



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

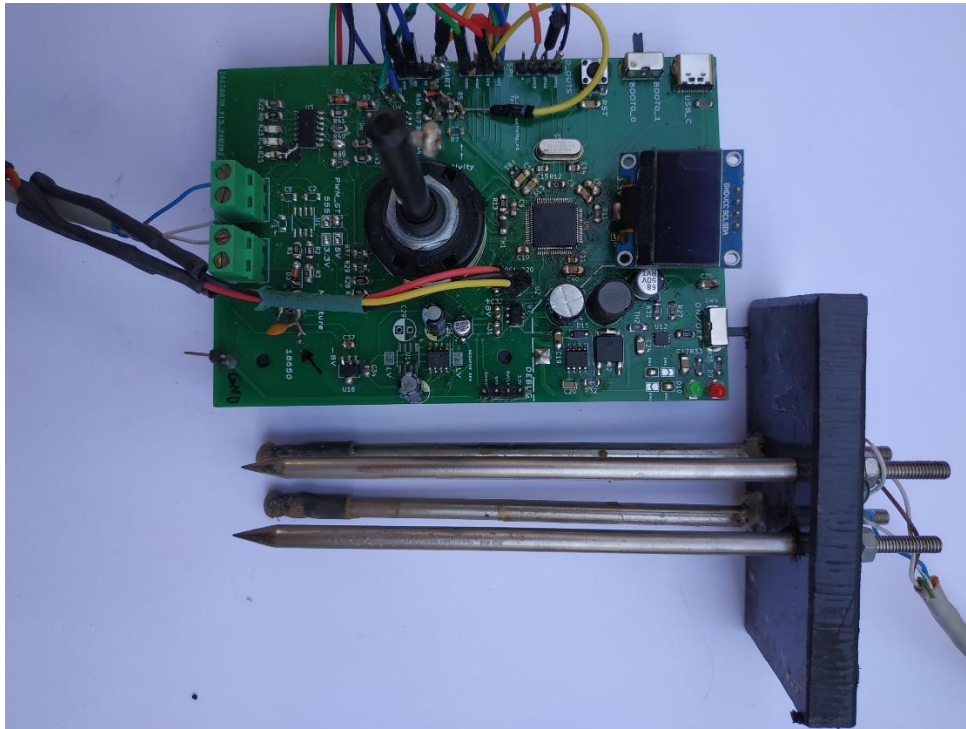
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη και υλοποίηση αισθητήρα μέτρησης
χαρακτηριστικών εδάφους»



Τελετός Εμμανουήλ

Επιβλέπων
Δρ. Τσιακμάκης Κυριάκος

ΙΟΥΛΙΟΣ 2024

Τίτλος Δ.Ε. Μελέτη και υλοποίηση αισθητήρα μέτρησης χαρακτηριστικών εδάφους

Κωδικός Δ.Ε. 23303

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Εμμανουήλ Τελετός

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Δρ. Κυριάκος Τσιακμάκης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 31/10/2023

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 30/6/2024

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής 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 Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Εφαρμοσμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα» στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Τελετού Εμμανουήλ 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 απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Η γεωργία είναι ο θεμέλιος λίθος της ανθρώπινης ύπαρξης, εξασφαλίζοντας την παραγωγή τροφίμων για την ευημερία των κοινωνιών μας. Για να βελτιώσουμε τις τεχνικές καλλιέργειας και να αυξήσουμε την παραγωγικότητα, είναι απαραίτητο να διαχειριζόμαστε σωστά τις γεωργικές εκτάσεις και να κατανοούμε τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Αυτή η διπλωματική εργασία εστιάζει στην ανάπτυξη μιας συσκευής που μετρά την αντίσταση, ηλεκτρική αγωγιμότητα, την υγρασία και τη θερμοκρασία του εδάφους. Επιλέχθηκε αυτό το θέμα λόγω της ανάγκης για αναβάθμιση των γεωργικών τεχνικών με σύγχρονες μεθόδους μέτρησης του εδάφους. Οι αισθητήρες αυτοί είναι ικανοί να προσφέρουν ακριβή δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας στους αγρότες να λαμβάνουν εξαιρετικά ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με την άρδευση, τη λίπανση και τη γενική διαχείριση των καλλιεργειών τους. Το καινοτόμο στοιχείο αυτής της εργασίας είναι η ενσωμάτωση των αισθητήρων σε ένα σύστημα που επιτρέπει την άμεση παρακολούθηση και ανάλυση των δεδομένων απευθείας στο χωράφι. Αυτή η συσκευή δίνει στους αγρότες ένα εργαλείο που βελτιώνει την πρόβλεψη της υγείας του εδάφους, μειώνοντας τη σπατάλη πόρων όπως το νερό και τα λιπάσματα. Η ανάπτυξη και χρήση αυτών των συσκευών βοηθά τους αγρότες να διαχειρίζονται τις εκτάσεις τους με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα που βελτιώνουν τις γεωργικές πρακτικές και αυξάνουν την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Με αυτή την τεχνολογία, οι αγρότες έχουν στα χέρια τους ένα ισχυρό εργαλείο για την καλύτερη διαχείριση των πόρων τους, εξασφαλίζοντας πιο αποδοτική και βιώσιμη παραγωγή τροφίμων για το μέλλον.

Περίληψη

Αυτή η διπλωματική εργασία ασχολείται με την ανάπτυξη και εφαρμογή μιας συσκευής που μετρά βασικά χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως η αντίσταση, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η υγρασία και η θερμοκρασία. Σκοπός μας είναι να δημιουργήσουμε ένα αξιόπιστο και εύχρηστο εργαλείο που θα βοηθήσει τους αγρότες να κατανοούν γρήγορα την κατάσταση του εδάφους τους, βασιζόμενοι στις τιμές αυτών των παραμέτρων. Αρχικά, εξετάζουμε το θεωρητικό υπόβαθρο των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του εδάφους. Αναλύουμε τους παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα και πώς αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν τη γονιμότητα και την υγεία του εδάφους. Επισημαίνουμε τη σημασία της ακριβούς μέτρησης αυτών των παραμέτρων για τη βελτίωση των γεωργικών πρακτικών. Στη συνέχεια, περιγράφουμε τη σχεδίαση και κατασκευή της συσκευής και του αισθητήρα. Η συσκευή χρησιμοποιεί τεχνολογία διπολικών παλμών εναλλασσόμενου ρεύματος για τη μέτρηση της αντίστασης και κατ' επέκταση της αγωγιμότητας, έναν χωρητικό αισθητήρα για τη μέτρηση της υγρασίας και έναν αισθητήρα θερμοκρασίας ψηφιακό για το έδαφος. Αυτή η συσκευή επιτρέπει στους αγρότες να μετρούν αυτές τις παραμέτρους απευθείας στο χωράφι, χωρίς να χρειάζονται εργαστηριακές αναλύσεις. Έτσι, μπορούν να αποκτούν γρήγορα και αξιόπιστα δεδομένα για την κατάσταση του εδάφους τους. Τα αποτελέσματα των δοκιμών μας δείχνουν ότι η προτεινόμενη συσκευή προσφέρει ακριβείς και σταθερές μετρήσεις. Η αξιοπιστία της συσκευής ελέγχθηκε σε διάφορες συνθήκες και περιβάλλοντα, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητά της σε πραγματικές γεωργικές εφαρμογές. Με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας, οι αγρότες μπορούν να προσαρμόζουν τις γεωργικές τους πρακτικές βάσει των δεδομένων που συλλέγουν, μειώνοντας την άσκοπη χρήση πόρων όπως το νερό και τα λιπάσματα. Συνοψίζοντας, η εργασία μας υπογραμμίζει τα οφέλη της χρήσης προηγμένων τεχνολογιών στη γεωργία. Η ανάπτυξη αυτής της συσκευής βοηθάει στη βελτίωση της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας των καλλιεργειών καθώς δίνει στους αγρότες τα στοιχεία για να λάβουν αποτελεσματικές αποφάσεις για τη διαχείριση των καλλιεργειών τους.

«Study and Implementation of a Sensor for Soil Characteristic Measurement»

«Emmanouil Teletos»

Abstract

This thesis focuses on the development and implementation of a device for measuring key soil characteristics, such as resistance, electrical conductivity, moisture, and temperature. The aim is to create a reliable and portable tool that will assist farmers in quickly assessing soil health based on these parameters. Initially, the thesis presents the theoretical background regarding the physical and chemical properties of the soil. It examines the factors that affect electrical conductivity, moisture, and soil temperature, as well as the impact of these parameters on soil fertility and health. The importance of accurately measuring these parameters for optimizing cultivation technics is analyzed. Subsequently, the design and construction of the device and the sensor are described. The device uses bipolar alternating current pulses technology for measuring conductivity, a capacitive sensor for measuring moisture, and a temperature sensor for soil. This device allows for the direct measurement of these parameters in the field, eliminating the need for laboratory analyses. This provides farmers with the capability to obtain quick and reliable data about their soil condition. The test results confirm that the proposed device offers accurate and stable measurements. The device's reliability was tested under various conditions and environments, demonstrating its usefulness in real agricultural applications. By using this technology, farmers can adjust their agricultural practices based on the collected data, reducing the unnecessary use of resources such as water and fertilizers, and promoting sustainable development. Overall, the thesis highlights the benefits of using advanced technologies in agriculture. The development of this device contributes to improving the efficiency and sustainability of crops, supporting farmers in making informed and effective decisions for managing their crops.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iii
Περίληψη	iv
Abstract	v
Περιεχόμενα	vi
Κεφάλαιο 1^ο : Εισαγωγή	9
1.1 Εισαγωγή.....	9
1.2 Σκοπός και Στόχοι.....	9
1.3 Προκλήσεις	9
Κεφάλαιο 2^ο : Θεωρητικό Υπόβαθρο	11
2.1 Εισαγωγή στο Έδαφος και τις Ιδιότητές του.....	11
2.2 Κατηγορίες Εδαφών.....	11
2.2.1 Άμμος (Sandy Soils).....	11
2.2.2 Ιλύς (Silt Soils).....	11
2.2.3 Αργιλώδη Εδάφη (Clay Soils).....	12
2.2.4 Πηλώδη Εδάφη (Loamy Soils).....	12
2.3 Φυσικές Ιδιότητες του Εδάφους	13
2.3.1 Υφή του Εδάφους.....	13
2.3.2 Δομή του Εδάφους	13
2.3.3 Πορώδες και Υδατοδιαπερατότητα.....	14
2.3.4 Θερμοκρασία του Εδάφους.....	14
2.4 Χημικές Ιδιότητες του Εδάφους	15
2.4.1 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC)	16
2.4.2 pH του Εδάφους	18
2.4.3 Οργανική Ύλη.....	19
2.4.4 Ικανότητα Ανταλλαγής Κατιόντων	19
2.4.5 Θρεπτικά Συστατικά και Ιχνοστοιχεία	20
Κεφάλαιο 3^ο : Μεθοδολογία.....	23
3.1 Εισαγωγή.....	23
3.2 Σχεδιασμός Αισθητήρα	25
3.2.1 Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία και Θόρυβος.....	25
3.3 Μέθοδοι μέτρησης Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας (EC)	26
3.2.2 Μέτρηση με Κορεσμένα Εκχυλίσματα	26

3.2.3	Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή	27
3.2.4	Μέτρηση στο Πεδίο με Ηλεκτρικά Αγωγιμόμετρα Εδάφους.....	28
3.2.5	Μέθοδος Συνεχούς Ρεύματος (DC).....	28
3.2.6	Μέθοδος Εναλλασσόμενου Ρεύματος με Ημιτονοειδές Σήμα (AC Sine Wave).....	28
3.2.7	Μέθοδος Διπολικών Παλμών AC	28
3.4	Σχεδίαση κυκλώματος μέτρησης αγωγιμότητας εδάφους.....	29
3.5	Μέθοδοι Μέτρησης της Υγρασίας	35
3.5.1	Μέθοδος Βαρυμετρικής Ανάλυσης.....	35
3.5.2	Μέθοδος Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής (TDR)	35
3.5.3	Αισθητήρες Αντίστασης.....	35
3.5.4	Χωρητικοί Αισθητήρες Υγρασίας.....	35
3.6	Μέθοδοι Μέτρησης Θερμοκρασίας του Εδάφους	36
3.6.1	Αντιστάσεις Θερμοκρασίας (RTDs)	36
3.6.2	Θερμοστοιχεία (Thermocouples)	37
3.6.3	Ψηφιακοί Αισθητήρες Θερμοκρασίας.....	37
Κεφάλαιο 4^ο :Υλοποίηση		38
4.1	Προσομοίωση Αναλογικού Κυκλώματος Αγωγιμότητας	38
4.2	Αποτελέσματα Προσομοίωσης	43
4.3	Ανάλυση και προσομοίωση κυκλώματος χωρητικού αισθητήρα Υγρασίας.....	46
4.4	Υλοποίηση Αισθητήρα Αντίστασης και Υγρασίας.....	48
4.5	Υλοποίηση Κυκλωμάτων.....	50
4.5.1	Τροφοδοσία	52
4.5.2	Αναλογικά	58
4.5.3	Ψηφιακά κυκλώματα και MCU.....	60
4.6	Κατασκευή PCB	62
4.7	Firmware και έλεγχος λειτουργίας	64
Κεφάλαιο 5^ο : Μετρήσεις και αποτελέσματα.....		70
5.1	Μετρήσεις Εδάφους και Εκτίμηση Χαρακτηριστικών	70
5.2	Αποτελέσματα Μετρήσεων.....	72
Κεφάλαιο 6^ο : Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης.....		78
6.1	Συμπεράσματα	78
6.2	Προτάσεις Βελτίωσης	78
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		80
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΣΧΕΔΙΟ ΤΥΠΩΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ		82

Κεφάλαιο 1^ο : Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Στη σύγχρονη εποχή η γεωργία έχει δώσει τις βάσεις για την ασφάλεια των τροφίμων και κατ' επέκταση του ανθρώπινου πολιτισμού. Η αποτελεσματικότητα των μεθόδων που χρησιμοποιούν οι αγρότες εξαρτάται από την κατανόηση των χαρακτηριστικών του εδάφους όπως η υγρασία, η θερμοκρασία, το pH και κυρίως, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα μπορεί να μας δείξει πόσα διαλυμένα άλατα υπάρχουν στο έδαφος, κάτι που είναι σημαντικό για την υγεία και τη γονιμότητα του εδάφους.

Κατά τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, η παγκόσμια γεωργία έχει σημειώσει τεράστια πρόοδο στην αύξηση της παγκόσμιας προσφοράς τροφίμων. Παρά το γεγονός ότι ο παγκόσμιος πληθυσμός έχει διπλασιαστεί κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η παραγωγή τροφίμων έχει αυξηθεί ακόμη πιο γρήγορα, με την κατά κεφαλήν προμήθεια τροφίμων να αυξάνεται από λιγότερο από 2000 θερμίδες ανά ημέρα το 1962 σε περισσότερες από 2500 θερμίδες το 1995[1]. Η αύξηση της παγκόσμιας παραγωγής τροφίμων έχει αποδοθεί σε καλύτερους σπόρους, εκτεταμένη άρδευση, και αυξημένη χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, κοινώς γνωστά ως η Πράσινη Επανάσταση.

1.2 Σκοπός και Στόχοι

Η γνώση των συστατικών του εδάφους έχει σημαντικό ρόλο για τους αγρότες. Με την ανάλυση των συστατικών του εδάφους, μπορούν να επιλέξουν τις κατάλληλες καλλιεργητικές τεχνικές, αυξάνοντας την παραγωγή και την αποδοτικότητα της καλλιέργειας. Η αλατότητα του εδάφους, για παράδειγμα, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ανάπτυξη των φυτών. Τα υψηλά επίπεδα αλατότητας μπορούν να περιορίσουν την ανάπτυξη των ριζών και την απορρόφηση θρεπτικών ουσιών, οδηγώντας σε μειωμένη καλλιεργητική αποδοτικότητα. Μέσω της μέτρησης της αγωγιμότητας, οι αγρότες μπορούν να εντοπίσουν τα επίπεδα αλατότητας και να εφαρμόσουν κατάλληλες πρακτικές για τη βελτίωση του εδάφους. Η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας παρέχει σημαντικά δεδομένα σχετικά με το περιεχόμενο των διαλυμένων ιόντων στο έδαφος, που μπορεί να υποδείξουν όχι μόνο την αλατότητα αλλά και την ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί ή να απελευθερώνει θρεπτικά συστατικά. Επίσης, μπορεί να αποκαλύψει την υγεία του εδάφους και να βοηθήσει στον προσδιορισμό των αναγκών για λίπανση και άλλες γεωργικές επεμβάσεις.

Τα τελευταία χρόνια, έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικές έρευνες στον τομέα της μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους. Αυτές οι έρευνες επικεντρώνονται στην ανάπτυξη νέων τεχνικών και συσκευών που χρησιμοποιούν σύγχρονα ηλεκτρονικά κυκλώματα και αισθητήρες. Οι νέες μέθοδοι μέτρησης συχνά αφορούν τη χρήση μεταλλικών ηλεκτροδίων ως αισθητήρες και την χρήση αναλογικών και ψηφιακών κυκλωμάτων καθώς και εξειδικευμένους αλγόριθμους για την εξαγωγή αξιόπιστων δεδομένων σχετικά με την αγωγιμότητα του εδάφους.

1.3 Προκλήσεις

Η προοπτική σίτισης των επιπλέον 3 δισεκατομμυρίων ανθρώπων που προβλέπεται να προστεθούν στον παγκόσμιο πληθυσμό κατά τα επόμενα 30 χρόνια θέτει περισσότερες προκλήσεις από αυτές που αντιμετωπίστηκαν τα τελευταία 30 χρόνια. Βραχυπρόθεσμα, οι παγκόσμιοι εμπειρογνώμονες πόρων

προβλέπουν ότι θα υπάρχουν επαρκείς παγκόσμιες προμήθειες τροφίμων, αλλά η διανομή αυτών των προμηθειών στους υποσιτισμένους ανθρώπους θα είναι το κύριο πρόβλημα. Μακροπρόθεσμα, ωστόσο, τα εμπόδια γίνονται πιο δύσκολα, αν και όχι ανυπέρβλητα. Παρόλο που οι συνολικές αποδόσεις συνεχίζουν να αυξάνονται σε παγκόσμια βάση, υπάρχει μια ανησυχητική μείωση στην αύξηση των αποδόσεων με ορισμένες κύριες καλλιέργειες όπως το σιτάρι και το καλαμπόκι να φτάνουν σε ένα «πλατό αποδόσεων» [1]. Η σίτιση του συνεχώς αυξανόμενου παγκόσμιου πληθυσμού θα απαιτήσει ένα βιώσιμο γεωργικό σύστημα που μπορεί να συμβαδίσει με την αύξηση του πληθυσμού.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους μετράτε με διάφορους τύπους μεθόδων, καθεμία από τις οποίες έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η μέθοδος συνεχούς ρεύματος (DC) χρησιμοποιεί συνεχές ρεύμα για τη μέτρηση της αγωγιμότητας, προσφέροντας απλότητα και χαμηλό κόστος, αλλά μπορεί να προκαλέσει αυξημένη πόλωση των ηλεκτροδίων και συσσώρευση ιόντων που μειώνουν την ακρίβεια στις μετρήσεις. Αντίθετα, η μέθοδος εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) με ημιτονοειδή κύματα χρησιμοποιεί συνεχή ημιτονοειδή κύματα για τη μέτρηση της αγωγιμότητας, μειώνοντας την πόλωση των ηλεκτροδίων και την συσσώρευση ιόντων, προσφέροντας πιο σταθερές μετρήσεις, αλλά με αυξημένο κόστος και πολυπλοκότητα του κυκλώματος. Μια άλλη μέθοδος είναι η μέθοδος εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) με διπολικούς παλμούς, η οποία χρησιμοποιεί εναλλασσόμενους θετικούς και αρνητικούς παλμούς με χαμηλό Duty Cycle. Αυτή η μέθοδος μειώνει την διάβρωση των ηλεκτροδίων, προσφέροντας πιο σταθερές και ακριβείς μετρήσεις, αλλά απαιτεί προηγμένη επεξεργασία σήματος για την εξασφάλιση της ακρίβειας των μετρήσεων.

Στη δική μας υλοποίηση, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος με χρήση διπολικών παλμών AC. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει τη μείωση της πόλωσης των ηλεκτροδίων και της συσσώρευσης ιόντων, προσφέροντας πιο σταθερές και ακριβείς μετρήσεις αγωγιμότητας. Επιπλέον, η συγκεκριμένη μέθοδος είναι πιο ανθεκτική στη διάβρωση των ηλεκτροδίων, κάτι που αυξάνει τη διάρκεια ζωής της συσκευής μέτρησης και διατηρεί την ακρίβεια των μετρήσεων.

Επίσης, η σχέση μεταξύ της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και άλλων σημαντικών παραμέτρων του εδάφους, όπως η υγρασία και η θερμοκρασία, είναι άμεση. Η αγωγιμότητα επηρεάζεται από την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό και τα διαλυμένα άλατα. Μετρώντας την υγρασία και τη θερμοκρασία παράλληλα με την αγωγιμότητα, οι αγρότες μπορούν να λάβουν μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης του εδάφους και να προσαρμόσουν τις καλλιεργητικές πρακτικές τους ανάλογα.

Συνοψίζοντας, η ανάπτυξη αυτής της συσκευής προσφέρει ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για τη μέτρηση και την ανάλυση κρίσιμων παραμέτρων του εδάφους. Οι πληροφορίες που παρέχει είναι απαραίτητες για τη βελτίωση των καλλιεργητικών πρακτικών, την αύξηση της αποδοτικότητας και την προώθηση της βιωσιμότητας στον αγροτικό τομέα. Μέσα από αυτήν τη διπλωματική εργασία, θα εξεταστούν νέες μέθοδοι και τεχνολογίες για τη μέτρηση και ανάλυση του εδάφους. Η ανάπτυξη μιας συσκευής που μπορεί να μετρά την ηλεκτρική αγωγιμότητα, την υγρασία και τη θερμοκρασία του εδάφους και να αποτυπώνει τις τιμές αυτών σε πραγματικό χρόνο δίνει τη δυνατότητα στους αγρότες να βελτιώσουν τις καλλιεργητικές τους τακτικές, να μειώσουν τα κόστη και να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα. Η δυνατότητα πραγματοποίησης μετρήσεων απευθείας στο πεδίο, χωρίς την ανάγκη εργαστηριακών αναλύσεων, καθιστά τη συσκευή ιδιαίτερα πρακτική και χρήσιμη καθώς οι πληροφορίες που παρέχει είναι σημαντικές για την βιωσιμότητα στον αγροτικό τομέα.

Κεφάλαιο 2^ο : Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Εισαγωγή στο Έδαφος και τις Ιδιότητές του

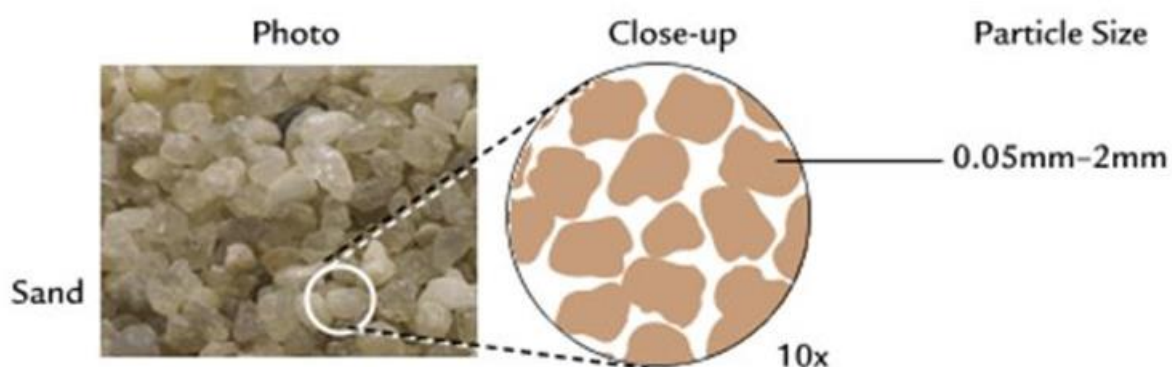
Το έδαφος αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους φυσικούς πόρους, καθώς υποστηρίζει την ανάπτυξη των φυτών και τη διατήρηση της ζωής. Για να κατανοήσουμε καλύτερα τις ιδιότητες του εδάφους και να βελτιώσουμε τις γεωργικές πρακτικές, είναι απαραίτητο να αναλύσουμε τις φυσικές και χημικές του παραμέτρους, όπως η υφή, η δομή, η υγρασία, η θερμοκρασία και η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αυτές οι ιδιότητες παίζουν σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της γονιμότητας του εδάφους και την απόδοση των καλλιεργειών.

2.2 Κατηγορίες Εδαφών

Τα εδάφη μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες με βάση τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες. Αυτές οι κατηγορίες περιλαμβάνουν τα αμμώδη, αργιλώδη, ιλύα και πηλώδη εδάφη. Κάθε τύπος εδάφους έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την αποδοτικότητα της καλλιέργειας και τη διαχείριση των φυσικών πόρων.

2.2.1 Άμμος (Sandy Soils)

Τα αμμώδη εδάφη χαρακτηρίζονται από μεγάλα σωματίδια και καλή διαπερατότητα. Το νερό, ο αέρας και τα θρεπτικά συστατικά διαπερνούν εύκολα τα αμμώδη εδάφη, καθιστώντας τα ευάλωτα σε ξηρασίες και εκχύλιση θρεπτικών ουσιών. Αυτό απαιτεί συχνή άρδευση και λίπανση για τη διατήρηση της γονιμότητας. Επίσης, τα αμμώδη εδάφη θερμαίνονται γρήγορα, γεγονός που μπορεί να ευνοήσει την ανάπτυξη των φυτών σε ψυχρότερες περιοχές, αλλά και να προκαλέσει ταχύτερη ξήρανση. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα στα αμμώδη εδάφη μπορεί να είναι χαμηλότερη λόγω της χαμηλής συγκέντρωσης διαλυμένων ιόντων, εκτός αν υπάρχει σημαντική αλάτωση[2].

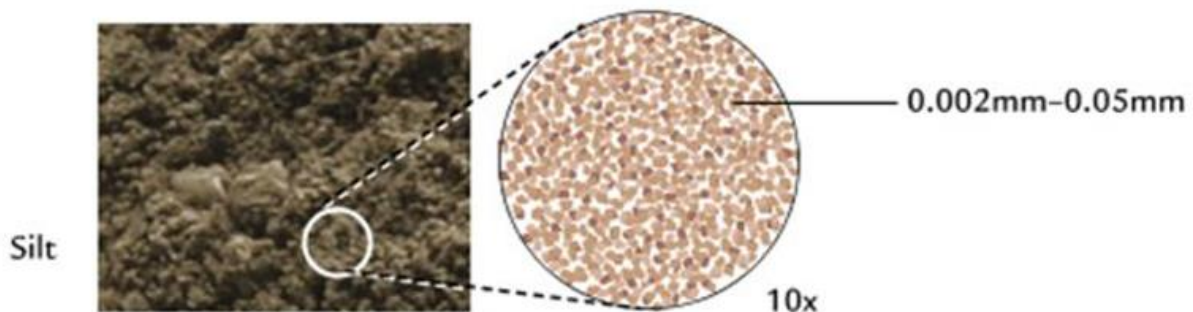


Εικόνα 2.1 Σωματίδια άμμου .

2.2.2 Ιλύς (Silt Soils)

Τα εδάφη με ιλύ έχουν μέτρια μεγέθη σωματιδίων και παρέχουν καλή διατήρηση της υγρασίας και ευκολία στην καλλιέργεια. Ο καλός αερισμός και η σταθερότητα στη διατήρηση θρεπτικών συστατικών

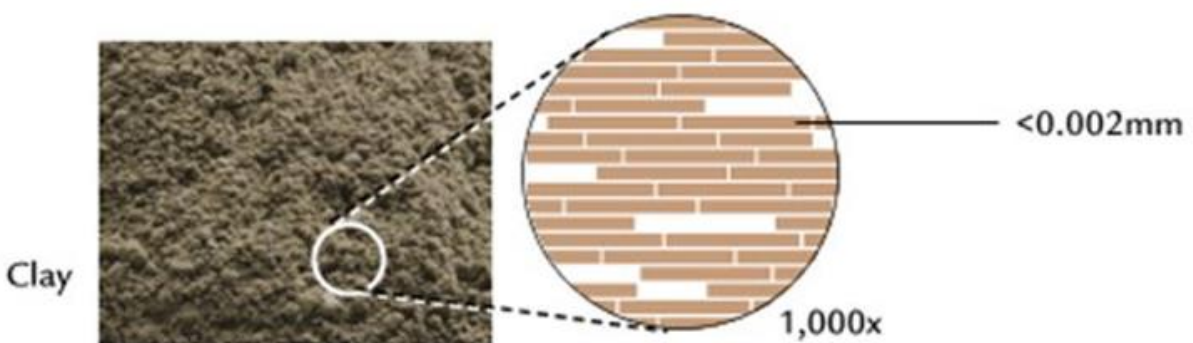
καθιστούν αυτά τα εδάφη ιδανικά για πολλές καλλιέργειες. Παρ' όλα αυτά, μπορεί να είναι ευάλωτα στη διάβρωση λόγω της λεπτότητας των σωματιδίων τους. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα των εδαφών με ιλύ μπορεί να είναι μέτρια, καθώς συνδυάζουν χαρακτηριστικά των αμμωδών και αργιλωδών εδαφών, παρέχοντας μια ισορροπία στη διατήρηση των θρεπτικών συστατικών και του νερού[2].



Εικόνα 1.2 Σωματίδια ιλύς .

2.2.3 Αργιλώδη Εδάφη (Clay Soils)

Τα αργιλώδη εδάφη έχουν μικρά, συμπαγή σωματίδια που διατηρούν το νερό και τα θρεπτικά συστατικά αποτελεσματικά. Αυτά τα εδάφη είναι συνήθως πλούσια σε θρεπτικά συστατικά, αλλά μπορεί να έχουν προβλήματα αερισμού και αποστράγγισης, καθώς η συνεκτικότητα τους μπορεί να προκαλέσει συμπίκνωση και περιορισμένη διείσδυση των ριζών. Η βελτίωση της δομής τους συχνά απαιτεί την προσθήκη οργανικών υλικών ή άμμου για τη βελτίωση της διαπερατότητας και του αερισμού. Η υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού στα αργιλώδη εδάφη συνήθως οδηγεί σε υψηλότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα, ειδικά σε περιόδους υγρασίας[2].



Εικόνα 2.3 Σωματίδια αργίλου.

2.2.4 Πηλώδη Εδάφη (Loamy Soils)

Τα πηλώδη εδάφη είναι τα πιο γόνιμα, συνδυάζοντας τα χαρακτηριστικά των άμμων, αργίλων και ιλύων. Προσφέρουν εξαιρετική ισορροπία μεταξύ διατήρησης υγρασίας, αερισμού και διαπερατότητας, καθιστώντας τα ιδανικά για την πλειονότητα των καλλιεργειών. Αυτά τα εδάφη είναι ευέλικτα και απαιτούν λιγότερη διαχείριση σε σχέση με άλλους τύπους εδάφους. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα στα

πηλώδη εδάφη μπορεί να είναι υψηλή λόγω της ικανότητάς τους να συγκρατούν νερό και διαλυμένα θρεπτικά συστατικά[2].

2.3 Φυσικές Ιδιότητες του Εδάφους

Η κατανόηση των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους είναι απαραίτητη για τη διαχείριση των καλλιεργειών και την αειφορία. Οι φυσικές ιδιότητες επηρεάζουν την ικανότητα του εδάφους να υποστηρίξει τη ζωή των φυτών, να διατηρήσει τα θρεπτικά συστατικά και να διαχειριστεί τα υδατικά αποθέματα. Οι βασικές φυσικές ιδιότητες περιλαμβάνουν την υφή, τη δομή, το πορώδες, την υδατοδιαπερατότητα και την θερμοκρασία.

2.3.1 Υφή του Εδάφους

Η υφή του εδάφους περιγράφει το μέγεθος, το σχήμα και τη διασπορά των σωματιδίων του. Οι βασικές κατηγορίες υφής περιλαμβάνουν την άμμο, την ιλύ και τον πηλό, καθεμία από τις οποίες έχει διαφορετικές ιδιότητες διαπερατότητας και ικανότητας συγκράτησης θρεπτικών συστατικών.

Άμμος : Τα αμμώδη εδάφη χαρακτηρίζονται από μεγάλα σωματίδια, τα οποία επιτρέπουν τη γρήγορη διέλευση του νερού και του αέρα. Αυτό μπορεί να προκαλέσει γρήγορη ξήρανση και εκχύλιση των θρεπτικών συστατικών, απαιτώντας συχνή άρδευση και λίπανση. Ωστόσο, τα αμμώδη εδάφη θερμαίνονται γρήγορα, γεγονός που μπορεί να είναι ευεργετικό σε ψυχρές περιοχές.

Ιλύς : Τα ιλύα εδάφη έχουν μεσαία μεγέθη σωματιδίων που παρέχουν καλή διατήρηση της υγρασίας και καλή αερισμό. Αυτό τα καθιστά ιδανικά για πολλές καλλιέργειες, καθώς προσφέρουν ισορροπία μεταξύ διαπερατότητας και συγκράτησης νερού.

Πηλός : Τα αργιλώδη εδάφη έχουν μικρά, συμπαγή σωματίδια που συγκρατούν αποτελεσματικά το νερό και τα θρεπτικά συστατικά. Ωστόσο, η υψηλή συνεκτικότητα τους μπορεί να περιορίσει τον αερισμό και την αποστράγγιση, απαιτώντας τη βελτίωση της δομής με προσθήκη οργανικών υλικών ή άμμου.

Η υφή του εδάφους επηρεάζει άμεσα την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του εδάφους, καθώς η ικανότητα συγκράτησης νερού και διαλυμένων ιόντων εξαρτάται από το μέγεθος και τη διασπορά των σωματιδίων[3].

2.3.2 Δομή του Εδάφους

Η δομή του εδάφους αναφέρεται στον τρόπο που τα σωματίδια του εδάφους συνδέονται για να σχηματίσουν συγκροτήματα ή αγκύλες. Η δομή αυτή επηρεάζει την υδατοδιαπερατότητα, τον αερισμό και την αντίσταση στη διάβρωση.

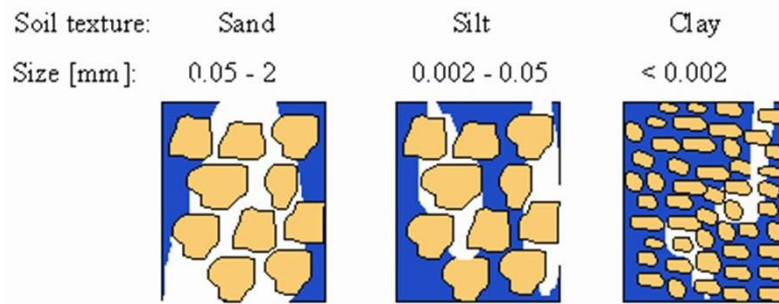
Σφαιρική δομή: Ιδανική για πολλές καλλιέργειες, επιτρέπει εξαιρετική διαπερατότητα και αερισμό, διευκολύνοντας την υγιή ανάπτυξη των ριζών.

Κυβική δομή: Βοηθά στη συγκράτηση νερού και είναι χρήσιμη σε περιοχές με περιορισμένες βροχοπτώσεις, παρέχοντας σταθερή βάση για τα φυτά.

Πλακώδης δομή: Σχηματίζει στρώματα που μπορεί να περιορίσουν τη διείσδυση των ριζών και την αερισμό, απαιτώντας συχνά επεμβάσεις για τη βελτίωση της δομής.

Η δομή του εδάφους μπορεί να επηρεάσει την ηλεκτρική αγωγιμότητα, καθώς η καλή αερισμός και η αποστράγγιση μπορούν να μειώσουν τη συγκέντρωση των διαλυμένων ιόντων[3].

2.3.3 Πορώδες και Υδατοδιαπερατότητα



Εικόνα 2.4 Υδατοδιαπερατότητα αμμού, ίλυ, αργίλου.

Το πορώδες του εδάφους αναφέρεται στους χώρους ανάμεσα στα σωματίδια, οι οποίοι είναι κρίσιμοι για τη διατήρηση της υγρασίας και του αερισμού. Το πορώδες επηρεάζει την ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί νερό και να επιτρέπει τη διείσδυση των ριζών.

Υψηλό πορώδες: Εδάφη με καλά ανεπτυγμένα πορώδη προάγουν την υγιή ανάπτυξη των φυτών και την αποφυγή υπεράρδευσης. Αυτά τα εδάφη προσφέρουν καλή αερισμό και βοηθούν στην αποστράγγιση.

Χαμηλό πορώδες: Μπορεί να προκαλέσει στάση νερού και να αυξήσει τον κίνδυνο ασθeneιών των φυτών, απαιτώντας συχνά βελτιώσεις για την αύξηση της διαπερατότητας.

Η υδατοδιαπερατότητα του εδάφους αναφέρεται στην ικανότητα του εδάφους να επιτρέπει τη ροή του νερού μέσα από αυτό. Τα καλά διαπερατά εδάφη επιτρέπουν την εύκολη αποστράγγιση του νερού και τη διείσδυση των ριζών, ενώ τα κακώς διαπερατά εδάφη μπορεί να προκαλέσουν υπεράρδευση και ασφυξία των ριζών.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα συνδέεται στενά με το πορώδες και την υδατοδιαπερατότητα, καθώς τα υψηλότερα επίπεδα υγρασίας και η καλύτερη διακίνηση του νερού βελτιώνουν τη μεταφορά των ιόντων, καθιστώντας τη μέτρηση της αγωγιμότητας ένα σημαντικό εργαλείο για την εκτίμηση της υγείας και της γονιμότητας του εδάφους[3].

2.3.4 Θερμοκρασία του Εδάφους

Η θερμοκρασία του εδάφους είναι μια κρίσιμη φυσική ιδιότητα που επηρεάζει την ανάπτυξη των φυτών και τη λειτουργία του εδάφους. Επηρεάζει τις βιολογικές και χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο έδαφος, καθώς και τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών. Η θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο στη βλάστηση των σπόρων, καθώς κάθε καλλιέργεια έχει ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας στο οποίο οι σπόροι αναπτύσσονται καλύτερα. Θερμοκρασίες εκτός αυτού του εύρους μπορούν να καθυστερήσουν ή να εμποδίσουν την ανάπτυξη των καλλιεργειών. Επίσης, η θερμοκρασία επηρεάζει την απορρόφηση θρεπτικών συστατικών, με τις ρίζες να απορροφούν καλύτερα νερό και θρεπτικά συστατικά σε ιδανικές θερμοκρασίες. Οι χημικές αντιδράσεις στο έδαφος, όπως η διάσπαση της οργανικής ύλης και η απελευθέρωση θρεπτικών συστατικών, επηρεάζονται επίσης από τη θερμοκρασία. Αυξημένες θερμοκρασίες μπορούν να επιταχύνουν αυτές τις αντιδράσεις, αλλά μπορούν επίσης να προκαλέσουν ταχύτερη απώλεια θρεπτικών συστατικών μέσω της εξάτμισης.

Η μέτρηση της θερμοκρασίας του εδάφους είναι σημαντική για τους εξής λόγους :

Αντιστάθμιση της Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας: Η θερμοκρασία του εδάφους συνδέεται στενά με την υγρασία. Οι θερμοκρασίες του εδάφους μπορούν να δώσουν ενδείξεις για την υδατική κατάσταση του εδάφους και να βοηθήσουν στην ορθολογική διαχείριση της άρδευσης.

Προγραμματισμός Σποράς: Γνωρίζοντας τη θερμοκρασία του εδάφους, οι αγρότες μπορούν να προγραμματίσουν τη σπορά σε κατάλληλες συνθήκες, εξασφαλίζοντας έτσι υψηλότερα ποσοστά επιτυχίας στη βλάστηση των σπόρων.

Πρόληψη Ζημιών από Παγετό: Η έγκαιρη μέτρηση της θερμοκρασίας του εδάφους μπορεί να βοηθήσει στην πρόληψη ζημιών από παγετό, δίνοντας τη δυνατότητα στους αγρότες να λάβουν προληπτικά μέτρα.

Διαχείριση Θρεπτικών Συστατικών: Η θερμοκρασία επηρεάζει τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών. Μέσω της παρακολούθησης της θερμοκρασίας, οι αγρότες μπορούν να προσαρμόσουν τις πρακτικές λίπανσης ώστε να μεγιστοποιήσουν την απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών από τα φυτά.

Εκτίμηση Εδαφικής Υγρασίας: Η θερμοκρασία του εδάφους συνδέεται στενά με την υγρασία. Οι θερμοκρασίες του εδάφους μπορούν να δώσουν ενδείξεις για την υδατική κατάσταση του εδάφους και να βοηθήσουν στην ορθολογική διαχείριση της άρδευσης.

Η θερμοκρασία του εδάφους επηρεάζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), καθώς οι μεταβολές στη θερμοκρασία επηρεάζουν την κινητικότητα των ιόντων και τη διάλυση των αλάτων. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η αυξημένη κινητικότητα των ιόντων και η διαλυτότητα των αλάτων αυξάνουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την αξιολόγηση της αγωγιμότητας του εδάφους, ιδίως σε περιοχές με μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Παρακάτω υπάρχει και ο μαθηματικός τύπος για τον υπολογισμό της Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας μετά από αντιστάθμιση με την θερμοκρασία του εδάφους.

$$EC_T = EC_{25} \times (1 + \alpha \times (T - 25)) \quad (2.1)$$

Η κατανόηση και η σωστή διαχείριση αυτών των φυσικών ιδιοτήτων είναι απαραίτητες για την αειφορία των γεωργικών πρακτικών και τη βελτίωση της αποδοτικότητας των καλλιεργειών. Επιπλέον, η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, της υγρασίας και της θερμοκρασίας σε διάφορα βάθη του εδάφους προσφέρει μια ολοκληρωμένη εικόνα των συνθηκών του εδάφους και επιτρέπει στους αγρότες να λαμβάνουν πιο ενημερωμένες αποφάσεις για τη διαχείριση των καλλιεργειών τους. Η ανάλυση αυτών των παραμέτρων βοηθά στη βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων, στη μείωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου και στην αύξηση της παραγωγικότητας των αγροτικών εκμεταλλεύσεων[3].

2.4 Χημικές Ιδιότητες του Εδάφους

Οι χημικές ιδιότητες του εδάφους αποτελούν θεμελιώδη παράγοντα για την κατανόηση της γονιμότητας και της ικανότητας του εδάφους να υποστηρίξει την ανάπτυξη των φυτών. Αυτές οι ιδιότητες καθορίζουν το περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσονται οι ρίζες των φυτών και επηρεάζουν άμεσα την πρόσβαση σε νερό και θρεπτικά συστατικά. Η ανάλυση των χημικών ιδιοτήτων του εδάφους μπορεί να αποκαλύψει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη φυσική και βιολογική λειτουργία του εδάφους, καθώς και την ικανότητά του να υποστηρίξει υγιή και παραγωγικά φυτά.

Οι κύριες χημικές ιδιότητες του εδάφους περιλαμβάνουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), το pH, την περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC) και την παρουσία θρεπτικών συστατικών και ιχνοστοιχείων. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) αποτελεί έναν δείκτη της συγκέντρωσης διαλυμένων αλάτων στο έδαφος και παρέχει πληροφορίες σχετικά με την αλατότητα και την ικανότητα του εδάφους να διατηρεί θρεπτικά συστατικά. Το pH του εδάφους επηρεάζει τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών και την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, καθιστώντας το κρίσιμο για τη βιολογική δραστηριότητα του εδάφους.

Η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη είναι εξίσου σημαντική, καθώς η οργανική ύλη βελτιώνει τη δομή του εδάφους, αυξάνει την ικανότητά του να συγκρατεί νερό και θρεπτικά συστατικά, και υποστηρίζει τη βιολογική δραστηριότητα των μικροοργανισμών. Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC) αναφέρεται στην ικανότητα του εδάφους να δεσμεύει και να ανταλλάσσει κατιόντα, όπως ασβέστιο, μαγνήσιο, και κάλιο, τα οποία είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών. Τέλος, η παρουσία θρεπτικών συστατικών και ιχνοστοιχείων είναι καθοριστική για τη διατροφή των φυτών, καθώς τα θρεπτικά συστατικά όπως το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο, και τα ιχνοστοιχεία όπως ο ψευδάργυρος και ο σίδηρος, είναι απαραίτητα για τη φυσιολογική λειτουργία των φυτών.

Η συνολική κατανόηση και ανάλυση των χημικών ιδιοτήτων του εδάφους είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική διαχείριση της γεωργίας και τη βελτίωση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών. Μέσω της τακτικής παρακολούθησης και της ανάλυσης των χημικών ιδιοτήτων, οι αγρότες μπορούν να προσαρμόσουν τις πρακτικές άρδευσης και λίπανσης, να εντοπίσουν και να αντιμετωπίσουν προβλήματα όπως η αλατότητα και η έλλειψη θρεπτικών συστατικών, και να βελτιώσουν τη συνολική υγεία του εδάφους και την παραγωγικότητα των καλλιεργειών τους[4].

2.4.1 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC)

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) είναι μια μέτρηση της ικανότητας του εδάφους να μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα, και συνδέεται άμεσα με την παρουσία διαλυμένων ιόντων. Αυτή η μέτρηση είναι σημαντική επειδή παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη συγκέντρωση αλάτων στο έδαφος, που επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών. Μια υψηλή αγωγιμότητα υποδηλώνει αυξημένα επίπεδα αλάτων, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στα φυτά, όπως η οσμωτική πίεση, η οποία μειώνει την ικανότητά τους να απορροφούν νερό και θρεπτικά συστατικά από το έδαφος. Η διαχείριση της αγωγιμότητας περιλαμβάνει την τακτική εξέταση του εδάφους και την εφαρμογή κατάλληλων πρακτικών άρδευσης και λίπανσης.

Η μέτρηση της αγωγιμότητας σε διαφορετικά βάθη μπορεί να αποκαλύψει διαφορές στη σύσταση και την υγρασία του εδάφους, επιτρέποντας πιο στοχευμένες γεωργικές επεμβάσεις. Η αγωγιμότητα επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η συγκέντρωση των διαλυμένων αλάτων, η υγρασία και η θερμοκρασία του εδάφους. Η υψηλή περιεκτικότητα σε νερό σημαίνει μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος. Επίσης τα διαλυμένα άλατα στο νερό του εδάφους αυξάνουν την αγωγιμότητα λόγω της παρουσίας περισσότερων ιόντων που μπορούν να μεταφέρουν ηλεκτρικό ρεύμα. Υψηλότερη αλατότητα συνήθως συνεπάγεται υψηλότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Η σύσταση και δομή του εδάφους επηρεάζουν επίσης την αγωγιμότητα. Οι διάφοροι τύποι σωματιδίων του εδάφους, όπως η άργιλος, η άμμος και η λάσπη, έχουν διαφορετικές ιδιότητες που επηρεάζουν την αγωγιμότητα. Ο άργιλος, για παράδειγμα, λόγω της μικρής κοκκομετρίας του και της μεγάλης ειδικής επιφάνειας, έχει συνήθως υψηλότερη αγωγιμότητα σε σύγκριση με την άμμο. Η οργανική ύλη μπορεί επίσης να επηρεάσει την αγωγιμότητα του εδάφους, αν και η επίδρασή της είναι συχνά μικρότερη σε σύγκριση με την υγρασία και την αλατότητα.

Η θερμοκρασία του εδάφους είναι ένας επιπλέον σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μεγαλύτερη κινητικότητα των ιόντων και αύξηση της διαλυτότητας των αλάτων, γεγονός που αυξάνει την αγωγιμότητα του εδάφους. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, το έδαφος μπορεί να έχει υψηλότερη συγκέντρωση διαλυμένων ιόντων, που ενισχύει την ικανότητά του να μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή η επίδραση της θερμοκρασίας είναι κρίσιμη για την κατανόηση των αλλαγών στη γονιμότητα και την υγεία του εδάφους σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες.

Η ηλεκτρική διαπερατότητα είναι μια συναφής έννοια που αναφέρεται στην ικανότητα του εδάφους να επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρικού πεδίου. Η διαπερατότητα εξαρτάται από την αγωγιμότητα του εδάφους και επηρεάζεται από παρόμοιους παράγοντες. Υψηλότερη αγωγιμότητα σημαίνει ότι το έδαφος έχει μεγαλύτερη ικανότητα να μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα, και αυτό συνήθως μεταφράζεται σε υψηλότερη διαπερατότητα.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την αγωγιμότητα και τη διαπερατότητα περιλαμβάνουν:

Υγρασία: Περισσότερο νερό στο έδαφος αυξάνει την κινητικότητα των ιόντων, βελτιώνοντας την αγωγιμότητα και διαπερατότητα. Η υψηλή περιεκτικότητα σε νερό σημαίνει μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος και πεδίου.

Αλατότητα: Τα διαλυμένα άλατα στο νερό του εδάφους αυξάνουν την αγωγιμότητα και τη διαπερατότητα λόγω της παρουσίας περισσότερων ιόντων που μπορούν να μεταφέρουν ηλεκτρικό ρεύμα και πεδίο. Υψηλότερη αλατότητα συνήθως συνεπάγεται υψηλότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα και διαπερατότητα.

Σύσταση και Δομή του Εδάφους: Οι διάφοροι τύποι σωματιδίων του εδάφους, όπως η άργιλος, η άμμος και η λάσπη, έχουν διαφορετικές ιδιότητες που επηρεάζουν την αγωγιμότητα και τη διαπερατότητα. Ο άργιλος, για παράδειγμα, λόγω της μικρής κοκκομετρίας του και της μεγάλης ειδικής επιφάνειας, έχει συνήθως υψηλότερη αγωγιμότητα και διαπερατότητα σε σύγκριση με την άμμο.

Παρουσία Οργανικής Ύλης: Η οργανική ύλη μπορεί να επηρεάσει την αγωγιμότητα και τη διαπερατότητα του εδάφους, αν και συχνά η επίδρασή της είναι μικρότερη σε σύγκριση με την υγρασία και την αλατότητα.

Θερμοκρασία: Η θερμοκρασία του εδάφους επηρεάζει την κινητικότητα των ιόντων και την διαλυτότητα των αλάτων. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η αυξημένη κινητικότητα των ιόντων και η διαλυτότητα των αλάτων αυξάνουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την αξιολόγηση της αγωγιμότητας του εδάφους, ιδίως σε περιοχές με μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η διαπερατότητα αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την εκτίμηση της γονιμότητας και της υγείας του εδάφους, καθώς και για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τις γεωργικές επεμβάσεις που θα εφαρμοστούν. Η τακτική παρακολούθηση της αγωγιμότητας επιτρέπει τον εντοπισμό προβλημάτων όπως η αλατότητα, που μπορούν να επηρεάσουν την ανάπτυξη των φυτών και τη βιωσιμότητα των καλλιεργειών. Παρακάτω υπάρχει ένας πίνακας με ενδεικτικές τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και τον ρόλο που παίζουν στην ποιότητα του εδάφους.

Εύρος EC (mS/Cm)	Ποιότητα Εδάφους
< 0.2	Πολύ χαμηλή αγωγιμότητα, συχνά ενδεικτική για αμμώδη εδάφη
0.2 - 0.4	Χαμηλή αγωγιμότητα, κατάλληλη για τις περισσότερες καλλιέργειες
0.4 - 0.8	Μέτρια αγωγιμότητα, αποδεκτή για τις περισσότερες καλλιέργειες
0.8 - 1.6	Αυξημένη αγωγιμότητα, μπορεί να επηρεάσει ευαίσθητες καλλιέργειες
1.6 - 3.2	Υψηλή αγωγιμότητα, περιορίζει τις επιλογές καλλιέργειας
> 3.2	Πολύ υψηλή αγωγιμότητα, ακατάλληλο για τις περισσότερες καλλιέργειες

Πίνακας 2.1 Ποιότητας εδάφους σε σχέση με τιμές αγωγιμότητας

Επιπλέον, η παρακολούθηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας μπορεί να παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τη διαχείριση των θρεπτικών συστατικών στο έδαφος. Η υψηλή αγωγιμότητα μπορεί να υποδεικνύει υπερβολική χρήση λιπασμάτων, που μπορεί να οδηγήσει σε ρύπανση των υδάτινων πόρων και σε οικονομικές απώλειες. Αντίθετα, χαμηλή αγωγιμότητα μπορεί να σημαίνει ότι το έδαφος έχει έλλειψη θρεπτικών συστατικών, απαιτώντας την εφαρμογή κατάλληλων λιπασμάτων για την υποστήριξη της ανάπτυξης των φυτών. Η τακτική παρακολούθηση της αγωγιμότητας επιτρέπει τον εντοπισμό προβλημάτων όπως η αλατότητα ή η παρουσία ρύπων, που μπορούν να επηρεάσουν την ανάπτυξη των φυτών και τη βιωσιμότητα των καλλιεργειών[5].

2.4.2 pH του Εδάφους

Το pH του εδάφους αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων για τα φυτά και, κατ' επέκταση, την υγεία και την ανάπτυξή τους. Το pH του εδάφους μετρά τη συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου (H^+) και δείχνει αν το έδαφος είναι όξινο ($pH < 7$), ουδέτερο ($pH = 7$) ή αλκαλικό ($pH > 7$). Οι περισσότερες καλλιέργειες προτιμούν ένα pH εδάφους μεταξύ 6 και 7.5, καθώς σε αυτό το εύρος, τα περισσότερα θρεπτικά στοιχεία είναι διαθέσιμα για απορρόφηση από τα φυτά.

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

Πίνακας 2.2 Διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων σε σχέση με το εύρος pH εδάφους.

Εδάφη με έντονα αλκαλικό ή όξινο pH μπορεί να εμποδίσουν την απορρόφηση ορισμένων θρεπτικών στοιχείων. Σε όξινα εδάφη (χαμηλό pH), η διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων όπως ο φώσφορος, το κάλιο και το ασβέστιο μειώνεται, ενώ αυξάνεται η διαθεσιμότητα τοξικών στοιχείων όπως το αργίλιο και το μαγγάνιο, τα οποία μπορεί να είναι επιβλαβή για τα φυτά. Αντίθετα, σε αλκαλικά εδάφη (υψηλό pH), η διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων όπως ο σίδηρος, ο ψευδάργυρος, το μαγγάνιο, ο χαλκός και το βόριο μειώνεται, καθιστώντας τα μη διαθέσιμα για τα φυτά και οδηγώντας σε ανεπάρκειες.

Η ρύθμιση του pH επιτυγχάνεται με την προσθήκη ασβεστίου (ασβεστόλιθος ή υδράσβεστος) για την αύξηση του pH σε όξινα εδάφη ή θεικών αλάτων (θειικό σίδηρο ή θειικό αργίλιο) για τη μείωση του pH σε αλκαλικά εδάφη. Η εφαρμογή αυτών των υλικών πρέπει να γίνεται με προσοχή και βασισμένη σε εδαφολογική ανάλυση, ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα χωρίς αρνητικές επιπτώσεις. Ένα ισορροπημένο pH είναι κρίσιμο για την αποδοτικότητα της λίπανσης και την υγεία των φυτών, καθώς επηρεάζει την κινητικότητα και τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών στο έδαφος.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους μπορεί επίσης να επηρεαστεί από το pH, καθώς η διαλυτότητα των διαφόρων ιόντων μεταβάλλεται ανάλογα με το pH του εδάφους. Σε όξινα εδάφη, η αυξημένη διαλυτότητα ορισμένων στοιχείων μπορεί να αυξήσει την αγωγιμότητα, ενώ σε αλκαλικά εδάφη, η μειωμένη διαλυτότητα μπορεί να μειώσει την αγωγιμότητα. Για παράδειγμα, σε όξινα εδάφη, η διαλυτότητα του αργιλίου αυξάνεται, προσθέτοντας περισσότερα ιόντα στο εδαφικό διάλυμα και αυξάνοντας την αγωγιμότητα.

Η κατανόηση και η διαχείριση του pH του εδάφους είναι απαραίτητες για τη διατήρηση ενός υγιούς εδαφικού περιβάλλοντος που υποστηρίζει την αποδοτική ανάπτυξη των καλλιεργειών. Οι τακτικές αναλύσεις του pH του εδάφους και η προσαρμογή των πρακτικών λίπανσης και εδαφοβελτίωσης βάσει αυτών των αναλύσεων μπορούν να βοηθήσουν στη βελτίωση της υγείας του εδάφους και της παραγωγικότητας των καλλιεργειών. Επιπλέον, η εκπαίδευση των αγροτών σχετικά με τη σημασία του pH και τις μεθόδους ρύθμισής του μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση των γεωργικών πρακτικών και στην αειφορία της γεωργικής παραγωγής[6].

2.4.3 Οργανική Ύλη

Η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη βελτιώνει τη δομή του εδάφους, την ικανότητα διατήρησης νερού και την προώθηση της υγιούς βιολογικής δραστηριότητας. Η ενσωμάτωση κομπόστας ή άλλων οργανικών υλικών αυξάνει την περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, προσφέροντας μακροπρόθεσμα οφέλη στη γονιμότητα και τη βιωσιμότητα του εδάφους. Η οργανική ύλη συμβάλλει επίσης στη βελτίωση της ικανότητας του εδάφους να συγκρατεί θρεπτικά συστατικά και να υποστηρίζει τη βιολογική δραστηριότητα, προάγοντας τη μακροπρόθεσμη υγεία του εδαφικού οικοσυστήματος.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα μπορεί να επηρεαστεί θετικά από την παρουσία οργανικής ύλης, καθώς αυξάνει τη διατήρηση του νερού και βελτιώνει τη μεταφορά των ιόντων. Επιπλέον, η οργανική ύλη βοηθά στη διατήρηση της εδαφικής υφής και δομής, που είναι απαραίτητες για την αποδοτική καλλιέργεια. Η κατανόηση και η σωστή διαχείριση των παραπάνω παραμέτρων είναι απαραίτητες για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των καλλιεργειών[7].

2.4.4 Ικανότητα Ανταλλαγής Κατιόντων

Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC) είναι ένας από τους πιο σημαντικούς δείκτες της γονιμότητας του εδάφους, καθώς προσδιορίζει την ικανότητά του να συγκρατεί και να ανταλλάσσει θρεπτικά κατιόντα, όπως το κάλιο (K^+), το ασβέστιο (Ca^{2+}), το μαγνήσιο (Mg^{2+}), και το αμμώνιο (NH_4^+). Η CEC μετρείται σε μονάδες χιλιοστοϊσοδύναμων φορτίων ανά 100 γραμμάρια εδάφους ($cmolc/kg$) και εξαρτάται κυρίως από την περιεκτικότητα του εδάφους σε αργιλώδη ορυκτά και οργανική ύλη. Υψηλή CEC υποδηλώνει ότι το έδαφος έχει μεγαλύτερη ικανότητα να συγκρατεί θρεπτικά συστατικά και να τα απελευθερώνει στα φυτά, γεγονός που υποστηρίζει την υγιή ανάπτυξη των καλλιεργειών. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη διατήρηση της γονιμότητας του εδάφους και την αποτροπή της εκχύλισης των θρεπτικών συστατικών.

Τα αργιλώδεις εδάφη και τα εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη έχουν συνήθως υψηλότερη CEC, καθώς οι μικροδομές τους και τα οργανικά μόρια παρέχουν περισσότερες θέσεις για τη συγκράτηση των κατιόντων. Από την άλλη πλευρά, τα αμμώδη εδάφη, που έχουν λιγότερες θέσεις για τη συγκράτηση κατιόντων, παρουσιάζουν χαμηλότερη CEC. Αυτό σημαίνει ότι τα αμμώδη εδάφη χρειάζονται συχνότερη λίπανση για να διατηρήσουν τα επίπεδα θρεπτικών συστατικών που απαιτούνται για την ανάπτυξη των φυτών.

Η CEC επηρεάζει άμεσα την αποδοτικότητα των λιπασμάτων και την ανάγκη για εδαφοβελτιώσεις. Σε εδάφη με υψηλή CEC, τα θρεπτικά συστατικά παραμένουν διαθέσιμα για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους, μειώνοντας την ανάγκη για συχνές λιπάνσεις και μειώνοντας τον κίνδυνο εκχύλισης των θρεπτικών συστατικών σε βαθύτερα στρώματα του εδάφους ή στους υδάτινους πόρους. Επιπλέον, η υψηλή CEC βοηθά στη διατήρηση του ισοζυγίου των θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος, εξασφαλίζοντας ότι τα φυτά έχουν πρόσβαση σε μια συνεχή παροχή θρεπτικών συστατικών.

Η διαχείριση της CEC είναι κρίσιμη για την αειφορία της γεωργικής παραγωγής. Εφαρμογές οργανικής ύλης, όπως κομπόστα ή κοπριά, μπορούν να αυξήσουν την CEC του εδάφους, βελτιώνοντας τη γονιμότητά του. Επίσης, η επιλογή κατάλληλων καλλιεργητικών πρακτικών, όπως η αμειψισπορά και η χρήση καλλιεργειών κάλυψης, μπορεί να συμβάλλει στη διατήρηση και την ενίσχυση της CEC. Η τακτική ανάλυση του εδάφους για τον προσδιορισμό της CEC και άλλων σημαντικών παραμέτρων βοηθά τους αγρότες να λαμβάνουν ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με τη διαχείριση των εδαφών τους και να βελτιστοποιούν την απόδοση των καλλιεργειών τους.

Η κατανόηση και η διαχείριση της CEC είναι θεμελιώδεις για τη βελτίωση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών και την αειφορία της γεωργικής παραγωγής. Με την κατάλληλη διαχείριση, οι αγρότες μπορούν να εξασφαλίσουν ότι τα εδάφη τους παραμένουν γόνιμα και παραγωγικά για πολλά χρόνια, προσφέροντας μια σταθερή και πλούσια πηγή θρεπτικών συστατικών για τις καλλιέργειές τους[8].

2.4.5 Θρεπτικά Συστατικά και Ιχνοστοιχεία

Τα θρεπτικά συστατικά και τα ιχνοστοιχεία είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη και την υγεία των φυτών. Τα θρεπτικά συστατικά μπορούν να χωριστούν σε μακροθρεπτικά και μικροθρεπτικά στοιχεία.

Μακροθρεπτικά Συστατικά:

Άζωτο (N): Το άζωτο είναι βασικό στοιχείο για την ανάπτυξη των φυτών, καθώς αποτελεί μέρος των πρωτεϊνών, των νουκλεϊκών οξέων και των χλωροφυλλών. Η έλλειψη αζώτου μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμένη ανάπτυξη και κιτρίνισμα των φύλλων.

Φόσφορος (P): Ο φώσφορος είναι κρίσιμος για την ανάπτυξη των ριζών και την άνθηση των φυτών. Είναι απαραίτητος για τη σύνθεση του ATP, το οποίο είναι ζωτικής σημασίας για τις ενεργειακές διεργασίες των φυτών.

Κάλιο (K): Το κάλιο βοηθά στη ρύθμιση της οσμωτικής πίεσης και της ισορροπίας νερού στα φυτά. Είναι σημαντικό για τη σύνθεση των πρωτεϊνών και την ανάπτυξη των καρπών.

Ας εξετάσουμε πιο λεπτομερώς τα τρία κύρια μακροθρεπτικά συστατικά (N, P, K) και τη σημασία τους:

Αζωτο (N):

Το άζωτο είναι ένα από τα πιο κρίσιμα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη των φυτών. Είναι βασικό συστατικό των πρωτεϊνών, των νουκλεϊκών οξέων (DNA, RNA) και της χλωροφύλλης. Η χλωροφύλλη είναι απαραίτητη για τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, μέσω της οποίας τα φυτά μετατρέπουν το φως του ήλιου σε ενέργεια. Το άζωτο βοηθά στην ανάπτυξη των φυλλωμάτων και στην παραγωγή νέων βλαστών. Η έλλειψη αζώτου μπορεί να προκαλέσει κιτρίνισμα των φύλλων (χλώρωση) και περιορισμένη ανάπτυξη. Η υπερβολική ποσότητα αζώτου, ωστόσο, μπορεί να προκαλέσει υπερβολική ανάπτυξη φύλλων εις βάρος της καρποφορίας.

Φώσφορος (P):

Ο φώσφορος είναι σημαντικός για την ανάπτυξη των ριζών και την άνθηση των φυτών. Συμβάλλει στη σύνθεση του ATP (τριφωσφορική αδενοσίνη), το οποίο είναι το ενεργειακό νόμισμα των κυττάρων και απαραίτητο για πολλές βιοχημικές διεργασίες. Ο φώσφορος προάγει την κυτταρική διαίρεση και την ανάπτυξη των ιστών. Επίσης, ενισχύει την ανθεκτικότητα των φυτών σε ασθένειες και δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες. Η έλλειψη φωσφόρου μπορεί να προκαλέσει καθυστέρηση στην ανάπτυξη των φυτών, σκούρο πράσινο ή μωβ χρώμα στα φύλλα, και αδύναμη ανάπτυξη ριζών.

Κάλιο (K):

Το κάλιο παίζει ζωτικό ρόλο στη ρύθμιση της οσμωτικής πίεσης και στη διατήρηση της ισορροπίας νερού στα φυτά. Είναι απαραίτητο για τη σύνθεση των πρωτεϊνών και τη μεταφορά των θρεπτικών ουσιών στα φυτά. Το κάλιο βοηθά στη ρύθμιση των στομάτων (μικροσκοπικών ανοιγμάτων στα φύλλα) που ελέγχουν την απώλεια νερού μέσω της διαπνοής. Επίσης, ενισχύει την αντοχή των φυτών σε ασθένειες και περιβαλλοντικές καταπονήσεις, όπως το ψύχος και η ξηρασία. Η έλλειψη καλίου μπορεί να προκαλέσει καστανές άκρες και άκρες φύλλων, καθυστέρηση στην ανάπτυξη, και μείωση της ανθεκτικότητας των φυτών.

Η σωστή αναλογία και διαθεσιμότητα των μακροθρεπτικών συστατικών (N, P, K) είναι απαραίτητη για την υγιή ανάπτυξη και την υψηλή απόδοση των καλλιεργειών. Οι αγρότες πρέπει να παρακολουθούν και να ρυθμίζουν τα επίπεδα αυτών των θρεπτικών ουσιών στο έδαφος για να διασφαλίσουν τη βέλτιστη ανάπτυξη των φυτών.

Μικροθρεπτικά Συστατικά (Ιχνοστοιχεία):

Σίδηρος (Fe): Ο σίδηρος είναι απαραίτητος για τη σύνθεση της χλωροφύλλης και τη λειτουργία των ενζύμων που εμπλέκονται στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης.

Ψευδάργυρος (Zn): Ο ψευδάργυρος είναι σημαντικός για τη σύνθεση των αυξινών, οι οποίες ρυθμίζουν την ανάπτυξη των φυτών.

Μαγγάνιο (Mn): Το μαγγάνιο είναι σημαντικό για τη φωτοσύνθεση και τη σύνθεση των αμινοξέων.

Χαλκός (Cu): Ο χαλκός είναι σημαντικός για τη λειτουργία των ενζύμων και την παραγωγή του λιγνίτη, ο οποίος συμβάλλει στην αντοχή των φυτών σε ασθένειες.

Μολυβδαίνιο (Mo): Το μολυβδαίνιο είναι απαραίτητο για την αζωτοδέσμευση και τη μετατροπή του ανόργανου αζώτου σε οργανικές μορφές.

Βόριο (B): Το βόριο είναι σημαντικό για την ανάπτυξη των κυττάρων και την αναπαραγωγή των φυτών.

Χλώριο (Cl): Το χλώριο είναι απαραίτητο για τη φωτοσύνθεση και τη ρύθμιση της οσμωτικής πίεσης στα φυτά.

Νικέλιο (Ni): Το νικέλιο είναι σημαντικό για τη λειτουργία ορισμένων ενζύμων και τη μεταβολή του αζώτου.

Η επάρκεια ή η έλλειψη αυτών των στοιχείων μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Η ανάλυση των θρεπτικών συστατικών και των ιχνοστοιχείων στο έδαφος βοηθά τους αγρότες να εφαρμόσουν κατάλληλες λιπαντικές πρακτικές για τη διασφάλιση της υγείας των φυτών και της απόδοσης των καλλιεργειών[9].

Εμπλουτισμός του Εδάφους:

Η προσθήκη λιπασμάτων και άλλων εδαφοβελτιωτικών μπορεί να βοηθήσει στην εξασφάλιση της διαθεσιμότητας των απαραίτητων θρεπτικών στοιχείων για τις καλλιέργειες. Οι οργανικές ουσίες, όπως η κομπόστα, μπορούν να προσφέρουν μακροπρόθεσμα οφέλη στη γονιμότητα του εδάφους, ενώ τα ανόργανα λιπάσματα μπορούν να παρέχουν άμεση ενίσχυση των θρεπτικών στοιχείων.

Η ανάλυση και η διαχείριση των χημικών ιδιοτήτων του εδάφους είναι απαραίτητες για την επίτευξη βέλτιστων γεωργικών πρακτικών και τη διατήρηση της γονιμότητας του εδάφους. Η κατανόηση αυτών των παραμέτρων και η σωστή διαχείριση τους επιτρέπει στους αγρότες να βελτιώσουν την αποδοτικότητα των καλλιεργειών και να προάγουν τη βιωσιμότητα των αγροτικών εκμεταλλεύσεων.

Κεφάλαιο 3^ο : Μεθοδολογία

3.1 Εισαγωγή

Στο τρίτο κεφάλαιο, θα εξετάσουμε αναλυτικά τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση και την ανάλυση των παραμέτρων του εδάφους. Η ανάλυση αυτή περιλαμβάνει τη μελέτη των μεθόδων που εφαρμόστηκαν, των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων τους, καθώς και την περιγραφή των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που αναπτύξαμε για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της υγρασίας του εδάφους. Στόχος είναι να διασφαλίσουμε την ακρίβεια, την αξιοπιστία και τη συνοχή των μετρήσεων, οι οποίες είναι κρίσιμες για την επιτυχή ανάλυση και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη γονιμότητα και την υγεία του εδάφους.

Με αυτό τον τρόπο, το κεφάλαιο αυτό θα προσφέρει μια ολοκληρωμένη εικόνα της μεθοδολογίας και των τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν, παρέχοντας ταυτόχρονα τη θεωρητική βάση και τις πρακτικές εφαρμογές που απαιτούνται για την κατανόηση και την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

Μέτρηση Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας

Ο αισθητήρας ηλεκτρικής αγωγιμότητας λειτουργεί με βάση την αρχή της μέτρησης της αντίστασης του εδάφους. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ) είναι η αντίστροφη της ειδικής αντίστασης και υπολογίζεται ως:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.1)$$

όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση. Η ειδική αντίσταση του εδάφους μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$\rho = R \times \frac{L}{A} \quad (3.2)$$

όπου:

R είναι η αντίσταση του εδάφους.

L είναι το μήκος της διαδρομής του ρεύματος.

A είναι το εμβαδόν των ηλεκτροδίων.

Η μέθοδος που επιλέχθηκε για την υλοποίηση του κυκλώματος μέτρησης της αγωγιμότητας είναι η παραγωγή διπολικών παλμών εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Αυτή η μέθοδος μειώνει το φαινόμενο της πόλωσης των ηλεκτροδίων και τη διάβρωση, εξασφαλίζοντας σταθερές και ακριβείς μετρήσεις με την πάροδο του χρόνου.

Οι διπολικοί παλμοί δημιουργούνται μέσω ενός μικροελεγκτή, ο οποίος παράγει διαδοχικούς παλμούς σε διαφορετικά pins με συγκεκριμένη συχνότητα και εφαρμόζει ένα κενό μεταξύ τους για να αποφεύγεται η συνένωση των παλμών. Στη συνέχεια, η πολικότητα του ενός παλμού αλλάζει, οδηγώντας τον στην αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή. Οι παλμοί συγχωνεύονται και ενισχύονται στο επόμενο στάδιο του κυκλώματος, εξασφαλίζοντας σταθερότητα και ακρίβεια στις μετρήσεις.

Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στο έδαφος και ένα σταθερό ρεύμα περνά μέσα από αυτά. Η πτώση τάσης που παρατηρείται μεταξύ των ηλεκτροδίων μετράτε και η αντίσταση υπολογίζεται με βάση τον νόμο του Ohm:

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.3)$$

όπου V είναι η πτώση τάσης και I είναι το σταθερό ρεύμα. Η αντίσταση αυτή στη συνέχεια μετατρέπεται σε ειδική αντίσταση (ρ) και στην συνέχεια σε ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ).

Μέτρηση Υγρασίας του Εδάφους

Οι χωρητικοί αισθητήρες υγρασίας λειτουργούν με βάση την αρχή της μεταβολής της χωρητικότητας λόγω της παρουσίας νερού στο έδαφος. Η χωρητικότητα C του αισθητήρα εξαρτάται από τη διηλεκτρική σταθερά ϵ_r του υλικού μεταξύ των ηλεκτροδίων, που αυξάνεται με την παρουσία υγρασίας. Η βασική εξίσωση για τη χωρητικότητα ενός πυκνωτή είναι:

$$C = \epsilon_r \times \epsilon_0 \times \frac{A}{d} \quad (3.4)$$

όπου:

ϵ_r (διηλεκτρική σταθερά του εδάφους) αυξάνεται με την παρουσία υγρασίας.

ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού.

A είναι το εμβαδόν των ηλεκτροδίων.

d είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Η παρουσία νερού στο έδαφος αυξάνει τη διηλεκτρική σταθερά, αυξάνοντας τη χωρητικότητα του αισθητήρα. Αυτή η μεταβολή στη χωρητικότητα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, που μπορεί να αναλυθεί για να προσδιοριστεί η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό.

Οι χωρητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν ταλαντωτές που παράγουν σήμα ανάλογο με τη χωρητικότητα. Η αλλαγή στη χωρητικότητα επηρεάζει τη συχνότητα ταλάντωσης, που μετατρέπεται σε αναγνώσιμη μορφή μέσω ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Η θεωρητική προσέγγιση περιλαμβάνει την ανάλυση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και της αλληλεπίδρασής τους με το έδαφος. Όταν το έδαφος περιέχει περισσότερο νερό, η διηλεκτρική σταθερά αυξάνεται, αυξάνοντας τη χωρητικότητα του αισθητήρα. Η μόνωση των ηλεκτροδίων με υλικά χαμηλής διηλεκτρικής σταθερότητας εξασφαλίζει ότι οι μετρήσεις είναι πιο ακριβείς και αξιόπιστες.

Οι χωρητικοί αισθητήρες προσφέρουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, εύκολη εγκατάσταση και συνεχιζόμενη παρακολούθηση της υγρασίας του εδάφους. Ωστόσο, η ακρίβειά τους μπορεί να επηρεαστεί από την αλατότητα και τη θερμοκρασία του εδάφους. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, χρησιμοποιούνται συχνότητες λειτουργίας που μειώνουν την επίδραση αυτών των παραγόντων και εφαρμόζονται τεχνικές απομόνωσης των ηλεκτροδίων.

3.2 Σχεδιασμός Αισθητήρα

Ο σχεδιασμός του αισθητήρα μέτρησης αντίστασης και υγρασίας εδάφους βασίζεται σε τέσσερα ηλεκτρόδια, χωρισμένα σε δύο ζεύγη: το ένα ζεύγος για τη μέτρηση της αντίστασης και το άλλο για τη μέτρηση της χωρητικότητας. Για τη μέτρηση της αντίστασης του εδάφους, χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρόδια. Το πρώτο ηλεκτρόδιο εισάγει σταθερό ρεύμα στο έδαφος, ενώ το δεύτερο μετρά την πτώση τάσης που προκαλείται λόγω της αντίστασης του εδάφους σε σχέση με το πρώτο ηλεκτρόδιο, το οποίο λειτουργεί ως σημείο αναφοράς. Η μέτρηση της τάσης ενισχύεται από έναν τελεστικό ενισχυτή, ο οποίος χρησιμοποιεί την αντίσταση του εδάφους ως R_{gain} , με αποτέλεσμα η έξοδος του ενισχυτή να είναι ανάλογη της αντίστασης του εδάφους βάσει του νόμου του Ohm $V = I \cdot R$ [10].

Για τη μέτρηση της υγρασίας του εδάφους, το δεύτερο ζεύγος ηλεκτροδίων χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της χωρητικότητας, η οποία επηρεάζεται από την υγρασία. Τα ηλεκτρόδια αυτά είναι μονωμένα ώστε να μετριέται μόνο η χωρητικότητα που προκύπτει από το ηλεκτροστατικό πεδίο μεταξύ τους, εξασφαλίζοντας ότι η μέτρηση επηρεάζεται αποκλειστικά από την ηλεκτροστατική επίδραση και όχι από την αγωγιμότητα του εδάφους. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων που αποτελούν κάθε ζεύγος είναι 1 cm, ενώ η απόσταση μεταξύ των δύο ζευγών είναι 3 cm.

3.2.1 Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία και Θόρυβος

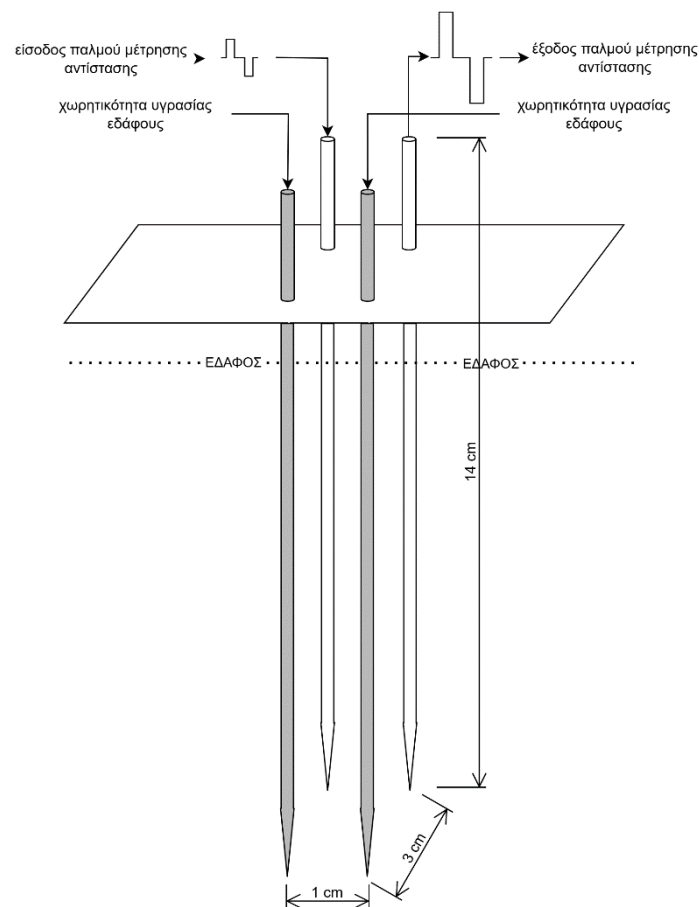
Ο νόμος του Biot-Savart περιγράφει πώς ένα ρεύμα δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από τον αγωγό. Σύμφωνα με τον νόμο του Biot-Savart, το μαγνητικό πεδίο B που δημιουργείται από ένα στοιχειώδες ρεύμα I σε απόσταση r δίνεται από τον τύπο: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ [11]. Αυτό το μαγνητικό πεδίο μπορεί να προκαλέσει θόρυβο στις μετρήσεις εάν τα ηλεκτρόδια είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, καθώς το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το ρεύμα στο ένα ζεύγος ηλεκτροδίων μπορεί να επηρεάσει το άλλο ζεύγος.

Για να ελαχιστοποιηθεί ο θόρυβος και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μετρήσεων, τα ζεύγη ηλεκτροδίων είναι γαλβανικά απομονωμένα και τοποθετημένα σε απόσταση 3 cm το ένα από το άλλο. Αυτή η απόσταση μειώνει την επίδραση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργείται κατά τη μέτρηση της αντίστασης και της υγρασίας του εδάφους, εξασφαλίζοντας ότι οι μετρήσεις είναι ακριβείς και αξιόπιστες.

Το μήκος των ηλεκτροδίων, που στην περίπτωση μας είναι 12 cm, παίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια και την αξιοπιστία των μετρήσεων της αντίστασης και της υγρασίας του εδάφους. Τα μακρύτερα ηλεκτρόδια επιτρέπουν τη μέτρηση σε μεγαλύτερο βάθος και όγκο εδάφους, παρέχοντας έτσι μια πιο αντιπροσωπευτική τιμή της συνολικής αντίστασης και υγρασίας του εδάφους. Η μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής των ηλεκτροδίων με το έδαφος βελτιώνει επίσης την αγωγιμότητα και τη σταθερότητα των μετρήσεων, μειώνοντας τις διακυμάνσεις και τις αβεβαιότητες.

Με αυτή τη διαμόρφωση, ο αισθητήρας μπορεί να παρέχει ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις της αντίστασης και της υγρασίας του εδάφους, καθιστώντας τον κατάλληλο για χρήση σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες και εφαρμογές.

Παρακάτω βλέπουμε και την αναπαράσταση του σχεδίου του αισθητήρα μέτρησης αντίστασης και υγρασίας εδάφους.



Εικόνα 3.1 Σχέδιο αισθητήρα μέτρησης αντίστασης και υγρασίας

3.3 Μέθοδοι μέτρησης Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας (EC)

3.2.2 Μέτρηση με Κορεσμένα Εκχυλίσματα

Η μέτρηση με κορεσμένα εκχυλίσματα αποτελεί μια εργαστηριακή μέθοδο για την αξιολόγηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους. Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει τη συλλογή δείγματος εδάφους και την προετοιμασία ενός εκχυλίσματος μέσω κορεσμού του δείγματος με αποσταγμένο νερό. Η διαδικασία ξεκινά με τη συλλογή ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος εδάφους από την περιοχή ενδιαφέροντος, το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται στο εργαστήριο για ανάλυση.

Στο εργαστήριο, συμπληρώνεται απιονισμένο νερό στο δείγμα εδάφους μέχρι να υπάρξει κορεσμός και να δημιουργηθεί ένα εκχύλισμα. Αυτό το εκχύλισμα περιέχει τα διαλυμένα άλατα και τα ιόντα που βρίσκονται στο έδαφος. Στη συνέχεια για την εξαγωγή του εκχυλίσματος, το δείγμα αφήνεται να σταθεί ώστε τα σωματίδια του εδάφους να κατακαθίσουν και το υγρό μέρος, το οποίο περιέχει τα διαλυμένα άλατα, συλλέγεται αναλύεται για την αγωγιμότητά του χρησιμοποιώντας ένα αγωγιμόμετρο υγρών.

Η μέτρηση της αγωγιμότητας του εκχυλίσματος παρέχει εξαιρετικά ακριβείς ενδείξεις για την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους, καθώς οι συνθήκες στο εργαστήριο είναι ελεγχόμενες και

σταθερές. Η χρήση αποσταγμένο νερού διασφαλίζει ότι μόνο τα διαλυμένα ιόντα από το έδαφος συμβάλλουν στην αγωγιμότητα του εκχυλίσματος, αποφεύγοντας έτσι εξωτερικές παρεμβολές που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα. Η ανάλυση πραγματοποιείται με τη χρήση εξειδικευμένων συσκευών με υψηλό κόστος τα οποία είναι σχεδιασμένα να μετρούν την ηλεκτρική αγωγιμότητα με υψηλή ακρίβεια[12].

Παρά την υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία που προσφέρει αυτή η μέθοδος, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα. Η διαδικασία είναι χρονοβόρα, καθώς απαιτεί τη συλλογή δειγμάτων, τη μεταφορά τους στο εργαστήριο, την προετοιμασία του εκχυλίσματος και την ανάλυση. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και εργαστηριακές συνθήκες, καθιστώντας την μη πρακτική για γρήγορες ή επιτόπιες μετρήσεις στο πεδίο.

Η μέθοδος των κορεσμένων εκχυλισμάτων χρησιμοποιείται κυρίως για επιβεβαιωτικές μετρήσεις και για την ανάλυση δειγμάτων από συγκεκριμένες περιοχές όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία. Χρησιμοποιείται ευρέως σε ερευνητικά προγράμματα και σε περιπτώσεις όπου είναι κρίσιμη η λεπτομερής και ακριβής αξιολόγηση της σύστασης του εδάφους.

3.2.3 Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή

Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή αποτελεί μια σύγχρονη και καινοτόμα μέθοδο για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους χωρίς την ανάγκη άμεσης επαφής με αυτό. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικά πεδία για να ανιχνεύσει και να μετρήσει την αντίσταση του εδάφους, προσφέροντας τη δυνατότητα ταχείας και ευρείας κάλυψης μεγάλων εκτάσεων. Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή βασίζεται στην αρχή ότι οι ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί που στέλνονται στο έδαφος αλληλοεπιδρούν με τα ιόντα και τα σωματίδια στο έδαφος, και η απόκριση του εδάφους μπορεί να καταγραφεί και να αναλυθεί για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ηλεκτρική αγωγιμότητα [13]. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη χρήση ειδικών συσκευών που εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε μια συγκεκριμένη συχνότητα. Αυτά τα κύματα διεισδύουν στο έδαφος και δημιουργούν ρεύματα επαγωγής (eddy currents) που κυκλοφορούν γύρω από τα σωματίδια του εδάφους. Η ένταση αυτών των επαγωγικών ρευμάτων εξαρτάται από την αγωγιμότητα του εδάφους. Οι αλλαγές στην ένταση και τη φάση των επιστρεφόμενων κυμάτων μπορούν να καταγραφούν και να αναλυθούν για να προσδιοριστεί η αγωγιμότητα του εδάφους σε διάφορα βάθη [13].

Η μέθοδος αυτή προσφέρει διάφορα πλεονεκτήματα, όπως η δυνατότητα μέτρησης χωρίς άμεση επαφή με το έδαφος, μειώνοντας τον κίνδυνο φθοράς του εξοπλισμού και εξαλείφοντας την ανάγκη για καλή φυσική επαφή με το έδαφος. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την κάλυψη μεγάλων περιοχών σε σύντομο χρονικό διάστημα, καθιστώντας την ιδανική για γεωργικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη συλλογή δεδομένων. Επιπλέον, επιτρέπει τη δημιουργία λεπτομερών χαρτών αγωγιμότητας του εδάφους, παρέχοντας μια οπτική αναπαράσταση των συνθηκών του εδάφους σε διαφορετικές περιοχές [13].

Ωστόσο, η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή παρουσιάζει και μειονεκτήματα. Η μέθοδος αυτή απαιτεί ειδικό εξοπλισμό που μπορεί να είναι ακριβός. Ο εξοπλισμός περιλαμβάνει συσκευές εκπομπής και καταγραφής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, καθώς και λογισμικό ανάλυσης δεδομένων. Η ερμηνεία των δεδομένων που συλλέγονται με αυτή τη μέθοδο απαιτεί εξειδικευμένη γνώση και εμπειρία, καθώς η ανάλυση των δεδομένων μπορεί να είναι περίπλοκη και να απαιτεί ειδικές δεξιότητες για την εξαγωγή ακριβών συμπερασμάτων. Επιπλέον, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να επηρεαστούν από

εξωτερικούς παράγοντες όπως οι μεταλλικές κατασκευές, τα υπόγεια καλώδια και άλλες ηλεκτρομαγνητικές πηγές, που μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια των μετρήσεων [13].

Παρά τα μειονεκτήματα, η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή είναι μια ισχυρή μέθοδος για τη μέτρηση της αγωγιμότητας του εδάφους, προσφέροντας γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα σε μεγάλες εκτάσεις. Η δυνατότητα δημιουργίας λεπτομερών χαρτών αγωγιμότητας είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη γεωργία ακριβείας, όπου οι αγρότες μπορούν να εντοπίσουν περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά και να προσαρμόσουν τις καλλιεργητικές πρακτικές τους ανάλογα [13].

3.2.4 Μέτρηση στο Πεδίο με Ηλεκτρικά Αγωγιμόμετρα Εδάφους

Η μέτρηση στο πεδίο με ηλεκτρικά αγωγιμόμετρα εδάφους είναι μία από τις πιο κοινές μεθόδους για την άμεση και αξιόπιστη μέτρηση της αγωγιμότητας του εδάφους. Αυτές οι φορητές συσκευές τοποθετούνται απευθείας στο έδαφος για να μετρήσουν την ηλεκτρική αντίσταση, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική αγωγιμότητα. Οι συσκευές αυτές απαιτούν καλή επαφή των ηλεκτροδίων με το έδαφος για να παρέχουν ακριβή δεδομένα. Αυτή η μέθοδος είναι γρήγορη και ευέλικτη, καθιστώντας την βολική για την παρακολούθηση μεγάλων εκτάσεων.

Οι συσκευές μέτρησης αγωγιμότητας εδάφους με ηλεκτρόδια έχουν διάφορες μεθόδους μέτρησης, καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Συνήθως αποτελούνται από δύο μεταλλικές ράβδους, κατά προτίμηση από ανοξείδωτο ατσάλι για να αποφευχθεί η μεγάλη διάβρωση του αισθητήρα.

3.2.5 Μέθοδος Συνεχούς Ρεύματος (DC)

Η πρώτη και πιο απλή μέθοδος μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με φορητή συσκευή γίνεται εφαρμόζοντας μια DC τάση πάνω στα ηλεκτρόδια, έχοντας σταθερό ρεύμα. Με τον νόμο του Ohm μπορούμε να βρούμε την αντίσταση του εδάφους $R = \frac{V}{I}$. Αυτή η μέθοδος έχει σχετικά μικρό κόστος υλοποίησης, είναι γρήγορη και εύκολη στην κατασκευή, αλλά προσφέρει κακής ποιότητας μετρήσεις λόγω της πόλωσης των ηλεκτροδίων, που προκύπτει από τη μεταφορά των ιόντων του εδάφους στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Με την πάροδο του χρόνου, εμφανίζεται και οξείδωση λόγω της ηλεκτρόλυσης, που μειώνει περαιτέρω την ακρίβεια της μέτρησης [14].

3.2.6 Μέθοδος Εναλλασσόμενου Ρεύματος με Ημιτονοειδές Σήμα (AC Sine Wave)

Μια άλλη μέθοδος για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με ηλεκτρόδια είναι η παραγωγή ημιτονοειδούς AC σήματος σταθερού ρεύματος και η εφαρμογή αυτού του σήματος στα ηλεκτρόδια. Κατά την εφαρμογή του αισθητήρα στο έδαφος, ένα ημιτονοειδές σήμα περνά από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο, δημιουργώντας πτώση τάσης στα ηλεκτρόδια. Αυτή μπορεί να μετρηθεί με εξειδικευμένα κυκλώματα και, στη συνέχεια, να βρεθεί η αντίσταση του εδάφους με τον νόμο του Ohm $R = \frac{V}{I}$, και να μετατραπεί σε αγωγιμότητα με τον τύπο $\sigma = \frac{1}{\rho}$. Αυτή η μέθοδος δεν δημιουργεί πόλωση στα ηλεκτρόδια, προσφέροντας πιο σταθερές μετρήσεις και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των ηλεκτροδίων. Ωστόσο, αυξάνει την πολυπλοκότητα και το κόστος κατασκευής και σχεδίασης των κυκλωμάτων, καθώς απαιτούνται εξειδικευμένοι τελεστικοί ενισχυτές και άλλα παθητικά υλικά [15].

3.2.7 Μέθοδος Διπολικών Παλμών AC

Η τρίτη μέθοδος μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με ηλεκτρόδια χρησιμοποιεί διπολικούς παλμούς AC χαμηλής συχνότητας. Αυτή η μέθοδος εξαλείφει το φαινόμενο της πόλωσης των

ηλεκτροδίων. Όπως και στις προηγούμενες μεθόδους, χρησιμοποιούνται εξειδικευμένα κυκλώματα για τη δημιουργία σταθερού ρεύματος που διαρρέει τα ηλεκτρόδια, ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η αντίσταση του εδάφους και στη συνέχεια η ηλεκτρική αγωγιμότητα σε dS/m. Αυτή η μέθοδος απαιτεί υψηλής ακρίβειας τελεστικούς ενισχυτές και εξειδικευμένους αλγόριθμους για την παραγωγή των διπολικών παλμών. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η εξάλειψη της πόλωσης των ηλεκτροδίων και η μεγιστοποίηση του κύκλου ζωής των ηλεκτροδίων[24]. Ωστόσο, έρχεται με το μειονέκτημα της αυξημένης πολυπλοκότητας των αλγορίθμων και του κόστους των αναλογικών και ψηφιακών κυκλωμάτων που απαιτούνται για την υλοποίησή της[16].

Για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους από την αντίσταση, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι τύποι:

Υπολογισμός της αντίστασης $R = \frac{V}{I}$ όπου V είναι η πτώση τάσης και I το σταθερό ρεύμα.

Επιφάνεια επαφής ηλεκτροδίου $A : A = \pi * r * L$

Λόγω της παράλληλης στοίχισης των ηλεκτροδίων μόνο οι εσωτερικές πλευρές των ηλεκτροδίων που είναι απέναντι η μία με την άλλη παίζουν σημαντικό ρόλο στην μεταφορά ρεύματος για αυτό λαμβάνουμε υπόψιν μόνο την μισή επιφάνεια των ηλεκτροδίων.

Ειδική αντίσταση ηλεκτροδίων ρ σε $\Omega \cdot m$: $\rho = R * \left(\frac{A}{l}\right)$

Μετατροπή της αντίστασης σε αγωγιμότητα σ : $\sigma = \frac{1}{\rho}$

Συνοψίζοντας, οι μέθοδοι μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο πεδίο περιλαμβάνουν διάφορες τεχνικές, καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, από την απλή μέθοδο συνεχούς ρεύματος μέχρι τις πιο προηγμένες τεχνικές με ημιτονοειδή σήματα και διπολικούς παλμούς AC. Κάθε μέθοδος προσφέρει διαφορετικά επίπεδα ακρίβειας, πολυπλοκότητας και κόστους, επιτρέποντας την προσαρμογή στις ανάγκες και τους περιορισμούς της εκάστοτε εφαρμογής.

3.4 Σχεδίαση κυκλώματος μέτρησης αγωγιμότητας εδάφους

Η μέθοδος με την οποία καταλήξαμε να υλοποιήσουμε το κύκλωμα μέτρησης αγωγιμότητας είναι με τη μέθοδο παραγωγής διπολικών παλμών εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Αυτή η μέθοδος επιλέχτηκε κυρίως με βάση τα εξής κριτήρια :

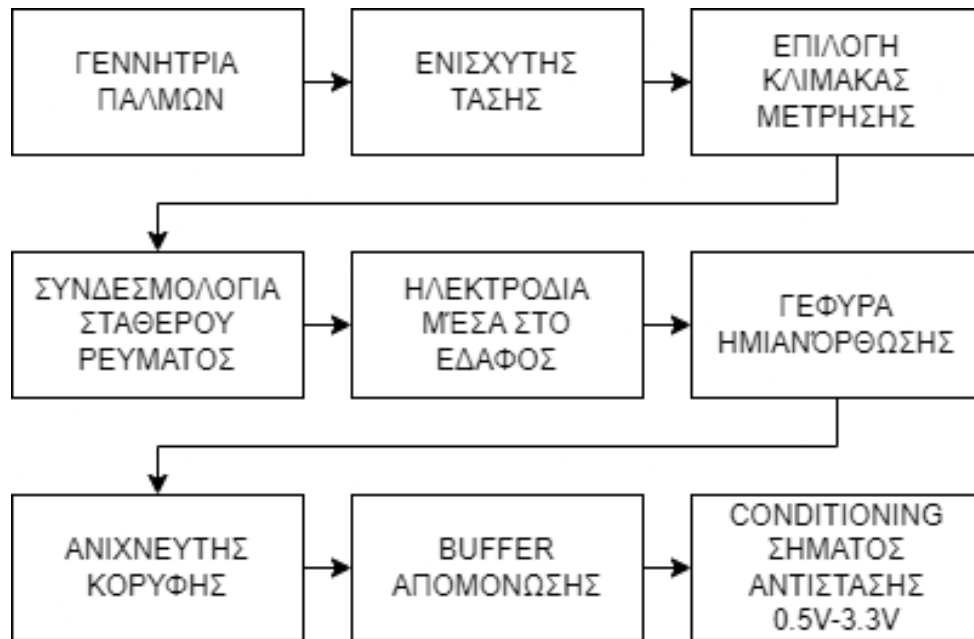
Σταθερές μετρήσεις στην πάροδο του Χρόνου: Η χρήση διπολικών παλμών εναλλασσόμενου ρεύματος μειώνει το φαινόμενο της πόλωσης των ηλεκτροδίων που συχνά παρατηρείται στις μεθόδους συνεχούς ρεύματος (DC). Η εναλλαγή των παλμών μεταξύ θετικών και αρνητικών τάσεων εξαλείφει τη συσσώρευση ιόντων στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων με αποτέλεσμα καλύτερες και σταθερότερες μετρήσεις.

Ακρίβεια των μετρήσεων: Οι διπολικοί παλμοί επιτρέπουν τη μέτρηση της αγωγιμότητας με μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς μειώνουν την πόλωση των ηλεκτροδίων και την απόθεση ιόντων. Αυτό οδηγεί σε πιο αξιόπιστες και ακριβείς μετρήσεις, απαραίτητες για την αξιολόγηση της ποιότητας και της γονιμότητας του εδάφους.

Επιμήκυνση της ζωής των ηλεκτροδίων: Η μέθοδος με διπολικούς παλμούς AC μειώνει την ηλεκτροχημική διάβρωση των ηλεκτροδίων. Η συνεχής εναλλαγή των παλμών αποτρέπει την

υπερβολική φθορά των ηλεκτροδίων, επεκτείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής τους και μειώνοντας την ανάγκη για συχνή αντικατάσταση.

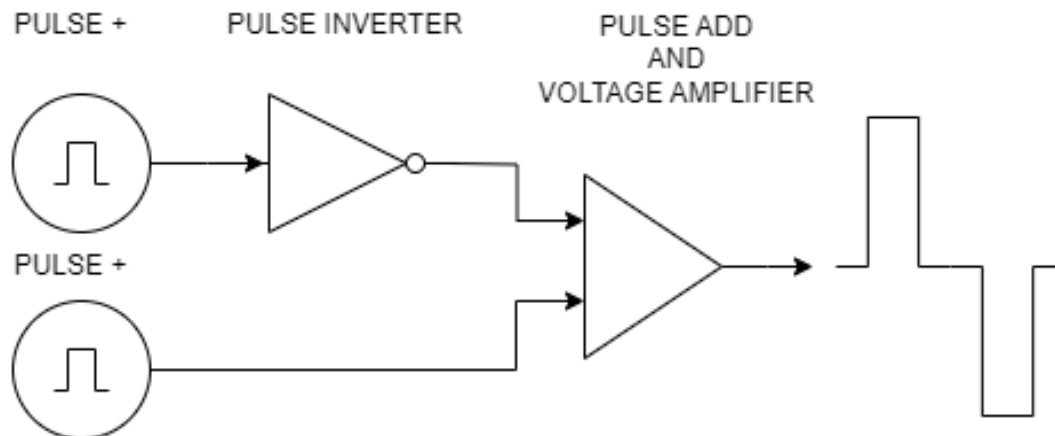
Στο κύκλωμα που δημιουργήσαμε για την μέτρηση της αντίστασης του εδάφους και κατ' επέκταση της αγωγιμότητας του εδάφους χωρίζεται σε εννέα διαφορετικά σκέλη. Το κάθε σκέλος αντιπροσωπεύει ένα κομμάτι του κυκλώματος που εκτελεί συγκεκριμένη λειτουργία για την μέτρηση της αντίστασης του εδάφους. Παρακάτω θα κατηγοριοποιήσουμε και θα αναλύσουμε αυτά τα εννέα σκέλη για να αντιληφθούμε καλύτερα τον τρόπο λειτουργίας του κυκλώματος μέτρησης.



Εικόνα 3.2 Διάγραμμα λειτουργίας κυκλώματος μέτρησης αντίστασης

Σκέλος 1: Γεννήτρια Διπολικών Παλμών

Η γεννήτρια διπολικών παλμών παράγει εναλλασσόμενα ρεύματα χαμηλής ή υψηλής συχνότητας που εφαρμόζονται στα ηλεκτρόδια. Στο κύκλωμα του μικροελεγκτή δημιουργούμε δυο διαδοχικούς παλμούς σε διαφορετικά pins με συγκεκριμένη συχνότητα εφαρμόζοντας ένα κενό μεταξύ τους έτσι ώστε να μην υπάρχει περίπτωση να γίνει συνένωση των παλμών. Στη συνέχεια αλλάζουμε την πολικότητα του ενός παλμού οδηγώντας τον στην αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή. Έπειτα συγχωνεύουμε το σήμα του διπολικού παλμού στο επόμενο στάδιο του τελεστικού ενισχυτή.



Εικόνα 3.3 Διάγραμμα γεννήτριας διπολικών παλμών.

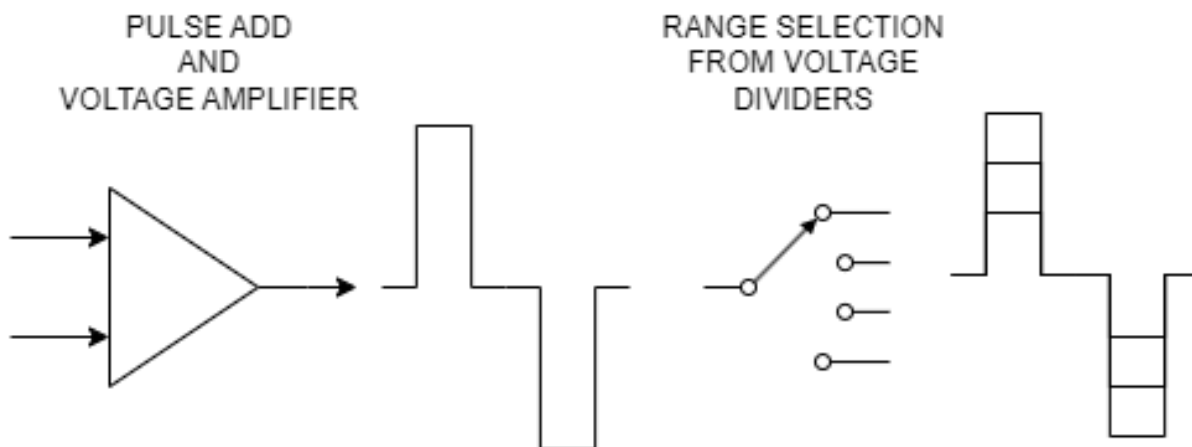
Αυτή η τεχνική των διπολικών παλμών εξασφαλίζει τη σταθερότητα των μετρήσεων με την πάροδο του χρόνου, αποτρέποντας την πόλωση και τη συσσώρευση ιόντων στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων που έχει ως αποτέλεσμα να προκαλείτε drift στις μετρήσεις μας.

Σκέλος 2: Συγχώνευση παλμών και ενίσχυση τάσης

Ο δεύτερος τελεστικός ενισχυτής διασφαλίζει την δημιουργία του διπολικού παλμού προσθέτοντας τους δύο παλμούς μέσω της συνδεσμολογίας του τελεστικού ενισχυτή ως voltage adder και στην συνέχεια για να μπορέσουμε να έχουμε την μέγιστη δυνατή τάση ώστε να καλύψουμε την πτώση τάσης που θα δημιουργηθεί από τους διαιρέτες τάσης για την επιλογή της κλίμακας ενισχύουμε το σήμα μας στο μέγιστο δηλαδή στις τάσης τροφοδοσίας, στην περίπτωση μας είναι τα $\pm 8V$.

Σκέλος 3: Επιλογή κλίμακας

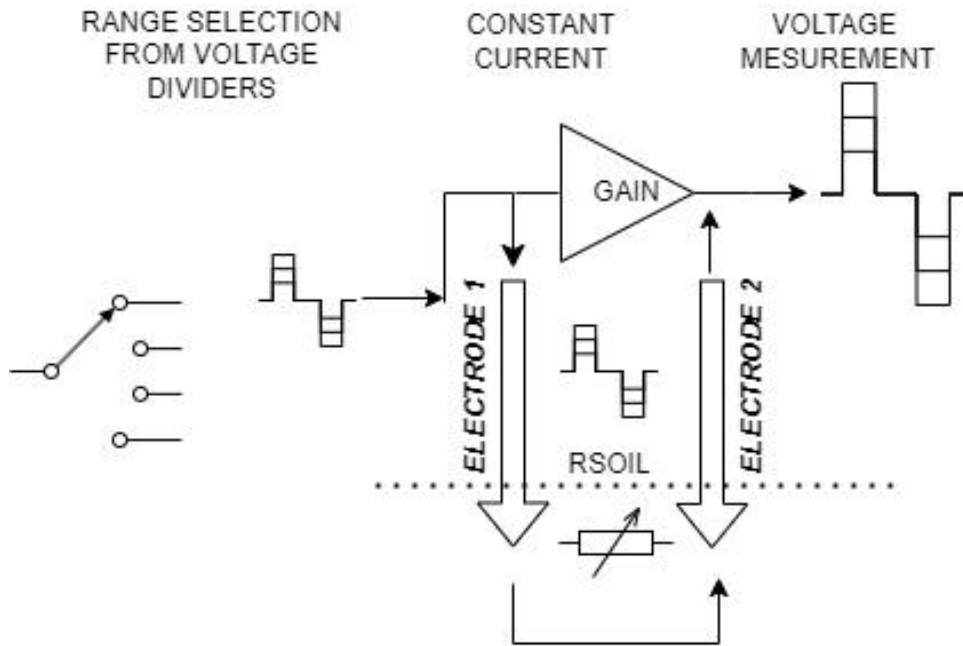
Στο σημείο αυτό χρειάστηκε να δημιουργήσουμε διαφορετικές κλίμακες έτσι ώστε να έχουμε μεγαλύτερο εύρος μέτρησης της αντίστασης. Για να το επιτύχουμε, χρειαστήκαμε έναν επιλεκτικό διακόπτη έτσι ώστε να μεταφέρουμε το σήμα μας από το προηγούμενο στάδιο που έχει ενισχυθεί στον κατάλληλο διαιρέτη τάσης που έχουμε δημιουργήσει (1, 0.5, 0.01, 0.001) για να μπορέσουμε να ρίξουμε την τάση στα επιθυμητά επίπεδα ώστε να δεχθεί την ανάλογη ενίσχυση από το επόμενο στάδιο.



Εικόνα 3.4 Διάγραμμα συγχώνευσης παλμών και επιλογή κλίμακας.

Σκέλος 4-5: Συνδεσμολογία σταθερού ρεύματος και Ηλεκτρόδια:

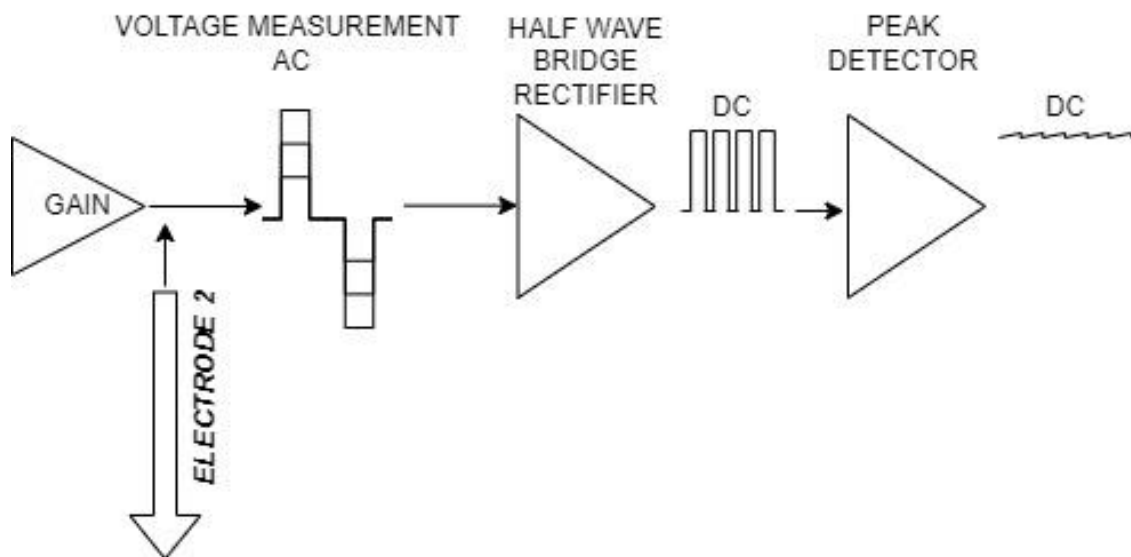
Σε αυτό το σκέλος δημιουργούμε συνθήκες σταθερού ρεύματος με τον τελεστικό ενισχυτή στην συγκεκριμένη συνδεσμολογία (constant current) και στην συνέχεια οδηγούμε το σήμα μέσα από τα ηλεκτρόδια. Έτσι χρησιμοποιούμε την αντίσταση του εδάφους ως μεταβαλλόμενη παράμετρο στο σχέδιο μας και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρατηρούμε στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή αλλαγή στην τάση η οποία ισούται με την πτώση τάσης ανάμεσα στα ηλεκτρόδια. Αυτή η αλλαγή οφείλεται στην σύνθετη αντίσταση του εδάφους και το σταθερό ρεύμα που διαρρέει το έδαφος από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο. Με αυτήν την μέθοδο μπορούμε να αντικατοπτρίσουμε την αλλαγή της σύνθετης αντίστασης του εδάφους σε τάση της τάξης $\pm 8V$.



Εικόνα 3.5 Διάγραμμα σταθερού ρεύματος και ενίσχυσης τάσης μέσω της αντίστασης του εδάφους.

Σκέλος 6: Ημιανόρθωση σήματος

Αυτό το σκέλος επεξεργάζεται το σήμα από την εκτίμηση της σύνθετης αντίστασης που αντιστοιχείται σε τάση από το προηγούμενο στάδιο και μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) σε συνεχές ρεύμα (DC) έτσι ώστε να μπορούμε να το παραμετροποιήσουμε στην συνέχεια και να πάρουμε την επιθυμητή έξοδο.



Εικόνα 3.6 Διάγραμμα Ημιανόρθωσης σήματος και ανιχνευτή κορυφής

Σκέλος 7: Ανιχνευτής κορυφής

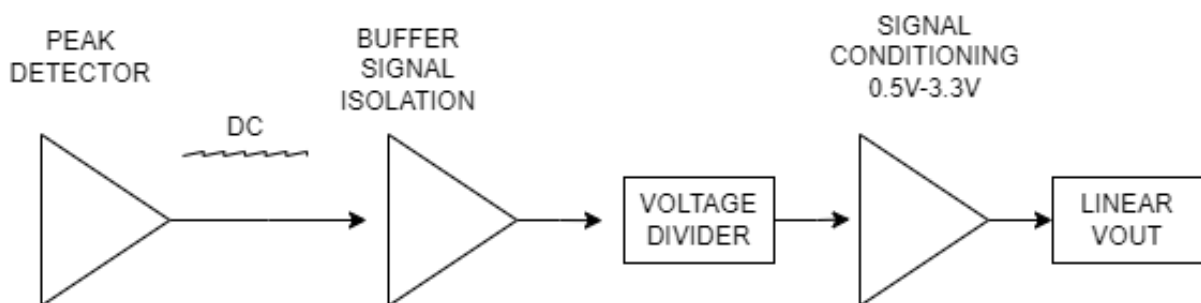
Ο ανιχνευτής κορυφής χρησιμοποιείται στην περίπτωσή μας για να μπορέσουμε να πάρουμε τα μέγιστα των τάσεων που παράγονται από την ημιανόρθωση και δεύτερον για να σταθεροποιήσουμε την τάση έτσι ώστε να μην υπάρχει μεγάλη κυμάτωση στο σήμα μας.

Σκέλος 8: Buffer απομόνωσης

Ο buffer σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιείται για να απομονώσει το ανιχνευτή κορυφής με το επόμενο στάδιο. Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιούσαμε buffer θα υπήρχε ένα μικρό ρεύμα διαρροής προς το ground και θα μας άλλαζε την σταθερά εκφόρτωσης του πυκνωτή.

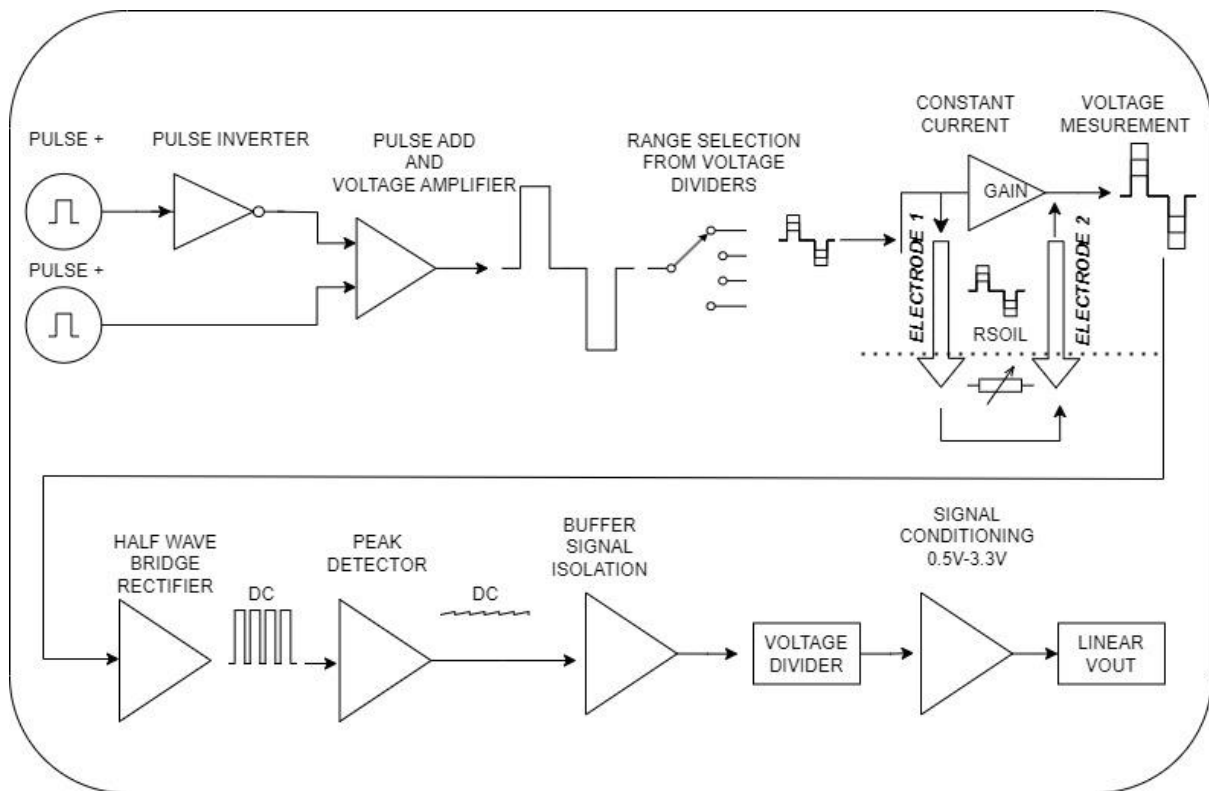
Σκέλος 9: Ενισχυτής Εξόδου

Τέλος οδηγούμε το σήμα σε ένα κύκλωμα το οποίο κάνει conditioning και αποτελείται αρχικά από έναν buffer για την απομόνωση του διαιρέτη τάσης έτσι ώστε να ρίξουμε την τάση στο ελάχιστο για να μπορέσουμε να θέσουμε ένα κατώτατο όριο για την μέτρηση της ελάχιστης αντίστασης. Στη συνέχεια υπάρχει ένας τελεστικός ενισχυτής ο οποίος ρυθμίζεται στα επίπεδα που χρειαζόμαστε έτσι ώστε να παράγουμε την επιθυμητή έξοδο. Με αυτήν την μέθοδο δημιουργούμε μια τάση που αντιπροσωπεύει την ελάχιστη αντίσταση στα 0.5V έως την μέγιστη αντίσταση στα 3.3V. Η τάση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε κάποιον μικροελεγκτή για την μέτρηση την αντίστασης και κατ' επέκταση την μέτρηση της αγωγιμότητας. Στο τέλος υπάρχει και ένας ανιχνευτής κορυφής για να έχουμε σταθερή μέτρηση στην έξοδο.



Εικόνα 3.7 Διάγραμμα Buffer και Conditioning σήματος.

Με τη χρήση αυτών των εννέα σκελών, το κύκλωμα μέτρησης αγωγιμότητας παρέχει σταθερές και ακριβείς μετρήσεις, εξασφαλίζοντας τη μακροχρόνια χρήση των ηλεκτροδίων και την αξιοπιστία των δεδομένων που συλλέγονται από το έδαφος. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την αποφυγή προβλημάτων που σχετίζονται με την πόλωση των ηλεκτροδίων και τη συσσώρευση ιόντων, τα οποία είναι κοινά σε παραδοσιακές μεθόδους συνεχούς ρεύματος (DC). Η μέθοδος διπολικών παλμών AC εξασφαλίζει ότι τα ηλεκτρόδια παραμένουν καθαρά και λειτουργικά για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, μειώνοντας την ανάγκη για συχνή συντήρηση ή αντικατάσταση.



Εικόνα 3.8 Ολικό διάγραμμα κυκλώματος μέτρησης αντίστασης εδάφους.

Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της ποιότητας και της γονιμότητας του εδάφους. Η σταθερότητα στις μετρήσεις διασφαλίζει ότι οι αγρότες και οι ερευνητές μπορούν να λαμβάνουν αξιόπιστα δεδομένα για την ανάλυση των παραμέτρων του εδάφους, όπως η συγκέντρωση διαλυμένων ιόντων, η αλατότητα και η υγρασία. Αυτό μπορεί να βοηθήσει ακόμη και στην συνεχή παρακολούθηση διαφόρων σημείων καθώς δεν υπάρχει το φαινόμενο της ολίσθησης των μετρήσεων λόγω της μεθόδου που χρησιμοποιούμε.

Επιπλέον, το κύκλωμα μέτρησης είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας άμεση ανάδραση για τις συνθήκες του εδάφους. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για εφαρμογές γεωργίας ακριβείας, όπου οι αλλαγές στις συνθήκες του εδάφους μπορούν να εντοπιστούν και να αντιμετωπιστούν άμεσα. Η δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης του εδάφους χωρίς την ανάγκη για δαπανηρές και χρονοβόρες εργαστηριακές αναλύσεις αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για τους αγρότες και τους γεωπόνους.

Το κύκλωμα είναι επίσης σχεδιασμένο να είναι ευέλικτο, επιτρέποντας τη χρήση του σε διάφορους τύπους εδάφους και συνθήκες. Η δυνατότητα προσαρμογής της κλίμακας μέτρησης και της ενίσχυσης της τάσης καθιστά το σύστημα κατάλληλο για διαφορετικές γεωργικές εφαρμογές, από την ανάλυση αργιλοδών εδαφών μέχρι τα αμμώδη εδάφη.

Συνολικά, η υλοποίηση αυτού του κυκλώματος μέτρησης αγωγιμότητας αντιπροσωπεύει μια σημαντική πρόοδο στη μέτρηση των παραμέτρων του εδάφους, παρέχοντας ακριβείς, αξιόπιστες και σταθερές μετρήσεις που μπορούν να βελτιώσουν τις γεωργικές πρακτικές και να υποστηρίξουν τη βιώσιμη ανάπτυξη.

3.5 Μέθοδοι Μέτρησης της Υγρασίας

Η μέτρηση της υγρασίας του εδάφους είναι κρίσιμη για την κατανόηση και διαχείριση των αγροτικών καλλιεργειών. Η σωστή παρακολούθηση της υγρασίας βοηθά τους αγρότες να προσαρμόζουν τις μεθόδους άρδευσης και να ανεβάζουν την απόδοση των καλλιεργειών. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τη μέτρηση της υγρασίας του εδάφους, καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

3.5.1 Μέθοδος Βαρυμετρικής Ανάλυσης

Η βαρυμετρική ανάλυση είναι η παραδοσιακή μέθοδος μέτρησης της υγρασίας του εδάφους. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει τη συλλογή ενός δείγματος εδάφους, το οποίο ζυγίζεται πριν και μετά την ξήρανση σε φούρνο στους 105°C. Η διαφορά στη μάζα του δείγματος, πριν και μετά την ξήρανση, δίνει την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό. Παρόλο που αυτή η μέθοδος είναι πολύ ακριβής, είναι χρονοβόρα και απαιτεί εργαστηριακές συνθήκες, κατατάσσοντάς την στις λιγότερο πρακτικές μεθόδους για συχνές μετρήσεις[17].

3.5.2 Μέθοδος Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής (TDR)

Η μέθοδος της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, γνωστή και ως Time Domain Reflectometry (TDR), χρησιμοποιεί την αντανάκλαση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για τη μέτρηση της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό. Ο αισθητήρας TDR εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα μέσω του εδάφους και μετρά τον χρόνο επιστροφής τους. Αυτός ο χρόνος σχετίζεται άμεσα με την υγρασία του εδάφους. Η μέθοδος TDR είναι ακριβής και γρήγορη, αλλά απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και γνώση για την ερμηνεία των δεδομένων, καθιστώντας την ακριβότερη[18].

3.5.3 Αισθητήρες Αντίστασης

Οι αισθητήρες αντίστασης λειτουργούν με τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους, η οποία αλλάζει ανάλογα με την υγρασία. Το νερό στο έδαφος είναι αγωγίμο και μειώνει την αντίσταση του εδάφους. Αυτοί οι αισθητήρες αποτελούνται από ζεύγη ηλεκτροδίων που τοποθετούνται στο έδαφος. Είναι απλοί στη χρήση και χαμηλού κόστους, αλλά η ακρίβειά τους μπορεί να επηρεαστεί από την πόλωση και τη διάβρωση των ηλεκτροδίων, ειδικά σε αλκαλικά ή αργιλώδη εδάφη[19].

3.5.4 Χωρητικοί Αισθητήρες Υγρασίας

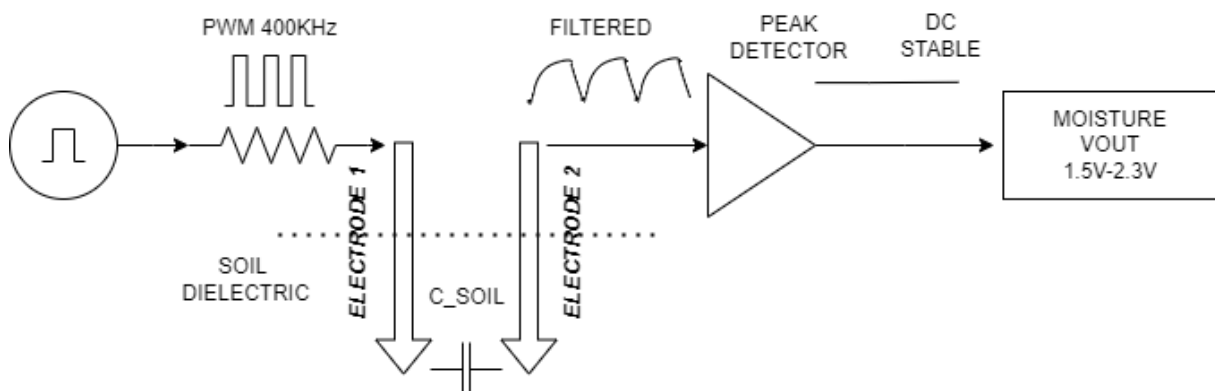
Οι χωρητικοί αισθητήρες υγρασίας λειτουργούν με την αρχή της μεταβολής της χωρητικότητας λόγω της παρουσίας νερού στο έδαφος. Όταν η περιεκτικότητα στο νερό αλλάζει, η χωρητικότητα του αισθητήρα αλλάζει επίσης. Αυτή η μεταβολή μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο αντιπροσωπεύει την υγρασία του εδάφους. Οι χωρητικοί αισθητήρες είναι ιδανικοί για μετρήσεις στο πεδίο. Είναι εύκολοι στην εγκατάσταση και τη χρήση, με χαμηλό κόστος και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, αν και η ακρίβεια τους μπορεί να επηρεαστεί από την αλατότητα και τη θερμοκρασία του εδάφους.

Οι χωρητικοί αισθητήρες υγρασίας αποτελούνται συνήθως από δύο ή περισσότερα ηλεκτρόδια που τοποθετούνται στο έδαφος. Τα ηλεκτρόδια αυτά δημιουργούν ένα ηλεκτροστατικό πεδίο μεταξύ τους. Η μεταβολή της περιεκτικότητας του νερού στο έδαφος αλλάζει τη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους, επηρεάζοντας την χωρητικότητα του αισθητήρα. Αυτή η αλλαγή στη χωρητικότητα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο μπορεί να μετρηθεί και να αναλυθεί. Οι αισθητήρες λειτουργούν σε συγκεκριμένες συχνότητες, συνήθως μεταξύ kHz και MHz, για να διασφαλιστεί η ακρίβεια των

μετρήσεων. Η υψηλή συχνότητα μειώνει την επίδραση της αλατότητας και των μεταβολών της θερμοκρασίας, βελτιώνοντας την ακρίβεια των μετρήσεων υγρασίας.

Η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους, η οποία είναι ένας δείκτης της ικανότητας του εδάφους να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό. Το νερό έχει υψηλή διηλεκτρική σταθερά (~80) F/m, ενώ τα υπόλοιπα συστατικά του εδάφους (άμμος, άργιλος, αέρας) έχουν χαμηλότερες διηλεκτρικές σταθερές (3-5). Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να αντιληφθούμε την ποσότητα του νερού στο έδαφος. Όταν η υγρασία του εδάφους αυξάνεται, η συνολική διηλεκτρική σταθερά του εδάφους αυξάνεται, γεγονός που προκαλεί αύξηση της χωρητικότητας του αισθητήρα.

Ένας χωρητικός αισθητήρας υγρασίας εδάφους χαμηλού κόστους αναπτύχθηκε για να παρέχει αξιόπιστες μετρήσεις υγρασίας για χρήση σε συστήματα διαχείρισης άρδευσης θερμοκηπίου. Ο αισθητήρας βασίζεται σε δύο παράλληλες αγώγιμες πλάκες που δημιουργούν ένα ηλεκτρικό πεδίο στο έδαφος. Καθώς η υγρασία του εδάφους αυξάνεται, η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους επίσης αυξάνεται, προκαλώντας αύξηση της χωρητικότητας του αισθητήρα. Η συσκευή συνδέεται με ένα κύκλωμα που χρησιμοποιεί το ολοκληρωμένο κύκλωμα χρονισμού 555 για τη δημιουργία ενός σήματος εξόδου που αντιστοιχεί στο επίπεδο υγρασίας. Ο σχεδιασμός του αισθητήρα επιτρέπει χαμηλό κόστος κατασκευής και εύκολη ενσωμάτωση σε συστήματα άρδευσης, καθιστώντας τον μια αποδοτική λύση για την παρακολούθηση της υγρασίας του εδάφους [20].



Εικόνα 3.9 Διάγραμμα μέτρησης υγρασίας εδάφους.

3.6 Μέθοδοι Μέτρησης Θερμοκρασίας του Εδάφους

Η μέτρηση της θερμοκρασίας του εδάφους αποτελεί σημαντική διαδικασία για την εκτίμηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι μέτρησης της θερμοκρασίας του εδάφους, καθεμία από τις οποίες έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

3.6.1 Αντιστάσεις Θερμοκρασίας (RTDs)

Οι αντιστάσεις θερμοκρασίας (RTDs) είναι γνωστές για την υψηλή ακρίβεια και σταθερότητά τους. Αυτές οι συσκευές αποτελούνται από υλικά, όπως η πλατίνα, που έχουν προβλέψιμη και ακριβή μεταβολή της αντίστασης με τη θερμοκρασία. Είναι κατάλληλες για συνεχείς μετρήσεις, παρέχοντας αξιόπιστα δεδομένα σε μακροχρόνιες εφαρμογές. Ωστόσο, οι RTDs απαιτούν εξωτερική ενέργεια για τη λειτουργία τους και μπορούν να είναι δαπανηρές, λόγω του κόστους των υλικών και της κατασκευής

τους. Παρά την ακρίβειά τους, η χρήση RTDs μπορεί να περιορίζεται σε εφαρμογές όπου η ανάγκη για ακριβείς και σταθερές μετρήσεις αντισταθμίζει το κόστος[21].

3.6.2 Θερμοστοιχεία (Thermocouples)

Τα θερμοστοιχεία προσφέρουν ευρύ φάσμα μέτρησης θερμοκρασιών και γρήγορη απόκριση, καθιστώντας τα κατάλληλα για δυναμικές μετρήσεις. Λειτουργούν με βάση τη θερμοηλεκτρική επίδραση, παράγοντας μια τάση που είναι ανάλογη της θερμοκρασίας. Τα θερμοστοιχεία είναι ανθεκτικά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες. Ωστόσο, απαιτούν βαθμονόμηση και εξωτερική ενέργεια για την ακριβή μέτρηση της τάσης. Η ακρίβειά τους μπορεί να επηρεαστεί από τις συνδέσεις και τις συνθήκες περιβάλλοντος, καθώς οι μεταβολές στη θερμοκρασία των συνδέσεων μπορούν να προκαλέσουν σφάλματα στις μετρήσεις[22].

3.6.3 Ψηφιακοί Αισθητήρες Θερμοκρασίας

Οι ψηφιακοί αισθητήρες θερμοκρασίας είναι ακριβείς και εύκολοι στη χρήση, με δυνατότητα σύνδεσης σε συστήματα καταγραφής δεδομένων. Υποστηρίζουν ψηφιακή μετάδοση δεδομένων, γεγονός που μειώνει τις πιθανότητες σφαλμάτων κατά την αναλογική μετατροπή. Αυτοί οι αισθητήρες, όπως ο DS18B20, λειτουργούν με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα σε αυτόματα συστήματα παρακολούθησης. Η ψηφιακή έξοδος επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωση με μικροελεγκτές και άλλα ψηφιακά συστήματα, διευκολύνοντας την αυτοματοποίηση της συλλογής και ανάλυσης δεδομένων. Ωστόσο, μπορεί να είναι ευαίσθητοι σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια των μετρήσεων σε περιβάλλοντα με υψηλό ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο.

Για την παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η χρήση του ψηφιακού αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας διαθέτει εξαιρετικά χαρακτηριστικά που τον καθιστούν ιδανικό για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του εδάφους.

Ο αισθητήρας DS18B20 είναι γνωστός για την υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία του. Παρέχει μετρήσεις θερμοκρασίας με ακρίβεια $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ στο εύρος από -10°C έως $+85^{\circ}\text{C}$, κάνοντάς τον κατάλληλο για εφαρμογές σε περιβαλλοντικές και γεωργικές μελέτες. Η ευκολία χρήσης του ενισχύεται από το πρωτόκολλο One Wire, το οποίο επιτρέπει την απλή σύνδεση και επικοινωνία με μικροελεγκτές και συστήματα καταγραφής δεδομένων. Το πρωτόκολλο One Wire μειώνει τις απαιτήσεις καλωδίωσης, επιτρέποντας τη σύνδεση πολλαπλών αισθητήρων σε μία γραμμή δεδομένων, καθιστώντας το σύστημα πιο αποδοτικό και εύκολο στη συντήρηση. Επιπλέον, ο αισθητήρας είναι ανθεκτικός και μπορεί να λειτουργήσει σε περιβάλλοντα με υγρασία, εξασφαλίζοντας μακροχρόνια και αξιόπιστη λειτουργία. Η ψηφιακή έξοδος του DS18B20 μειώνει τις πιθανότητες σφαλμάτων που σχετίζονται με την αναλογική μετατροπή, παρέχοντας ακριβή και αξιόπιστα δεδομένα για την ανάλυση.

Η χρήση του αισθητήρα DS18B20 επιτρέπει την ακριβή και αξιόπιστη μέτρηση της θερμοκρασίας του εδάφους, παρέχοντας δεδομένα για την κατανόηση των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους και τη βελτίωση της διαχείρισης των καλλιεργειών. Η δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης και καταγραφής των δεδομένων θερμοκρασίας σε πραγματικό χρόνο συμβάλλει στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση των γεωργικών πρακτικών και την ενίσχυση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών[23].

Κεφάλαιο 4^ο :Υλοποίηση

4.1 Προσομοίωση Αναλογικού Κυκλώματος Αγωγιμότητας

Ο στόχος της προσομοίωσης είναι να επαληθεύσουμε τη λειτουργία του κυκλώματος όσον αφορά τη μέθοδο μέτρησης της αντίστασης και την επαλήθευσή αυτής καθώς και το εύρος μέτρησης που μπορούμε να επιτύχουμε. Η προσομοίωση επιτρέπει την αξιολόγηση της απόδοσης του κυκλώματος πριν από την πραγματική κατασκευή του, μειώνοντας έτσι τους κινδύνους αποτυχίας και εξοικονομώντας χρόνο και πόρους.

Η προσομοίωση αποτελεί ένα κρίσιμο στάδιο στη διαδικασία ανάπτυξης του κυκλώματος, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα λεπτομερούς ανάλυσης και αξιολόγησης της απόδοσης χωρίς την ανάγκη για φυσική κατασκευή και δοκιμή. Μέσω της προσομοίωσης, μπορούμε να εντοπίσουμε και να διορθώσουμε πιθανά προβλήματα σχεδίασης, να βελτιστοποιήσουμε την απόδοση των επιμέρους τμημάτων του κυκλώματος και να διασφαλίσουμε ότι το τελικό προϊόν θα πληροί τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Επαλήθευση Λειτουργίας των Τελεστικών Ενισχυτών:

Παραγωγή και Σύνθεση Διπολικών Παλμών: Επαλήθευση της λειτουργίας των τελεστικών ενισχυτών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και τη σύνθεση των διπολικών παλμών, εξασφαλίζοντας ότι οι παλμοί είναι σταθεροί και ακριβείς.

Επιλογή Κλίμακας με Διαιρέτες Τάσης: Έλεγχος της ακρίβειας των διαιρετών τάσης που χρησιμοποιούνται για την επιλογή της κλίμακας μέτρησης.

Σταθερό Ρεύμα για τα Ηλεκτρόδια:

Δημιουργία Συνθηκών Σταθερού Ρεύματος: Διασφάλιση ότι το κύκλωμα μπορεί να δημιουργήσει και να διατηρήσει σταθερό ρεύμα μέσω των ηλεκτροδίων, απαραίτητο για ακριβείς μετρήσεις αγωγιμότητας.

Μετατροπή Σήματος από AC σε DC:

Ημιανόρθωση Σήματος: Επαλήθευση της διαδικασίας ημιανόρθωσης για τη μετατροπή του σήματος από AC σε DC, χρησιμοποιώντας κατάλληλους τελεστικούς ενισχυτές.

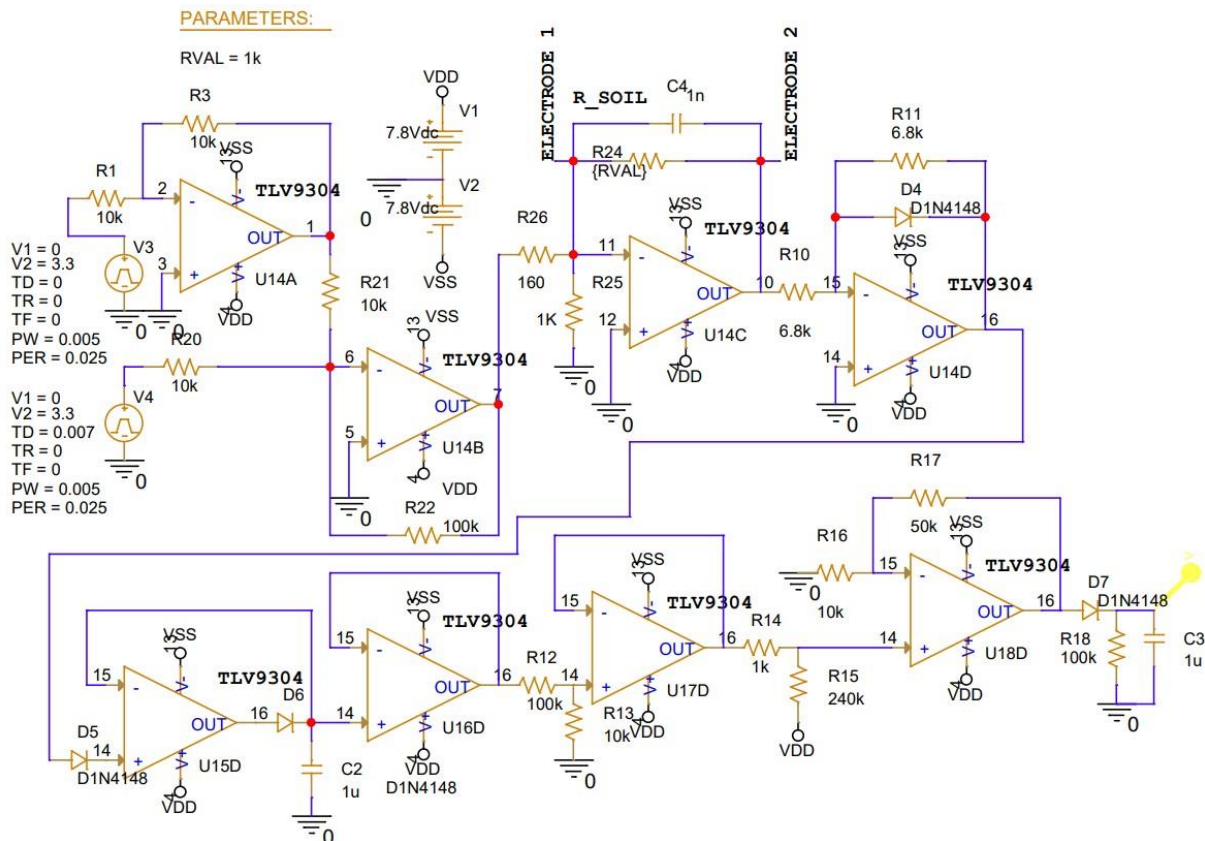
Σταθεροποίηση Σήματος με Peak Detectors: Έλεγχος της σταθεροποίησης του ανορθωμένου σήματος με τη χρήση peak detectors για να μειωθεί η κυμάτωση και να επιτευχθεί σταθερή έξοδος.

Μετατροπή Σήματος σε Γραμμική Αναλογική Έξοδο:

Signal Conditioning: Διασφάλιση ότι το τελικό σήμα έχει γραμμική αναλογική έξοδο στην περιοχή 0.5V - 3.3V, επιτρέποντας την εύκολη οδήγησή του από αναλογικά-ψηφιακά μετατροπείς (ADC).

Επαλήθευση Λειτουργίας Κυκλώματος:

Αντίσταση και Τάση: Επιβεβαίωση ότι το κύκλωμα ανταποκρίνεται σωστά στις μεταβολές της αντίστασης του εδάφους, με μικρότερη τάση να υποδεικνύει μικρότερη αντίσταση.



Εικόνα 4.1 Σχηματικό προσομοίωσης κυκλώματος μέτρησης αντίστασης εδάφους.

Αρχικά στο κύκλωμα μέτρησης αντίστασης του εδάφους έχουμε επιλέξει να το υλοποιήσουμε με τελεστικούς ενισχυτές που έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μικρό *Input Bias* ρεύμα $< 1\mu A$
- Μικρό *offset voltage* $< 1mV$
- Μικρό *offset voltage drift* $< 2\mu V / ^\circ C$
- Υψηλό *high common mode rejection* $> 90 dB$
- Υψηλό *slew rate* $> 3V/\mu s$
- Υψηλό *bandwidth* $> 100kHz$
- Χαμηλό ρεύμα κατανάλωσης
- *Rail to rail output*
- *Wide supply range* $> \pm 14V$

Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά καταλήξαμε στο να χρησιμοποιήσουμε τους τελεστικούς TLV9304 οι οποίοι είναι Low Cost Τελεστικοί ενισχυτές με πολύ καλά χαρακτηριστικά που πληρούν τις προϋποθέσεις που έχουμε ορίσει.

Τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος αποτελούνται από αντιστάσεις και πυκνωτές υψηλής ακρίβειας ανοχής 1% έτσι ώστε να αποφύγουμε διάφορες ατέλειες των παθητικών στοιχείων.

Με βάση τα προηγούμενα προχωρήσαμε στην υλοποίηση του σχεδίου. Για την προσομοίωση του κυκλώματος χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό της Cadence OrCAD PSpice 22. Αρχικά έχουμε την παραγωγή των παλμών.

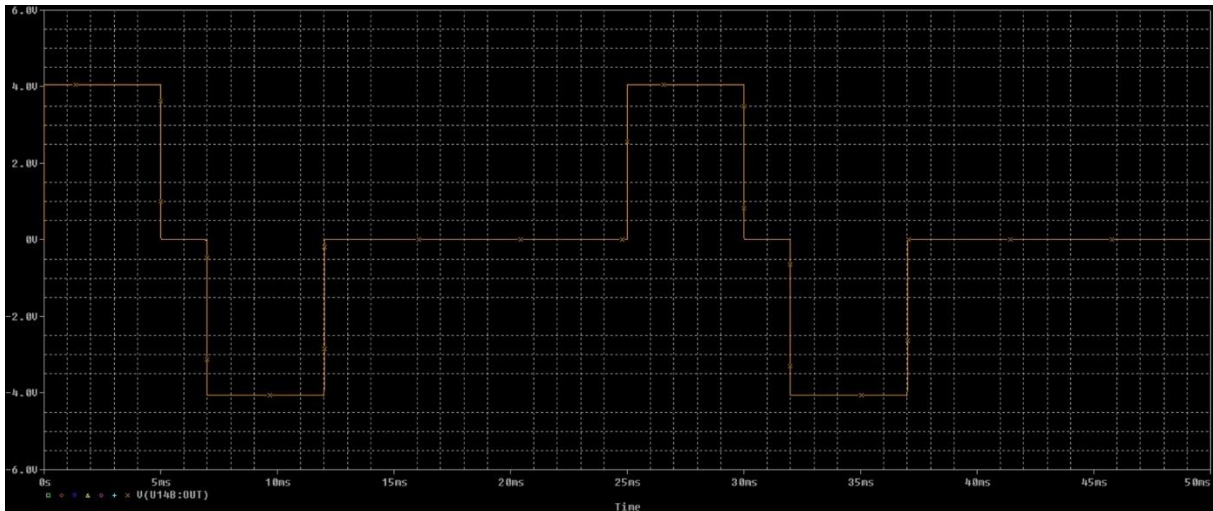
Σε αυτό το στάδιο λαμβάνουμε διαδοχικούς παλμούς DC από δύο διαφορετικές εξόδους του μικροελεγκτή (STM32F103RB) οι οποίοι έχουν τάση εξόδου στα 3.3V. Έπειτα για να μπορέσουμε να

αποφύγουμε το φαινόμενο της πόλωσης των ηλεκτροδίων που προκαλεί συγκέντρωση των ιόντων του εδάφους επάνω στην επιφάνειά τους, χρησιμοποιούμε την μέθοδο της παραγωγής διπολικών παλμών AC που το αποτρέπει έτσι ώστε να αυξήσουμε την ζωή των ηλεκτροδίων και να έχουμε καλύτερες και πιο ακριβείς μετρήσεις. Με αυτήν την μέθοδο τα ηλεκτρόδια μπορούν να αντέξουν παραπάνω χρόνο χωρίς οξείδωση ακόμη και στις πιο δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες. Με αυτόν τον σκοπό συνδέουμε τον τελεστικό (U14A) ως αναστροφέα για να αλλάζουμε την πολικότητα του ενός παλμού οδηγώντας τον στην αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή.

Έπειτα οδηγούμε τους δύο παλμούς μας στην αναστρέφουσα είσοδο του U14B για να κάνουμε σύνθεση του παλμού και μια ενίσχυση για να πάμε στο υψηλότερο δυναμικό έτσι ώστε να έχουμε περιθώριο για την επιλογή της κλίμακας και της πτώσης τάσης του εδάφους στο επόμενο στάδιο. Η τάση εξόδου του τελεστικού (U14B) υπολογίζεται με βάση τον τύπο :

$$V_{out} = \frac{R_{22}}{R_{21}} (V_1 + V_2) \quad (4.1)$$

Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η σύνθεση του διπολικού παλμού AC και το σχέδιο μας επαληθεύεται από την προσομοίωση. Παρακάτω βλέπουμε την μέτρηση της τάσης στην έξοδο του τελεστικού U14B να το επιβεβαιώνει.



Γράφημα 4.1 Προσομοίωση παραγωγής διπολικών παλμών.

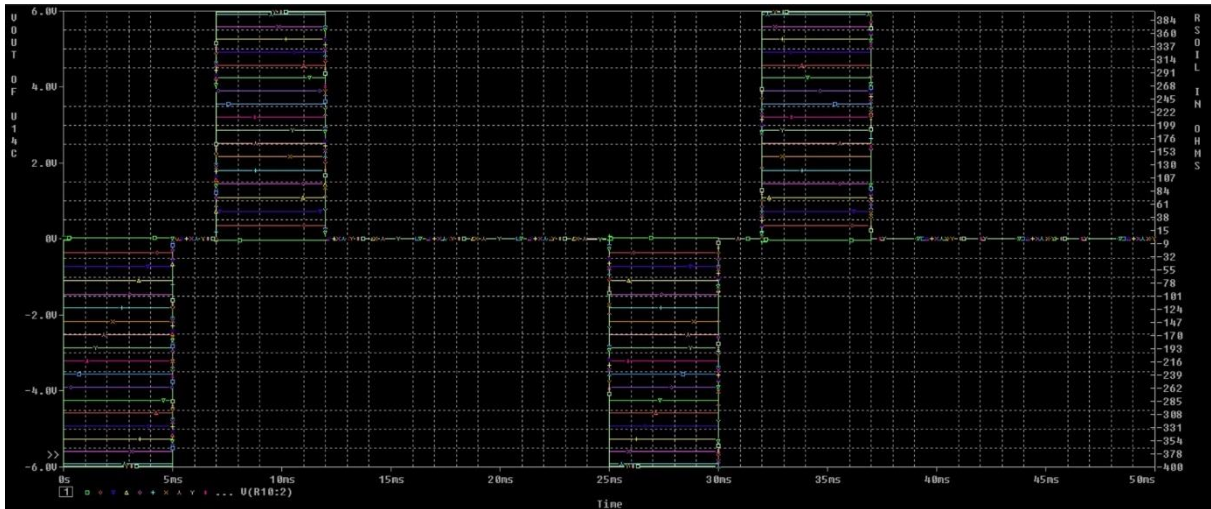
Στην συνέχεια στο κύκλωμα υπάρχει ο μεταγωγικός διακόπτης με τον οποίο επιλέγουμε τον κατάλληλο διαιρέτη τάσης που έχουμε θέσει για να ορίσουμε την κλίμακα αντίστασης που θα μετράμε στο έδαφος. Στην προσομοίωση χρησιμοποιούμε την R26 με την R25 για να δημιουργήσουμε τον διαιρέτη τάσης από τον τύπο :

$$V_{out} = V_{in} * \left(\frac{R_{25}}{R_{26} + R_{25}} \right) \quad (4.2)$$

Έχουμε ορίσει 4 διαφορετικές αντιστάσεις στην θέση της R26 (160Ω, 1KΩ, 10KΩ, 100KΩ) που εισάγονται στο κύκλωμα με τον μεταγωγικό διακόπτη να επιλέγουμε μια κάθε φορά και να δημιουργούμε 4 διαφορετικούς διαιρέτες τάσης καταλήγοντας σε 4 κλίμακες μέτρησης αντίστασης. Στην ουσία όσο μικρότερο πλάτος έχει το σήμα μας στην έξοδο του διαιρέτη τάσης τόσο περιθώριο ενίσχυσης έχουμε από την αντίσταση του εδάφους. Η αντίσταση του εδάφους παίζει σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση της αντίστασης στο κύκλωμα μας καθώς είναι μια μεταβλητή παράμετρος που παίζει τον ρόλο της R_{GAIN} στον τελεστικό U14C. Επίσης η αντίσταση του εδάφους διαρρέεται από σταθερό

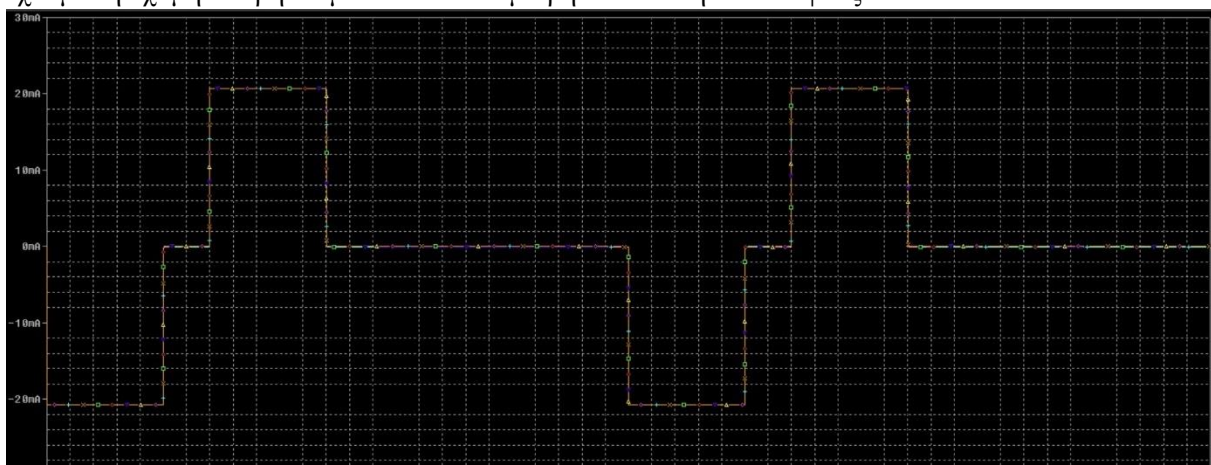
ρεύμα το οποίο ορίζεται από την κάθε κλίμακα που επιλέγουμε. Αυτό μας βοηθάει να απεικονίσουμε την διακύμανση της αντίστασης απευθείας στην έξοδο του τελεστικού σε μορφή AC τάσης που φτάνει από V_{DD} έως V_{SS} δηλαδή $V_{pp} = 12V$.

Στο παρακάτω γράφημα αναπαριστούμε την διακύμανση της τάσης εξόδου του (U14C) από $-6V$ έως $+6V$ (στον αριστερό κάθετο άξονα) του τελεστικού σε σχέση με τον χρόνο σε διαφορετικές αντιστάσεις του εδάφους (στον δεξί κάθετο άξονα) από $10\ \Omega$ έως $400\ \Omega$. Με αυτόν τον τρόπο επαληθεύουμε την διακύμανση της τάσης σε σχέση με την αντίσταση του εδάφους. Επίσης παρατηρείται γραμμική συμπεριφορά καθώς ανεβάζουμε την τιμή της αντίστασης του εδάφους που είναι αρκετά σημαντικό για τις αξιόπιστες μετρήσεις το κυκλώματος.



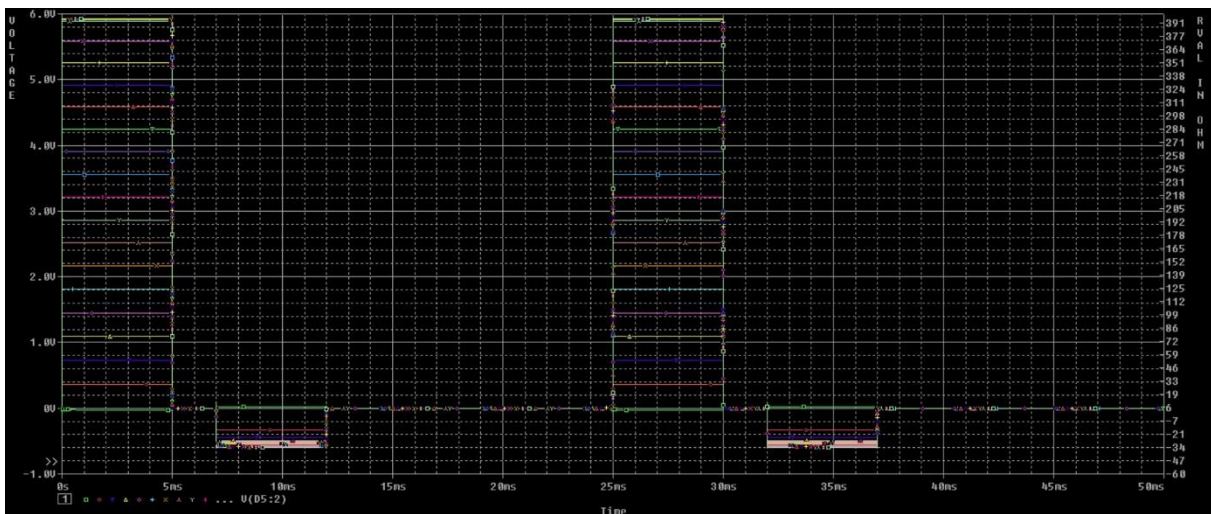
Γράφημα 4.2 Προσομοίωση ενίσχυσης τάσης στην έξοδο του ενισχυτή μέτρησης και διακύμανση της τάσης σε σχέση με την αντίσταση του εδάφους για την κλίμακα SENSE X1.

Επίσης πρέπει να επισημάνουμε πώς καθ' όλη την διάρκεια των παλμών το ρεύμα παραμένει σταθερό ανάμεσα από τα ηλεκτρόδια λόγω της συνδεσμολογίας σταθερού ρεύματος που έχουμε δημιουργήσει και το ρεύμα που διαρρέει τα ηλεκτρόδια ορίζεται από την επιλογή της κλίμακας. Όπως βλέπουμε στην εικόνα παρακάτω το ρεύμα των παλμών μένει σταθερό και είναι στα $20\ \mu A$ όπου είναι λογικό γιατί έχουμε την χαμηλότερη κλίμακα και πολύ μικρή αντίσταση του εδάφους.



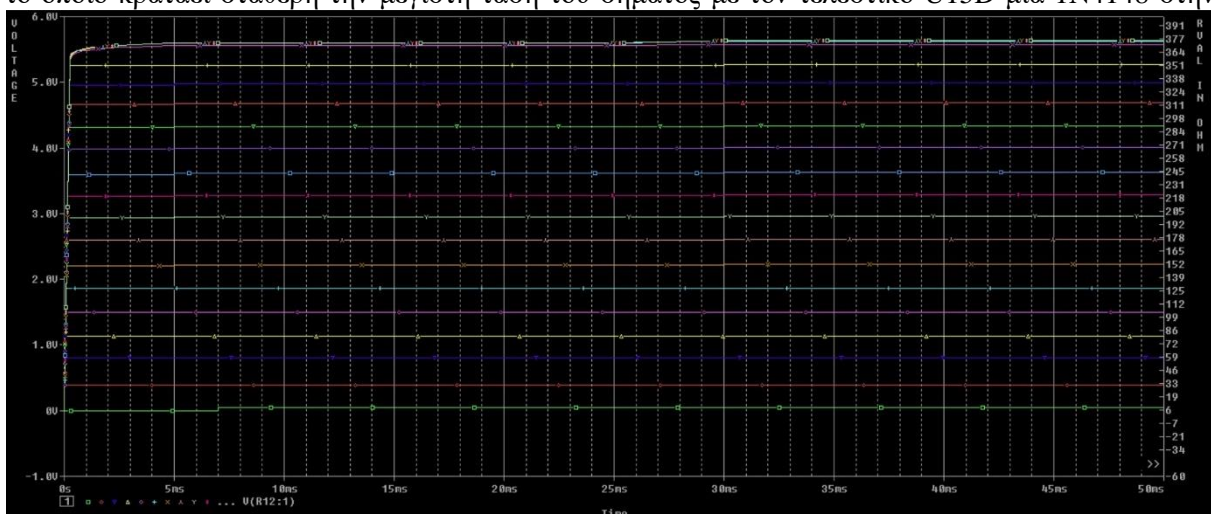
Γράφημα 4.3 Προσομοίωση Κατανάλωσης ρεύματος κατά την παραγωγή των παλμών στην κλίμακα SENSE X1.

Στο επόμενο στάδιο εφόσον έχουμε εκτιμήσει την αντίσταση του εδάφους σε μορφή AC τάσης παλμών πρέπει να μετατρέψουμε το σήμα μας σε DC για να μπορέσουμε να το επεξεργαστούμε περαιτέρω. Έτσι δημιουργήσαμε ένα κύκλωμα το οποίο κάνει ημιανόρθωση του AC σήματος σε DC το οποίο δεν έχει εξομάλυνση. Επιλέξαμε να κάνουμε το κύκλωμα ημιανόρθωσης ακριβείας με τελεστικούς που μας αποφέρει υψηλή ακρίβεια στην τάση εξόδου. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι εφόσον κάνουμε ημιανόρθωση τα αρνητικά κομμάτια του σήματος κόβονται. Αυτό όμως στην ουσία δεν μας επηρεάζει γιατί χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο των διπολικών παλμών AC για την αξιόπιστη μεταφορά του σήματος από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο. Εφόσον έχουμε περάσει αυτό το στάδιο και έχουμε εκτιμήσει την αντίσταση τα αρνητικά κομμάτια του σήματος δεν μας είναι χρήσιμα καθώς θα μας προκαλούσαν και ένα offset στις μετρήσεις μας εάν χρησιμοποιούσαμε πλήρη ανόρθωση. Παρακάτω απεικονίζεται η τάση εξόδου του κυκλώματος ημιανόρθωσης του τελεστικού U14D.



Γράφημα 4.4 Προσομοίωση παλμών μετά τον ημιανορθωτή.

Για να έχουμε αξιόπιστες μετρήσεις χρησιμοποιήσαμε έναν ανιχνευτή κορυφής (Peak Detector) Γράφημα 4.5 καθώς θα πρέπει να σταθεροποιήσουμε αρκετά το σήμα μας εφόσον πλέον έχουμε μεγάλα κενά μεταξύ των παλμών λόγω της ημιανόρθωσης. Σε αυτήν την περίπτωση σχεδιάσαμε ένα κύκλωμα το οποίο κρατάει σταθερή την μέγιστη τάση του σήματος με τον τελεστικό U15D μια 1N4148 στην



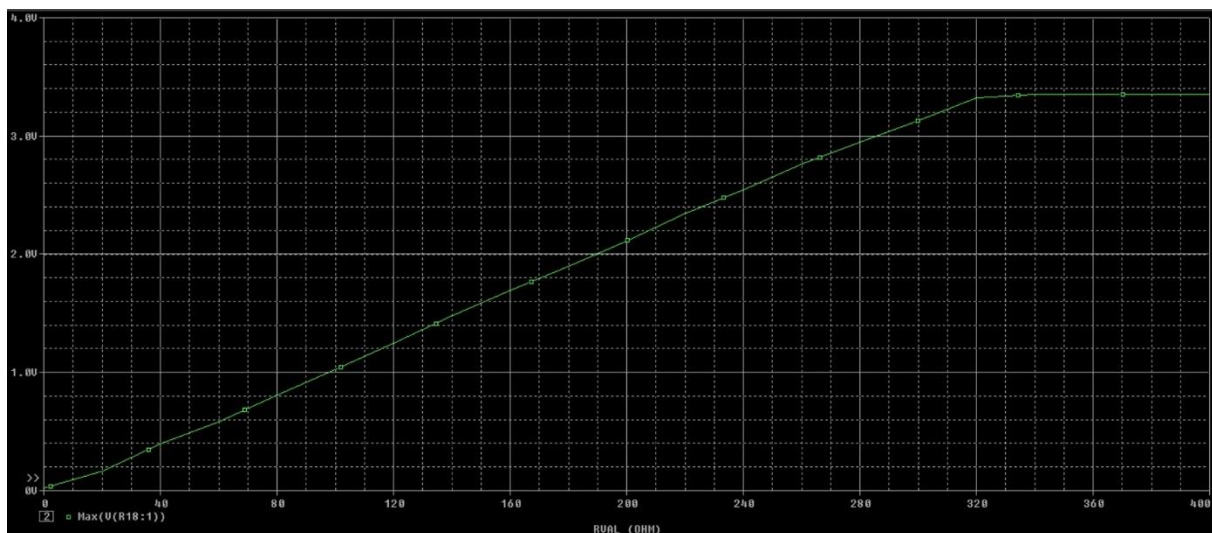
Γράφημα 4.5 Προσομοίωση σήματος μετά τον ανιχνευτή κορυφής.

έξοδο του και έναν πυκνωτή συγκράτησης της εισερχόμενης τάσης. Παρακάτω βλέπουμε την έξοδο του τελεστικού U15D που πραγματοποιεί την συγκράτηση της μέγιστης τάσης.

Έπειτα ήταν απαραίτητο να απομονώσουμε το σήμα μας με έναν τελεστικό σε συνδεσμολογία Buffer διότι χρειαζόμαστε να κατεβάσουμε την τάση του σήματος με διαιρέτη τάσης για να μπορέσουμε να κάνουμε το signal conditioning από 0.5V στα 3.3V. Στην περίπτωση που δεν το κάναμε θα υπήρχε ένα ρεύμα διαρροής από τον πυκνωτή συγκράτησης προς τον διαιρέτη τάσης και θα είχαμε παραμόρφωση της εξόδου του Peak Detector.

Τέλος δημιουργήσαμε ένα κύκλωμα το οποίο κάνει την επεξεργασία του σήματος (signal conditioning) για να μπορέσουμε να λάβουμε γραμμική έξοδο της τάσης σε σχέση με την αντίσταση από 0.5V έως 3.3V.

Παρακάτω στην εικόνα βλέπουμε την αναλογική έξοδο του τελεστικού ενισχυτή U18D ο οποίος μας δίνει μια τάση από 0.5V έως 3.3V σε σχέση με την αντίσταση του εδάφους σε Ohm με ένα εύρος που κυμαίνεται από (50 ohm – 320 ohm) για την πρώτη κλίμακα (most sensitive).



Γράφημα 4.6 Προσομοίωση εύρους μέτρησης αντίστασης (50 Ohm-320 Ohm).

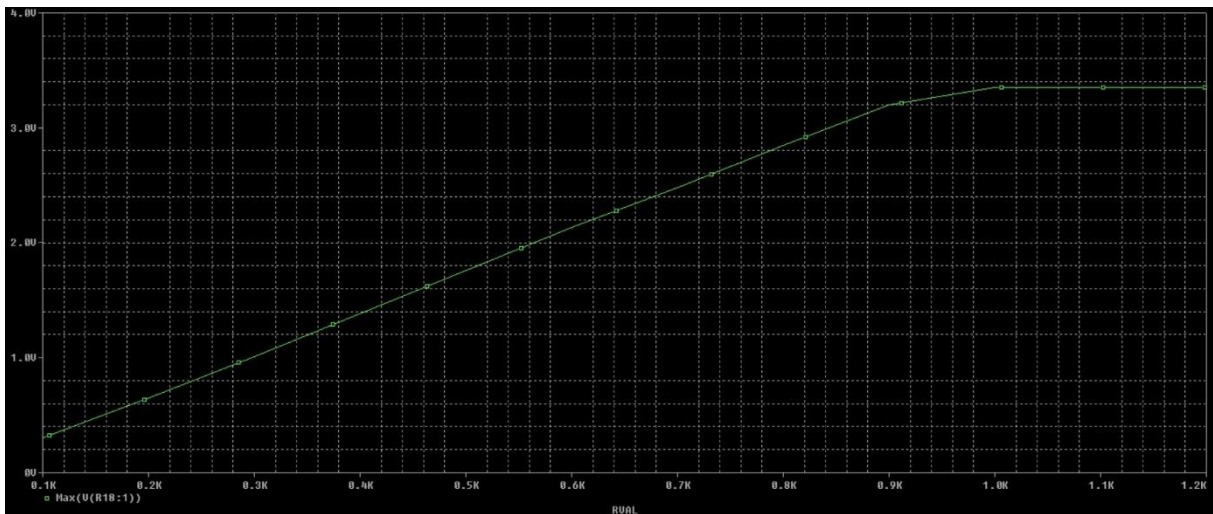
4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του κυκλώματος ήταν ενθαρρυντικά και μας επέτρεψαν να επιβεβαιώσουμε την αρχική μας σχεδίαση. Αυτή η επιβεβαίωση είναι κρίσιμη για την περαιτέρω υλοποίηση και βελτιστοποίηση του συστήματος μέτρησης αντίστασης εδάφους. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μας επέτρεψαν να καθορίσουμε το εύρος μέτρησης της συσκευής.

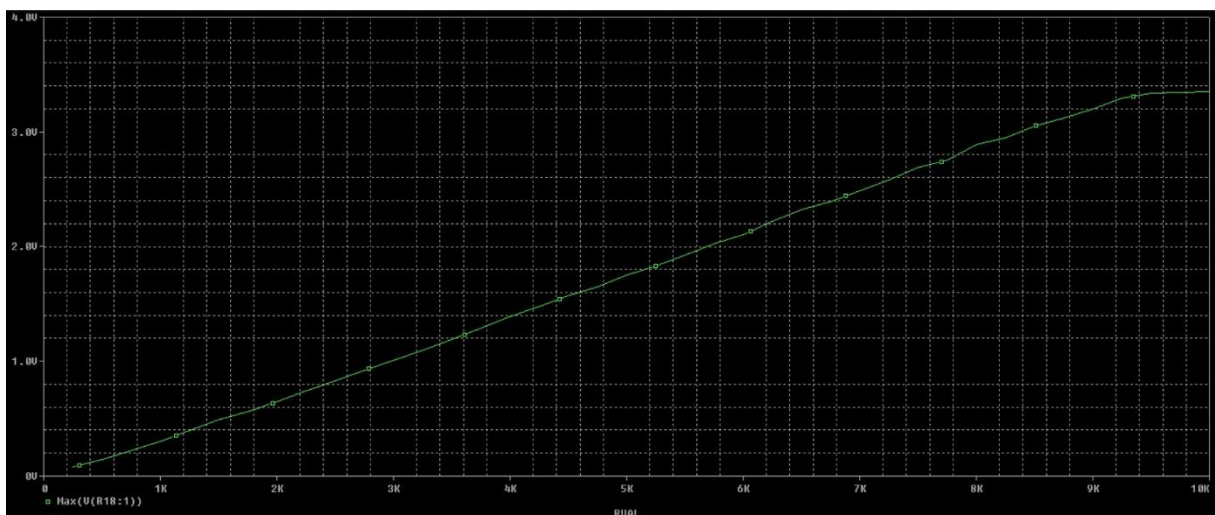
Κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων, εκτελέσαμε Performance Analysis για κάθε μία από τις τέσσερις κλίμακες του διαιρέτη τάσης που είχαμε προκαθορίσει (160 Ω, 1 kΩ, 10 kΩ, 100 kΩ). Κάθε κλίμακα έδωσε διαφορετικά γραφήματα, τα οποία παρουσίαζαν γραμμική συμπεριφορά. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς εξασφαλίζει την αξιοπιστία και την επαναληψιμότητα των μετρήσεων.

Τα γραφήματα αυτά επιβεβαίωσαν ότι μπορούμε να ανιχνεύσουμε την αντίσταση του εδάφους με ακρίβεια και αξιοπιστία στην αναλογική έξοδο του τελεστικού ενισχυτή U18D. Συγκεκριμένα, για την πιο ευαίσθητη κλίμακα, το εύρος μέτρησης κυμαινόταν από 10 Ω έως 320 Ω, με την έξοδο του τελεστικού να μεταφράζεται σε τάση από 0.5V έως 3.3V.

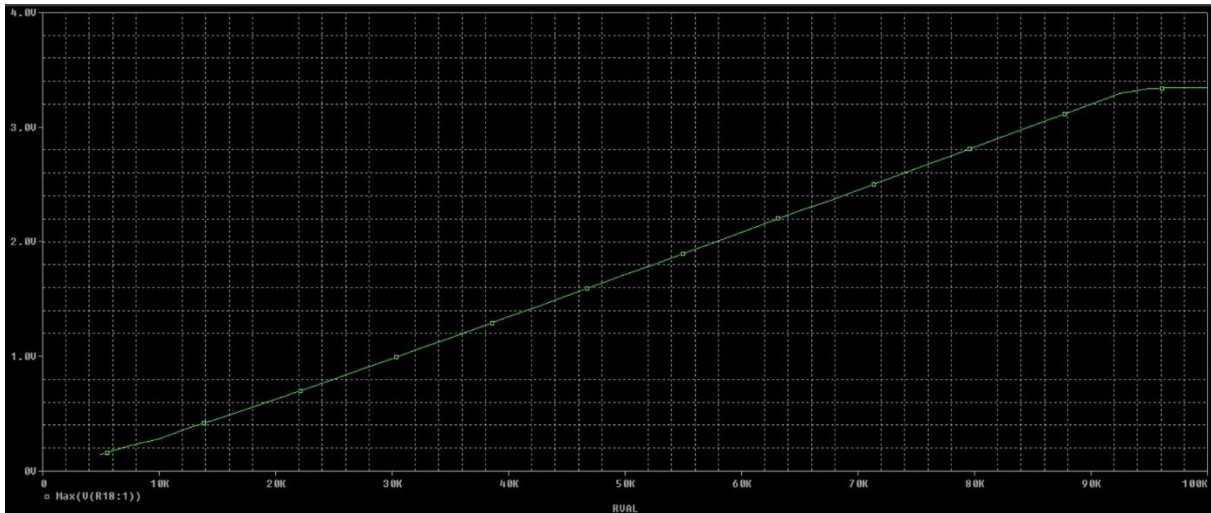
Τέλος, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαίωσαν ότι το κύκλωμα που σχεδιάσαμε μπορεί να επιτύχει αξιόπιστες και ακριβείς μετρήσεις της αντίστασης του εδάφους, διασφαλίζοντας τη γραμμικότητα της απόκρισης σε όλο το εύρος των μετρήσεων. Με βάση αυτά τα ευρήματα προχωρήσαμε στην περαιτέρω υλοποίηση του συστήματος.



Γράφημα 4.7 Προσομοίωση εύρους μέτρησης αντίστασης (100 Ohm-1K Ohm).



Γράφημα 4.8 Προσομοίωση εύρους μέτρησης αντίστασης (1K Ohm-10K Ohm).



Γράφημα 4.9 Προσομοίωση εύρους μέτρησης αντίστασης (10K Ohm-100K Ohm).

Το εύρος μέτρησης του αναλογικού κυκλώματος που δημιουργήσαμε με τις 4 κλίμακες είναι από :

~50 Ohm – 320 Ohm

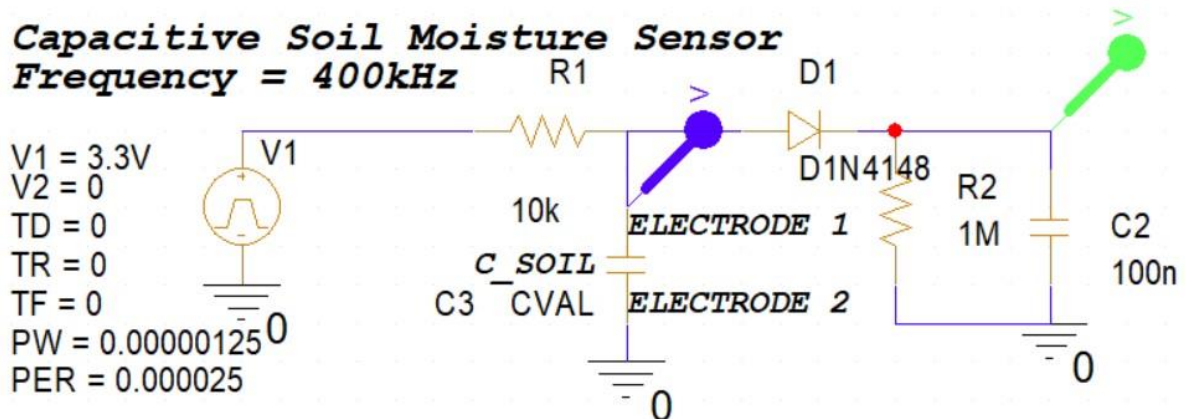
~200 Ohm – 1K Ohm

~1K Ohm – 10K Ohm

~10K Ohm – 100K Ohm

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ήταν ενθαρρυντικά, επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότητα του κυκλώματος και επιτρέποντάς μας να ορίσουμε το εύρος μέτρησης της συσκευής. Η γραμμική έξοδος του κυκλώματος και η αναπαράσταση της τάσης από 0.5V που αντιστοιχείται σε χαμηλή αντίσταση έως τα 3.3V σε υψηλή αντίσταση μας δίνουν την δυνατότητα να οδηγήσουμε αυτή την τάση σε κυκλώματα μικροελεγκτών για να εκτιμήσουμε την αντίσταση του εδάφους με ακρίβεια. Συνολικά, το κύκλωμα προσφέρει αξιόπιστες και ακριβείς μετρήσεις, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές στη γεωργία και την ανάλυση της υγείας του εδάφους.

4.3 Ανάλυση και προσομοίωση κυκλώματος χωρητικού αισθητήρα Υγρασίας



Εικόνα 4.2 Σχηματικό προσομοίωσης μέτρησης υγρασίας εδάφους.

Για την εκτίμηση της υγρασίας του εδάφους, αρχικά αναπτύχθηκε ένα κύκλωμα που περιλαμβάνει μια πηγή υψηλής συχνότητας. Ο μικροελεγκτής παράγει ένα σήμα τετραγωνικών παλμών το οποίο φέρει συχνότητα περίπου 400 kHz με κύκλο εργασίας (Duty Cycle) 50%. Αυτό το σήμα διοχετεύεται σε ένα χαμηλοπερατό φίλτρο, το οποίο είναι σχεδιασμένο να εξασθενεί τα σήματα υψηλής συχνότητας, επιτρέποντας τη διέλευση των σημάτων χαμηλής συχνότητας. Το φίλτρο αποτελείται από μία αντίσταση R3 των 10K Ohm και έναν πυκνωτή που συνδέεται στη γείωση.

Ο πυκνωτής, στην πραγματικότητα είναι ο χωρητικός αισθητήρας βυθιζόμενος στο έδαφος και αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια τα οποία είναι μονωμένα για να αποτρέπουν την άμεση επαφή του μετάλλου με το έδαφος και το νερό. Η χωρητικότητα του εδάφους μετράτε βάσει της υγρασίας του εδάφους που περιέχεται σε αυτό, καθώς η παρουσία υγρασίας επηρεάζει τη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους και αλλάζει η χωρητικότητα. Εφόσον αλλάζει η χωρητικότητα του εδάφους αλλάζει και η τιμή αποκοπής του χαμηλοπερατού φίλτρου. Όσο ανεβαίνει η τιμή της χωρητικότητας του εδάφους τόσο εξασθενεί το πλάτος του σήματος. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να εκτιμήσουμε την αλλαγή της υγρασίας στο έδαφος.

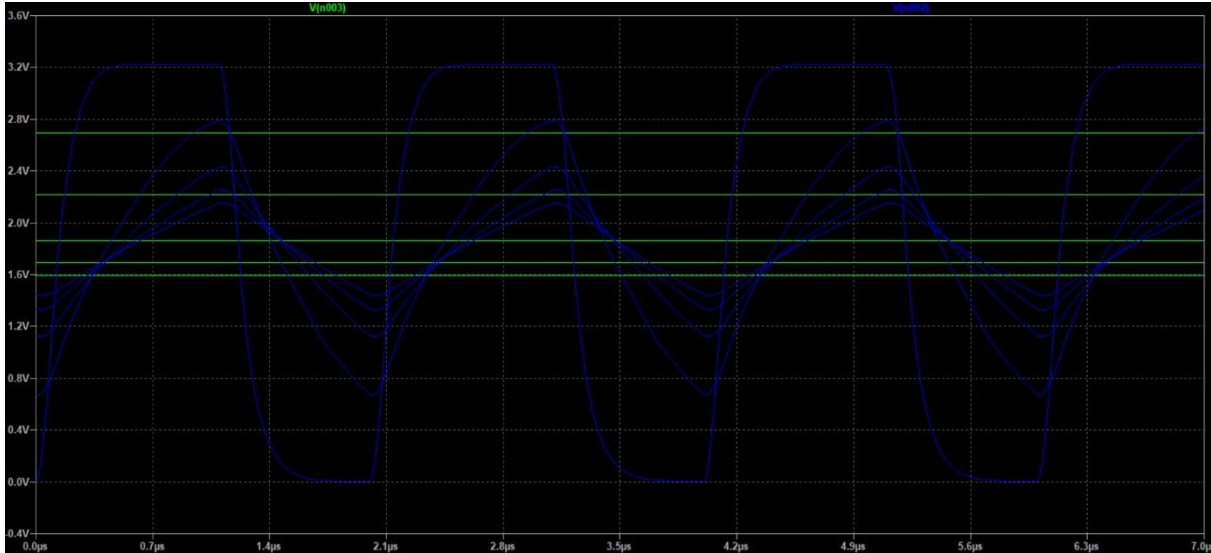
$$Fc = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.3)$$

Στη συνέχεια, το σήμα που προκύπτει από το φίλτρο διοχετεύεται σε έναν ανιχνευτή κορυφής, ο οποίος μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) σε σταθερό ρεύμα (DC). Το τριγωνικό σήμα εξόδου εξέρχεται από το χαμηλοπερατό φίλτρο και οδηγείται στο κύκλωμα ημιανόρθωσης που αποτελείται από μία διόδο 1N4148 η οποία συνδέεται σε σειρά για να παράξει ένα σήμα DC. Για την βελτίωση του σήματος και την μείωση της κυμάτωσης συνδέεται και μια αντίσταση 1 MΩ παράλληλα με έναν πυκνωτή 1uF. Τα άκρα της αντίστασης και του πυκνωτή καταλήγουν στον ηλεκτρόδιο γείωσης. Η τοποθέτηση της διόδου σε σειρά αποτρέπει την πλήρη αποφόρτιση του πυκνωτή όταν το σήμα μας είναι χαμηλής τάσης και τότε η εκφόρτιση του πυκνωτή γίνεται μόνο μέσα από την αντίσταση 1MΩ και προκύπτει η σταθερά του χρόνου εκφόρτωσης του ενός δευτερολέπτου παρέχοντας έτσι μια αξιόπιστη και σταθερή μέτρηση της υγρασίας του εδάφους που μπορεί να οδηγηθεί σε μια αναλογική είσοδο του μικροελεγκτή και να μας παρέχει την ποσοστιαία υγρασία μέσα στο έδαφος.

Σταθερά εκφόρτισης του πυκνωτή

$$\tau = R \times C \quad (4.4)$$

$$t = (1 \times 10^6 \Omega) \times (1 \times 10^{-6} F) = 1 \text{ second}$$



Γράφημα 4.10 Προσομοίωση εξόδου κυκλώματος μέτρησης υγρασίας.

Τέλος λάβαμε το γράφημα που αναπαριστά την έξοδο του κυκλώματος με πράσινο χρώμα σε V και την τριγωνική κυματομορφή με πράσινο χρώμα στο σημείο του κυκλώματος που δημιουργείται αμέσως μετά το φίλτρο της αντίστασης με την χωρητικότητα του εδάφους. Παρατηρούμε ότι καθώς η χωρητικότητα του εδάφους μεγαλώνει, αντίστοιχα και η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους μεγαλώνει με την παρουσία μεγαλύτερης ποσότητας υγρασίας, η τριγωνική κυματομορφή μικραίνει το πλάτος της, που αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της τάσης εξόδου στον Peak Detector.

Η ανάλυση του γραφήματος δείχνει ότι όσο αυξάνεται η υγρασία του εδάφους, τόσο μειώνεται η τάση εξόδου. Η μη γραμμική συμπεριφορά του κυκλώματος απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων για την ακριβή εκτίμηση της υγρασίας στην πλευρά του μικροελεγκτή. Ωστόσο, οι αλλαγές στην έξοδο του Peak Detector είναι αρκετά σαφείς ώστε να επιτρέπουν την παρακολούθηση της υγρασίας του εδάφους σε πραγματικό χρόνο. Οι μετρήσεις δείχνουν ότι το κύκλωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενός αισθητήρα παρακολούθησης της υγρασίας του εδάφους.

4.4 Υλοποίηση Αισθητήρα Αντίστασης και Υγρασίας

Αρχικά, δημιουργήσαμε ένα 3D σχέδιο στο Tinkercad για να εκτιμήσουμε τη μορφή του αισθητήρα και να διασφαλίσουμε ότι όλα τα εξαρτήματα θα τοποθετηθούν σωστά. Το Tinkercad μας επέτρεψε να οπτικοποιήσουμε τη διάταξη των ηλεκτροδίων και της βάσης, καθώς και να δούμε πώς θα συνδεθούν τα ηλεκτρόδια με τα κυκλώματα μέτρησης υγρασίας και αντίστασης. Στην εικόνα που ακολουθεί, απεικονίζεται το 3D σχέδιο του αισθητήρα, όπως αναπτύχθηκε στο Tinkercad. Αυτό το βήμα ήταν κρίσιμο για να εξασφαλίσουμε ότι το τελικό προϊόν θα είναι λειτουργικό και εύκολο στην κατασκευή.

Ο σχεδιασμός του αισθητήρα μέτρησης αντίστασης και υγρασίας εδάφους βασίζεται σε τέσσερα ηλεκτρόδια, χωρισμένα σε δύο ζεύγη: το ένα ζεύγος για τη μέτρηση της αντίστασης και το άλλο για τη μέτρηση της χωρητικότητας.

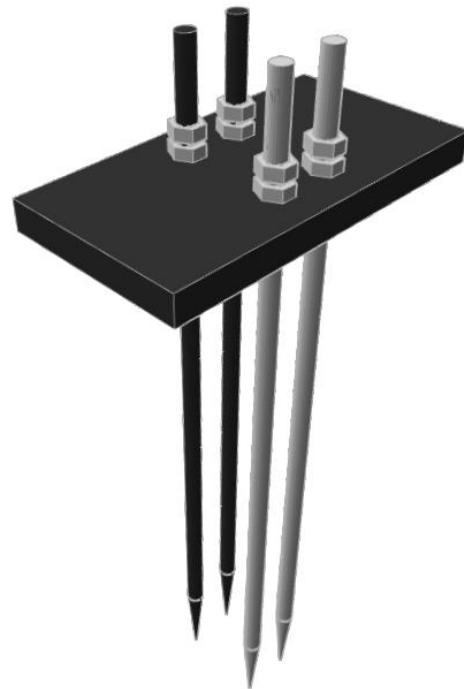
Αρχικά, λήφθηκαν τέσσερα ηλεκτρόδια από ανοξείδωτο ατσάλι. Το ανοξείδωτο ατσάλι επιλέχθηκε λόγω της ανθεκτικότητάς του στη διάβρωση και την ικανότητά του να διατηρεί σταθερή απόδοση στις μετρήσεις με την πάροδο του χρόνου. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η συγκέντρωση ιόντων στα ηλεκτρόδια και η διάβρωσή τους, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία στις μετρήσεις.

Στην μία άκρη των ηλεκτροδίων δημιουργήθηκαν σπειρώματα ώστε να μπορούν να βιδωθούν στη βάση και να ενώνονται γαλβανικά με τα κυκλώματα μέτρησης υγρασίας και αντίστασης. Χρησιμοποιήσαμε μικρά παξιμάδια για τη σύνδεση των καλωδίων των κυκλωμάτων στα ηλεκτρόδια. Για τα καλώδια επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε καλώδιο Ethernet UTP, το οποίο επιτρέπει τη μεταφορά του σήματος υψηλής ταχύτητας χωρίς παραμόρφωση λόγω της αντίστασης των καλωδίων. Η απόσταση των καλωδίων είναι 1 μέτρο, η οποία είναι επαρκής για να τα ενώσουμε στη συσκευή μας.

Η άλλη άκρη των τεσσάρων ηλεκτροδίων έχει διαμορφωθεί με μύτες για να διεισδύουν εύκολα στο έδαφος. Χρησιμοποιήθηκε τόννος για την διαμόρφωση των άκρων, διευκολύνοντας την εισχώρηση στο έδαφος.

Στη συνέχεια, μονώθηκαν τα ηλεκτρόδια που θα χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της υγρασίας του εδάφους ώστε να μετριέται μόνο η χωρητικότητα του εδάφους και να μην επηρεάζεται από την αντίσταση του εδάφους. Για τη μόνωση χρησιμοποιήθηκε σπρέι πλαστικοποίησης πλακετών, το οποίο έχει πολύ μικρό πάχος ανά στρώση. Αυτό είναι σημαντικό για τη λειτουργία του αισθητήρα μέτρησης υγρασίας, διότι όσο περισσότερο πάχος προστίθεται, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση ενός άλλου διηλεκτρικού στην εκτίμηση της υγρασίας. Καλύφθηκαν τα δύο ηλεκτρόδια της υγρασίας με το υλικό και ήταν σημαντικό να υπάρχει χρόνος ανάμεσα στις στρώσεις μέχρι να εφαρμοστεί σωστά το υλικό.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε ένα κομμάτι πλαστικό ABS για να δημιουργήσουμε τη βάση στην οποία θα βιδωθούν τα ηλεκτρόδια. Στη βάση αυτή δημιουργήσαμε σπειρώματα ώστε να βιδωθούν σταθερά τα ηλεκτρόδια, εξασφαλίζοντας ότι δεν θα κινούνται μεταξύ τους, διατηρώντας σταθερές παραμέτρους για επαναλαμβανόμενες μετρήσεις.



Εικόνα 4.3 Τρισδιάστατο σχέδιο αισθητήρα

Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων που αποτελούν κάθε ζεύγος είναι 1 cm, ενώ η απόσταση μεταξύ των δύο ζευγών είναι 3 cm. Το μήκος των ηλεκτροδίων είναι 14 cm, το οποίο επιτρέπει τη μέτρηση σε μεγαλύτερο βάθος και όγκο εδάφους, παρέχοντας μια πιο αντιπροσωπευτική τιμή της συνολικής αντίστασης και υγρασίας του εδάφους. Η μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής με το έδαφος βελτιώνει την αγωγιμότητα και τη σταθερότητα των μετρήσεων, μειώνοντας τις διακυμάνσεις και τις αβεβαιότητες.

Μετά από δοκιμές βύθισης του αισθητήρα στο έδαφος, παρατηρήσαμε ότι η επικάλυψη της πλαστικοποίησης φθείρεται εύκολα στις μύτες των ηλεκτροδίων. Για αυτόν τον λόγο, προσθέσαμε στα δύο ηλεκτρόδια μέτρησης υγρασίας εδάφους μια προστασία στην μύτη τους από θερμοσυστελλόμενα σωληνάρια. Αυτή η πρόσθετη προστασία εξασφαλίζει ότι η πλαστικοποίηση δεν θα φθείρεται τόσο εύκολα και η μέτρηση της υγρασίας δεν θα επηρεάζεται από την αντίσταση του εδάφους, διατηρώντας την ακρίβεια και την αξιοπιστία των μετρήσεων.

Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν :

- **Ηλεκτρόδια:**

Τέσσερα ηλεκτρόδια από ανοξείδωτο ατσάλι (μήκος 14 cm).

- **Βάση:**

Πλαστικό ABS για τη βάση.

- **Σπείρωμα και Παξιμάδια:**

Μικρά παξιμάδια για τη στερέωση των ηλεκτροδίων στη βάση.

- **Καλώδια:**

Καλώδιο Ethernet UTP (1 μέτρο)

- **Σπρέι πλαστικοποίησης:**

Σπρέι πλαστικοποίησης πλακετών για τη μόνωση των ηλεκτροδίων υγρασίας.

- **Θερμοσυστελλόμενα σωληνάρια:**

2 Θερμοσυστελλόμενα σωληνάρια για την προστασία της πλαστικοποίησης των ηλεκτροδίων.



Εικόνα 4.4 Υλοποίηση αισθητήρα

4.5 Υλοποίηση Κυκλωμάτων

Για την υλοποίηση των κυκλωμάτων, δημιουργήθηκε αρχικά ένα διάγραμμα που απεικονίζει τα σκέλη που χρησιμοποιούνται στη συσκευή. Το διάγραμμα περιλαμβάνει τις εξής φάσεις:

Είσοδος Τροφοδοσίας και Φόρτιση Μπαταρίας:

Το κύκλωμα ξεκινά με την είσοδο της τροφοδοσίας και τον έλεγχο της φόρτισης της μπαταρίας. Η σωστή φόρτιση και διαχείριση της μπαταρίας είναι κρίσιμη για τη σταθερή λειτουργία της συσκευής.

Έξοδος Τάσης από το Κύκλωμα Φόρτισης και Boost Converter:

Η έξοδος της τάσης από το κύκλωμα φόρτισης της μπαταρίας ενισχύεται με μια τοπολογία boost converter, που επιτρέπει την αύξηση της τάσης από 2V-5V σε 12V.

Δημιουργία Θετικής και Αρνητικής Τάσης:

Η τάση 12V μετατρέπεται σε αρνητική τάση -12V, ώστε να μπορεί να τροφοδοτηθούν οι τελεστικοί ενισχυτές με θετική και αρνητική τάση. Στη συνέχεια, οι τάσεις 12V και -12V μετατρέπονται σε 8V και -8V, αντίστοιχα, για την προβλεπόμενη τροφοδοσία των τελεστικών ενισχυτών.

Μετατροπή Τάσης σε 3.3V:

Η τάση 12V κατεβαίνει επίσης σε 5V και στη συνέχεια ρυθμίζεται στα 3.3V από τους ρυθμιστές τάσης (regulators), δημιουργώντας την τάση λειτουργίας για όλα τα κυκλώματα, συμπεριλαμβανομένων του μικροελεγκτή (MCU), της οθόνης OLED SSD1306 και του αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20.

Οδήγηση Κυκλωμάτων για Ψηφιακές και Αναλογικές Επικοινωνίες:

Το σύστημα περιλαμβάνει κυκλώματα για τις ψηφιακές και αναλογικές επικοινωνίες και λειτουργίες με τον μικροελεγκτή. Αυτό περιλαμβάνει:

Την παραγωγή παλμών 133 kHz για τη μέτρηση της αντίστασης του εδάφους.

Την παραγωγή παλμών 400 kHz για τη μέτρηση της υγρασίας του εδάφους.

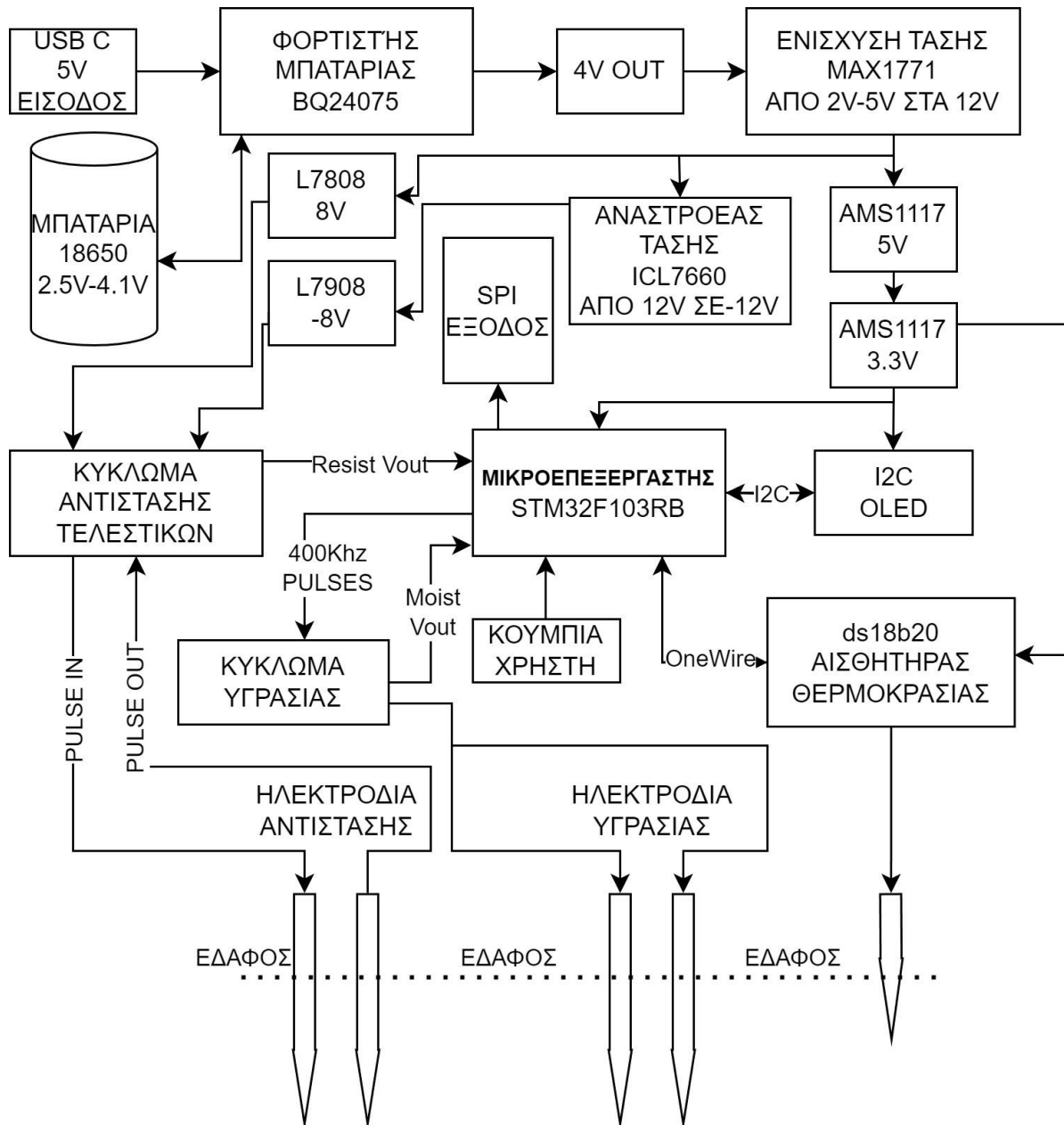
Την αναγνώριση αναλογικής τάσης από τη μέτρηση της αντίστασης και της υγρασίας του εδάφους.

Την αναγνώριση της μέτρησης θερμοκρασίας από τον αισθητήρα DS18B20 μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας One Wire.

Την επικοινωνία με την οθόνη OLED μέσω του πρωτοκόλλου I2C για την ένδειξη των υπολογισμένων τιμών.

Την αναγνώριση των εισόδων από τα κουμπιά χρήστη.

Παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα με τα σκέλη λειτουργίας του κυκλώματος :



Εικόνα 4.5 Διάγραμμα λειτουργίας κυκλώματος τυπωμένου.

Η συσκευή είναι σχεδιασμένη να εκτελεί πολλαπλές λειτουργίες, εξασφαλίζοντας ακριβείς μετρήσεις της αντίστασης, της υγρασίας και της θερμοκρασίας του εδάφους. Χρησιμοποιώντας εξειδικευμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα, παράγει παλμούς διαφορετικών συχνοτήτων για τις μετρήσεις αυτές και καταγράφει την αναλογική τάση που προκύπτει. Ο αισθητήρας θερμοκρασίας DS18B20 προσφέρει ακριβή καταγραφή θερμοκρασίας μέσω του πρωτοκόλλου One Wire. Η οθόνη OLED επιτρέπει την άμεση προβολή των τιμών, ενώ τα κουμπιά χρήστη διευκολύνουν την προσαρμογή των ρυθμίσεων για την ρύθμιση της συχνότητας. Αυτή η πολλαπλή λειτουργικότητα καθιστά τον αισθητήρα ευέλικτο και ικανό να προσαρμόζεται σε διάφορες εφαρμογές.

4.5.1 Τροφοδοσία

Αρχικά, το κύκλωμα τροφοδοσίας σχεδιάστηκε με βάση τις ανάγκες της συσκευής, η οποία έπρεπε να είναι φορητή. Για αυτόν τον λόγο, επιλέχθηκε η χρήση μπαταρίας. Η μπαταρία που επιλέχθηκε είναι η 18650, η οποία προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα και αναφέρονται μερικά από αυτά παρακάτω.

Χωρητικότητα: Οι μπαταρίες 18650 διαθέτουν υψηλή χωρητικότητα, συνήθως μεταξύ 2200mAh και 3500mAh, προσφέροντας μεγάλη διάρκεια ζωής και χρόνο λειτουργίας για τη συσκευή.

Τάση: Η ονομαστική τάση της είναι 3.7V, με μέγιστη τάση φόρτισης τα 4.2V, παρέχοντας αρκετή ισχύ για διάφορες εφαρμογές.

Ρεύμα εκφόρτισης: Μπορούν να υποστηρίξουν υψηλά ρεύματα εκφόρτισης, συχνά μέχρι 20A ή περισσότερο, ανάλογα με την κατασκευή, καθιστώντας τις κατάλληλες για απαιτητικές εφαρμογές.

Κύκλοι ζωής: Οι μπαταρίες 18650 έχουν μακρά διάρκεια ζωής και μπορούν να αντέξουν 300-500 κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης, διατηρώντας την απόδοσή τους.

Ευκολία φόρτισης: Μπορούν να φορτίζονται εύκολα μέσω συμβατικών φορτιστών, ενώ η επαναφορτιζόμενη φύση τους τις καθιστά φιλικές προς το περιβάλλον.

Αξιοπιστία: Οι μπαταρίες 18650 είναι γνωστές για την αξιοπιστία τους, καθώς προσφέρουν σταθερή απόδοση και έχουν χαμηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης, περίπου 2-3% το μήνα.



Εικόνα 4.6 Μπαταρία 18650.

Με βάση την επιλογή της μπαταρίας 18650, επιλέχθηκε και το κατάλληλο ολοκληρωμένο κύκλωμα για τη διαχείρισή της, δηλαδή την ελεγχόμενη φόρτιση και εκφόρτισή της. Το ολοκληρωμένο που επιλέχθηκε είναι το BQ24075[25], το οποίο προσφέρει χρήσιμες λειτουργίες πέρα από την απλή φόρτιση και εκφόρτιση. Παρακάτω αναφέρονται κάποια από τα χαρακτηριστικά που έχει το BQ24075.

Έλεγχος φόρτισης και εκφόρτισης: Το BQ24075 παρέχει ακριβή έλεγχο της διαδικασίας φόρτισης και εκφόρτισης, διασφαλίζοντας την ασφάλεια και την απόδοση της μπαταρίας. Ρυθμίζει την τάση και το ρεύμα φόρτισης, επιτρέποντας την αποτελεσματική και ασφαλή φόρτιση της μπαταρίας. Η μέγιστη τάση φόρτισης είναι 4.2V και το μέγιστο ρεύμα φόρτισης μπορεί να ρυθμιστεί μέχρι 1.5A.

Ενσωματωμένη προστασία: Το ολοκληρωμένο κύκλωμα διαθέτει προστασία από υπέρταση, υπόταση, υπερφόρτωση και βραχυκύκλωμα, διασφαλίζοντας την ασφαλή λειτουργία της μπαταρίας και προλαμβάνοντας την καταστροφή της.

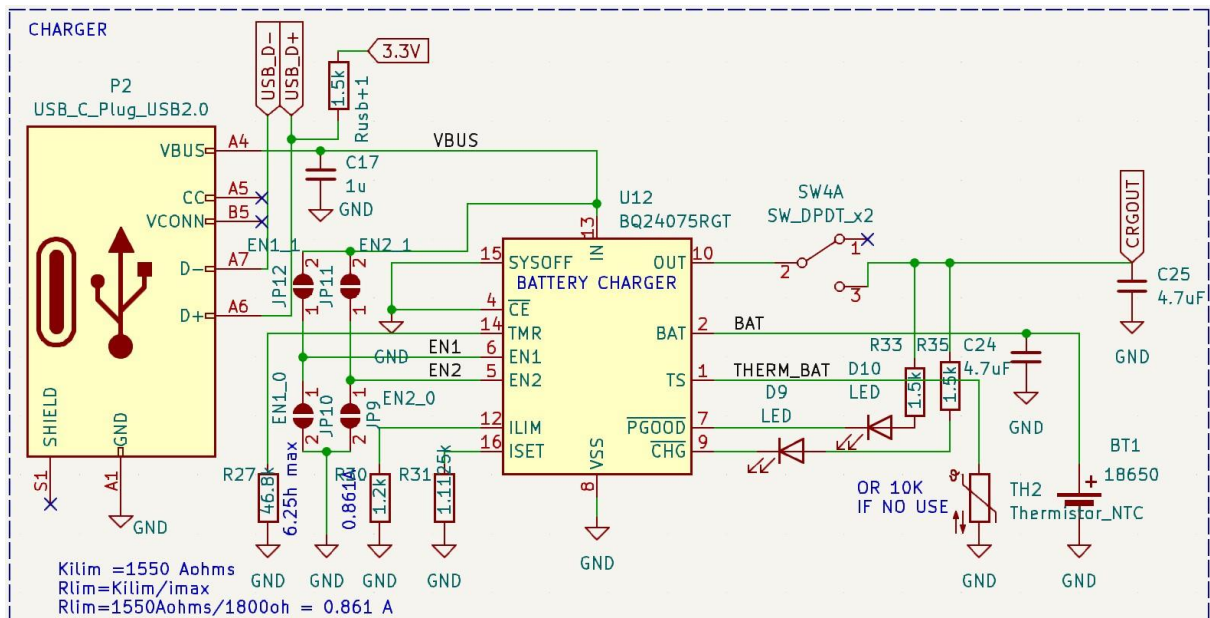
Διαχείριση θερμοκρασίας: Το BQ24075 περιλαμβάνει αισθητήρες θερμοκρασίας που παρακολουθούν τη θερμοκρασία της μπαταρίας και προσαρμόζουν τη διαδικασία φόρτισης για να αποφεύγεται η υπερθέρμανση. Αυτό προστατεύει τη μπαταρία από θερμικές καταστροφές και παρατείνει τη διάρκεια ζωής της.

Ευελιξία τροφοδοσίας: Το ολοκληρωμένο κύκλωμα μπορεί να τροφοδοτήσει τη συσκευή τόσο από την μπαταρία όσο και από εξωτερική πηγή τροφοδοσίας, αν υπάρχει διαθέσιμη. Αυτό επιτρέπει τη συνεχή λειτουργία της συσκευής ακόμα και κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

LED ένδειξης: Το BQ24075 παρέχει ενδείξεις LED για την κατάσταση της φόρτισης, διευκολύνοντας τον χρήστη να παρακολουθεί την πορεία της φόρτισης. Οι ενδείξεις μπορεί να περιλαμβάνουν τη φόρτιση σε εξέλιξη, την πλήρη φόρτιση και τυχόν σφάλματα.

Ρυθμιζόμενες παράμετροι: Το ολοκληρωμένο κύκλωμα επιτρέπει την προσαρμογή των παραμέτρων φόρτισης, όπως η μέγιστη τάση και το μέγιστο ρεύμα φόρτισης, για την καλύτερη δυνατή απόδοση της μπαταρίας.

Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας: Το BQ24075 έχει σχεδιαστεί για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, με τυπική κατανάλωση ρεύματος σε κατάσταση αναμονής στα 15μΑ, ελαχιστοποιώντας την απώλεια ισχύος κατά τη φόρτιση και τη λειτουργία της συσκευής.



Εικόνα 4.7 Σχεδιαστικό κυκλώματος τροφοδοσίας.

Με γνώμονα αυτά τα χαρακτηριστικά, σχεδιάστηκε το κύκλωμα φόρτισης της μπαταρίας. Το κύκλωμα αυτό λαμβάνει τροφοδοσία εισόδου από το USB C στα 5V και είτε φορτίζει την μπαταρία εάν χρίζει φόρτισης είτε το κύκλωμα δουλεύει απευθείας από την εξωτερική πηγή φόρτισης χωρίς να καταναλώνει την μπαταρία. Στην ουσία γίνεται επιλογή πηγής από το ολοκληρωμένο, όπου πάντα επιλέγει την εξωτερική πηγή. Εάν η εξωτερική πηγή δεν είναι παρούσα, τότε καταναλώνει την ενέργεια της μπαταρίας.

Το κύκλωμα σχεδιάστηκε και με βάση την ευελιξία ανάμεσα στις επιλογές που δίνονται από το ολοκληρωμένο. Για αυτόν τον λόγο, έχουν τοποθετηθεί στα σημεία που αναφέρει ο κατασκευαστής η επιλογή του σεταρίσματος του ρεύματος και της ώρας που θα γίνει τερματισμός φόρτισης με βραχυκυκλωτήρες.

Στο κύκλωμα επίσης έχει προστεθεί ένα θερμίστορ δίπλα στην μπαταρία για την προστασία της και τη διακοπή τροφοδοσίας της από το κύκλωμα σε περίπτωση υπερθέρμανσης. Επιπλέον, δύο LED έχουν τοποθετηθεί για να υποδεικνύουν ότι η τροφοδοσία του κυκλώματος είναι σωστή στα 5V και ένα ακόμη LED που υποδεικνύει την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας. Η τάση που βγαίνει από την έξοδο του κυκλώματος εξαρτάται από την τάση της μπαταρίας, η οποία μπορεί να κυμαίνεται από τα 2.7V μέχρι τα 4.1V.

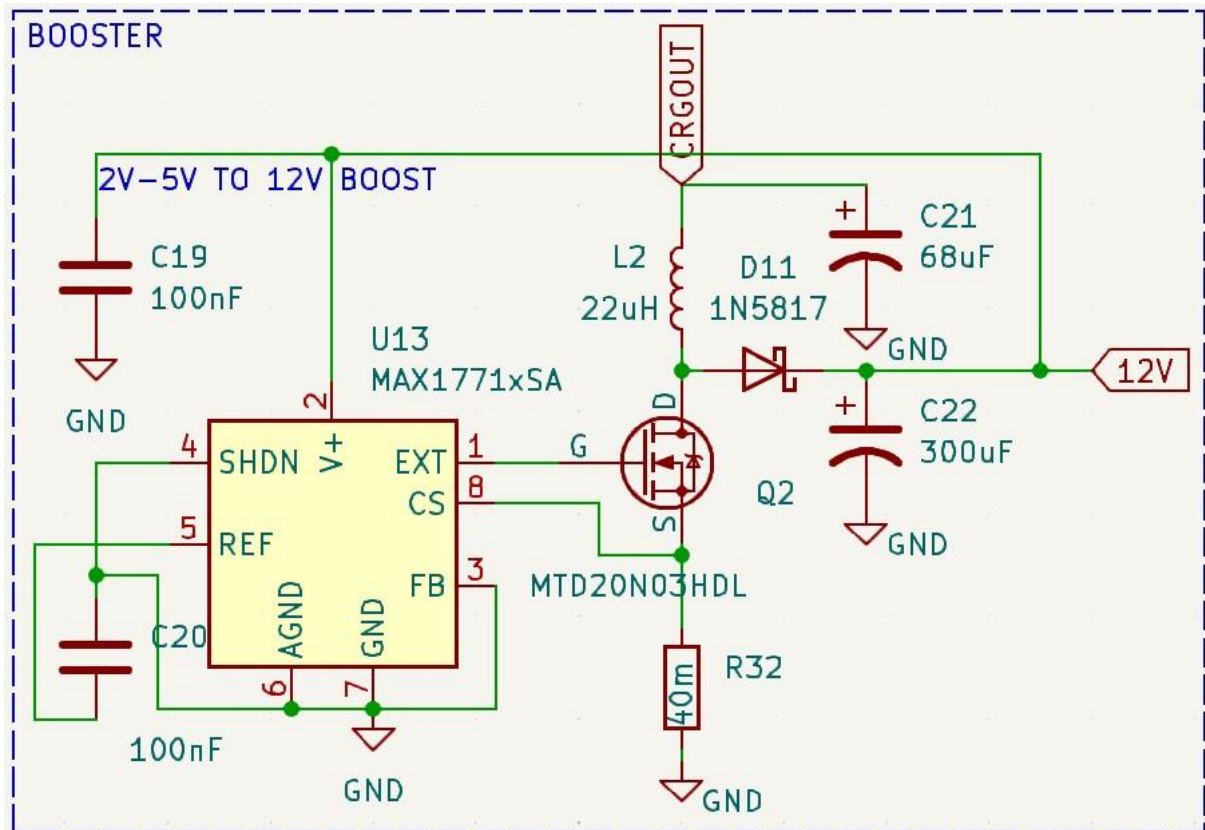
Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν το BQ24075 ιδανικό για τη διαχείριση της μπαταρίας 18650 στη φορητή συσκευή διασφαλίζοντας την αποτελεσματική και ασφαλή τροφοδοσία της συσκευής.

Κύκλωμα Boost με το MAX1771

Στη συνέχεια, η τάση που παράγει η έξοδος του BQ24075 οδηγείται στο κύκλωμα boost του MAX1771. Το MAX1771 είναι ένα ολοκληρωμένο το οποίο ελέγχει έναν διακόπτη σε σχέση με το feedback της τάσης που λαμβάνει παρέχοντας ανυψωμένη τάση με υψηλή απόδοση. Σε αυτό το κύκλωμα χρησιμοποιείται η τοπολογία boost converter για να αυξήσει την τάση από την μπαταρία στα 12V. Η τοπολογία boost converter είναι μια αρχιτεκτονική στην οποία η είσοδος τροφοδοτεί ένα πηνίο, και στη συνέχεια ο διακόπτης και η διόδος ελέγχουν την εκφόρτιση του πηνίου στην έξοδο, δημιουργώντας μια υψηλότερη τάση από αυτή της εισόδου.

Το κύκλωμα boost με το MAX1771 έχει την ικανότητα να ανυψώνει την τάση στα 12V με αρκετά καλή απόδοση, συνήθως πάνω από 85%. Η έξοδος αυτού του κυκλώματος στα 12V μπορεί να παρέχει ρεύμα μέχρι 1.5A, καθιστώντας το κατάλληλο για την τροφοδοσία διαφόρων τμημάτων της συσκευής που απαιτούν υψηλότερη τάση.

Έτσι το κύκλωμα τροφοδοσίας είναι σε θέση να διαχειρίζεται αποτελεσματικά την ενέργεια από την μπαταρία και να την ανυψώνει στην απαιτούμενη τάση. Παρακάτω απεικονίζεται και το κύκλωμα που σχεδιάστηκε για την λειτουργία του boost στα 12V.



Εικόνα 4.8 Σχεδιαστικό κυκλώματος ενίσχυσης τάσης τροφοδοσίας.

Μετατροπή τάσης με το ICL7660 σε αρνητική τάση

Η τάση που παράγεται από το κύκλωμα boost του MAX1771 χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να γίνει η μετατροπή της τάσης σε αρνητική, ώστε να παρέχουμε στους τελεστικούς ενισχυτές την κατάλληλη τροφοδοσία για την υποστήριξη της παραγωγής διπολικών AC παλμών. Αυτό επιτυγχάνεται με το ολοκληρωμένο κύκλωμα ICL7660, το οποίο είναι σχεδιασμένο για την αναστροφή της τάσης που δέχεται.

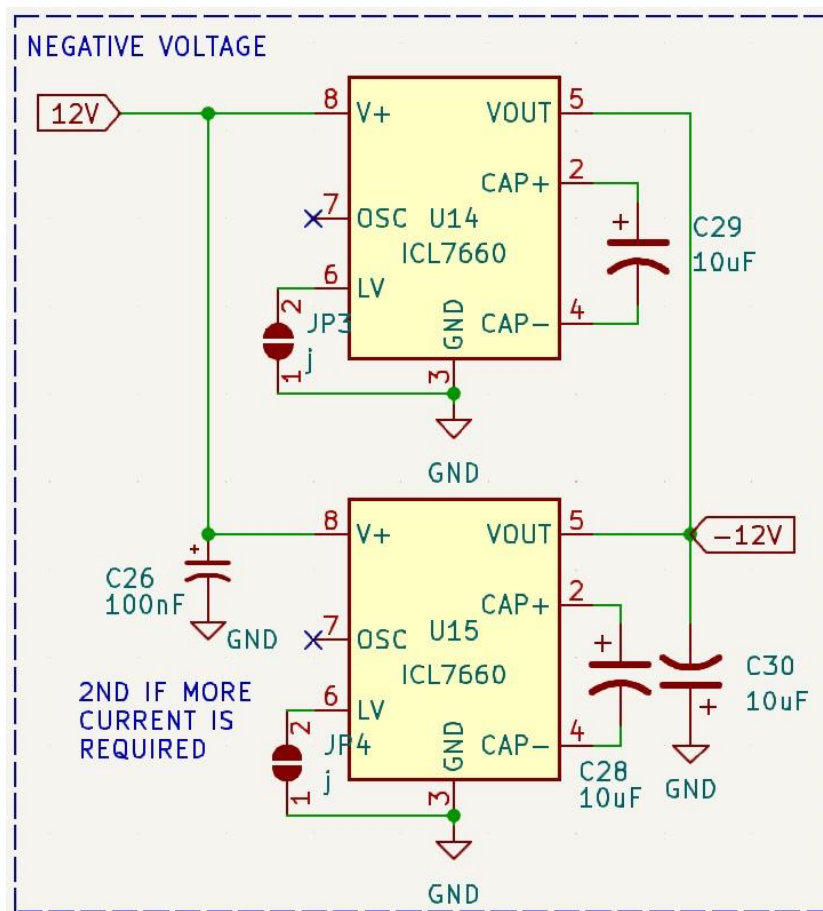
Το ICL7660 λειτουργεί χρησιμοποιώντας έναν εσωτερικό διακόπτη που εναλλάσσεται γρήγορα για να μεταφέρει φορτίο από την είσοδο στην έξοδο. Με τη χρήση πυκνωτών αποθήκευσης και μεταφοράς, το ICL7660 μπορεί να δημιουργήσει μια αρνητική τάση από μια θετική τάση εισόδου. Συγκεκριμένα, το κύκλωμα λειτουργεί ως εξής:

Φάση Φόρτισης: Κατά τη φάση φόρτισης, ένας πυκνωτής φόρτισης συνδέεται ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο του διακόπτη, αποθηκεύοντας ενέργεια.

Φάση Εκφόρτισης: Κατά τη φάση εκφόρτισης, ο πυκνωτής εκφόρτισης συνδέεται ανάμεσα στην έξοδο και τη γείωση, μεταφέροντας την αποθηκευμένη ενέργεια στην έξοδο ως αρνητική τάση.

Το ICL7660 μπορεί να παρέχει αρνητική τάση έως $-12V$, ανάλογα με την τάση εισόδου, και έχει τυπική απόδοση περίπου 90%. Ωστόσο, επειδή το ICL7660 έχει περιορισμένη παροχή ρεύματος, τυπικά έως 20 mA, προνοήθηκε να μπορεί να τοποθετηθεί και ένα δεύτερο ολοκληρωμένο κύκλωμα παράλληλα για περισσότερη παροχή ρεύματος.

Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται ότι η αρνητική τάση που παράγεται μπορεί να υποστηρίξει τις απαιτήσεις ρεύματος των τελεστικών ενισχυτών, που χρειάζονται σταθερή και αξιόπιστη τροφοδοσία για την παραγωγή διπολικών AC παλμών. Τέλος, η τάση που παράγεται είναι αρνητική στην έξοδο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω για την τροφοδοσία των κυκλωμάτων που απαιτούν αρνητική τάση, όπως οι τελεστικοί ενισχυτές για την παραγωγή διπολικών AC παλμών.



Εικόνα 4.9 Σχεδιαστικό κυκλώματος αναστροφής τάσης.

Σταθεροποίηση Τάσης

Εφόσον έχουμε παραγάγει την αρνητική τάση των $-12V$, μπορούμε να παραγάγουμε όλες τις τάσεις που επιθυμούμε με τους κατάλληλους σταθεροποιητές τάσης. Στο κομμάτι αυτό χρησιμοποιούμε

σταθεροποιητές τάσης για τους τελεστικούς ενισχυτές στα $\pm 8V$ με τους L7808 και L7908 αντίστοιχα, έτσι ώστε να έχουμε σταθερή και ίση τροφοδοσία για την παραγωγή των διπολικών AC παλμών.

Συγκεκριμένα:

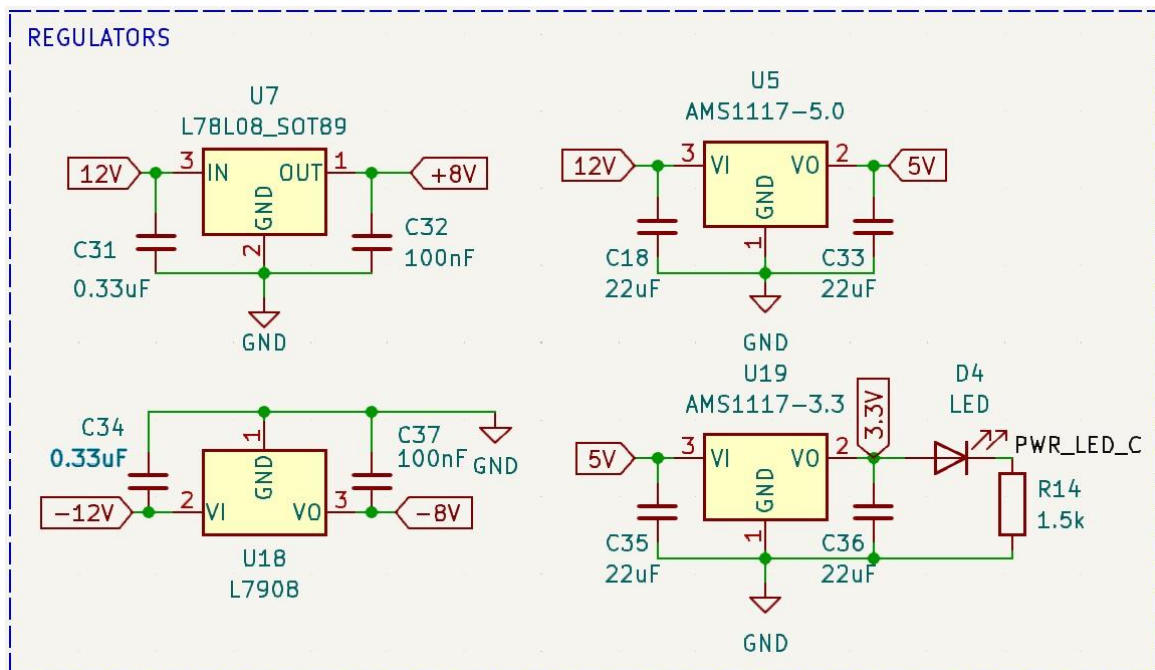
L7808: Σταθεροποιεί την θετική τάση από τα 12V στα 8V, παρέχοντας σταθερή έξοδο 8V με μέγιστο ρεύμα 1.5A.

L7908: Σταθεροποιεί την αρνητική τάση από τα -12V στα -8V, παρέχοντας σταθερή έξοδο -8V με μέγιστο ρεύμα 1.5A.

Στη συνέχεια, σταθεροποιούμε την τάση από τα 12V στα 5V και μετά στα 3.3V για να υπάρχει καλύτερη κατανομή της θερμοκρασίας λόγω της υψηλής διαφοράς τάσης απευθείας για τα 3.3V, χρησιμοποιώντας τους σταθεροποιητές AMS1117-5 και AMS1117-3.3 αντίστοιχα.

AMS1117-5: Μειώνει την τάση από τα 12V στα 5V, παρέχοντας σταθερή έξοδο 5V με μέγιστο ρεύμα 1A.

AMS1117-3.3: Μειώνει την τάση από τα 5V στα 3.3V, παρέχοντας σταθερή έξοδο 3.3V με μέγιστο ρεύμα 1A.



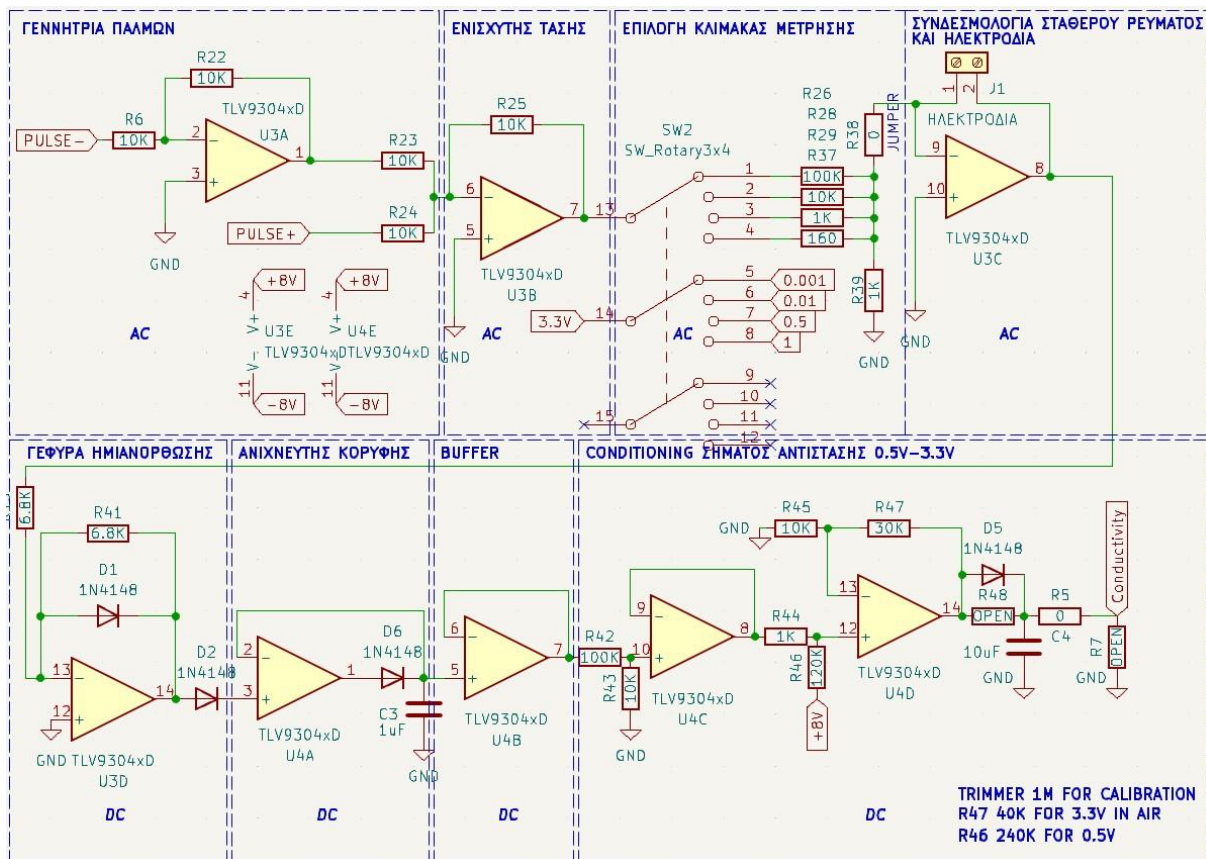
Εικόνα 4.10 Σχεδιαστικό κυκλώματος σταθεροποιητών τάσης.

Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν όλες οι απαραίτητες τάσεις για την τροφοδοσία των διαφόρων συστημάτων του κυκλώματος, εξασφαλίζοντας σταθερότητα και αποδοτικότητα στην τροφοδοσία της συσκευής.

4.5.2 Αναλογικά

Υλοποίηση του Αναλογικού Μέρους του Κυκλώματος

Το αναλογικό μέρος του κυκλώματος παίζει κρίσιμο ρόλο στη μέτρηση της αντίστασης του εδάφους. Βασικά στοιχεία του αναλογικού κυκλώματος είναι οι τελεστικοί ενισχυτές και οι διαιρέτες τάσης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία και την προσαρμογή των σημάτων. Στο κύκλωμα που υλοποιήθηκε χρησιμοποιήθηκαν τελεστικοί ενισχυτές ακριβείας οι TLV9304 καθώς και παθητικά στοιχεία ανοχής 1% όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα της προσομοίωσης. Στη συνέχεια όπου κρίθηκε απαραίτητο χρησιμοποιήθηκαν trimmer για την βαθμονόμηση του σήματος. Επίσης τοποθετήθηκαν κλέμμες στα σημεία που θέλουμε να παρεμβάλουμε τα ηλεκτρόδια έτσι ώστε να ενωθούν με τα καλώδια Ethernet UTP. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν οι συνθήκες για την μέτρηση της αντίστασης του εδάφους.



Εικόνα 4.11 Σχεδιαστικό κυκλώματος μέτρησης αγωγιμότητας.

Στο αναλογικό κομμάτι μέτρησης υγρασίας του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν διάφορα παθητικά στοιχεία με ανοχή 1%, καθώς και άλλα ολοκληρωμένα κυκλώματα υψηλής ακρίβειας για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα και η ακρίβεια των μετρήσεων. Η πλακέτα αναπτύχθηκε με ευελιξία, επιτρέποντας την επιλογή δύο διαφορετικών πηγών συχνότητας για την εκτίμηση της υγρασίας στο έδαφος. Αυτή η ευελιξία είναι σημαντική, καθώς επιτρέπει τη χρήση εναλλακτικών τρόπων λειτουργίας του κυκλώματος, σε περίπτωση που ένας από τους δύο τρόπους αποδειχθεί μη αποτελεσματικός σε συγκεκριμένες συνθήκες.

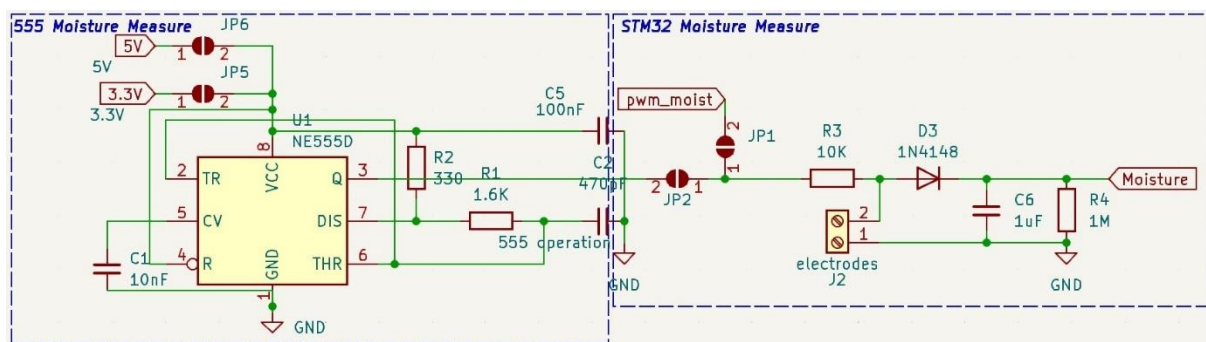
Για αυτό το λόγο, σχεδιάστηκε ένα κύκλωμα παραγωγής τετραγωνικών παλμών με duty cycle 50% και συχνότητα 400kHz, χρησιμοποιώντας το ολοκληρωμένο κύκλωμα timer 555. Το 555 είναι ένα δημοφιλές ολοκληρωμένο κύκλωμα χρονισμού που μπορεί να ρυθμιστεί για να παράγει σταθερούς παλμούς με προκαθορισμένη συχνότητα και διάρκεια. Το κύκλωμα αυτό επιλέχθηκε για τη σταθερότητα και την απλότητά του, καθώς και για την ικανότητά του να παράγει ακριβείς τετραγωνικούς παλμούς.

Μετά από διερεύνηση στο αναλογικό κομμάτι της παραγωγής παλμών, αποφασίστηκε τελικά να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος παραγωγής παλμών μέσω του μικροελεγκτή. Η επιλογή αυτή αποδείχθηκε πιο αποδοτική από πολλές απόψεις. Η χρήση του μικροελεγκτή για την παραγωγή παλμών προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και ακρίβεια στις ρυθμίσεις της συχνότητας και του duty cycle, επιτρέποντας την προσαρμογή των παλμών στις συγκεκριμένες απαιτήσεις του συστήματος.

Επιπλέον, η χρήση του μικροελεγκτή συμβάλλει στη βελτίωση της απόδοσης της συσκευής από άποψη ζωής της μπαταρίας και κατανάλωσης ενέργειας. Ο μικροελεγκτής μπορεί να διαχειριστεί την παραγωγή παλμών με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με τη συνεχή λειτουργία του timer 555. Αυτό μειώνει την κατανάλωση της μπαταρίας, επιμηκύνοντας τη διάρκεια ζωής της συσκευής και μειώνοντας τη συχνότητα αντικατάστασης ή φόρτισης της μπαταρίας.

Τέλος, η χρήση του μικροελεγκτή για την παραγωγή παλμών μειώνει τον μόνιμο θόρυβο που δημιουργείται όταν ο timer 555 λειτουργεί συνεχώς. Ο μικροελεγκτής μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να παράγει παλμούς μόνο όταν είναι απαραίτητο, μειώνοντας έτσι τον θόρυβο και βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος.

Με αυτά τα πλεονεκτήματα, η επιλογή του μικροελεγκτή για την παραγωγή παλμών καθιστά το σύστημα πιο αποδοτικό και αξιόπιστο, εξασφαλίζοντας την ακριβή μέτρηση της υγρασίας του εδάφους. Παρακάτω απεικονίζεται το σχέδιο της μέτρησης της υγρασίας του εδάφους.



Εικόνα 4.12 Σχεδιαστικό κυκλώματος μέτρησης υγρασίας.

Με την ολοκλήρωση του αναλογικού μέρους, μπορούμε τώρα να προχωρήσουμε στην ανάλυση και υλοποίηση των ψηφιακών κυκλωμάτων. Τα ψηφιακά κυκλώματα έχουν έναν σημαντικό ρόλο στην επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνονται από το αναλογικό κύκλωμα, στην αποθήκευση των μετρήσεων, καθώς και στη διαχείριση της επικοινωνίας με άλλα ολοκληρωμένα και συστήματα.

4.5.3 Ψηφιακά κυκλώματα και MCU

Διαχείριση του Κυκλώματος με τον Μικροελεγκτή STM32F103Rb

Για τη διαχείριση του κυκλώματος των αναλογικών και ψηφιακών συστημάτων που δημιουργήθηκαν, χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής STM32F103Rb. Ο μικροελεγκτής αυτός λειτουργεί ως ο κύριος εγκέφαλος της συσκευής και επιλέχθηκε λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων του, όπως το χαμηλό κόστος, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και η πληθώρα περιφερειακών που υποστηρίζει. Συγκεκριμένα, ο STM32F103Rb είναι οικονομικός, κάτι που τον καθιστά ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν πολλαπλά αντίγραφα ή μαζική παραγωγή. Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας του μικροελεγκτή είναι κρίσιμη για την αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας σε φορητές συσκευές, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη αυτονομία. Επιπλέον, ο μικροελεγκτής υποστηρίζει διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως SPI, I2C, 3xUART, και debug interfaces, διευκολύνοντας την ενσωμάτωσή του με άλλα κυκλώματα και αισθητήρες, ενώ η υποστήριξη για το FreeRTOS επιτρέπει την ανάπτυξη σύνθετων εφαρμογών με πολλαπλά threads.

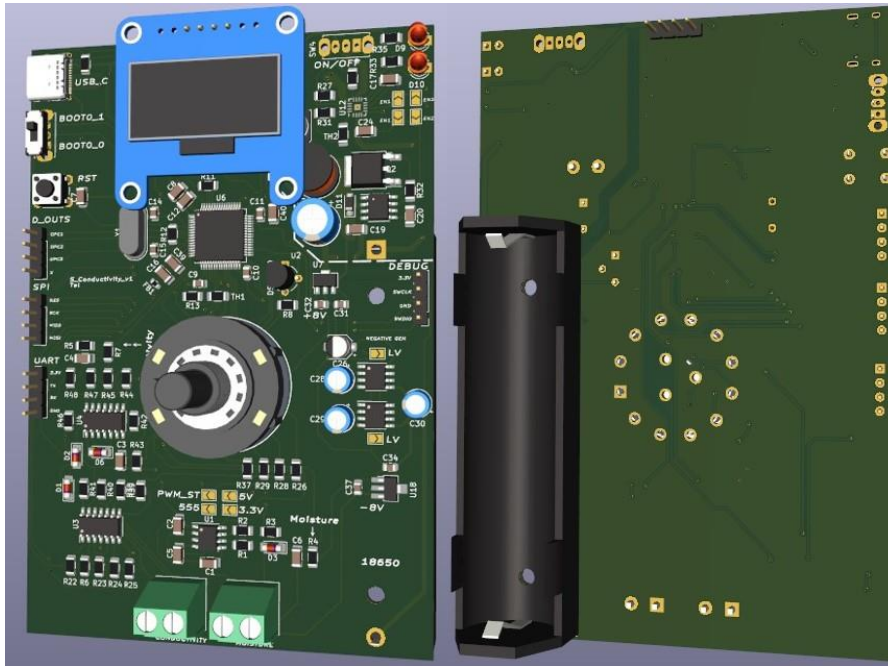
Ο STM32F103Rb διαχειρίζεται την επικοινωνία με τα αναλογικά και ψηφιακά συστήματα της συσκευής, εκτελώντας πολλές κρίσιμες λειτουργίες. Επικοινωνεί με την οθόνη OLED SSD1306 μέσω του πρωτοκόλλου I2C επιτρέποντας την άμεση οπτική ανατροφοδότηση των μετρήσεων στον χρήστη. Η οθόνη SSD1306 επιλέχθηκε λόγω της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, γεγονός που συμβάλλει στην αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Επικοινωνεί επίσης με τον αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20 μέσω του πρωτοκόλλου OneWire, επιτρέποντας την ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας του εδάφους. Το πρωτόκολλο OneWire επιλέχθηκε επειδή μειώνει τον αριθμό των ψηφιακών εξόδων και εισόδων που απαιτούνται για την επικοινωνία, εξοικονομώντας πολύτιμους πόρους στον μικροελεγκτή.

Επιπλέον, ο μικροελεγκτής παράγει παλμούς με συγκεκριμένη συχνότητα και band gap μεταξύ των παλμών μέσω των ψηφιακών εξόδων. Οι παλμοί αυτοί είναι κρίσιμοι για την αποφυγή της πόλωσης των ηλεκτροδίων, εξασφαλίζοντας ακριβείς μετρήσεις μακροπρόθεσμα. Ο STM32F103Rb διαθέτει επίσης ενσωματωμένο ADC (Analog-to-Digital Converter) για την ανάγνωση των τάσεων από τα αναλογικά κυκλώματα. Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αντίστασης του εδάφους, της υγρασίας και της θερμοκρασίας, επιτρέποντας την εκτίμηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους.

Με βάση τις αναλογικές μετρήσεις, ο STM32F103Rb υπολογίζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους και εμφανίζει τα αποτελέσματα στην OLED οθόνη. Στην οθόνη απεικονίζεται το ποσοστό υγρασίας του εδάφους σε ποσοστό επί τοις εκατό, η θερμοκρασία του εδάφους, η εκτίμηση αν το έδαφος χρειάζεται λιπάσματα (σε περιπτώσεις χαμηλής αγωγιμότητας), καθώς και αν τα επίπεδα ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι πολύ υψηλά, κάτι που υποδηλώνει την αλατότητα του εδάφους, η οποία μπορεί να είναι καταστροφική για ορισμένα φυτά. Αυτή η λεπτομερής απεικόνιση παρέχει στον χρήστη άμεση και αξιόπιστη πληροφόρηση για την κατάσταση του εδάφους, βοηθώντας στη λήψη αποφάσεων για την καλλιέργεια ή άλλες εφαρμογές.

4.6 Κατασκευή PCB

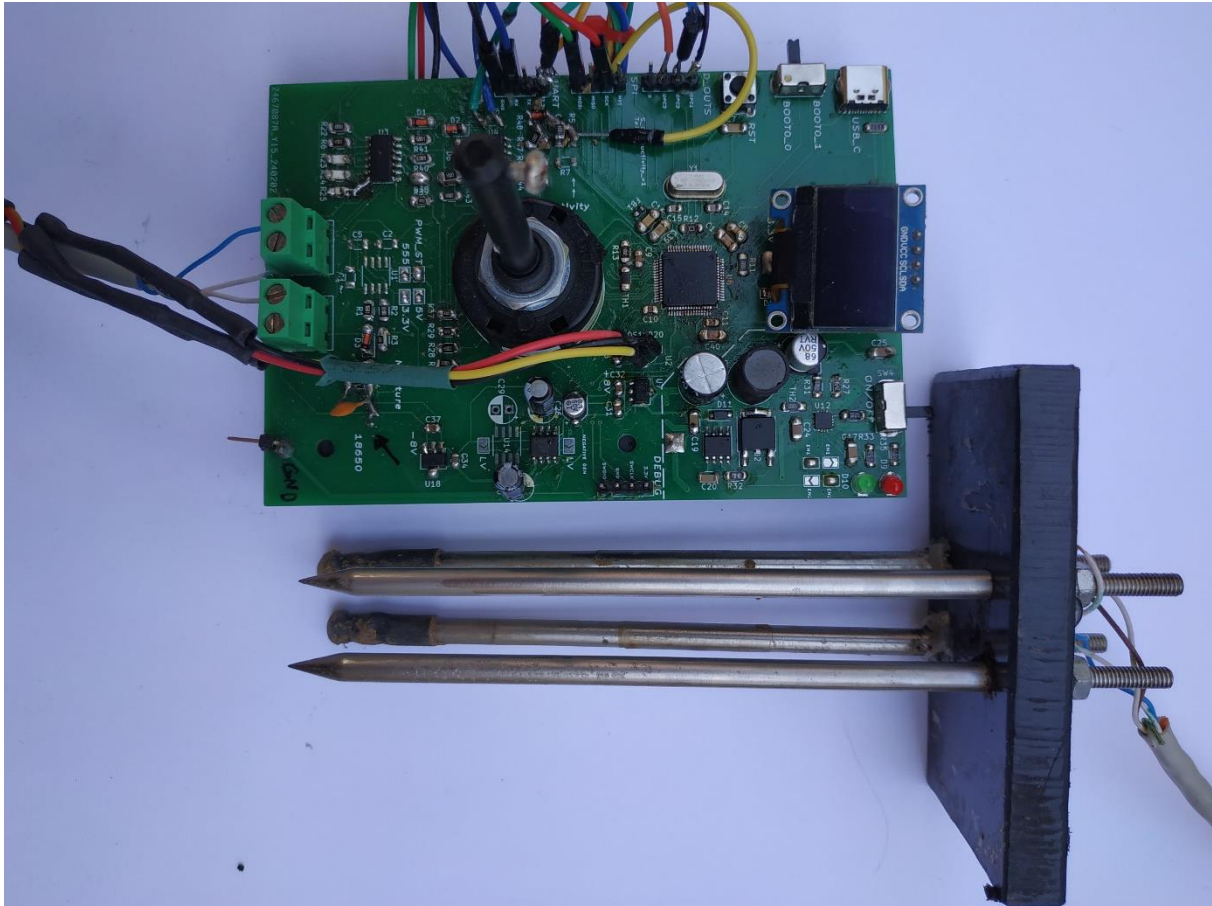
Για τον σχεδιασμό του τυπωμένου κυκλώματος (PCB) καθώς και του σχεδίου του, χρησιμοποιήθηκε το Open Source λογισμικό Kicad 7.0. Αρχικά, σχεδιάστηκαν τα κυκλώματα που παρουσιάσαμε προηγουμένως και τοποθετήθηκαν τα κατάλληλα footprints για να περάσουμε στη φάση του σχεδιασμού του τυπωμένου κυκλώματος. Το μέγεθος του PCB ορίστηκε στα 11cm ύψος x 8cm πλάτος, έτσι ώστε η συσκευή να μπορεί να κρατηθεί άνετα με το ένα χέρι από τον χρήστη. Τα υλικά τοποθετήθηκαν σε συγκεκριμένες θέσεις για να αποφευχθεί η δημιουργία θορύβου. Το κύκλωμα παραγωγής τάσεων, το οποίο προκαλεί θόρυβο λόγω της φύσης των διακοπτικών κυκλωμάτων, τοποθετήθηκε σε απομακρυσμένη θέση από τα αναλογικά κυκλώματα μέτρησης, ώστε να μειωθεί η επίδραση του θορύβου στις ευαίσθητες μετρήσεις. Με τη χρήση του Kicad 7.0, εξασφαλίστηκε η ορθή λειτουργία του κυκλώματος καθώς και η οπτικοποίηση του τυπωμένου κυκλώματος, βοηθώντας στην αποφυγή λαθών σε διάφορα footprints και packages, επιτρέποντας την ακρίβεια στην κατασκευή και την αξιοπιστία του τελικού προϊόντος.



Εικόνα 4.14 Τρισδιάστατη αναπαράσταση τυπωμένου κυκλώματος.

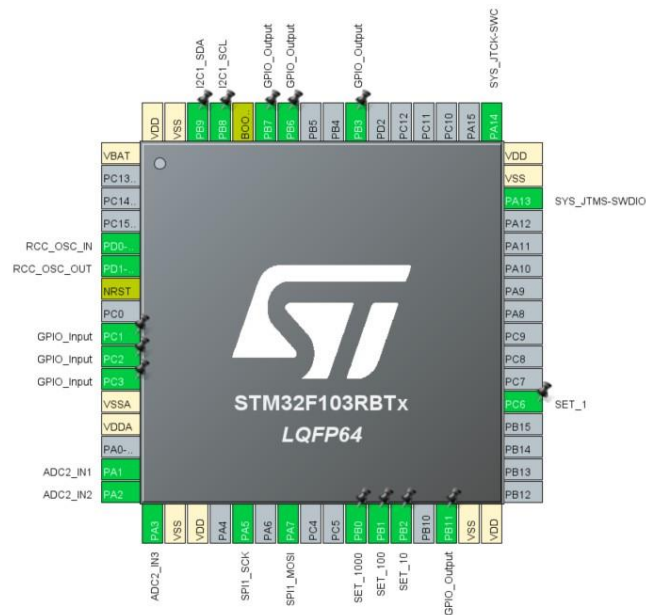
Αφού σχεδιάστηκε το τυπωμένο κύκλωμα της πλακέτας, προχωρήσαμε στην παραγωγή του και στη διαδικασία της συναρμολόγησης του κυκλώματος. Αρχικά, ελέγχθηκαν οι τάσεις που σχεδιάστηκαν για το κύκλωμα χρησιμοποιώντας ένα πολύμετρο, επαληθεύοντας ότι οι τάσεις εξόδου από τους σταθεροποιητές ήταν οι αναμενόμενες και εντός των προδιαγραφών. Αφού επιβεβαιώθηκε η σωστή παραγωγή των τάσεων, προχωρήσαμε στη συναρμολόγηση του υπόλοιπου κυκλώματος, τοποθετώντας και συγκολλώντας τα εξαρτήματα στην πλακέτα. Παρακάτω απεικονίζεται και το τυπωμένο κύκλωμα συναρμολογημένο που δημιουργήθηκε.

Μετά τη διόρθωση τυχόν λαθών και την εξασφάλιση της σωστής λειτουργίας του PCB, προχωρήσαμε στην εφαρμογή του προγράμματος λειτουργίας (firmware) στον μικροελεγκτή STM32F103Rb, διασφαλίζοντας ότι εκτελεί τις αναγκαίες λειτουργίες επικοινωνίας, επεξεργασίας σήματος και απεικόνισης δεδομένων. Με την ολοκλήρωση της κατασκευής και της αρχικής δοκιμής του PCB, μπορούμε πλέον να προχωρήσουμε στη λεπτομερή ανάλυση και ανάπτυξη του firmware.



Εικόνα 4.15 Υλοποίηση τυπωμένου κυκλώματος.

4.7 Firmware και έλεγχος λειτουργίας



Εικόνα 4.16 I/O μικροεπεξεργαστή.

Το firmware για τη συσκευή μας παίζει κρίσιμο ρόλο στη λειτουργία της, καθώς είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία με τα περιφερειακά, την επεξεργασία των δεδομένων και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων στον χρήστη. Το firmware αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας τη γλώσσα C και το πρόγραμμα STM32Cube IDE για την εγγραφή του. Το firmware αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία της συσκευής, καθώς σε αυτό δημιουργείται η λογική της συσκευής, διαχειρίζονται όλες οι τιμές των αναλογικών σημάτων και ενημερώνονται οι τιμές στην οθόνη OLED.

Αρχιτεκτονική του Firmware

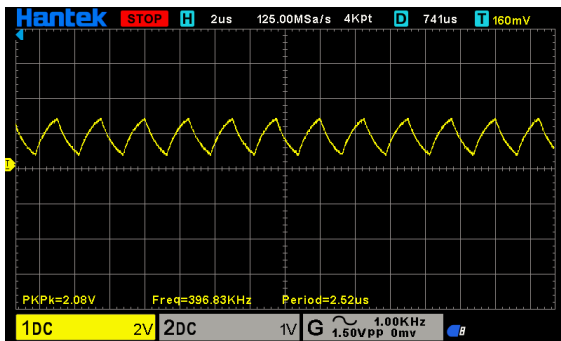
Η αρχιτεκτονική του firmware χωρίζεται σε διάφορα υποσυστήματα, το καθένα από τα οποία είναι υπεύθυνο για συγκεκριμένες λειτουργίες. Αυτή η δομή επιτρέπει τη διαχείριση των αναλογικών και ψηφιακών συστημάτων με αποδοτικότητα και ακρίβεια.

Αρχικοποίηση Περιφερειακών: Κατά την εκκίνηση της συσκευής, το firmware αρχικοποιεί όλα τα απαραίτητα περιφερειακά. Αυτό περιλαμβάνει την αρχικοποίηση του I2C για την οθόνη OLED, του OneWire για επικοινωνία με τον αισθητήρα θερμοκρασίας και του ADC για την ανάγνωση αναλογικών σημάτων. Χρησιμοποιήθηκαν εντολές χαμηλού επιπέδου (LL) για να επιτευχθεί μεγαλύτερη συχνότητα και αποδοτικότητα στην επικοινωνία και τη διαχείριση των δεδομένων.

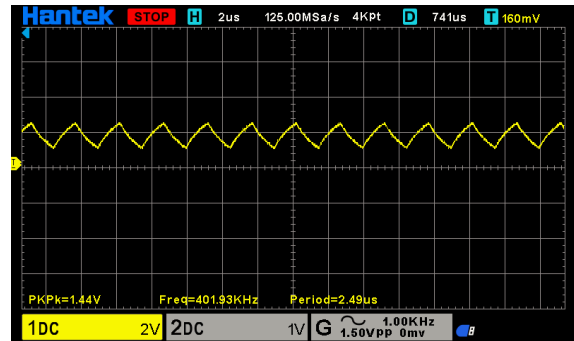
Μενού Αρχικής Οθόνης: Μετά την αρχικοποίηση, ο χρήστης οδηγείται στο μενού της αρχικής οθόνης, όπου εμφανίζονται οι τιμές που μπορούν να μετρηθούν. Αυτό το στάδιο επιτρέπει στον χρήστη να δει τις διαθέσιμες επιλογές και να ξεκινήσει τη διαδικασία μέτρησης όταν είναι έτοιμος. Εφόσον ο χρήστης πατήσει το κουμπί εκκίνησης μετρήσεων ο STM32F103Rb ξεκινά τη διαδικασία μέτρησης.

Μέτρηση Υγρασίας Εδάφους: Ο μικροελεγκτής παράγει παλμούς 400kHz για την εκτίμηση της υγρασίας μέσω των ηλεκτροδίων. Αυτοί οι παλμοί παράγονται με ακρίβεια χρησιμοποιώντας τις εντολές (LL) του μικροελεγκτή για να διασφαλιστεί η σταθερότητα και η ακρίβεια της συχνότητας.

Έπειτα στο τυπωμένο κύκλωμα επαληθεύτηκε η λειτουργία του κυκλώματος με τους τετραγωνικούς παλμούς να περνάνε μέσα από το φίλτρο που δημιουργείται από την αντίσταση 10K OHM και τον πυκνωτή του εδάφους ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας που περιέχει. Επομένως βλέπουμε την μετατροπή των τετραγωνικών παλμών σε τριγωνικών και παρατηρούμε την διαφορά της εξόδου από τα επίπεδα υγρασίας 20-30% και 90-100%. Παρατηρήθηκε η αλλαγή στο πλάτος της τάσης εξόδου των παλμών σε ξηρό έδαφος από 2.08V σε 1.44V όταν προσθέσαμε απιονισμένο νερό και αυξήσαμε την υγρασία του εδάφους. Έπειτα λαμβάνουμε την σταθερή DC τάση από τον ανιχνευτή κορυφής και οι μετρήσεις υγρασίας εδάφους υπολογίζονται ποσοστιαία και εμφανίζονται στην οθόνη OLED.

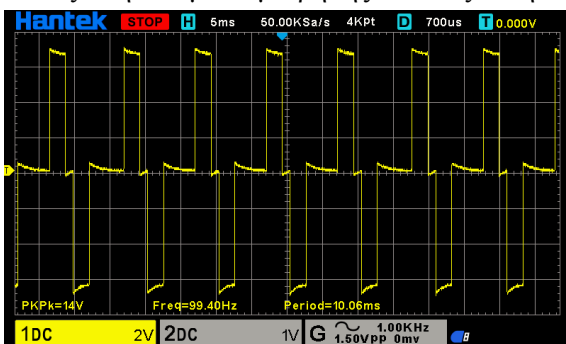


Γράφημα 4.11 Πειραματική μέτρηση επαλήθευσης κυκλώματος υγρασίας στον αέρα.

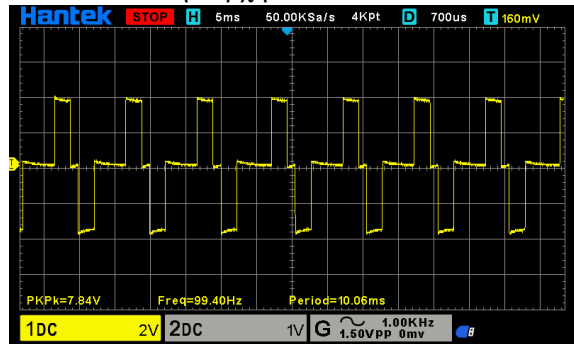


Γράφημα 4.12 Πειραματική μέτρηση επαλήθευσης κυκλώματος υγρασίας στο έδαφος με παρουσία υγρασίας.

Μέτρηση Αντίστασης Εδάφους: Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία μέτρησης της υγρασίας ξεκινά η μέτρηση της αντίστασης του εδάφους. Ο STM32F103Rb δημιουργεί τους παλμούς και τους οδηγεί στα αναλογικά κυκλώματα που έχουν δημιουργηθεί. Μετά από λίγο, λαμβάνει τη μέτρηση της αντίστασης του εδάφους σε μορφή τάσης από τους τελεστικούς και αποθηκεύει αυτή την τάση. Εάν η μέτρηση είναι εκτός ορίων, τότε εμφανίζεται σχετικό μήνυμα που ενημερώνει τον χρήστη ότι πρέπει να αλλάξει την κλίμακα μέτρησης και να ξεκινήσει τη διαδικασία από την αρχή.



Γράφημα 4.13 Πειραματική μέτρηση επαλήθευσης κυκλώματος αντίστασης εδάφους σε αντίσταση 150 Ohm.



Γράφημα 4.14 Πειραματική μέτρηση επαλήθευσης κυκλώματος αντίστασης εδάφους σε αντίσταση 75 Ohm.

Για την επαλήθευση της σωστής λειτουργίας του κυκλώματος χρησιμοποιήσαμε ενδεικτικά συγκεκριμένες τιμές αντιστάσεων για την ανίχνευσή τους καθώς και για να διαπιστώσουμε την σωστή λειτουργία των αναλογικών κυκλωμάτων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν αντιστάσεις 150 Ohm και

75 Ohm για να παρατηρηθεί η πτώση τάσης στο μισό της αρχικής. Παρακάτω ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις που αποτυπώνουν την αλλαγή του πλάτους της τάσης στην έξοδο του τελεστικού των ηλεκτροδίων.

Για να μπορέσουμε να αντιστοιχίσουμε την μετρούμενη τάση στην έξοδο των τελεστικών σε αντίσταση χρησιμοποιήσαμε τα εύρη που εκτιμήθηκαν από την προσομοίωση στο Orcad PSpice. Με αυτόν τον τρόπο γνωρίζοντας το εύρος των τεσσάρων κλίμακων δημιουργήθηκε στο firmware ένας συντελεστής για κάθε κλίμακα. Με βάση αυτόν τον συντελεστή μπορούμε να υπολογίσουμε κατά προσέγγιση την μετρούμενη αντίσταση για κάθε mV. Οι συντελεστές υπολογίστηκαν ως εξής :

Εύρος τάσης X1 : 0.5V – 3.3V

Εύρος αντίστασης από 1Ω – 320Ω

1. Υπολογισμός διαφοράς τάσης (ΔV)

$$\Delta V = 3.3V - 0.5V = 2.8V \quad (4.5)$$

2. Υπολογισμός διαφοράς αντίστασης (ΔR)

$$\Delta R = 320\Omega - 1\Omega = 319\Omega \quad (4.6)$$

3. Μετατροπή τάσης σε mV

$$\Delta V = 2.8V * 1000 = 2800mV$$

4. Υπολογισμός mV ανά ohm (mV/Ω)

$$mV/\Omega = \frac{\Delta V}{\Delta R} = \frac{2800mV}{319\Omega} = 8.77 mV/\Omega \quad (4.7)$$

Αντίστοιχα υπολογίστηκαν και οι υπόλοιποι συντελεστές

Κλίμακα X1: 8.77

Κλίμακα X10: 3.1

Κλίμακα X100: 0.31

Κλίμακα X1000: 0.031

Στην συνέχεια για την εκτίμηση της μετρούμενης αντίστασης έχουμε :

$$R = \frac{mV(measured)}{mVoltPerOhm} \quad (4.8)$$

Υπολογισμός Αγωγιμότητας Εδάφους : Με τις μετρήσεις αντίστασης και θερμοκρασίας εδάφους ο μικροελεγκτής μπορεί να υπολογίσει την αγωγιμότητα του εδάφους για τον συγκεκριμένο αισθητήρα. Η αγωγιμότητα του εδάφους υπολογίστηκε με βάση τους τύπους της ειδικής αντίστασης που εκφράζεται σε ($Ohm * m$) . Παρακάτω ακολουθεί η διαδικασία του υπολογισμού της υγρασίας του εδάφους.

Μήκος ηλεκτροδίων L : 12 cm

Ακτίνα ηλεκτροδίων r : 0,25 cm

Απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων l : 1 cm

Επιφάνεια επαφής ηλεκτροδίου A : $A = \pi * 0.25cm * 12cm = 3\pi * cm^2$

Επιφάνεια επαφής 2 ηλεκτροδίων $A_{total} = 2 * 3\pi * cm^2 = 6\pi * cm^2$

Λόγω της παράλληλης στοίχισης των ηλεκτροδίων μόνο οι εσωτερικές πλευρές των ηλεκτροδίων που είναι απέναντι η μία με την άλλη παίζουν σημαντικό ρόλο στην μεταφορά ρεύματος για αυτό λαμβάνουμε υπόψη μόνο την μισή επιφάνεια των ηλεκτροδίων.

$$\text{Ειδική αντίσταση ηλεκτροδίων } \rho \text{ σε } \Omega \cdot \text{m}: \rho = R * \left(\frac{A}{l}\right) \quad (4.9)$$

$$\rho = R * \frac{6\pi * cm^2}{1 * cm}$$

$$\rho = 6\pi R * cm$$

$$\rho = 18.84 * R * cm$$

$$\text{Τύπος ηλεκτρικής αγωγιμότητα } \sigma \text{ σε } S/cm : \sigma = \frac{1}{\rho * cm} \quad (4.10)$$

Οπότε για μια μέτρηση των 100 ohm θα έχουμε τιμή αγωγιμότητας :

$$\sigma = \frac{1}{18.84 * 100 * cm}$$

$$\sigma = 0.000531 S/cm$$

$$\text{Μετατροπή από } S/cm \text{ σε } mS/cm : \sigma = 1000 * 0.000531 S/cm$$

$$\sigma = 0.531 mS/cm$$

Μέτρηση Θερμοκρασίας: Εφόσον οι μετρήσεις της αντίστασης του εδάφους είναι εντός των καθορισμένων ορίων και μπορεί να υπολογισθεί η αγωγιμότητα, ξεκινά η μέτρηση της θερμοκρασίας. Αρχικά, συλλέγονται τα δεδομένα θερμοκρασίας του εδάφους με έναν αισθητήρα θερμοκρασίας όπως ο DS18B20, ο οποίος χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο OneWire για την επικοινωνία με τον μικροελεγκτή. Ο μικροελεγκτής στέλνει εντολή στον αισθητήρα για να μετρήσει τη θερμοκρασία, και η τιμή που επιστρέφεται αποθηκεύεται για τη διαδικασία αντιστάθμισης.

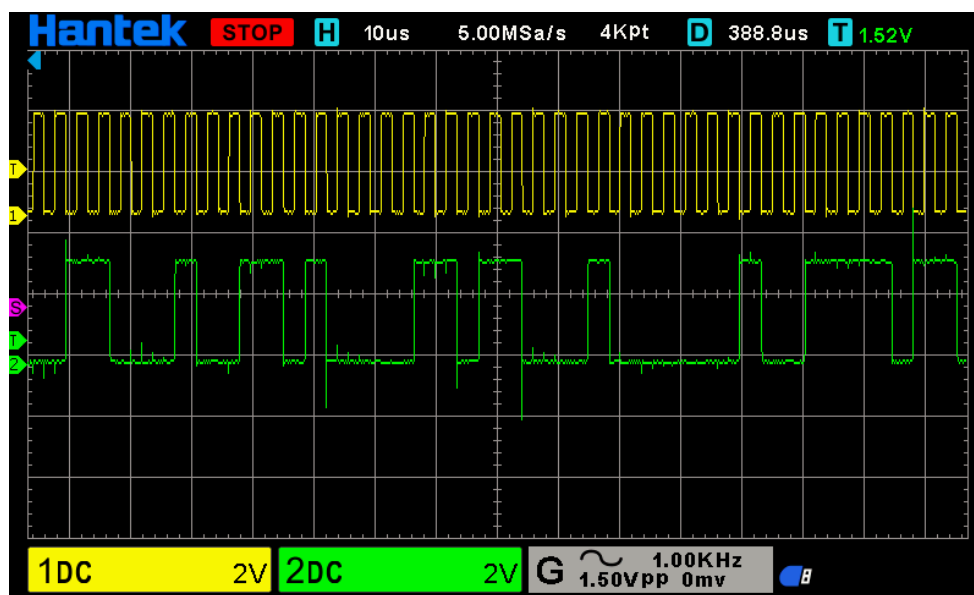
Για την αντιστάθμιση της θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται η εξίσωση $\sigma_{25} = \frac{\sigma_T}{(1+\alpha)(T-25)}$, όπου σ_{25} είναι η αγωγιμότητα στους 25°C, σ_T είναι η μετρούμενη αγωγιμότητα στη θερμοκρασία T , α είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής της αγωγιμότητας, και T είναι η θερμοκρασία του εδάφους κατά τη στιγμή της μέτρησης. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής α εξαρτάται από το είδος του εδάφους και το εδαφικό διάλυμα, συνήθως λαμβάνεται ως 0.019/°C για τυπικά εδάφη.

Μετά την εφαρμογή της αντιστάθμισης, η διορθωμένη τιμή της αγωγιμότητας επαληθεύεται με γνωστές συνθήκες και παρατηρούμενες τιμές για να διασφαλιστεί η ακρίβεια των μετρήσεων. Οι τιμές συγκρίνονται με πίνακες αγωγιμότητας για την πρόβλεψη της υγείας του εδάφους. Αν οι τιμές της αγωγιμότητας θεωρηθούν χαμηλές, κανονικές ή υψηλές, το firmware εμφανίζει τα αντίστοιχα μηνύματα στον χρήστη, προειδοποιώντας τον για την κατάσταση του εδάφους και τις ενδεχόμενες ανάγκες λίπανσης ή άλλων παρεμβάσεων.

Μέσος όρος τιμών: Εφόσον οι μετρούμενες τιμές εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, πάντα λαμβάνεται υπόψη ο μέσος όρος των τιμών που λαμβάνονται, ιδιαίτερα στα αναλογικά κυκλώματα. Σε κάθε περίπτωση, μετρούνται επαναλαμβανόμενες τιμές εξόδου και αποθηκεύονται σε πίνακα ξεχωριστό για κάθε μέγεθος για να χρησιμοποιηθούν στην εκτίμηση των τελικών τιμών που έχουν προκληθεί από τον μέσο όρο.

Ενημέρωση Οθόνης: Ο μικροελεγκτής εμφανίζει όλες τις υπολογισμένες τιμές στην OLED οθόνη. Οι τιμές αυτές περιλαμβάνουν το ποσοστό υγρασίας, την αντίσταση του εδάφους, τη θερμοκρασία και την αγωγιμότητα. Αυτό επιτρέπει στον χρήστη να έχει πλήρη και άμεση πληροφόρηση για την κατάσταση του εδάφους.

Αποστολή Τιμών μέσω SPI: Στη συνέχεια εφόσον έχουν ολοκληρωθεί οι μετρήσεις και έχουν εμφανιστεί στην οθόνη OLED ο μικροελεγκτής αναλαμβάνει να στείλει τα δεδομένα μέσω του σειριακού πρωτοκόλλου SPI (Serial Peripheral Interface) σε ένα άλλο πιθανό σύστημα που λαμβάνει αυτά τα δεδομένα και τα επεξεργάζεται. Το σειριακό πρωτόκολλο επιλέχτηκε να λειτουργεί στα 281.25Kbit/s που ήταν το ελάχιστο που μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε και αυτό για να μην υπάρχει περίπτωση επιρροής των tracks του κυκλώματος στην μορφή του σήματος.



Γράφημα 4.15 Λειτουργία SPI

Οι τιμές που απεικονίζονται είναι οι εξής :

Measured Resistance: 500mV-3300mV και εκτιμώμενη Αντίσταση σε Ohm.

Measured Moisture: 1500mV-2500mV και η ποσοστιαία αναπαράστασή της στο έδαφος επι τις 100.

Θερμοκρασία του εδάφους με το ds18b20 σε βαθμούς Celsius.

EC: Ηλεκτρική αγωγιμότητα εδάφους μετρούμενη σε mS/cm και σε uS/cm.

SENSE: Η επιλογή της κλίμακας μέτρησης αντίστασης εδάφους (X1, X10, X100, X1000)

Frequency: Η επιλογή της συχνότητας παραγωγής παλμών για την εκτίμηση της αντίστασης του εδάφους.



Εικόνα 4.17 Εμφάνιση τιμών στην οθόνη OLED.

Εγγραφή και Προγραμματισμός του Μικροελεγκτή

Για την εγγραφή και τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή STM32F103Rb, χρησιμοποιήθηκε ο προγραμματιστής/debugger STLINKv2. Ο STLINKv2 επιτρέπει την εύκολη σύνδεση του μικροελεγκτή με το STM32Cube IDE, διευκολύνοντας τη διαδικασία ανάπτυξης, προγραμματισμού και αποσφαλμάτωσης του firmware. Η χρήση του STLINKv2 εξασφαλίζει ότι το firmware μπορεί να προγραμματιστεί και να τροποποιηθεί αποτελεσματικά, παρέχοντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα για ζωντανή παρακολούθηση και ανάλυση της λειτουργίας του μικροελεγκτή κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης.

Με την ολοκλήρωση αυτών των διαδικασιών, το firmware διασφαλίζει την αξιόπιστη λειτουργία της συσκευής, επιτρέποντας την ακριβή μέτρηση και ανάλυση των δεδομένων από το έδαφος και παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για την κατάσταση και τις ανάγκες του εδάφους στον χρήστη.

Κεφάλαιο 5^ο : Μετρήσεις και αποτελέσματα

5.1 Μετρήσεις Εδάφους και Εκτίμηση Χαρακτηριστικών

Με την ολοκλήρωση της ανάπτυξης του firmware, προχωρήσαμε στις μετρήσεις για το εύρος μέτρησης της συσκευής καθώς και για την μέτρηση της αντίστασης και αγωγιμότητας του εδάφους και την εκτίμηση των χαρακτηριστικών του. Αρχικά για να μπορέσουμε να εκτιμήσουμε το εύρος μέτρησης του εδάφους πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε συγκεκριμένες τιμές αντιστάσεων ΤΗΤ στα άκρα του αισθητήρα έτσι ώστε να εκτιμηθεί η ακρίβεια του συστήματος. Έπειτα προχωρήσαμε στην εκτίμηση του εύρος της αντίστασης που μπορεί να ανιχνευθεί και έπειτα προχωρήσαμε στις μετρήσεις του εδάφους. Για να έχουμε ευελιξία στις μετρήσεις, επιλέχθηκαν τρία διαφορετικά είδη χώματος από κοινά παντοπωλεία, τα οποία είναι διαθέσιμα ευρέως. Τα είδη χώματος που επιλέχθηκαν είχαν ως κύριο κριτήριο τις διαφορετικές αγωγιμότητες που έχουν μεταξύ τους από την χαμηλή στην μεσαία και έπειτα σε υψηλή αγωγιμότητα. Παρακάτω αναλύουμε περισσότερα τα είδη των δειγμάτων.

Χώμα για κάκτους: Αυτό το χώμα είναι ειδικά σχεδιασμένο για κάκτους και άλλα σακχαρώδη φυτά, τα οποία χρειάζονται καλή αποστράγγιση και μειωμένη υγρασία. Συνήθως περιέχει μεγάλη ποσότητα άμμου και περλίτη. Η αγωγιμότητα σε αυτό το χώμα είναι συνήθως χαμηλή λόγω της μεγάλης ποσότητας αμμόδους υλικού που μειώνει την ικανότητα ηλεκτρολυτικής μεταφοράς.

Χώμα γενικής χρήσης: Αυτό το χώμα είναι ένα μείγμα διάφορων συστατικών, σχεδιασμένο για να υποστηρίξει την ανάπτυξη ευρείας γκάμας φυτών. Περιέχει συνήθως ένα μείγμα από τύρφη, άμμο και κάποια ποσότητα οργανικής ύλης. Η αγωγιμότητα μπορεί να κυμαίνεται από μέτρια έως υψηλή, ανάλογα με τη σύνθεση του χώματος.

Χώμα κομπόστας (βιολογικό): Αυτό το χώμα προέρχεται από αποσυντεθειμένη οργανική ύλη και είναι πλούσιο σε θρεπτικά στοιχεία. Είναι ιδανικό για τη βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους και προσφέρει καλή αγωγιμότητα λόγω του υψηλού περιεχομένου οργανικών ιόντων.

Προετοιμασία Δειγμάτων Εδάφους:

Τα δείγματα εδάφους τοποθετήθηκαν σε τρεις γλάστρες των 5 λίτρων η κάθε μία. Αυτό μας επέτρεψε να διαχειριστούμε τα δείγματα με ευκολία και να εξασφαλίσουμε ότι η ποσότητα του εδάφους ήταν επαρκής για την εκτέλεση επαναλαμβανόμενων μετρήσεων.

Διαπιστώσαμε ότι τα περισσότερα δείγματα είχαν ήδη κάποια υγρασία από τη συσκευασία τους. Αυτό ήταν αναμενόμενο και δεν επηρέασε την ακρίβεια των αρχικών μετρήσεων. Χρησιμοποιήσαμε απιονισμένο νερό γενικής χρήσης διότι έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε ιόντα και έχει αρκετά μεγάλη αντίσταση ανά εκατοστό περίπου στο 1M ohm. Με την εισαγωγή του απιονισμένου νερού στο μείγμα επιτρέπουμε την απελευθέρωση των ιόντων του εδάφους και εξασφαλίζεται η καλή επαφή των ηλεκτροδίων με το έδαφος χωρίς να το εμπλουτίζουμε με παραπάνω ιόντα.

Ανάδευση με Απιονισμένο Νερό και δημιουργία μείγματος.

Για τη διαδικασία μέτρησης, αρχικά ρίξαμε απιονισμένο νερό στο σημείο που θέλαμε να μετρήσουμε. Ανακατέψαμε καλά με ένα εργαλείο κηπουρικής για να ομογενοποιηθεί το μείγμα και να έρθει στην επιθυμητή υγρασία. Επίσης απομακρύνθηκαν τυχόν πετρώματα από το μείγμα τα οποία μπορούν να

τραυματίσουν την μόνωση των ηλεκτροδίων της υγρασίας και να αποτρέψουν την άμεση επαφή με τα ηλεκτρόδια μέτρησης αντίστασης.



Εικόνα 5.1 Μέτρηση των παραμέτρων του εδάφους.

Βύθιση ηλεκτροδίων και διαδικασία μέτρησης για την εκτίμηση της αγωγιμότητας.

Στην συνέχεια εφόσον έχει δημιουργηθεί το μείγμα βυθίζουμε στο έδαφος τον αισθητήρα που αναπτύχθηκε και ξεκινάμε την μέτρηση έχοντας επιλέξει την κατάλληλη κλίμακα μέτρησης αντίστασης. Αρχικά η συσκευή θα ανιχνευθεί η υγρασία του εδάφους και θα συνεχίσει στο επόμενο στάδιο. Έπειτα σε αυτό το σημείο η συσκευή ξεκινάει να ανιχνεύει την αντίσταση του εδάφους και θα μας ενημερώσει εάν έχουμε επιλέξει λάθος κλίμακα μέτρησης για να διορθώσουμε στην πορεία την κλίμακα και να ξανά ξεκινήσουμε την διαδικασία μέτρησης. Εφόσον θέσουμε σωστά και την μέτρηση της κλίμακας τότε η συσκευή ξεκινάει και μετράει την αντίσταση του εδάφους μέσα από το αναλογικό κύκλωμα μέτρησης αντίστασης. Με την ολοκλήρωση μέτρησης της αντίστασης του εδάφους ξεκινάει η μέτρηση της θερμοκρασίας του εδάφους. Αυτή η μέτρηση είναι εξίσου σημαντική καθώς υπάρχει επιρροή της θερμοκρασίας σε σχέση με την αγωγιμότητα του εδάφους, συγκεκριμένα η αύξηση της θερμοκρασίας βοηθάει στην κίνηση των ιόντων και στην ευκολότερη διάλυση αλάτων. Υπολογίζεται ότι η θερμοκρασία αλλάζει κατά 0.2% για κάθε βαθμό που απέχει από τους 25°C. Έτσι στο τέλος έχουμε μια ολοκληρωμένη εκτίμηση της αγωγιμότητας συμπεριλαμβανομένης της υγρασίας και της θερμοκρασίας εμφανίζοντας και τα κατάλληλα μηνύματα στην οθόνη OLED για την υγεία του εδάφους πέρα από τις τιμές μέτρησης.

Σταδιακή Αύξηση Υγρασίας και εκτίμηση της σχέσης με την αγωγιμότητα

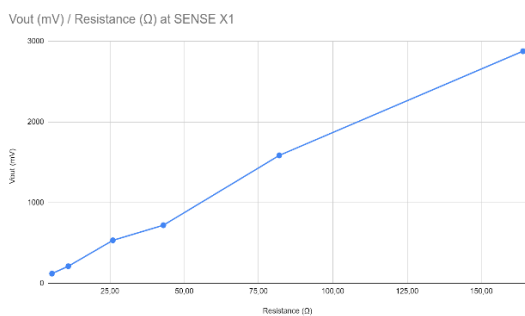
Για αυτό το στάδιο λήφθηκαν μετρήσεις υγρασίας του εδάφους σε χαμηλότερο ποσοστό για να εκτιμηθεί η σχέση της με την αγωγιμότητα. Πραγματοποιήσαμε μετρήσεις σταδιακά, αυξάνοντας το ποσοστό της υγρασίας προσθέτοντας mL απιονισμένου νερού και καταγράφοντας τις αλλαγές στην

υγρασία, την αγωγιμότητα του εδάφους. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για κάθε τύπο χόματος, επιτρέποντας την εκτίμηση της σχέσης μεταξύ της υγρασίας και της αγωγιμότητας.

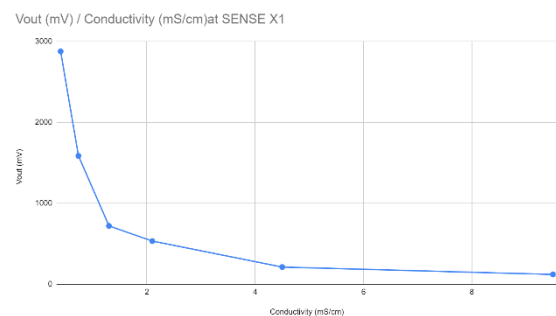
Επιλογή Συχνοτήτων: Στο firmware δημιουργήθηκαν 5 σετ προκαθορισμένων τιμών διπολικών παλμών με διαφορετικές συχνότητες: 100Hz, 1kHz, 10kHz, 50kHz και 100kHz. Αυτό μας επέτρεψε να παρατηρήσουμε την ύπαρξη διαφοράς στη μέτρηση ανάλογα με τη συχνότητα των παλμών. Δοκιμάστηκε κάθε σετ συχνοτήτων ξεχωριστά για να δούμε πώς επηρεάζει τις μετρήσεις της αντίστασης και της αγωγιμότητας του εδάφους. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών μας επέτρεψαν να αναλύσουμε που μπορεί να εκτιμηθεί καλύτερα η μέτρηση της αγωγιμότητας.

5.2 Αποτελέσματα Μετρήσεων

Μετά από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τις καθορισμένες τιμές των αντιστάσεων THT παράχθηκαν οι γραφικές παραστάσεις που μας δείχνουν αναλυτικά την γραμμικότητα του συστήματος σε ένα μεγάλο εύρος τιμών. Οι τιμές των αντιστάσεων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από 10Ω έως 150Ω για την κλίμακα SENSE X1, 100Ω έως 1KΩ για την κλίμακα SENSE X10, 1KΩ έως 10KΩ για την κλίμακα SENSE X100 και 10K έως 89K για την κλίμακα SENSE X1000. Όλες οι μετρήσεις γίναν σε θερμοκρασία 25-27°C οπότε η θερμοκρασιακή αντιστάθμιση των μετρήσεων ήταν κάτω του 0.4%. Παρακάτω βλέπουμε τις γραφικές παραστάσεις που μας δείχνουν τα αποτελέσματα.

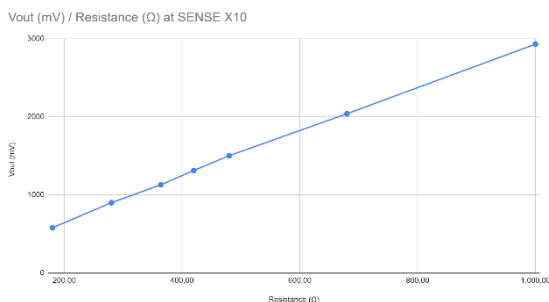


Γράφημα 5.1 Μέτρηση αντίστασης
10 Ohm – 150 Ohm

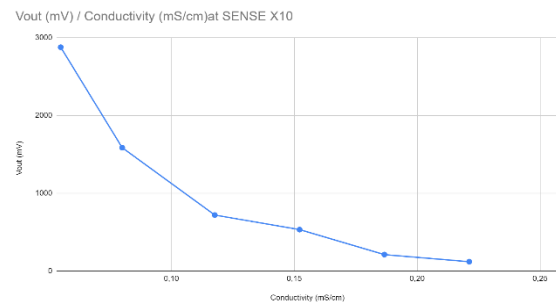


Γράφημα 5.2 Μέτρηση αγωγιμότητας
10mS/cm-0.25mS/cm

Στο γράφημα 5.1 απεικονίζεται η γραμμικότητα που επικρατεί σε όλο το εύρος μέτρησης της αντίστασης των τιμών αντιστάσεων από 10Ω έως 150Ω σε σχέση με την τάση εξόδου στην κλίμακα μέτρησης SENSE X1. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί επαληθεύει την σταθερότητα και την ακρίβεια των μετρήσεων που εμφανίσαμε στις γραφικές παραστάσεις των προσομοιώσεων. Παρομοίως στο γράφημα 5.2 παρατηρούμε την υπολογισθείσα αγωγιμότητα μέσα από μετρήσεις και την καμπύλη που



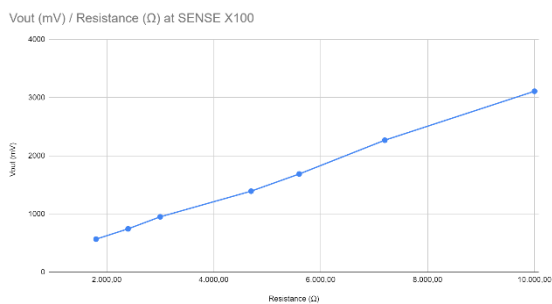
Γράφημα 5.3 Μέτρηση αντίστασης
100 Ohm – 1K Ohm



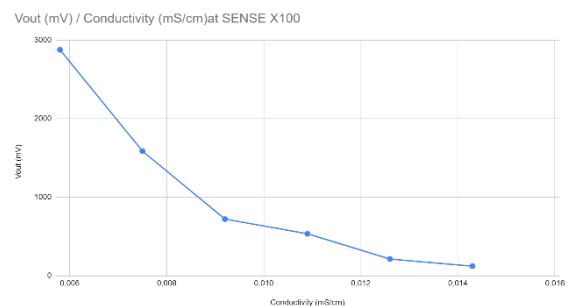
Γράφημα 5.4 Μέτρηση αγωγιμότητας
0.25mS/cm-0.01mS/cm

δημιουργείται να ακολουθεί την αναμενόμενη καμπύλη. Επίσης είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι τιμές της αγωγιμότητας στην κλίμακα SENSE X1 είναι ιδανικές για να μπορέσουμε να εκτιμήσουμε υγεία του εδάφους καθώς σε αρκετά υψηλές αγωγιμότητας μπορούμε να διακρίνουμε και την αλατότητα του εδάφους που συνήθως κυμαίνεται στα 10 mS/cm – 4 mS/cm.

Επίσης στο γράφημα 5.3 απεικονίζεται η γραμμικότητα που επικρατεί σε όλο το εύρος μέτρησης της αντίστασης των τιμών αντιστάσεων από 100Ω έως 1KΩ σε σχέση με την τάση εξόδου στην κλίμακα μέτρησης SENSE X10. Παρομοίως στο γράφημα 5.4 παρατηρούμε τις τιμές αγωγιμότητας που μετρήθηκαν από την συσκευή. Η γραμμικότητα και η ακρίβεια αυτής της κλίμακας είναι σημαντική γιατί μπορεί να βοηθήσει στο να αντιληφθεί η υγεία του εδάφους καθώς οι τιμές που είναι ανάμεσα σε 0.01 mS/cm έως 0.25mS /cm δείχνουν ότι η καλλιέργεια έχει θρεπτικά συστατικά και ιχνοστοιχεία.

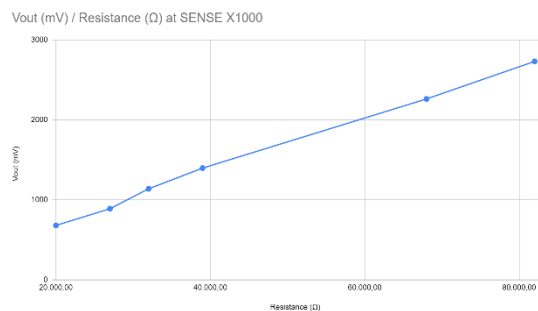


Γράφημα 5.5 Μέτρηση αντίστασης 1K Ohm – 10K Ohm

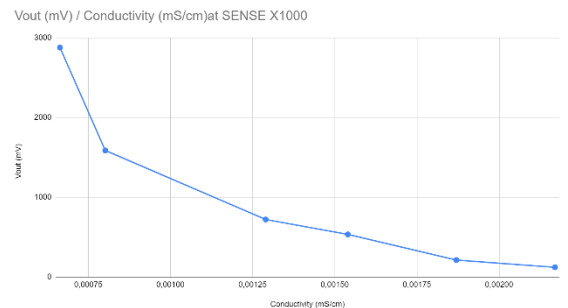


Γράφημα 5.6 Μέτρηση αγωγιμότητας 0.01mS/cm-0.001mS/cm

Στο γράφημα 5.5 απεικονίζεται η γραμμικότητα που επικρατεί σε όλο το εύρος μέτρησης της αντίστασης των τιμών αντιστάσεων από 1KΩ έως 10KΩ σε σχέση με την τάση εξόδου στην κλίμακα μέτρησης SENSE X100. Παρομοίως στο γράφημα 5.6 παρατηρούμε τις τιμές της αγωγιμότητας μέσα από μετρήσεις και την καμπύλη που δημιουργείται να ακολουθεί την θεωρητική. Οι τιμές αγωγιμότητας σε αυτήν την κλίμακα μας αποδεικνύουν την ανάγκη για εμπλουτισμό του εδάφους με διάφορα λιπάσματα.



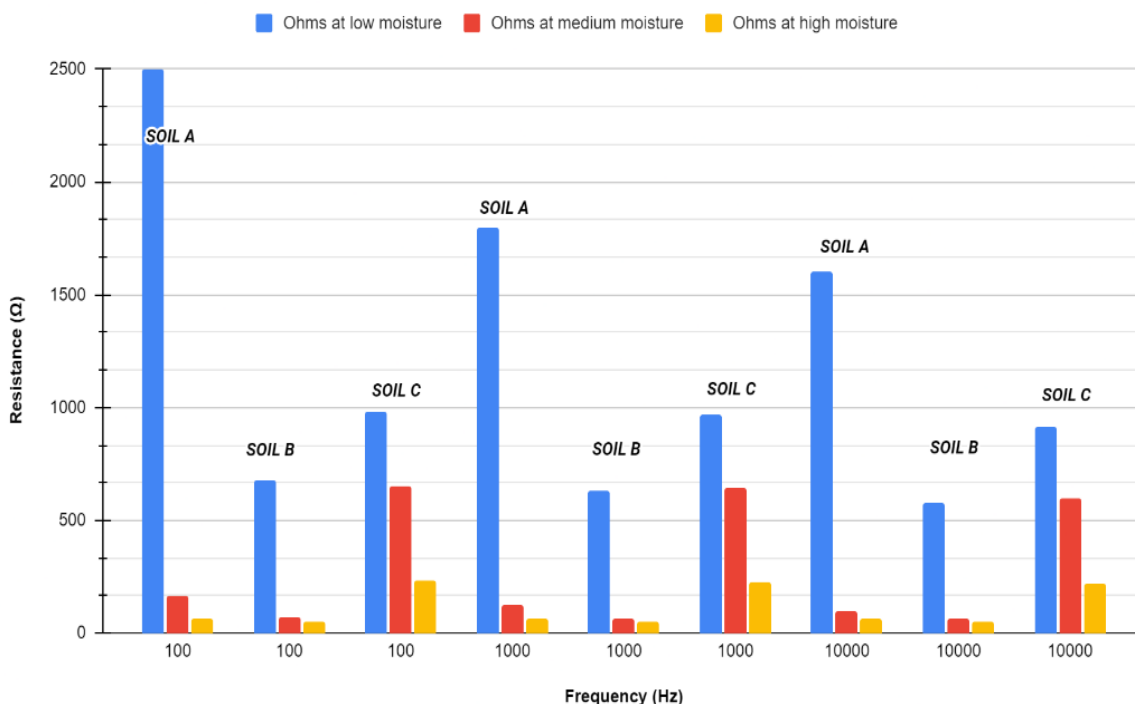
Γράφημα 5.7 Μέτρηση αντίστασης 10K Ohm – 100K Ohm



Γράφημα 5.8 Μέτρηση αγωγιμότητας 0.001mS/cm-0.0001mS/cm

Παρομοίως στο γράφημα 5.7 απεικονίζεται η γραμμικότητα που επικρατεί σε όλο το εύρος μέτρησης της αντίστασης των τιμών αντιστάσεων από 10KΩ έως 89KΩ σε σχέση με την τάση εξόδου στην κλίμακα μέτρησης SENSE X1000. Στο γράφημα 5.8 παρατηρούμε την αγωγιμότητα μέσα από τις μετρήσεις και το εύρος μέτρησης που μπορεί να φτάσει 0.0001 mS/cm έως 0.001 mS/cm να αποδεικνύουν την κρίσιμη κατάσταση του εδάφους για εμπλουτισμό με θρεπτικά στοιχεία.

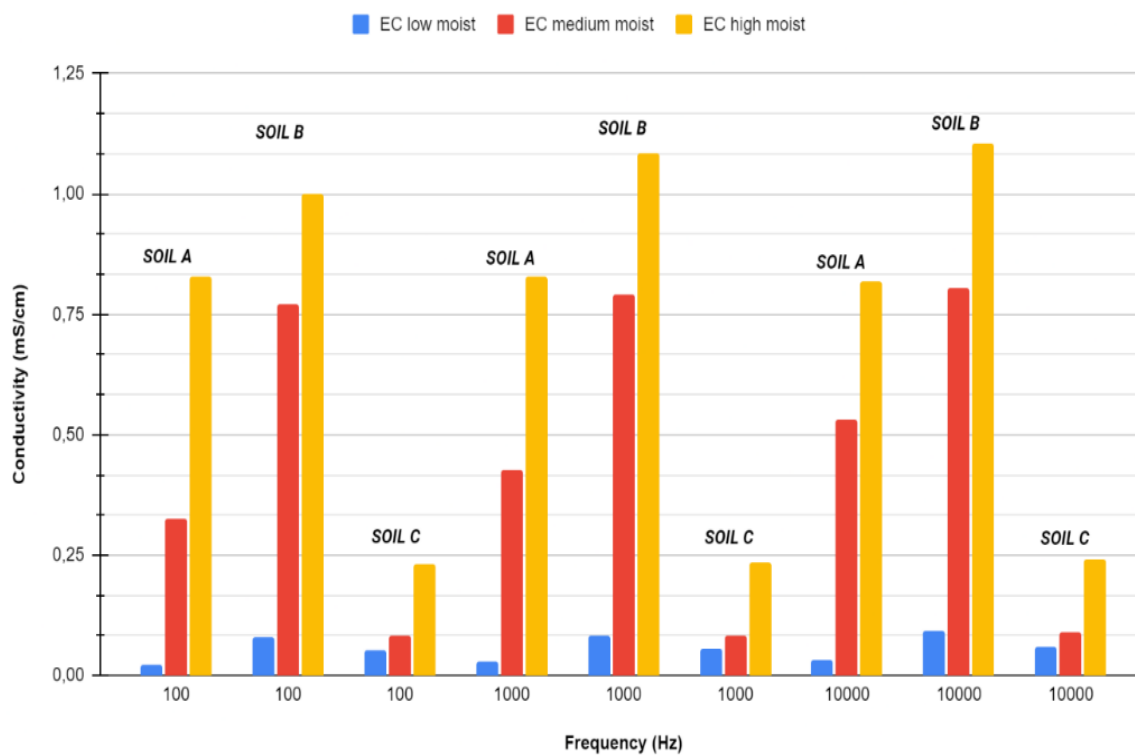
Resistance of 3 different Moisture levels vs Frequencies of 3 samples of soil



Γράφημα 5.9 Μέτρηση αντίστασης 3 διαφορετικών ειδών εδάφους σε 3 διαφορετικά επίπεδα υγρασίας για 3 διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας.

Στο γράφημα 5.9 απεικονίζεται η σχέση που υπάρχει μεταξύ της αντίστασης των τριών διαφορετικών τύπων εδάφους, χόμα για κάκτους υψηλή αντίσταση SOIL A, αργιλώδες έδαφος χαμηλή αντίσταση SOIL B και χόμα γενικής χρήσης μεσαίας αντίστασης SOIL C. Αυτά τα είδη εδάφους συγκρίθηκαν για τις τιμές των αντιστάσεων σε 3 διαφορετικές συχνότητες 100Hz 1KHz, 10KHz καθώς και μετρήθηκαν σε 3 διαφορετικά επίπεδα υγρασίας για να εκτιμηθεί η επίδραση της υγρασίας στην αντίσταση του εδάφους. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ανέδειξαν την σημαντική επίδραση της υγρασίας στην αντίσταση του εδάφους καθώς όσο η τιμή της μετρούμενης υγρασίας στο έδαφος αυξάνεται τόσο η αντίσταση του εδάφους μειώνεται και αυτό με διαφορετικό ρυθμό σε κάθε τύπο χόματος. Επίσης αυτές οι μετρήσεις ανέδειξαν και την διαφορά στην ανίχνευση της αντίστασης του εδάφους ανάλογα με την συχνότητα των διπολικών παλμών που χρησιμοποιούμε. Παρατηρήθηκε ότι με μεγαλύτερες συχνότητες παραγωγής διπολικών παλμών ανιχνεύεται χαμηλότερη αντίσταση και αυτό επαληθεύτηκε και στα 3 δείγματα του εδάφους.

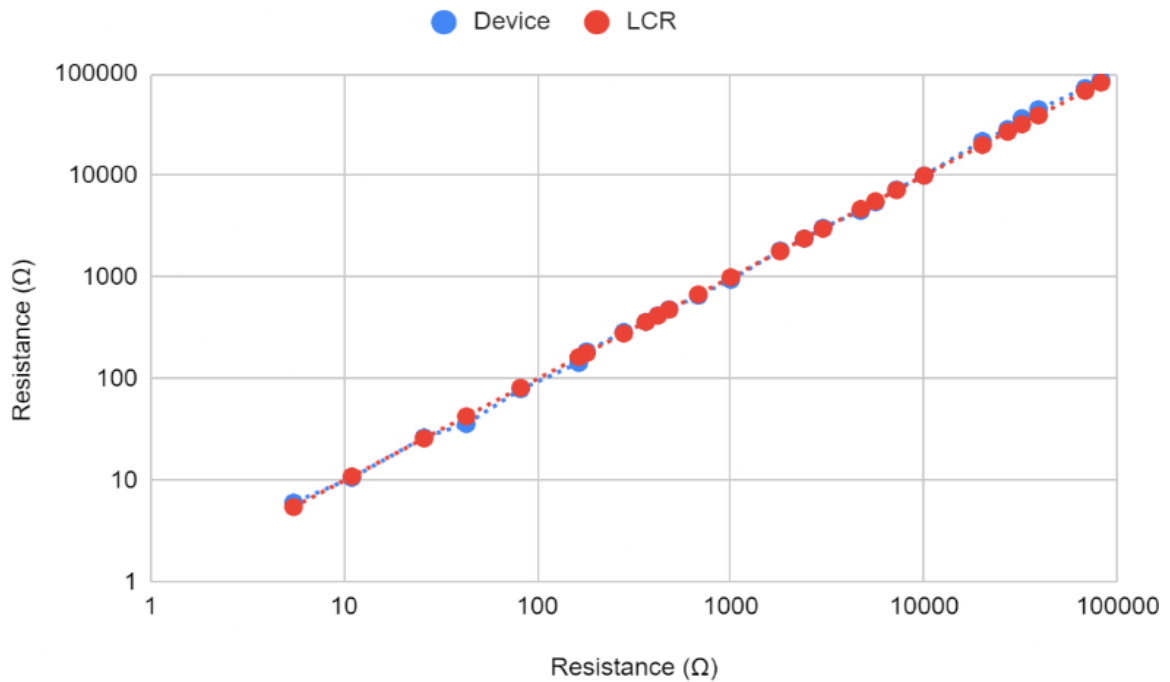
Conductivity of 3 different Moisture levels vs Frequencies with 3 samples of soil



Γράφημα 5.10 Μέτρηση αγωγιμότητας 3 διαφορετικών ειδών εδάφους σε 3 διαφορετικά επίπεδα υγρασίας για 3 διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας.

Στο γράφημα 5.10 παρατηρείται επίσης το ίδιο δείγμα μετρήσεων που αναφέρθηκε πριν αλλά με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει την μετρούμενη αγωγιμότητα της συσκευής. Παρατηρούμε πως η υγρασία συμβάλει σημαντικά στην αύξηση της αγωγιμότητας του εδάφους καθώς και η αύξηση στη συχνότητα λειτουργίας διπολικών παλμών. Στα δείγματα που λήφθηκαν συγκεκριμένα στο SOIL B που έχει την μεγαλύτερη διαφορά αγωγιμότητας σε σχέση με τα άλλα δείγματα εδάφους βλέπουμε μια αύξηση της αγωγιμότητας της τάξης του 7-10% στην μέτρηση στα 10KHz σε σχέση με την μέτρηση στα 100Hz.

Resistance Device (Ω) / Resistance LCR (Ω)

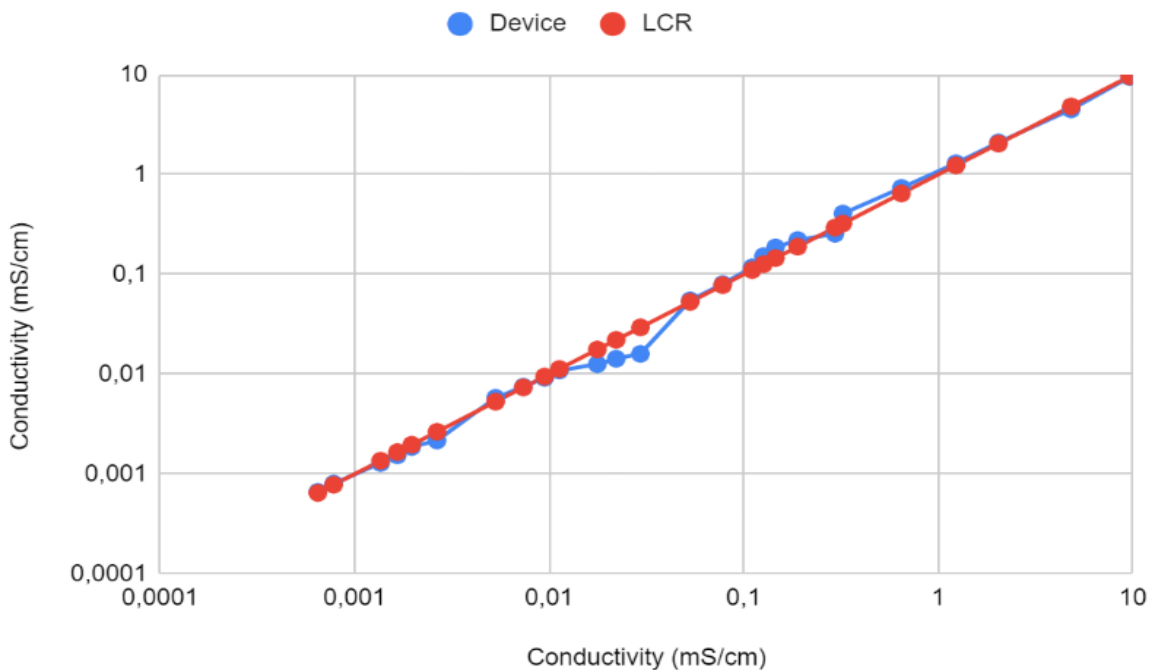


Γράφημα 5.11 Αναπαράσταση ακρίβειας μέτρησης σε σχέση με κοινό LCR Meter.

Στο γράφημα 5.11 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της αντίστασης του εδάφους. Οι μετρήσεις έγιναν χρησιμοποιώντας το αναπτυγμένο σύστημα αισθητήρων μας και συγκρίθηκαν με αυτές που λήφθηκαν από το LCR Meter. Η γραμμικότητα της αντίστασης μετρήθηκε σε διάφορες τιμές για να καλύψουμε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών.

Από την ανάλυση των δεδομένων, παρατηρήθηκε ότι οι μετρήσεις της αντίστασης του συστήματός μας δείχνουν υψηλή γραμμικότητα σε σχέση με το LCR Meter. Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές που καταγράφονται από τον αισθητήρα μας είναι πολύ κοντά στις τιμές του LCR Meter, δείχνοντας την ακρίβεια του αισθητήρα σε όλο το εύρος των κλιμάκων.

Conductivity Device mS/cm / Conductivity LCR mS/cm



Γράφημα 5.12 Αναπαράσταση ακρίβειας μέτρησης υγρασίας σε σχέση με κοινό LCR Meter.

Στο γράφημα 5.12 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της αγωγιμότητας του εδάφους. Όπως και με την αντίσταση, οι μετρήσεις έγιναν με το σύστημα αισθητήρων μας και συγκρίθηκαν με αυτές του LCR Meter. Η αγωγιμότητα μετρήθηκε σε διάφορες κλίμακες για να διασφαλίσουμε την κάλυψη όλων των συνθηκών εδάφους.

Από την ανάλυση των δεδομένων στο γράφημα Y, παρατηρήθηκε ότι η γραμμικότητα των μετρήσεων της αγωγιμότητας του συστήματός μας διατηρείται σε όλο το εύρος των κλιμάκων. Οι τιμές που καταγράφονται από τον αισθητήρα μας είναι πολύ κοντά στις τιμές του LCR Meter, επιβεβαιώνοντας την ακρίβεια του αισθητήρα.

Συνοψίζοντας, οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του αισθητήρα και της συσκευής που αναπτύχθηκε απέδειξαν την υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία του σε όλο το εύρος των τιμών αντίστασης και αγωγιμότητας του εδάφους. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα δεδομένα από το LCR Meter επιβεβαίωσε τη γραμμικότητα των μετρήσεων μας, υποδεικνύοντας ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε πραγματικές γεωργικές εφαρμογές. Οι δοκιμές με διαφορετικούς τύπους εδάφους και η ανάλυση της επίδρασης της υγρασίας και της θερμοκρασίας παρείχαν πολύτιμες πληροφορίες για την προσαρμογή και βελτιστοποίηση των γεωργικών τεχνικών, ενισχύοντας την κατανόηση της υγείας του εδάφους και προωθώντας την ανάπτυξη των καλλιεργειών.

Κεφάλαιο 6^ο : Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

6.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη και την υλοποίηση ενός αισθητήρα μέτρησης χαρακτηριστικών εδάφους, συγκεκριμένα της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, της υγρασίας και της θερμοκρασίας. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, αναπτύχθηκαν και δοκιμάστηκαν διάφορες τεχνικές μέτρησης, οι οποίες απέδειξαν ότι μπορούν να παρέχουν αξιόπιστα και ακριβή δεδομένα, εξυπηρετώντας τις ανάγκες της σύγχρονης γεωργίας.

Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας ήταν ενθαρρυντικά. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν και αναπτύχθηκαν ήταν σε θέση να δώσουν ακριβείς πληροφορίες για την κατάσταση του εδάφους σε πραγματικό χρόνο. Αυτό επιτρέπει στους αγρότες να λαμβάνουν ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με την άρδευση και τη λίπανση των καλλιεργειών τους. Η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, για παράδειγμα, παρέχει κρίσιμες πληροφορίες για την αλατότητα του εδάφους, ενώ οι μετρήσεις της υγρασίας και της θερμοκρασίας βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση της συνολικής κατάστασης του εδάφους.

Οι αισθητήρες που αναπτύχθηκαν μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη βελτίωση της αποδοτικότητας των αγροτικών καλλιεργειών, προσφέροντας στους αγρότες τη δυνατότητα να προσαρμόζουν τις γεωργικές τεχνικές τους βάσει των δεδομένων που συλλέγονται. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να μειώσει την άσκοπη χρήση νερού και λιπασμάτων, συμβάλλοντας έτσι στη βιώσιμη ανάπτυξη της γεωργίας.

6.2 Προτάσεις Βελτίωσης

Παρά τα θετικά αποτελέσματα, υπάρχουν αρκετές δυνατότητες βελτίωσης της παρούσας τεχνολογίας, οι οποίες θα μπορούσαν να ενισχύσουν την απόδοση και τη χρησιμότητά της. Ακολουθούν μερικές προτάσεις βελτίωσης:

Βελτίωση της ακρίβειας του αισθητήρα pH:

Η προσθήκη ενός αισθητήρα pH θα μπορούσε να παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την οξύτητα του εδάφους. Το pH είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών και την υγεία των φυτών. Ένας ακριβής αισθητήρας pH θα επιτρέψει στους αγρότες να παρακολουθούν και να προσαρμόζουν τις πρακτικές λίπανσης, διασφαλίζοντας τη βέλτιστη ανάπτυξη των καλλιεργειών.

Αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας:

Η αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας για τις μετρήσεις υγρασίας θα μπορούσε να προσφέρει πιο ακριβείς και λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του εδάφους. Αυτό θα επιτρέψει στους αγρότες να εντοπίζουν πιο γρήγορα τις αλλαγές στην υγρασία και να προσαρμόζουν την άρδευση ανάλογα, εξοικονομώντας νερό και βελτιώνοντας την υγεία των φυτών.

Ενσωμάτωση τεχνολογίας IoT:

Η ενσωμάτωση του αισθητήρα σε ένα δίκτυο IoT (Internet of Things) θα επιτρέψει την απομακρυσμένη παρακολούθηση και ανάλυση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο, οι αγρότες θα μπορούν να λαμβάνουν ειδοποιήσεις και να παρακολουθούν την κατάσταση του εδάφους από

οποιαδήποτε τοποθεσία, βελτιώνοντας την ευχρηστία και την αποτελεσματικότητα του συστήματος. Η τεχνολογία IoT θα επιτρέψει επίσης τη δημιουργία χαρτών (mapping) των χαρακτηριστικών του εδάφους, παρέχοντας μια οπτική αναπαράσταση των δεδομένων. Αυτό θα βοηθήσει τους αγρότες να εντοπίζουν εύκολα περιοχές με προβλήματα και να προσαρμόζουν τις καλλιεργητικές τους πρακτικές αναλόγως.

Δυνατότητα καταγραφής δεδομένων (Data Logging):

Η προσθήκη δυνατότητας καταγραφής δεδομένων θα επιτρέψει την ανάλυση ιστορικών δεδομένων, βοηθώντας τους αγρότες να εντοπίζουν μοτίβα και τάσεις στις μετρήσεις του εδάφους. Αυτό θα συμβάλει στη λήψη πιο ενημερωμένων αποφάσεων και στη βελτιστοποίηση των γεωργικών πρακτικών.

Αναβάθμιση του μικροελεγκτή (MCU) και των αναλογικών τελεστικών:

Η χρήση ενός πιο ισχυρού μικροελεγκτή, όπως ο STM32 H7, θα μπορούσε να βελτιώσει την απόδοση και την ακρίβεια των μετρήσεων. Ένας πιο ισχυρός MCU θα επιτρέψει την επεξεργασία περισσότερων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και θα υποστηρίξει τις νέες δυνατότητες που προτείνονται, όπως η ενσωμάτωση IoT και η καταγραφή δεδομένων. Επίσης η χρήση τελεστικών ενισχυτών οργανολογίας θα μπορούσε να αυξήσει την ακρίβεια και την απόδοση του κυκλώματος μέτρησης αγωγιμότητας καθιστώντας το ακόμη πιο χρήσιμο για την εκτίμηση της υγείας του εδάφους.

Ανάπτυξη εφαρμογών ανάλυσης δεδομένων:

Η ανάπτυξη εφαρμογών λογισμικού που θα επιτρέπουν την ανάλυση και την οπτικοποίηση των δεδομένων που συλλέγονται από τους αισθητήρες θα είναι χρήσιμη. Αυτές οι εφαρμογές θα μπορούσαν να παρέχουν γραφήματα και αναφορές που θα βοηθούν τους αγρότες να κατανοήσουν καλύτερα την κατάσταση του εδάφους και να προσαρμόζουν τις καλλιεργητικές πρακτικές τους.

Η εφαρμογή αυτών των βελτιώσεων θα συμβάλει στη δημιουργία ενός πιο ολοκληρωμένου και αποτελεσματικού συστήματος παρακολούθησης των χαρακτηριστικών του εδάφους. Με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας, οι αγρότες θα μπορέσουν να βελτιστοποιήσουν τις καλλιεργητικές τους πρακτικές, να μειώσουν τα κόστη και να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα των καλλιεργειών τους.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Smith, A. Johnson, and L. Williams, "Global Food Security: Challenges and Innovations," *Journal of Agricultural Science*, vol. 23, no. 4, pp. 342-356, 2020.
- [2] "Soil texture," Wikipedia. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Soil_texture.
- [3] "Physical properties of soil," Wikipedia. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Physical_properties_of_soil.
- [4] "Soil chemistry," Wikipedia. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Soil_chemistry.
- [5] S. P. Friedman, "Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review," *Computers and electronics in agriculture*, 2005.
- [6] "Soil pH," Wikipedia. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Soil_pH.
- [7] "Organic matter," Wikipedia. [Online]. Available https://en.wikipedia.org/wiki/Soil_chemistry#Soil_organic_matter.
- [8] "Cation exchange capacity," Wikipedia. [Online]. Available [https://en.wikipedia.org/wiki/Soil#Cation_exchange_capacity_\(CEC\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Soil#Cation_exchange_capacity_(CEC)).
- [9] "Plant nutrients in soil," Wikipedia. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Plant_nutrients_in_soil.
- [10] "Ohm's Law", Wikipedia. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Ohm%27s_law.
- [11] "Biot–Savart law", Wikipedia. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Biot%E2%80%93Savart_law.
- [12] K. Martin, E. Davis, and R. Thompson, "Evaluation analysis of the saturated paste method for determining soil salinity," *International Journal of Agricultural Research*, vol. 45, no. 3, pp. 234-245, Oct. 2022.
- [13] Y. Li, Z. Shi, R. Webster, J. Triantafilis, and S. Chen, "Comparison of Multi-Frequency and Multi-Coil Electromagnetic Induction Instruments for Measuring Soil Apparent Electrical Conductivity," *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 2330, 2020.
- [14] E. A. Halvorson and M. R. Nofziger, "Theory of Four-electrode Resistance/Conductivity Method," *Landviser*, 2005.
- [15] "Measurement of soil electrical conductivity based on direct digital synthesizer (DDS) and digital oscilloscope," *ResearchGate*.
- [16] R. Queiroz, L. Marques, and A. S. Lima, "Development and Test of a Low-Cost Portable Soil Apparent Electrical Conductivity Sensor," *Agricultural and Biological Engineering Department, University of Florida*, 2017.
- [17] J. N. K. V. V. Balaji, "Measurement of Soil Moisture by Direct Methods," *JNKVV*, 2020.
- [18] R. Queiroz, L. Marques, and A. S. Lima, "Determination of Moisture Diffusivity using the Time Domain Reflectometry (TDR) method," *SAGE Journals*, 2006.
- [19] "What is a Soil Moisture Sensor You Should to Know," HENGKO, Sep. 18, 2021.

- [20] A. M. Okasha, H. G. Ibrahim, A. H. Elmetwalli, K. M. Khedher, Z. M. Yaseen, and S. Elsayed, "Designing Low-Cost Capacitive-Based Soil Moisture Sensor and Smart Monitoring Unit Operated by Solar Cells for Greenhouse Irrigation Management," *Sensors*, vol. 21, no. 15, p. 5387, 2021.
- [21] "Resistance thermometer," Wikipedia, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Resistance_thermometer.
- [22] "Thermocouple," Wikipedia, The Free Encyclopedia. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermocouple>.
- [23] Maxim Integrated, "DS18B20: Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer," Datasheet, Mar. 2021. [Online]. Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.
- [24] Y. Wei, J. Wang, D. Li, and Q. Ding, "Design of Intelligent Conductivity Meter Based on MSP430F149," in CCTA 2009, IFIP AICT 317, 2010, pp. 240-247.
- [25] Texas Instruments, "BQ24075: Battery charger", Datasheet, <https://www.ti.com/product/BQ24075>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΣΧΕΔΙΟ ΤΥΠΩΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

