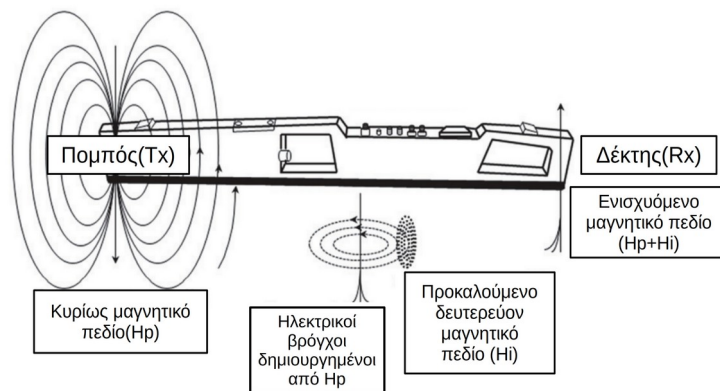
$$Depth = \frac{a}{3} \quad (2.18)$$

Και ο όγκος που θα μετρηθεί είναι στην γραμμή:

$$Area = Depth^3 \quad (2.19)$$

Όσο αυξάνεται η απόσταση, αυξάνεται το βάθος της μέτρησης και ο όγκος.[2][6][9]

2.2.2 Αισθητήρας Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής



Εικόνα 8: Σχηματικό συσκευής - αισθητήρας ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής μέτρησης αγωγιμότητας εδάφους[2][6]

Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή είναι το φαινόμενο ανάπτυξης ηλεκτρισμού λόγω ενός μαγνητικού πεδίου. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της αγωγιμότητας του εδάφους.

Η βασική αρχή λειτουργίας του μετρητή ηλεκτρικής αγωγιμότητας εδάφους παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 8. Ένα πηνίο πομπού που βρίσκεται στο ένα άκρο του οργάνου δημιουργεί το κυρίως

μαγνητικό πεδίο H_p στο έδαφος και με τη σειρά του προκαλεί κυκλικούς βρόγχους ρευμάτων. Το μέγεθος αυτών των βρόγχων είναι ευθέως ανάλογο με την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους στην περιοχή του βρόγχου αυτού. Κάθε βρόγχος ρεύματος παράγει ένα δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο H_i που είναι ανάλογο της τιμής του ρεύματος που ρέει μέσα στον βρόγχο. Ένα τμήμα του δευτερογενούς προκαλούμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από κάθε βρόγχο ανακτάται από το πηνίο δέκτη του οργάνου και το άθροισμα αυτών των σημάτων ενισχύεται και διαμορφώνεται σε μια τάση εξόδου, η οποία σχετίζεται γραμμικά με τη φαινόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους EC_a . [2] [6]

$$EC_a = \frac{4}{2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot f \cdot s^2} \left[\frac{H_i}{H_p} \right] \quad (2.20)$$

όπου το αποτέλεσμα της (2.20) στο SI θα είναι σε S/m (Ζίμενς ανά μέτρο) και με μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του ελεύθερου χώρου, f η συχνότητα της έντασης, s η απόσταση των πηνίων και H_p , H_i οι εντάσεις των πεδίων, το βάθος της μέτρησης δίνεται από τον τύπο :

$$Depth = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot EC_a}} \quad (2.21)$$

Ο όγκος που θα μετρηθεί δίνεται από τον τύπο :

$$Area = \pi \cdot (k_1 \cdot s + k_2 \cdot Depth)^2 \quad (2.22)$$

όπου οι k_1 και k_2 οι σταθερές με βάση τον σχεδιασμό - γεωμετρία του αισθητήρα.

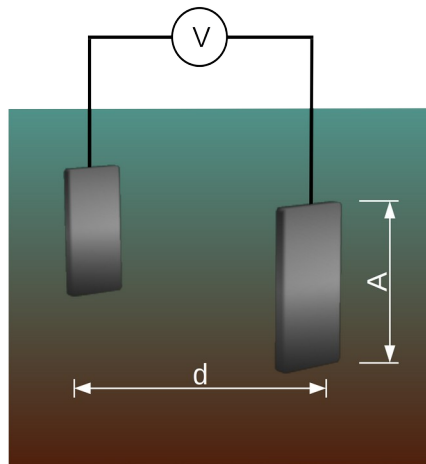
2.2.3 Χωρητικό Αισθητήριο Ηλεκτρικής Διαπερατότητας

Θεωρώντας το έδαφος σαν διηλεκτρικό υλικό και τα ηλεκτρόδια σαν τις πλάκες ενός πυκνωτή, μπορούμε να μετρήσουμε τη διαπερατότητα του εδάφους. Η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους εξαρτάται από την περιεκτικότητά του σε υγρασία το ξηρό έδαφος έχει χαμηλή διηλεκτρική σταθερά περίπου 2-5 F/m ενώ το νερό έχει υψηλή διηλεκτρική σταθερά περίπου 80 F/m επομένως, καθώς αυξάνεται η υγρασία του εδάφους, η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους αυξάνεται, οδηγώντας σε αύξηση της χωρητικότητας του αισθητήρα.

Η σχετική διαπερατότητα του εδάφους περιγράφεται από τον τύπο:

$$\epsilon_r = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0 \cdot A} \quad (2.23)$$

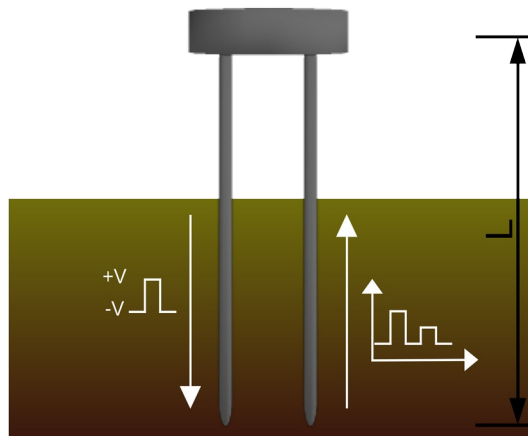
όπου C η χωρητικότητα του εδάφους, d η απόσταση των πλακών, ϵ_0 η διαπερατότητα του κενού και A το εμβαδόν των πλακών. Το βάθος της μέτρησης εξαρτάται από το μήκος των πλακών του αισθητήρα και ο όγκος από το εμβαδόν των πλακών. [4] [7]



Εικόνα 10: Γράφημα αισθητήρα σχετικής διαπερατότητα εδάφους

2.2.4 TDR Μέτρηση Ανάκλασης στο Πεδίο του Χρόνου

Η μέθοδος TDR (Time Domain Reflectometry) βασίζεται στη μέτρηση του χρόνου διάδοσης ενός ηλεκτρικού παλμού κατά μήκος ηλεκτροδίων που βρίσκονται στο έδαφος. Η διαπερατότητα είναι κύριος παράγοντας που αξιολογείται κατά τη διάρκεια της μέτρησης και δευτερεύον η αγωγιμότητα, δηλαδή μετράμε την απόκριση στον χρόνο του εδάφους σε σχέση με έναν παλμό.[8]



Εικόνα 11: Γράφημα ηλεκτροδίων TDR

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται στα παράλληλα ηλεκτρόδια μήκους L , θεωρούμε ότι κύμα μεταδίδεται κάθετα προς το έδαφος, πράγμα που σημαίνει ότι τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία είναι κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η ταχύτητα διάδοσης του παλμού στο έδαφος προσδιορίζεται από την σχέση :

Κεφάλαιο 2ο:

$$v \approx \frac{2 \cdot L}{t} \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon_b}} \quad (2.24)$$

λύνοντας την (2.26) για ϵ_b , βρίσκουμε την σχετική διαπερατότητα του εδάφους λόγω $\epsilon_b \approx \epsilon'_r$:

$$\epsilon_b = \left(\frac{c \cdot t}{2 \cdot L} \right)^2 \quad (2.25)$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός, t ο χρόνος που χρειάζεται ο παλμός να ταξιδεύσει την απόσταση $2 \cdot L$ και L το μήκος των ηλεκτροδίων. Η σχέση μεταξύ της ταχύτητας διάδοσης του παλμού στο έδαφος και του πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής διαπερατότητας παρέχει τη βάση της αρχής μέτρησης της TDR. Μέσω της TDR μπορούμε επίσης να προσδιορίσουμε της ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους:

$$\sigma_b = \frac{K_p \cdot f_t}{Z_L} \quad (2.26)$$

όπου Z_L η μιγαδική αντίσταση των ηλεκτροδίων, K_p η σταθερά με βάση τον σχεδιασμό - γεωμετρία των ηλεκτροδίων και f_t ο συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας.[8]

2.2.5 FDR Μέτρηση Ανάκλασης στο Πεδίο της Συχνότητας

Η μέθοδος FDR (Frequency Domain Reflectometry) χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της διαπερατότητας και της αγωγιμότητας του εδάφους και λειτουργεί στο πεδίο της συχνότητας. Η αλληλεπίδραση του σήματος με το έδαφος εξαρτάται από τη διηλεκτρική διαπερατότητα και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους. Σε αυτήν τη μέθοδο θεωρούμε το έδαφος σαν το κύκλωμα που αναφέραμε παραπάνω, δηλαδή μια αντίσταση και έναν πυκνωτή παράλληλα. Γίνονται πολλαπλές μετρήσεις από χαμηλή συχνότητα σε υψηλή, ώστε να προσδιορίζουμε την αγωγιμότητα και διαπερατότητα. Ένα ημιτονοειδές σήμα με γνωστή συχνότητα αποστέλλεται στο έδαφος χρησιμοποιώντας έναν κυματοδηγό (συνήθως ένα ομοαξονικό καλώδιο ή ηλεκτρόδια θαμμένα στο έδαφος). Το πλάτος και η φάση του ανακλώμενου σήματος μετρώνται για τον προσδιορισμό αυτών των ιδιοτήτων του εδάφους.[8]

Οι τύποι που περιγράφουν τις μετρήσεις εξαρτώνται από το κύκλωμα – τρόπο που θα χρησιμοποιηθεί, συνήθως γίνεται μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου σαν ηλεκτρόδιο θαμμένο στο έδαφος, για ένα κύμα που ταξιδεύει μέσα στο έδαφος :

$$\Gamma(f) = \frac{Z(f) + Z_0}{Z(f) - Z_0} \quad (2.26)$$

όπου $\Gamma(f)$ ο συντελεστής ανάκλασης, ο οποίος προσδιορίζει το ποσοστό του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που ανακλάται όταν αυτό συναντά μια ανισότητα αντίστασης, όπως στη επιφάνεια μεταξύ μιας γραμμής μεταφοράς και του περιβάλλοντος μέσου, Z_0 η μιγαδική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς (ομοαξονικό καλώδιο) και $Z(f)$ η αντίσταση εισόδου στο σημείο μέτρησης.[8] Λύνοντας

την (2.26) για $Z(f)$ θα έχουμε την αγωγιμότητα και την διαπερατότητα :

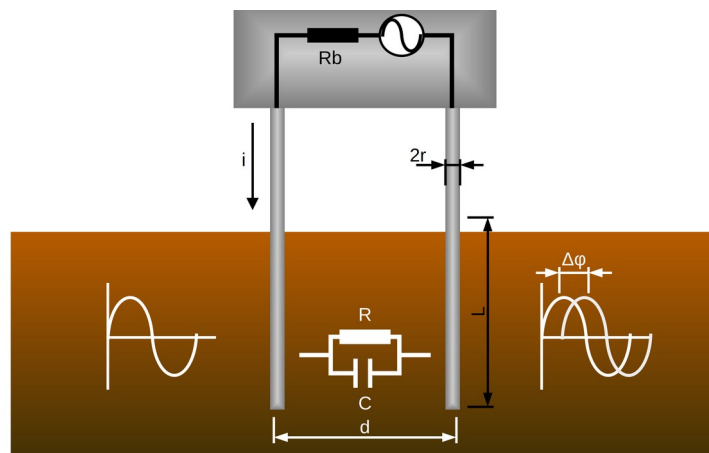
$$Z(f) = Z_0 \cdot \frac{1 - \Gamma(f)}{1 + \Gamma(f)} \quad (2.27)$$

Και εξισώνοντας την (2.12) με (2.21) θα έχουμε :

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon_0} \Rightarrow \sigma = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \quad (2.28)$$

$$\varepsilon = \Re(Z(f)) \quad (2.29)$$

2.2.6 Αισθητήρας Προσδιορισμού Μιγαδικής Αντίστασης Εδάφους



Εικόνα 12: Αισθητήρας προσδιορισμού μιγαδικής αντίστασης εδάφους

Ένας άλλος τρόπος που συνδυάζει κάποιες από τις παραπάνω μεθόδους που περιγράψαμε-μέθοδο Wenner και χωρητικό αισθητήριο ηλεκτρικής διαπερατότητας- είναι η μέτρηση της μιγαδικής αντίστασης του εδάφους. Σε αυτήν την μέθοδο χρησιμοποιούμε δυο ηλεκτρόδια, των οποίων η γεωμετρία τους επηρεάζει τις μετρήσεις, θαμμένα στο έδαφος, θεωρώντας ότι το χώμα είναι ομοιογενές και ανάμεσα τους το χώμα είναι μοντελοποιημένο σαν ένας συνδυασμός αντίστασης και πυκνωτή, πολώνουμε το χώμα μέσω γνωστής αντίστασης με διαφορετικό εύρος συχνοτήτων (KHz και MHz). Στις χαμηλές συχνότητες υπολογίζουμε την αντίσταση άρα και την αγωγιμότητα και στις υψηλές συχνότητες τον πυκνωτή άρα και τη σχετική διαπερατότητα, και στα δυο εύρη μετράμε το πηλίκιο του σήματος εισόδου προς σήμα εξόδου και την διαφορά φάσης μεταξύ τους.[4][7]

Εφαρμόζεται ο νόμος του Ohm αλλά μια μιγαδική αντιστάτη :

$$Z = R \parallel C \Leftrightarrow Y = G + B \quad (2.30)$$

όπου Z είναι η συνθέτη μιγαδική αντίσταση του εδάφους, R η αντίσταση του μοντελοποιημένου εδάφους, C ο πυκνωτής του μοντελοποιημένου εδάφους. Με Y η σύνθετη μιγαδική αγωγιμότητα του εδάφους το ανάστροφο μέγεθος του Z , G η αγωγιμότητα του μοντελοποιημένου εδάφους και B επιδεκτικότητα του μοντελοποιημένου εδάφους. Το ρεύμα που διαρρέει τη μιγαδική αντίσταση του

Κεφάλαιο 2ο:

εδάφους είναι γνωστό, έχουμε:

$$I_{Rb} = \frac{V_{sig}}{Rb} \quad (2.31)$$

$$I_{Rb} = I_{Soil} \quad (2.32)$$

με I_{Rb} η ένταση του ρεύματος πάνω στη γνωστή αντίσταση Rb , V_{sig} η τάση του σήματος πόλωσης και I_{Soil} η ένταση του ρεύματος στη μιγαδική αντίσταση χώματος. Εφαρμόζοντας τον νόμο του Ohm και την (2.32) θα έχουμε:

$$I_{Soil} = \frac{V_{Soil}}{|Z_{Soil}|} \Leftrightarrow |Z_{Soil}| = \frac{V_{Soil}}{I_{Soil}} \Leftrightarrow |Y_{Soil}| = \frac{I_{Soil}}{V_{Soil}} \quad (2.33)$$

με V_{Soil} η τάση της μιγαδικής αντίστασης εδάφους, Z_{Soil} το μέτρο της μιγαδικής αντίστασης εδάφους και Y_{Soil} το μέτρο της μιγαδικής αγωγιμότητας εδάφους. Καθώς με την διάφορα φάσης και την 2.30 έχουμε:

$$Y_{Soil} = |Y_{Soil}| \cdot (\cos(\Delta\varphi) + j\sin(\Delta\varphi)) \quad (2.34)$$

$$G = |Y_{Soil}| \cdot (\cos(\Delta\varphi)) \quad (2.35)$$

$$B = |Y_{Soil}| \cdot (\sin(\Delta\varphi)) \quad (2.36)$$

όπου η $\Delta\varphi$ η διαφορά φάσης, η 2.34 είναι ο υπολογισμός της σύνθετης μιγαδικής αγωγιμότητας, η (2.35) υπολογισμός της αγωγιμότητας και 2.36 ο υπολογισμός επιδεκτικότητας.

Ο υπολογισμός των ηλεκτρικών στοιχείων είναι :

$$R = \frac{1}{G} \quad (2.37)$$

$$C = \frac{B}{\omega} \quad (2.38)$$

με ω η γωνιακή ταχύτητα του σήματος.

Τέλος για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων :

$$EC\alpha = G \cdot k_g \quad (2.39)$$

$$\epsilon_r = \frac{C}{\epsilon_0 \cdot k_g} \quad (2.40)$$

με k_g ο όρος της γεωμετρίας των ηλεκτροδίων, ϵ_0 η διαπερατότητα του κενού, ϵ_r η σχετική διαπερατότητα του εδάφους και $EC\alpha$ η αγωγιμότητα του χώματος.[4][7]

2.3 Προσδιορισμός Ποιότητας Εδάφους

Η διαδικασία προσδιορισμού της ποιότητας του εδάφους περιέχει φυσικές, χημικές και βιολογικές παραμέτρους, προκειμένου να αξιολογηθεί η ικανότητά του να υποστηρίζει την ανάπτυξη φυτών και τη διατήρηση οικολογικής ισορροπίας. Εκτός από την αλατότητα, την υγρασία και τη θερμοκρασία, υπάρχουν παράγοντες όπως η υφή, το pH, η περιεκτικότητα σε οργανική ουσία, η μικροβιακή δραστηριότητα και η διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων.

2.3.1 Αλατότητα

Η αλατότητα του εδάφους αναφέρεται στη συγκέντρωση διαλυτών αλάτων που περιέχονται στο νερό των πόρων του εδάφους. Αυτά τα άλατα, όπως το χλωριούχο νάτριο, τα θειικά και άλλα, επηρεάζουν σημαντικά τη δυνατότητα των φυτών να απορροφούν νερό και θρεπτικά συστατικά. Η υψηλή αλατότητα μπορεί να οδηγήσει σε αλατούχο στρες για τα φυτά, μειώνοντας την ανάπτυξη και την απόδοσή τους. Η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) αποτελεί κοινή πρακτική για τον προσδιορισμό της αλατότητας και βοηθά στην έγκαιρη λήψη μέτρων, όπως η αποστράγγιση ή η χρήση κατάλληλων καλλιεργειών ανθεκτικών στο αλάτι.

Γενικά μπορεί να χρησιμοποιήσει ο τύπος :

$$C \approx 640 \cdot EC_{@25C} \quad (2.41)$$

όπου C η αλατότητα σε mg/L και $EC_{@25C}$ που είναι η αγωγιμότητα στο 25 βαθμούς Κελσίου. [2][6]

2.3.2 Υγρασία

Η υγρασία του εδάφους είναι η διαθεσιμότητα του νερού και των θρεπτικών συστατικών στις ρίζες. Το ποσοστό υγρασίας καθορίζει την αποτελεσματικότητα της φωτοσύνθεσης, τη μεταφορά θρεπτικών στοιχείων και τη μικροβιακή δραστηριότητα στο έδαφος. Υπερβολική υγρασία μπορεί να προκαλέσει ασφυξία στις ρίζες, ενώ η έλλειψή της οδηγεί σε υδατικό στρες.

Ένας τύπος προσδιορισμού της υγρασίας είναι η εξίσωση του Torpp:

$$\theta_v = \left(\left(4.3 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon_a^3 \right) - \left(5.5 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon_a^2 \right) + \left(2.92 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon_a \right) - 0.053 \right) \cdot 100 \quad (2.42)$$

με θ_v το ποσοστό της ογκομετρικής περιεκτικότητας σε νερό (VWC%) και ε_a φαινόμενη διηλεκτρική διαπερατότητα.[4][7]

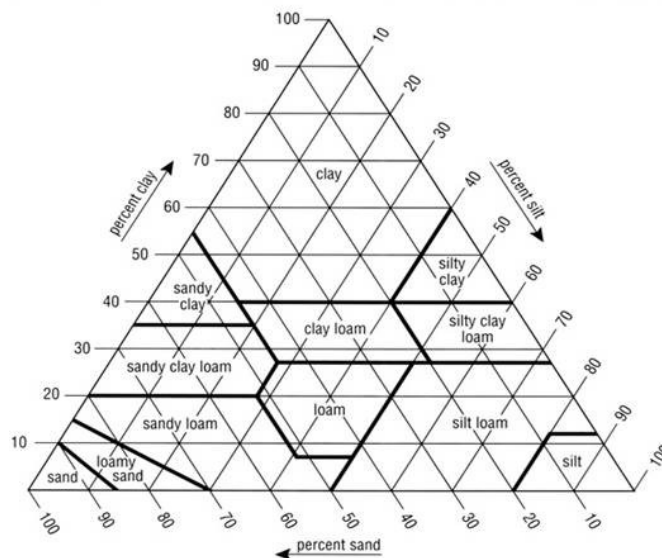
2.3.3 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία του εδάφους επηρεάζει την υγρασία και την αλατότητα, όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, επιταχύνεται η εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια του εδάφους, οδηγώντας σε μείωση της υγρασίας και συγκέντρωση των διαλυμένων αλάτων στην επιφάνεια, αυξάνοντας έτσι την αλατότητα. Αντίστοιχα, χαμηλές θερμοκρασίες μειώνουν την εξάτμιση και επιβραδύνουν τις

φυσικοχημικές διεργασίες, περιορίζοντας τη μετακίνηση και συγκέντρωση των αλάτων. Επιπλέον, η θερμοκρασία επηρεάζει τη μικροβιακή δραστηριότητα και τη διαθεσιμότητα του νερού για τα φυτά, επηρεάζοντας έμμεσα τη γενική ισορροπία υγρασίας και αλατότητας στο εδαφικό περιβάλλον.[2][6]

2.3.4 Υφή

Η υφή του εδάφους είναι ποσοστό άμμου, ιλύος και αργίλου που περιέχεται στο έδαφος και αποτελεί χαρακτηριστικό που επηρεάζει την καταλληλότητά του για καλλιέργεια. Ανάλογα με την υφή, το έδαφος μπορεί να είναι αμμώδες, πηλώδες, αργιλώδες ή μίγμα αυτών (π.χ. αμμοπηλώδες). Η υφή επηρεάζει σημαντικά ιδιότητες όπως η κατακράτηση νερού, ο αερισμός, η διήθηση, η ευκολία κατεργασίας και η θρεπτική ικανότητα.



Εικόνα 13: Σχέδιο προσδιορισμού σύστασης εδάφους

2.3.5 Χημική σύσταση

Η χημική ανάλυση του εδάφους προσδιορίζει τις συγκεντρώσεις βασικών θρεπτικών στοιχείων όπως το άζωτο (N), ο φώσφορος (P), το κάλιο (K), καθώς και άλλων μικροθρεπτικών (σίδηρος, μαγνήσιο, ψευδάργυρος κ.ά.). Επιπλέον, αξιολογεί παραμέτρους όπως το pH, η αλατότητα και η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC), που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στα φυτά.

2.3.6 Βιολογική σύσταση

Η βιολογική ανάλυση επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της μικροβιακής δραστηριότητας και της βιοποικιλότητας που υπάρχει στο έδαφος, οι οποίες είναι καθοριστικές για τη διάσπαση οργανικής ύλης, την απελευθέρωση θρεπτικών στοιχείων και τη γενική υγεία του εδαφικού οικοσυστήματος.

Μετρά παραμέτρους όπως η μικροβιακή βιομάζα, τα ένζυμα του εδάφους και η παρουσία ωφέλιμων οργανισμών (π.χ. μυκόρριζες, βακτήρια αζωτοδέσμευσης).

2.4 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 2

- [1] Giancoli, D. C. (2023). Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς – τόμος Β (Γ. Ι. Μπόντζιος, Μετ.) (5η έκδ.; τόμος Β). Τζιόλα. ISBN 978-618-221-017-8
- [2] Rhoades, J.D., F. Chanduvi, and S. Lesch., "Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements", IrrigDrain Pap. 57. FAO, Rome 1999.
- [3] M. I. Alif Muslan, W. F. H. Abdullah, Z. Zulkifli and A. B. Binti Rosli, "Electrical Conductivity Sensing Circuit Design Using Voltage Divider," 2022 IEEE 12th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE), Penang, Malaysia, 2022, pp. 186-190, doi:10.1109/ISCAIE54458.2022.979450.
- [4] Rêgo Segundo, A.K.; Martins, J.H.; Monteiro, P.M.d.B.; De Oliveira, R.A.; Freitas, G.M. A Novel Low-Cost Instrumentation System for Measuring the Water Content and Apparent Electrical Conductivity of Soils. *Sensors* 2015, 15, 25546-25563. <https://doi.org/10.3390/s151025546>
- [5] Keysight Technologies. (n.d.). Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials. Retrieved from <https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-01284/application-notes/5989-2589.pdf>
- [6] Corwin, Dennis & Yemoto, Kevin. (2017). Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. 10.2136/msa2015.0039.
- [7] Chavanne, Xavier & Frangi, Jean-Pierre & de Rosny, Gilles. (2010). A New Device for In Situ Measurement of an Impedance Profile at 1–20 MHz. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*. 59. 1850 - 1859. 10.1109/TIM.2009.2028781.
- [8] Gustavo Fano, W. (2020). The Electrical Properties of Soils with Their Applications to Agriculture, Geophysics, and Engineering. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.88989
- [9] V. D. Koufogeorgos, A. T. Hatzopoulos, K. Tsiakmakis, V. Vassios, M. S. Papadopoulou and D. K. Papakostas, "Design and Development of a Low-Cost Circuit for Soil Electrical Conductivity Measurement Using the Wenner Array Method," 2025 14th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Dresden, Germany, 2025, pp. 1-5, doi: 10.1109/MOCASST65744.2025.11083912.

2.5 Κατάλογος Συμβόλων και Εξισώσεων Κεφαλαίου 2

Σύμβολο	Όνομα	Μονάδα Μέτρησης	Εξίσωση
R	Ηλεκτρική αντίσταση	Ω (Ωμ)	$R = \frac{V}{I}$ (2.1), $R = \frac{V}{i}$ (2.15), $R = \frac{1}{G}$ (2.37)
V	Τάση	V (Βολτ)	$V = R \cdot I$
I, i	Ένταση	A (Αμπέρ)	$I = \frac{V}{R}$ (2.31)
ρ	Ειδική αντίσταση	Ωm (Ωμ επί μετρά)	$\rho = R \cdot \frac{A}{l}$ (2.2)
A	Διατομή, Εμβαδόν	m^2 (τετραγωνικά μετρά)	
l	Μήκος, Ύψος	m (μετρά)	
S	Αγωγιμότητα	S (Ζίμενς)	$S = \frac{1}{R}$ (2.3)
σ	Ειδική αγωγιμότητα	$S m^{-1}$ (Ζίμενς ανά μέτρο)	$\sigma = \frac{1}{\rho}$ (2.4)
EC	Ειδική αντίστασης εδάφους	S/m (Ζίμενς ανά μέτρο)	$EC = \frac{(R \cdot \pi)}{\left(\frac{2 \cdot l}{r} - \frac{2 \cdot l}{L - r}\right)}$ (2.5)
r	Διάμετρος	m (μετρά)	
L, d, a, s	Απόσταση	m (μετρά)	
C	Χωρητικότητα F (Φαράντ)	$C = \frac{Q}{V}$ (2.6), $C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$ (2.7), $C = K \cdot C_0$ (2.9), $C = K \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$ (2.10), $C = \frac{B}{\omega}$ (2.38)	
Q	Ηλεκτρικό φορτίο	C (Κουλόμπ)	
ϵ_0	Διαπερατότητα του κενού	$A^2 \cdot s^4 \cdot kg^{-1} \cdot m^{-3}, F/m$	$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$
ϵ	Ηλεκτρική διαπερατότητα, διαπερατότητα	F/m (Φαράντ ανά μέτρο)	$\epsilon = \frac{E}{D}$ (2.8), $\epsilon = K \cdot \epsilon_0$ (2.10)
E	Ηλεκτρικό πεδίο	N/C (Νιούτον ανά Κουλόμπ)	
D	Ηλεκτρικό πεδίο μετατόπισης	C/m^2 (Κουλόμπ ανά τετραγωνικά μετρά)	

K	Σχετική διηλεκτρική σταθερά		
$\varepsilon_r(\omega), \varepsilon'_r, \varepsilon_r, \varepsilon_b$	Σχετική διαπερατότητα	$\varepsilon_r(\omega) = \frac{\varepsilon(\omega)}{\varepsilon_0}$ (2.12), $\varepsilon_r = \frac{C \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot A}$ (2.23), $\varepsilon_b = \left(\frac{c \cdot t}{2 \cdot L}\right)^2$ (2.25), $\varepsilon_r = \frac{C}{\varepsilon_0 \cdot k_g}$ (2.40)	
ω	Γωνιακή συχνότητα	rad/s (Ακτίνιο ανά δευτερόλεπτο)	
$\varepsilon_\alpha(\omega)$	Συνθέτη διηλεκτρική διαπερατότητα	$\varepsilon_\alpha(\omega) = \varepsilon'_r(\omega) - j \cdot \varepsilon''_r(\omega)$ (2.13)	
ε_α	Φαινόμενη συνθέτη διηλεκτρική διαπερατότητα	$\varepsilon_\alpha = \varepsilon_r - \frac{j \cdot \sigma}{\omega \cdot \varepsilon_0}$ (2.14)	
ECa	Φαινόμενη αγωγιμότητα εδάφους	S/m (Ζίμενς ανά μέτρο)	
ECb	Χύμα αγωγιμότητας εδάφους	S/m (Ζίμενς ανά μέτρο)	
ECa	Φαινόμενη αγωγιμότητα εδάφους Wenner S/m (Ζίμενς ανά μέτρο)	$ECa = \frac{4 \cdot \pi \cdot \alpha}{\left(1 + \left(\frac{2 \cdot \alpha}{\sqrt{\alpha^2 + 4l^2}}\right) - \left(\frac{2 \cdot \alpha}{\sqrt{4\alpha^2 + 4l^2}}\right)\right)} R$ (2.17)	
ECa	Φαινόμενη αγωγιμότητα εδάφους EMI S/m (Ζίμενς ανά μέτρο)	$ECa = \frac{4}{2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot f \cdot s^2} \left[\frac{H_i}{H_p} \right]$ (2.20)	
μ_0	Μαγνητική διαπερατότητα του ελεύθερου χώρου	H/m (Ανρί ανά μέτρο)	$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$
f	Συχνότητα	Hz (Χερτζ)	
H_p, H_i	Ένταση μαγνητικού πεδίου	A/m (Αμπέρ ανά μέτρο)	
v	Ταχύτητα διάδοσης του παλμού	m/s (μέτρα ανά δευτερόλεπτο)	$v \approx \frac{2 \cdot L}{t} \approx \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_b}}$ (2.24)
c	Ταχύτητα του φωτός	m/s (μέτρα ανά δευτερόλεπτο)	$c = 299.792.458$
t	Χρόνος	s (δευτερόλεπτο)	
σ_b	Αγωγιμότητα εδάφους TDR	S/m (Ζίμενς ανά μέτρο)	$\sigma_b = \frac{K_p \cdot f_t}{Z_L}$ (2.26)
K_p, k_g	Γεωμετρική σταθερά		
f_t	Συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας		

Κεφάλαιο 2ο:

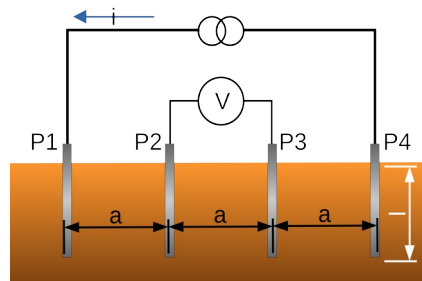
$\Gamma(f)$	Συντελεστής ανάκλασης		$\Gamma(f) = \frac{Z(f) + Z_0}{Z(f) - Z_0}$ (2.27)
Z	Συνθέτη μιγαδική αντίσταση εδάφους	Ω ($\Omega\mu$)	$Z = R \parallel C \Leftrightarrow Y = G + B$ (2.30)
Y	Σύνθετη μιγαδική αγωγιμότητα εδάφους	S (Ζίμενς)	$Z = R \parallel C \Leftrightarrow Y = G + B$ (2.30)
G	Μιγαδική αγωγιμότητα εδάφους	S (Ζίμενς)	$G = Y_{Soil} \cdot (\cos(\Delta\phi))$ (2.35)
B	Μιγαδική επιδεκτικότητα εδάφους	S (Ζίμενς)	$G = Y_{Soil} \cdot (\cos(\Delta\phi))$ (2.36)
Z_{Soil}	Μέτρο της μιγαδικής αντίστασης εδάφους	Ω ($\Omega\mu$)	
Y_{Soil}	Μέτρο της μιγαδικής αγωγιμότητας εδάφους S (Ζίμενς)		$Y_{Soil} = Y_{Soil} \cdot (\cos(\Delta\phi) + j\sin(\Delta\phi))$ (2.34)
ECa	Φαινόμενη αγωγιμότητα εδάφους ΤΙΑ	S/m (Ζίμενς ανά μέτρο)	$ECa = G \cdot k_g$ (2.39)
C	Αλατότητα	mg/L (χιλιόγραμμα ανά λίτρο)	$C \approx 640 \cdot EC_{@25C}$ (2.41)
$EC_{@25C}$	Αγωγιμότητα στο 25 βαθμούς κελσίου	S/m (Ζίμενς ανά μέτρο)	
θ_v	Ποσοστό περιεκτικότητας σε νερό		
			$\theta_v = \left((4.3 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon_a^3) - (5.5 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon_a^2) + (2.92 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon_a) - 0.053 \right) \cdot 100$ (2.42)

Κεφάλαιο 3ο: Πειραματική Διάταξη Μέτρησης Ηλεκτρικών Ιδιοτήτων Εδάφους : Μέθοδος Wenner

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφεί η μεθοδολογία της Διάταξης Wenner, την οποία εφαρμόσαμε πειραματικά. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1 διαπιστώθηκε ότι η διάταξη Wenner δεν είναι επαρκής για να καθοριστεί η ποιότητα εδάφους μόνη της, θα γίνει όμως πιο εκτεταμένη περιγραφή της.

3.1 Διάταξη Wenner

Στο υποκεφάλαιο 2.2.1 έχουμε περιγράψει ένα κομμάτι της θεωρίας της διάταξης, σε αυτό το υποκεφάλαιο θα προσθέσουμε περαιτέρω πληροφορίες.



Εικόνα 14: Διάταξη Wenner

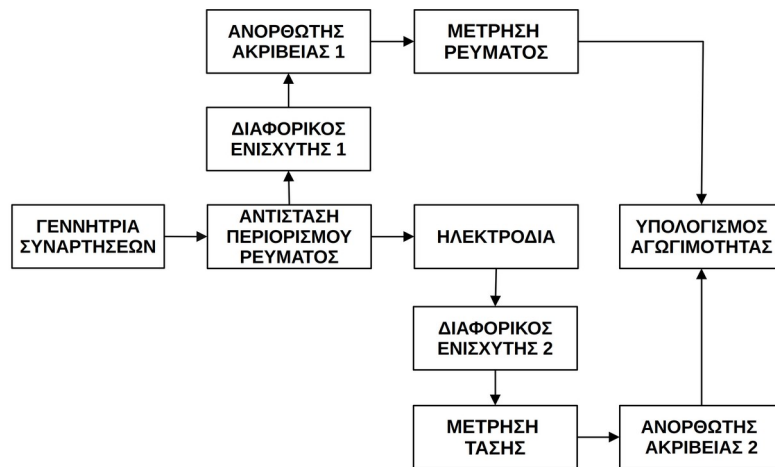
Η εξίσωση (2.17) είναι μια από της εξίσωσης που περιγράφουν την αγωγιμότητα του χώματος, δίχως να παίρνει υπόψιν την θερμοκρασία του. Η θερμοκρασία του χώματος είναι σημαντική παράμετρος λόγω της επιρροής που έχει στην υγρασία του χώματος και στις συγκεντρώσεις των αλάτων. Η θερμοκρασιακά διορθωμένη εξίσωση είναι :

$$EC_{25^{\circ}C} = \frac{1 + \frac{2}{\sqrt{1 + 4 \cdot \left(\frac{l}{a}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{l}{a}\right)^2}}}{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R} \cdot f_T \quad (3.1)$$

$$f_T = 0.4470 + 1.4034 \cdot \exp\left(\frac{-T}{26.815^{\circ}C}\right) \quad (3.2)$$

όπου $EC_{25^{\circ}C}$ είναι η φαινόμενη αγωγιμότητα εδάφους διορθωμένη για τη θερμοκρασία $25^{\circ}C$ στο SI S/m (Ζίμενς ανά μέτρο), a η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, l το μήκος των ηλεκτροδίων που έρχονται σε επαφή με το χώμα, R η υπολογιζόμενη αντίσταση, f_T είναι ο συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας με το T η θερμοκρασία του εδάφους σε βαθμούς Κελσίου κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Στην εξίσωση (2.17) θα την πολλαπλασιάσαμε με το συντελεστή f_T και θα είχαμε παρόμοια αποτελέσματα, άλλα προτιμήσαμε την 3.1 από την [1] .[2][5]

3.1.1 Σχέδιο Διάταξης



Εικόνα 15: Block διάγραμμα κυκλώματος Wenner

Στην εικόνα 15 παρουσιάζεται το μπλοκ διάγραμμα του κυκλώματος μέτρησης αγωγιμότητας, εκτός από το μπλοκ θερμοκρασίας. Το κύκλωμα αποτελείται από μια γεννήτρια λειτουργίας που παράγει ένα ημιτονοειδές σήμα $2V_p$ -p στα 50kHz. Το ρεύμα του σήματος κατευθύνεται στην αντίσταση περιορισμού ρεύματος και στη συνέχεια στα εξωτερικά ηλεκτρόδια εδάφους. Στη συνέχεια, η τάση της αντίστασης του εδάφους μετράται στα εσωτερικά ηλεκτρόδια. Οι δύο τάσεις εναλλασσόμενου ρεύματος που αναπτύσσονται διοχετεύονται σε δύο τελεστικούς ενισχυτές που είναι συνδεδεμένοι ως διαφορικοί ενισχυτές με κέρδος μονάδας. Ο πρώτος μετρά το ρεύμα και ο δεύτερος τη διαφορά τάσης μεταξύ των ανιχνευτών.

3.1.2 Κύκλωμα Διάταξης

Στην εικόνα 16 παρουσιάζεται το σχηματικό του κυκλώματος Wenner, με :

$$V_{IN} = 2V_{pp} \quad (3.3)$$

$$R_{IN} = 50\ \Omega \quad (3.4)$$

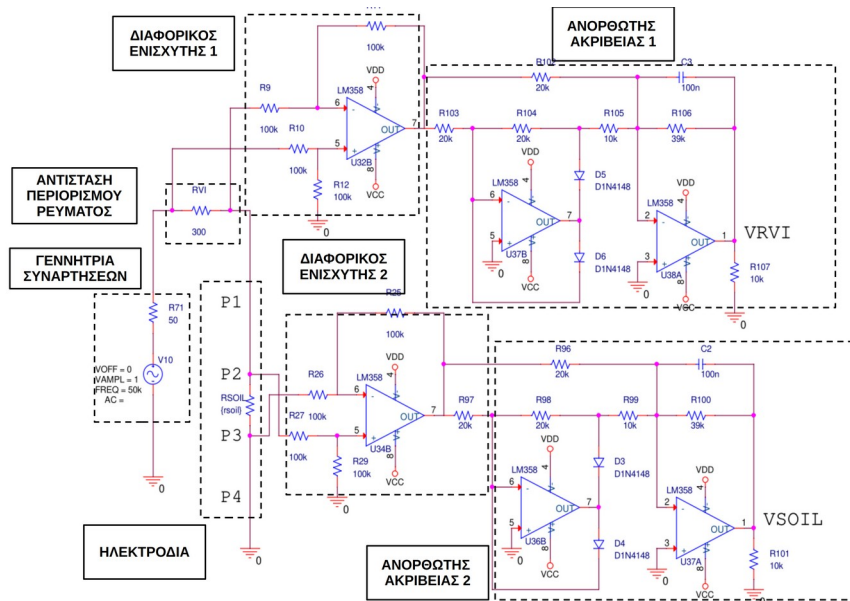
που είναι η ημιτονοειδής τάση της γεννήτριας και αντίσταση εξόδου της αντίστοιχα. Η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα της αντίστασης R_{VI} (αντίσταση περιορισμού ρεύματος) είναι :

$$VRVI_{DIF} = VRVI_1 - VRVI_2 \quad (3.5)$$

$$VRVI_1 = V_{IN} \cdot \frac{R_{VI} + R_{SOIL}}{R_{VI} + R_{SOIL} + R_{IN}} \quad (3.6)$$

$$VRVI_2 = VRVI_1 \cdot \frac{R_{SOIL}}{R_{VI} + R_{SOIL}} \quad (3.7)$$

με $VRVI_{DIF}$ η διαφορική τάση της R_{VI} , $VRVI_1$ η τάση στο αριστερό άκρο της, $VRVI_2$ η τάση στο δεξιό άκρο της και R_{SOIL} η αντίσταση του εδάφους.



Εικόνα 16: Σχηματικό κυκλώματος Wenner

Η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα της αντίστασης $RSOIL$ είναι :

$$V_{RSOIL_DIF} = V_{RSOIL1} - V_{RSOIL2} \quad (3.8)$$

$$V_{RSOIL1} = V_{RVI} \quad (3.9)$$

$$V_{RSOIL2} = 0 \quad (3.10)$$

με V_{RSOIL_DIF} η διαφορική τάση της, V_{RSOIL1} η τάση στο αριστερό άκρο της και V_{RSOIL2} η τάση στο δεξιό άκρο. Οι διαφορικοί ενισχυτές ενισχύουν τη διαφορά τάσης μεταξύ δύο εισόδων τους με την έξοδο τους να είναι ανάλογη της διαφοράς των σημάτων εισόδου.[3] Όπως αναφέραμε έχουν κέρδος μονάδας, λόγω :

$$R9 = R10 = R11 = R12 \quad (3.11)$$

$$R25 = R26 = R27 = R29 \quad (3.12)$$

άρα:

$$V_{DIFAMP1} = V_{RVI_DIF} \cdot \frac{R11}{R10} \quad (3.13)$$

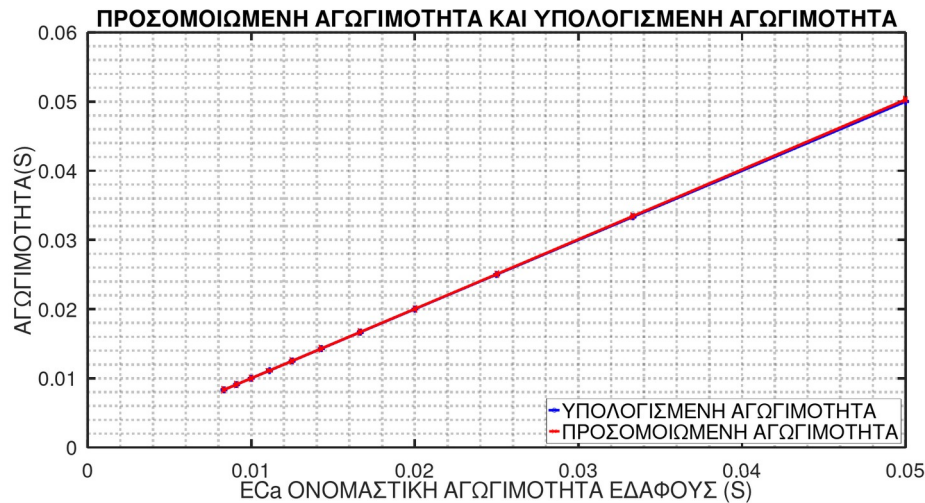
$$V_{DIFAMP2} = V_{RSOIL_DIF} \cdot \frac{R25}{R27} \quad (3.14)$$

όπου $V_{DIFAMP1}$ η τάση εξόδου του διαφορικού ενισχυτή 1, με $V_{DIFAMP2}$ η τάση εξόδου του διαφορικού ενισχυτή 2. Οι έξοδοι τους είναι εναλλασσόμενο σήμα για αυτό χρησιμοποιήσαμε το κύκλωμα του ανορθωτή πλήρους κύματος, που μετατρέπει ένα σήμα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) σε σήμα συνεχούς ρεύματος (DC) .[3] Άρα θα έχουμε :

$$V_{RVI} = V_{DIFAMP1} \quad (3.15)$$

$$V_{VSOIL} = V_{DIFAMP2} \quad (3.16)$$

που είναι οι ανορθωμένες τάσεις των RVI και $RSOIL$, ώστε στην συνέχεια να διαβαστούν από τον ADC του μικροελεγκτή.



Εικόνα 17: Υπολογισμένη έναντι προσομοιωμένης ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Σχεδιάσαμε το κύκλωμα για να μετρήσει την αγωγιμότητα από 20 έως 120 Ohm ή 8,3 mS έως 50 mS. Χρησιμοποιώντας τις (3.13) και (3.14) και ανάλογα με την τιμή της αντίστασης του εδάφους, είναι:

- $V_{DIFAMP1} = 0,803 Vp$ έως $0,632 Vp$ για τον πρώτο ενισχυτή.
- $V_{DIFAMP2} = 53,2 mVp$ έως $253 mVp$ για τον δεύτερο ενισχυτή.

Τα σήματα εναλλασσόμενου ρεύματος που προέρχονται από την έξοδο των διαφορικών ενισχυτών ανορθώνονται από τις βαθμίδες ανορθωτή ακριβείας. Οι τάσεις που προκύπτουν είναι οι εξής:

- $VRVI = 0,803 V$ έως $0,632 V$ για τον πρώτο ανορθωτή.
- $VSOIL = 53,2 mV$ έως $253 mV$ για τον δεύτερο ανορθωτή.

Οι ανωτέρω υπολογισμοί συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα προσομοίωσης Orcad Pspice για την αξιολόγηση της ακρίβειας του συστήματος στην αναφερόμενη περιοχή μέτρησης. Η εικόνα 17 δείχνει την υπολογισμένη αγωγιμότητα και την προσομοιωμένη αγωγιμότητα σε σχέση με την υποτιθέμενη τιμή αγωγιμότητας του εδάφους και επιβεβαιώνει την καλή λειτουργία του κυκλώματος.

3.1.3 Μέθοδος Πειραματικής Μέτρησης

Για να υπολογίσουμε την αγωγιμότητα χρησιμοποιήσαμε στην αρχή προγράμματα αριθμητικών υπολογισμών όπως το MatLab και το Octave, περνάμε τις μετρήσεις χειρονακτικά και τις περνούσαμε στα προγράμματα, στη συνέχεια προγραμματίσαμε έναν μικροελεγκτή για να αυτοματοποιηθούν οι μετρήσεις.

Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήσαμε είναι γαλβανισμένα καρφιά μήκους 10cm και έχουν απόσταση μεταξύ τους 3cm, τοποθετηθήκαν σε μια μοριοσανίδα, όπως φαίνεται στην εικόνα 18. Η θερμοκρασία του εδάφους μετρήθηκε από ένα πέμπτο ηλεκτρόδιο σε απόσταση.



Εικόνα 18: Κατασκευή Ηλεκτροδίων

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικούς τύπους χώματος :

- Δείγμα εδάφους Α, τύπου αμμώδες
- Δείγμα εδάφους Β, τύπου πηλώδες
- Δείγμα εδάφους Γ, τύπου αμμώδες- αργιλώδες

Είχαμε δύο διαφορετικές μεθόδους μετρήσεων :

- Προσθήκη νερού χωρίς ανάμιξη, όπου το νερό προστέθηκε χωρίς ανάμιξη για να προσομοιωθούν οι συνθήκες πεδίου μετά από άρδευση ή βροχόπτωση.
- Προσθήκη νερού με ανάμιξη, όπου το νερό αναμιγνύεται επαρκώς με το έδαφος για να προσομοιωθούν ομοιογενείς συνθήκες κορεσμού.

Η απόδοση του συστήματος επικυρώθηκε με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του με ένα μετρητή LCR Extech LCR200, που είναι μετρητικό όργανο για τον έλεγχο πηνίων, πυκνωτών και αντιστάσεων χρησιμοποιώντας πολλαπλές συχνότητες και ένα εμπορικό μετρητή ποιότητας εδάφους 5TE METER που είναι μετρητής υγρασίας, θερμοκρασίας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους.



Εικόνα 19: LCR200 και 5TE

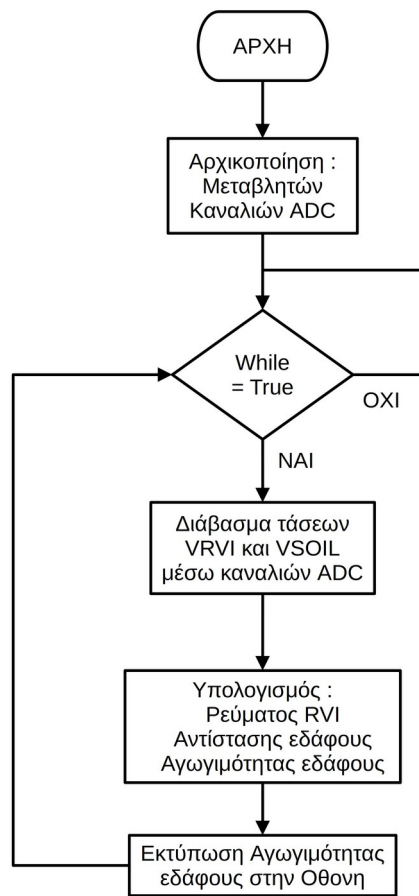
Τα δεδομένα και από τις τρεις συσκευές διατηρήθηκαν και αναλύθηκαν για να αξιολογηθεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία του κυκλώματος. Αρχικά, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η αντίσταση του εδάφους μετρήθηκαν με τη χρήση του κυκλώματος μέτρησης. Οι ίδιες μετρήσεις στις ίδιες συνθήκες λήφθηκαν

Κεφάλαιο 3ο:

από τον μετρητή LCR και τον εμπορικό μετρητή αγωγιμότητας εδάφους 5TE, που θεωρήθηκε ότι παρέχει ακριβείς μετρήσεις. Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους με τη χρήση του μετρητή LCR χρησιμοποιείται ο τύπος που περιγράφεται στο [4]:

$$EC_{LCR} = \frac{\left(\frac{2l}{r} - \frac{2l}{a-r} \right)}{\pi \cdot R_{LCR}} \quad (3.17)$$

με R_{LCR} η μετρούμενη αντίσταση, l το μήκος του ηλεκτροδίου που βυθίζεται στο έδαφος, r η διάμετρος του ηλεκτροδίου και a η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων .

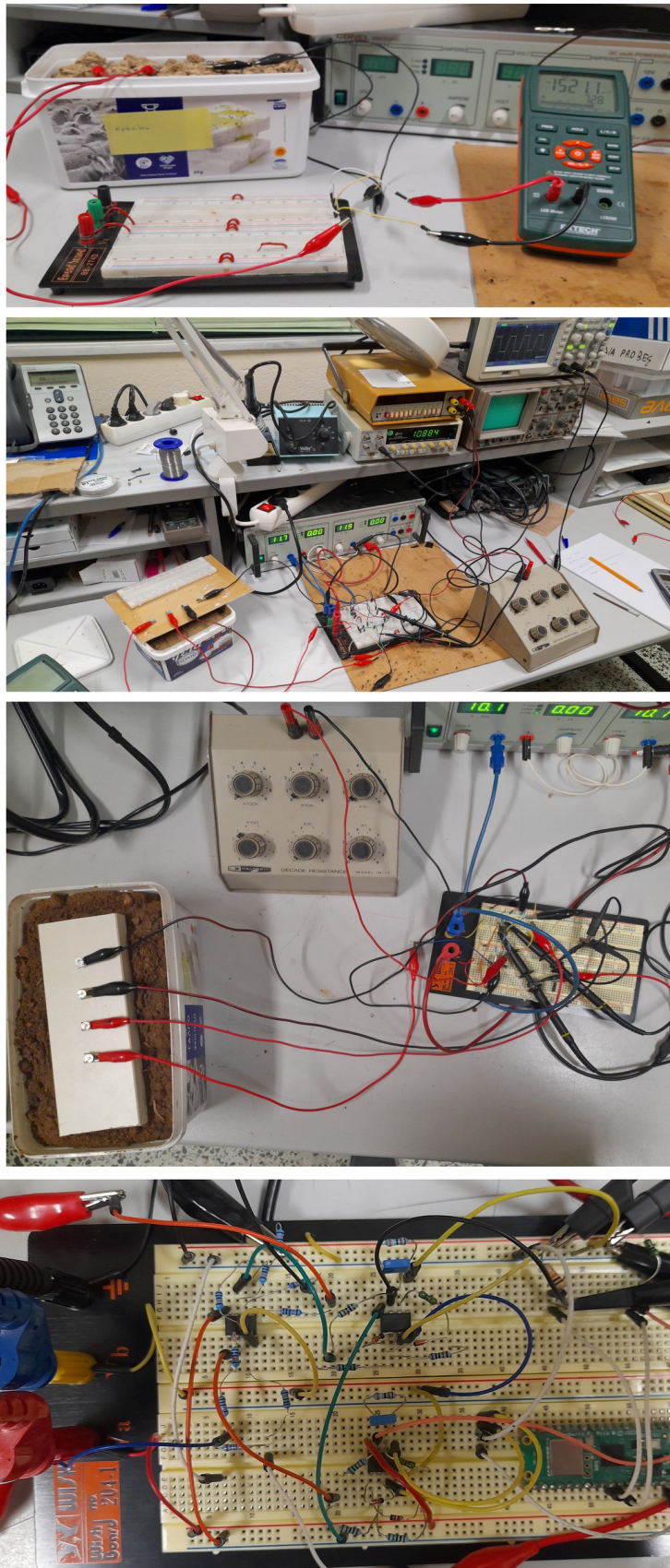


Εικόνα 20: Διάγραμμα ροής διάταξης Wenner

Στην εικόνα 20 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του προγράμματος. Για τον υπολογισμό της αγωγιμότητας χρησιμοποιήσαμε τις (3.1) και (3.2).

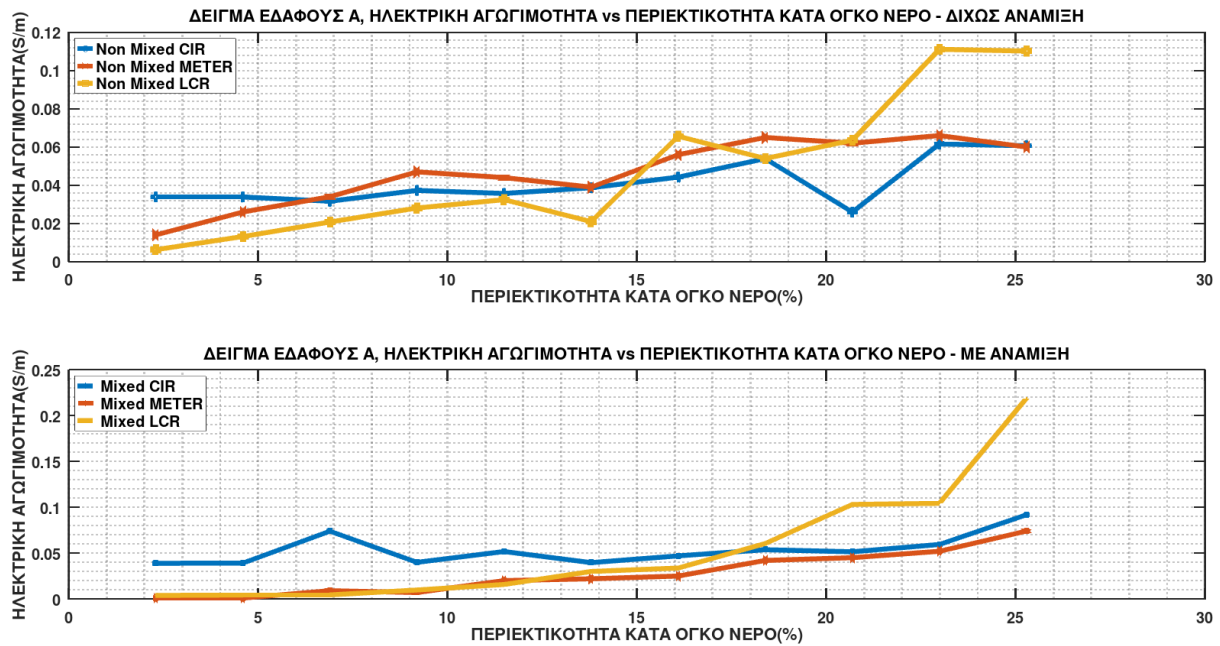
Στην εικόνα 21 παρουσιάζονται ορισμένα από τα στάδια της πειραματικής διάταξης. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με στόχο να διευκρινιστεί το φυσικό μέγεθος που καταγραφόταν (αντίσταση ή ειδική αντίσταση), καθώς και η επίδραση των ηλεκτροδίων στη μέτρηση. Στη συνέχεια σχεδιάστηκε και συνδέθηκε τμήμα του κυκλώματος, ενώ τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με εκείνα που λήφθηκαν από τα όργανα LCR και 5TE. Τελικό στάδιο αποτέλεσε η συναρμολόγηση του κυκλώματος της εικόνας 16 σε συνδυασμό με τον μικροελεγκτή.

Πειραματική Διάταξη Μέτρησης Ηλεκτρικών Ιδιοτήτων Εδάφους : Μέθοδος Wenner



Εικόνα 21: Στάδια πειράματος με διάταξη Wenner

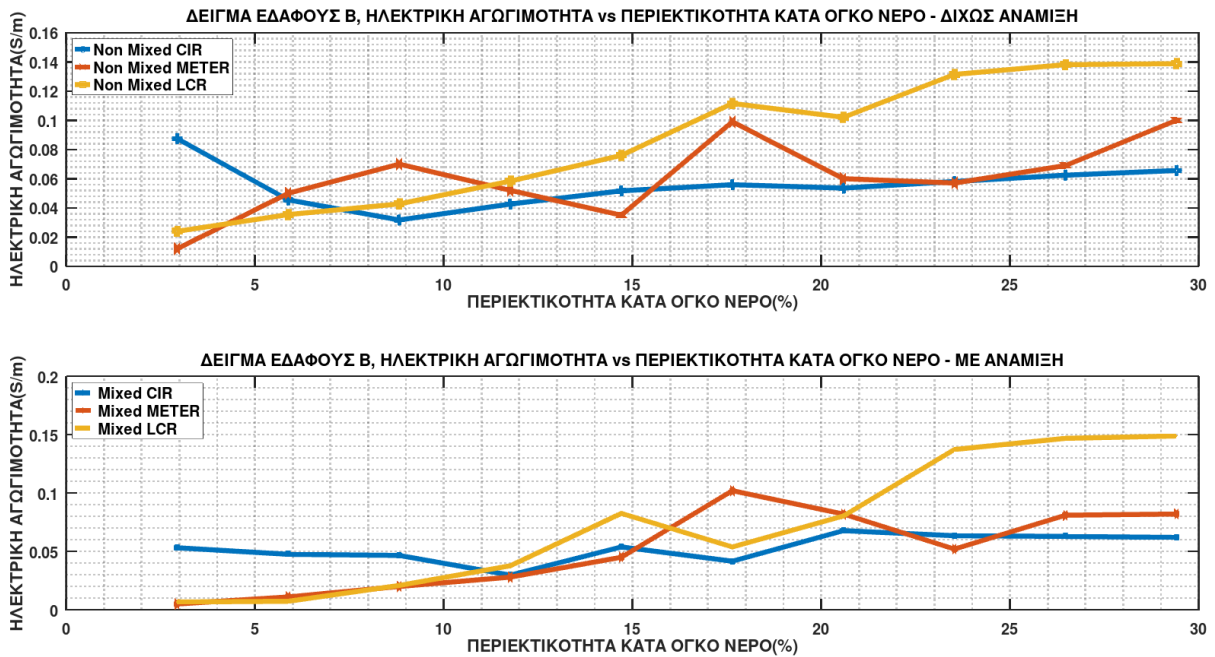
3.2 Αποτελέσματα



Εικόνα 22: Αποτελέσματα δείγματος εδάφους Α

Πίνακας 1 : Δείγμα εδάφους Α

WATER(ml)	GWC(%)	Μη Αναμιγμένο			Αναμιγμένο		
		CIR(S/m)	LCR(S/m)	METER(S/m)	CIR(S/m)	LCR(S/m)	METER(S/m)
100	2	0.034	0.006	0.014	0.039	0.004	0.001
200	5	0.034	0.013	0.026	0.039	0.004	0.001
300	7	0.032	0.021	0.034	0.074	0.004	0.009
400	9	0.037	0.028	0.047	0.040	0.010	0.007
500	11	0.036	0.032	0.044	0.052	0.016	0.020
600	14	0.039	0.021	0.039	0.040	0.030	0.022
700	16	0.044	0.066	0.056	0.047	0.034	0.025
800	18	0.054	0.054	0.065	0.054	0.060	0.042
900	21	0.026	0.064	0.062	0.051	0.103	0.045
1000	23	0.062	1.011	0.066	0.059	0.104	0.052

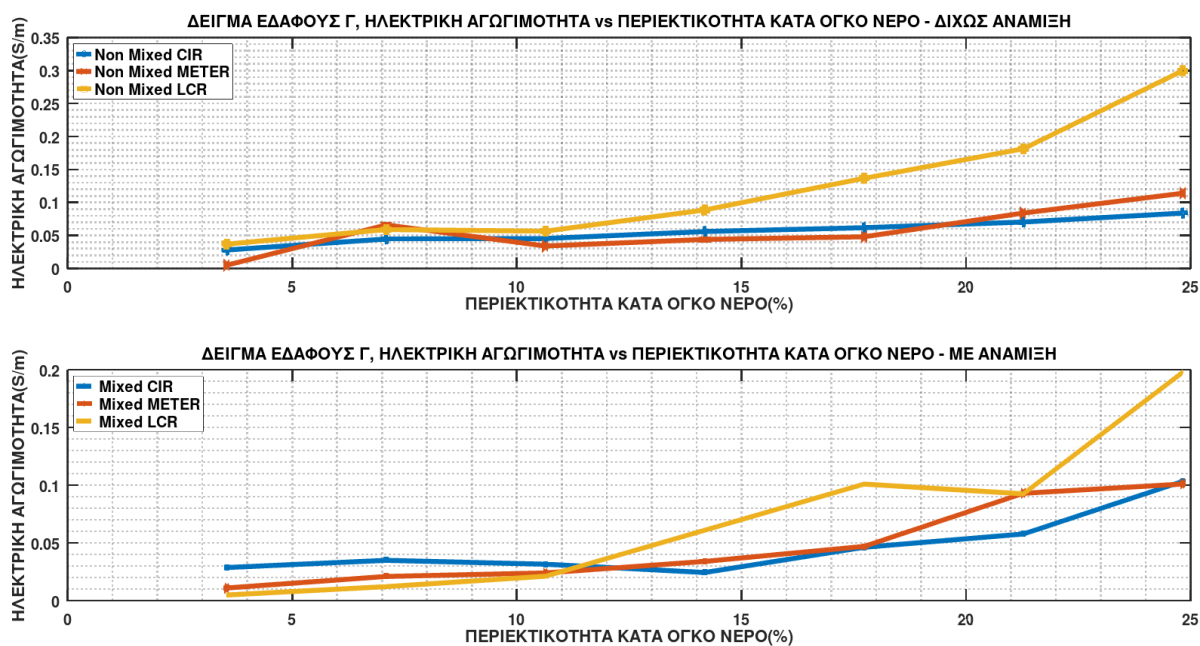


Εικόνα 23: Αποτελέσματα δείγματος εδάφους Β

Πίνακας 2: Δείγμα εδάφους Β

WATER(ml)	GWC(%)	Μη Αναμιγμένο			Αναμιγμένο		
		CIR(S/m)	LCR(S/m)	METER(S/m)	CIR(S/m)	LCR(S/m)	METER(S/m)
100	3	0.087	0.024	0.012	0.053	0.007	0.005
200	6	0.045	0.035	0.050	0.048	0.007	0.011
300	9	0.032	0.043	0.070	0.047	0.021	0.020
400	12	0.043	0.058	0.052	0.030	0.038	0.028
500	15	0.052	0.076	0.035	0.054	0.083	0.045
600	18	0.056	0.112	0.099	0.042	0.054	0.102
700	21	0.054	0.102	0.060	0.068	0.080	0.082
800	24	0.058	0.131	0.057	0.063	0.137	0.052
900	26	0.062	0.138	0.069	0.063	0.147	0.081
1000	29	0.066	0.139	0.100	0.062	0.149	0.082

Στις εικόνες 21, 22 και 23 καθώς και στους πίνακες 1, 2 και 3 απεικονίζονται τα γραφήματα και αποτελέσματα της μεθόδου που περιγράφηκε στη υποενότητα 3.1.3. Στις εικόνες, στο επάνω μέρος παρουσιάζονται τα γραφήματα με το έδαφος να μην έχει αναμιχθεί ενώ στο κάτω μέρος με αναμιγμένο έδαφος, σε σχέση με την περιεκτικότητα κατά όγκο νερού. Στους πίνακες WATER (ml) είναι ο όγκος του απιονισμένου νερού που προστίθεται, GWC (%) είναι η περιεκτικότητα κατά όγκο νερού, CIR (S/m) είναι η αγωγιμότητα που μετράται από το κύκλωμα, LCR (S/m) είναι η αγωγιμότητα που μετράται από τον μετρητή LCR, METER (S/m) είναι η αγωγιμότητα που μετράται από τον μετρητή 5TE METER.



Εικόνα 24: Αποτελέσματα δείγματος εδάφους Γ

Πίνακας 3: Δείγμα εδάφους Γ

WATER(ml)	GWC(%)	Μη Αναμιγμένο			Αναμιγμένο		
		CIR(S/m)	LCR(S/m)	METER(S/m)	CIR(S/m)	LCR(S/m)	METER(S/m)
100	4	0.028	0.037	0.005	0.029	0.005	0.011
200	7	0.045	0.059	0.066	0.035	0.012	0.021
300	11	0.045	0.057	0.034	0.032	0.021	0.024
400	14	0.056	0.089	0.044	0.025	0.061	0.034
500	18	0.062	0.137	0.048	0.046	0.102	0.047
600	21	0.070	0.181	0.084	0.058	0.093	0.093
700	25	0.084	0.300	0.114	0.103	0.198	0.101

Από τις παραπάνω εικόνες και πίνακες φαίνεται ότι υπάρχει διαφορά μεταξύ των δειγμάτων εδάφους που έχουν αναμιχθεί και των μη αναμιγμένων δειγμάτων εδάφους. Το νερό της βροχής ή της άρδευσης όταν πέφτει στο έδαφος ακολουθεί την πορεία με τα λιγότερα εμπόδια. Έτσι, το έδαφος δεν είναι ομογενοποιημένο και κάθε σύστημα παρουσιάζει διαφορετικές μετρήσεις, ανάλογα με το σημείο εισαγωγής. Αυτό δείχνει ότι η υγρασία χρειάζεται χρόνο για να μετακινηθεί σε σημεία με χαμηλότερο υδατικό δυναμικό και κατά τη διάρκεια αυτής της κίνησης οι αισθητήρες μπορούν να μετρήσουν διαφορετική αγωγιμότητα σε διαφορετικές διαδρομές υγρασίας.

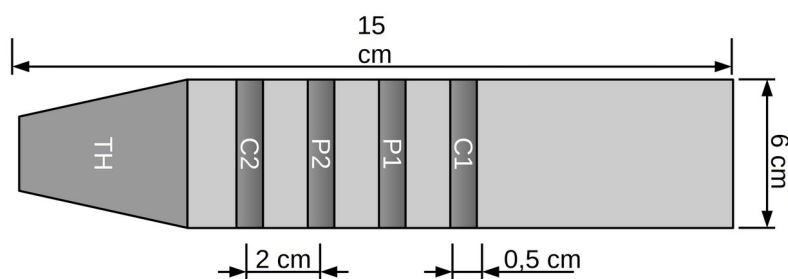
Για τις μετρήσεις με περιεκτικότητα σε νερό 700 ml και άνω, τα δείγματα έχουν κορεστεί με νερό άρα είναι και πιο αγωγιμα. Αυτό δίνει διέξοδο στο ρεύμα συνήθως μέσω του νερού στην επιφάνεια, το οποίο έχει υψηλότερη αγωγιμότητα. Στο πεδίο, αυτή η κατάσταση μπορεί να βρεθεί μετά από μια

μακρά και έντονη βροχή και είναι προσωρινή, οπότε αυτές οι μετρήσεις μπορεί να έχουν μικρότερη σημασία. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι μετρήσεις του κυκλώματος είναι κοντά στα δεδομένα του 5TE METER και ακόμη πιο κοντά στα δεδομένα του μετρητή LCR. Εάν ληφθεί υπόψη ο τύπος εδάφους, οι μετρήσεις του κυκλώματος μπορούν να τροποποιηθούν κατάλληλα και να έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια, όπως όλοι οι εμπορικοί μετρητές αγωγιμότητας εδάφους.

3.3 Συμπεράσματα

Η διάταξη Wenner είναι αρκετά κοντά στα αποτελέσματα της σε σχέση με των 5TE και LCR ,υπόψιν ότι δεν έχει γίνει βαθμονόμηση, μόνο θεωρητικός υπολογισμός των ορίων. Από τις εικόνες 21, 22 και 23 καθώς και στους πίνακες 1, 2 και 3 παρατηρείται μια σύγκλιση των αποτελεσμάτων στα αναμιγμένα δείγματα λίγο πριν θεωρηθούν κορεσμένα, λόγω της σχεδόν ίσης κατανομής νερού. Αυτό δείχνει την ανάγκη για βαθμονόμηση και σε σχέση με την ποσότητα νερού ώστε να βρεθούν τα μέγιστα και ελάχιστα της ποσότητας νερού.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων παρατηρήσαμε ότι το σημείο και ο τρόπος που τοποθετούνταν τα ηλεκτρόδια άλλαζε τα αποτελέσματα, δηλαδή αν τοποθετούνταν υπό κάποια γωνία και όχι κάθετα ή το σημείο δεν είχε αρκετό νερό, καθώς επίσης αν κουνιόντουσαν κατά τη διάρκεια της μέτρησης με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κενά στο χώμα, είχαμε σφάλματα στις μετρήσεις. Αυτό συνέβαινε και στο LCR αλλά λιγότερο στο 5TE. Καταλήξαμε ότι δεν είναι λάθος της μεθοδολογίας αλλά αδυναμία της κατασκευής των ηλεκτροδίων, τα οποία δεν παρέχουν καλή επιφανειακή πίεση καθώς και δεν μπορούν να θαφτούν μέσα στο έδαφος όπως ο 5TE. Ένα σχέδιο μιας κατασκευής ενός ενδεικτικού probe παρουσιάζεται στην εικόνα 25. Το probe είναι ένας κύλινδρος που καταλήγει σε σχεδόν κωνική μύτη ώστε να έχει καλή επαφή με το έδαφος, άρα και επιφανειακή πίεση καθώς και να θάβεται.



Εικόνα 25: Probe μέτρησης αγωγιμότητας εδάφους, C1 και C2 πολώνουν το έδαφος, P1 και P2 μετράνε την τάση που αναπτύσσεται και TH ο αισθητήρας θερμοκρασίας

Τέλος λόγω του ότι η διάταξη αυτή μετράει μόνο αγωγιμότητα κρίναμε ότι δεν είναι αρκετή για να προσδιορίσουμε την ποιότητα εδάφους. Θα χρειαζόταν κάποιο άλλο κύκλωμα που θα μετρούσε την ποσότητα νερού του εδάφους το οποίο θα έκανε το κύκλωμα πιο περίπλοκο από ότι χρειάζεται.

3.4 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 3

- [1] Rhoades, J.D., F. Chanduvi, and S. Lesch., "Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements", IrrigDrain Pap. 57. FAO, Rome 1999.
- [2] Corwin, Dennis & Yemoto, Kevin. (2017). Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. 10.2136/msa2015.0039.
- [3] Σπάσος Ν. Μιχάλης (2017). Ηλεκτρονικές Μετρήσεις & Οργανολογία. Εκδόσεις ΑΪΒΑΖΗ. ISBN:978-960-549-005-8
- [4] M. I. Alif Muslan, W. F. H. Abdullah, Z. Zulkifli and A. B. Binti Rosli, "Electrical Conductivity Sensing Circuit Design Using Voltage Divider," 2022 IEEE 12th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE), Penang, Malaysia, 2022, pp. 186-190, [doi:10.1109/ISCAIE54458.2022.979450](https://doi.org/10.1109/ISCAIE54458.2022.979450).
- [5] V. D. Koufogeorgos, A. T. Hatzopoulos, K. Tsiakmakis, V. Vassios, M. S. Papadopoulou and D. K. Papakostas, "Design and Development of a Low-Cost Circuit for Soil Electrical Conductivity Measurement Using the Wenner Array Method," 2025 14th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Dresden, Germany, 2025, pp. 1-5, doi: 10.1109/MOCASST65744.2025.11083912.

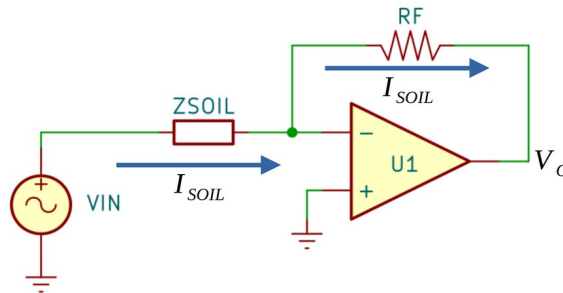
3.5 Κατάλογος Συμβόλων και Εξισώσεων Κεφαλαίου 3

Σύμβολο	Όνομα	Μονάδα Μέτρησης	Εξίσωση
$EC_{25^{\circ}C}$	Θερμοκρασιακά διορθωμένη ειδική αγωγιμότητα εδάφους Wenner (S/m)		$EC_{25^{\circ}C} = \frac{1 + \frac{2}{\sqrt{1 + 4 \cdot \left(\frac{l}{a}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{l}{a}\right)^2}}}{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R} \cdot f_T \quad (3.1)$
f_T	Συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας		$f_T = 0.4470 + 1.4034 \cdot \exp\left(\frac{-T}{26.815^{\circ}C}\right) \quad (3.2)$
l	Μήκος, Ύψος	m (μετρά)	
a	Απόσταση	m (μετρά)	
R	Ηλεκτρική αντίσταση	Ω (Ωμ)	
T	Θερμοκρασία	$^{\circ}C$ (Κέλσιου)	
			$VRVI_{DIF} = VRVI_1 - VRVI_2 \quad (3.5),$
			$VRVI_1 = V_{IN} \cdot \frac{RVI + RSOIL}{RVI + RSOIL + R_{IN}} \quad (3.6),$
			$VRVI_2 = VRVI_1 \cdot \frac{RSOIL}{RVI + RSOIL} \quad (3.7),$
V	Τάση V (Βολτ)		$V_{DIFAMP1} = VRVI_{DIF} \cdot \frac{R_{11}}{R_{10}} \quad (3.13),$
			$V_{DIFAMP2} = VRVI_{DIF} \cdot \frac{R_{25}}{R_{27}} \quad (3.14),$
EC_{LCR}	Ειδική αντίστασης εδάφους LCR S/m (Ζίμενς ανά μέτρο)		$EC_{LCR} = \frac{\left(\frac{2l}{r} - \frac{2l}{a-r}\right)}{\pi \cdot R_{LCR}} \quad (3.17)$

Κεφάλαιο 4ο: Πειραματική Διάταξη Ενισχυτή Σύνθετης Εμπέδησης και Μέτρησης

4.1 Ενισχυτής Σύνθετης Εμπέδησης

Στο παρόν κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί αναλυτικά η πειραματική διάταξη του ενισχυτή σύνθετης εμπέδησης που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε σε πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB) με σκοπό τον προσδιορισμό της ποιότητας του εδάφους.



Εικόνα 26: Βασικό κύκλωμα ενισχυτή σύνθετης αντίστασης

Σε προηγούμενο κεφάλαιο (2.2.6) έγινε μια μικρή εισαγωγή σε ένα παρόμοιο σύστημα μέτρησης. Η θεωρία είναι ίδια, με την διαφορά ότι χρησιμοποιούμε έναν αναστρέφοντα ενισχυτή. Η βασική ιδέα αυτού του κυκλώματος είναι η μετατροπή του ρεύματος I_{SOIL} μέσω της άγνωστης σύνθετης αντίστασης Z_{SOIL} σε τάση V_{OUT} , θα έχουμε δηλαδή :

$$V_{OUT} = I_{SOIL} \cdot RF \quad (4.1)$$

μια άλλη εξίσωση που περιγράφει τη λειτουργία του ενισχυτή είναι :

$$V_{OUT} = \left(- \frac{RF}{|Z_{SOIL}|} \right) \cdot V_{IN} \quad (4.2)$$

η τάση εξόδου όμως εξαρτάται από την άγνωστη σύνθετη αντίσταση Z_{SOIL} δηλαδή το έδαφος, λύνοντας την (4.2) για την σύνθετη αντίσταση Z_{SOIL} :

$$|Z_{SOIL}| = \frac{-RF \cdot V_{IN}}{V_{OUT}} \quad (4.3)$$

με $|Z_{SOIL}|$ το μέτρο της σύνθετης αντίστασης του εδάφους. Η σύνθετη εμπέδηση είναι το ανάστροφο μέγεθος της σύνθετης αντίστασης :

$$|Y_{SOIL}| = \frac{V_O}{-RF \cdot V_{IN}} \quad (4.4)$$

Όπως αναφέραμε στο δεύτερο κεφάλαιο, το έδαφος μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν ένα κύκλωμα αντίστασης παράλληλα με πυκνωτή. Με την αντίσταση προσδιορίζουμε την αγωγιμότητα του εδάφους ECa άρα και την αγωγιμότητα και από τον πυκνωτή την ογκομετρική περιεκτικότητα νερού

VWC. Για να βρούμε τα στοιχεία λύνουμε τις εξισώσεις που περιγράφηκαν στο 2.2.6 :

$$Y_{SOIL} = |Y_{SOIL}| \cdot (\cos(\Delta\phi) + j\sin(\Delta\phi)) \quad (4.5)$$

$$G = |Y_{SOIL}| \cdot (\cos(\Delta\phi)) \quad (4.6)$$

$$B = |Y_{SOIL}| \cdot (\sin(\Delta\phi)) \quad (4.7)$$

με $\Delta\phi$ η διαφορά φάσης, η (4.5) είναι ο υπολογισμός της σύνθετης μιγαδικής αγωγιμότητας, η (4.6) είναι ο υπολογισμός της αγωγιμότητας και η (4.7) είναι ο υπολογισμός επιδεκτικότητας. Ο υπολογισμός των ηλεκτρικών στοιχείων αντίστασης και πυκνωτή είναι :

$$R = \frac{1}{G} \quad (4.8)$$

$$C = \frac{B}{\omega} \quad (4.9)$$

με ω η γωνιακή ταχύτητα του σήματος, για να υπολογίσουμε τις ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους φαινόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα και την σχετική διαπερατότητα του εδάφους, έχουμε :

$$EC\alpha = G \cdot k_g \quad (4.10)$$

$$\epsilon_r = \frac{C}{\epsilon_0 \cdot k_g} \quad (4.11)$$

με k_g ο όρος της γεωμετρίας των ηλεκτροδίων, ϵ_0 η διαπερατότητα του κενού, ϵ_r η σχετική διαπερατότητα του εδάφους και $EC\alpha$ η αγωγιμότητα του χόματος.[1][2] Όπως και στη διάταξη Wenner η θερμοκρασία επηρεάζει την $EC\alpha$ και τη υγρασία, οι (4.10) και (4.11) θα κανονικοποιηθούν με :

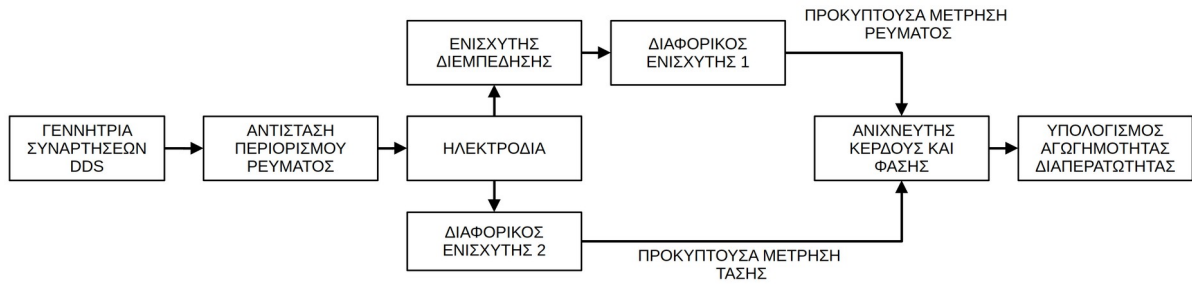
$$EC_{25^\circ C} = EC\alpha \cdot \left(0.4470 + 1.4034 \cdot e^{\frac{-T}{26.815}} \right) \quad (4.12)$$

$$\epsilon_{r25^\circ C} = \epsilon_r + 0.114 \cdot (25 - T) \quad (4.13)$$

με T η θερμοκρασία τη στιγμή της μέτρησης.[1][3]

4.1.1 Σχέδιο Διάταξης

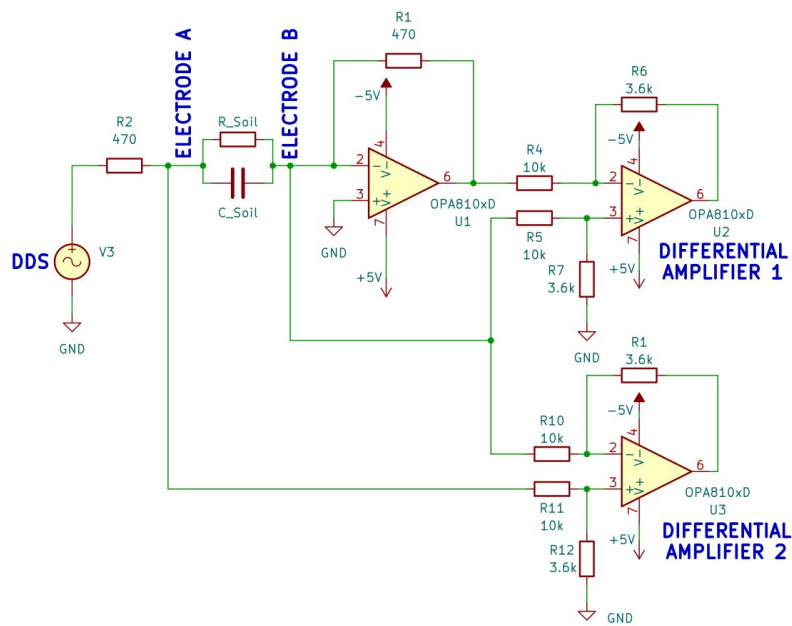
Το σύστημα εφαρμόζει ένα ημιτονοειδές σήμα στο έδαφος μέσω ηλεκτροδίων, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά εύρη συχνοτήτων (100 kHz, 150 kHz, 200 kHz για την $EC\alpha$ και 9 MHz, 9.5 MHz, 10 MHz για την VWC), ώστε να επιτευχθεί η ταυτόχρονη μέτρηση της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας ($EC\alpha$) και της ογκομετρικής περιεκτικότητας νερού (VWC). Η πόλωση του εδάφους προκαλεί μεταβολές στο πλάτος και τη φάση του σήματος λόγω της μεταβαλλόμενης σύνθετης εμπέδησης του εδάφους. Οι προκύπτουσες τάσεις τροφοδοτούνται σε μονάδα ανάλυσης, η οποία προσδιορίζει την ενίσχυση πλάτους και τη διαφορά φάσης. Από αυτές τις παραμέτρους, το σύστημα υπολογίζει τη σύνθετη εμπέδηση του εδάφους, επιτρέποντας την εκτίμηση της $EC\alpha$ και της VWC.



Εικόνα 27: Block διάγραμμα διάταξης

Πιο συγκεκριμένα η εικόνα 2 δείχνει το σύστημα της διάταξης που αποτελείται από: μια μονάδα DDS (Direct Digital Synthesis) που παράγει ένα ημιτονοειδές σήμα με διαφορετικές συχνότητες που κυμαίνονται από 100 KHz έως 10 MHz, μια αντίσταση περιορισμού ρεύματος, τα ηλεκτρόδια, δύο διαφορικούς ενισχυτές που μετρούν την τάση της σύνθετης αντίστασης του εδάφους και την τάση εξόδου του ενισχυτή εμπέδησης και τη μονάδα ανίχνευσης κέρδους και φάσης. Στη συνέχεια με έναν μικροελεγκτή διαβάζουμε το κέρδος και την διαφορά φάσης τα οποία αποστέλλονται σε πρόγραμμα απεικόνισης μετρήσεων.

4.1.2 Προσομοίωση Διάταξης



Εικόνα 28: Κύκλωμα προσομοίωσης

Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται το κύκλωμα που προσομοιώθηκε στο πρόγραμμά Ltspice. Βασίζεται στα [1] και [4]. Με $V3=2Vp-p$ να αντιπροσωπεύει την DDS, το U1 είναι ο ενισχυτής εμπέδησης με κέρδος εξαρτώμενο από έδαφος. Η R2 είναι η αντίσταση περιορισμού ρεύματος που παρέχει επίσης μεγαλύτερη σταθερότητα στο κύκλωμα, σύμφωνα με το [4] και τα εργαστηριακά πειράματα που κάναμε. Τα R_{Soil} και C_{Soil} αντιπροσωπεύουν την αντίσταση και την χωρητικότητα του εδάφους

αντίστοιχα. Το $R1$ είναι η αντίσταση ανάδρασης, η επιλογή των τιμών των αντιστάσεων $R1$ και $R2$ βασίστηκε σε προσωπικά πειράματα καθώς και στα : [1], [2], [4] και [5]. Τα $U2$ και $U3$ είναι οι διαφορικοί ενισχυτές που μετρούν την τάση εξόδου του κυκλώματος V_{out} και την τάση στην αντίσταση του εδάφους V_x , η απολαβή τους είναι ίση με 0.36, η οποία είναι απαραίτητη για την προστασία και της μονάδας ανιχνευτή φάσης και κέρδους. Συγκρίναμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο με διακριτά εξαρτήματα, ώστε να προσδιορίσουμε την αποδοτικότητα του συστήματος.

Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις προσομοιώσεις – δοκιμές.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα δοκιμών διακριτών εξαρτημάτων

Δοκιμή	R Real(Ω)	C Real(F)	R Cir(Ω)	C Cir(F)	R Spice(Ω)	C Spice(F)	Error R-C(%)	Error R-S(%)	Error C-S(%)
1	2,2K Ω	100pF	2,006K Ω	108nF	2,079K Ω	100,36nF	8,7891 7,6052	5,4997 0,3587	3,4808 7,2206
2	220 Ω	390pF	245,7 Ω	399pF	218,75 Ω	391,4pF	15,77 2,33	0,58 0,38	16,45 1,94
3	1,4K Ω	47pF	1,42K Ω	46,2pF	1,71K Ω	47,4pF	20,85 1,68	4,55 1,02	17,07 2,67
4	56 Ω	1nF	50,61 Ω	0.669nF	55,91 Ω	1,004nF	9,61 33,12	0,14 0,42	9,48 33,4

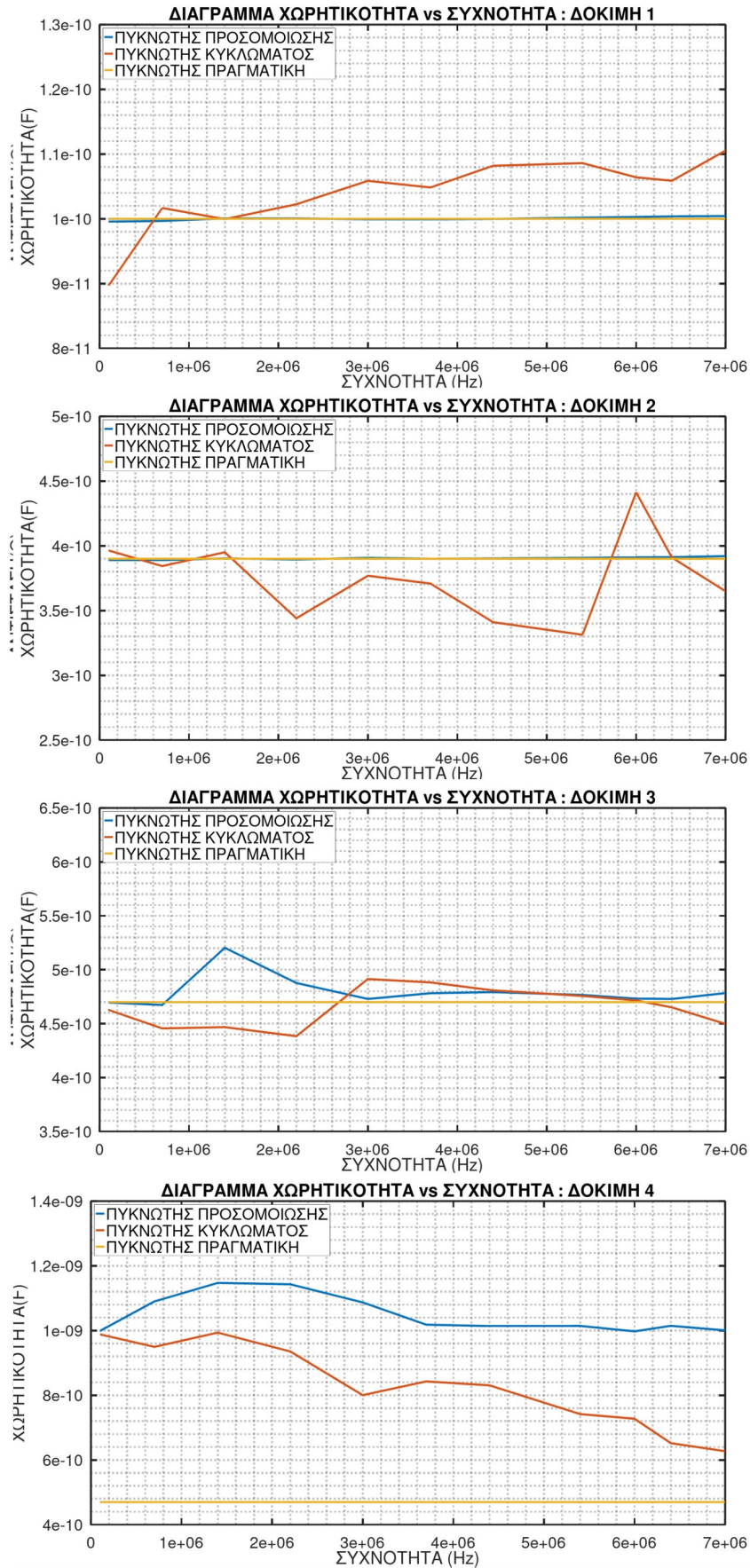
Πίνακας 5: Μέσο σφάλμα Αποτελέσματα δοκιμών διακριτών εξαρτημάτων

	Mean Error R-C(%)	Mean Error R-S(%)	Mean Error C-S(%)
Mean Error R	12,69	2,57	12,97
Mean Error C	4,97	0,4	4,95

Ο πίνακας 4 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της δοκιμής-προσομοίωσης. Οι δύο πρώτες στήλες R Real και C Real περιέχουν τις πραγματικές τιμές των διακριτών εξαρτημάτων, η τρίτη R Cir και η τέταρτη C Cir τις τιμές που υπολογίσαμε το κύκλωμα, η πέμπτη R Spice και η έκτη C Spice τις τιμές που υπολόγισε το Ltspice. Η έβδομη στήλη Error R-C περιέχει τα αποτελέσματα σφάλματος μεταξύ των πραγματικών τιμών και των τιμών του κυκλώματος, η όγδοη Error R-S τα αποτελέσματα σφάλματος μεταξύ των πραγματικών τιμών και των προσομοιώσεων και η τελευταία Error C-S τα αποτελέσματα σφάλματος μεταξύ των τιμών του κυκλώματος και των προσομοιώσεων. Στην πρώτη γραμμή εμφανίζεται το σφάλμα των αντιστάσεων και στη δεύτερη το σφάλμα των χωρητικότητων. Ο πίνακας 5 παρουσιάζει τα προκύπτοντα μέσα σφάλματα. Τα αποτελέσματα είναι κοντά μεταξύ τους, πραγματικά με εργαστηριακά και προσομοίωσης, μόνο οι τιμές που υπερβαίνουν τις τυπικές τιμές του εδάφους (αν τις μετρούσαμε χωρίς να μετατρέψουμε σε (4.12) και (4.14)). Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζαμε μέσω του κυκλώματος και της προσομοίωσης τα εξαρτήματα είναι παρόμοιος, δηλαδή μετρούσαμε ή περνούσαμε τις μετρήσεις από V_{out} , V_x και $\Delta\phi$. Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας τις 4.4 μέχρι 4.11 βρήκαμε τις τιμές των διακριτών εξαρτημάτων, δηλαδή υπολογίζαμε την $|Y_{SOIL}|$ και στην συνέχεια τα G , B και τέλος τα R , C . Όπως φαίνεται από τις εικόνες 29 και 30, οι τιμές των υπολογισμένων αντιστάσεων και πυκνωτών αλλάζουν με τη συχνότητα, κάτι το οποίο περιμέναμε,

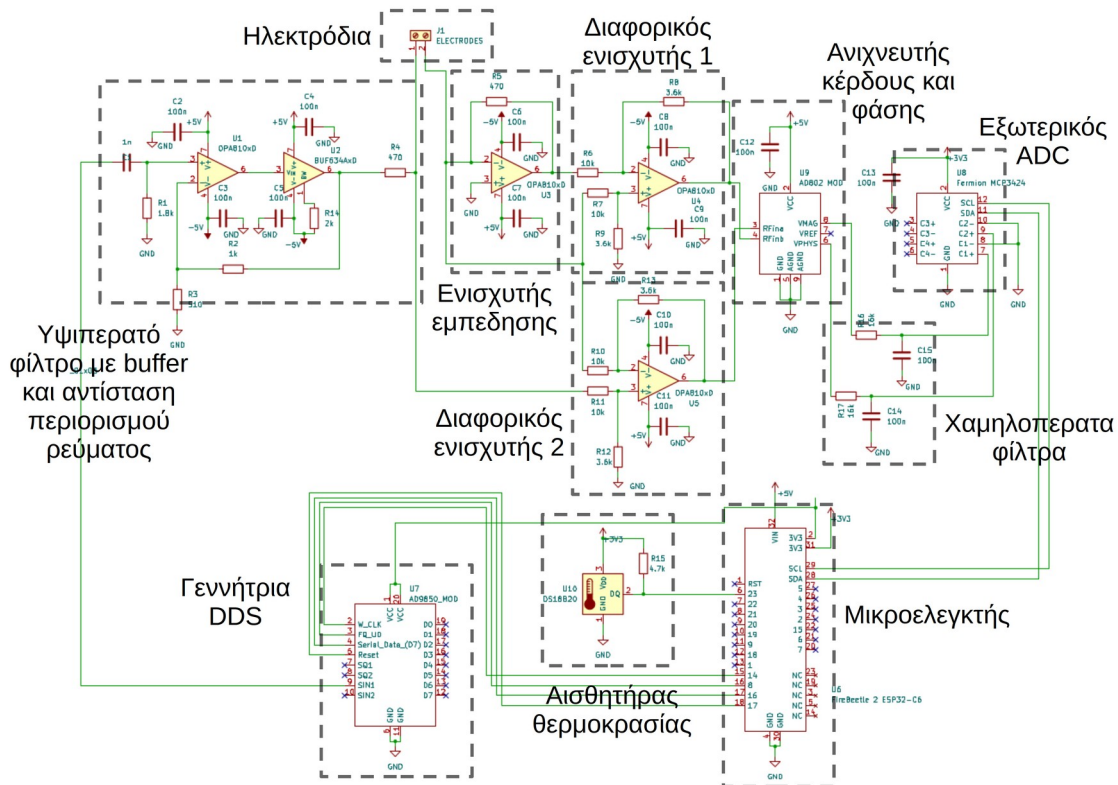
Κεφάλαιο 4ο:

εφόσον υπάρχει χωρητικό στοιχείο στον παράλληλο συνδυασμό που μετράμε. Για να αντιμετωπίσουμε τα ψευδή αποτελέσματα παίρναμε τον μέσο όρο των δυο πρώτων αποτελεσμάτων για αντίσταση και τα τρία τελευταία για τον πυκνωτή, διότι στις χαμηλές συχνότητες η συμπεριφορά του κυκλώματος προσεγγίζει περισσότερο την ωμική, με αποτέλεσμα οι μετρήσεις της αντίστασης να είναι πιο αξιόπιστες, αντίθετα, στις υψηλές συχνότητες κυριαρχεί η επίδραση του χωρητικού στοιχείου, γεγονός που καθιστά πιο αξιόπιστες τις μετρήσεις της χωρητικότητας. Η μη ίση επιλογή μέσων όρων οφείλεται στις επιλογές των συχνοτήτων που κάναμε τις δοκιμές, οι οποίες είναι : 100Khz, 700Khz, 1.4Mhz, 2.2Mhz, 3Mhz, 3.7Mhz, 4.4Mhz, 5.4Mhz, 6Mhz, 6.4Mhz και 7Mhz, κάναμε δοκιμή σε εύρος συχνοτήτων ώστε να παρατηρήσουμε και τις αλλαγές στη σύνθετη αντίσταση. Οι συχνότητες αυτές κατά τη διάρκεια των δοκιμών άλλαξαν ώστε να διακρίνεται καλύτερα η αλλαγή στη σύνθετη αντίσταση. Τέλος, κρίναμε ότι δεν χρειαζόταν περαιτέρω προσομοίωση επειδή δεν μας πρόσφεραν παραπάνω στοιχεία για το πως θα αποκρίνεται το κύκλωμα σε διαφορετικούς τύπους χωμάτων και ηλεκτροδίων.



Εικόνα 29: Αποτελέσματα δοκιμών διακριτών πυκνωτών

4.1.3 Κύκλωμα Διάταξης

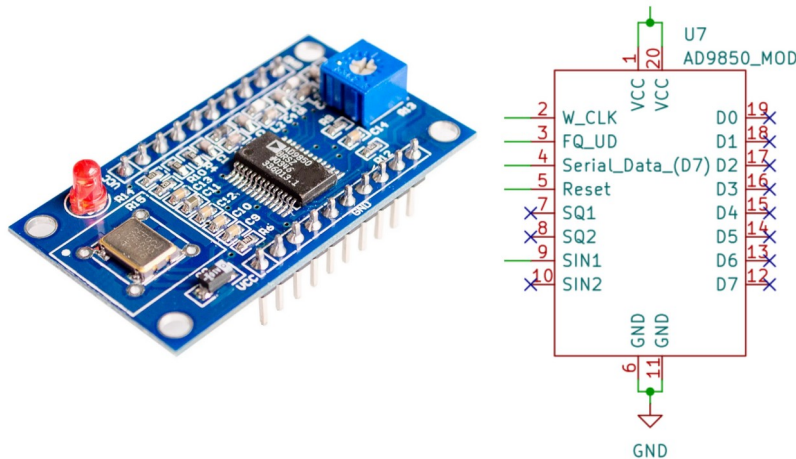


Εικόνα 31: Κύκλωμα διάταξης

Στην εικόνα 31 φαίνεται το σχηματικό του κυκλώματος της διάταξης. Η επιλογή των υλικών βασίστηκε κυρίως στην ανάγκη του κυκλώματος να λειτουργεί σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων καθώς και σε χαμηλή τάση. Τα εύρη κυμαίνονται από 100Khz έως 10Mhz (100Khz, 150Khz, 200Khz, 9Mhz, 9.5Mhz, 10Mhz).

4.1.3.1 Γεννήτρια DDS

Χρησιμοποιήσαμε μια γεννήτρια DDS (Direct Digital Synthesizer), γιατί δεν υπάρχει κάποιο κύκλωμα που να είναι αρκετά απλό και να μπορούσε να μας δώσει τα εύρη συχνοτήτων, καθώς και να είναι ελεγχόμενο. Είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα παραγωγής κυματομορφών. Πιο συγκεκριμένα είναι το AD9850 που έχει την ικανότητα να παράγει σε δυο διπλά κανάλια τετραγωνικές και ημιτονοειδείς κυματομορφές, με εύρος από 0 έως 40Mhz και τάση εξόδου περίπου 0.5V_{p-p}. Εμείς όμως χρησιμοποιήσαμε ένα κανάλι της ημιτονοειδούς κυματομορφής, της οποίας η συχνότητα είναι ελεγχόμενη από τον μικροελεγκτή, η συνδεσμολογία και η μονάδα του AD9850 φαίνεται στην εικόνα 32. Ο μικροελεγκτής ελέγχει - προγραμματίζει με την μονάδα μέσω τεσσάρων διαύλων W_CLK, FQ_UD, Serial_DATA και Reset. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας περιγράφεται στο φύλλο δεδομένων [7]. Ο μικροελεγκτής είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό της συχνότητας και της φάσης του σήματος, καθώς και για τη διαχείριση της κατάστασης λειτουργίας χαμηλής κατανάλωσης (Sleep mode).



Εικόνα 32: Μονάδα και σχήμα AD9850

Η τάση εξόδου της DDS έχει DC τάση αναφοράς περίπου 0.6V άρα θα κυμαίνεται περίπου μεταξύ 1.1V και 0.1V, την οποία τάση θέλουμε να μηδενίσουμε – κόψουμε, ώστε το σήμα που θα πολώνει το έδαφος θα είναι συμμετρικό στο μηδέν. Ο λόγος που θέλουμε το σήμα συμμετρικό είναι γιατί δεν θα προκαλεί ηλεκτρόλυση ή άλλες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στην επαφή ηλεκτροδίου-εδάφους, καθώς επίσης μια DC τάση αναφοράς προκαλεί ροή ρεύματος καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων, με αποτέλεσμα να συσσωρεύεται ηλεκτρικό φορτίο στα ηλεκτρόδια που δημιουργεί πόλωση και μεταβολή της μέτρησης με την πάροδο του χρόνου.

4.1.3.2 Κύκλωμα Υψηλατάτου Φίλτρου

Για να το πετύχουμε αυτό χρησιμοποιήσαμε ένα ενεργό υψηλατάτου φίλτρο πρώτης τάξης, το οποίο φαίνεται στην εικόνα 33. Το φίλτρο αποτελείται από τον πυκνωτή $C1$ και την αντίσταση $R1$, τα οποία καθορίζουν τη συχνότητα αποκοπής. Στην περίπτωση του υψηλατάτου φίλτρου, η συχνότητα αποκοπής αντιστοιχεί στη χαμηλότερη συχνότητα που μπορεί να διέλθει μέσω του φίλτρου. Το ολοκληρωμένο $U1$ είναι ο τελεστικός συνδεδεμένος σαν μη αναστρέφον ενισχυτής που μαζί με της $R2$ και $R3$ ενισχύουν το σήμα εισόδου, το ολοκληρωμένο $U2$ είναι ένας ακόλουθος τάσης που είναι συνδεδεμένος με τέτοιο τρόπο στην ανατροφοδότηση του $U1$ ώστε μας παρέχει επιπλέον ρεύμα εξόδου και απομόνωση από επομένη βαθμίδα, η $R14$ προτείνεται από το φύλλο δεδομένων του ακολούθου για τη μείωση της κατανάλωσης του ρεύματος τροφοδοσίας. Η $R4$ είναι η αντίσταση περιορισμού ρεύματος που παρέχει σταθερότητα στο κύκλωμα, σύμφωνα με το [4] και τα εργαστηριακά πειράματα που κάναμε. Οι πυκνωτές $C2$, $C3$, $C4$ και $C5$ έχουν συνδεθεί για να σταθεροποιούν την τροφοδοσία των ολοκληρωμένων.

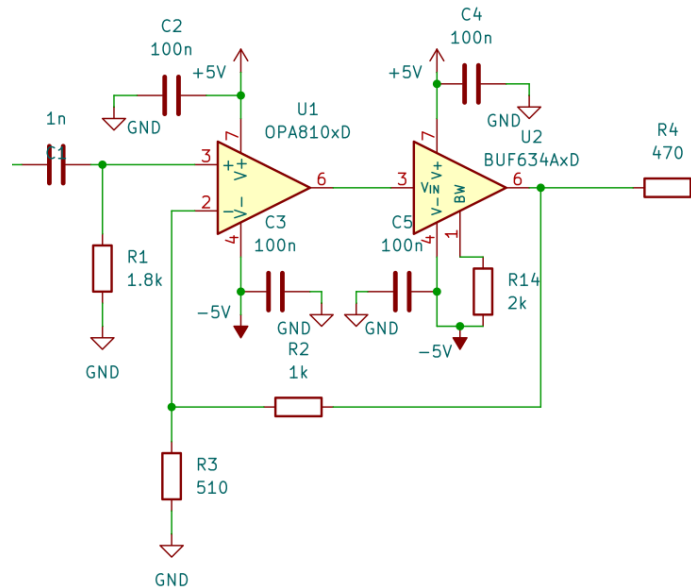
Πιο συγκεκριμένα η συχνότητα αποκοπής υπολογίζεται από :

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot C1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1.8k \cdot 1n} \approx 90 \text{ Khz} \quad (4.14)$$

,η ενισχυμένη τάση εξόδου υπολογίζεται :

$$V_{OUTFilter} = \left(1 + \frac{R2}{R3}\right) \cdot V_{OUTDDS} = \left(1 + \frac{1k}{510}\right) = 2.96 \cdot 0.6 V_{p-p} \approx 2 V_{p-p} \quad (4.15)$$

με $V_{OUTFilter}$ η έξοδος του ακολούθου και V_{OUTDDS} η έξοδος της DDS.



Εικόνα 33: Κύκλωμα υπερκατού φίλτρου

Η επιλογή των υλικών βασίστηκε στις τεχνικές προδιαγραφές των ενισχυτών U1 και U2, με ιδιαίτερη έμφαση στο slew rate τους, το οποίο ανέρχεται σε 200 V/μs και 2000 V/μs αντίστοιχα. Το slew rate αντιπροσωπεύει την ικανότητα των ενισχυτών να μεταβάλλουν γρήγορα την τάση εξόδου σε απόκριση απότομων μεταβολών της εισόδου. Επιπλέον, λήφθηκε υπόψη το εύρος της συμμετρικής τροφοδοσίας, καθώς και η ιδιότητά τους να είναι Rail-to-Rail τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο, επιτρέποντας τη λειτουργία τους κοντά στα όρια της τροφοδοσίας. Οι τιμές των πυκνωτών C2, C3, C4 και C5 καθορίστηκαν εμπειρικά μέσω πειραματικών δοκιμών. Τέλος, το κύκλωμα εισάγει διαφορά φάσης μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου. Η διαφορά αυτή δεν επηρεάζει τη λειτουργία του κυκλώματος, καθώς το σήμα πόλωσης λαμβάνεται από την έξοδο του ακολούθου και όχι από τη γεννήτρια DDS.

4.1.3.3 Ηλεκτροδία

Στην συνέχεια το σήμα περνάει μέσω των ηλεκτροδίων στο έδαφος, στην εικόνα 34 φαίνεται η κατασκευή τους. Είναι παρόμοια με αυτά της διάταξης Wenner, δηλαδή δυο καρφιά τοποθετημένα σε μοριοσανίδα. Η απόσταση μεταξύ τους είναι 3cm, το μήκος που έρχεται σε επαφή με το έδαφος είναι 7cm και η διάμετρος τους είναι 4mm. Αναφέραμε παραπάνω το k_g που είναι ο όρος της γεωμετρίας των ηλεκτροδίων. Ο όρος είναι απαραίτητος για τη μετατροπή της μετρούμενης αγωγιμότητας και χωρητικότητας σε ECa εδάφους και σχετική διαπερατότητα του εδάφους ϵ_r .

Ο υπολογισμός του όρου γίνεται είτε εμπειρικά είτε λύνοντας τις εξισώσεις του νόμου του Gauss, εμείς βασιστήκαμε στις [8] και [9] με το όρο να είναι ίσος με :

$$k_g = \frac{1}{\pi \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot a}{r} - 1\right) \approx 0.1697 \text{ cm}^{-1} \quad (4.16)$$

με L το μήκος που έρχεται σε επαφή με το έδαφος, a η απόσταση μεταξύ τους και r η ακτίνα του ηλεκτροδίου. Η αρχική μας σκέψη για τα ηλεκτρόδια της εικόνας 9 θα ήταν προσωρινά, ώστε να γίνει μια αρχική μελέτη και στη συνέχεια κατασκευή ηλεκτροδίων τα οποία θα μπορούν να θαφτούν μέσα στο χώμα, αυτό δεν έγινε και συνεχίσαμε με τα ίδια. Η επιρροή της γεωμετρίας τους θα εξηγηθεί σε επόμενο κεφαλαίο.



Εικόνα 34: Ηλεκτρόδια

4.1.3.4 Ενισχυτής Εμπέδησης

Το σήμα στην συνέχεια θα περάσει από τον ενισχυτή εμπέδησης U3 και μέσω των δυο διαφορετικών ενισχυτών U4 και U5 θα μετρήσουμε την τάση επάνω στην σύνθετη αντίσταση εδάφους και καθώς και την τάση εξόδου του ενισχυτή. Στην εικόνα 10 φαίνεται το σχέδιο του ενισχυτή εμπέδησης. Ο U3 αποτελεί έναν τελεστικό ενισχυτή, του οποίου οι ακίδες 2 και 3 αντιστοιχούν στην αναστρέφουσα και στη μη αναστρέφουσα είσοδο, αντίστοιχα. Λόγω της αρχής της ιδανικής λειτουργίας του τελεστικού ενισχυτή, θεωρούμε ότι υφίσταται ένα “εικονικό βραχυκύκλωμα” μεταξύ των δύο εισόδων, γεγονός που συνεπάγεται ότι οι τάσεις στους δύο κόμβους είναι ίσες. Στην πράξη, ωστόσο, εμφανίζεται μια πολύ μικρή διαφορά δυναμικού στον αναστρέφοντα κόμβο, η οποία οφείλεται στα μη ιδανικά χαρακτηριστικά του στοιχείου.

Μετρώντας διαφορικά ακυρώνουμε το σφάλμα που οφείλεται στην τάση του αναστρέφοντα κόμβου του U3. Η μαθηματική ανάλυση είναι παρόμοια με αυτή που έγινε στην αρχή του κεφαλαίου, με

Κεφάλαιο 4ο:

διαφορά στην εξίσωση (4.4) που θα γίνει :

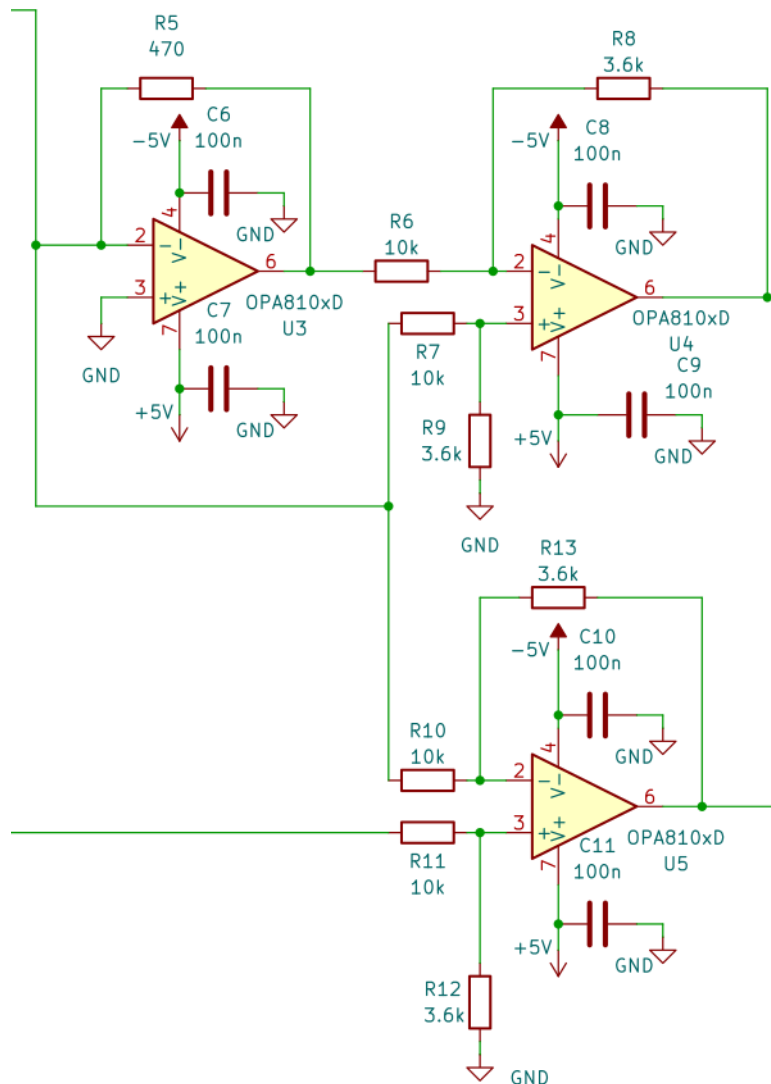
$$|Y_{SOIL}| = \frac{V_{Out}}{RF \cdot V_X} \quad (4.17)$$

με V_{Out} η έξοδος του U4 και V_X η έξοδος του U5. Οι διαφορικοί έχουν ενίσχυση ίση με 0.36, ο λόγος που θέσαμε αυτή την ενίσχυση είναι για να προστατεύσουμε τις εισόδους της επομένης μονάδας. Εξαρτάται από τις αντιστάσεις $R6, R7, R8$ και $R9$ για τον U4, $R10, R11, R12$ και $R13$ για τον U5 και λόγω ότι $R6=R7, R8=R9, R10=R11$ και $R12=R13$ θα έχουμε :

$$V_{Out} = V_{OUTU4} = \frac{R8}{R7} \cdot (V_{INU3} - V_{OUTU3}) \quad (4.18)$$

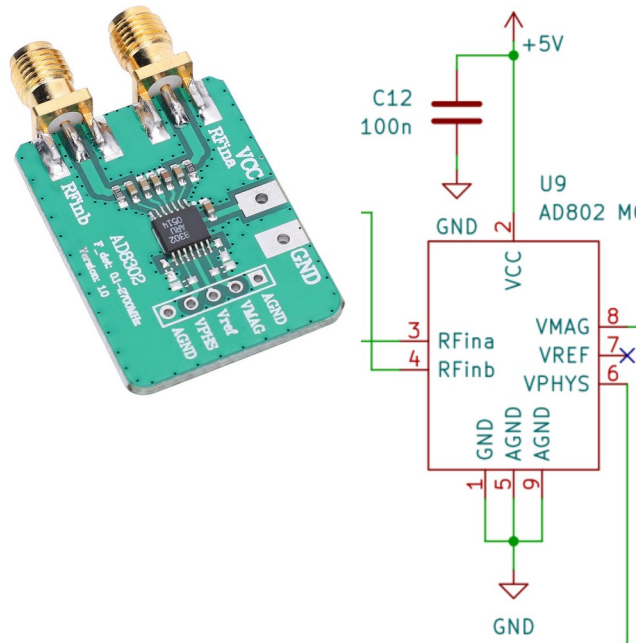
$$V_X = V_{OUTU5} = \frac{R13}{R11} \cdot (V_{OUTFilter} - V_{INU3}) \quad (4.19)$$

με V_{OUTU3}, V_{OUTU4} και V_{OUTU5} οι έξοδοι των U3, U4 και U5, V_{INU3} η είσοδος του U3. Η επιλογή των υλικών είναι ίδια με αυτή του υπερπαρατού φίλτρου.



Εικόνα 35: Σχέδιο ενισχυτή εμπέδησης

4.1.3.5 Μονάδας Ανίχνευσης Φάσης και Κέρδους



Εικόνα 36: Μονάδα και σχέδιο ανιχνευτή φάσης και κέρδους AD8302

Η μονάδα AD8302 αποτελεί ανιχνευτή πλάτους ή κέρδους (gain) και διαφοράς φάσης. Στην έξοδο της ακίδας 8 παρέχεται η πληροφορία του λόγου πλάτους των δύο εισόδων, δηλαδή το πόσο το ένα σήμα υπερτερεί του άλλου ή $VMAG$, ενώ στην έξοδο της ακίδας 6 αποδίδεται η διαφορά φάσης μεταξύ τους ή $VPHYS$. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι τα σήματα εισόδου να έχουν την ίδια κυματομορφή και συχνότητα. Το εύρος λειτουργίας της μονάδας εκτείνεται από πολύ χαμηλές συχνότητες έως 2.7 GHz. Τα δύο σήματα από την προηγούμενη βαθμίδα εφαρμόζονται στις εισόδους RFinb (ακίδα 4) και RFin (ακίδα 3). Η μέγιστη επιτρεπτή τάση εισόδου είναι -3 dBV (1.4 V_{p-p}), επομένως στην προηγούμενη βαθμίδα εφαρμόστηκε ενίσχυση 0.36, ώστε να εξασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία της μονάδας.[10] Οι εξοδοί της μονάδας είναι DC τάση, με κέντρο τα 900mV όπως φαίνεται στην εικόνα 37. Το κέρδος μας δίνεται σε dB με βήμα αυξομείωσης 30mV/dB, η διαφορά φάσης μας δίνεται σε μοίρες με βήμα αυξομείωσης 10mV/DEG. Η μονάδα δεν μας παρέχει την πληροφορία αν η διαφορά φάσης είναι αρνητική ή θετική, αν το σήμα προπορεύεται ή καθυστερεί, αυτό δεν μας δημιουργεί πρόβλημα γιατί θεωρούμε ότι το έδαφος έχει χωρητικό φορτίο άρα πάντα καθυστερεί.

Για να μετατρέψουμε τις εξόδους από τάση σε πληροφορία που μπορούμε να επεξεργαστούμε, χρησιμοποιήσαμε τις εξισώσεις από το φύλλο δεδομένων [10] :

$$Gain = \frac{VMAG - 0.9}{30 \cdot 10^{-3}} \quad (4.20)$$

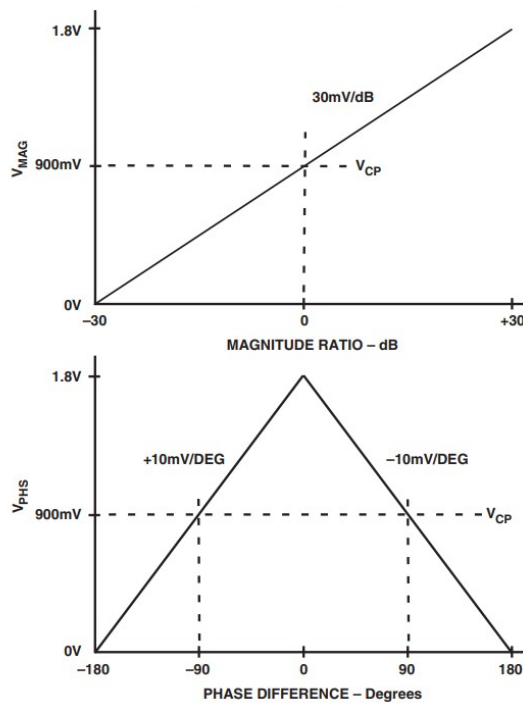
$$V_{Gain} = 10^{\frac{Gain}{20}} \quad (4.21)$$

$$\Delta\varphi = \frac{V_{PHYS} - 0.9}{10 \cdot 10^{-3}} - 90 \quad (4.22)$$

με $Gain$ το κέρδος σε dB, V_{Gain} το κέρδος σε καθαρό αριθμό και $\Delta\varphi$ η διάφορα φάσης σε μοίρες. Με τον τρόπο όμως που συνδέσαμε τις εισόδους η (4.17) θα αλλάξει σε :

$$VMAG = \frac{V_X}{V_{Out}} \quad (4.23)$$

$$|Y_{SOIL}| = \frac{1}{RF \cdot V_{Gain}} \quad (4.24)$$



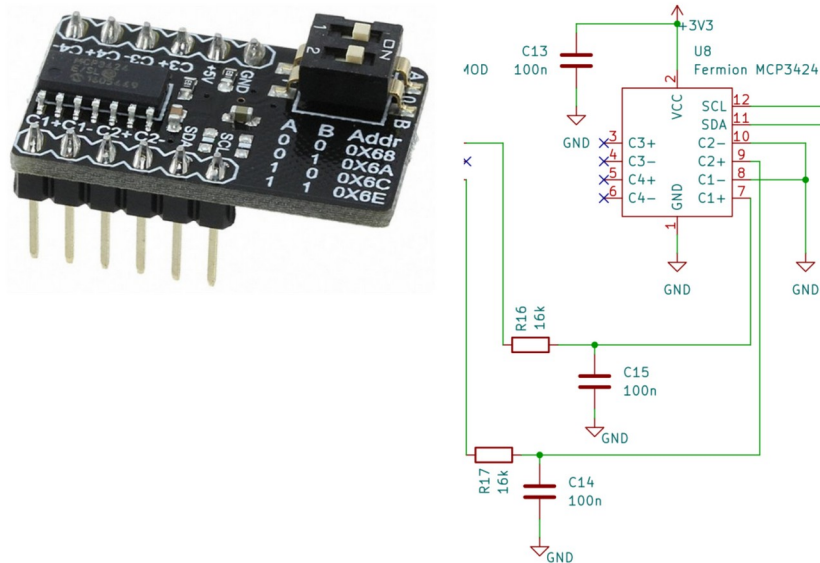
Εικόνα 37: Συνάρτηση μεταφοράς εξόδων AD8302[10]

4.1.3.6 Εξωτερική μονάδα ADC

Στην εικόνα 38 φαίνεται η εξωτερική μονάδα ADC MCP3424, με αυτή την μονάδα μετατρέπουμε την αναλογική τάση σε ψηφιακό αριθμό που μπορεί να επεξεργαστή ο μικροελεγκτής. Ο λόγος που επιλέξαμε εξωτερικό ADC είναι για να μειώσουμε τα σφάλμα του εσωτερικού ADC του μικροελεγκτή καθώς και την ικανότητα να μετράμε ταυτόχρονα δυο σήματα.

Πιο συγκεκριμένα το MCP3424 έχει 4 διαφορεικά κανάλια δηλαδή μπορεί να μετρήσει τάση όπως οι διαφορικοί ενισχυτές. Έχει προγραμματιζόμενη ανάλυση 12, 14, 16 και 18bits, αυτό είναι ο αριθμός των πιθανών τιμών εξόδου που μπορεί να παράγει ο ADC, μια υψηλότερη ανάλυση ADC σημαίνει γενικά μεγαλύτερη ακρίβεια. Έχει επίσης προγραμματιζόμενο ρυθμό δεδομένων 240, 60, 15 και 3.75

SPS, δηλαδή είναι ικανότητα ρύθμισης της συχνότητας με την οποία ο ADC μετατρέπει τα αναλογικά σήματα σε ψηφιακά δεδομένα.



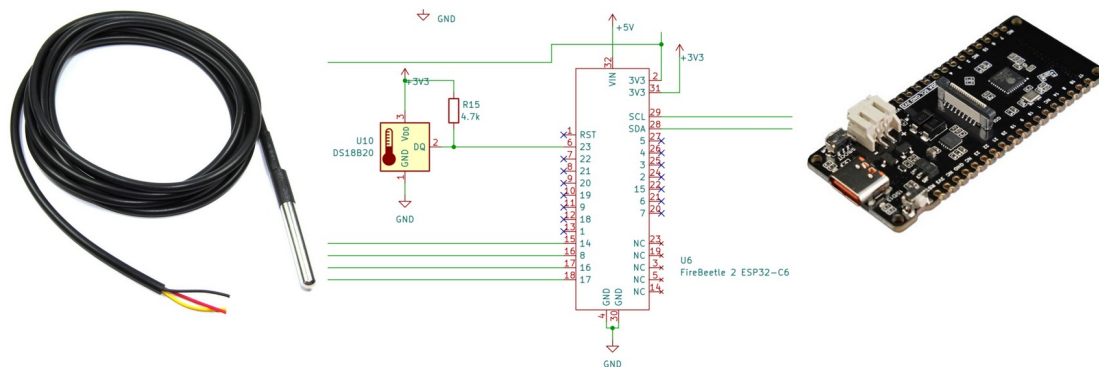
Εικόνα 38: Μονάδα και σχέδιο ADC MCP3424

Επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή μέσω πρωτοκόλλου I2C, εμείς επιλέξαμε 16bits. Στις εισόδους των καναλιών που συνδέσαμε χαμηλοπερατά φίλτρα ώστε να μειώσουμε τον θόρυβο άρα και τα σφάλματα, στο κανάλι 1 C1+ συνδέσαμε το κέρδος και στο κανάλι 2 C2+ την διαφορά φάσης. Τα φίλτρα έχουν συχνότητα αποκοπής περίπου με 100hz :

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 16 \text{ K} \cdot 100 \text{ n}} = 100 \text{ hz} \quad (4.25)$$

4.1.3.7 Μικροελεγκτής και Αισθητήρας Θερμοκρασίας

Στην εικόνα 39 φαίνεται το σχέδιο του μικροελεγκτή ESP32 C6 και αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20. Χρησιμοποιήσαμε ψηφιακό αισθητήριο θερμοκρασίας ώστε να μην κάνουμε το κύκλωμα πιο περίπλοκο, καθώς και για την ευκολία χρήσης του, μπορεί να μετρήσει από -55 έως 125°C, είναι αδιάβροχο και μπορεί να θαφτεί στο χώμα ώστε να έχουμε πιο ακριβείς μετρήσεις. Επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή με το πρωτοκόλλου 1-Wire, που χρειάζεται έναν δίαυλο - σύνδεση επικοινωνίας, το μόνο που χρειάστηκε να προσθέσουμε ήταν μια αντίσταση Pull-Up την R15. Ο μικροελεγκτής συγκεκριμένα είναι ο FireBeetle 2 ESP32 C6 ο οποίος έχει αρκετές δυνατότητες σε συνδεσιμότητα όπως: WI-FI, Bluetooth, I2C, UART καθώς επίσης και στο επίπεδο του υλικού hardware με: συχνότητα λειτουργίας 160Mhz, SRAM 512KB, ROM 320KB, Flash 4MB. Έχει και άλλες λειτουργίες άλλα εμείς κυρίως τον επιλέξαμε για την ευκολία προγραμματισμού και συνδεσιμότητα του.

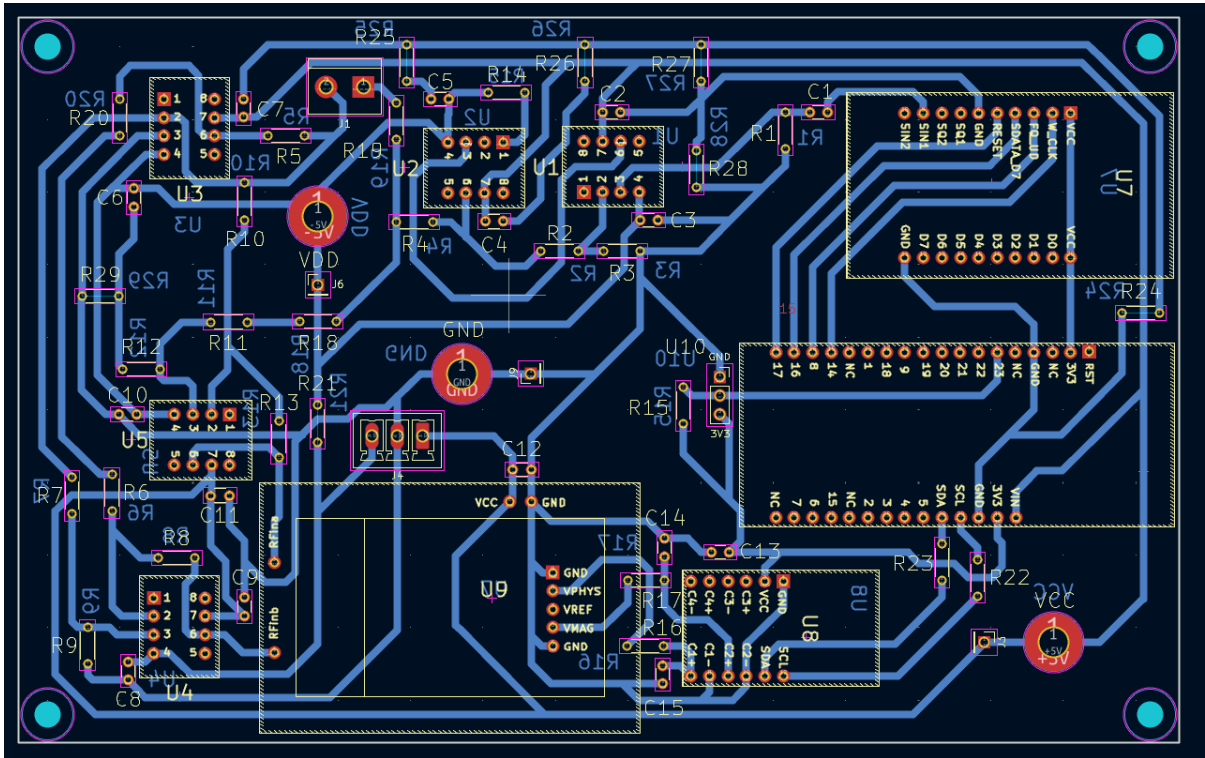


Εικόνα 39: Σχέδιο μικροελεγκτή ESP32 C6 και αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20

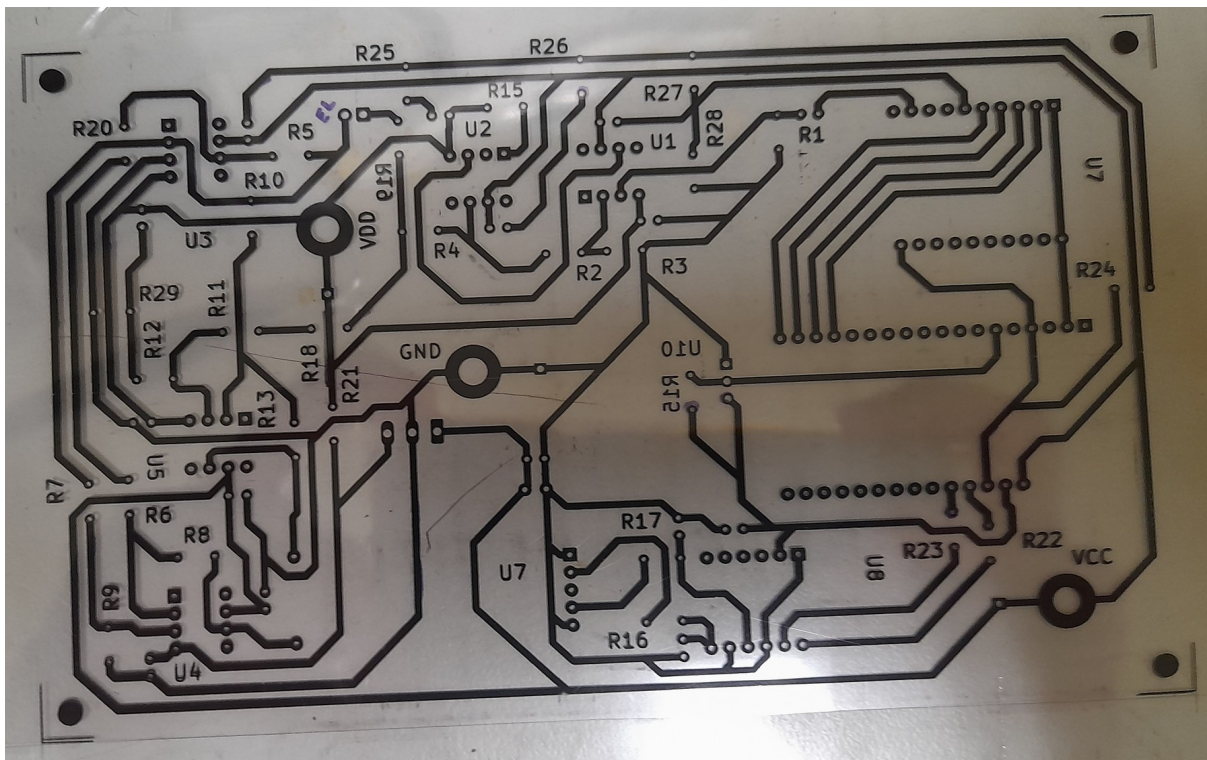
Η λειτουργία του μικροελεγκτή είναι η επιλογή των συχνοτήτων εξόδου της DDS, το διάβασμα των μετρούμενων σημάτων *VMAG* και *VPHYS*, το διάβασμα της θερμοκρασίας, ο υπολογισμός της αγωγιμότητας εδάφους *ECa*, της περιεκτικότητας σε νερό *VWC* και η αποστολή των δεδομένων μέσω πρωτοκόλλου MODBUS σε πρόγραμμα απεικόνισης. Το πρόγραμμα του μικροελεγκτή και τα προγράμματα απεικονίσεις θα εξηγηθούν σε επομένη ενότητα. Τέλος, προσθέσαμε μια OLED οθόνη η οποία δεν φαίνεται στο σχέδιο και επικοινωνεί μέσω I2C.

4.1.4 Πλακέτα (PCB) Διάταξης

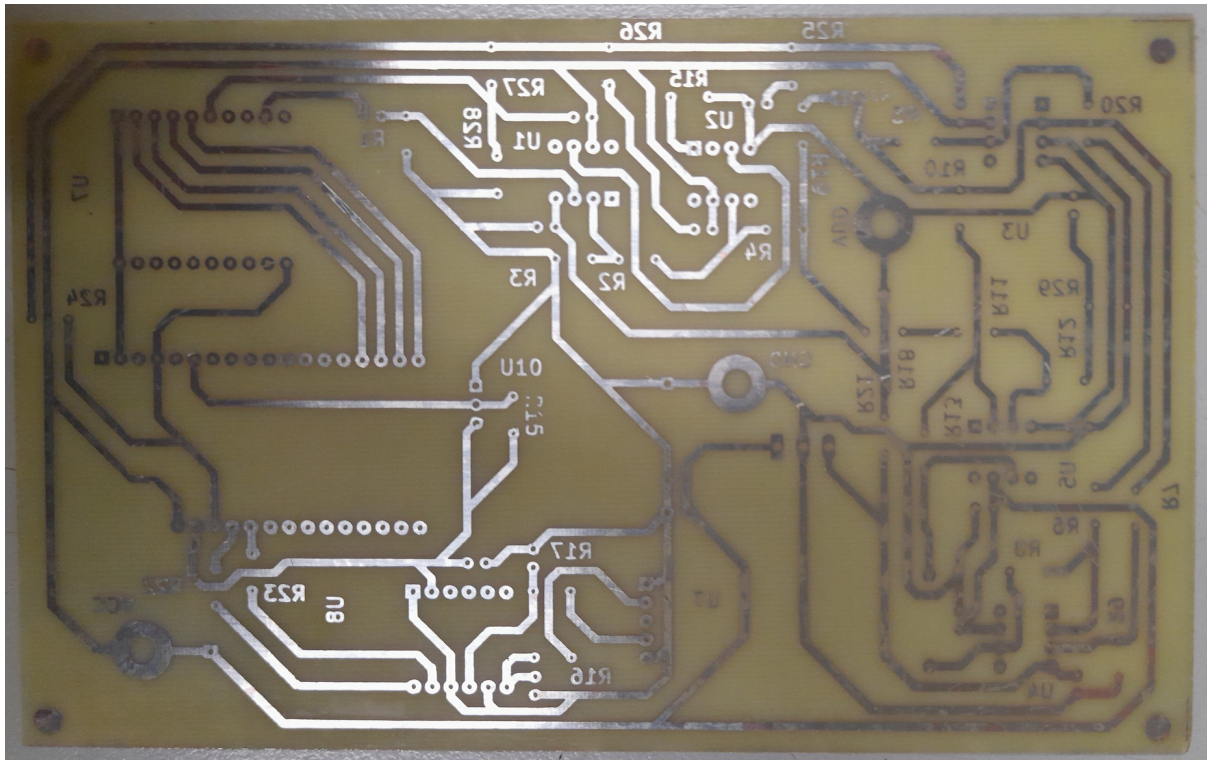
Για τον σχεδιασμό της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος (PCB) χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό KiCad, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 40, με βάση το ηλεκτρονικό σχέδιο της εικόνας 31. Η πλακέτα έχει διαστάσεις 10×16 cm. Για τα περισσότερα εξαρτήματα χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα αποτυπώματα (footprints) που παρέχονται από το λογισμικό, ενώ για όσα δεν υπήρχαν δημιουργήθηκαν νέα αποτυπώματα κατόπιν μετρήσεων. Στη συνέχεια, το σχέδιο εκτυπώθηκε σε διαφανές χαρτί εικόνα 41 και τοποθετήθηκε επάνω σε φωτοευαίσθητη πλακέτα. Μέσω έκθεσης σε έντονο φως το σχέδιο μεταφέρθηκε στην επιφάνεια του χαλκού. Ακολούθως, η πλακέτα τοποθετήθηκε σε διάλυμα καυστικής σόδας, ώστε να αφαιρεθεί ο μη προστατευμένος χαλκός. Για την αποφυγή οξείδωσης, η επιφάνεια επικαλύφθηκε με στρώσεις κασσιτέρου. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην εικόνα 42. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε διάτρηση για τις θέσεις των εξαρτημάτων, τα οποία κολλήθηκαν επάνω στην πλακέτα. Επιπλέον, εκτυπώθηκε οδηγός τοποθέτησης (silkscreen) σε χαρτί για την οπτική αναγνώριση των εξαρτημάτων, όπως φαίνεται στην εικόνα 43. Η ολοκληρωμένη πλακέτα με τα συγκολλημένα εξαρτήματα παρουσιάζεται στην εικόνα 44. Τέλος, για τη σύνδεση της οθόνης κατασκευάστηκε μια πρόσθετη βαθμίδα σε διάτρητη πλακέτα, όπως φαίνεται στην εικόνα 45.



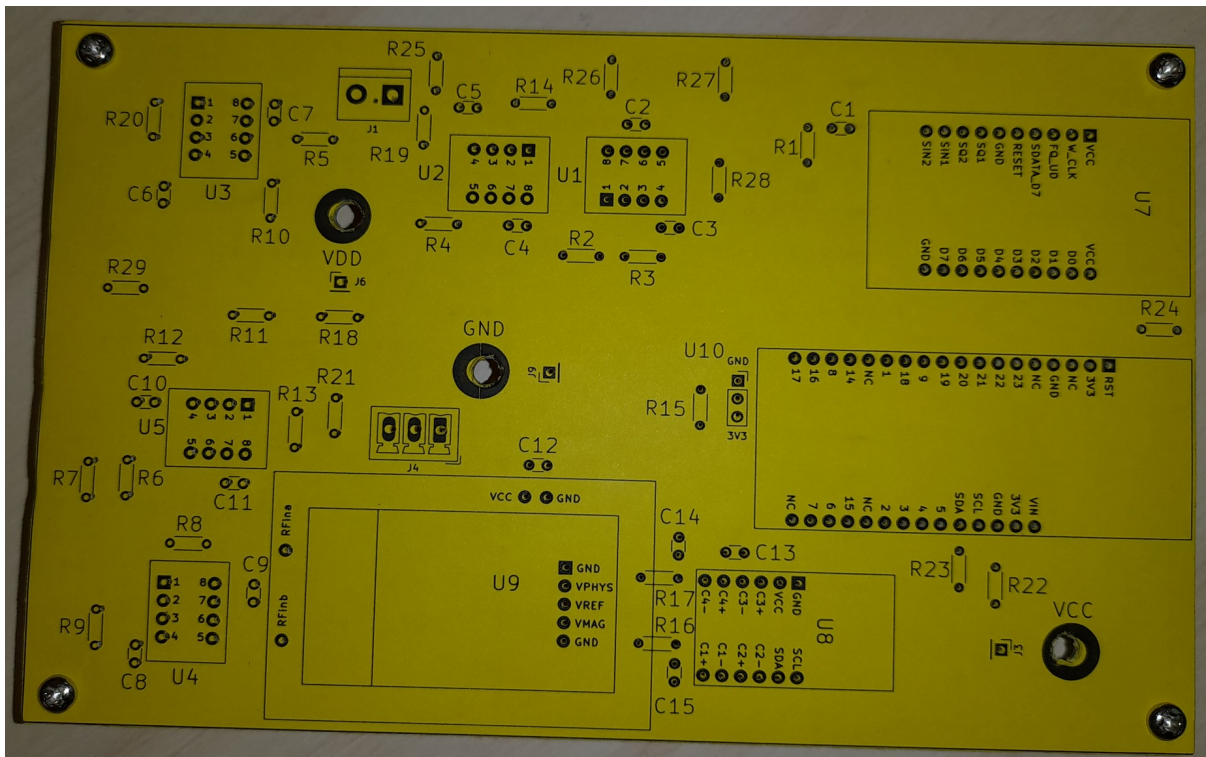
Εικόνα 40: Σχεδιασμός PCB στο KiCad



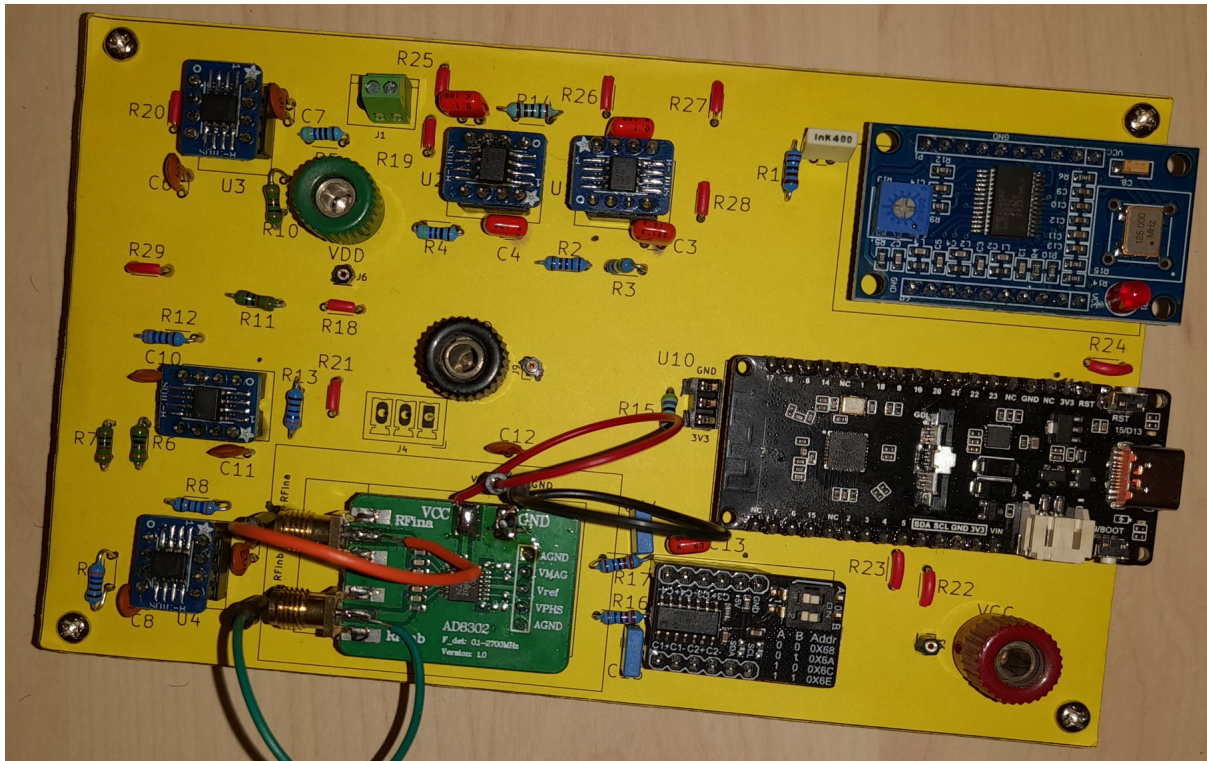
Εικόνα 41: Εκτύπωση σχεδίου πλακέτας PCB σε διαφανές χαρτί



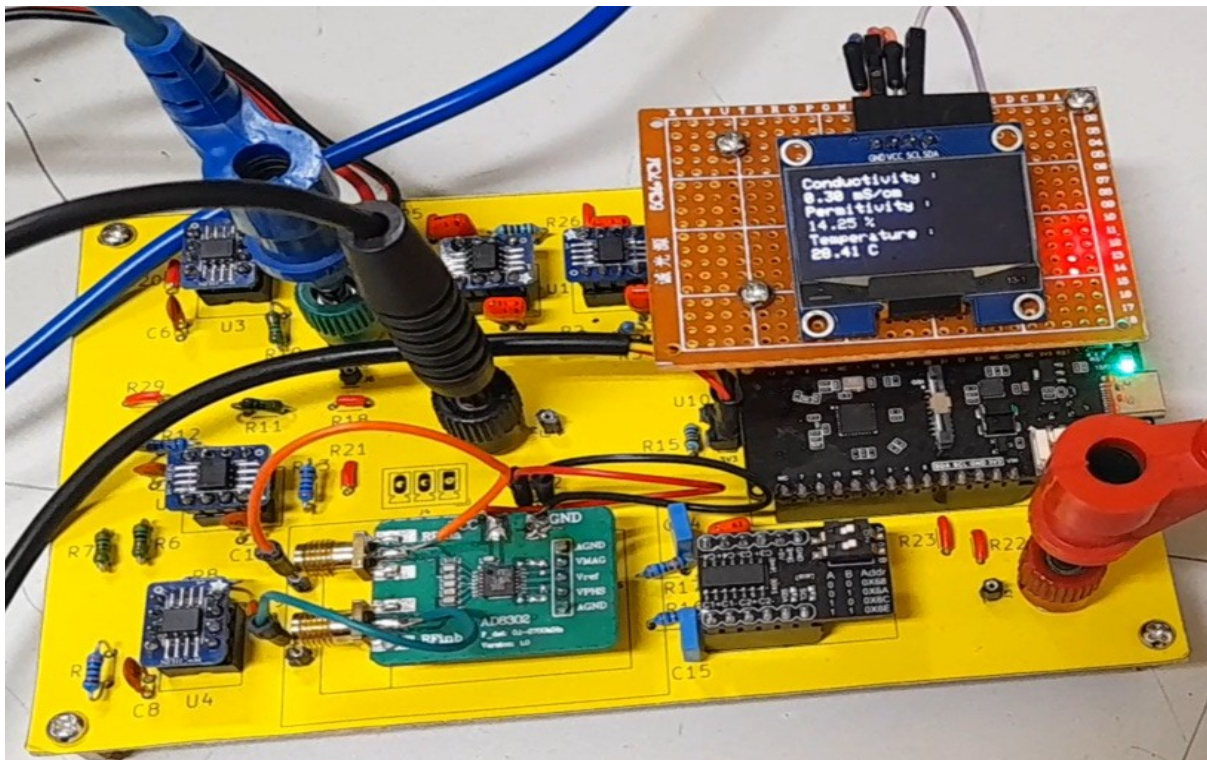
Εικόνα 42: Επικασσιτερωμένη πλακέτα



Εικόνα 43: "Πρόσοψη" πλακέτας



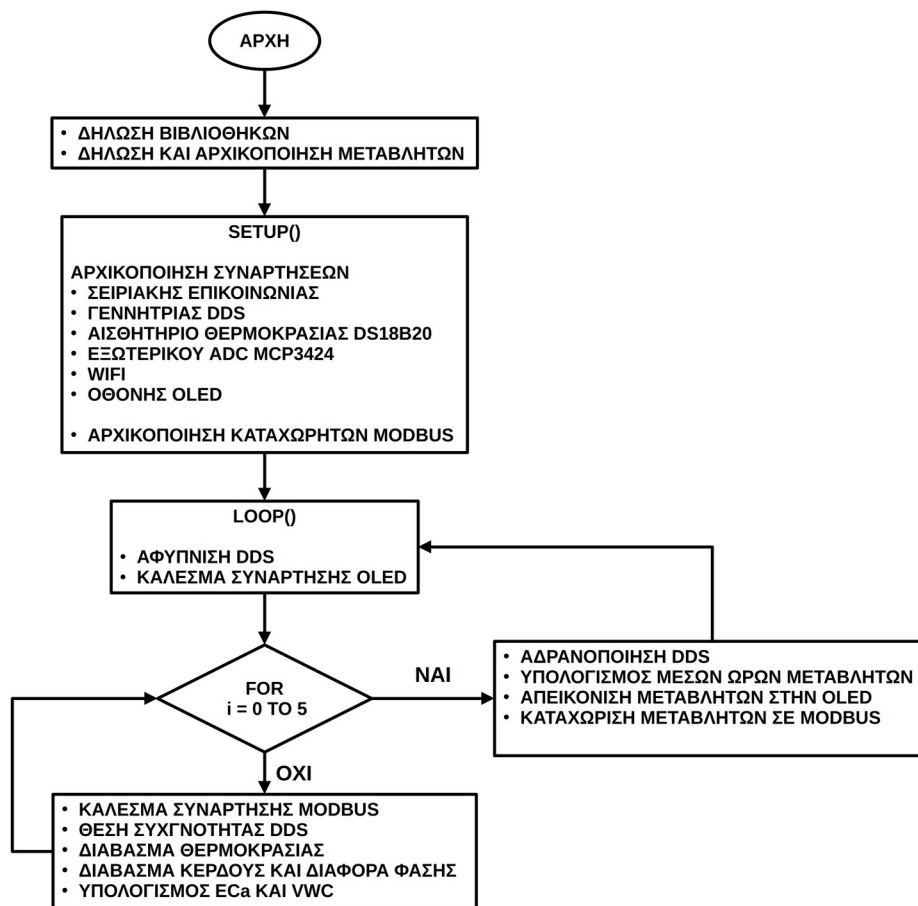
Εικόνα 44: Πλακέτα με τα εξαρτήματα τοποθετημένα



Εικόνα 45: Πλακέτα με οθόνη

4.1.5 Κώδικας Μικροελεγκτή και Προγράμματα Απεικόνισης

Στην εικόνα 46 φαίνεται το διάγραμμα ροής του προγράμματος του μικροελεγκτή, ο προγραμματισμός έγινε στο Arduino IDE. Το πρόγραμμα αποτελείται από δυο κύριες συναρτήσεις την setup() και την loop(). Στην αρχή δηλώνουμε τις βιβλιοθήκες, τις μεταβλητές και συναρτήσεις, μετά στην setup αρχικοποιούμε τις λειτουργίες του μικροελεγκτή, των περιφερειακών του και των συνδέσεων του δηλαδή στήνουμε τον μικροελεγκτή. Η loop() είναι η συνάρτηση που τρέχει καθόλη τη διάρκεια λειτουργίας, μέσα της γράφουμε τις ενέργειες που θέλουμε να κάνει ο μικροελεγκτής. Αφότου εισέλθουμε στην loop() αφυπνίζουμε την DDS και καλούμε τη συνάρτηση της οθόνης oled για να λειτουργήσει. Στη συνέχεια μπαίνουμε σε έναν φθόγγο for που τρέχει 6 φορές όσες και οι συχνότητες, μέσα καλούμε τη συνάρτηση του πρωτοκόλλου MODBUS για να ετοιμάσει τους καταχωρητές, θέτουμε τη συχνότητα της DDS, διαβάζουμε τη θερμοκρασία από το αισθητήριο DS18B20, διαβάζουμε τα σήματα VMAG και VPHYS, τέλος υπολογίζουμε την ECa εδάφους και την VWC.



Εικόνα 46: Διάγραμμα ροής προγράμματος

Αφότου τελείωση ο φθόγγος κλείνουμε την DDS, υπολογίζουμε τους μέσους όρους των μεταβλητών, τα απεικονίζουμε στην οθόνη OLED και περνούμε τις τιμές των μεταβλητών στους καταχωρητές του MODBUS και αρχίζει μετά από την αρχή.

4.1.5.1 Πρωτόκολλο MODBUS

Το MODBUS είναι πρωτόκολλο επικοινωνίας με σκοπό την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ ηλεκτρονικών βιομηχανικών συσκευών όπως PLC (Programmable Logic Controller), αισθητήρων, SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) και HMI (Human Machine Interface) συστημάτων. Βασίζεται σε ένα αρχιτεκτονικό μοντέλο τύπου master-slave, όπου ένας master (π.χ. ένας ελεγκτής) ξεκινά την επικοινωνία με έναν ή περισσότερους slaves (π.χ. μετρητές ή αισθητήρες), οι οποίοι ανταποκρίνονται μόνο όταν ερωτηθούν. Το MODBUS παρέχει τη δυνατότητα ανάγνωσης και εγγραφής δεδομένων μέσω ενός προκαθορισμένου συνόλου function codes, όπως για ανάγνωση ψηφιακών εξόδων (Function Code 01, Coil), αναλογικών τιμών (03, 04, Input Registers), ή εγγραφή σε καταχωρητές (06, 16, Holding Registers). Υποστηρίζει διάφορες μορφές μετάδοσης, με πιο κοινές τις: MODBUS RTU (σε RS-232/RS-485 σειριακές συνδέσεις), και MODBUS TCP/IP, που χρησιμοποιεί το Ethernet για δικτυακή επικοινωνία, επιτρέποντας ευκολότερη ενσωμάτωση σε σύγχρονα δίκτυα. Επιλέξαμε το MODBUS για την απλότητά του και την εύκολη ενσωμάτωση του στο πρόγραμμα. Δηλαδή έχουμε σαν master τα προγράμματα απεικόνισης και ο μικροελεγκτής είναι ο slave. Εμείς κάναμε μια παραλλαγή του MODBUS TCP/IP αντί να στέλνουμε τα δεδομένα μέσω καλωδίου Ethernet χρησιμοποιήσουμε την ήδη υπάρχουσα σύνδεση μέσω WIFI που έχει ο μικροελεγκτής.

4.1.5.2 Κώδικας Μικροελεγκτή

Στην Εικόνα 47 παρουσιάζεται το τμήμα του κώδικα στο οποίο δηλώνονται οι βιβλιοθήκες και οι μεταβλητές. Αρχικά, εισάγονται οι απαιτούμενες βιβλιοθήκες, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση των περιφερειακών και την υλοποίηση επιμέρους λειτουργιών (ADC, OLED, DDS, Wi-Fi). Στη συνέχεια δηλώνονται οι μεταβλητές που αφορούν: τη σύνδεση της DDS (γραμμές 15–18), τις συχνότητες εξόδου σε πίνακα freq, τα αποτελέσματα υπολογισμού της αγωγιμότητας (ECa) σε πίνακα result_con και της περιεκτικότητας σε νερό σε πίνακα result_cap, καθώς και η μεταβλητή βαθμονόμησης της DDS (trimFreq) και τα αποτελέσματα μέτρησης θερμοκρασίας σε πίνακα Temperature (γραμμές 20–27). Επιπλέον, δηλώνονται οι μεταβλητές για τη σύνδεση του αισθητηρίου θερμοκρασίας DS18B20 μέσω του πρωτοκόλλου OneWire (γραμμές 29–32), καθώς και για το αντικείμενο του MODBUS, τη διασύνδεση του εξωτερικού ADC MCP3424 και της οθόνης OLED (γραμμές 35–47). Στη συνέχεια ορίζονται τα structs για την οργάνωση των δεδομένων: adc_values_volt (ανάγνωση καναλιών ADC), adc_values_con (μετατροπή σε κέρδος και διαφορά φάσης) και complex_con (υπολογισμός ECa και περιεκτικότητας νερού). Η χρήση structs επιτρέπει την ταυτόχρονη διαχείριση και επεξεργασία των σχετικών μεταβλητών. Τέλος, δηλώνονται οι στατικές παράμετροι δικτύου (IP, Gateway και Subnet), οι οποίες χρησιμοποιούνται τόσο για τη σύνδεση μέσω Wi-Fi όσο και για την επικοινωνία με το πρωτόκολλο MODBUS.

```

1  #include <Wire.h>
2  #include <MCP342x.h>
3  #include <AD9850.h>
4  #include "OneWireESP32.h"
5  #include <SPI.h>
6  #include <Adafruit_GFX.h>
7  #include <Adafruit_SH110X.h>
8  #ifndef ESP8266
9  #include <ESP8266WiFi.h>
10 #else //ESP32
11 #include <WiFi.h>
12 #endif
13 #include <ModbusIP_ESP8266.h>
14
15 const int W_CLK_PIN = 14;
16 const int FQ_UD_PIN = 8;
17 const int DATA_PIN = 16;
18 const int RESET_PIN = 17;
19
20 double freq[6] = {100e+3, 150e+3, 200e+3, 9000e+3, 9500e+3, 10000e+3};
21 double result_con[6];
22 double result_cap[6];
23 double trimFreq = 124999500;
24
25 int phase = 0;
26
27 float Temperature[6];
28
29 const uint8_t MaxDevs = 1;
30 uint64_t addr[MaxDevs];
31 OneWire32 ds(23);
32 long ts;
33 ModbusIP mb;
34
35 uint8_t address = 0x68;
36 MCP342x adc = MCP342x(address);
37
38 #define i2c_Address 0x3c
39
40 #define SCREEN_WIDTH 128
41 #define SCREEN_HEIGHT 64
42 #define OLED_RESET -1
43 Adafruit_SH1106G display = Adafruit_SH1106G(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, OLED_RESET);
44
45 #define NUMFLAKES 10
46 #define XPOS 0
47 #define YPOS 1
48 #define DELTAY 2
49
50 struct adc_values_volt{
51     double cha_adc_1;
52     double cha_adc_2;
53 };
54
55 struct adc_values_conv{
56     double gain;
57     double phase_dif;
58 };
59
60 struct complex_conv{
61     double real;
62     double imag;
63 };
64
65 IPAddress local_IP(192, 168, 1, 166);
66 IPAddress gateway(192, 168, 1, 1);
67 IPAddress subnet(255, 255, 0, 0);
68

```

Εικόνα 47: Κώδικας προγράμματος 1 : δήλωση μεταβλητών

Στην εικόνα 48 φαίνεται η συνάρτηση setup, στην οποία <<σετάρουμε>> - στήνουμε τις λειτουργίες του μικροελεγκτή, των περιφερειακών του και των συνδέσεων του. Στην αρχή, η συνάρτηση ξεκινάει με τη σειριακή επικοινωνία μέσω του καλωδίου προγραμματισμού, που χρησιμοποιήθηκε στην αρχή για debugging. Μετά αρχικοποιεί τη γεννήτρια DDS ακίδες επικοινωνίας και βαθμονόμηση, στη συνέχεια ψάχνει τον αισθητήρα θερμοκρασίας και τον ADC, στην περίπτωση που δεν τα βρει στέλνει ένα μήνυμα για το καθένα ξεχωριστά μέσω του καλωδίου προγραμματισμού. Στη συνέχεια θα προσπαθήσει να συνδεθεί στο δίκτυο WIFI, όταν συνδεθεί θα στείλει μήνυμα ότι συνδέθηκε το αντίθετο όταν δεν συνδεθεί, μετά στήνει τον server του MODBUS με 6 καταχωρητές (Holding Registers) στη διεύθυνση 40099-40104, 8 ψηφιακές εξόδους (Coils) στη διεύθυνση 10099-10106 και 2 αναλογικές τιμές (Input Registers) στη διεύθυνση 60099-60100. Τέλος, αρχικοποιεί την οθόνη OLED.

Πίνακας 6: Διευθύνσεις MODBUS

Holding Registers		Coils		Input Registers	
Διεύθυνση	Μεταβλητή	Διεύθυνση	Μεταβλητή	Διεύθυνση	Μεταβλητή
40099	Μέση ECa	10099	LED	60099	Διορθωτικός όρος ECa
40100	ECa	10100		60100	Διορθωτικός όρος VWC
40101	Μέση VWC	10101			
40102	VWC	10102			
40103	Μέση Θερμοκρασία	10103			
40104	Διάφορα Φάσης	10104			
		10105			
		10106			

```

69 void
70 setup(void) {
71   Serial.begin(9600);
72   Wire.begin();
73
74   DDS.begin(W_CLK_PIN, FQ_UD_PIN, DATA_PIN, RESET_PIN);
75   DDS.calibrate(trimFreq);
76   DDS.down();
77
78   uint8_t devices = ds.search(addr, MaxDevs);
79
80   MCP342x::generalCallReset();
81   delay(1);
82
83   Wire.requestFrom(address, (uint8_t)1);
84   if (!Wire.available()) {
85     Serial.print("No device found at address ");
86     Serial.println(address, HEX);
87     while (1)
88       ;
89   }
90
91   WiFi.begin("ELE_A2", "ele_1234");
92
93   while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
94     delay(500);
95     Serial.print(".");
96   }
97
98   if (!WiFi.config(local_IP, gateway, subnet)) {
99     Serial.println("STA Failed to configure");
100 }
101
102 Serial.println("");
103 Serial.println("WiFi connected");
104 Serial.println("IP address: ");
105 Serial.println(WiFi.localIP());
106
107 mb.server();
108 mb.addIreg(99,0,6);
109 mb.addCoil(99,0,8);
110 mb.addHreg(99,0,2);
111 pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
112
113 delay(250);
114 display.begin(i2c Address, true);
115 display.display();
116
117 display.clearDisplay();
118 display.clearDisplay();
119 display.setTextSize(1.5);
120 display.setTextColor(SH110X_WHITE);
121
122 }

```

Εικόνα 48: Κώδικας προγράμματος 2 : συνάρτηση setup()

```

124 void loop(void) {
125     struct adc_values_volt values1;
126     struct adc_values_conv values2;
127     struct complex_conv values3;
128     DDS.up();
129     display.display();
130
131     for (int i = 0; i <= 5; i++) {
132         Serial.println(i);
133
134         mb.task();
135         delay(500);
136         DDS.setfreq(freq[i], phase);
137         Temperature[i]=tempTask();
138
139         values1=adc_read();
140         values2=vals_conv(values1.cha_adc_2,values1.cha_adc_1);
141         values3=complex_vals(values2.gain,values2.phase_dif,freq[i],Temperature[i]);
142
143         result_con[i]=values3.real;
144         result_cap[i]=values3.imag;
145         mb.Ireg(100,uint16_t(values3.real*1000*1000));
146         mb.Ireg(102,uint16_t(values3.imag*1000));
147         mb.Ireg(104,uint16_t(values3.phase_dif*1000));
148
149     }
150     DDS.down();
151
152     double mean_con=((result_con[0]+result_con[1]+result_con[2])/3)-mb.Hreg(99)/1000;
153     double mean_cap=((result_cap[3]+result_cap[4]+result_cap[5])/3)-mb.Hreg(100)/1000;
154     double mean_temp=(Temperature[0]+Temperature[1]+Temperature[2]+Temperature[3]+Temperature[4]+Temperature[5])/6;
155
156     display.clearDisplay();
157     display.setCursor(0, 0);
158     display.println("Conductivity :");
159     display.setCursor(0, 10);
160     display.println((mean_con*1000));
161     display.setCursor(30, 10);
162     display.println("mS/cm");
163
164     display.setCursor(0, 20);
165     display.println("Permitivity :");
166     display.setCursor(0, 30);
167     display.println(mean_cap);
168     display.setCursor(35, 30);
169     display.println("%");
170
171     display.setCursor(0, 40);
172     display.println("Temperature :");
173     display.setCursor(0, 50);
174     display.println(mean_temp);
175     display.setCursor(35, 50);
176     display.println("C");
177
178     Serial.println("mean conductivity(mS/cm) : ");
179     Serial.println(mean_con*1000,12);
180     Serial.println("mean Theata(%) : ");
181     Serial.println(mean_cap,4);
182     Serial.println("mean Temp(C) : ");
183     Serial.println(mean_temp,4);
184     Serial.println("-----");
185     Serial.println(" ");
186
187
188
189     mb.Ireg(99,uint16_t(mean_con*1000*1000));
190     mb.Ireg(101,uint16_t(mean_cap*1000));
191     mb.Ireg(103,uint16_t((15+mean_temp)*1000));
192     digitalWrite(LED_BUILTIN, mb.Coil(99));
193
194 }
195

```

Εικόνα 49: Κώδικας προγράμματος 3 : συνάρτηση loop()

Η εικόνα 49 παρουσιάζει την κεντρική συνάρτηση του προγράμματος loop(), η οποία τρέχει ατέρμονα, σε αυτήν γράφουμε τις ενέργειες που θέλουμε να κάνει ο μικροελεγκτής. Δηλώνουμε στην αρχή τις μεταβλητές τύπου struct adc_values_volt values1, adc_values_conv values2 και complex_conv values3 στις οποίες θα περνάμε τα αποτελέσματα συναρτήσεων τους, που θα περιγράψουμε παρακάτω, μετά αφυπνίζουμε την DDS και την οθόνη OLED.

Στη συνέχεια υλοποιείται ένας βρόχος for, ο οποίος εκτελείται έξι φορές, όσες είναι και οι συχνότητες εξόδου της DDS. Εντός του βρόχου αποστέλλεται αρχικά ένα μήνυμα με τον αριθμό της τρέχουσας επανάληψης (για σκοπούς αποσφαλμάτωσης), ενεργοποιείται ο server του MODBUS, ορίζεται η αντίστοιχη συχνότητα εξόδου της DDS και πραγματοποιείται μέτρηση της θερμοκρασίας, με τα αποτελέσματα να αποθηκεύονται στον πίνακα Temperature. Στη συνέχεια, μέσω των συναρτήσεων `adc_read()`, `vals_conv` και `complex_vals`, πραγματοποιείται η λήψη δεδομένων από τον ADC, η μετατροπή τους σε κέρδος και διαφορά φάσης, καθώς και ο υπολογισμός της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (ECa) του εδάφους και της περιεκτικότητας σε νερό (VWC). Τα ενδιάμεσα αποτελέσματα αποθηκεύονται προσωρινά στις μεταβλητές `values1`, `values2` και `values3` για κάθε επανάληψη του βρόχου. Ακολούθως, τα αποτελέσματα μεταφέρονται στους πίνακες `result_conv` και `result_cap`, ενώ ορισμένες μεταβλητές αποθηκεύονται σε καταχωρητές (Holding Registers) για σκοπούς αποσφαλμάτωσης και βαθμονόμησης. Τέλος, οι τιμές της ECa, της VWC και της διαφοράς φάσης κλιμακώνονται αριθμητικά (πολλαπλασιασμός με συντελεστές 1000 ή 1.000.000 για την ECa), ώστε να μετατραπούν σε ακέραιους αριθμούς πριν αποσταλούν μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας.

Αφότου τελειώσουν οι επαναλήψεις βγαίνουμε από τον φθόγγο, κλείνουμε την DDS γιατί πήραμε τις μετρήσεις, στη συνέχεια υπολογίζουμε τον μέσο όρο της ECa από τα τρία πρώτα αποτελέσματα και αφαιρούμε από αυτόν το διορθωτικό όρο ECa, δηλαδή για συχνότητες 100Khz, 150Khz και 200Khz. Μετά υπολογίζουμε τον μέσο όρο της περιεκτικότητας νερού από τα τρία τελευταία αποτελέσματα και αφαιρούμε από αυτόν τον διορθωτικό όρο περιεκτικότητας νερού, δηλαδή για συχνότητες 9Mhz, 9.5Mhz και 10Mhz. Ο λόγος των διορθωτικών όρων θα περιγραφεί σε επομένη ενότητα. Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον μέσο όρο της θερμοκρασίας και μεταφέρουμε τα αποτελέσματα σε καταχωρητές (Holding Registers), για να τα στείλουμε όμως μέσω MODBUS όπως και παραπάνω τα μετατρέπουμε σε ακέραιο αριθμό, δηλαδή πολλαπλασιάζουμε την περιεκτικότητα επί 1000, στην θερμοκρασία επειδή μπορεί να είναι και αρνητική προσθέτουμε 15 βαθμούς και μετά πολλαπλασιάζουμε επί 1000 και στην ECa πολλαπλασιάζουμε επί 1000000. Ο λόγος θα εξηγηθεί σε επομένη ενότητα. Τέλος, απεικονίζουμε στην οθόνη OLED.

Στην εικόνα 50 φαίνεται η συνάρτηση `adc_read`, είναι τύπου `struct adc_values_volt` δηλαδή επιστρέφει δυο μεταβλητές όταν την καλούμε τύπου `adc_values_volt`. Με αυτή διαβάζουμε τα σήματα `VMAG` και `VPHYS` από το εξωτερικό ADC, η συνάρτηση δεν δέχεται κάποια μεταβλητή. Αρχικοποιούμε και δηλώνουμε στη αρχή την μεταβλητή τύπου `adc_values_volt` την `vals` σε αυτή θα αποθηκεύσουμε το αποτέλεσμα της μετατροπής από ψηφιακή τιμή σε πραγματικό αριθμό. Τις `value1` και `value2` σε αυτές αποθηκευτεί προσωρινά το ψηφιακό νούμερο της μέτρησης και το αντικείμενο `status` τύπου `MCP342x:Config` που χρησιμοποιείται από τη συνάρτηση μέτρησης του ADC για την κατάσταση της. Με την εντολή `adc.convertAndRead` διαβάζουμε τη μέτρηση από τον ADC, οι μεταβλητές που δέχεται είναι: το κανάλι του ADC, ο τρόπος διαβάσματος στη δικιά μας περίπτωση `oneShot` δηλαδή διαβάζει μια φορά το κανάλι και όχι συνεχόμενα, η ανάλυση του διαβάσματος 16-bit

Κεφάλαιο 4ο:

η ενίσχυση που θέλουμε να έχει η μέτρηση εμείς επιλέξαμε 1, μέγιστος χρόνος διαβάσματος, η μεταβλητή αποθήκευσης του αποτελέσματος και το αντικείμενο κατάστασης. Στην περίπτωση που υπάρξει πρόβλημα θα σταλεί μήνυμα.

```
202
203 struct adc_values_volt adc_read(void) {
204
205     struct adc_values_volt vals;
206     long value1 = 0;
207     long value2 = 0;
208
209     MCP342x::Config status;
210
211     uint8_t err1 = adc.convertAndRead(MCP342x::channel1, MCP342x::oneShot,
212                                     MCP342x::resolution16, MCP342x::gain1,
213                                     1000000, value1, status);
214     if (err1) {
215         Serial.print("Convert error: ");
216         Serial.println(err1);
217     }else{
218         vals.cha_adc_1=(value1*2.048)/32767;
219     }
220     delay(2000);
221     uint8_t err2 = adc.convertAndRead(MCP342x::channel2, MCP342x::oneShot,
222                                     MCP342x::resolution16, MCP342x::gain1,
223                                     1000000, value2, status);
224     if (err1) {
225         Serial.print("Convert error: ");
226         Serial.println(err2);
227     }else{
228         vals.cha_adc_2=(value2*2.048)/32767;
229     }
230     delay(2000);
231
232     return vals;
233 }
234
```

Εικόνα 50: Κώδικας προγράμματος 4 : συνάρτηση adc_read

Στη συνέχεια μετατρέπουμε τον ψηφιακό αριθμό σε πραγματικό :

$$Qvalues = (2^{16}/2) - 1 = 32767 \quad (4.26)$$

που είναι οι πιθανές τιμές εισόδου από 1 έως 32767, 16 είναι η ανάλυση τον bit, το διαιρούμε δια 2 γιατί ADC έχει διαφορετικές εισόδους το άλλο μισό είναι το αρνητικό. Η διακριτικότητα του είναι ίση με:

$$Qacc = \frac{2.048}{32767} = 62.5 \mu V \quad (4.27)$$

που είναι η ελάχιστη τάση που μπορεί να μετρήσει καθώς και το βήμα μετατροπής, το 2.048 είναι η μέγιστη τάση εισόδου του ADC. Με την εξίσωση μετατροπής :

$$real = \frac{measurement \cdot 2.048}{32767} \quad (4.28)$$

με *real* ο πραγματικός αριθμός και *measurement* η μέτρηση του ADC. Τέλος, επιστρέφει τις δυο τιμές σε πραγματικό αριθμό.

```

235
236 struct adc_values_conv vals_conv(double v_phys,double v_mag){
237
238     struct adc_values_conv ch_vals;
239     double value1 = 0;
240     double value2 = 0;
241
242     value1=pow(10.0,(((v_mag-0.9)/0.03)/20));
243
244     value2=((v_phys-0.9)/(-0.01))+90;
245
246     ch_vals.gain=value1;
247     ch_vals.phase_dif=value2;
248
249     return ch_vals;
250 }
251
252

```

Εικόνα 51: Κώδικας προγράμματος 5 : συνάρτηση vals_conv

Στην εικόνα 51 παρουσιάζεται η συνάρτηση vals_conv, με την οποία μετατρέπουμε τις μετρήσεις που πήραμε από τον ADC σε κέρδος και διαφορά φάσης. Είναι τύπου struct adc_values_conv και δέχεται δυο μεταβλητές την v_phys και v_mag. Αρχικοποιούμε και δηλώνουμε στην αρχή την μεταβλητή τύπου adc_values_conv την ch_vals σε αυτή θα αποθηκεύσουμε το αποτέλεσμα της μετατροπής. Τις value1 και value2 σε αυτές θα αποθηκευτεί προσωρινά το αποτέλεσμα της μετατροπής. Στη συνέχεια υπολογίζει το κέρδος και τη διαφορά φάσης χρησιμοποιώντας τις 4.20, 4.21 και 4.22 και τέλος τις επιστρέφει.

Στην εικόνα 52 παρουσιάζεται η συνάρτηση complex_vals, με την οποία υπολογίζουμε την ECa και VWC. Είναι τύπου struct complex_conv και δέχεται τέσσερις μεταβλητές v_gain, phase, frequency, temperature ή το κέρδος, η διαφορά φάσης, η συχνότητα και η θερμοκρασία. Αρχικοποιούμε στην αρχή τη μεταβλητή τύπου complex_conv την com_vals σε αυτή θα αποθηκεύσουμε τα αποτελέσματα του υπολογισμού. Στη συνέχεια δηλώνουμε τις μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό και την προσωρινή του αποθήκευση. Οι εξισώσεις 4.5 μέχρι 4.13, η 4.24 και η 2.42 χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ECa και VWC .

Κεφάλαιο 4ο:

```
246 struct complex_conv complex_vals(double v_gain,double phase,double frequency,float tempera
247
248     struct complex_conv com_vals;
249     float Yx_abs = 0;
250     float Yx_real = 0;
251     float Yx_imag = 0;
252     float phase_rad = 0;
253     float RF = 470.0;
254     float omega = 2*M_PI*frequency;
255
256     float E0=8.85e-12;
257     float kg=0.1697;
258
259     float geo_soil_con = 0;
260     float EC25 = 0;
261     float geo_perm = 0;
262     float E_A = 0;
263     float PERM25 = 0;
264     float Theta_x = 0;
265
266     Yx_abs=1/(RF*v_gain);
267     phase_rad=((phase)*M_PI)/180;
268
269     Yx_real=Yx_abs*cos(phase_rad);
270     Yx_imag=(Yx_abs*sin(phase_rad))/omega;
271
272     geo_soil_con=Yx_real*kg;
273     EC25=geo_soil_con*(0.4470+(1.4034*exp((-temperature)/26.815)));
274
275     geo_perm=(Yx_imag)/(E0*kg);
276     PERM25=geo_perm+0.114*(25-temperature);
277
278     E_A=sqrt(pow(PERM25,2)+pow((EC25/(E0*omega)),2));
279     Theta_x(((4.3e-6)*(pow(E_A,3)))-((5.5e-4)*(pow(E_A,2)))+((2.92e-2)*(E_A))-0.053)*100;
280
281     com_vals.real=abs(EC25);
282     com_vals.imag=abs(Theta_x);
283
284     return com_vals;
285 }
286 }
```

Εικόνα 52: Κώδικας προγράμματος 6: συνάρτηση complex_vals

```
299
300 float tempTask(void){
301
302     float currTemp=0;
303
304     ds.request();
305     delay(500);
306
307     uint8_t err = ds.getTemp(addr[0], currTemp);
308     if(err){
309         const char *errrt[] = {"", "CRC", "BAD", "DC", "DRV"};
310         Serial.print(": "); Serial.println(errrt[err]);
311     }
312     return currTemp;
313     delay(500);
314
315 }
```

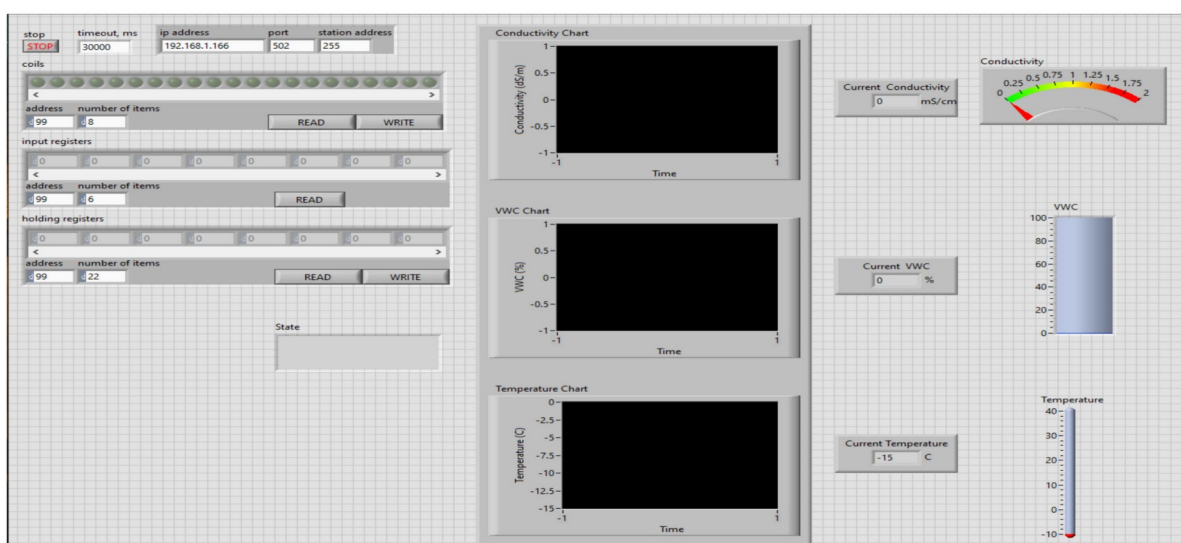
Εικόνα 53: Κώδικας προγράμματος 7: συνάρτηση tempTask

Στην εικόνα 53 φαίνεται ο κώδικας της συνάρτησης tempTask, με την οποία διαβάζουμε τη θερμοκρασία από τον αισθητήρα DS18B20. Η συνάρτηση καλεί τον αισθητήρα και στη συνέχεια διαβάζει τη θερμοκρασία, στην περίπτωση που υπάρξει πρόβλημα στέλνει μήνυμα και τέλος, επιστρέφει την θερμοκρασία.

4.1.5.3 Πρόγραμμα LabView

Το LabVIEW είναι μια γραφική πλατφόρμα προγραμματισμού για την απόκτηση, ανάλυση και παρουσίαση μετρήσεων σε εφαρμογές ελέγχου, αυτοματισμού και δοκιμών. Αντί για γραμμή-γραμμή κώδικα, ο προγραμματιστής δημιουργεί μπλοκ διαγραμμάτων που αναπαριστούν τη ροή δεδομένων και τις λειτουργίες του προγράμματος. Το κάθε πρόγραμμα ονομάζεται Virtual Instrument (VI) και αποτελείται από: Το Front Panel η διεπαφή χρήστη με κουμπιά, sliders, ενδείξεις, γραφήματα. Το Block Diagram το διάγραμμα ροής που περιέχει την λογική και τον "κώδικα" σε μορφή γραφικών μπλοκ.

Στην εικόνα 54 φαίνεται το Front Panel της εφαρμογής μας, από τα αριστερά προς τα δεξιά έχουμε : τα πεδία στα οποία συμπληρώνουμε την διεύθυνση IP το slave, την πόρτα επικοινωνίας και το χρονικό όριο διαβάσματος. Από κάτω έχουμε τα πεδία στα οποία επιλέγουμε τις διευθύνσεις και τον αριθμό των αντικείμενων που θέλουμε να διαβάσουμε ή γράψουμε, καθώς και το παράθυρο του state στο οποίο μας εμφανίζεται η κατάσταση των μετρήσεων ή αν υπάρξει κάποιο πρόβλημα. Στη μέση έχουμε τα διαγράμματα από τις μεταβλητές που διαβάζουμε ECa αγωγιμότητα εδάφους σε mS/cm, VWC περιεκτικότητα σε νερό σε % και θερμοκρασία σε βαθμούς Κέλσιου. Δίπλα έχουμε τα παράθυρα που δείχνουν την πιο πρόσφατη τιμή σε αριθμό και σε ενδείκτες.

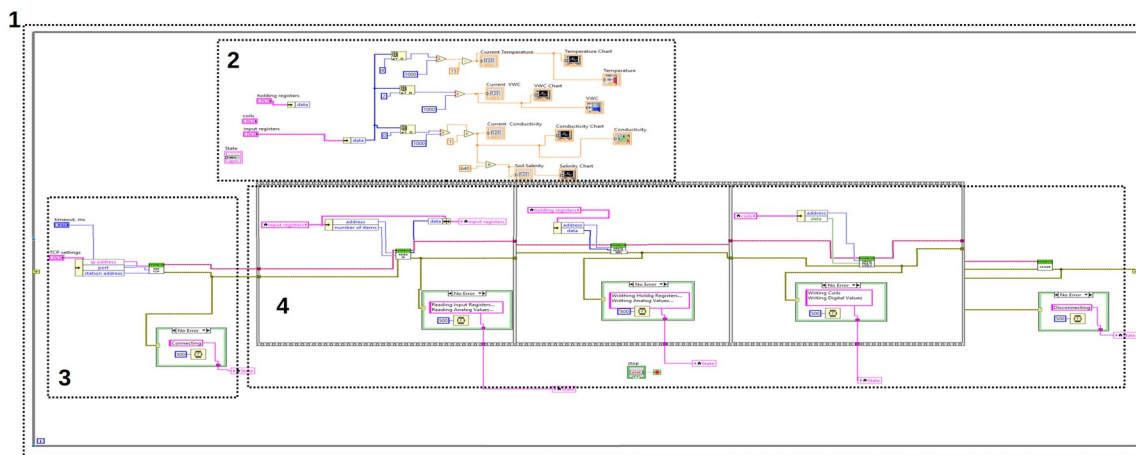


Εικόνα 54: Front Panel

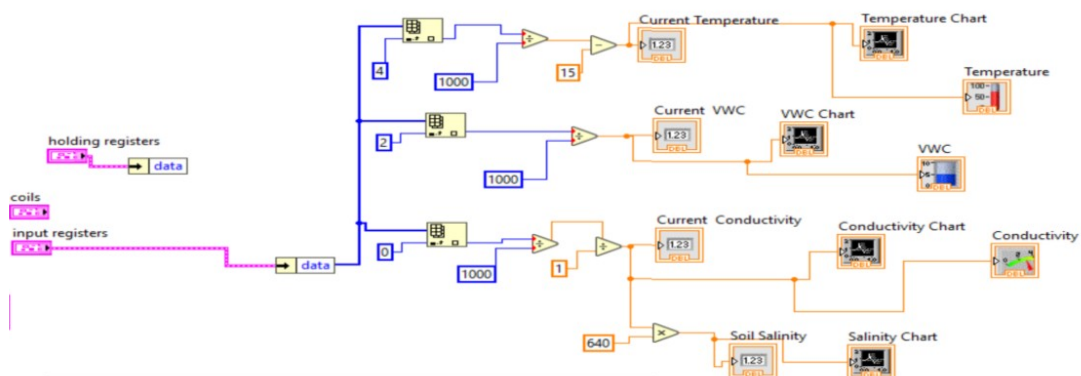
Κεφάλαιο 4ο:

Στην εικόνα 55 φαίνεται Block Diagram της εφαρμογής αποτελείται από :

1. Το διάγραμμα while loop που εμφολεύει όλη την εφαρμογή και σταματάει μόνο όταν πατηθεί το κουμπί του stop.
2. Είναι διάγραμμα όπου οι μεταβλητές οι οποίες διαβάζονται μετατρέπονται σε πληροφορία που μπορεί να παρουσιαστεί.
3. Είναι το διάγραμμα το οποίο έχει να κάνει με την σύνδεση του slave
4. Είναι διάγραμμα Flat Sequence, δηλαδή μέσα της βάζουμε μια ακολουθία από εντολές που θέλουμε να εκτελεστούν με μια σειρά, για εμάς το διάβασμα και γράψιμο των μεταβλητώ

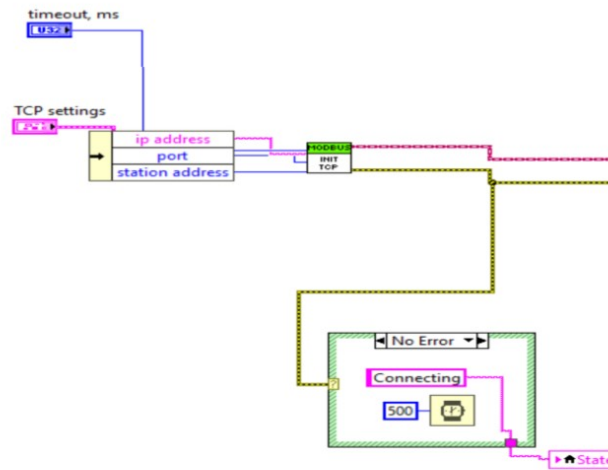


Εικόνα 55: Block Diagram



Εικόνα 56: Block Diagram διάγραμμα 2

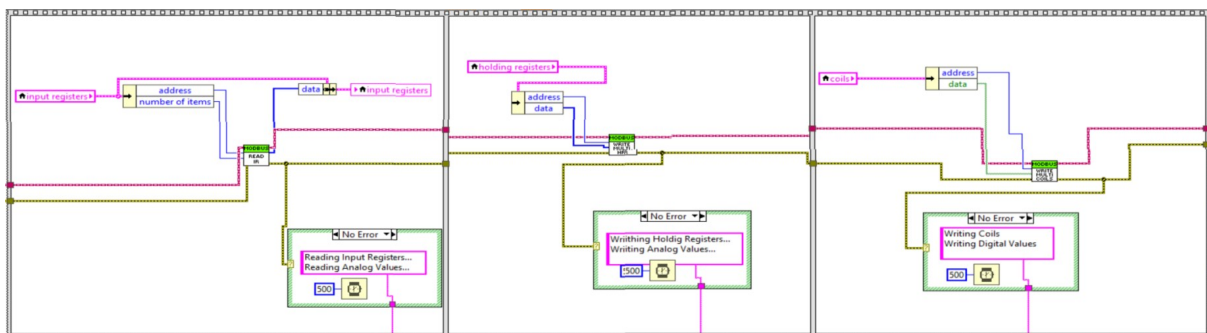
Στην εικόνα 56 έχουμε το διάγραμμα μετατροπής τιμών. Από τα αριστερά διαλέγουμε τις τιμές των input registers, διότι αποθηκεύονται σε πινάκες (κίτρινο τετράγωνο), στη συνέχεια κάνουμε τις απαραίτητες πράξεις για να μετατρέψουμε τις τιμές σε πληροφορία που μπορεί να διαβαστεί (κίτρινα τρίγωνα). Τέλος, τις περνάμε στα διαγράμματα charts, στους ενδείκτες προσφάτων τιμών current και στους ενδείκτες οργάνων.



Εικόνα 57: Block Diagram διάγραμμα 3

Στην εικόνα 57 έχουμε το διάγραμμα με την αρχικοποίηση και τη σύνδεση του LabView Master με τον αισθητήρα Slave. Η αρχικοποίηση γίνεται από την εντολή MODBUS INIT TCP στο οποίο συνδέουμε τη διεύθυνση IP πόρτα PORT και τον χρόνο Timeout, στην περίπτωση που υπάρξει πρόβλημα θα περαστεί στη μεταβλητή state αλλιώς θα δείχνει ότι συνδέεται Connecting.

Στην εικόνα 58 έχουμε το διάγραμμα με την ακολουθία του διαβάσματος και γραψίματος μεταβλητών. Όπως και παραπάνω χρησιμοποιήσαμε τις εντολές MODBUS READ IN για διάβασμα Input Registers, MODBUS WRITE MULTI HR για γράψιμο πολλαπλών Holding Registers και MODBUS WRITE MULTI COIL για γράψιμο πολλαπλών Coil. Συνδέουμε στο καθένα τη διεύθυνση και τον αριθμό των μεταβλητών που θέλουμε να διαβάσουμε ή να γράψουμε. Στην περίπτωση που υπάρξει πρόβλημα θα περαστεί στη μεταβλητή state αλλιώς θα δείχνει ότι διαβάζει Reading ή γράφει Writing. Κάθε εντολή έχει το δικό της παράθυρο μέσα στην Flat Sequence δηλαδή εκτελούνται βήμα-βήμα, αυτό το σχεδιάσαμε γιατί με το MODBUS δεν μπορούμε να εκτελέσουμε τις εντολές όλες μαζί.

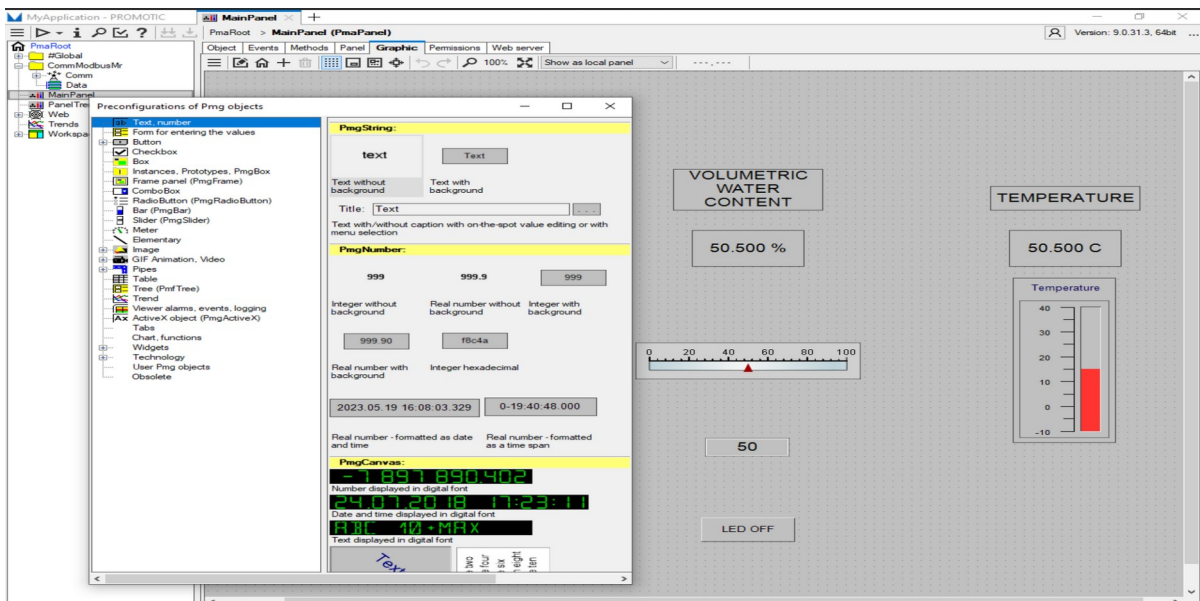


Εικόνα 58: Block Diagram διάγραμμα 4

Τέλος, κλείνουμε τον δίαυλο επικοινωνίας και περιμένουμε μέχρι το επόμενο διάβασμα του αισθητήρα που είναι περίπου κάθε 28s.

4.1.5.4 Πρόγραμμα PROMOTIC

Το PROMOTIC είναι μια πλατφόρμα λογισμικού για SCADA και HMI εφαρμογές, χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση, οπτικοποίηση και απομακρυσμένο έλεγχο διεργασιών σε βιομηχανίες, κτίρια και υποδομές. Το SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) είναι ένα σύστημα λογισμικού και υλικού που χρησιμοποιείται για την εποπτεία, έλεγχο και συλλογή δεδομένων από βιομηχανικές και τεχνικές εγκαταστάσεις σε πραγματικό χρόνο. Λειτουργεί ως «γέφυρα» ανάμεσα στον χειριστή και τον εξοπλισμό, επιτρέποντας τη σύνδεση με απομακρυσμένους αισθητήρες, μετρητές και ελεγκτές (PLC, RTU, IoT συσκευές), ώστε να παρακολουθείται η κατάσταση της εγκατάστασης, να γίνεται έλεγχος λειτουργιών, να λαμβάνονται συναγερμοί και να καταγράφονται ιστορικά δεδομένα για ανάλυση. Το PROMOTIC αποτελείται από το αναπτυξιακό περιβάλλον (Development Environment), όπου σχεδιάζεται η εφαρμογή, ρυθμίζονται οι επικοινωνίες, δημιουργούνται τα γραφικά πάνελ (HMI) και προγραμματίζονται λειτουργίες, και το runtime περιβάλλον, το οποίο εκτελεί την εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο, επικοινωνεί με PLC, αισθητήρες και βάσεις δεδομένων, και διαχειρίζεται alarms και ιστορικά δεδομένα.

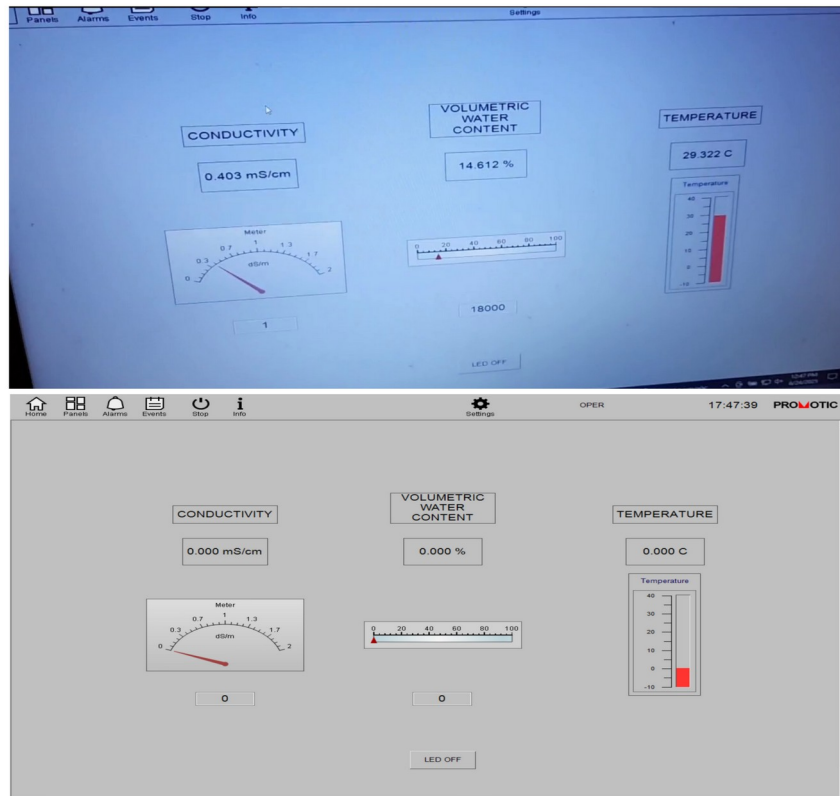


Εικόνα 59: Αναπτυξιακό περιβάλλον του PROMOTIC

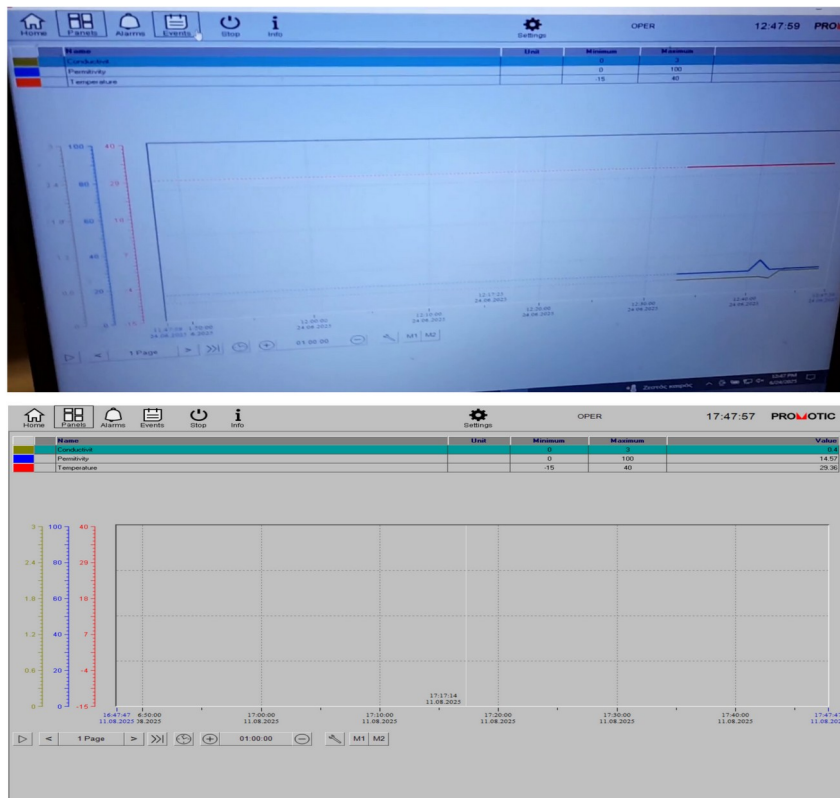
Ο προγραμματισμός της εφαρμογής στο PROMOTIC είναι διαφορετικός από αυτόν στο LabVIEW, έχουμε ήδη έτοιμους τους οδηγούς επικοινωνίας απλά χρειάζεται μόνο να βάλουμε διεύθυνση και τον χρόνο timeout, επίσης τα γραφικά στοιχεία είναι και αυτά έτοιμα απλώς τα τοποθετούμε κάνοντας drag-and-drop και συνδέοντας τις μεταβλητές που έχουμε δηλώσει.

Η εφαρμογή αποτελείται από δυο πάνελ το κεντρικό, εικόνα 60, στο οποίο παρακολουθούμε τις πιο πρόσφατες τιμές σε ενδείκτες και sliders, καθώς και πέμπουμε να γράψουμε στον αισθητήρα. Τα γραφήματα είναι το πάνελ στο οποίο αποθηκεύονται και παρουσιάζονται όλες οι τιμές των μεταβλητών σε διάγραμμα εικόνα 36.

Πειραματική Διάταξη Ενισχυτή Σύνθετης Εμπέδησης και Μέτρησης



Εικόνα 60: Κεντρικό πάνελ PROMOTIC



Εικόνα 61: Πάνελ διαγραμμάτων PROMOTIC

4.2 Μετρήσεις

Οι τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων για την ανάπτυξη του αισθητήρα αφορούσαν κυρίως το εύρος των συχνοτήτων λειτουργίας και τις διαδικασίες μέτρησης. Το πρώτο κύκλωμα, το οποίο συναρμολογήθηκε σε πλακέτα δοκιμών (breadboard), παρουσίαζε μικρές διαφορές σε σχέση με το τελικό, το οποίο απεικονίζεται στην εικόνα 6. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές με τη χρήση διακριτών εξαρτημάτων. Στη συνέχεια, οι μετρήσεις του εδάφους έγιναν με εργαστηριακά όργανα, συγκεκριμένα παλμογράφο και γεννήτρια συναρτήσεων, τα οποία κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης αντικαταστάθηκαν από τις ολοκληρωμένες μονάδες AD8302 και AD9850. Τελικό στάδιο αποτέλεσε η λήψη μετρήσεων μέσω της πλακέτας PCB σε συνδυασμό με το λογισμικό LabView.

4.2.1 Μέθοδος Πειραματικής Μέτρησης

Για να διακριβώσουμε την ορθή λειτουργία του αισθητήρα πήραμε μετρήσεις από τρία διαφορετικά χρώματα :

- Δείγμα εδάφους Α, τύπου αμμώδες
- Δείγμα εδάφους Β, τύπου αμμώδες-πηλώδες
- Δείγμα εδάφους Γ, τύπου αμμώδες-αργιλώδες

Σε δυο καταστάσεις χρώματος :

- Προσθήκη νερού χωρίς ανάμιξη, όπου το νερό προστέθηκε χωρίς ανάμιξη για να προσομοιωθούν οι συνθήκες πεδίου μετά από άρδευση ή βροχόπτωση.
- Προσθήκη νερού με ανάμιξη, όπου το νερό αναμιγνύεται επαρκώς με το έδαφος για να προσομοιωθούν ομοιογενείς συνθήκες κορεσμού.

Στην πειραματική μας διάταξη, επιλέχθηκαν διαφορετικές συχνότητες μέτρησης, συγκεκριμένα 100 khz, 150 khz και 200 khz για την εκτίμηση της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας ECa, και 9 Mhz, 9.5 Mhz και 10 Mhz για την εκτίμηση της ογκομετρικής περιεκτικότητας νερού VWC. Η επιλογή αυτών των συχνοτήτων αποσκοπούσε στη βελτιστοποίηση της διακριτικής ικανότητας μεταξύ του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της διηλεκτρικής διεμπέδησης, αξιοποιώντας την κυρίαρχη επιρροή του πραγματικού μέρους στο εύρος των khz και του φανταστικού μέρους στο εύρος των Mhz. Αντί της σταδιακής προσθήκης νερού, όπως στη μέθοδο Wenper, υιοθετήθηκαν δύο διακριτές ποσότητες νερού, 330ml και 660ml, για την προσομοίωση εδαφικών συνθηκών που αντιστοιχούν σε σχεδόν ξηρό και σχεδόν κορεσμένο έδαφος, αντίστοιχα, σε δείγματα εδάφους βάρους περίπου 2.8 kg. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις μετρήσεις του εμπορικού αισθητήρα 5TE της Decagon, οι οποίες θεωρήθηκαν ως τιμές αναφοράς.

Στα πρώτα πειράματα μετρούσαμε τις τάσεις V_{out} , V_x και την διαφορά φάσης τους μέσω του παλμογράφου και το σήμα πόλωσης μας το έδινε η γεννήτρια συναρτήσεων, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες 7, 8, και 9.

Πίνακας 7: Αποτελέσματα δείγματος Α με όργανα εργαστηρίου

Κατάσταση	Νερό (ml)	ECa Κυκλώματος (mS/cm)	VWC Κυκλώματος (%)	ECa Μετρητή (mS/cm)	VWC Μετρητή (%)	Σφάλμα ECa (%)	Σφάλμα VWC (%)
Χωρίς ανάμιξη	330	0,15	15,14	0,13	17,50	15,3846	13,52
	660	0,61	30,32	0,48	28,10	27,0833	7,91
Με ανάμιξη	330	0,09	5,46	0,09	11,50	2,90	52,5217
	660	0,86	38,25	0,65	31,46	32,3077	21,58

Πίνακας 8: Αποτελέσματα δείγματος Β με όργανα εργαστηρίου

Κατάσταση	Νερό (ml)	ECa Κυκλώματος (mS/cm)	VWC Κυκλώματος (%)	ECa Μετρητή (mS/cm)	VWC Μετρητή (%)	Σφάλμα ECa (%)	Σφάλμα VWC (%)
Χωρίς ανάμιξη	330ml	0,20	9,58	22,30	15,60	8,26	38,60
	660ml	0,55	26,18	0,51	21,40	7,43	22,33
Με ανάμιξη	330ml	0,24	12,56	0,19	12,50	23,92	0,45
	660ml	0,83	24,80	0,75	26,70	10,84	7,12

Πίνακας 9: Αποτελέσματα δείγματος Γ με όργανα εργαστηρίου

Κατάσταση	Νερό (ml)	ECa Κυκλώματος (mS/cm)	VWC Κυκλώματος (%)	ECa Μετρητή (mS/cm)	VWC Μετρητή (%)	Σφάλμα ECa (%)	Σφάλμα VWC (%)
Χωρίς ανάμιξη	330ml	0,62	20,43	0,71	13,40	13,06	52,45
	660ml	1,73	24,75	1,95	28,20	11,31	12,25
Με ανάμιξη	330ml	0,22	17,69	0,21	14,30	4,7619	23,71
	660ml	0,21	15,85	0,27	15,30	22,2222	3,59

Η πρώτη στήλη των πινάκων έχει την κατάσταση του χώματος, η δεύτερη την ποσότητα του νερού κάθε κατάστασης, η τρίτη και τέταρτη έχουν την ECa και την VWC του κυκλώματος, η πέμπτη και η έκτη έχουν την ECa και την VWC του μετρητή και οι δυο τελευταίες έχουν το σφάλμα μεταξύ του κυκλώματος και του μετρητή. Παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις μας είναι αρκετά κοντά σε αυτές του μετρητή, καθώς και την επιρροή που έχει τον νερό και η ανάμιξη του χώματος.

Κεφάλαιο 4ο:

Στη συνέχεια κάναμε πειράματα αφότου συνδέσαμε μονάδα του AD8302 ,με την ίδια μεθοδολογία. Μετρούσαμε την VMAG και VPHYS με τη χρήση του πολύμετρου και το σήμα πόλωσης μας το έδινε η γεννήτρια συναρτήσεων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πινάκες 10, 11, και 12.

Πίνακας 10: Αποτελέσματα δείγματος Α με AD8302

Κατάσταση	Νερό (ml)	ECa Κυκλώματος (mS/cm)	VWC Κυκλώματος (%)	ECa Μετρητή (mS/cm)	VWC Μετρητή (%)	Σφάλμα ECa (%)	Σφάλμα VWC (%)
Χωρίς ανάμιξη	330	0,134	14,284	0,150	15,500	10,725	7,844
	660	0,449	25,050	0,520	18,700	13,646	33,956
Με ανάμιξη	330	0,145	10,567	0,110	12,300	32,073	14,089
	660	0,599	27,129	0,550	27,900	8,816	2,762

Πίνακας 11: Αποτελέσματα δείγματος Β με AD8302

Κατάσταση	Νερό (ml)	ECa Κυκλώματος (mS/cm)	VWC Κυκλώματος (%)	ECa Μετρητή (mS/cm)	VWC Μετρητή (%)	Σφάλμα ECa (%)	Σφάλμα VWC (%)
Χωρίς ανάμιξη	330	0,370	21,043	0,340	21,300	8,936	1,208
	660	0,626	32,108	0,596	29,700	5,062	8,107
Με ανάμιξη	330	0,095	11,686	0,140	9,700	32,290	20,474
	660	0,783	26,902	0,720	29,000	8,808	7,234

Πίνακας 12: Αποτελέσματα δείγματος Γ με AD8302

Κατάσταση	Νερό (ml)	ECa Κυκλώματος (mS/cm)	VWC Κυκλώματος (%)	ECa Μετρητή (mS/cm)	VWC Μετρητή (%)	Σφάλμα ECa (%)	Σφάλμα VWC (%)
Χωρίς ανάμιξη	330	0,436	16,744	0,520	14,200	16,092	17,913
	660	2,413	46,166	2,100	39,400	14,894	17,173
Με ανάμιξη	330	0,212	13,708	0,220	12,000	3,643	14,232
	660	1,877	22,298	2,120	23,000	11,442	3,053

Όπως και παραπάνω παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις μας είναι αρκετά κοντά σε αυτές του μετρητή, την επιρροή που έχει τον νερό και η ανάμιξη του χώματος καθώς και ότι είναι κοντά με τις προηγούμενες.

Στην συνέχεια συνδεσμολογήσαμε σε πλακέτα δοκιμών (breadboard) το κύκλωμα τις εικόνες 6 και παίρναμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων στην οθόνη του υπολογιστή μέσω του προγράμματος Arduino IDE. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες 13, 14, και 15.

Πίνακας 13: Αποτελέσματα δείγματος Α με μικροελεγκτή

Κατάσταση	Νερό (ml)	ECa Κυκλώματος (mS/cm)	VWC Κυκλώματος (%)	ECa Μετρητή (mS/cm)	VWC Μετρητή (%)	Σφάλμα ECa (%)	Σφάλμα VWC (%)
Χωρίς ανάμιξη	330	0,214	14,109	0,210	11,900	1,905	18,563
	660	0,539	19,193	0,550	22,000	2,000	12,759
Με ανάμιξη	330	0,156	14,626	0,160	10,800	2,500	35,426
	660	0,669	31,460	0,630	27,500	6,190	14,400

Πίνακας 14: Αποτελέσματα δείγματος Β με μικροελεγκτή

Κατάσταση	Νερό (ml)	ECa Κυκλώματος (mS/cm)	VWC Κυκλώματος (%)	ECa Μετρητή (mS/cm)	VWC Μετρητή (%)	Σφάλμα ECa (%)	Σφάλμα VWC (%)
Χωρίς ανάμιξη	330	0,344	35,950	0,320	23,400	7,500	53,632
	660	0,449	16,660	0,550	22,500	18,364	25,956
Με ανάμιξη	330	0,223	13,600	0,180	12,300	23,889	10,569
	660	0,709	23,677	0,670	31,100	5,821	23,868

Πίνακας 15: Αποτελέσματα δείγματος Γ με μικροελεγκτή

Κατάσταση	Νερό (ml)	ECa Κυκλώματος (mS/cm)	VWC Κυκλώματος (%)	ECa Μετρητή (mS/cm)	VWC Μετρητή (%)	Σφάλμα ECa (%)	Σφάλμα VWC (%)
Χωρίς ανάμιξη	330	0,467	15,516	0,560	13,800	16,430	12,435
	660	0,427	14,106	0,570	18,900	25,162	25,367
Με ανάμιξη	330	0,120	7,316	0,140	8,800	14,401	16,861
	660	0,162	18,448	0,162	22,700	0,175	18,732

Σε αυτό το στάδιο δεν είχαμε σύνδεση με τα προγράμματα απεικόνισης. Όπως και παραπάνω παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις μας είναι αρκετά κοντά σε αυτές του μετρητή, την επιρροή που έχει το νερό και η ανάμιξη του χώματος καθώς και ότι είναι κοντά με τις προηγούμενες.

Κεφάλαιο 4ο:

Τέλος, κολλήσαμε τα εξαρτήματα επάνω στην πλακέτα και συνδέσαμε το πρόγραμμα LabView ώστε να μπορούμε να παίρνουμε μεγαλύτερο όγκο μετρήσεων. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του τελικού συστήματος.

Πίνακας 16: Αποτελέσματα δείγματος Α με PCB

Κατάσταση	Νερό (ml)	ECa Κυκλώματος (mS/cm)	VWC Κυκλώματος (%)	ECa Μετρητή (mS/cm)	VWC Μετρητή (%)	Σφάλμα ECa (%)	Σφάλμα VWC (%)
Χωρίς ανάμιξη	330	0,186	13,736	0,220	11,960	15,455	14,847
	660	0,076	15,219	0,120	11,500	36,500	32,339
Με ανάμιξη	330	0,504	17,807	0,558	22,660	9,722	21,417
	660	0,666	25,261	0,658	27,020	1,216	6,510

Πίνακας 17: Αποτελέσματα δείγματος Β με PCB

Κατάσταση	Νερό (ml)	ECa Κυκλώματος (mS/cm)	VWC Κυκλώματος (%)	ECa Μετρητή (mS/cm)	VWC Μετρητή (%)	Σφάλμα ECa (%)	Σφάλμα VWC (%)
Χωρίς ανάμιξη	330	0,339	35,982	0,490	21,300	30,816	68,930
	660	0,166	15,814	0,182	12,875	8,681	22,825
Με ανάμιξη	330	0,449	16,692	0,672	22,150	33,185	24,641
	660	0,750	24,819	0,594	20,824	26,263	19,185

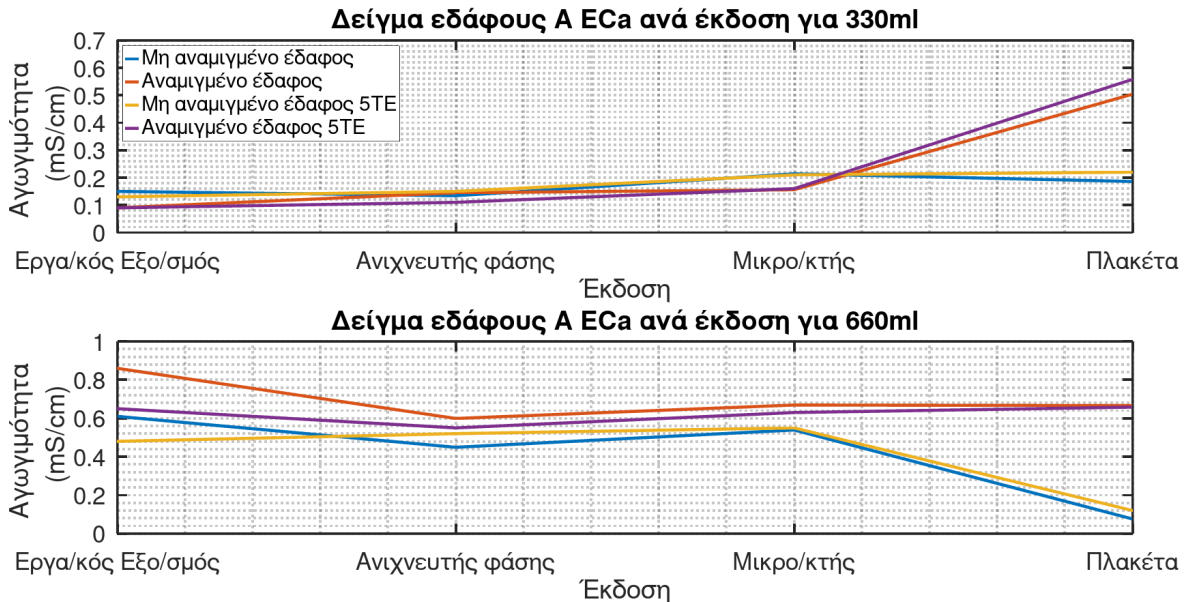
Πίνακας 18: Αποτελέσματα δείγματος Γ με PCB

Κατάσταση	Νερό (ml)	ECa Κυκλώματος (mS/cm)	VWC Κυκλώματος (%)	ECa Μετρητή (mS/cm)	VWC Μετρητή (%)	Σφάλμα ECa (%)	Σφάλμα VWC (%)
Χωρίς ανάμιξη	330	0,243	9,964	0,222	11,400	9,550	12,595
	660	0,108	14,205	0,095	10,900	5,4170	30,321
Με ανάμιξη	330	0,110	18,705	0,115	21,600	4,348	13,403
	660	0,291	14,232	0,254	14,780	14,370	3,708

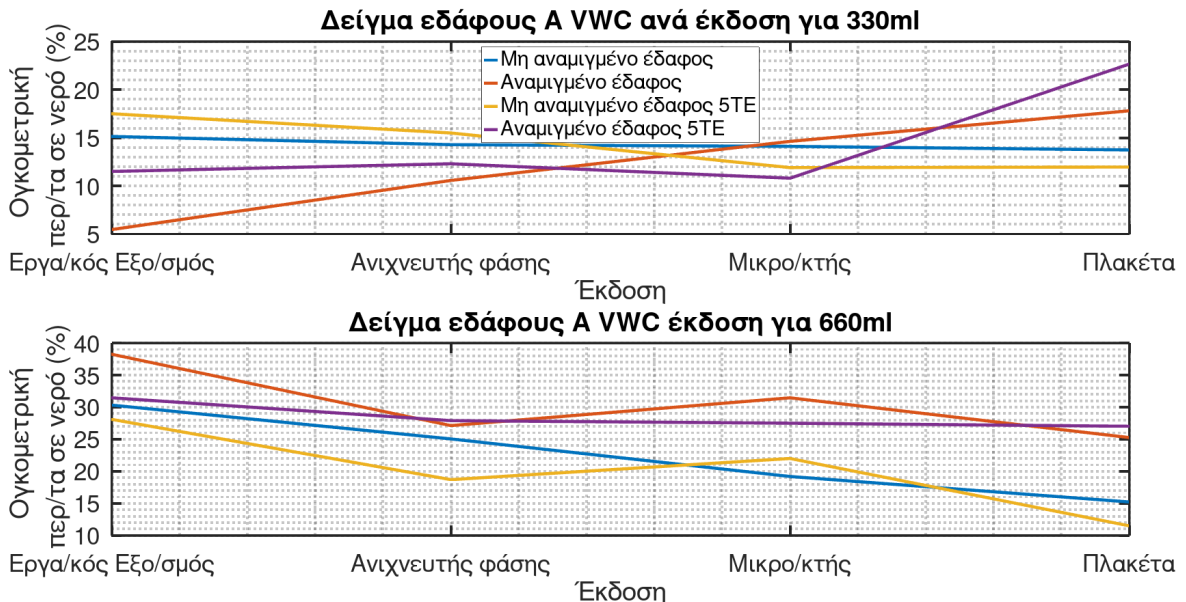
Όπως και παραπάνω παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις μας είναι αρκετά κοντά σε αυτές του μετρητή. Σε αυτή τη φάση χρειάστηκε να βάλουμε όπως αναφέραμε παραπάνω έναν διορθωτικό όρο κυρίως στις μετρήσεις VWC ίσο με περίπου 20% σε όλα τα δείγματα, οι επιρροές των μονάδων, των ηλεκτροδίων, των εργαστηριακών οργάνων και της πλακέτας θα περιγραφεί στην επομένη ενότητα.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι μετρήσεις των ECa και VWC κάθε δείγματος εδάφους ανά 330 ml και 660 ml νερού, ανά κατάσταση αναμεμιγμένου και μη αναμεμιγμένου και ανά έκδοση πειράματος, με την πρώτη να είναι η μέτρηση με τον εργαστηριακό εξοπλισμό, τη δεύτερη μέτρηση

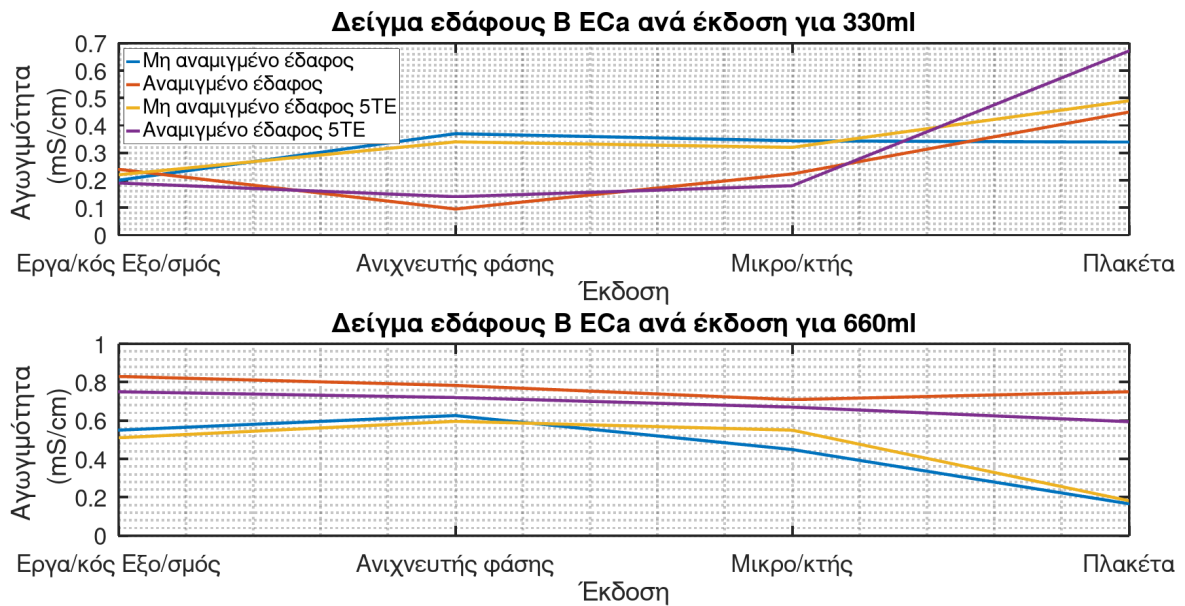
να είναι η μονάδα ανιχνευτή φάσης AD8302, η τρίτη είναι η μέτρηση με το σύστημα συνδεδεμένο στο breadboard και τις μετρήσεις που λαμβάνονται από τον μικροελεγκτή και η τέταρτη τελική έκδοση είναι το σύστημα με το προσαρμοσμένο PCB.



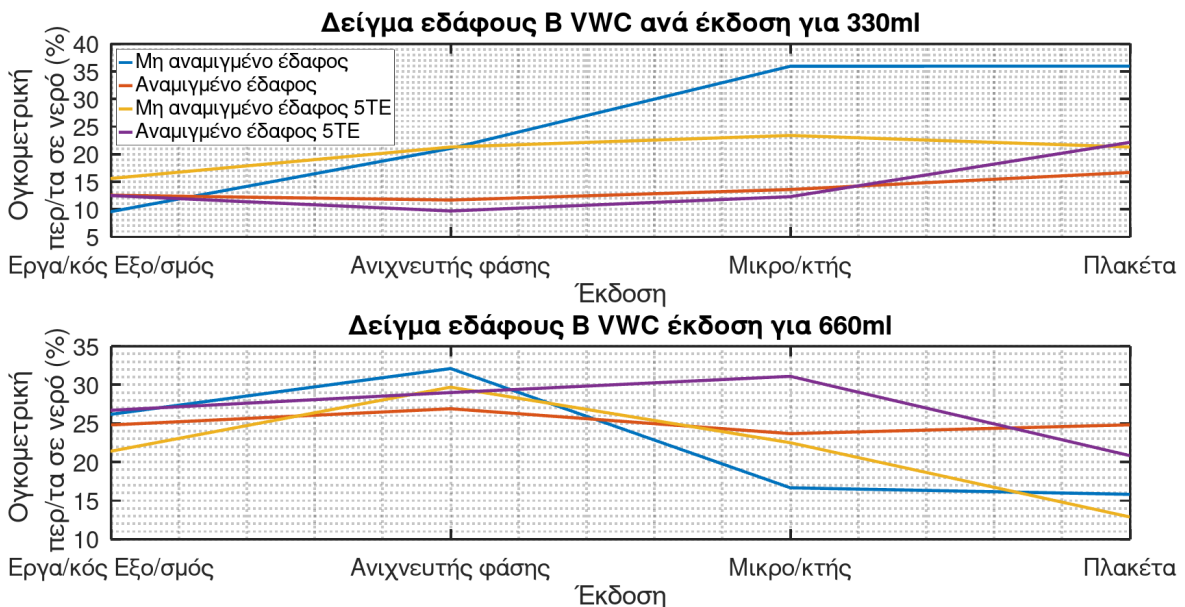
Εικόνα 62: Αποτελέσματα μετρήσεων ECa δείγματος εδάφους A



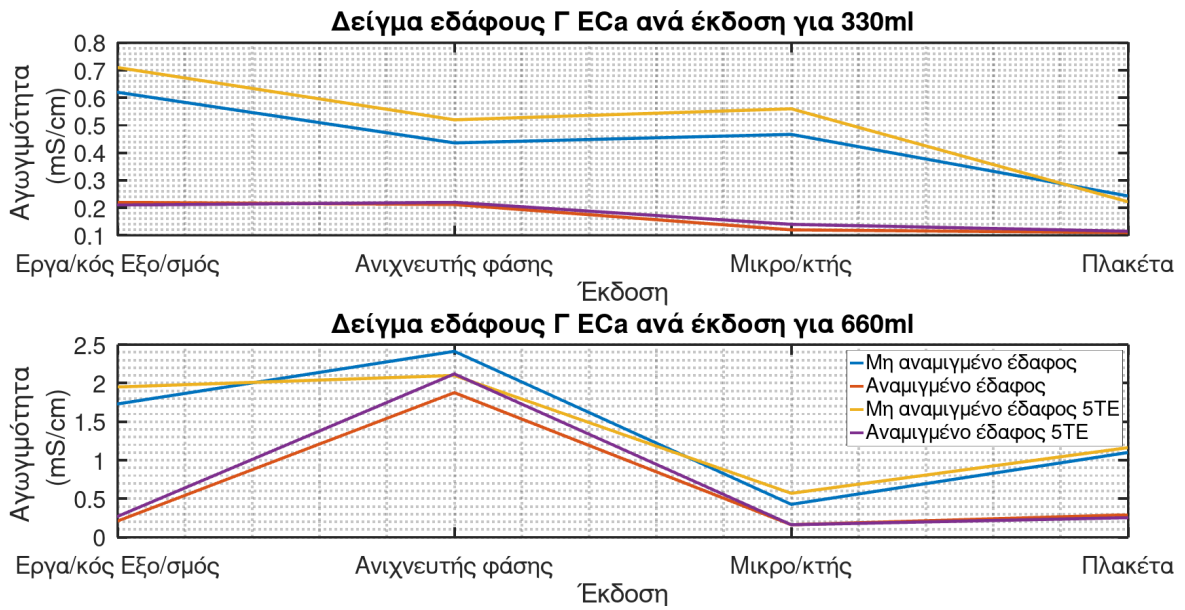
Εικόνα 63: Αποτελέσματα μετρήσεων VWC δείγματος εδάφους A



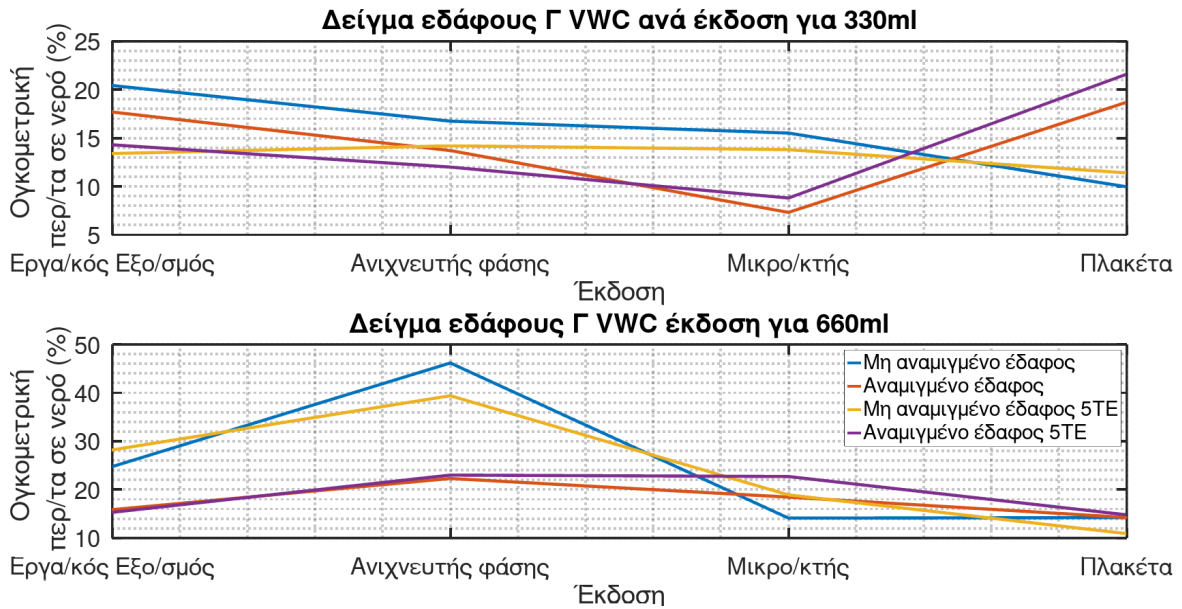
Εικόνα 64: Αποτελέσματα μετρήσεων ECa δείγματος εδάφους B



Εικόνα 65: Αποτελέσματα μετρήσεων VWC δείγματος εδάφους B



Εικόνα 66: Αποτελέσματα μετρήσεων ECa δείγματος εδάφους Γ



Εικόνα 67: Αποτελέσματα μετρήσεων VWC δείγματος εδάφους Γ

4.3 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 4

- [1] Rêgo Segundo, A.K.; Martins, J.H.; Monteiro, P.M.d.B.; De Oliveira, R.A.; Freitas, G.M. A Novel Low-Cost Instrumentation System for Measuring the Water Content and Apparent Electrical Conductivity of Soils. *Sensors* 2015, 15, 25546-25563. <https://doi.org/10.3390/s151025546>
- [2] Chavanne, Xavier & Frangi, Jean-Pierre & de Rosny, Gilles. (2010). A New Device for In Situ Measurement of an Impedance Profile at 1–20 MHz. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on.* 59. 1850 - 1859. [10.1109/TIM.2009.2028781](https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2028781).
- [3] Rhoades, J.D., F. Chanduvi, and S. Lesch., "Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements", *IrrigDrain Pap.* 57. FAO, Rome 1999.
- [4] TIDA-060029 LCR Meter Analog Front End Reference Design. (n.d.). Retrieved from <https://www.ti.com/lit/ug/tida06029/tida06029.pdf>
- [5] M. J. Da Silva, E. Schleicher and U. Hampel, "A Novel Needle Probe Based on High-Speed Complex Permittivity Measurements for Investigation of Dynamic Fluid Flows," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, no. 4, pp. 1249-1256, Aug. 2007, doi: [10.1109/TIM.2007.900419](https://doi.org/10.1109/TIM.2007.900419).
- [6] V. D. Koufogeorgos, A. T. Hatzopoulos, K. Tsiakmakis, V. Vassios, M. S. Papadopoulou and D. K. Papakostas, "Design and Development of a Low-Cost Circuit for Soil Electrical Conductivity Measurement Using the Wenner Array Method," 2025 14th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Dresden, Germany, 2025, pp. 1-5, doi: [10.1109/MOCASST65744.2025.11083912](https://doi.org/10.1109/MOCASST65744.2025.11083912).
- [7] Analog Devices, Inc. (2004). AD9850: a CMOS, 125 MHz complete DDS synthesizer. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9850.pdf>
- [8] Kristiansson, K. (2000, June). Calculable conductance cells for absolute determination of electrolytic conductivity. In *Proceedings of the 17th IMEKO World Congress* (pp. 1–6). IMEKO. <https://www.imeko.org/publications/wc-2000/IMEKO-WC-2000-TC4-P149.pdf>
- [9] Mosaic Industries. (n.d.). Cell constant of parallel wire electrodes: Solving Gauss's Law electric field equations for a paraxial two-electrode conductivity cell. <https://www.mosaic-industries.com/embedded-systems/instrumentation/conductivity-meter/two-electrode-cell-constant>
- [10] Analog Devices, Inc. (2018). AD8302 RF/IF gain and phase detector data sheet (Rev.B). <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8302.pdf>

4.4 Κατάλογος Συμβόλων και Εξισώσεων Κεφαλαίου 4

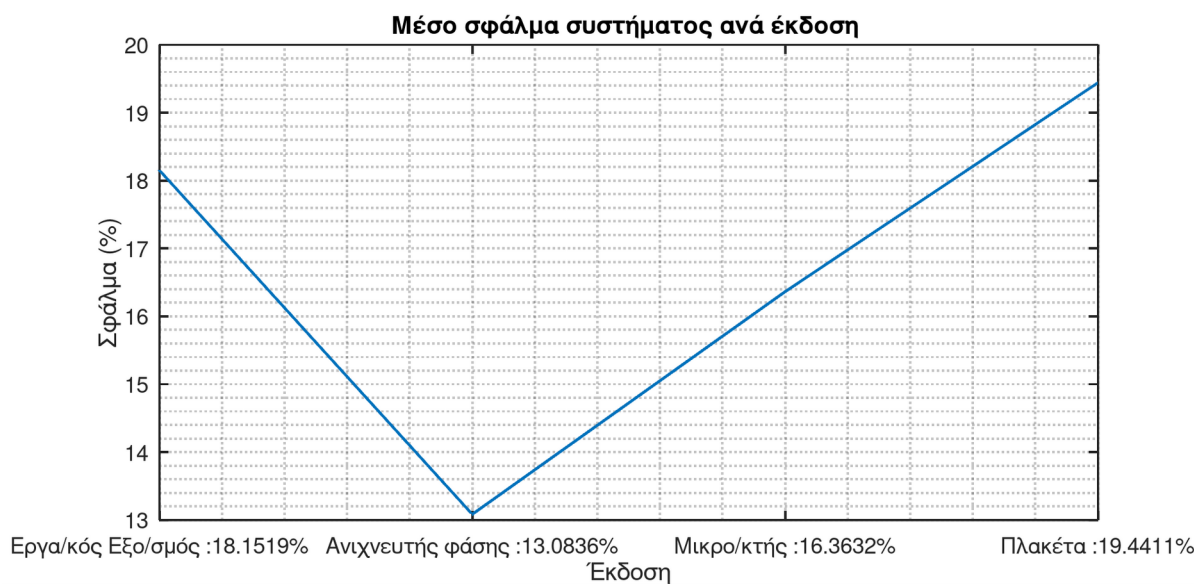
Σύμβολο	Όνομα	Μονάδα Μέτρησης	Εξίσωση
V_{OUT}	Τάση εξόδου αναστρέφοντα ενισχυτή	V (βολτ)	$V_{OUT} = \left(-\frac{RF}{ Z_{SOIL} } \right) \cdot V_{IN}$ (4.2)
Y	Σύνθετη μιγαδική αγωγιμότητα εδάφους S (Ζίμενς)	$Y_{SOIL} = Y_{SOIL} \cdot (\cos(\Delta\phi) + j\sin(\Delta\phi))$	(4.5)
G	Μιγαδική αγωγιμότητα εδάφους	S (Ζίμενς)	$G = Y_{SOIL} \cdot (\cos(\Delta\phi))$ (4.6)
B	Μιγαδική επιδεκτικότητα εδάφους	S (Ζίμενς)	$B = Y_{SOIL} \cdot (\sin(\Delta\phi))$ (4.7)
ECa	Φαινόμενη αγωγιμότητα εδάφους	S/m (Ζίμενς ανά μέτρο)	$ECa = G \cdot k_g$ (4.10)
ϵ_r	Σχετική διαπερατότητα εδάφους		$\epsilon_r = \frac{C}{\epsilon_0 \cdot k_g}$ (4.11)
$EC_{25^\circ C}$	Αγωγιμότητα εδάφους κανονικοποιημένη για 25C		$EC_{25^\circ C} = ECa \cdot \left(0.4470 + 1.4034 \cdot e^{\frac{-T}{26.815}} \right)$ (4.12)
$\epsilon_{r25^\circ C}$	Σχετική διαπερατότητα εδάφους κανονικοποιημένη για 25C		$\epsilon_{r25^\circ C} = \epsilon_r + 0.114 \cdot (25 - T)$ (4.13)
k_g	Όρος της γεωμετρίας ηλεκτροδίων m^{-1}		$k_g = \frac{1}{\pi \cdot L} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot a}{r} - 1 \right)$ (4.16)
$Gain$	Κέρδος σε Ντεσιμπέλ από μονάδα AD8302	dB (Ντεσιμπέλ)	$Gain = \frac{VMAG - 0.9}{30 \cdot 10^{-3}}$ (4.20)
V_{Gain}	Κέρδος από μονάδα AD8302		$V_{Gain} = 10^{\frac{Gain}{20}}$ (4.21)
$\Delta\phi$	Διάφορα φάσης από μονάδα AD8302	Μοίρες	$\Delta\phi = \frac{VPHYS - 0.9}{10 \cdot 10^{-3}} - 90$ (4.22)

Κεφάλαιο 5ο: Αποτελέσματα και Βελτιώσεις

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η ανάλυση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, ενώ παράλληλα προτείνονται πιθανές βελτιώσεις για το υπό ανάπτυξη σύστημα.

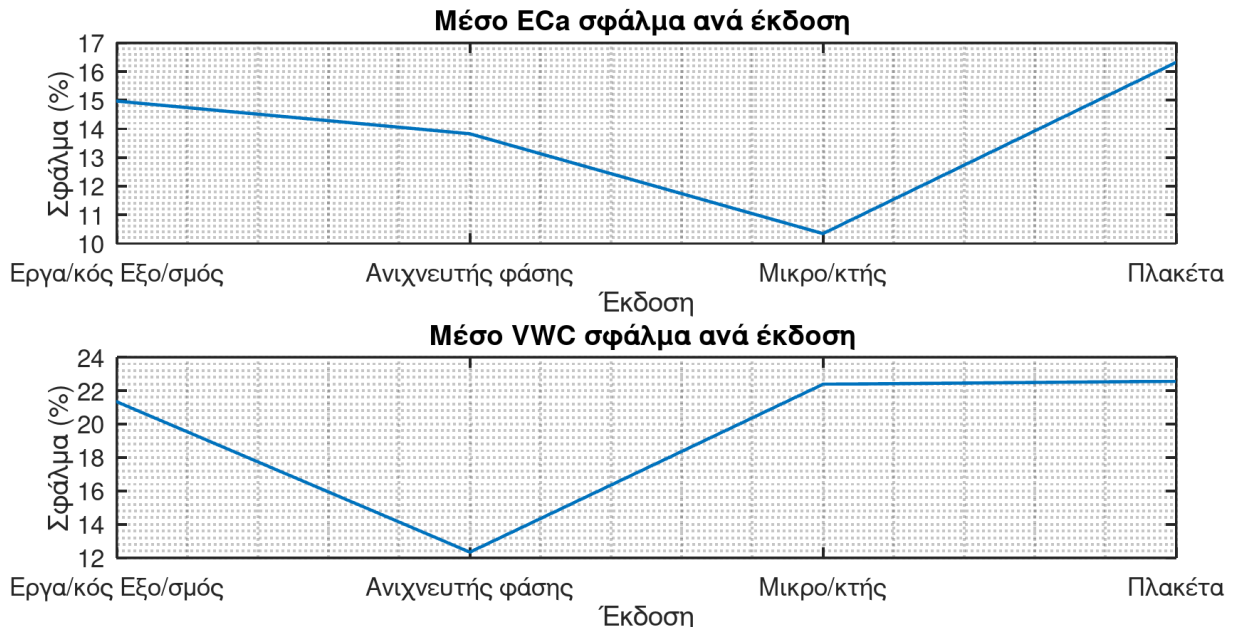
5.1 Αποτελέσματα

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται οι μέσοι όροι των σφαλμάτων ανά έκδοση, αρχικά από το γενικό σφάλμα του συστήματος εικόνα 1, στη συνέχεια τα σφάλματα ανά τύπο μέτρησης ECa και VWC και τέλος τα σφάλματα ανά ποσότητα νερού και κατάσταση του χώματος.

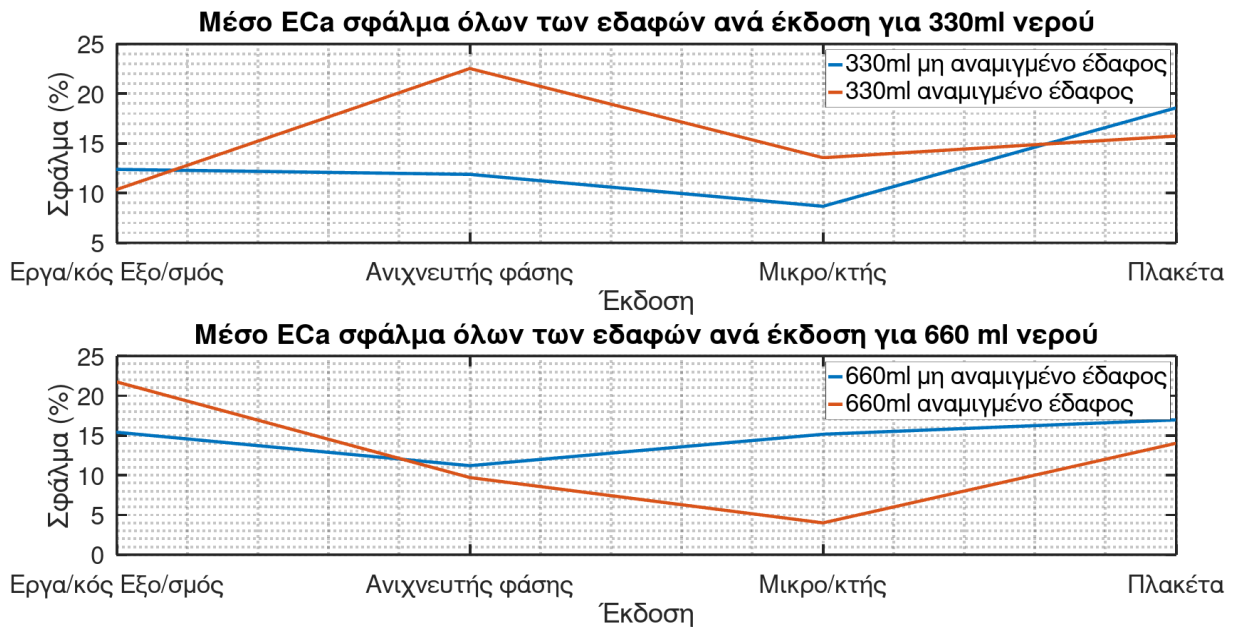


Εικόνα 66: Μέσο γενικό σφάλμα συστήματος ανά έκδοση

Στην εικόνα 66 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα του συνολικού συστήματος, το οποίο προέκυψε από τους μέσους όρους των σφαλμάτων της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ECa και της ογκομετρικής περιεκτικότητας σε νερό VWC, όπως φαίνεται στην εικόνα 2. Παρατηρείται ότι το ελάχιστο σφάλμα εμφανίζεται στη δεύτερη έκδοση του συστήματος, ενώ στην τελική έκδοση το σφάλμα αυξάνεται σε επίπεδα συγκρίσιμα με εκείνα της αρχικής έκδοσης. Οι λόγοι αυτής της αύξησης θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα. Στην εικόνα 64 απεικονίζονται χωριστά τα σφάλματα της ECa και της VWC ανά έκδοση. Παρατηρείται ότι, αντίστοιχα με το συνολικό σφάλμα της εικόνας 66, μια ενδιάμεση έκδοση εμφανίζει το ελάχιστο σφάλμα. Συγκεκριμένα, για την ECa η βέλτιστη επίδοση καταγράφεται στην έκδοση με χρήση μικροελεγκτή, ενώ για την VWC στην έκδοση με τον ανιχνευτή φάσης. Τα αποτελέσματα υπολογίστηκαν από τους μέσους όρους των σφαλμάτων που παρουσιάζονται στις εικόνες 68 και 69.

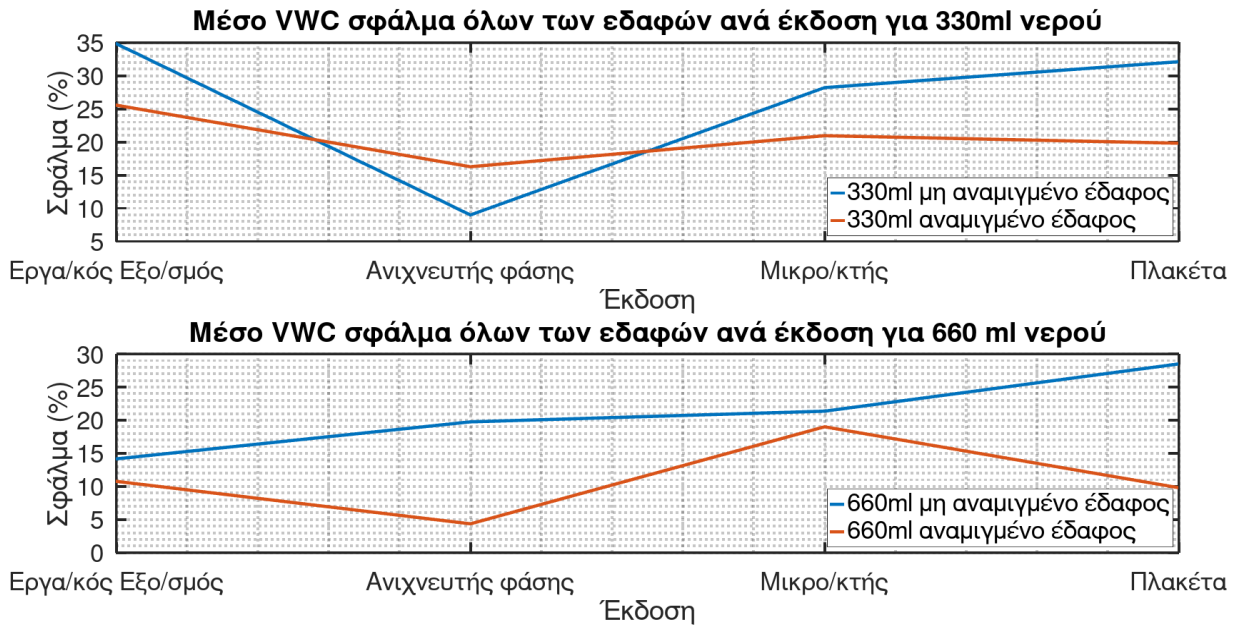


Εικόνα 67: Μέσο σφάλμα ECa και VWC ανά έκδοση



Εικόνα 68: Μέσο σφάλμα ECa όλων των εδαφών ανά έκδοση

Στις εικόνες 68 και 69 έχουμε τους μέσους όρους των σφαλμάτων όλων των δειγμάτων εδάφους. Στην εικόνα 68 έχουμε το σφάλμα ECa ανά ποσότητα νερού και ανά κατάσταση εδάφους αναμιγμένο και μη αναμιγμένο. Παρατηρούμε τις επιρροές που έχει η πρόσθεση του νερού και η ανάμιξη του εδάφους στο μέσο σφάλμα των μετρήσεων.



Εικόνα 69: Μέσο σφάλμα VWC όλων των εδαφών ανά έκδοση

Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι το σφάλμα μέτρησης δεν έπεσε κάτω από το 20% πέρα από κάποιες περιπτώσεις, αυτό οφείλεται σε διάφορους λόγους που παρατηρήσαμε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και της υλοποίησης του συστήματος. Κάποιοι από αυτούς τους λόγους είναι παρόμοιοι με αυτούς της μεθόδου Wenner.

Όπως αναφερθήκαμε σε προηγούμενα κεφάλαια για τη μέτρηση των ιδιοτήτων του εδάφους χρειάστηκε να κατασκευάσουμε ηλεκτρόδια, στην δικιά μας περίπτωση ήταν καρφιά τοποθετημένα σε μια μοριοσανίδα με το κυριότερο πρόβλημα να είναι η μη πρόκληση αρκετής επιφανειακής πίεσης στο έδαφος ώστε να υπάρχει καλύτερη διεπαφή μεταξύ εδάφους ηλεκτροδίου, όπως και στην μέθοδο Wenner. Σε περιπτώσεις όπου τα ηλεκτρόδια δεν τοποθετούνταν κατακόρυφα ή παρουσίαζαν μετατόπιση κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, η επαφή τους με το έδαφος δεν ήταν επαρκής, με αποτέλεσμα την εμφάνιση σφαλμάτων στις μετρήσεις. Το πρόβλημα αυτό ήταν εντονότερο κατά τη μέτρηση των δειγμάτων εδαφών Β και Γ, τα οποία είναι πηλώδη και αργιλώδη αντίστοιχα. Τα συγκεκριμένα εδάφη συγκρατούσαν καλύτερα τόσο το σχήμα τους όσο και το νερό που προστίθετο, με συνέπεια, όταν αφαιρούνταν τα ηλεκτρόδια ή ο αισθητήρας 5TE, το έδαφος να μην επανερχόταν στην αρχική του κατάσταση. Το ζήτημα αυτό αντιμετωπίστηκε με τη συμπίκνωση (πάκτωση) του εδάφους, ιδιαίτερα στα δείγματα μεικτού εδάφους, σε μία πλευρά του δοχείου, ώστε να αποφεύγονται κενά και να διασφαλίζεται σταθερή επαφή. Ένα επιπλέον πρόβλημα αφορούσε τη στεγανότητα της κατασκευής. Αν και στην αρχική φάση των πειραμάτων δεν παρατηρήθηκαν δυσκολίες, με την πάροδο του χρόνου διείσδυσε νερό στη μοριοσανίδα, γεγονός που προκάλεσε αλλοιώσεις και επηρέασε αρνητικά την αξιοπιστία των μετρήσεων

Κατά τη διάρκεια που γινόντουσαν τα πειράματα προσέξαμε επίσης την επιρροή του χρόνου ανάμιξης και τον τρόπο, δηλαδή ίδια δείγματα χώματος τα οποία είχαν αναμιχτεί γρήγορα ή και μη επιμελώς (μόνο επιφανειακά ή και μέρος αυτού) δεν ήταν ομοιογενή, με αποτέλεσμα να αλλάζουν οι μετρήσεις μεταξύ τους. Όπως και παραπάνω εξαρτιόταν από τον τύπο του δείγματος δηλαδή πηλώδη και αργιλώδη και δεν αναμιγνύονταν εύκολα. Αυτό διαπιστώθηκε όταν πήραμε μετρήσεις από δείγμα εδάφους που ήταν κυρίως πηλός <<κοκκινοχρώμα>>. Από ποσότητες νερού 300ml και άνω το χώμα δεν αναμιγνύονταν εύκολα καθώς και οι μετρήσεις είτε με τον μετρητή 5TE είτε με το σύστημα είχαν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους, ακόμα και στο ίδιο δείγμα. Αυτό συνέβαινε γιατί το χώμα είχε ήδη κορεστεί και δεν μπορούσε να αναμιχθεί καλά, καθώς και τα ηλεκτρόδια δεν δημιουργούσαν αρκετή πίεση για καλή επαφή. Κρίναμε ότι δεν θα συμπεριλάβουμε το δείγμα αυτό στη μελέτη που έγινε, λόγω της μη καλής ανάμιξης άρα και ανομοιογένειας.

Πινάκας 19: Αποτελέσματα δείγματος πηλώδους χώματος

Κατάσταση	Νερό (ml)	ECa Κυκλώματος (mS/cm)	VWC Κυκλώματος (%)	ECa Μετρητή (mS/cm)	VWC Μετρητή (%)	Σφάλμα ECa (%)	Σφάλμα VWC (%)
Χωρίς ανάμιξη	330	1,38	29,32	1,560	27,280	11,6	7,49
	660	0,43	14,07	0,510	14,150	15,29	0,57
Με ανάμιξη	330	1,69	30,89	4,218	41,900	60,05	26,29
	660	3,33	28,67	3,625	51,125	8,19	43,91

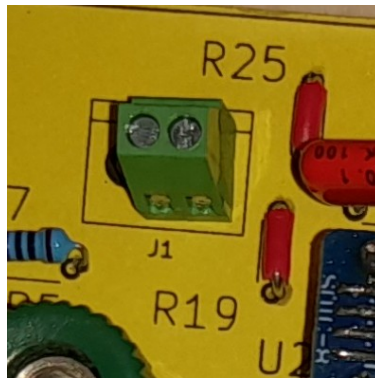
Κάποια άλλα προβλήματα που συνέβαλαν με το τελικό σφάλμα έχουν να κάνουν με την κατασκευή συστήματος και τον προγραμματισμό του. Όπως αναφέραμε το ελάχιστο μέσο σφάλμα ήταν στην έκδοση με τον ανιχνευτή φάσης και κέρδους AD8302, αυτό οφείλεται στη χρήση των εργαστηριακών οργάνων σε συνδυασμό με τη μονάδα. Στις δύο πρώτες εκδόσεις του συστήματος, ως πηγή πόλωσης του εδάφους χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακή γεννήτρια συναρτήσεων, η οποία παρείχε πιο καθαρό και σταθερό σήμα σε σύγκριση με την DDS. Κατά τις μετρήσεις με τον παλμογράφο, οι κυματομορφές παρουσίαζαν διακυμάνσεις, γεγονός που επηρέαζε την αξιοπιστία ορισμένων μετρήσεων. Αντιθέτως, η μονάδα AD8302 παρείχε πιο σταθερά αποτελέσματα, δεδομένου ότι πρόκειται για αναλογικό κύκλωμα, το οποίο δεν απαιτεί μετατροπή σήματος σε ψηφιακή μορφή, σε αντίθεση με τον ψηφιακό παλμογράφο. Επιπλέον, κατά τους υπολογισμούς που εκτελεί ο μικροελεγκτής, η τιμή της συχνότητας λαμβάνεται από αποθηκευμένες μεταβλητές. Ωστόσο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η DDS δεν αποδίδει στην έξοδό της την απολύτως ακριβή τιμή της ορισμένης συχνότητας, με αποτέλεσμα να εισάγονται μικρά σφάλματα στον υπολογισμό της γωνιακής ταχύτητας. Άλλο ένα πρόβλημα που προσέξαμε μετά την κατασκευή της πλακέτας είναι η σύνδεση μεταξύ των ηλεκτροδίων με τη πλακέτα, η οποία έγινε με απλό καλώδιο και όχι ομοαξονικό για την ελαχιστοποίηση του θορύβου, καθώς και ο συνδετήρας δεν είναι τύπου που χρησιμοποιείται για

υψηλές συχνότητες. Επίσης, είναι και πολύ κοντά μεταξύ τους όπως φαίνεται στην εικόνα 70, που μπορεί να δημιουργεί πρόβλημα στις υψηλές συχνότητες. Καθώς επίσης και η ίδια η πλακέτα δημιουργεί θόρυβο στις μετρήσεις διότι οι μονάδες είναι τοποθετημένες μέσω συνδετήρων και όχι κολλημένες, άρα δημιουργούν παρασιτικές χωρητικότητες.

Το σύστημα δεν υποβλήθηκε σε διαδικασία βαθμονόμησης, καθώς απαιτούνταν μεγαλύτερος αριθμός δειγμάτων εδάφους, προκειμένου να συλλεχθούν επαρκείς μετρήσεις και να εξαχθούν εξισώσεις βαθμονόμησης για κάθε τύπο εδάφους. Στις τελευταίες μετρήσεις της ογκομετρικής περιεκτικότητας σε νερό VWC εφαρμόστηκε εμπειρικά ένας διορθωτικός όρος, δεδομένου ότι διαπιστώθηκε πως η ελάχιστη μετρήσιμη τιμή της VWC είναι περίπου 20%, ανάλογα με το δείγμα.

Συνοψίζοντας, οι κύριοι λόγοι που οδήγησαν στο τελικό σφάλμα ήταν οι εξής:

- Η γεωμετρία και η κατασκευή των ηλεκτροδίων,
- Η έλλειψη επαρκών δειγμάτων εδάφους και η απουσία βαθμονόμησης,
- Η κατασκευή της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος (PCB).



Εικόνα 70: Τερματικός σύνδεσμος καλωδίου ηλεκτροδίων

5.2 Συμπεράσματα

Στο πρώτο κεφάλαιο θέσαμε τους σκοπούς της διπλωματικής να είναι η σχεδίαση και υλοποίηση αισθητήρα προσδιορισμού της ποιότητας εδάφους που να είναι εύκολος στην χρήση του ώστε να μπορεί να χρησιμοποιείται στο πεδίο-χωράφι, απλός στην κατασκευή, να επιδιορθώνεται, να συντηρείται εύκολα και να είναι φορητός. Εμείς καταφέραμε να πετύχουμε 4 από τους 5 στόχους που θέσαμε να είναι εύκολος στην χρήση, απλός στην κατασκευή, να επιδιορθώνεται και να συντηρείται δεν καταφέραμε να είναι φορητός. Το τελικό σύστημα πέτυχε μέσο σφάλμα της τάξης του 20%, γεγονός που αποδεικνύει ότι μπορεί να προσφέρει μια ικανοποιητική πρώτη εκτίμηση της κατάστασης του εδάφους, ιδίως σε εφαρμογές όπου η χαμηλή πολυπλοκότητα και το χαμηλό κόστος είναι καθοριστικοί παράγοντες. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, παρά τους περιορισμούς της ακρίβειας, η λύση που προτάθηκε μπορεί να λειτουργήσει ως ένα εργαλείο υποστήριξης σε αγροτικές εφαρμογές, συμβάλλοντας στη λήψη αποφάσεων για την άρδευση και τη διαχείριση καλλιεργειών. Παράλληλα,

αναγνωρίζεται ότι το ποσοστό σφάλματος περιορίζει τη χρήση του συστήματος σε περιπτώσεις που απαιτείται υψηλή ακρίβεια

5.3 Βελτιώσεις

Οι βελτιώσεις που πρέπει να γίνουν για μελλοντική μελέτη του συστήματος είναι :

- Η γεωμετρία και η κατασκευή των ηλεκτροδίων. Η κατασκευή των ηλεκτροδίων θα πρέπει να είναι αδιάβροχη , να αντέχει να θάπτεται στο χώμα ή και η διάμετρος των ηλεκτροδίων να είναι μεγαλύτερη ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη επιφανειακή πίεση άρα και καλύτερη διεπαφή με το έδαφος, καθώς επίσης χρειάζεται παραπάνω μελέτη η επιρροή της γεωμετρίας και το σχήμα των ηλεκτροδίων στις μετρήσεις.
- Θα πρέπει να βαθμονομηθεί με τη χρήση περισσότερων δειγμάτων εδάφους και να προγραμματιστούν περισσότερες εξισώσεις οι οποίες θα μετατρέπουν τις μετρήσεις σε ποιοτικά χαρακτηριστικά για κάθε τύπο εδάφους.
- Η κατασκευή της πλακέτας του συστήματος χρήζει βελτίωσης με το να γίνει διπλής όψης και οι διάφορες μονάδες να κολληθούν επάνω της δηλαδή να επανασχεδιαστεί από την αρχή. Καθώς και να γίνει φορητή ώστε να μπορούμε να παίρνουμε μετρήσεις από το πεδίο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικας Διάταξης Wenner

```
#Δήλωση βιβλιοθηκών
import machine
import utime
import math

#Δήλωση μεταβλητών μέτρησης από ADC
value_VSOIL = machine.ADC(26)# μέτρηση εδάφους
value_VRVI = machine.ADC(27)# μέτρηση αντίσταση προστασίας
Temp_sensor = machine.ADC(4)# μέτρηση αισθητήρα θερμοκρασίας

while True:
    print("")
    print("-----")
    #Μετατροπή μετρήσεων ADC από ψηφιακό αριθμό σε τάση
    reading_VSOIL = (3.3*(value_VSOIL.read_u16()/65536))# τάση εδάφους
    reading_VRVI = (3.3*(value_VRVI.read_u16()/65536))# τάση αντίσταση
    προστασίας
    reading_TEMP_s = 27 - (((3.3*(Temp_sensor.read_u16()/65536))) -
    0.706)/0.001721# θερμοκρασία

    utime.sleep(5)
    IRVI=((reading_VRVI)/300)#Υπολογισμός ρεύματος αντίστασης
    προστασίας
    RSOIL=((reading_VSOIL)/IRVI)#Υπολογίσιμος αντίστασης εδάφους
    conductivity=1/(RSOIL+0.00001)#Μετατροπή αντίστασης σε αγωγιμότητα

    #Μετατροπή αγωγιμότητας σε φαινόμενη αγωγιμότητα εδάφους
    ECa = (1 + (2 / math.sqrt(1 + 4 * (0.04 / 0.03) ** 2)) - (1 / math.sqrt(1 +
    (0.04 / 0.03) ** 2))) / (4 * math.pi * 0.03 * RSOIL)
    #Κανονικοποίηση φαινόμενης αγωγιμότητα εδάφους για 25C
    EC25=ECa*(0.4470+1.4034*math.exp(-reading_TEMP_s/26.815))

    #Εκτύπωση μεταβλητών
    print("VRVI: ",reading_VRVI*1000," mV ", "VSOIL: ",reading_VSOIL*1000,"
    mV ", "Temperature: ",reading_TEMP_s," C ")
    print("#####")
    print("CON: ",conductivity*10," dS", "RSOIL: ",RSOIL," Ohm")
    print("#####")
    print("ECb: ",ECa*10," dS/m ", "EC25: ",EC25*10," dS/m")
    print("#####")
    error=(abs(0.82-EC25*10)/0.82)*100
    print("ERROR: ",error)
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Κώδικας Διάταξης Ενισχυτή Εμπέδισης

```
#include <Wire.h>           // Επικοινωνία I2C
#include <MCP342x.h>        // Βιβλιοθήκη ADC MCP342x
#include <AD9850.h>        // Βιβλιοθήκη για τον DDS AD9850
#include "OneWireESP32.h"   // Για αισθητήρες θερμοκρασίας OneWire (ESP32)
#include <SPI.h>           // Επικοινωνία SPI
#include <Adafruit_GFX.h>   // Γραφικά για οθόνες
#include <Adafruit_SH110X.h> // Driver για OLED SH1106
#ifdef ESP8266
  #include <ESP8266WiFi.h>
#else //ESP32
  #include <WiFi.h>        // WiFi για ESP32
#endif
#include <ModbusIP_ESP8266.h> // Modbus TCP/IP

// Pins για DDS AD9850
const int W_CLK_PIN = 14;
const int FQ_UD_PIN = 8;
const int DATA_PIN = 16;
const int RESET_PIN = 17;

// Συχνότητες που θα παραχθούν από το DDS
double freq[6] = {100e+3,150e+3,200e+3,9000e+3,9500e+3,10000e+3};
double result_con[6]; // αποτελέσματα αγωγιμότητας
double result_cap[6]; // αποτελέσματα διηλεκτρικής σταθεράς
double trimFreq = 124999500; // συχνότητα αναφοράς για βαθμονόμηση DDS

int phase = 0; // Αρχική φάση σήματος
float Temperature[6]; // Θερμοκρασίες από αισθητήρα

// OneWire ρύθμιση
const uint8_t MaxDevs = 1;
uint64_t addr[MaxDevs];
OneWire32 ds(23);
long ts;

// Modbus ρύθμιση
ModbusIP mb;

// ADC MCP342x
uint8_t address = 0x68;
MCP342x adc = MCP342x(address);
```

```

// OLED ρύθμιση
#define i2c_Address 0x3c
#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64
#define OLED_RESET -1
Adafruit_SH1106G display = Adafruit_SH1106G(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT,
&Wire, OLED_RESET);

// Δομές για αποθήκευση μετρήσεων
struct adc_values_volt{
    double cha_adc_1;
    double cha_adc_2;
};

struct adc_values_conv{
    double gain;
    double phase_dif;
};

struct complex_conv{
    double real;
    double imag;
};

// Ρυθμίσεις IP ESP32
IPAddress local_IP(192, 168, 1, 166);
IPAddress gateway(192, 168, 1, 1);
IPAddress subnet(255, 255, 0, 0);

```cpp

// ----- SETUP -----
void setup(void) {
 Serial.begin(9600);
 Wire.begin();

 // DDS αρχικοποίηση
 DDS.begin(W_CLK_PIN, FQ_UD_PIN, DATA_PIN, RESET_PIN);
 DDS.calibrate(trimFreq);
 DDS.down();

 // Έλεγχος OneWire συσκευών
 uint8_t devices = ds.search(addr, MaxDevs);

```

```

// Reset ADC
MCP342x::generalCallReset();
delay(1);

// Έλεγχος αν υπάρχει MCP342x
Wire.requestFrom(address, (uint8_t)1);
if (!Wire.available()) {
 Serial.print("No device found at address ");
 Serial.println(address, HEX);
 while (1);
}

// Σύνδεση WiFi
WiFi.begin("ELE_A2", "ele_1234");
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
 delay(500);
 Serial.print(".");
}

if (!WiFi.config(local_IP, gateway, subnet)) {
 Serial.println("STA Failed to configure");
}

Serial.println("");
Serial.println("WiFi connected");
Serial.println("IP address: ");
Serial.println(WiFi.localIP());

// Modbus server configuration
mb.server();
mb.addIreg(99,0,6); // Input registers
mb.addCoil(99,0,8); // Coils
mb.addHreg(99,0, 2); // Holding registers
pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);

// OLED display αρχικοποίηση
delay(250);
display.begin(i2c_Address, true);
display.display();
display.clearDisplay();
display.setTextSize(1.5);
display.setTextColor(SH110X_WHITE);
}

```

```

// ----- LOOP -----
void loop(void) {
 struct adc_values_volt values1;
 struct adc_values_conv values2;
 struct complex_conv values3;

 DDS.up(); // ενεργοποίηση DDS
 display.display();

 for (int i = 0; i <= 5; i++) {
 Serial.println(i);

 mb.task(); // ενημέρωση Modbus
 delay(500);

 // Θέσε συχνότητα DDS
 DDS.setfreq(freq[i], phase);

 // Διάβασε θερμοκρασία
 Temperature[i]=tempTask();

 // Διάβασε ADC
 values1=adc_read();

 // Επεξεργασία ADC (gain, phase)
 values2=vals_conv(values1.cha_adc_2,values1.cha_adc_1);

 // Υπολογισμοί αγωγιμότητας και διηλεκτρικής σταθεράς
 values3=complex_vals(values2.gain,values2.phase_dif,freq[i],Temperature[i]);

 // Αποθήκευση αποτελεσμάτων
 result_con[i]=values3.real;
 result_cap[i]=values3.imag;

 // Στείλε τα αποτελέσματα μέσω Modbus
 mb.Ireg(100, uint16_t(values3.real*1000*1000));
 mb.Ireg(102, uint16_t(values3.imag*1000));
 mb.Ireg(104, uint16_t(values3.phase_dif*1000));
 }

 DDS.down(); // απενεργοποίηση DDS

```

```

// Εμφάνιση τιμών στην OLED
display.clearDisplay();
display.setCursor(0, 0);
display.println("Conductivity :");
display.setCursor(0, 10);
display.println((mean_con*1000));
display.setCursor(30, 10);
display.println("mS/cm");

display.setCursor(0, 20);
display.println("Permittivity :");
display.setCursor(0, 30);
display.println(mean_cap);
display.setCursor(35, 30);
display.println("%");

display.setCursor(0, 40);
display.println("Temperature :");
display.setCursor(0, 50);
display.println(mean_temp);
display.setCursor(35, 50);
display.println("C");

// Εμφάνιση στο Serial Monitor
Serial.println("mean conductivity(mS/cm) : ");
Serial.println(mean_con*1000,12);
Serial.println("mean Theata(%) : ");
Serial.println(mean_cap,4);
Serial.println("mean Temp(C) : ");
Serial.println(mean_temp,4);
Serial.println("-----");
Serial.println(" ");

// Αποστολή τιμών στο Modbus
mb.Ireg(99, uint16_t(mean_con*1000*1000));
mb.Ireg(101, uint16_t(mean_cap*1000));
mb.Ireg(103, uint16_t((15+mean_temp)*1000));

// LED ένδειξη από Coil Modbus
digitalWrite(LED_BUILTIN, mb.Coil(99));
}

```

```

// ----- Συναρτήσεις -----

// Διαβάζει από ADC MCP342x
struct adc_values_volt adc_read(void) {
 struct adc_values_volt vals;
 long value1 = 0;
 long value2 = 0;
 MCP342x::Config status;

 uint8_t err1 = adc.convertAndRead(MCP342x::channel1, MCP342x::oneShot,
 MCP342x::resolution16, MCP342x::gain1,
 1000000, value1, status);

 if (!err1) {
 vals.cha_adc_1=(value1*2.048)/32767;
 }
 delay(2000);

 uint8_t err2 = adc.convertAndRead(MCP342x::channel2, MCP342x::oneShot,
 MCP342x::resolution16, MCP342x::gain1,
 1000000, value2, status);

 if (!err2) {
 vals.cha_adc_2=(value2*2.048)/32767;
 }
 delay(2000);

 return vals;
}

// Ανάγνωση θερμοκρασίας από OneWire αισθητήρα
float tempTask(void){
 float currTemp=0;
 ds.request();
 delay(500);
 uint8_t err = ds.getTemp(addr[0], currTemp);
 if(err){
 const char *errt[] = {"", "CRC", "BAD", "DC", "DRV"};
 Serial.print(": "); Serial.println(errt[err]);
 }
 return currTemp;
}

```

```

// Υπολογισμός gain και phase από τις μετρήσεις ADC
struct adc_values_conv vals_conv(double v_phys,double v_mag){
 struct adc_values_conv ch_vals;
 ch_vals.gain=pow(10.0,(((v_mag-0.9)/0.03)/20));
 ch_vals.phase_dif=((v_phys-0.9)/(-0.01))+90;
 return ch_vals;
}

// Υπολογισμός αγωγιμότητας & διηλεκτρικής σταθεράς
struct complex_conv complex_vals(double v_gain,double phase,double
frequency,float temperature){
 struct complex_conv com_vals;
 float Yx_abs = 1/(470.0*v_gain); // αγωγιμότητα κυκλώματος
 float phase_rad=((phase)*M_PI)/180;

 float Yx_real=Yx_abs*cos(phase_rad);
 float Yx_imag=(Yx_abs*sin(phase_rad))/(2*M_PI*frequency);

 float geo_soil_con=Yx_real*0.1697; // σταθερά γεωμετρίας
 float EC25=geo_soil_con*(0.4470+(1.4034*exp((-temperature)/26.815)));

 float geo_perm=(Yx_imag)/(8.85e-12*0.1697);
 float PERM25=geo_perm+0.114*(25-temperature);

 float E_A=sqrt(pow(PERM25,2)+pow((EC25/(8.85e-12*2*M_PI*frequency)),2));
 float Theta_x=(((4.3e-6)*(pow(E_A,3)))-((5.5e-4)*(pow(E_A,2)))+((2.92e-2)*(E_A))-
0.053)*100;

 com_vals.real=abs(EC25);
 com_vals.imag=abs(Theta_x);

 return com_vals;
}

```