



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Σχεδίαση, Κατασκευή και Δοκιμή Αυτόματου και Αυτόνομου Συστήματος Άρδευσης

Διπλωματική Εργασία

Ευάγγελος Σταμπουλής

A.E.M.:9786

Επιβλέπων καθηγητής, Χατζόπουλος Αλκιβιάδης, Α.Π.Θ.

Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2023

Περιεχόμενα

1ο κεφάλαιο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
1.1) Επιστημονική περιοχή της διπλωματικής	4
1.2) Σκοπός και συνεισφορά της διπλωματικής.....	5
1.3) Διάρθρωση της διπλωματικής	6
2ο κεφάλαιο: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ	8
2.1) Λειτουργικές απαιτήσεις και προϋποθέσεις.....	8
2.2) Γενικό σχεδιάγραμμα του συστήματος.....	9
2.3) Επιλογή εξαρτημάτων και σχεδίαση των κυκλωμάτων	10
2.3.1) Η υπολογιστική πλακέτα Arduino Uno R3	10
2.3.2) Το WiFi module ESP-01.....	13
2.3.3) Οι αισθητήρες Soil Humidity Sensor, Water Level Sensor και DHT11.....	15
2.3.4) Οι σερβοκινητήρες SG90 9g και η MICRO SUBMERSIBLE WATER PUMP DC.....	19
2.3.5) Η Τροφοδοσία: Μπαταρία, Φωτοβολταϊκή Κυψέλη και Ηλιακός Φορτιστής	22
2.3.6) Ο Ανιχνευτής Ηλίου	25
2.4) Αναλυτικό σχεδιάγραμμα του συστήματος	27
2.5) Θεωρητικός ενεργειακός προϋπολογισμός	29
3ο κεφάλαιο: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ.....	32
3.1) Arduino IDE και αρχικές ρυθμίσεις	32
3.2) Εφαρμογή Virtuino 6.....	34
3.3) Καταστάσεις συστήματος	36
3.4) Συνάρτηση ανίχνευσης ηλίου	37
3.5) Συναρτήσεις μετρήσεων	40
3.6) Συναρτήσεις αποστολής και λήψης	45
3.7) Συνάρτηση ποτίσματος	46
3.8) Χρονισμός του κύριου βρόχου	47
4ο κεφάλαιο: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗΣ ΚΑΛΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	49
4.1) Λογική Δοκιμών.....	49
4.2) Δοκιμές των υποσυστημάτων	49
4.2.1) Δοκιμή ανιχνευτή ηλίου	50
4.2.2) Δοκιμή αισθητήρων	51
4.2.3) Δοκιμή απομακρυσμένου ελέγχου	54
4.2.4) Δοκιμή αντλίας.....	54
4.3) Δοκιμή αυτονομίας μπαταρίας	56
4.4) Δοκιμή σε πραγματικές συνθήκες.....	58
4.4) Πραγματικός ενεργειακός προϋπολογισμός.....	61

5 ^ο κεφάλαιο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ.....	63
5.1) Συμπεράσματα και προβλήματα που προέκυψαν	63
5.2) Πιθανές βελτιώσεις και μελλοντικά βήματα.....	64
Βιβλιογραφία.....	67

Designing, Manufacturing and Testing of an Automated and Autonomous Irrigation System

Abstract

This thesis aims to explore the process of designing, manufacturing, code developing and testing an autonomous and automated irrigation system designed to address the critical challenges of modern agriculture, specifically concerning water resource management and plant health optimization. This multifaceted system combines cutting-edge hardware and software components, each meticulously chosen to fulfill a specific role in its operation. This thesis comprehensively documents the entire developmental process of an automated and autonomous irrigation system, providing a detailed and informative account of its creation.

The design phase encompasses a thorough analysis of the watering system's requirements, culminating in a comprehensive plan. This plan addresses essential components, including computational capabilities, sensor integration and power management strategies. Its primary objective is to create a resilient watering system that ensures continuous water supply to plants, precise sensor data collection, efficient solar energy absorption through solar tracking, and seamless user interaction via a suitable application.

After concluding the design phase, the manufacturing process commences. This phase includes component procurement, system assembly, and a rigorous focus on hardware quality and integrity. Meticulous attention to detail and adherence to best practices in electronic are paramount to ensure the overall system's durability and reliability.

An integral aspect of this thesis project is the development of code for the irrigation system's microcontroller. This code serves as the system's central intelligence, responsible for processing sensor data, executing algorithms, and overseeing system functions. The code development process encompasses the creation of efficient and reliable algorithms, along with the incorporation of precise control logic. Rigorous testing and debugging procedures are applied to ensure the code's functionality and robustness. The code development phase is pivotal to this research, as it empowers the system to execute its intended tasks with precision and efficiency, ultimately contributing to its overall success.

The concluding phase of this project entails comprehensive testing of the system under real-world conditions. Rigorous procedures, including hardware validation, functional testing, and performance evaluation, are executed to ensure the system's reliability. These tests are instrumental in confirming the system's readiness for real-world deployment, enhancing its potential for success in practical scenarios.

The development of an in-house watering system presents the advantage of a cost-effective, bespoke solution, enabling the customization of features and functionalities tailored to the specific irrigation requirements. The knowledge garnered from this project not only contributes to the domain of embedded systems but also fosters the advancement and accessibility of such technology within Greece.

1ο κεφάλαιο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1) Επιστημονική περιοχή της διπλωματικής

Ο πρωτογενής τομέας παραγωγής, και πιο συγκεκριμένα η γεωργία, απασχολεί τον άνθρωπο από αρχαιότατων χρόνων. Ανέκαθεν, ανθρωπότητα γνώριζε ότι η γεωργία αποτελούσε τη βάση της επιβιώσής της, παρέχοντας τροφή και πρώτες ύλες για την επεξεργασία και κατασκευή αντικειμένων. Οι αρχαίοι άνθρωποι διέθεταν περιορισμένες γνώσεις και τεχνικές, εξαρτώνταν από τις φυσικές και κλιματικές συνθήκες, και χρησιμοποιούσαν πρωτογενή γεωργικά εργαλεία. Κατά τη διάρκεια των αιώνων όμως, η γεωργία έχει εξελιχθεί σε μια πολυπλοκότερη και πιο εξειδικευμένη δραστηριότητα, δημιουργώντας τον όρο γεωργική τεχνολογία.

Η γεωργική τεχνολογία αντιπροσωπεύει έναν τομέα που έχει βιώσει σημαντικές εξελίξεις και ανακαλύψεις στην προσπάθειά της να καλύψει τις αυξημένες ανάγκες για τρόφιμα, πρώτες ύλες και άλλα γεωργικά προϊόντα του σύγχρονου κόσμου. Από την πρωτογενή γεωργία μέχρι τη σύγχρονη γεωργική τεχνολογία, η εξέλιξη αυτή έχει έναν σημαντικό αντίκτυπο στην παραγωγή τροφίμων, τη διαχείριση των φυσικών πόρων και τη γεωργική βιωσιμότητα. Η χρήση νέων τεχνολογιών, όπως η αυτοματοποίηση με αισθητήρες και η γενετική βελτίωση έχουν επιτρέψει την αύξηση της απόδοσης των καλλιεργειών και την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Οι αγρότες μπορούν πλέον να παρακολουθούν το έδαφος, τον καιρό, και τις φυτικές ανάγκες με ακρίβεια, επιτρέποντας την προσαρμογή των πρακτικών τους για βελτιωμένα αποτελέσματα. Η γεωργική τεχνολογία επιτρέπει επίσης την παραγωγή τροφίμων σε περιοχές με αυστηρές κλιματικές συνθήκες ή ελλιπή πρόσβαση σε νερό. Οι υδροπονίες, τα θερμοκήπια και τα αυτόματα ποτίσματα είναι μερικά παραδείγματα που συνεισφέρουν στην αύξηση της παραγωγής των τροφίμων σε δύσκολες συνθήκες. Επιπλέον, η γεωργική τεχνολογία συμβάλλει στη μείωση της χρήσης χημικών λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, προστατεύοντας έτσι το περιβάλλον και την υγεία των ανθρώπων.

Μια από τις πιο σημαντικές ανακαλύψεις στον τομέα της γεωργίας είναι τα αυτόματα συστήματα άρδευσης. Αυτά τα συστήματα επιτρέπουν την ακριβή και αποδοτική χρήση του νερού, με τη βοήθεια διαφόρων αισθητήρων. Συνδυάζοντας την αυτοματοποίηση με την παρακολούθηση των καιρικών συνθηκών και την ανάλυση δεδομένων, τα αυτόματα συστήματα αρδεύσεως εξασφαλίζουν ότι τα φυτά λαμβάνουν την ακριβή ποσότητα νερού που χρειάζονται, ενισχύοντας τη γεωργική παραγωγή και μειώνοντας το κόστος και τον ανθρώπινο κόπο [1].

Πολλά από τα αυτόματα αρδευτικά συστήματα, όπως και αυτό που πραγματεύεται η συγκεκριμένη διπλωματική, χρησιμοποιούν το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, για να εξασφαλιστεί ο απομακρυσμένος έλεγχος του συστήματος από τον χρήστη. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, ή αλλιώς Internet of Things (IoT), αποτελεί μια μετασχηματιστική τεχνολογία που συνδέει καθημερινά αντικείμενα και συσκευές στο διαδίκτυο, επιτρέποντας την ανταλλαγή δεδομένων και την αυτοματοποίηση. Οι συσκευές IoT είναι εξοπλισμένες με αισθητήρες, επεξεργαστές και μονάδες επικοινωνίας που συλλέγουν δεδομένα, τα επεξεργάζονται και τα μεταδίδουν σε άλλες συσκευές ή κεντρικά συστήματα. Αυτή η τεχνολογία έχει εφαρμογές σε πολλούς τομείς και αλλάζει τον τρόπο ζωής και εργασίας.

Ένα σύστημα εμφανίζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, για να θεωρηθεί εφαρμογή του Διαδικτύου των Πραγμάτων και περιλαμβάνει τον κατάλληλο εξοπλισμό για να τα εξασφαλίσει. Αρχικά οι συσκευές IoT, από τα κινητά τηλέφωνα (smartphones) μέχρι βιομηχανικά μηχανήματα, συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον τους χρησιμοποιώντας διάφορους αισθητήρες και χρησιμοποιούν διάφορες επιλογές συνδεσιμότητας, όπως Wi-Fi ή Bluetooth για τη μετάδοση των δεδομένων αυτών. Παράλληλα τα δεδομένα επεξεργάζονται τοπικά στις συσκευές ή στο νέφος (Cloud) για να ανακτηθούν σημαντικές πληροφορίες και να ενεργοποιηθούν λειτουργίες. Τα υπολογιστικά νέφη δηλαδή, παρέχουν εκτός από αποθήκευση και υπολογιστική ισχύ, τη δυνατότητα επεξεργασίας, ανάλυσης και διαχείρισης των δεδομένων [2].

1.2) Σκοπός και συνεισφορά της διπλωματικής

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση, κατασκευή και δοκιμή ενός εξελιγμένου συστήματος ποτίσματος, που ενσωματώνει σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις και προωθεί την αειφόρο γεωργία. Η διπλωματική αυτή συμβάλλει σε διάφορους τομείς και έχει πολλαπλή συνεισφορά στον γεωργικό τομέα και τη γενικότερη κοινωνία.

Καταρχάς, έχει ως στόχο τη βελτίωση της παραγωγικότητας στον γεωργικό τομέα. Με τη χρήση αισθητήρων και αυτοματισμού, το σύστημα ποτίσματος εξασφαλίζει ότι τα φυτά λαμβάνουν την ακριβή ποσότητα νερού που χρειάζονται, μειώνοντας τυχόν απώλειες λόγω υπερβολικού ή ανεπαρκούς ποτίσματος. Αυτό συμβάλλει στην αύξηση της ποιότητας και της ποσότητας της γεωργικής παραγωγής, προσφέροντας παράλληλα σημαντικές εξοικονομήσεις στους αγρότες.

Επιπλέον, η διπλωματική συντελεί στην αειφόρο γεωργία. Ο συνδυασμός της χρήσης ηλιακής ενέργειας, ως μοναδική πηγή ενέργειας, και της αυτόματης λειτουργίας επιτρέπει την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας από μη ανανεώσιμες πηγές. Επιπλέον, η παρακολούθηση των συνθηκών του εδάφους και των φυτών συμβάλλει στην πρόληψη της υπερβολικής χρήσης λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, προάγοντας την υγιή και βιώσιμη γεωργία.

Σημαντική συνεισφορά της διπλωματικής αποτελεί και η ενθάρρυνση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον γεωργικό τομέα. Η ενσωμάτωση της φωτοβολταϊκής κυψέλης στο σύστημα ποτίσματος και η χρήση ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών ενισχύουν τη βιωσιμότητα της γεωργίας, μειώνοντας το αποτύπωμα άνθρακα προς το περιβάλλον και το κόστος λειτουργίας.

Τέλος, η παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου και παρακολούθησης του συστήματος άρδευσης από απόσταση, μέσω της τεχνολογίας του απομακρυσμένου ελέγχου. Ο απομακρυσμένος έλεγχος επιτρέπει την παρακολούθηση των καιρικών συνθηκών και των δεδομένων αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι το σύστημα ποτίσματος μπορεί να προσαρμοστεί αυτόματα στις ανάγκες των καλλιεργειών, με βάση τα καιρικά δεδομένα και τα δεδομένα του εδάφους, όπως θερμοκρασία και υγρασία αέρα και υγρασία εδάφους. Αυτό σημαίνει ότι οι αγρότες μπορούν να διαχειρίζονται και να ελέγχουν το πότισμα των καλλιεργειών τους από απόσταση, εξοικονομώντας χρόνο και πόρους.

Συνοψίζοντας, η διπλωματική αυτή συμβάλλει στην επίλυση προβλημάτων που αντιμετωπίζει ο γεωργικός τομέας, προάγοντας την αειφόρο γεωργία, ενθαρρύνοντας τη χρήση ανανεώσιμων ενεργειακών πηγών και εξοικονομώντας πόρους μέσω του απομακρυσμένου ελέγχου.

Με αυτόν τον τρόπο, προσφέρει σημαντική συνεισφορά στην αειφόρο ανάπτυξη της γεωργίας και την αντιμετώπιση των προκλήσεων του 21ου αιώνα.

1.3) Διάρθρωση της διπλωματικής

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται όλη η διαδικασία που ακολουθήθηκε, με σκοπό την υλοποίηση ενός πλήρως λειτουργικού αυτόματου αρδευτικού συστήματος.

Έπειτα από τις παραπάνω εισαγωγικές παραγράφους, παρατίθεται το 2^ο κεφάλαιο, όπου αναλύεται εκτενώς η φάση του σχεδιασμού. Αυτή η φάση, επικεντρώνεται στην ανάλυση των απαιτήσεων που πρέπει να πληροί ένα σύστημα άρδευσης, καθώς και στον λεπτομερή σχεδιασμό ενός συνεκτικού σχεδίου για την υλοποίησή του. Συγκεκριμένα, στόχος της φάσης σχεδίασης είναι η ανάλυση των προϋποθέσεων και των λειτουργικών απαιτήσεων του συστήματος, η επιλογή των εξαρτημάτων που το απαρτίζουν με βάση τη συμβατότητα και τη λειτουργικότητα και την υλοποίηση της συνδεσμολογίας του συστήματος. Ακόμη, στο κεφάλαιο αυτό, παρατίθεται ο θεωρητικός ενεργειακός προϋπολογισμός των επιμέρους εξαρτημάτων. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός συστήματος που να ανταποκρίνεται στις ανάγκες της γεωργίας και του περιβάλλοντος, με βέλτιστη απόδοση, αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία.

Στο 3^ο κεφάλαιο, αναλύεται εκτενώς η λογική κώδικα του μικροελεγκτή και εξετάζεται η σημασία που έχει στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας. Ο κώδικας είναι ο πυρήνας του συστήματος άρδευσης και αποτελεί τον "εγκέφαλο" πίσω από τη λειτουργία και τον έλεγχο του συστήματος. Η σημασία του είναι μεγάλη, καθώς αναλαμβάνει την εκτέλεση των εντολών που καθορίζουν πότε, πόσο και πώς θα πρέπει να γίνουν οι διάφορες ενέργειες. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι αρχικές ρυθμίσεις και το περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού που χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή, οι καταστάσεις του συστήματος καθώς και το διάγραμμα λειτουργίας του. Ακόμη αναλύονται οι βιβλιοθήκες, οι μεταβλητές και οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται σε κάθε κατάσταση και ο χρονισμός του κύριου βρόχου. Αξίζει να αναφερθεί ότι η διαδικασία συγγραφής κώδικα αποτελείται από εκτενείς δοκιμές, εύρεση και διόρθωση σφαλμάτων και ομαδοποίηση του κώδικα σε μικρότερα μέρη, με στόχο, όχι μόνο τη διευκόλυνση της διαχείρισης και της συντήρησης του κώδικα, αλλά και την ευελιξία για πιθανές τροποποιήσεις και βελτιώσεις.

Εν συνεχεία, στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται η διαδικασία των δοκιμών που είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση, επιβεβαίωση της λειτουργικότητας και ασφάλειας, ανίχνευση σφαλμάτων και βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος, εξασφαλίζοντας την επιτυχή ανάπτυξη και λειτουργία του. Πιο συγκεκριμένα αναλύεται η λογική που ακολουθήθηκε, οι δοκιμές των επιμέρους υποσυστημάτων, η δοκιμή της ολοκληρωμένης διάταξης, της αντοχής της μπαταρίας, η δοκιμή του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες και ο πραγματικός του ενεργειακός προϋπολογισμός.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εκτενή ανάλυση και έρευνα που πραγματοποιήθηκε. Επιπλέον, εξετάζονται δυνητικές βελτιώσεις που μπορούν να εφαρμοστούν στο σύστημα, με στόχο την αύξηση της απόδοσης και της αποτελεσματικότητάς του. Επίσης, δίνεται έμφαση σε μελλοντικά βήματα που θα μπορούσαν να ακολουθηθούν για την επέκταση ή τη βελτίωση του συστήματος.

Στη συνέχεια, παρέχεται μια λίστα αναφορών προς τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της εργασίας, προκειμένου ο αναγνώστης να μπορεί να ανατρέξει σε περισσότερες λεπτομέρειες και πηγές πληροφοριών σχετικά με το θέμα.

2ο κεφάλαιο: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

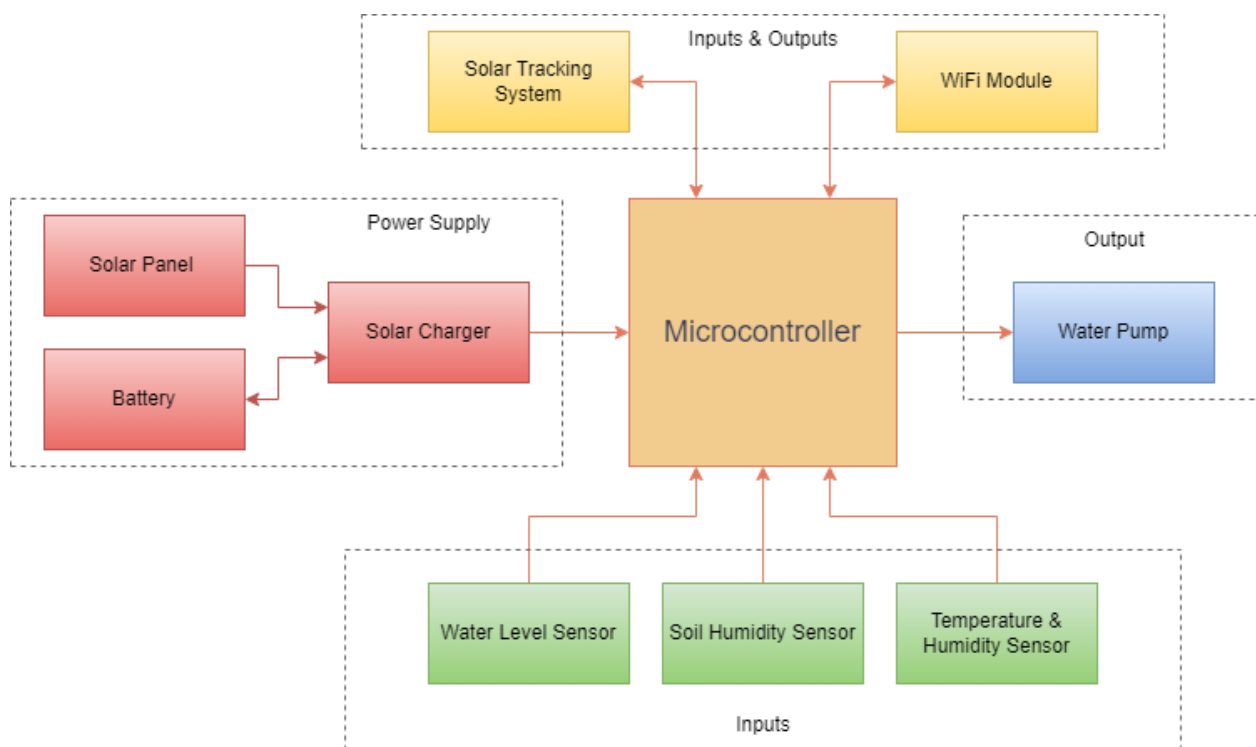
2.1) Λειτουργικές απαιτήσεις και προϋποθέσεις.

Προκειμένου να σχεδιαστεί ένα αυτόνομο και αυτόματο σύστημα άρδευσης, έπρεπε πρώτα να τεθούν κάποιες λειτουργικές απαιτήσεις, προκειμένου να επιτύχει το στόχο του. Το σύστημα άρδευσης σχεδιάστηκε με στόχο να ποτίσει σωστά ένα σχετικά μικρό φυτό, που θα βρίσκεται σε μία γλάστρα ή σε ένα μικρό κηπάκι, αντλώντας νερό από μια δεξαμενή. Για τη λειτουργία του, το σύστημα εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια. Αυτό επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση ενός συστήματος ανίχνευσης ηλίου σε δύο άξονες και τη χρήση ενός ηλιακού πάνελ στην κορυφή του, που επιτρέπει στο σύστημα να απορροφά τη μέγιστη δυνατή ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το ηλιακό πάνελ μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία αποθηκεύεται σε μια μπαταρία. Αυτή η μπαταρία χρησιμεύει ως αποθηκευτικός χώρος ενέργειας για την τροφοδοσία του συστήματος, επιτρέποντας τη λειτουργία του, ακόμη και όταν οι συνθήκες δεν είναι κατάλληλες για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας. Επιπλέον, το σύστημα χρησιμοποιεί αισθητήρες για τη μέτρηση των βασικών παραμέτρων, που επηρεάζουν τις ανάγκες της άρδευσης, όπως η υγρασία του εδάφους, η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα αλλά και η στάθμη νερού της δεξαμενής. Οι αισθητήρες αυτοί συλλέγουν δεδομένα, που στέλνονται σε έναν μικροελεγκτή, ο οποίος αποτελεί τον εγκέφαλο του συστήματος. Ο μικροελεγκτής αναλύει αυτά τα δεδομένα και λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με το πότισμα του φυτού. Επιπρόσθετα, το συγκεκριμένο σύστημα άρδευσης υποστηρίζει απομακρυσμένο έλεγχο, μέσω του Internet of Things, εφόσον υπάρχει πρόσβαση σε δίκτυο WiFi. Αυτό επιτρέπει τον χρήστη να παρακολουθεί και να ελέγχει τη λειτουργία του από απόσταση, χρησιμοποιώντας μόνο μια εφαρμογή στο smartphone/tablet του.

Οι απαραίτητες προϋποθέσεις του συστήματος είναι ότι το σύστημα πρέπει να λειτουργεί συνεχώς και για εκτεταμένα χρονικά διαστήματα, χωρίς να εξαντλεί πλήρως την ενέργειά του, ιδίως τους καλοκαιρινούς μήνες που υπάρχει έλλειψη βροχής. Για να επιτευχθεί αυτό, ενσωματώθηκε ένα σύστημα ανίχνευσης ηλίου σε δύο άξονες, που επιτρέπει στο σύστημα να απορροφά τη μέγιστη δυνατή ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας και την αποθήκευσή της σε μία μπαταρία μεγάλης χωρητικότητας. Επιπλέον, το σύστημα θα πρέπει να υποστηρίζει όλα τα υποσυστήματα παρά τις απαιτήσεις ισχύος, δηλαδή ανεξάρτητα από την ενεργοποίηση των διάφορων στοιχείων, το σύστημα να εξασφαλίζει ότι λειτουργούν όλα σωστά και κατά τα βέλτιστα. Επίσης, το σύστημα είναι αναγκαίο να διασφαλίζει την ακρίβεια των μετρήσεων που πραγματοποιούνται από τους αισθητήρες, συμβάλλοντας στην αξιοπιστία του ποτίσματος των φυτών, γι' αυτό ενσωματώθηκαν αισθητήρες ποιότητας και μαθηματικοί αλγόριθμοι για πιο ακριβείς μετρήσεις. Επιπροσθέτως, το σύστημα έπρεπε να είναι προσαρμοστικό σε κάθε φυτό, λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες του σε νερό. Από το αρδευτικό σύστημα δεν μπορούσε να λείπει η υποστήριξη απομακρυσμένου ελέγχου, επιτρέποντας στους χρήστες να παρακολουθούν και να διαχειρίζονται το πότισμα των φυτών από απόσταση. Τέλος, αυστηρή προϋπόθεση ήταν να είναι σχετικά οικονομικό από άποψη τιμής, επιτρέποντας την ευρεία διάθεσή του από απλούς σπιτονοικοκύρηδες που επιθυμούν να φροντίσουν τον κήπο τους, μέχρι γεωργούς, ώστε να ενισχυθεί η ευρύτερη υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας και η βελτίωση της γεωργικής παραγωγής.

2.2) Γενικό σχεδιάγραμμα του συστήματος

Παρακάτω παρουσιάζεται το γενικό μπλοκ διάγραμμα του αυτόνομου και αυτόματου αρδευτικού συστήματος.



Σχήμα 2.1. Μπλοκ διάγραμμα αυτόνομου και αυτόματου αρδευτικού συστήματος

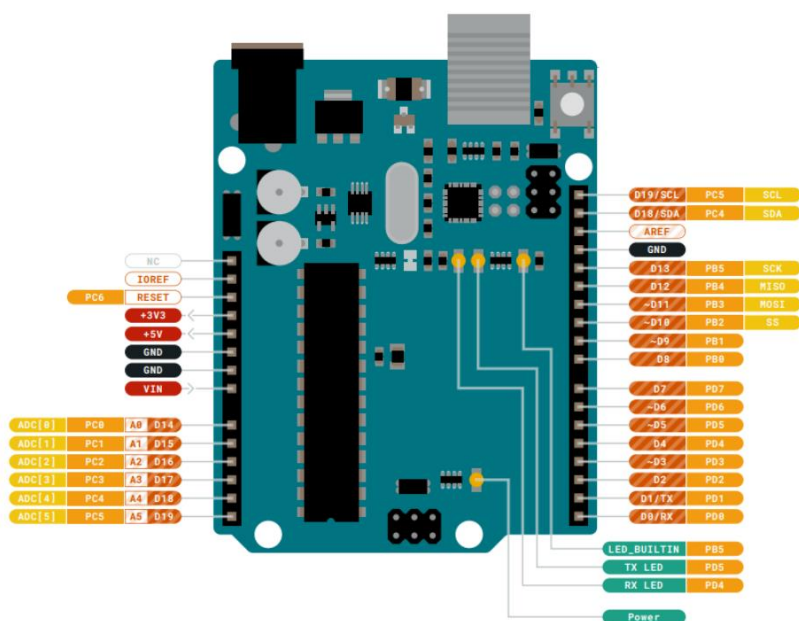
Το διάγραμμα του αυτόνομου και αυτόματου αρδευτικού συστήματος, που απεικονίζεται στο σχήμα 2.1, περιλαμβάνει τον μικροελεγκτή (Microcontroller), ο οποίος, μέσω του προγραμματισμού του, είναι υπεύθυνος να λαμβάνει τις μετρήσεις των αισθητήρων και των λοιπών περιφερειακών και βάσει αυτών να παίρνει τις απαραίτητες αποφάσεις. Ακόμη, περιλαμβάνει τους αισθητήρες: στάθμης νερού (Water Level Sensor) της δεξαμενής, υγρασίας εδάφους (Soil Humidity Sensor) και θερμοκρασίας και υγρασίας (Temperature & Humidity Sensor), που είναι υπεύθυνοι για την έγκυρη λήψη των εκάστοτε μετρήσεων και αποτελούν εισόδους (Inputs) του μικροελεγκτή. Περιέχει την αντλία νερού (Water Pump) που αποσκοπεί στην άρδευση του φυτού, αντλώντας νερό από τη δεξαμενή και αποτελεί την κύρια έξοδο (Output) του μικροελεγκτή. Επιπλέον, το διάγραμμα περιλαμβάνει τη φωτοβολταϊκή κυψέλη (Solar Panel), υπεύθυνη για την παροχή ενέργειας στον ηλιακό φορτιστή, την μπαταρία (Battery) που τροφοδοτεί τον φορτιστή όταν το φωτοβολταϊκό αδυνατεί και τον ηλιακό φορτιστή (Solar Charger), που αναλαμβάνει τη διαχείριση της ενέργειας, τη σωστή φόρτιση της μπαταρίας και την ελεγχόμενη τροφοδότηση του συστήματος. Η φωτοβολταϊκή κυψέλη, η μπαταρία και ο ηλιακός φορτιστής αναλαμβάνουν την τροφοδοσία (Power Supply) του μικροελεγκτή. Τέλος, το μπλοκ διάγραμμα περιλαμβάνει το σύστημα ανίχνευσης του ήλιου (Solar Tracking System), το οποίο έχει ως στόχο να φέρει το φωτοβολταϊκό κάθετα στις ακτίνες του ηλίου για μέγιστη απορρόφηση ακτινοβολίας και το WiFi Module που είναι υπεύθυνο για τον απομακρυσμένο έλεγχο του συστήματος από τον χρήστη, μέσω του διαδικτύου. Το σύστημα ανίχνευσης ηλίου και το WiFi Module αλληλεπιδρούν με τον μικροελεγκτή και γι' αυτό αποτελούν και εισόδους και εξόδους του (Inputs & Outputs).

2.3) Επιλογή εξαρτημάτων και σχεδίαση των κυκλωμάτων

Παρακάτω παρατίθενται τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του αυτόματου και αυτόνομου συστήματος άρδευσης, τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, καθώς και οι λόγοι που επιλέχθηκαν συγκριτικά με τον ανταγωνισμό. Ακόμη, σε μερικά από αυτά, αναλύεται η σχεδίαση των κυκλωμάτων τους και η συνδεσμολογία τους.

2.3.1) Η υπολογιστική πλακέτα Arduino Uno R3

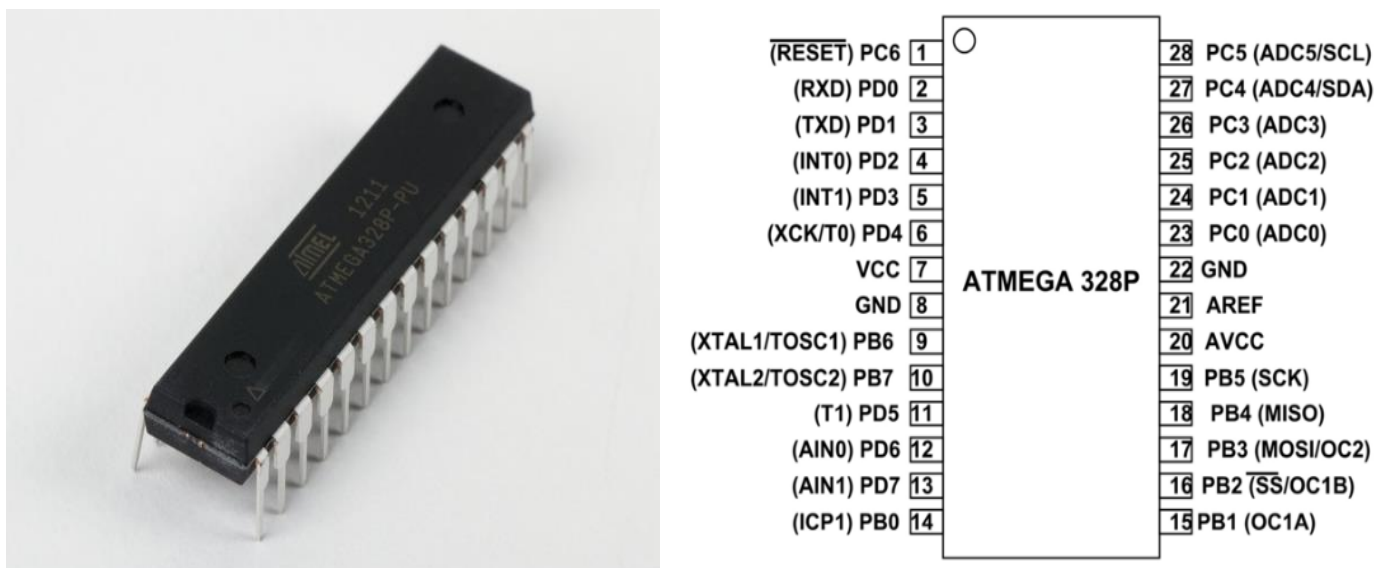
Η επιλογή του Arduino Uno R3 για την υλοποίηση του αυτόνομου συστήματος άρδευσης έγινε λόγω πολλών πρακτικών και λειτουργικών πλεονεκτημάτων. Πρώτον, το Arduino Uno R3 προσφέρει μια φιλική προς τον χρήστη πλατφόρμα προγραμματισμού με το Arduino IDE, που διευκολύνει τον προγραμματισμό και την ανάπτυξη του λογισμικού. Η ανοικτή και ενεργή κοινότητα Arduino παρέχει πληθώρα πόρων, πληροφοριών και βοήθειας που διευκολύνουν την ανάπτυξη του συστήματος. Δεύτερον, η διαθεσιμότητα και η υποστήριξη πολλών αισθητήρων και πρόσθετων εξαρτημάτων καθιστά εύκολη την προσαρμογή του συστήματος στις ανάγκες της άρδευσης. Επιπλέον, το Arduino Uno R3 είναι σχετικά οικονομικό, διασφαλίζοντας την οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος, καθώς επιτρέπει στους χρήστες να προσθέσουν και να επεκτείνουν το σύστημα με πρόσθετα εξαρτήματα, χωρίς να αυξήσουν σημαντικά το κόστος του. Τέλος, παρέχει αρκετή υπολογιστική ισχύ, μέσω του επεξεργαστή του, και μεγάλο αποθηκευτικό χώρο για την επίλυση των αλγορίθμων και την αποθήκευση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 2.1. Arduino Uno R3 και pinout

Ο επεξεργαστής ATmega328P που χρησιμοποιεί το Arduino Uno, είναι υπεύθυνος για την ευελιξία και την απόδοση αυτής της δημοφιλούς προγραμματιστικής πλακέτας, καθώς αποτελεί τον εγκέφαλο της πλακέτας και κατ' επέκταση όλου του συστήματος. Αυτός είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο των αισθητήρων και των υπόλοιπων περιφερειακών και προγραμματίζεται για να παίρνει αποφάσεις βάσει αλγορίθμων. Ο ATmega328P, ο οποίος αποτελεί έναν αξιόπιστο και ευέλικτο 8-bit

μικροελεγκτή, βασίζεται στην αρχιτεκτονική AVR RISC (Reduced Instruction Set Computer) η οποία προσφέρει υψηλή απόδοση και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και λειτουργεί στα 16 MHz, προσφέροντας αρκετή υπολογιστική ισχύ για τις ανάγκες του συστήματος. Ακόμη, διαθέτει 32 kilobyte μνήμη Flash, 2 kilobyte RAM και 1 kilobyte EEPROM. Η μνήμη Flash επιτρέπει την αποθήκευση των προγραμμάτων και των δεδομένων η RAM επιτρέπει την αποθήκευση των ενεργών μεταβλητών κατά την εκτέλεση του προγράμματος και η EEPROM χρησιμοποιείται για την αποθήκευση μόνιμων δεδομένων, που διατηρούνται, ακόμη και αν το Arduino Uno απενεργοποιηθεί. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου μικροελεγκτή είναι η δυνατότητα πολλαπλών ψηφιακών και αναλογικών ακροδεκτών, οι οποίοι επιτρέπουν τη σύνδεση αισθητήρων και εξόδων. Αυτό καθιστά τον επεξεργαστή ιδανικό για τον προγραμματισμό και τον έλεγχο συνδεδεμένων συσκευών. Τέλος, Ο ATmega328P μπορεί να προγραμματιστεί σε γλώσσα προγραμματισμού C, με χρήση του περιβάλλοντος ανάπτυξης Arduino IDE, που παρέχει ένα εύχρηστο περιβάλλον για τη δημιουργία και το ανέβασμα των προγραμμάτων [3].



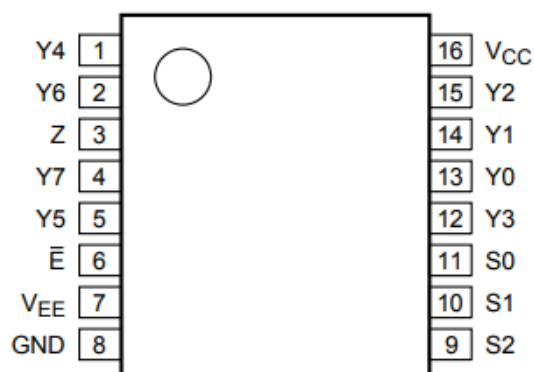
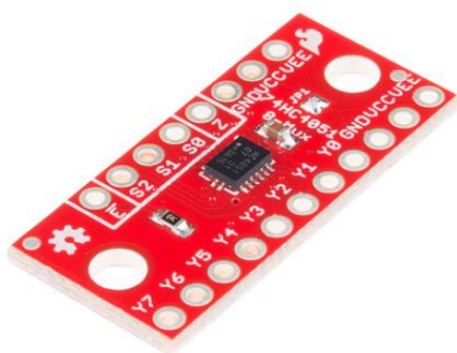
Εικόνα 2.2. ATmega328P και pinout

Όσον αφορά την τροφοδοσία, το Arduino Uno R3 board μπορεί να τροφοδοτηθεί, είτε μέσω USB (5V), είτε με μια εξωτερική πηγή τροφοδοσίας. Η εξωτερική τροφοδοσία μπορεί να προέρχεται, είτε από έναν μετασχηματιστή AC-DC, είτε από μπαταρία. Ο μετασχηματιστής μπορεί να συνδεθεί συνδέοντας ένα βύσμα 2,1mm στην υποδοχή τροφοδοσίας, ενώ οι ακροδέκτες των καλωδίων της μπαταρίας μπορούν να εισαχθούν στους ακροδέκτες GND και Vin. Στην τελευταία περίπτωση, το board μπορεί να λειτουργήσει με εξωτερική τροφοδοσία από 6 έως 20V. Στη συγκεκριμένη διπλωματική χρησιμοποιείται το USB ως θύρα τροφοδοσίας του Arduino.

Για να τροφοδοτήσει, τα συνδεδεμένα σε αυτό εξαρτήματα, το Arduino Uno R3 χρησιμοποιεί τους ακροδέκτες τροφοδοσίας (power pins). Τα power pins που διαθέτει είναι το 5V pin, που εξάγει μια ρυθμισμένη τάση 5V από τον ρυθμιστή τάσης του board με μέγιστο ρεύμα 800mA, το 3V3 pin που παράγει 3.3V από τον ενσωματωμένο ρυθμιστή, τα τρία GND pins, δηλαδή τη γείωση και το

IOREF pin που παρέχει την τάση αναφοράς με την οποία λειτουργεί ο μικροελεγκτής. Ακόμα, ενσωματώνει ένα reset pin που χρησιμοποιείται για την επαναφορά του μικροελεγκτή στην αρχική του κατάσταση ή για την επανεκκίνηση του προγράμματος που εκτελείται.

Το Arduino Uno R3 διαθέτει τόσο αναλογικές όσο και ψηφιακές εισόδους και εξόδους, προσφέροντας έτσι ευελιξία και δυνατότητες για τη σύνδεση με διάφορους αισθητήρες, συσκευές και επικοινωνία με το περιβάλλον. Οι αναλογικές εισόδους επιτρέπουν στο Arduino Uno να μετρά τιμές από αισθητήρες, που παράγουν αναλογικές τάσεις. Με αυτές τις εισόδους, μπορούν να μετρηθούν τάσεις που αντιπροσωπεύουν φυσικά μεγέθη όπως η θερμοκρασία, η φωτεινότητα, η πίεση και πολλά άλλα. Ο Arduino Uno έχει 6 αναλογικές εισόδους, σημειωμένες ως A0-A5, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τέτοιες μετρήσεις. Από την άλλη πλευρά, οι ψηφιακές εισόδους και έξοδοι επιτρέπουν την επικοινωνία με ψηφιακές συσκευές, όπως διακόπτες, LED, αισθητήρες με ψηφιακή έξοδο και πολλά άλλα. Το Arduino Uno διαθέτει 14 ψηφιακές εισόδους/εξόδους, από τις οποίες οι 6 μπορούν να λειτουργήσουν ως PWM (Pulse Width Modulation), που λειτουργεί με τη μεταβολή του πλάτους των παλμών, ή της διάρκειας των παλμών, σε μια συγκεκριμένη περίοδο.



Εικόνα 2.3. 74HC4051 και pinout

Παρόλο που η συγκεκριμένη πλακέτα διαθέτει αρκετές αναλογικές εισόδους, για τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρειάστηκε μία ακόμα. Γι' αυτό χρησιμοποιήθηκε ο **πολυπλέκτης 74HC4051** [4]. Με την προσθήκη του πολυπλέκτη η αναλογική είσοδος A5 κατάφερε να επεκταθεί σε δύο εισόδους και να συλλέγει μετρήσεις από δύο διαφορετικούς αισθητήρες. Για να πραγματοποιηθεί όμως αυτό, ήταν αναγκαία η σωστή συνδεσμολογία και ο ορθός χρονισμός. Ο χρονισμός του 74HC4051 θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 3. Όσον αφορά στη συνδεσμολογία, ενώθηκε η αναλογική έξοδος του πολυπλέκτη (Z) με την είσοδο του Arduino Uno (A5), γειώθηκαν τα selection pins (S1,S2), το enable pin (E), το ground pin (GND) του 74HC4051 και τροφοδοτήθηκε μέσω του Vcc pin στα 5V. Ακόμη, συνδέθηκαν οι έξοδοι των δύο αισθητήρων στα κανάλια εισόδου του πολυπλέκτη (Y0,Y1) και το selection pin 0 (S0) στην ψηφιακή έξοδο D9 του Arduino Uno, για να μπορεί να εναλλάσσεται η αναλογική είσοδος μεταξύ των αισθητήρων, ώστε να λαμβάνονται δεδομένα και από τους δύο. Η εναλλαγή αυτή γίνεται βάσει του πίνακα 2.1

Πίνακας 2.1. Πίνακας λειτουργίας του 74HC4051

Input				Channel ON
E	S2	S1	S0	
L	L	L	L	Y0 to Z
L	L	L	H	Y1 to Z
L	L	H	L	Y2 to Z
L	L	H	H	Y3 to Z
L	H	L	L	Y4 to Z
L	H	L	H	Y5 to Z
L	H	H	L	Y6 to Z
L	H	H	H	Y7 to Z
H	X	X	X	switches off

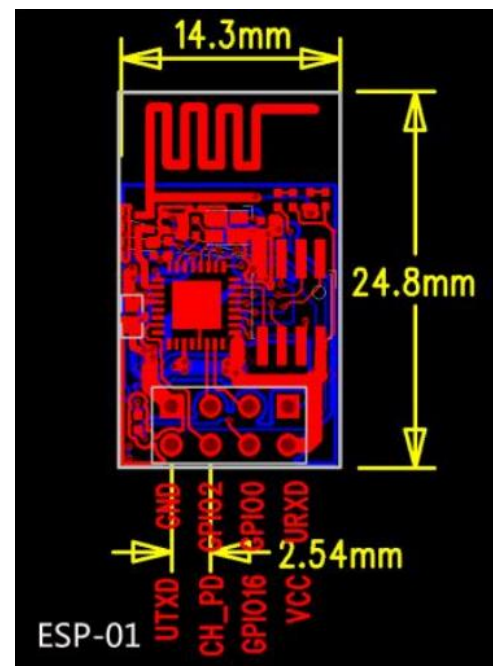
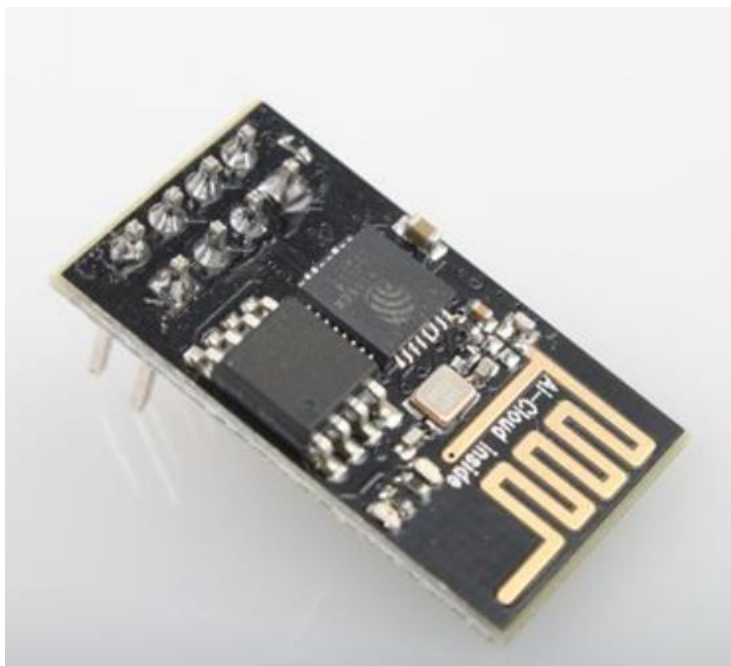
[1] H = HIGH voltage level; L = LOW voltage level; X = don't care.

Βάσει των γειωμένων ακροδεκτών του πολυπλέκτη (E, S2, S1) που λαμβάνουν την τιμή L, προκύπτει ότι μπορούν μόνο 2 από τα 8 κανάλια του να είναι ανοιχτά, ένα τη φορά. Αυτά είναι τα κανάλια Y0 και Y1 στα οποία συνδέονται οι 2 αισθητήρες και εναλλάσσονται ανάλογα με την τιμή του ακροδέκτη S0.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί, ότι για να γίνει ο συγκεκριμένος πολυπλέκτης ευκολότερος στη διαχείριση και στη συνδεσμολογία, πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις ειδικών ακροδεκτών σε όλες τις υποδοχές του, ώστε να γίνει συμβατός με breadboard. Οι κολλήσεις έγιναν με κολλητήρι και καλώς προσέχοντας μη βραχυκυκλωθούν οι υποδοχές, καθώς βρίσκονται σε αρκετά κοντινή απόσταση. Αυτή η τεχνική προσέφερε αξιοπιστία και αντοχή στις διάφορες συνδέσεις του πολυπλέκτη και γλίτωσε κόπο και πολύτιμο χρόνο στην κατασκευή του συστήματος.

2.3.2) Το WiFi module ESP-01

Για την επίτευξη του απομακρυσμένου ελέγχου του αυτόματου και αυτόνομου συστήματος άρδευσης, επιλέχθηκε το **WiFi module ESP-01** [5]. Ένας από τους λόγους που επιλέχθηκε είναι ότι προσφέρει αξιόπιστη ασύρματη συνδεσιμότητα μέσω Wi-Fi, επιτρέποντας τον έλεγχο του συστήματος εξ'αποστάσεως. Αυτό είναι κρίσιμο για την εξοικονόμηση χρόνου και πόρων, καθώς ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί και να διαχειρίζεται την άρδευση από οπουδήποτε, μέσω του διαδικτύου. Επιπλέον, το ESP-01 είναι οικονομικό, πράγμα που συνέβαλε στη μείωση του συνολικού κόστους. Η μικρή του μορφή το καθιστά επίσης κατάλληλο για εφαρμογές με περιορισμένο χώρο, όπου πολλά συστήματα δε θα χωρούσαν εύκολα. Τέλος, οι δυνατότητες του ESP-01 σε συνδυασμό με την ευκολία προγραμματισμού και την υποστήριξη από την κοινότητα Arduino το καθιστούν ιδανική επιλογή για το συγκεκριμένο έργο, προσφέροντας την απόλυτη ευελιξία και αξιοπιστία. Οι διαστάσεις και τα ονόματα των ακροδεκτών του WiFi module ESP-01 απεικονίζονται στην εικόνα 2.4.



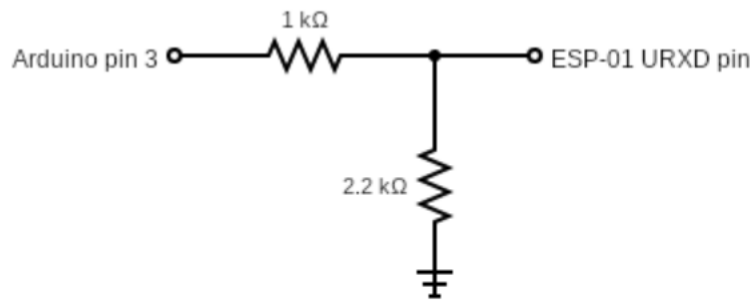
Εικόνα 2.4. ESP-01 διαστάσεις και pinout

Το ESP-01 είναι ένας μικρός και πολύ δημοφιλής ασύρματος μικροελεγκτής (microcontroller) που βασίζεται στο ESP8266EX Wi-Fi chip (MCU) και έχει σχεδιαστεί ειδικά για εφαρμογές Internet of Things (IoT). Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιεί την Tensilica L106 32-bit κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU) χρονισμένη στα 80MHz, ενώ έχει τη δυνατότητα να αγγίζει τα 160MHz. Διαθέτει εσωτερική μνήμη 1MB ROM και SRAM < 36kB, ανάλογα με την τρέχουσα έκδοση SDK. Ακόμη, το ESP-01, ενισχύοντας την εσωτερική μνήμη, είναι εφοδιασμένο με μια εξωτερική SPI flash μνήμη 1MB, για να αποθηκεύεται ο κώδικας του χρήστη, το firmware και τα απαραίτητα δεδομένα. Έχει ενσωματωμένη κεραία με ικανοποιητική εμβέλεια (~ 100m σε συνθήκες χωρίς εμπόδια) ικανή να στέλνει και να λαμβάνει σήματα 2,4GHz. Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που υποστηρίζει είναι τα HSPI, PWM, IR Remote Control, ADC, I2C, UART και I2S, ενώ το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο σύστημα είναι το UART(Universal Asynchronous Receiver-Transmitter).

Το UART επιτρέπει την ασύγχρονη επικοινωνία, δηλαδή τη μετάδοση δεδομένων χωρίς την ανάγκη για κοινό ρολόι επικοινωνίας. Οι βασικοί ακροδέκτες που χρησιμοποιούνται σε μια σύνδεση UART είναι οι TXD (Transmit) για τη μετάδοση δεδομένων και ο RXD (Receive) για τη λήψη δεδομένων. Ο ακροδέκτης D3 του Arduino συνδέεται με τον ακροδέκτη RXD του WiFi module και αντίστοιχα ο D2 του με τον TXD του WiFi module. Ο τρόπος μετάδοσης των δεδομένων σε ένα σύστημα UART βασίζεται σε μια σειρά από bits. Κάθε μονάδα δεδομένων αποτελείται από ένα Start bit (για επαρκή χρόνο σήματος πριν τη μετάδοση), ένα ή περισσότερα data bits (για τη μετάδοση των δεδομένων), ένα ή περισσότερα parity bits (για ελέγχους σφάλματος) και ένα ή περισσότερα stop bits (για την οριοθέτηση του τέλους της μετάδοσης). Η ταχύτητα μετάδοσης των bits, η αλλιώς baud rate είναι ρυθμισμένη στα 9600 bits ανά δευτερόλεπτο στη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Επειδή όμως το ESP-01 λειτουργεί με διαφορά δυναμικού 3.3V, για να το τροφοδοτήσουμε, συνδέουμε τους ακροδέκτες του, Vcc και GND, με το 3.3V και GND pin του Arduino αντίστοιχα. Ακόμη,

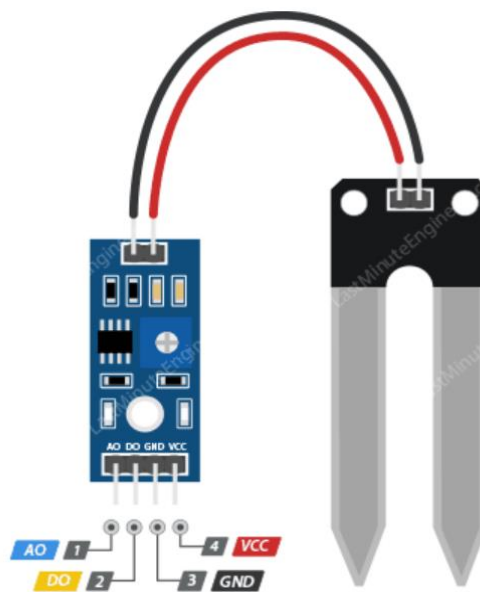
για να διασφαλιστεί η φερέγγυα επικοινωνία μεταξύ των δύο, υλοποιήθηκε η διαίρεση τάσης της εικόνας 2.5, ώστε να ρυθμιστούν τα σήματα που δέχεται το URXD pin του ESP-01, από 5V που στέλνει το D3 pin του Arduino, σε 3,3V. Αντίθετα, όσον αφορά την εκπομπή σημάτων του WiFi module προς το Uno R3, δε χρειάστηκε κάποια τροποποίηση, καθώς τα σήματα των 3.3V γίνονται εύκολα αντιληπτά από το Uno R3, άρα συνδέθηκε απευθείας το UTXD pin του ESP στο D2 pin του Arduino. Τέλος, επειδή το ESP-01, παρά το μικρό μέγεθός του, μπορεί να καταναλώσει αρκετή ενέργεια από την μπαταρία, χρησιμοποιήθηκε το CH_PD pin (Chip Power Down). Έτσι, συνδέθηκε με το D4 pin του Arduino, για ενεργοποιείται μόνο όταν χρειάζεται.



Εικόνα 2.5. Κύκλωμα διαίρεσης τάσης του ESP-01

2.3.3) Οι αισθητήρες Soil Humidity Sensor, Water Level Sensor και DHT11

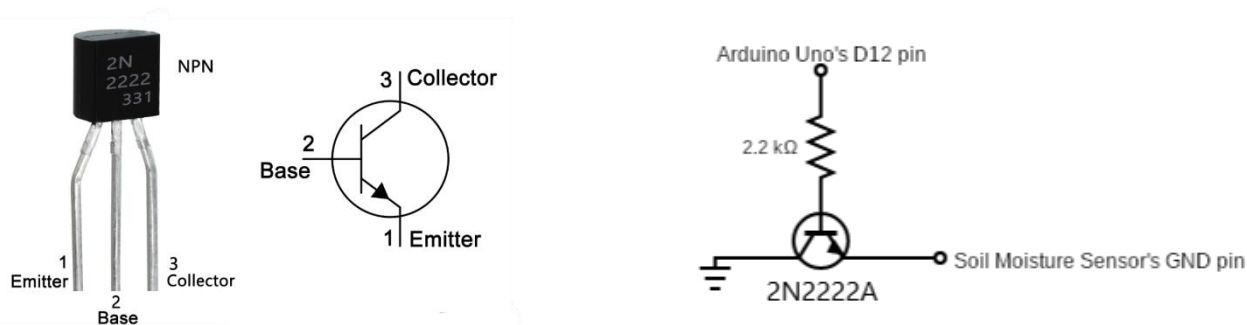
Ο κύριος αισθητήρας του αυτόματου και αυτόνομου συστήματος άρδευσης είναι ο **Soil Humidity Sensor** [6]. Αυτός αναλαμβάνει την έγκυρη λήψη και τη μεταφορά πληροφοριών, όπως η υγρασία του εδάφους προς το Arduino. Ένας από τους λόγους επιλογής του ήταν η ακρίβεια στις μετρήσεις, καθώς το LM393 chip που χρησιμοποιεί για τη λήψη των τιμών υγρασίας λειτουργεί χωρίς αστάθειες. Ακόμα, ο αισθητήρας είναι εύκολος στην εγκατάσταση, απλός στη χρήση και συμβατός με το Arduino Uno. Τέλος, καθοριστικός παράγοντας στην επιλογή του, υπήρξε η τιμή του, αφού ήταν πολύ μικρότερη από τον ανταγωνισμό, για τις παροχές που προσφέρει.



Εικόνα 2.6. Soil Humidity Sensor και pinout

Ο αισθητήρας υγρασίας εδάφους λειτουργεί μετρώντας την αντίσταση του εδάφους. Καταρχάς, εισάγεται στο έδαφος και τοποθετείται κοντά στη ρίζα των φυτών. Στη συνέχεια, μετρά την αντίσταση μεταξύ των δύο ακροδεκτών του. Η αντίσταση του εδάφους είναι αντιστρόφως ανάλογη με την υγρασία του, δηλαδή όσο πιο υγρό είναι το έδαφος, τόσο χαμηλότερη είναι η αντίσταση, και αντίστροφα. Έτσι μεταβάλλεται και η τάση που στέλνει το A0 pin του αισθητήρα στην αναλογική είσοδο του Arduino. Επιπλέον, έχει ενσωματωμένο ένα ποτενσιόμετρο για τη ρύθμιση της ευαισθησίας και έχει τάση λειτουργίας στο εύρος 3.3 – 5V, γεγονός που ενισχύει την προσαρμοστικότητά του.

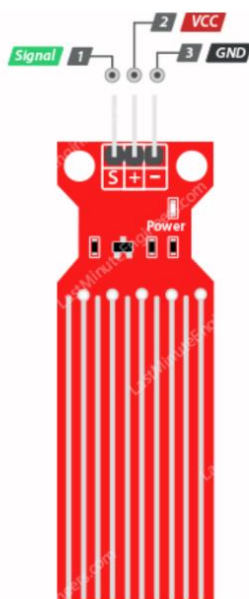
Επειδή όμως ο συγκεκριμένος αισθητήρας καταναλώνει αρκετή ισχύ, είναι αναγκαία η τροφοδότηση του μόνο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, γι' αυτό σχεδιάστηκε το κύκλωμα της εικόνας 2.7. Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από το 2N2222A ηρη transistor σε ρόλο διακόπτη και μία αντίσταση 2.2kΩ στη βάση του, για να ρυθμίσει το ρεύμα που τη διαρρέει [7]. Το συγκεκριμένο transistor επιλέχθηκε διότι είναι σε θέση να αντέξει σχετικά υψηλές τάσεις και ρεύματα, όπως αυτά του αισθητήρα, έχει γρήγορη απόκριση, είναι ευρέως διαθέσιμο και αρκετά οικονομικό. Όταν σταλεί το σήμα ενεργοποίησης από το D12 pin του Arduino, περνά ρεύμα από τη βάση του transistor, με αποτέλεσμα να επιτρέπεται η ροή ρεύματος από τον συλλέκτη στον εκπομπό και να τροφοδοτείται ο αισθητήρας. Κατά αυτόν τον τρόπο, το Arduino αποφασίζει πότε θα ενεργοποιηθεί ο αισθητήρας, εξοικονομώντας πολύτιμη ενέργεια από την μπαταρία.



Εικόνα 2.7. 2N2222A και κύκλωμα τροφοδοσίας του Soil Moisture Sensor

Ο αισθητήρας στάθμης νερού, γνωστός και ως **Water Level Sensor** [8], διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στο αυτόματο και αυτόνομο αρδευτικό σύστημα. Είναι υπεύθυνος για τη συλλογή ακριβών δεδομένων σχετικά με τη στάθμη του νερού στη δεξαμενή και τη μεταφορά τους προς το Arduino Uno. Ο λόγος που επιλέχτηκε αυτός ο αισθητήρας είναι πολύ σημαντικός και συνάγεται από αρκετούς παράγοντες. Καταρχάς, ο Water Level Sensor είναι εξαιρετικά ακριβής στις μετρήσεις του, προσφέροντας στο σύστημά τη δυνατότητα να παρακολουθεί ακριβώς τη στάθμη του νερού. Αυτό είναι κρίσιμο για την υγιή ανάπτυξη του φυτού, καθώς απαιτείται ακρίβεια στη ρύθμιση της ποσότητας του νερού που παρέχεται. Επιπλέον, ο αισθητήρας είναι εύκολος στην εγκατάσταση και απλός στη χρήση του, διευκολύνοντας τη διαδικασία της ενσωμάτωσής του. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά χωρίς την ανάγκη για περίπλοκες διαδικασίες εγκατάστασης ή προγραμματισμού. Σημαντικός παράγοντας στην επιλογή του αισθητήρα αποτέλεσε και η άμεση διαθεσιμότητά του στην αγορά, καθώς και η φιλική προς τον προϋπολογισμό

τιμή του. Αυτό επέτρεψε τη δημιουργία ενός αποδοτικού συστήματος χωρίς την υπέρβαση του προϋπολογισμού.



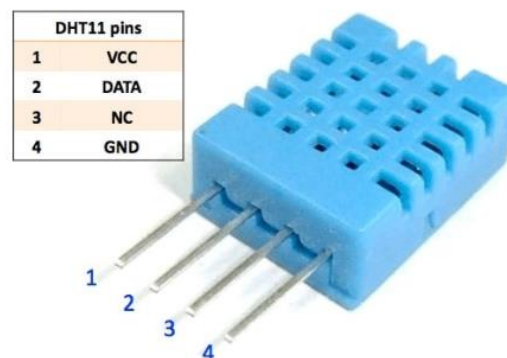
Εικόνα 2.8. Water Level Sensor και pinout

Η αρχή λειτουργίας του Water Level Sensor βασίζεται στον ηλεκτρικά αγώγιμο χαρακτήρα του νερού. Ο αισθητήρας περιλαμβάνει μια σειρά από παράλληλα αγώγιμα μεταλλικά ηλεκτρόδια που εκτίθενται στο νερό. Όταν το νερό αγγίζει αυτά τα ηλεκτρόδια, δημιουργεί μια ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους. Η αντίσταση του νερού προστίθεται στο κύκλωμα, και αυτό επηρεάζει την τάση που μετριέται από τον αισθητήρα. Το Arduino συλλέγει αυτήν την αναλογική τάση από το Signal pin του Water Level Sensor και μετατρέπει την τιμή σε ποσοστιαία αναπαράσταση της στάθμης του νερού. Όσο υψηλότερη είναι η στάθμη του νερού, τόσο χαμηλότερη είναι η αντίσταση και τόσο υψηλότερη η τάση που μετριέται από τον αισθητήρα. Έτσι, είναι δυνατή η συνεχής παρακολούθηση της στάθμης του νερού και η λήψη των αναγκαίων μετρήσεων για το σύστημα.

Όπως στην περίπτωση του αισθητήρα υγρασίας εδάφους, έτσι και στον Water Level Sensor, υπάρχει αρκετή κατανάλωση ενέργειας από τη διαρκή τροφοδότηση του αισθητήρα. Για να ρυθμιστεί η λειτουργία του σχεδιάστηκε το ίδιο κύκλωμα με πριν (εικόνα 2.7), με τη διαφορά ότι η βάση του transistor συνδέθηκε στο D13 pin του Arduino και ο εκπομπός του στο Water Level Sensor's GND pin. Έτσι βελτιώθηκε περεταίρω η διαχείριση των πόρων της μπαταρίας.

Ο αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του αρδευτικού συστήματος είναι ο **DHT11** [9]. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας επιλέχθηκε με προσοχή λόγω πολλών σημαντικών προτερημάτων. Το κύριο από αυτά είναι η αξιοπιστία του στις μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας, κάτι που είναι απαραίτητο για την ακριβή και αποτελεσματική άρδευση. Επιπλέον, το DHT11 είναι εύκολο στη χρήση και συνδυάζεται άψογα με το Arduino, καθιστώντας το προσιτό για ερασιτέχνες και επαγγελματίες που αναζητούν μια αποτελεσματική

λύση για τον έλεγχο του περιβάλλοντος των φυτών τους. Υπάρχουν πολλές έτοιμες βιβλιοθήκες και πλούσιο υλικό που είναι διαθέσιμο, καθιστώντας την ανάπτυξη και τον προγραμματισμό πιο εύκολη και γρήγορη διαδικασία. Η ύπαρξη αυτών των πόρων αποτελεί μια πολύτιμη πηγή γνώσης και υποστήριξης για την αντιμετώπιση προβλημάτων. Οι προγραμματιστές και οι μηχανικοί έχουν πρόσβαση σε μια ευρεία κοινότητα που μπορεί να τους βοηθήσει σε περίπτωση ανάγκης, εξοικονομώντας πολύτιμο χρόνο και πόρους στην ανάπτυξη του συστήματος. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό του DHT11 είναι η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα συστήματα που πρέπει να λειτουργούν συνεχώς και για μεγάλα χρονικά διαστήματα, διατηρώντας παράλληλα χαμηλά την κατανάλωση. Αυτό εξασφαλίζει ότι το σύστημα μπορεί να παρακολουθεί τις συνθήκες περιβάλλοντος των φυτών για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να απορροφά πολύτιμη ενέργεια. Επιπλέον, ο DHT11 είναι διαθέσιμος ευρέως και σε χαμηλό κόστος, κάτι που τον καθιστά προσιτό για όλους. Είναι μια ιδανική επιλογή για τον έλεγχο και τη διατήρηση της υγείας των φυτών με αξιοπιστία και αποδοτικότητα.



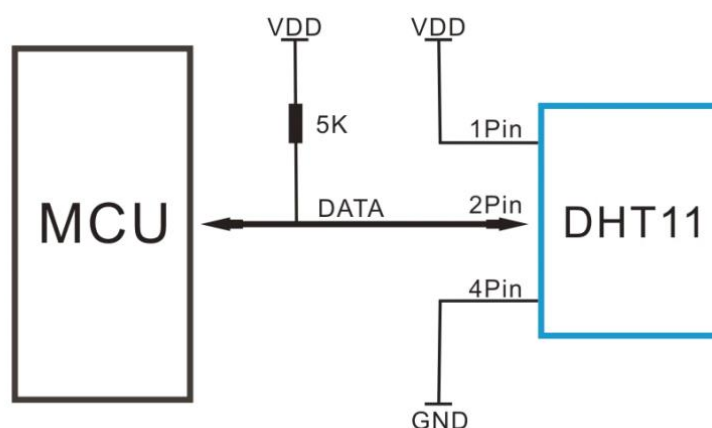
Εικόνα 2.9. DHT11 και pinout

Ο αισθητήρας DHT11 διαθέτει εξαιρετικά χαρακτηριστικά που τον καθιστούν ιδανικό για εφαρμογές μέτρησης θερμοκρασίας και υγρασίας. Το εύρος μέτρησης θερμοκρασίας κυμαίνεται από 0°C έως 50°C, με ανάλυση 1°C και ακρίβεια $\pm 2^\circ\text{C}$. Όσον αφορά την υγρασία, το εύρος μέτρησης κυμαίνεται από 20% έως 90% RH, με ανάλυση 1% RH και ακρίβεια $\pm 5\% \text{ RH}$. Ο αισθητήρας λειτουργεί σε τάση τροφοδοσίας 3.3V ή 5V, ενώ η κατανάλωση ισχύος είναι πολύ χαμηλή (συνήθως λιγότερο από 1mA κατά τη λήψη μέτρησης), κάτι που τον καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Ο χρόνος απόκρισης του αισθητήρα είναι μικρός, καθώς παρέχει τα δεδομένα σε λιγότερο από 2 δευτερόλεπτα και χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο επικοινωνίας Single-Bus Digital Signal για να μεταδίδει τα δεδομένα της θερμοκρασίας και της υγρασίας στο Arduino Uno.

Στο πρωτόκολλο Single-Bus Digital Signal, τα ψηφιακά δεδομένα για τη θερμοκρασία και την υγρασία κωδικοποιούνται και μεταδίδονται μέσω ενός μόνο καλωδίου (Single-Bus), κάνοντας την επικοινωνία απλή. Αρχικά, ο αισθητήρας DHT11 εκπέμπει ένα σήμα εκκίνησης προς το Arduino Uno. Κατόπιν, το Arduino ανταποκρίνεται στο σήμα εκκίνησης και αιτείται τα δεδομένα από τον αισθητήρα. Ο αισθητήρας με τη σειρά του απαντά με τα δεδομένα θερμοκρασίας και υγρασίας, καθώς και έναν έλεγχο ακεραιότητας (checksum). Τα δεδομένα περνούν στο Arduino μέσω του Single-Bus καλωδίου. Κατά τη μετάδοση, το καλώδιο χρησιμοποιείται για να αλλάξει την κατάσταση

της τάσης στο ψηφιακό επίπεδο (0V για 0 και 3.3V ή 5V για 1), αναπαριστώντας τα ψηφιακά δεδομένα. Τέλος, το Arduino αποκωδικοποιεί τα δεδομένα με βάση τις αλλαγές στο Single-Bus και υπολογίζει τη θερμοκρασία και την υγρασία από αυτά.

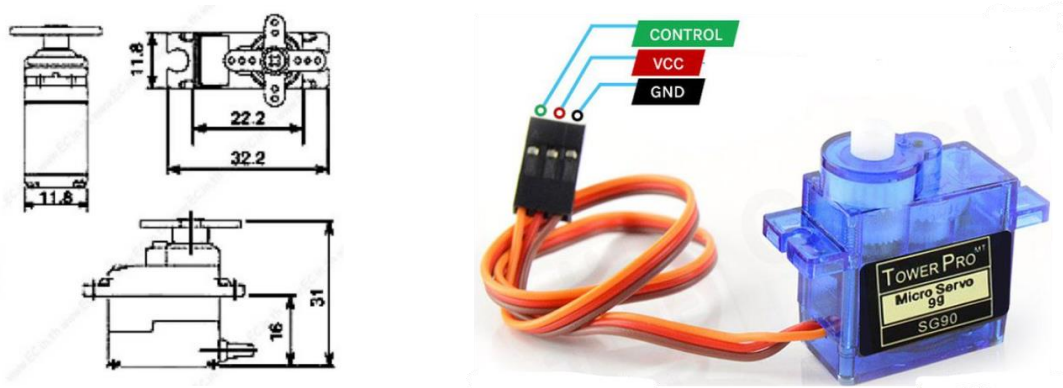
Η συνδεσμολογία που απαιτείται για τη σωστή λειτουργία του DHT11 φαίνεται στην εικόνα 2.10. Συγκεκριμένα συνδέεται το Vcc και το GND pin του αισθητήρα στο +5V και GND pin του Arduino αντίστοιχα, συνδέεται το Data pin του DHT11 στο D8 pin του Arduino για τη μεταφορά των δεδομένων, ενώ είναι απαραίτητη η ύπαρξη μίας pull-up αντίστασης 5kΩ για να προστατεύεται ο αισθητήρας από υπερτάσεις και να εξασφαλίζεται ότι λειτουργεί στο ασφαλές εύρος τάσης. Τέλος, το NC pin του αισθητήρα παραμένει ασύνδετο γιατί κατέχει μόνο ρόλους στήριξης στο breadboard.



Εικόνα 2.10. Συνδεσμολογία DHT11

2.3.4) Οι σερβοκινητήρες SG90 9g και η MICRO SUBMERSIBLE WATER PUMP DC

Στο συγκεκριμένο αρδευτικό σύστημα χρησιμοποιήθηκαν δύο **σερβοκινητήρες SG90 9g** για να στρέφουν το φωτοβολταϊκό σε δύο άξονες, το ένα παράλληλα στο έδαφος και το άλλο κάθετα [10]. Στόχος τους είναι να φέρουν το φωτοβολταϊκό σε κατεύθυνση κάθετη προς τον ήλιο, για τη βέλτιστη απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας. Οι σερβοκινητήρες SG90 9g επιλέχθηκαν λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που προσφέρουν. Καταρχάς, η υψηλή ακρίβεια κίνησής τους εξασφαλίζει την ακρίβεια της θέσης του solar panel, ενώ το μικρό τους μέγεθος τους επιτρέπει να τοποθετούνται σε περιορισμένους χώρους. Επιπλέον, η χαμηλή κατανάλωση ισχύος τους καθιστά φιλικούς προς τη χρήση μπαταριών ή πηγών ενέργειας περιορισμένης διάρκειας. Επίσης, η οικονομική τους τιμή τους καθιστά ιδανική επιλογή για το συγκεκριμένο σύστημα, χωρίς να θυσιάζεται η αξιοπιστία. Τέλος, μπορούν να προγραμματιστούν εύκολα μέσω του Arduino, καθώς υπάρχουν έτοιμες βιβλιοθήκες και διάφορα παραδείγματα για την κατανόηση του κώδικα, επιτρέποντας την προσαρμογή της θέσης τους ανάλογα με τη θέση του ηλίου. Συνολικά, οι SG90 9g σερβοκινητήρες αποτελούν αξιόπιστη και αποδοτική επιλογή για το αυτόματο και αυτόνομο σύστημα άρδευσης.



Εικόνα 2.11. Servomotor SG90 9g διαστάσεις και pinout

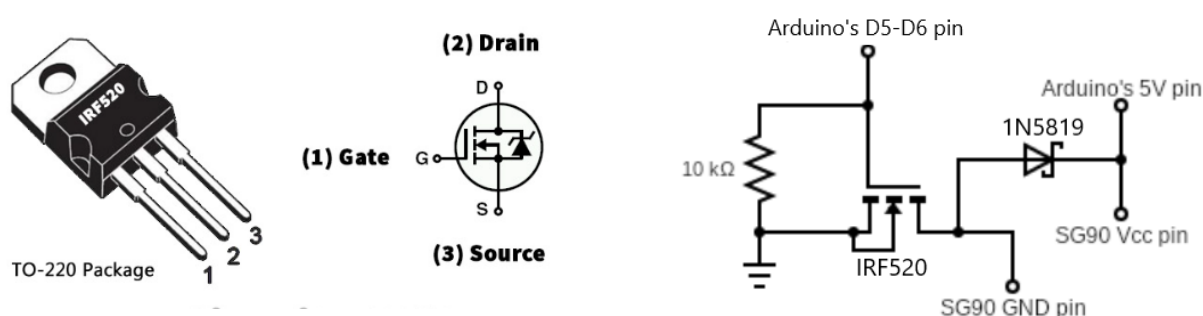
Ο σερβοκινητήρας SG90 9g είναι μια μικρή αλλά ισχυρή συσκευή που χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές που απαιτούν ακρίβεια και αξιοπιστία στον έλεγχο της θέσης. Με την τάση λειτουργίας που κυμαίνεται από 4.8V έως 6V, παρέχει ικανοποιητική ροπή, περίπου 1.8 kg/cm στα 4.8V και περίπου 2.2 kg/cm στα 6V, καθιστώντας τον κατάλληλο για διάφορες εφαρμογές. Επιπλέον, διαθέτει υψηλή ακρίβεια (περίπου 1°), γρήγορη απόκριση, και μεγάλη ταχύτητα περιστροφής (μέγιστη γωνιακή ταχύτητα 60 μοίρες ανά 0.1 δευτερόλεπτο χωρίς φορτίο) κάτι που τον καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη και ακριβή αλλαγή θέσης. Διαθέτει μικρό μέγεθος, σχετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μπορεί να μεταδίδει το σήμα έως και 20 μέτρα. Τέλος, ο SG90 χρησιμοποιεί PWM (Pulse Width Modulation) για τον έλεγχο της θέσης του και μπορεί να περιστρέφεται κατά 180 μοίρες (90 μοίρες προς τα αριστερά και 90 μοίρες προς τα δεξιά).

Η τεχνική PWM (Pulse Width Modulation), είναι ένας δημοφιλής τρόπος ψηφιακού ελέγχου συσκευών που απαιτούν προσαρμογή της ισχύος ή της έντασης ενός σήματος. Βασίζεται στην ιδέα της ρύθμισης της αναλογίας του χρόνου που ένα σήμα είναι ενεργό (σε υψηλή κατάσταση) σε σχέση με τη συνολική περίοδο λειτουργίας. Στην πράξη, το PWM λειτουργεί ως εξής: Ένας μικροελεγκτής ή μια συσκευή παράγει μια σειρά από παλμούς (παλμοί PWM), όπου ο παλμός είναι ενεργός (σε υψηλή τάση) για ένα μέρος της περιόδου και ανενεργός (σε χαμηλή τάση) για το υπόλοιπο. Το ποσοστό του χρόνου που ο παλμός είναι ενεργός συγκρίνεται με τον συνολικό χρόνο της περιόδου και εκφράζεται ως ποσοστό, γνωστό ως duty cycle. Αυτό το ποσοστό καθορίζει τη μέση τιμή της τάσης ή του ρεύματος και, κατά συνέπεια, την ισχύ του εξόδου. Ο χειριστής μπορεί να προσαρμόσει το duty cycle των παλμών PWM για να ρυθμίσει την ισχύ της εξόδου. Ο υψηλός ρυθμός αλλαγής του PWM του επιτρέπει να ρυθμίζει την ισχύ με ακρίβεια, ενώ ο σχετικά χαμηλός καταναλώνει λίγη ενέργεια, καθιστώντας τον ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν αποδοτική χρήση ενέργειας.

Ο σερβοκινητήρας SG90 9g, παρά το μικρό του μέγεθος, έχει μία μικρή κατανάλωση ισχύος που κρίνεται αναγκαίο να περιοριστεί όσο το δυνατόν περισσότερο. Πιο συγκεκριμένα, το ρεύμα αναμονής του, δηλαδή το ρεύμα που το διαρρέει όταν αυτό δε λειτουργεί, υπολογίζεται περίπου στα 10 – 20mA, μία τιμή που δεν περνά απαρατήρητη. Με σκοπό τον μηδενισμό του ρεύματος αναμονής των 2 σερβοκινητήρων, σχεδιάστηκαν 2 όμοια κυκλώματα με αυτό της εικόνας 2.12.

Το κύκλωμα αυτό περιλαμβάνει ένα transistor IRF520 TO-220 N-Channel Mosfet, που κατέχει το ρόλο του διακόπτη, για να απενεργοποιεί τελείως τον σερβοκινητήρα όταν αυτός δε χρειάζεται

[11]. Στην πύλη του transistor τοποθετήθηκε μια pull-down αντίσταση 10kΩ για να εξασφαλιστεί ότι η τάση στην είσοδο της πύλης είναι στο επιθυμητό επίπεδο (0V) όταν δεν υπάρχει ενεργό σήμα εισόδου. Ακόμη, επιλέχθηκε η chottky δίοδος 1N5819 ως flyback diode, για να προστατεύει το υπόλοιπο κύκλωμα από τις αυξομειώσεις της τάσης που προκύπτουν κατά την απενεργοποίησή του SG90 [12]. Αυτό γίνεται διότι οι ηλεκτρομαγνήτες και άλλες μηχανικές συσκευές μπορούν να δημιουργήσουν ανάστροφες τάσεις (πηγές ανάστροφης τάσης) όταν απενεργοποιούνται. Αυτές οι τάσεις μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στο κύκλωμα εάν δεν αντιμετωπιστούν. Οι δίοδοι Flyback συνδέονται παράλληλα με το φορτίο (όπως ο σερβοκινητήρας) και προσφέρουν έναν "δρόμο" για αυτές τις τάσεις, επιτρέποντας στο ρεύμα να κυκλοφορεί μέσα από αυτές χωρίς να προκαλεί προβλήματα. Τέλος, τον έλεγχο τροφοδοσίας του ενός SG90 τον ανάλαβε το D5 pin του Arduino, ενώ τον έλεγχο του άλλου το D6 pin.



Εικόνα 2.12. IRF520 και κύκλωμα τροφοδοσίας των SG90

Αξίζει να αναφερθούν οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκαν το IRF520 Mosfet και η chottky δίοδος 1N5819 στην υλοποίηση του κυκλώματος τροφοδοσίας των SG90. Ο λόγος που επιλέχθηκε το IRF520 MOSFET ως διακόπτης για το SG90 ήταν η ικανότητά του να διαχειρίζεται αποτελεσματικά το ρεύμα που απαιτείται για την τροφοδοσία του σερβοκινητήρα. Το IRF520 είναι ισχυρό με υψηλή ικανότητα αγωγιμότητας, και μπορεί να χειρίζεται αρκετά υψηλά ρεύματα χωρίς να θερμαίνεται υπερβολικά. Επιπλέον, η σχετικά χαμηλή τιμή του τον καθιστά οικονομική επιλογή, ενώ ταυτόχρονα είναι εύκολα διαθέσιμος στην αγορά. Η επιλογή της Schottky Diode 1N5819 ως δίοδου flyback για το SG90 έγινε διότι έχει πολύ χαμηλή πτώση τάσης (~0.3V). Ακόμη οι δίοδοι Schottky έχουν πολύ χαμηλό χρόνο ανάκαμψης, δηλαδή χρόνο που απαιτείται για να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση, πράγμα που τις καθιστά ιδανικές για εφαρμογές με γρήγορες μεταβολές. Η 1N5819 είναι μικρή και εύκολη στη σύνδεση σε ηλεκτρονικά κυκλώματα, κάνοντάς την πρακτική για ενσωμάτωση σε συστήματα, που ο χώρος είναι περιορισμένος και απαιτεί ελάχιστη ενέργεια για τη λειτουργία της, βοηθώντας να διατηρείται η χαμηλή κατανάλωση ισχύος του συστήματος. Τέλος, είναι οικονομική και ευρέως διαθέσιμη.

Τη μεταφορά του νερού από τη δεξαμενή στο φυτό αναλαμβάνει η **MICRO SUBMERSIBLE WATER PUMP DC** [13]. Αυτή η αντλία νερού είναι υπεύθυνη για τη σημαντικότερη λειτουργία του αυτόνομου και αυτόματου συστήματος άρδευσης, το πότισμα του φυτού. Η συγκεκριμένη αντλία

επιλέχθηκε, διότι πληροί όλες τις προϋποθέσεις του συστήματος. Αρχικά, έχει πολύ μικρή κατανάλωση ισχύος, που συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και επιτρέπει τη μακροπρόθεσμη λειτουργία. Καθοριστικός ρόλος επιλογής της υπήρξε το γεγονός ότι έχει τη δυνατότητα να τροφοδοτηθεί με μικρές τάσεις (~3-5V) και δε χρειάζεται κάποια εναλλακτική πηγή ενέργειας, αφού μπορεί να την τροφοδοτήσει το Arduino Uno. Αυτός είναι ένας σημαντικός παράγοντας, διότι έτσι επαληθεύεται η αυτονομία του συστήματος, καθώς όλα τα υποσυστήματα θα λαμβάνουν την απαραίτητη ενέργεια από μία μπαταρία η οποία θα φορτίζεται από το φωτοβολταϊκό. Τέλος, η αντλία είναι οικονομική και προσφέρει καλή απόδοση.



Εικόνα 2.13. MICRO SUBMERSIBLE WATER PUMP DC και διαστάσεις

Η MICRO SUBMERSIBLE WATER PUMP DC είναι σχεδιασμένη για να λειτουργεί με τάση που κυμαίνεται από 3 έως 5 V, καθιστώντας τη συμβατή με διάφορες πηγές τροφοδοσίας. Στην πλευρά της κατανάλωσης, δεσμεύει περίπου 250mA ρεύματος κατά τη λειτουργία της. Η αντλία διαθέτει παροχή νερού που κυμαίνεται μεταξύ 1.2 έως 1.6 λίτρα ανά λεπτό, επαρκή για να καλύψει τις ανάγκες ενός μικρού φυτού. Τέλος, η διάρκεια ζωής της αντλίας εκτιμάται σε περίπου 500 ώρες, προσφέροντας αξιόπιστη λειτουργία και απόδοση στον χρόνο.

Για τον έλεγχο της αντλίας χρησιμοποιήθηκε το κύκλωμα της εικόνας 2.12 με τη διαφορά ότι η πύλη του transistor συνδέθηκε με το D7 pin του Arduino, η εκροή του transistor συνδέθηκε με τον ακροδέκτη GND της αντλίας και η κάθοδος της διόδου με τον ακροδέκτη Vcc της αντλίας (αντί του SG90).

2.3.5) Η Τροφοδοσία: Μπαταρία, Φωτοβολταϊκή Κυψέλη και Ηλιακός Φορτιστής

Κύρια πηγή τροφοδοσίας του αρδευτικού συστήματος αποτελεί η **Μπαταρία Λιθίου XTAR 26650** [14]. Μέσω αυτής μπορούν να λειτουργούν όλα τα υποσυστήματα και να εκτελούν τα καθήκοντά τους. Η επιλογή της συγκεκριμένης μπαταρίας για το σύστημα άρδευσης βασίστηκε σε αρκετούς κρίσιμους παράγοντες που αφορούν την απόδοση, την αξιοπιστία και τη διάρκεια ζωής της. Καταρχάς, η μεγάλη χωρητικότητα των 5200mAh εξασφαλίζει μεγάλη αυτονομία για το σύστημα, επιτρέποντάς του να λειτουργεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς την ανάγκη συνεχούς αντικατάστασης της μπαταρίας. Επιπλέον, η τάση λειτουργίας των 3.7V ταιριάζει απόλυτα με τις απαιτήσεις του συστήματος και συνδυάζεται εύκολα με τα άλλα στοιχεία του, όπως τον ηλιακό φορτιστή. Επιπρόσθετα, η μπαταρία παρέχει σχετικά σταθερή τάση εξόδου σε μικρά

ρεύματα, κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης, βοηθώντας στην αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος και έχει εκτιμώμενη διάρκεια ζωής που φτάνει τις 500 φορτίσεις/αποφορτίσεις, προσδίδοντας μακροζωία. Το κύκλωμα προστασίας της εξασφαλίζει την ασφαλή λειτουργία του συστήματος, καθώς προσφέρει προστασία από υπερφόρτιση, που αποτρέπει την υπερβολική φόρτιση της μπαταρίας, προστασία από υποφόρτιση, που αποτρέπει την αποφόρτιση της κάτω από ασφαλές επίπεδο, και την προστασία από βραχυκυκλώματα, που αποτρέπει τη ροή υψηλού ρεύματος που μπορεί να τα προκαλέσει. Τέλος, η εταιρεία XTAR έχει αποδείξει την αξία της στον χώρο των μπαταριών, προσφέροντας προϊόντα υψηλής ποιότητας, προσδίδοντας ακόμα περισσότερη εμπιστοσύνη στην επιλογή αυτή. Μαζί με την μπαταρία επιλέχθηκε και μία βάση μπαταρίας, με στόχο την καλύτερη ασφάλεια και την ευκολότερη πρόσβαση και σύνδεση των καλωδίων στους ακροδέκτες της.



Εικόνα 2.14. Μπαταρία Λιθίου XTAR 26650 και βάση

Για τη μέτρηση του ποσοστού μπαταρίας, συνδέθηκε σε σειρά με την μπαταρία, μία αντίσταση 10kΩ, τις οποίες ο ένας ακροδέκτης ήταν συνδεδεμένος με την A4 αναλογική είσοδο του Arduino Uno και ο άλλος με τον θετικό πόλο της μπαταρίας, ενώ ο αρνητικός της πόλος ήταν γειωμένος στο GND pin του Arduino. Η χρησιμότητα της αντίστασης είναι να ρυθμίζει το ρεύμα που περνά στην αναλογική είσοδο για να μην προκληθεί ζημιά. Έτσι, ο μικροελεγκτής μπορεί να μετρά την τάση της μπαταρίας και να υπολογίζει το ποσοστό μπαταρίας, βάσει ενός εξειδικευμένου αλγορίθμου.

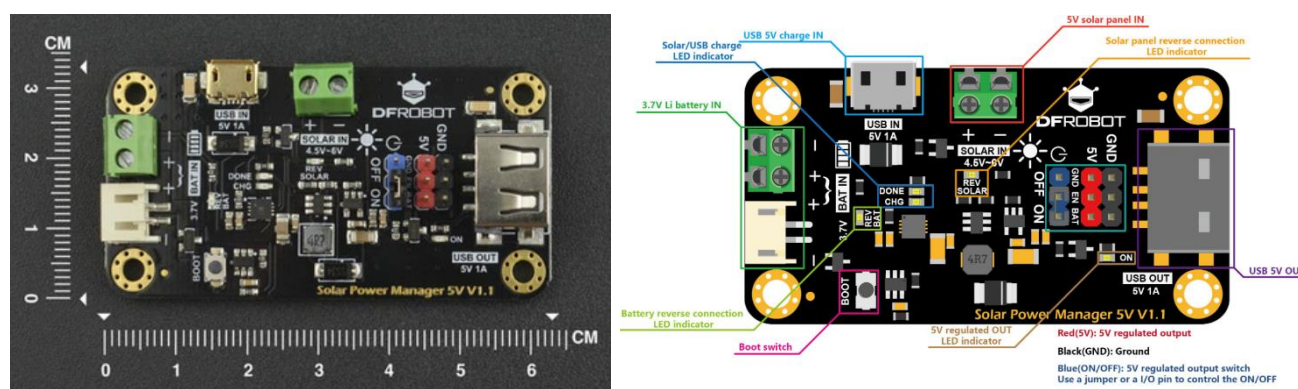
Για τη φόρτιση της μπαταρίας και την παροχή ενέργειας στο σύστημα κατά την ηλιοφάνεια χρησιμοποιήθηκε η **CNC165X135 6V 3.5Watt φωτοβολταϊκή κυψέλη** [15]. Η φωτοβολταϊκή κυψέλη CNC165X135 6V με τεχνολογία μονοκρυσταλλικού πυριτίου παρουσιάζει υψηλό ποσοστό μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Είναι εξαιρετικά αποτελεσματική σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού, διατηρώντας υψηλή απόδοση ακόμα και όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι περιορισμένη. Η επικάλυψη με εποξική ρητίνη παρέχει υψηλή διαπερατότητα στο φως, εξασφαλίζοντας την αποτελεσματική απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας. Με μέγιστη παραγόμενη τάση 6V DC και μέγιστη ένταση ρεύματος 583mA, αποτελεί ιδανική επιλογή για την παραγωγή

ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, διαθέτει υψηλής ποιότητας κατασκευή από PVC, βάρος 99g, πάχος 2mm, και διαστάσεις 135 x 165mm αποτελώντας ιδανική επιλογή για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, καθώς είναι μικρό και ελαφρύ, για να μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί στο υποσύστημα ανίχνευσης του ηλίου.



Εικόνα 2.15. Φωτοβολταϊκή κυψέλη CNC165X135 6V 3.5W

Τη μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το φωτοβολταϊκό στην μπαταρία και την τροφοδότηση του Arduino, ανέλαβε ο **DFRobot Solar Power Manager 5V** [16]. Η επιλογή του συγκεκριμένου ηλιακού φορτιστή έγινε με προσοχή και βάσει πολλών και σημαντικών λόγων. Καταρχάς, είναι σχεδιασμένος να δέχεται στην είσοδο σύνδεσης του φωτοβολταϊκού (SOLAR IN), 4.5-6V, γεγονός που το καθιστά πλήρως συμβατό με την επιλεγμένη κυψέλη. Ακόμη, προσφέρει υψηλή απόδοση μετατροπής (~86% απόδοση) της εισαγόμενης ισχύος σε 5V 1A έξοδο, ιδανική για να τροφοδοτήσει το Arduino Uno, μέσω της USB θήρας του. Επιπλέον, αυτός ο διαχειριστής ενέργειας έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί και να φορτίσει αποδοτικά (~73% απόδοση) μία εξωτερική μπαταρία 3.7V, όπως η μπαταρία λιθίου 26650 της XTAR, που επιλέχθηκε για τον εφοδιασμό του συστήματος με ενέργεια, όταν το φωτοβολταϊκό αδυνατεί. Αυτό εξασφαλίζει σταθερή παροχή ισχύος ακόμα και κατά τη νύχτα ή σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία και την αυτονομία του αρδευτικού συστήματος.



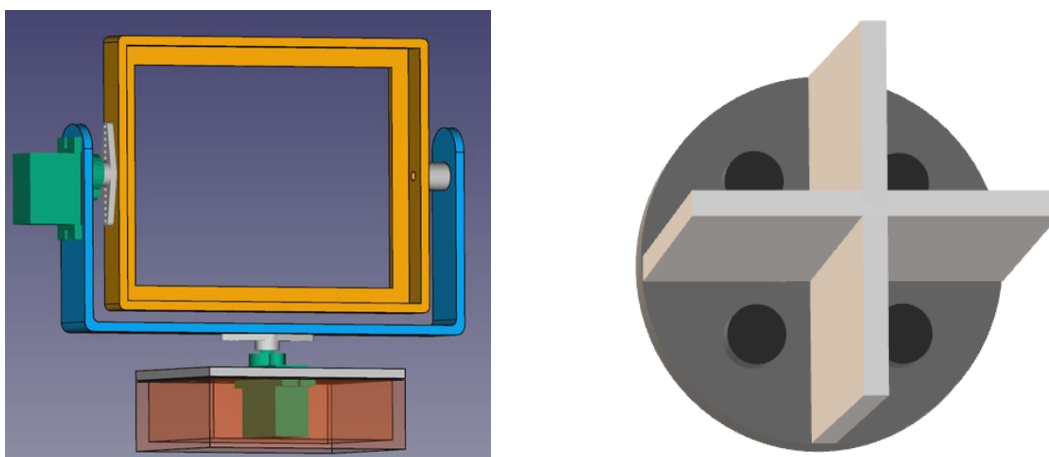
Εικόνα 2.16. DFRobot Solar Power Manager 5V διαστάσεις και pinout

Ο DFRobot Solar Power Manager 5V διαθέτει κυκλώματα προστασίας που εξασφαλίζουν τη σταθερή και ασφαλή λειτουργία του συστήματος. Τα κυκλώματα αυτά προστατεύουν την μπαταρία από υπερφόρτιση (Overcharge Protection), υποφόρτιση (Over Discharge Protection), υπερρεύματα (Over Current Protection), αντίστροφη σύνδεση (Reverse Connection Protection), ενώ την έξοδο των 5V από βραχυκύκλωμα (Short Circuit Protection) και υπερρεύματα (Over Current Protection). Η προστασία υπερφόρτισης και υποφόρτισης εξασφαλίζει την ασφαλή λειτουργία της μπαταρίας, ενώ η προστασία από υπερρεύματα και βραχυκυκλώματα προστατεύει το σύστημα από πιθανές ζημιές. Επιπλέον, η προστασία αντίστροφης σύνδεσης εμποδίζει την ανεπιθύμητη αντίστροφη σύνδεση της φωτοβολταϊκής κυψέλης και της μπαταρίας.

2.3.6) Ο Ανίχνευτής Ηλίου

Το σύστημα ανίχνευσης του ήλιου, το οποίο λειτουργεί σε δύο άξονες είναι ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό και ακριβές σύστημα. Αφού ενσωματωθεί σε αυτό μία φωτοβολταϊκή κυψέλη, την επιτρέπει να παρακολουθεί τη θέση του ηλίου σε πραγματικό χρόνο και να προσαρμόζει την κατεύθυνση της, έτσι ώστε να λαμβάνει τη μέγιστη ποσότητα φωτός και ενέργειας από τις ακτίνες του. Οι δύο αξονικές κινήσεις επιτρέπουν στην κυψέλη να ακολουθεί την πορεία του ηλίου τόσο στον ορίζοντα όσο και κάθετα σε αυτόν, διασφαλίζοντας έτσι τη μέγιστη απόδοση καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Για να επιτευχθεί αυτή η σύνθετη κίνηση του φωτοβολταϊκού κατασκευάστηκε το σύστημα ανίχνευσης της εικόνας 2.17. Αυτό απαρτίζεται από τρία διαφορετικά εξαρτήματα τα οποία είναι: η βάση της φωτοβολταϊκής κυψέλης (κίτρινο χρώμα), το υποστήριγμα αυτής της βάσης (μπλε χρώμα) και η βάση του συστήματος ανίχνευσης (πορτοκαλί χρώμα). Στη βάση του συστήματος τοποθετείται ο ένας, εκ των δύο, σερβοκινητήρας για να περιστρέφει παράλληλα στο δάπεδο το υποστήριγμα της βάσης της κυψέλης και κατά συνέπεια την ίδια την κυψέλη. Ο άλλος σερβοκινητήρας τοποθετείται στο υποστήριγμα της βάσης του φωτοβολταϊκού για να το περιστρέφει κάθετα στο δάπεδο. Η κατασκευή του συστήματος έγινε από φύλλο αλουμινίου 1mm για να περιοριστεί το βάρος του και να παραμείνει σε υψηλά επίπεδα η αντοχή του.

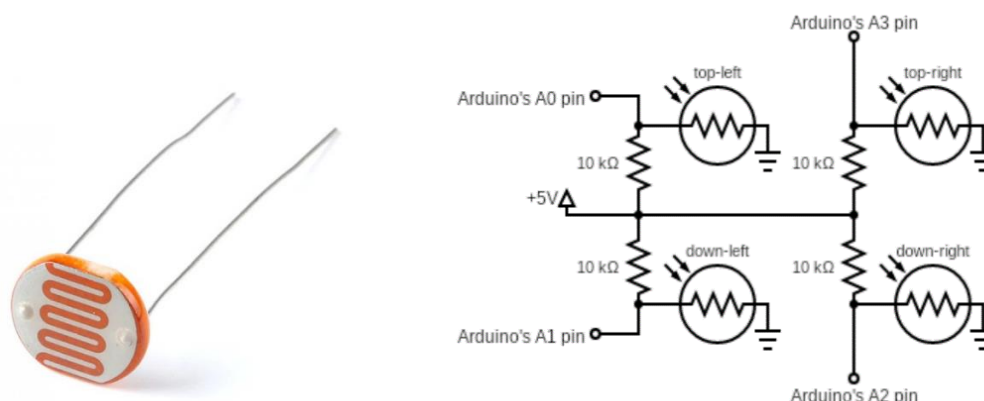


Εικόνα 2.17. Σύστημα ανίχνευσης ηλίου και σχήμα σταυρού των φωτοαντιστάσεων

Ο τρόπος με τον οποίο αναγνωρίζεται η ακριβής θέση του ήλιου είναι μέσω ενός σχήματος με 4 φωτοαντιστάσεις GL5516 5mm [17]. Οι φωτοαντιστάσεις, γνωστές και ως LDR (Light-Dependent Resistors) είναι ηλεκτρικά εξαρτήματα που αλλάζουν την αντίστασή τους ανάλογα με την ένταση του φωτός που τις περιβάλλει, καθώς περιέχουν ένα ειδικό υλικό, συνήθως έναν ημιαγωγό, ο οποίος αυξάνει την αγωγιμότητά του όταν εκτίθεται στο φως.

Η επιλογή της φωτοαντίστασης τύπου GL5516 βασίστηκε σε αρκετούς σημαντικούς λόγους. Καταρχάς, διαθέτει εξαιρετικά υψηλή ευαισθησία, επιτρέποντας την ανίχνευση ακόμη και μικρών διακυμάνσεων στον φωτισμό. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές όπου η ακρίβεια της μέτρησης είναι κρίσιμη. Επιπλέον, η εποχική επιστρωση που διαθέτει προστατεύει τον αισθητήρα από περιβαλλοντικούς παράγοντες και τον καθιστά ανθεκτικό σε υγρασία και σκόνη. Αυτό επιτρέπει τη χρήση της σε διάφορα περιβάλλοντα, χωρίς να επηρεάζεται η απόδοσή της. Ο μικρός της όγκος και οι συμπαγείς διαστάσεις την καθιστούν ευέλικτη στον σχεδιασμό και την ενσωμάτωση σε διάφορες εφαρμογές. Επιπλέον, η χαμηλή της κατανάλωση ισχύος είναι ένα ακόμη πλεονέκτημα, καθιστώντας την ενεργειακά αποδοτική. Τέλος, η φωτοαντίσταση GL5516 προσφέρει αξιόπιστη απόκριση (~30ms) και ευρύ θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας (-30 έως 70 °C), καθιστώντας την ιδανική για ένα αρδευτικό σύστημα ακόμη και σε δυσμενής συνθήκες περιβάλλοντος.

Η ιδιαίτερη διαρρύθμιση των φωτοαντιστάσεων που απεικονίζεται (με μαύρο χρώμα) στην εικόνα 2.17 τις τοποθετεί σε σχήμα σταυρού, ενώ στις 4 μεσοκαθέτους τους τοποθετούνται τοιχώματα ίσου ύψους που ενώνονται στο κέντρο. Έτσι οι τιμές που θα προκύψουν από τις 4 φωτοαντιστάσεις θα ταυτιστούν μόνο όταν δε σκιάζεται καμία από αυτές, δηλαδή όταν ο ήλιος βρίσκεται ακριβώς από πάνω από το κέντρο τους. Όταν ο ήλιος βρίσκεται εκ των δεξιών, οι δύο αριστερές φωτοαντιστάσεις, λόγω σκίασης, θα έχουν μεγαλύτερες τιμές αντίστασης από τις δύο δεξιές, ενώ όταν ο ήλιος βρίσκεται εκ των αριστερών το αντίθετο. Παρομοίως ισχύει όταν ο ήλιος βρίσκεται στο επάνω ή στο κάτω μέρος. Τοποθετώντας αυτό το σχήμα των φωτοαντιστάσεων δίπλα από τη φωτοβολταϊκή κυψέλη και πάνω στη βάση της, επιτυγχάνεται ο εντοπισμός της θέσης του ηλίου στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Εικόνα 2.18. LDR GL5516 5mm και κύκλωμα φωτοαντιστάσεων του ανιχνευτή ηλίου

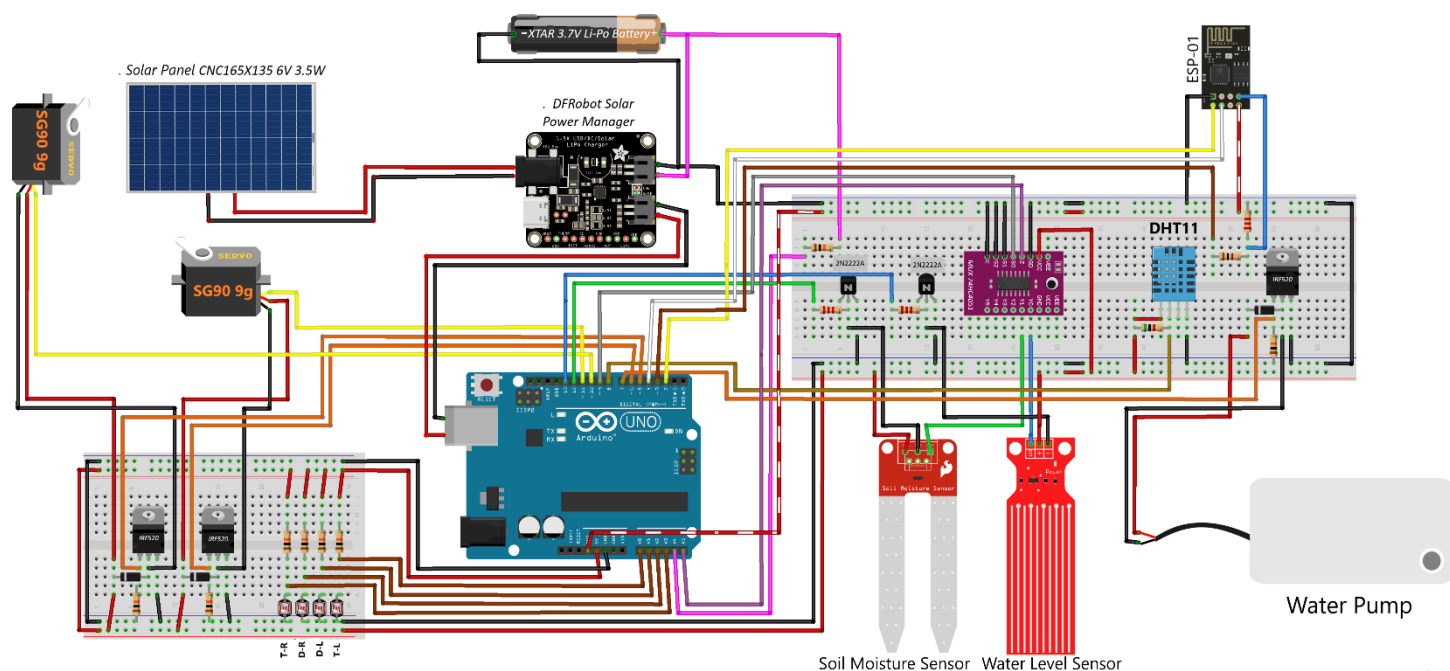
Επειδή το Arduino Uno δεν έχει τη δυνατότητα να μετρά αντιστάσεις, αλλά τάσεις μέσω των αναλογικών του εισόδων, σχεδιάστηκε το κύκλωμα της εικόνας 2.18. Έτσι μετατρέπεται η μεταβολή των τιμών των φωτοαντιστάσεων σε τιμές τάσεων, για να μπορούν να διαβαστούν από το Arduino.

Κάθε φωτοαντίσταση δεσμεύει μία αναλογική είσοδο του Arduino, για να μπορεί αυτό να συγκρίνει ταυτόχρονα και τις τέσσερις τιμές και να παίρνει τις κατάλληλες αποφάσεις σχετικά με την κίνηση του φωτοβολταϊκού. Επίσης, η κάθε φωτοαντίσταση συνυπάρχει με μία 10kΩ αντίσταση, για να πραγματοποιήσουν τη διαίρεση τάσης των 5V και να στείλουν το αποτέλεσμα στο Arduino. Πιο συγκεκριμένα, η πάνω-αριστερά φωτοαντίσταση συνδέεται με την A0 είσοδο του Arduino, η κάτω-αριστερά με την A1, η κάτω-δεξιά με την A2 και η πάνω δεξιά με την A3.

Αξίζει να σημειωθεί ότι επειδή το σχήμα σταυρού των φωτοαντιστάσεων τις τοποθετεί σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους και βρίσκεται πάνω στον ανιχνευτή ηλίου, που αποτελείται από πολλά κινούμενα μέρη, ήταν αναγκαία η προστασία από βραχυκυκλώματα μεταξύ των ακροδεκτών τους και η διασφάλιση της αντοχής των συνδέσεων. Γι' αυτό, πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις των ακροδεκτών των φωτοαντιστάσεων και των καλωδίων με κολλητήρι και καλά, ενώ έπειτα μονώθηκαν οι ενώσεις με ειδικά θερμοστελλόμενα.

2.4) Αναλυτικό σχεδιάγραμμα του συστήματος

Παρακάτω παρουσιάζεται συνολικά το αναλυτικό σχεδιάγραμμα του αυτόνομου και αυτόματου συστήματος άρδευσης και η συνδεσμολογία όλων των εξαρτημάτων που το απαρτίζουν.



Σχήμα 2.2. Αναλυτικό σχεδιάγραμμα αυτόνομου και αυτόματου συστήματος άρδευσης

Το αναλυτικό διάγραμμα του αρδευτικού συστήματος που απεικονίζεται στο σχήμα 2.2 περιλαμβάνει το Arduino Uno σαν κεντρική μονάδα επεξεργασίας το οποίο τροφοδοτείται, μέσω της 5V USB θήρας του, με ένα καλώδιο USB από τον DFRobot Solar Power Manager 5V, που κατέχει ρόλο ηλιακού φορτιστή. Στον DFRobot Solar Power Manager 5V συνδέεται ο θετικός και ο αρνητικός ακροδέκτης της φωτοβολταϊκής κυψέλης CNC165X135 6V 3.5W στις υποδοχές 'SOLAR IN +' και 'SOLAR IN -' αντίστοιχα, μέσω δύο μονόκλωνων καλωδίων για τη μεταφορά της ηλεκτρικής

ενέργειας. Ακόμη, στις υποδοχές του 'BAT IN +' και 'BAT IN -' συνδέεται ο θετικός και αρνητικός πόλος αντίστοιχα, της Μπαταρίας Λιθίου XTAR 26650.

Το Arduino παρέχει την τάση των 5V στο αριστερό breadboard και στο κάτω μέρος του δεξιού, καθώς τα συνδέει με τους ακροδέκτες του 5V και GND και την τάση των 3.3V στο πάνω μέρος του δεξιού breadboard, συνδέοντάς το με τους ακροδέκτες του 3.3V και GND, για την τροφοδοσία των κοντινών εξαρτημάτων. Ακόμη συνδέθηκε το GND pin του Arduino με τον αρνητικό πόλο της μπαταρίας, δημιουργώντας κοινή γείωση και ο θετικός πόλος της μπαταρίας συνδέθηκε μέσω μίας αντίστασης 10kΩ στο A4 ακροδέκτη του Arduino για τη σωστή μέτρηση της τάσης της μπαταρίας.

Στο διάγραμμα επίσης απεικονίζεται στα αριστερά το σύστημα ανίχνευσης του ήλιου το οποίο, πέρα από τη φωτοβολταϊκή κυψέλη, αποτελείται από τους δύο σερβοκινητήρες SG90 9g, τα δύο κυκλώματα τροφοδοσίας και προστασίας τους και το κύκλωμα των τεσσάρων φωτοαντιστάσεων. Τα κυκλώματα τροφοδοσίας των σερβοκινητήρων αναλύονται εκτενέστερα στην ενότητα 2.3.4. Καθένα από αυτά αποτελείται από ένα transistor IRF520 TO-220 N-Channel Mosfet, μία αντίσταση 10kΩ και μία chottky δίοδος 1N5819. Για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του σερβοκινητήρα που περιστρέφει κατακόρυφα την κυψέλη χρησιμοποιείται το αριστερό Mosfet του σχήματος, του οποίου η πύλη συνδέεται με τον D5 ακροδέκτη του Arduino, ενώ για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του σερβοκινητήρα που περιστρέφει οριζόντια την κυψέλη χρησιμοποιείται το δεξί Mosfet, του οποίου η πύλη συνδέεται με τον D6 ακροδέκτη του Arduino. Από την άλλη, για τον έλεγχο της θέσης του αριστερού SG90 9g συνδέθηκε το control pin του στο D10 pin του Arduino, ενώ για τον έλεγχο της θέσης του δεξιού συνδέθηκε το control pin του στο D11 pin του Arduino. Όσον αφορά στο κύκλωμα με τις φωτοαντιστάσεις, αναλύεται εκτενέστερα στην ενότητα 2.3.6. Η T-R φωτοαντίσταση είναι η πάνω-δεξιά στο σχήμα σταυρού και συνδέεται με τον A3 ακροδέκτη του Arduino, η D-R είναι η κάτω-δεξιά στο σχήμα σταυρού και συνδέεται με τον A2 ακροδέκτη του Arduino, η D-L είναι η κάτω-αριστερά στο σχήμα σταυρού και συνδέεται με τον A1 ακροδέκτη του Arduino και η T-L είναι η πάνω-αριστερά στο σχήμα σταυρού και συνδέεται με τον A0 ακροδέκτη του Arduino.

Επιπλέον, στο αναλυτικό διάγραμμα παρουσιάζονται οι αισθητήρες στάθμης νερού και υγρασίας εδάφους με τα κυκλώματα τροφοδοσίας τους, που αναλύονται εκτενέστερα στην ενότητα 2.3.3. Για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του αισθητήρα εδάφους συνδέθηκε η βάση του αριστερού 2N2222A transistor με τον D12 ακροδέκτη του Arduino, ενώ για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του αισθητήρα στάθμης νερού συνδέθηκε η βάση του δεξιού 2N2222A transistor με τον D13 ακροδέκτη. Ακόμη, απεικονίζεται ο πολυπλέκτης 74HC4051 που αναλύεται στην ενότητα 2.3.1. Αυτός επιτρέπει τη μεταφορά των δεδομένων από τους δύο αισθητήρες σε μία αναλογική είσοδο του Arduino. Αναλυτικότερα, συνδέεται ο signal ακροδέκτης του αισθητήρα στάθμης νερού στο κανάλι Y0 του πολυπλέκτη και ο A0 ακροδέκτης του αισθητήρα εδάφους στο κανάλι Y1, ενώ η έξοδος Z συνδέεται στον ακροδέκτη A5 του Arduino. Γειώνονται οι ακροδέκτες του E, S2, S1, GND και ο Vcc ακροδέκτης του συνδέεται στα 5V, ενώ για τον έλεγχο του ανοιχτού καναλιού συνδέεται το S0 pin του στο D9 pin του Arduino.

Επιπροσθέτως, στο διάγραμμα φαίνεται ο αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας DHT11, ο οποίος αναλύεται στην ενότητα 2.3.3. Οι Vcc και GND ακροδέκτες του συνδέονται αντίστοιχα στα 5V και GND pins του breadboard, ενώ ο DATA ακροδέκτης του συνδέεται στο D8 pin του Arduino.

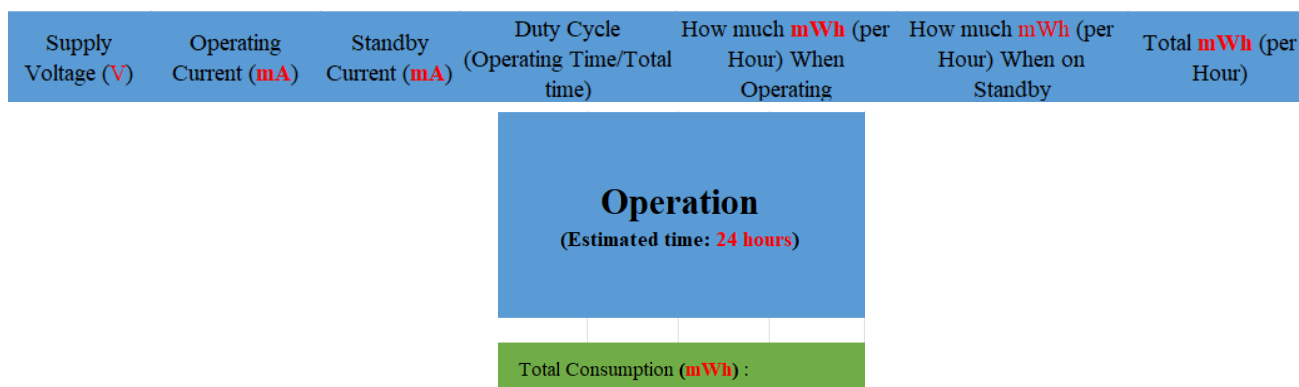
Ακόμη, κάτω αριστερά απεικονίζεται η αντλία νερού με το κύκλωμα προστασίας και τροφοδοσίας της, που αναλύεται στην ενότητα 2.3.4. Οι Vcc και GND ακροδέκτες της συνδέονται αντίστοιχα στα 5V και GND pins του breadboard, ενώ για τον έλεγχο της συνδέεται η πύλη του IRF520 Mosfet στο D8 pin του Arduino.

Τέλος, πάνω αριστερά στο διάγραμμα φαίνεται το ESP-01 WiFi Module το οποίο αναλύεται διεξοδικά στην ενότητα 2.3.2. Οι Vcc και GND ακροδέκτες του συνδέονται αντίστοιχα στα 3.3V και GND pins του breadboard, το CH_PD pin του συνδέθηκε στο D4 pin του Arduino, το URXD pin του συνδέθηκε στο D3 pin του Arduino μέσω του κυκλώματος διαίρεσης τάσης και το UTXD pin του συνδέθηκε στο D2 pin του Arduino.

2.5) Θεωρητικός ενεργειακός προϋπολογισμός

Προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή και αξιόπιστη λειτουργία του αυτόματου και αυτόνομου αρδευτικού συστήματος είναι σημαντικό να προσδιοριστούν τα ποσά ενέργειας τα οποία αναμένεται να καταναλωθούν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Για αυτό πραγματοποιήθηκε ένας θεωρητικός ενεργειακός προϋπολογισμός που συμπεριλαμβάνει όλα τα βασικά εξαρτήματα που καταναλώνουν τα σημαντικότερα ποσά ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο, σιγουρεύεται ότι η επιλεγμένη τροφοδοσία θα είναι επαρκής για να διασφαλίσει την αυτονομία του συστήματος.

Ο τρόπος με τον οποίον υπολογίζεται η ενέργεια που καταναλώνει το κάθε εξάρτημα. Τα περισσότερα εξαρτήματα έχουν δύο βασικά ρεύματα, το ρεύμα λειτουργίας και το ρεύμα αναμονής. Το ρεύμα λειτουργίας είναι το ρεύμα το οποίο χρησιμοποιεί ένα εξάρτημα όταν κάνει τη δουλειά την οποία σχεδιάστηκε να κάνει, π.χ. ο αισθητήρας εδάφους να παίρνει τη μέτρηση της υγρασίας του εδάφους και να τη μεταφέρει στον μικροελεγκτή. Όταν το εξάρτημα δε βρίσκεται σε αυτή τη διαδικασία αλλά περιμένει την εντολή από τον μικροελεγκτή για να πάρει την επόμενη μέτρηση τότε χρησιμοποιεί το ρεύμα αναμονής, το οποίο είναι συνήθως μικρότερο από το ρεύμα λειτουργίας. Αν διαιρέσουμε το χρόνο που λειτουργεί το κάθε εξάρτημα με το ρεύμα λειτουργίας, με τον συνολικό χρόνο, προκύπτει ένα ποσοστό το οποίο ονομάζεται duty cycle.



Εικόνα 2.19. Τρόπος υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας

Για να γίνουν λοιπόν οι απαραίτητοι υπολογισμοί για την κατανάλωση ενέργειας του κάθε εξαρτήματος χρησιμοποιήθηκαν οι συγκεκριμένες στήλες. Αρχικά χρειαζόμαστε την τάση τροφοδοσίας του κάθε εξαρτήματος καθώς και τα προαναφερθέντα ρεύματα λειτουργίας και

αναμονής. Αυτές οι πληροφορίες αντλήθηκαν από τα αναλυτικά datasheet του κάθε εξαρτήματος, που γράφονται από τον κατασκευαστή και προκύπτουν μετά από πολλές δοκιμές προκειμένου να είναι αξιόπιστα. Έπειτα υπολογίζεται το duty cycle του κάθε εξαρτήματος κάτι που διαφέρει από φάση σε φάση και εξαρτάται από τη δομή του κώδικα. Η επόμενη (πέμπτη) στήλη υπολογίζει σε mWh, την ενέργεια που καταναλώνει ανά ώρα το κάθε εξάρτημα όταν λειτουργεί με το ρεύμα λειτουργίας, πολλαπλασιάζοντας το ρεύμα λειτουργίας με την τάση και μετά με το duty cycle. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται και για την επόμενη (έκτη) στήλη, που υπολογίζει την ενέργεια που καταναλώνει ένα εξάρτημα στην αναμονή πολλαπλασιάζοντας αυτή τη φορά το ρεύμα αναμονής, με την τάση και το $1 - \text{duty cycle}$, δηλαδή το ποσοστό του χρόνου που λειτουργεί στην αναμονή. Έπειτα, προστίθενται οι ενέργειες που καταναλώνονται από ένα εξάρτημα στην αναμονή και στην κανονική λειτουργία και προκύπτει η τελευταία στήλη, δηλαδή η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται ανά ώρα λειτουργίας. Τέλος, προστίθενται οι συνολικές ενέργειες κατανάλωσης όλων των εξαρτημάτων ανά ώρα και το άθροισμα πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό 24, για να προκύψει η ημερήσια κατανάλωση όλου του συστήματος.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε ο θεωρητικός ενεργειακός προϋπολογισμός των εξαρτημάτων, χωρίς τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας.

Πίνακας 2.2. Θεωρητικός ενεργειακός προϋπολογισμός, χωρίς τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας

Part Name	Supply Voltage (V)	Operating Current (mA)	Standby Current (mA)	Duty Cycle (Operating Time/Total time)	How much mWh (per Hour) When Operating	How much mWh (per Hour) When on Standby	Total mWh (per Hour)	Operation (Estimated time: 24 hours)
1 × Arduino Uno R3	5	35	10	100%	175,00	0,00	175,00	
1 × DFRobot Solar Power Manager 5V	5	29,26	1	100%	146,30	0,00	146,30	
1 × USB Small Water Pump with Cable	5	300	10	0,7% (1)	10,50	49,65	60,15	
2 × SG90 servo motor	5	200	40	0,34% (2)	3,40	199,32	202,72	
1 × ESP8266 WiFi Module	3,3	80	80	1,7% (3)	4,48	259,51	263,99	
1 × Water Level Sensor	5	20	20	1,7% (3)	1,70	98,30	100,00	
1 × Soil Moisture Detection Module	5	35	35	1,7% (3)	2,98	172,03	175,00	
1 × Multiplexer 74HC4051	5	5	0,005	100%	25	0	25	
1 × Temp & Humid Sensor DHT11	5	1	0	100%	5,00	0,00	5,00	
							Total Consumption (mWh):	27675,84

Power Supply	Output Voltage (V)	Output power mWh	(1): 10 × 1 min a day (2): 144 (every 10 min) × 2 sec a day (3): 144 (every 10 min) × 10 sec a day (4): 19,200 to 25,600 mWh of energy per day in Greece during the summer and 9,600 to 12,800 mWh during the winter months from this panel giving the average value of 16800 mWh
1 × Battery 26650 3.7V 5.2Ah	3,7	19240	
1 × Solar Panel 3.5W	6	16800 (4)	

Total consumption: 27676 mWh Supplied Energy: 19240 mWh (By fully charged battery) 16800 mWh (By solar panel)
--

Υποθέτοντας προσεγγιστικά ότι η αντλία νερού λειτουργεί 10 φορές από 1 λεπτό τη φορά ανά την ημέρα, οι σερβοκινητήρες λειτουργούν κάθε 10 λεπτά για 2 δευτερόλεπτα την ημέρα, το WiFi Module, ο αισθητήρας εδάφους και ο αισθητήρας στάθμης νερού λειτουργούν κάθε 10 λεπτά για 10 δευτερόλεπτα τη μέρα, το Arduino Uno, ο ηλιακός φορτιστής, ο πολυπλέκτης και ο αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας λειτουργούν συνεχόμενα, προκύπτουν οι αντίστοιχοι κύκλοι λειτουργίας (Duty Cycles) και η συνολική ημερήσια κατανάλωση των 27676 mWh. Ακόμη θεωρήθηκε ότι η μπαταρία αποδίδει τα βέλτιστα 19240 mWh και η φωτοβολταϊκή κυψέλη 16800 mWh κατά μέσο όρο ημερησίως. Από τα αποτελέσματα αυτά είναι φανερό ότι χρειάζεται να εφαρμοστούν τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας, καθώς σε μία όχι τόσο φωτεινή μέρα το

φωτοβολταϊκό θα παρήγαγε πολύ λιγότερη ενέργεια και η μπαταρία δε θα ήταν ικανή να καλύψει τις ανάγκες του συστήματος.

Έτσι πραγματοποιήθηκε ο θεωρητικός ενεργειακός προϋπολογισμός των εξαρτημάτων, με τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας.

Πίνακας 2.3. Θεωρητικός ενεργειακός προϋπολογισμός, με τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας

Part Name	Supply Voltage(V)	Operating Current (mA)	Standby Current (mA)	Duty Cycle (Operating Time/Total time)	How much mWh (per Hour) When Operating	How much mWh (per Hour) When on Standby	Total mWh (per Hour)	Operation (Estimated time: 24 hours)
1 × Arduino Uno R3	5	35	10	100%	175,00	0,00	175,00	
1 × DFRobot Solar Power Manager 5V	5	9.5	1	100%	48,83	0,00	48,83	
1 × USB Small Water Pump with Cable	5	300	0	0,7% (1)	10,50	0,00	10,50	
2 × SG90 servo motor	5	200	0	0,34% (2)	3,40	0,00	3,40	
1 × ESP8266 WiFi Module	3.3	80	15	1,7% (3)	4,48	48,66	53,14	
1 × Water Level Sensor	5	20	0	1,7% (3)	1,70	0,00	1,70	
1 × Soil Moisture Detection Module	5	35	0	1,7% (3)	2,98	0,00	2,98	
1 × Multiplexer 74HC4051	5	5	0,005	100%	25	0	25	
1 × Temp & Humid Sensor DHT11	5	1	0	100%	5,00	0,00	5,00	
Total Consumption (mWh) :								7813,20
Power Supply	Output Voltage(V)	Output power mWh	(1):10 × 1 min a day (2):144 (every 10 min) × 2 sec a day (3):144 (every 10 min) × 10 sec a day (4):19,200 to 25,600 mWh of energy per day in Greece during the summer and 9,600 to 12,800 mWh during the winter months from this panel giving the avarage value of 16800 mWh					
1 × Battery 26650 3.7V 5.2Ah	3,7	19240						
1 × Solar Panel 3.5W	6	16800 (4)						
			Total consumption: 7813 mWh Supplied Energy: 19240 mWh (By fully charged battery) 16800 mWh (By solar panel)					

Λαμβάνοντας τις ίδιες ακριβώς υποθέσεις με πριν, αλλά μειώνοντας κατά πολύ τα ρεύματα αναμονής των σερβοκινητήρων, της αντλίας νερού, του WiFi Module και των αισθητήρων εδάφους και στάθμης νερού επιτεύχθηκε η ραγδαία μείωση της ημερήσιας κατανάλωσης του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, υπήρξε 71,8% μείωση στην κατανάλωση ενέργειας, καταναλώνοντας μόνο 7813 mWh ημερησίως. Έτσι το σύστημα έχει αυτονομία περίπου 2,5 μέρες μόνο από την μπαταρία, ενώ η φωτοβολταϊκή κυψέλη, με μέση ηλιοφάνεια, θα μπορεί να αναπληρώσει το ποσό που αποφορτίστηκε κατά τη διάρκεια της νύχτας (~3600 mWh), σε περίπου 2 ώρες.

Ο θεωρητικός ενεργειακός προϋπολογισμός με τη χρήση τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας που πραγματοποιήθηκε δίνει μια πρώτη θεωρητική επιβεβαίωση ότι το σύστημα που σχεδιάστηκε θα έχει τη δυνατότητα της συνεχόμενης τροφοδοσίας, ώστε να είναι αξιόπιστο. Προχωρώντας στα επόμενα στάδια της κατασκευής του συστήματος, θα πραγματοποιηθεί και αντίστοιχο πείραμα για να επιβεβαιωθούν και πρακτικά οι παραπάνω υπολογισμοί.

3ο κεφάλαιο: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να λειτουργήσει η ολοκληρωμένη διάταξη του αυτόνομου και αυτόματου αρδευτικού συστήματος, όσον αφορά τον προγραμματισμό του ATmega328P, τον επεξεργαστή δηλαδή του Arduino Uno R3. Ο κώδικας που απαιτείται για να γίνουν όλες οι απαραίτητες λειτουργίες είναι μεγάλος και περίπλοκος. Για να γίνει εύκολα κατανοητός από τον αναγνώστη, δε δίνεται τόσο βάση στις τεχνικές λεπτομέρειες του κώδικα, όσο στη λογική που ακολουθείται προκειμένου αυτός να λειτουργήσει.

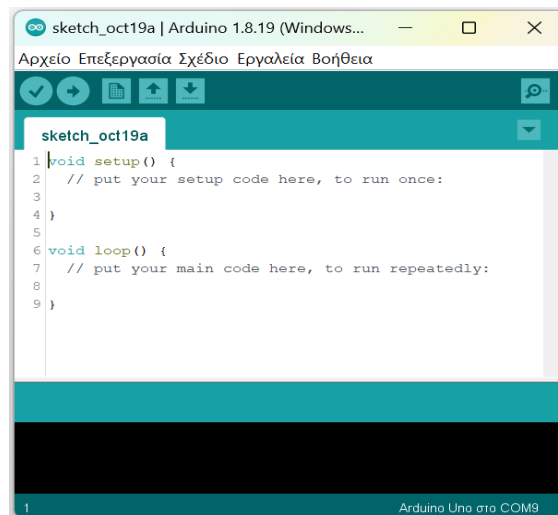
Αρχικά, αφού παρουσιαστούν οι αρχικές ρυθμίσεις του Arduino Uno και της πλατφόρμας προγραμματισμού του, αναλύεται η εφαρμογή που χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με το WiFi Module ESP-01, για τον απομακρυσμένο έλεγχο του συστήματος από τον χρήστη. Στη συνέχεια αναφέρονται οι διάφορες καταστάσεις του συστήματος και εξηγείται συνοπτικά η λειτουργία έκαστης. Ακόμη, αναλύονται οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε κατάσταση του συστήματος για να συμβάλουν στην ομαλή λειτουργία. Τέλος, αφού γίνει κατανοητό πως είναι εφικτή η λειτουργία της κάθε κατάστασης, αναλύεται ο χρονισμός τους στον κύριο κώδικα, ώστε το Arduino να εκτελεί τις επιθυμητές ενέργειες παίρνοντας τις σωστές αποφάσεις. Ο κώδικας του project μπορεί να βρεθεί [εδώ](#).

3.1) Arduino IDE και αρχικές ρυθμίσεις

Το Arduino IDE είναι ένα καινοτόμο περιβάλλον ανάπτυξης που έχει επαναπροσδιορίσει τον τρόπο προγραμματισμού των μικροελεγκτών. Σχεδιασμένο ειδικά για την πλακέτα Arduino, το IDE ανοίγει τον κόσμο της ηλεκτρονικής ανάπτυξης σε όλους, από αρχάριους προγραμματιστές μέχρι προχωρημένους μηχανικούς. Με τον χρήσιμο συντακτικό έλεγχο, τον εύχρηστο διαχειριστή βιβλιοθηκών και πολλά παραδείγματα κώδικα, το Arduino IDE καθιστά τον προγραμματισμό των μικροελεγκτών Arduino εύκολο και διασκεδαστικό. Είναι ένα ιδανικό εργαλείο για τη δημιουργία ευφυών συσκευών και την εξερεύνηση της ηλεκτρονικής ανάπτυξης [18].

Το περιβάλλον ανάπτυξης Arduino περιέχει ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου, για τη σύνταξη του κώδικα, μια περιοχή στην οποία εμφανίζονται μηνύματα, μία κονσόλα κειμένου και μια γραμμή εργαλείων υπό μορφή κουμπιών. Συνδέεται με το hardware μέρος του Arduino για να φορτώσει προγράμματα και να επικοινωνεί μαζί τους. Ο κώδικας που έχει γραφεί για το Arduino ονομάζεται sketch. Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζονται τα εργαλεία του περιβάλλοντος ανάπτυξης, υπό μορφή κουμπιών και το ίδιο το περιβάλλον.

Το Arduino IDE παρέχει ένα πρακτικό περιβάλλον για τη συγγραφή των προγραμμάτων, με συντακτική χρωματική σήμανση, πολλές έτοιμες βιβλιοθήκες και τον compiler για τη μεταγλώττιση των sketch. Ακόμη διαθέτει μία σειριακή οθόνη (serial monitor) που παρακολουθεί τις επικοινωνίες της σειριακής (USB), αναλαμβάνει να στείλει αλφαριθμητικά στο Arduino μέσω αυτής και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την αποσφαλμάτωση των sketch. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα να αλλάξει ο ρυθμός μετάδοσης της πληροφορίας (baud rate) στη σειριακή οθόνη ανάλογα με τις ανάγκες του προγράμματος.



	Verify	Ελέγχει για συντακτικά λάθη στον κώδικα.
	Upload	Μεταγλωττίζει τον κώδικα και τον φορτώνει στο Arduino.
	New	Δημιουργεί ένα νέο sketch.
	Open	Παραθέτει ένα μενού με όλα τα sketch. Κάνοντας κλικ σε ένα από αυτά, θα ανοίξει αυτόματα στο τρέχον παράθυρο.
	Save	Αποθηκεύει ένα sketch.
	Serial Monitor	Ανοίγει την σειριακή οθόνη.

Εικόνα 3.1. Περιβάλλον Arduino IDE και εργαλεία υπό τη μορφή κουμπιών

Η γλώσσα του Arduino βασίζεται στη γλώσσα Wiring, μια παραλλαγή C/C++ για μικροελεγκτές αρχιτεκτονικής AVR όπως ο ATmega, και υποστηρίζει όλες τις βασικές δομές της C καθώς και μερικά χαρακτηριστικά της C++. Για compiler χρησιμοποιείται ο AVR gcc και ως βασική βιβλιοθήκη C χρησιμοποιείται η AVR libc. Λόγω της καταγωγής της από τη C, στη γλώσσα του Arduino, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ουσιαστικά οι ίδιες βασικές εντολές και συναρτήσεις, με την ίδια σύνταξη, τους ίδιους τύπων δεδομένων και τους ίδιους τελεστές όπως και στη C. Πέρα από αυτές όμως, υπάρχουν κάποιες ειδικές εντολές, συναρτήσεις και σταθερές που βοηθούν για τη διαχείριση του ειδικού hardware του Arduino. Τα προγράμματα του Arduino διαίρονται σε τρία μέρη: δομή (structure), τιμές (values) και συναρτήσεις (functions). Από την άλλη, η δομή των προγραμμάτων αποτελείται από τη δήλωση των μεταβλητών και βιβλιοθηκών, τη συνάρτηση setup που περιέχει τη δήλωση λειτουργιών που ισχύουν για όλο το πρόγραμμα και δεν επαναλαμβάνονται και τη συνάρτηση loop που περιέχει τη δήλωση των λειτουργιών που επαναλαμβάνονται κατά τη λειτουργία του προγράμματος.

Η σύνδεση του Arduino Uno r3 στο Arduino IDE είναι μία απλή και εύκολη διαδικασία. Αρχικά, χρειάζεται να πραγματοποιηθεί η λήψη της εφαρμογής από την επίσημη ιστοσελίδα του Arduino. Στη συνέχεια γίνεται σύζευξη του Arduino Uno με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω ενός καλωδίου USB A σε B. Κατόπιν, αφού ανοίξει η εφαρμογή, γίνεται η επιλογή της πλακέτας που θα προγραμματιστεί, από τα εργαλεία που βρίσκονται στο menu. Από εκεί γίνεται και η επιλογή της θήρας που είναι συνδεδεμένο το Arduino. Τέλος, δημιουργώντας ένα νέο sketch και προβαίνοντας στην προγραμματιστική διαδικασία, πραγματοποιείται εύκολα το ανέβασμα του προγράμματος και το αποτέλεσμά του πάνω στην πλακέτα.

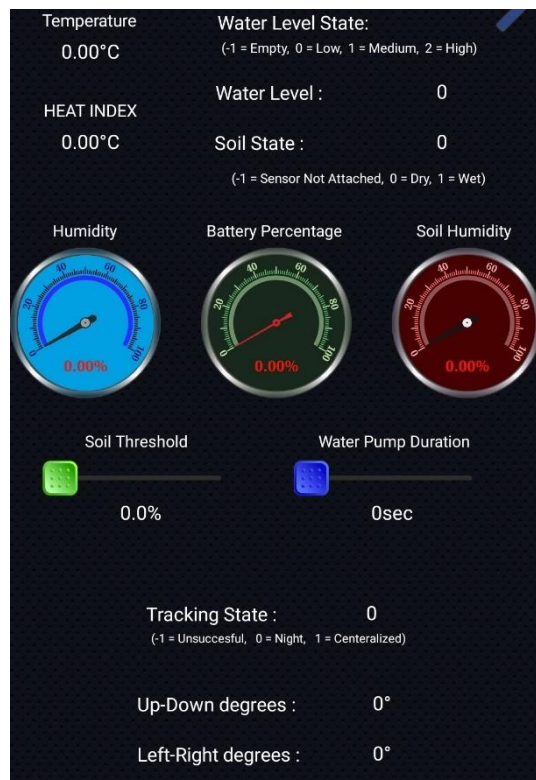
3.2) Εφαρμογή Virtuino 6

Για να επιτευχθεί ο απομακρυσμένος έλεγχος του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή Virtuino 6 [19]. Η εφαρμογή αυτή είναι μια IoT πλατφόρμα διεπαφής χρηστών (HMI), που επιτρέπει τον έλεγχο διάφορων συσκευών και συστημάτων από το smartphone ή το tablet. Στο συγκεκριμένο σύστημα η εφαρμογή αλληλεπιδρά με το Arduino Uno R3, μέσω του ESP-01 WiFi module. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ της εφαρμογής Virtuino 6 και του ESP-01 είναι το TCP/IP.

Το πρωτόκολλο TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) αποτελεί τη βάση του Διαδικτύου και των δικτύων υπολογιστών. Πρόκειται για ένα σύνολο κανόνων που διασφαλίζουν την αξιόπιστη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ συσκευών σε ένα δίκτυο. Το πρωτόκολλο TCP είναι υπεύθυνο για την αξιόπιστη και σειριακή μετάδοση δεδομένων, ενώ το πρωτόκολλο IP διαχειρίζεται τη διευθυνσιοδότηση και τη δρομολόγηση των πακέτων σε ένα δίκτυο. Μέσω του TCP/IP, οι συσκευές μπορούν να επικοινωνούν σε παγκόσμιο επίπεδο, επιτρέποντας τη μετάδοση δεδομένων από έναν υπολογιστή σε άλλον σε οποιαδήποτε γωνιά του κόσμου. Η αξιόπιστη φύση του TCP/IP το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές όπως η ηλεκτρονική αλληλογραφία, η περιήγηση στο Διαδίκτυο, οι φωνητικές κλήσεις μέσω IP (VoIP), και πολλές άλλες που απαιτούν αξιόπιστη και παγκόσμια δικτύωση. Επιπλέον, το TCP/IP αποτελεί τη βάση του Internet of Things (IoT), επιτρέποντας τη σύνδεση και τον έλεγχο διάφορων συσκευών στο Διαδίκτυο.

Για να διασφαλιστεί η επικοινωνία μεταξύ της εφαρμογής Virtuino 6 και του ESP-01 είναι αναγκαίος ο έλεγχος του firmware του WiFi module, όσον αφορά στη συμβατότητα του. Το ESP-01 που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο σύστημα διέθετε παρωχημένο firmware, με αποτέλεσμα να μην είναι συμβατό με την εφαρμογή και να μην επιτυγχάνεται η επικοινωνία. Γι' αυτό το λόγο αναβαθμίστηκε στο πιο πρόσφατο. Ακόμη, είναι απαραίτητη η αλλαγή του baud rate του ESP-01 σε 9600 bps, καθώς η επικοινωνία στην προκαθορισμένη ταχύτητα (11520 bps) δεν υποστηρίζεται ορθά.

Με το άνοιγμα της εφαρμογής και αφού συνδεθεί το smartphone/tablet στο τοπικό δίκτυο WiFi, προστίθεται στην εφαρμογή ο Web Server Arduino Board. Έπειτα, επιλέγεται η προκαθορισμένη διεύθυνση IP και ρυθμίζεται, έτσι ώστε να έχει την πρώτη τριάδα αριθμών ίδια με την IP του router. Κατόπιν, αφού ελεγχθεί η σύνδεση, εμφανίζεται η κεντρική οθόνη, μέσω της οποίας πραγματοποιείται η ρύθμιση των εισόδων του συστήματος από το χρήστη, ενώ γίνονται ορατά και τα δεδομένα που στέλνει το αρδευτικό σύστημα. Για να συμβεί αυτό, πρέπει πρώτα να τοποθετηθούν τα κατάλληλα widget στην κεντρική οθόνη και να συνδεθούν με κάποιους εικονικούς ακροδέκτες (Virtual pins) στις αντίστοιχες μεταβλητές. Τα widgets που χρησιμοποιήθηκαν χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες με βάση την εμφάνισή τους. Αυτές είναι: τα widgets με τη μορφή οθόνης (value display), αυτά με τη μορφή αναλογικού μετρητή (analog instrument) και αυτά με τη μορφή ρυθμιστή μέσω ολίσθησης (slider). Η κεντρική οθόνη του Virtuino 6, στα πλαίσια του αρδευτικού συστήματος, φαίνεται στην εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2. Κεντρική οθόνη εφαρμογής Virtuino 6

Οι μεταβλητές που εμφανίζονται στην εφαρμογή υπό τη μορφή value display είναι: η θερμοκρασία του αέρα (Temperature) και ο δείκτης θερμοκρασίας (HEAT INDEX), με ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων, η ακέραια τιμή της στάθμης νερού της δεξαμενής (Water Level Value), η κατάσταση της στάθμης του νερού της δεξαμενής (Water Level) σε τέσσερις ζώνες (-1=Empty, 0=Low, 1=Medium, 2=High), η κατάσταση του εδάφους όσον αφορά την υγρασία (Soil State) σε τρεις ζώνες (-1=Sensor not attached, 0=Dry, 1=Wet), η κατάσταση του ανιχνευτή ηλίου (Tracking State) σε τρεις ζώνες (-1= Unsuccessful tracking, 0=Night position, 1=Centralized), η θέση του φωτοβολταϊκού στον κατακόρυφο άξονα (Up-Down degrees) και η θέση το φωτοβολταϊκού στον οριζόντιο άξονα (Left-Right degrees) σε μοίρες, με Up-Down degrees=90° και Left-Right degrees=90° να είναι παράλληλο στον ορίζοντα. Ακόμη, υπό τη μορφή value display είναι ορατές οι μεταβλητές: του όριο του ποσοστού υγρασίας εδάφους (Soil Threshold) και της διάρκειας λειτουργίας της αντλίας (Water Pump Duration), οι οποίες ανανεώνονται βάσει των εισόδων του χρήστη από τους ρυθμιστές ολίσθησης (Sliders).

Οι μεταβλητές που εμφανίζονται στην κεντρική οθόνη της εφαρμογής με τη μορφή analog instrument είναι: η το ποσοστό υγρασίας του αέρα (Humidity), το ποσοστό της μπαταρίας (Battery Percentage) και το ποσοστό υγρασίας του εδάφους (Soil Humidity), με ελάχιστη και μέγιστη τιμή 0 και 100 αντίστοιχα.

Οι μεταβλητές που ρυθμίζονται από τους ρυθμιστές ολίσθησης είναι: το όριο του ποσοστού υγρασίας του εδάφους (Soil Threshold), κάτω από το οποίο το έδαφος θεωρείται ξηρό, το οποίο μπορεί να λάβει ακέραιες τιμές από 0 έως 100% και η διάρκεια λειτουργίας της αντλίας σε δευτερόλεπτα (Water Pump Duration), η οποία μπορεί να πάρει ακέραιες τιμές από 0 έως 20 sec.

3.3) Καταστάσεις συστήματος

Το αυτόνομο και αυτόματο σύστημα άρδευσης, αφού ρυθμιστεί κατάλληλα κατά την αρχικοποίηση, λειτουργεί επαναλαμβανόμενα σε πέντε βασικές καταστάσεις για να εκτελέσει τη διαδικασία άρδευσης. Αυτές οι καταστάσεις είναι: η ανίχνευση του ήλιου, η λήψη των διάφορων μετρήσεων από τους αισθητήρες, η αποστολή των μετρήσεων στην εφαρμογή απομακρυσμένου ελέγχου, το πότισμα και η αναμονή.

Κατά την **αρχικοποίηση του συστήματος (Setup)**, το Arduino ρυθμίζει την αρχική θέση του φωτοβολταϊκού, λαμβάνει τις πρώτες μετρήσεις από τους αισθητήρες και συνδέεται στο διαδίκτυο. Στη συνέχεια έχει τη δυνατότητα να λάβει ως είσοδο από τον χρήστη το ποσοστό υγρασίας που θέλει να διατηρηθεί το έδαφος του φυτού και τον χρόνο που να διαρκεί η αντλία κατά το πότισμα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής απομακρυσμένου ελέγχου. Κατόπιν, στέλνει τα δεδομένα στην εφαρμογή και ανανεώνει τις εισόδους του χρήστη και επιλέγει αν θα πραγματοποιηθεί το πρώτο πότισμα. Αυτή η διαδικασία επιβεβαιώνει την ορθή λειτουργία των εξαρτημάτων κατά την αρχικοποίηση, ώστε να γίνει η μετάβαση στην κανονική λειτουργία του συστήματος.

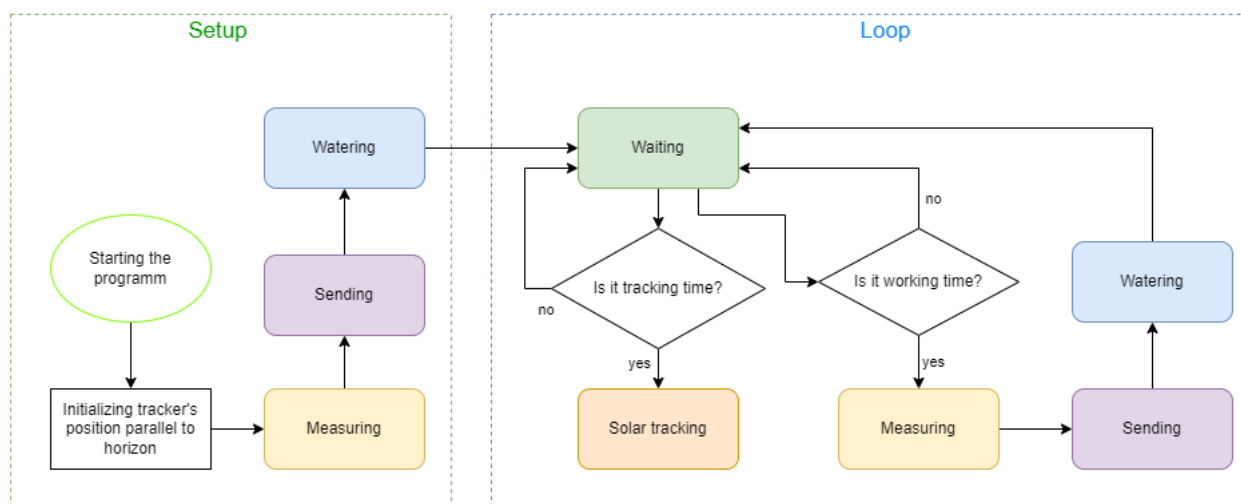
Όσον αφορά στην **ανίχνευση του ήλιου (Solar Tracking State)**, ο επεξεργαστής είναι υπεύθυνος να στρέψει τη φωτοβολταϊκή κυψέλη προς τον ήλιο με τη βοήθεια του συστήματος ανίχνευσης και να αποθηκεύσει τα απαραίτητα δεδομένα αυτής της κατάστασης στη μνήμη. Αυτό γίνεται προσαρμόζοντας τις εξόδους του (σερβοκινητήρες) ανάλογα με τις εισόδους του (φωτοαντιστάσεις). Έτσι, κατ' εξακολούθηση το Arduino πρέπει να πετυχαίνει τον σκοπό αυτής της κατάστασης, μέσα σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα.

Για τη **λήψη των μετρήσεων (Measuring State)**, ο επεξεργαστής λαμβάνει τα δεδομένα όχι μόνο από τους τρεις αισθητήρες (Water Level Sensor, Soil Humidity Sensor, DHT11) αλλά και από τον θετικό πόλο της μπαταρίας για να μετρηθεί το ποσοστό της. Ακόμη, αποθηκεύει τα λαμβανόμενα δεδομένα και τα ανανεώνει για μετέπειτα σημαντικούς υπολογισμούς.

Κατά την **αποστολή των μετρήσεων (Sending State)**, η μονάδα επεξεργασίας, με τη βοήθεια του ESP-01, επιτυγχάνει την αξιόπιστη σύνδεση στο διαδίκτυο μέσω WiFi. Κατόπιν, συνδέεται με την εφαρμογή απομακρυσμένου ελέγχου, λαμβάνει τις εισόδους από τον χρήστη και στέλνει τα απαραίτητα δεδομένα που έχουν αποθηκευτεί, για να γίνουν ορατά στον χρήστη.

Όσον αφορά στο **πότισμα (Watering State)**, το Arduino αφού έχει πρώτα λάβει τις απαραίτητες μετρήσεις, αποφασίζει, ανά επαναλαμβανόμενα χρονικά διαστήματα, αν θα πραγματοποιηθεί το πότισμα του φυτού ή όχι. Στην πρώτη περίπτωση αναλαμβάνει την ενεργοποίηση της αντλίας, τη λειτουργία της για καθορισμένο χρόνο, βάσει της εισόδου του χρήστη, και την απενεργοποίησή της.

Κατά την **αναμονή (Waiting State)**, το σύστημα περιμένει μέχρι να βρεθεί στην επόμενη κατάσταση, καταναλώνοντας όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια για να επεκταθεί η διάρκεια λειτουργίας του.



Σχήμα 3.1. Γενικό διάγραμμα ροής

Στο σχήμα 3.1 απεικονίζεται το γενικό διάγραμμα ροής του αυτόματου και αυτόνομου συστήματος άρδευσης και η εναλλαγή των καταστάσεων του. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι στην αριστερή πλευρά του διαγράμματος λαμβάνει χώρα η αρχικοποίηση του συστήματος, ο κώδικας της οποίας βρίσκεται μέσα στη συνάρτηση setup. Αφού το σύστημα ολοκληρώσει την αρχικοποίησή του, δηλαδή αφού βγει από τη συνάρτηση setup, προχωρά στην επαναλαμβανόμενη λειτουργία του, ο κώδικας της οποίας βρίσκεται στη συνάρτηση loop, στη δεξιά πλευρά του γενικού διαγράμματος ροής. Αυτή η επαναλαμβανόμενη λειτουργία αποτελεί την κύρια λειτουργία του συστήματος.

Η λειτουργία του βρόχου (loop) του αρδευτικού συστήματος χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τις συνθήκες που το αναγκάζουν να εξέλθει από την κατάσταση αναμονής. Αυτές οι λειτουργίες είναι: η λειτουργία ανίχνευσης (Tracking Operation), που ταυτίζεται με την κατάσταση ανίχνευσης (Tracking State) και η λειτουργία εργασίας (Working Operation), η οποία αποτελείται κατά σειρά από τις καταστάσεις: λήψη μετρήσεων (Measuring State), αποστολή και λήψη (Sending State) και πότισμα (Watering State). Και οι δυο αυτές κατηγορίες, αφού ολοκληρώσουν την αποστολή τους, οδηγούν το σύστημα στην κατάσταση αναμονής. Αυτή η διαδικασία λειτουργεί επαναλαμβανόμενα, με στόχο την αξιόπιστη άρδευση του φυτού.

3.4) Συνάρτηση ανίχνευσης ηλίου

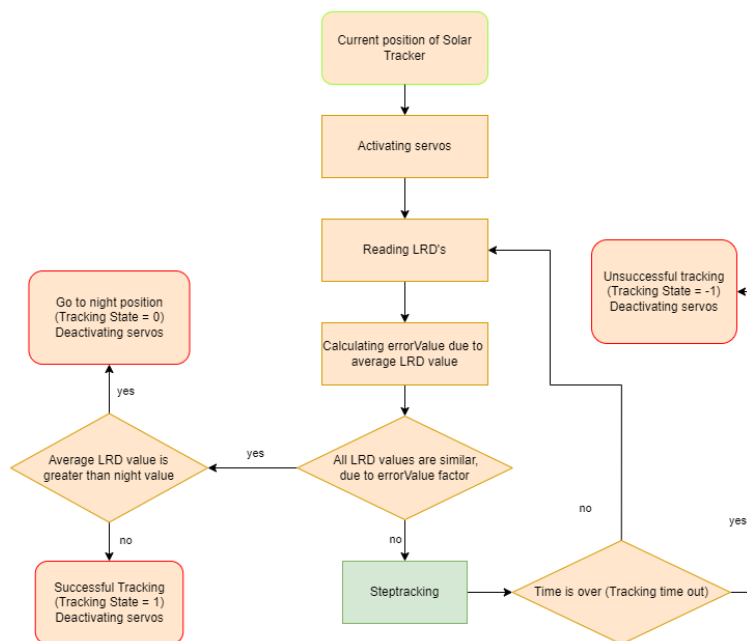
Για να επιτευχθεί η σωστή ανίχνευση του ηλίου από τον ηλιακό ανιχνευτή, είναι απαραίτητη η συγχώνευση του hardware με το software. Για τον λόγο αυτό, τοποθετήθηκε ένας αξιόπιστος κώδικας στον εγκέφαλο του συστήματος, ικανός να υποστηρίξει την έγκυρη λειτουργία του ανιχνευτή.

Στην αρχή του προγράμματος συμπεριλαμβάνεται η βιβλιοθήκη Servo.h, η οποία επικουρεί στη διαχείριση των σερβοκινητήρων, καθώς διαθέτει πολλές συναρτήσεις για τον χειρισμό τους. Στη συνέχεια ορίζονται τα όρια των θέσεων των δύο σερβοκινητήρων (upThreshold, downThreshold, leftThreshold, rightThreshold), που αποτελούν και τα όρια των θέσεων της ηλιακής κυψέλης. Στα

πλαίσια του συγκεκριμένου συστήματος, με την αρχική θέση του πάνελ παράλληλη στον ορίζοντα και με διάνυσμα θέσεως ($90^\circ, 90^\circ$), ορίστηκε το εύρος των τιμών $[30^\circ, 150^\circ]$ για την κατακόρυφη κίνηση και το εύρος $[0^\circ, 180^\circ]$ για την, παράλληλη στον ορίζοντα, κίνηση του πάνελ. Αυτό σημαίνει ότι ο κατακόρυφος σερβοκινητήρας μπορεί να περιστρέφεται 60° προς τα μπρος και 60° προς τα πίσω, ενώ ο οριζόντιος 90° δεξιά και 90° αριστερά. Ακόμη, δηλώνεται η μεταβλητή της τιμής σφάλματος των φωτοαντιστάσεων (`errorValue`), της τιμής που οριοθετεί τη μέρα και τη νύχτα (`night`) και του χρόνου αναμονής μεταξύ των κινήσεων του ανιχνευτή (`steptime`). Έπειτα ορίστηκε το διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών ανιχνεύσεων (`trackingInterval`), αλλά και ο μέγιστος χρόνος που διαρκεί η κάθε ανίχνευση (`trackingTimeOut`). Κατόπιν, δημιουργούνται δύο αντικείμενα τύπου Servo (`tdServo`, `lrServo`) και ορίζονται οι ακροδέκτες D5 και D6 του Arduino ως οι ακροδέκτες ενεργοποίησης των `td` και `lr` σερβοκινητήρων αντίστοιχα, αλλά και οι ακροδέκτες D10 και D11 ως ακροδέκτες ελέγχου κίνησης. Τέλος, δηλώνονται οι καθολικές μεταβλητές `trackingState`, `upDownDegrees` και `leftRightDegrees`, που θα είναι ορατές από τον χρήστη.

Κατά την αρχικοποίηση του συστήματος, μέσα στη συνάρτηση `setup`, αφού δηλωθούν οι είσοδοι και οι έξοδοι της διάταξης, ενεργοποιούνται οι δύο σερβοκινητήρες και τοποθετούν τη φωτοβολταϊκή κυψέλη στην αρχική της θέση ($90^\circ, 90^\circ$). Έπειτα, ανανεώνονται οι προηγούμενες καθολικές μεταβλητές και απενεργοποιούνται οι σερβοκινητήρες.

Στο κύριο βρόγχο (`loop`) του προγράμματος, καλείται ανά προκαθορισμένα διαστήματα (`trackingInterval`), η συνάρτηση `solarTracker`, η οποία είναι υπεύθυνη για την ανίχνευση της θέσης του ηλίου. Σε αυτή τη συνάρτηση, αρχικά τροφοδοτούνται οι δύο σερβοκινητήρες. Κατόπιν, επαναλαμβάνεται ένας βρόχος με δύο συνθήκες εξόδου. Αυτός ο βρόχος περιλαμβάνει το διάβασμα των τιμών των τεσσάρων φωτοαντιστάσεων, τον υπολογισμό της μέσης τιμής τους αλλά και του σφάλματος που είναι ανάλογο, τη συνθήκη εξόδου αν οι τιμές των φωτοαντιστάσεων είναι κοντά μεταξύ τους κατά τον παράγοντα σφάλματος, την κίνηση του ανιχνευτή (`Steptracking`) και τη συνθήκη εξόδου αν ξεπεράστηκε ο μέγιστος χρόνος της ανίχνευσης. Αν η πρώτη, κατά σειρά, συνθήκη είναι αληθής, τότε ελέγχεται αν η μέση τιμή των φωτοαντιστάσεων υπερβαίνει το όριο διαχωρισμού της ημέρας με τη νύχτα. Αν την υπερβαίνει, ο ανιχνευτής επιστρέφει στην αρχική του θέση, ανανεώνει τις καθολικές μεταβλητές, απενεργοποιεί τους σερβοκινητήρες και περιμένει την επόμενη ανίχνευση, καθώς αυτό σημαίνει ότι έχει βραδιάσει. Αν όμως η μέση τιμή των φωτοαντιστάσεων δεν υπερβαίνει την τιμή της νύχτας, τότε ο ανιχνευτής έχει εκπληρώσει τον στόχο του, καθώς βρίσκεται κάθετα στον ήλιο. Ανανεώνει άρα τις καθολικές μεταβλητές, απενεργοποιεί τους σερβοκινητήρες και περιμένει την επόμενη ανίχνευση. Από την άλλη πλευρά, αν κατά τη δεύτερη συνθήκη εξόδου του βρόχου, ξεπεραστεί ο μέγιστος χρόνος ανίχνευσης, τότε ο ανιχνευτής έχει αποτύχει στον εντοπισμό της θέσης του ηλίου, παραμένει στην τελευταία θέση αναζήτησης, ανανεώνει τις καθολικές μεταβλητές, απενεργοποιεί τους σερβοκινητήρες και περιμένει την επόμενη ανίχνευση με την ελπίδα ότι θα είναι επιτυχής. Η λειτουργία της συνάρτησης `solarTracker` απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 3.2.



Σχήμα 3.2. Διάγραμμα ροής της συνάρτησης SolarTracker

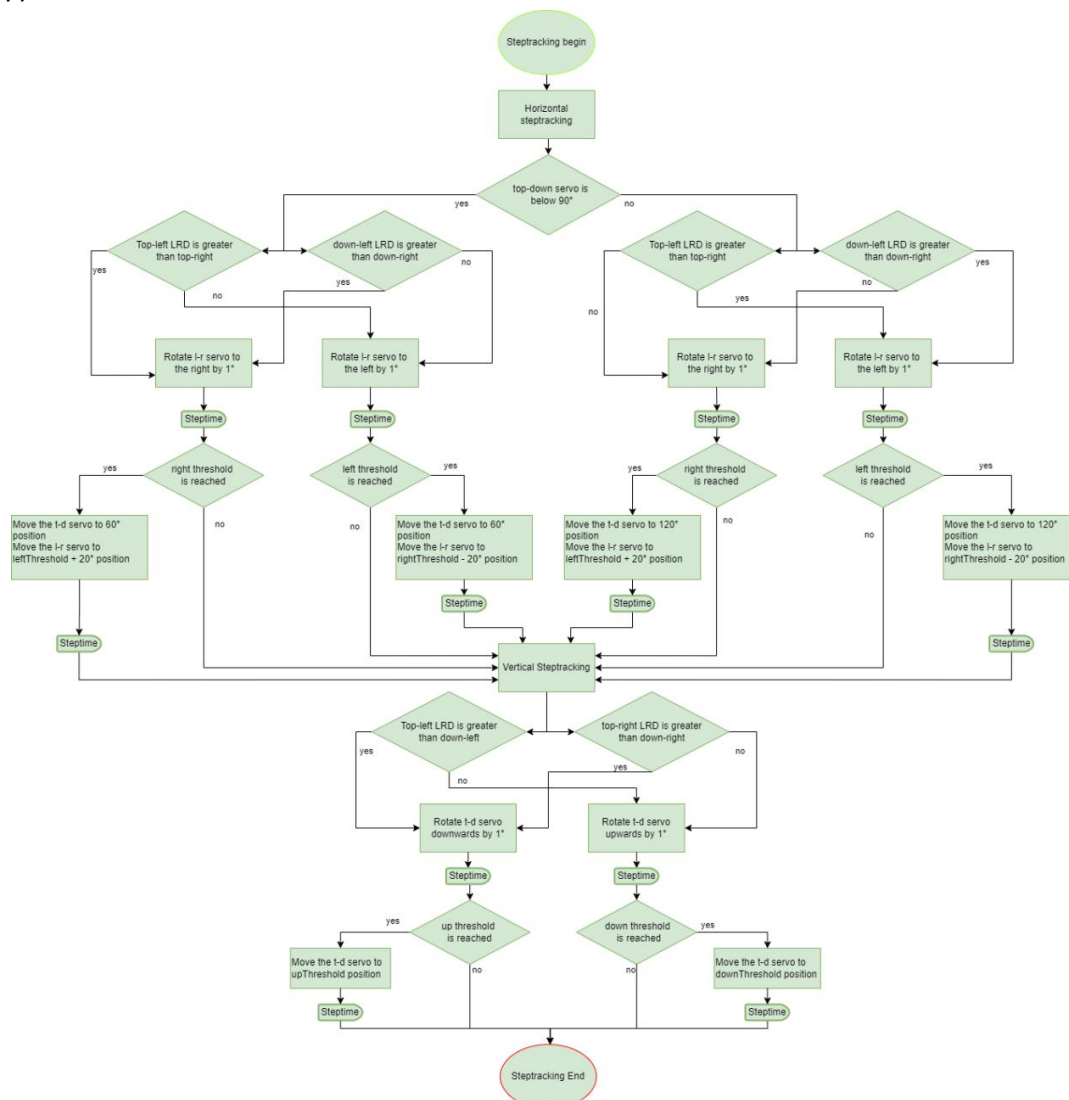
Το Steptracking είναι μία σύνθετη κίνηση και αποτελείται από δύο ανεξάρτητες κινήσεις, αυτήν στον κατακόρυφο και αυτήν στον οριζόντιο άξονα. Το tdServo είναι υπεύθυνο για την πρώτη και το lrservo για τη δεύτερη. Το Steptracking πραγματοποιείται μόνο εάν οι φωτοαντιστάσεις δεν έχουν παραπλήσιες τιμές και χρειάζεται η περιστροφή του ανιχνευτή σε έναν τουλάχιστον άξονα. Πρώτη κατά σειρά έρχεται η κίνηση στον οριζόντιο άξονα και ακολουθεί η κίνηση στον κατακόρυφο. Η λειτουργία του Steptracking απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 3.3.

Όσον αφορά την κίνηση στον οριζόντιο άξονα (Horizontal Steptracking), αρχικά ελέγχεται η θέση του tdServo, για να εξακριβωθεί αν υπερβαίνει ή όχι τις 90°. Αν δεν τις υπερβαίνει, αυτό σημαίνει ότι έχει φορά προς τα μπρος. Έτσι, συγκρίνονται ξεχωριστά η t-l με την t-r και η d-l με την d-r φωτοαντίσταση. Αν η τιμή της t-l είναι μεγαλύτερη από της t-r το lrservo περιστρέφεται κατά 1° δεξιά και περιμένει steptime χιλιοστά του δευτερολέπτου, ενώ αλλιώς κατά 1° αριστερά και περιμένει steptime ms. Το ίδιο ισχύει και για τις τιμές των d-l και d-r φωτοαντιστάσεων. Έπειτα ελέγχεται η συνθήκη της θέσης του lrservo αν έχει ξεπεράσει το δεξί όριο. Αν δεν είναι αληθής, τότε ο ανιχνευτής περνά στην κίνηση στον κατακόρυφο άξονα, ενώ αν είναι αληθής τότε ο ανιχνευτής πραγματοποιεί έναν σύνθετο ελιγμό, που τοποθετεί το lrservo 20° πριν το αριστερό όριο και το tdServo στις 120°. Το ίδιο ισχύει και αν ξεπεραστεί το αριστερό όριο, με τη διαφορά ότι το lrservo περιστρέφεται στις 20° πριν το δεξί όριο. Έτσι σε επόμενο Steptracking θα είναι ευκολότερη η ανίχνευση. Αντίστροφη κίνηση εφαρμόζεται αν η θέση του tdServo υπερβαίνει τις 90°, δηλαδή έχει φορά προς τα πίσω. Αν η τιμή της t-l / d-l είναι μεγαλύτερη από της t-r / d-r το lrservo περιστρέφεται κατά 1° αριστερά και περιμένει steptime χιλιοστά του δευτερολέπτου, ενώ αλλιώς κατά 1° δεξιά και περιμένει steptime ms. Αν ξεπεραστεί σε αυτή την περίπτωση το δεξί όριο, το lrservo στρέφεται στις 20° πριν το αριστερό όριο και το tdServo στις 60°, ενώ αν ξεπεραστεί το αριστερό όριο το lrservo στρέφεται στις 20° πριν το δεξί όριο και το tdServo στις 60°.

Μετά την ολοκλήρωση της οριζόντιας κίνησης ακολουθεί η κίνηση στον κατακόρυφο άξονα (Vertical Steptracking). Κατά την κίνηση αυτή συγκρίνονται ξεχωριστά η t-l με την d-l και η t-r με την

d-r φωτοαντίσταση. Αν η τιμή της t-l είναι μεγαλύτερη από της d-l το l-rServo περιστρέφεται κατά 1° προς τα μπρος και περιμένει `steptime ms`, ενώ αλλιώς κατά 1° προς τα πίσω και περιμένει `steptime ms`. Το ίδιο ισχύει και για τις τιμές των d-l και d-r φωτοαντιστάσεων. Στη συνέχεια ελέγχεται αν το tdServo έχει ξεπεράσει το πάνω ή το κάτω όριο. Σε περίπτωση που ξεπεράσει το πάνω, αυτό επιστρέφει στο πάνω όριο, ενώ σε περίπτωση που ξεπεράσει το κάτω, επιστρέφει στο κάτω όριο.

Με την επαναλαμβανόμενη λήψη τιμών των φωτοαντιστάσεων και το επαναλαμβανόμενο `Steptracking` επιτυγχάνεται η ανίχνευση της θέσης του ηλίου και η τοποθέτηση της φωτοβολταϊκής κυψέλης κάθετα σε αυτόν.



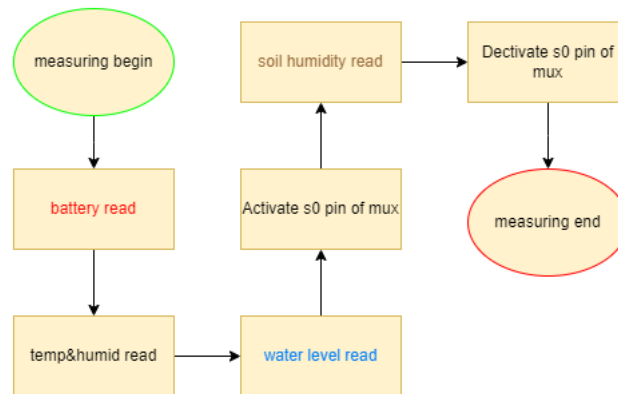
Σχήμα 3.3. Διάγραμμα ροής του `Steptracking`

3.5) Συναρτήσεις μετρήσεων

Αυτή η ενότητα επικεντρώνεται στον τρόπο που οι αισθητήρες μετρήσεων (soil humidity sensor, water level sensor, DHT11) αλλά και οι λογικές συναρτήσεις, συνεργάζονται για να αξιολογήσουν τις συνθήκες και να λαμβάνουν αποφάσεις, με στόχο το βέλτιστο πότισμα. Από την ανάλυση των μετρήσεων μέχρι τη συντονισμένη διαδικασία ποτίσματος, αυτή η ενότητα προσφέρει

μια εις βάθος ματιά στη λειτουργία των αυτομάτων συστημάτων άρδευσης και πώς αυτά εξυπηρετούν την αποδοτική διαχείριση των πόρων.

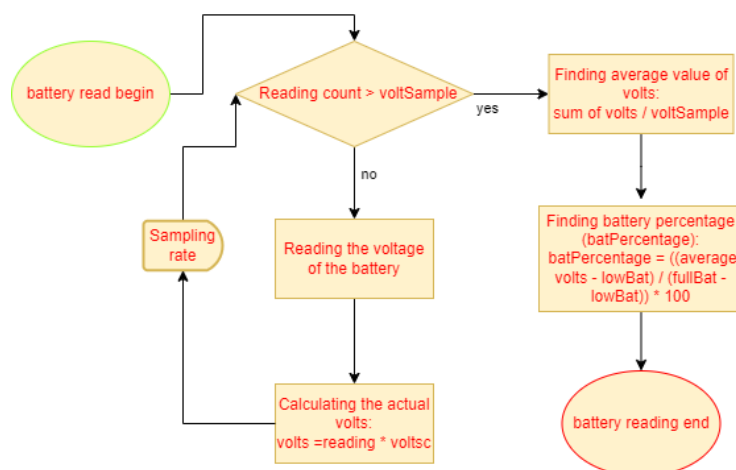
Η χρονολογική σειρά κατά την οποία πραγματοποιούνται οι επιμέρους μετρήσεις απεικονίζονται στο σχήμα 3.4. Αφού το σύστημα βρεθεί στην κατάσταση Measuring ξεκινά με τη λήψη της μέτρησης του ποσοστού μπαταρίας. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η μέτρηση της υγρασίας και θερμοκρασίας του αέρα από τον αισθητήρα DHT11 και κατόπιν διαβάζεται η στάθμη νερού της δεξαμενής. Έπειτα, αφού πρώτα ενεργοποιηθεί ο ακροδέκτης s0 του πολυπλέκτη, διαβάζεται η υγρασία του εδάφους και απενεργοποιείται ο s0 ακροδέκτης.



Σχήμα 3.4. Σειρά μετρήσεων

Όσον αφορά τον κώδικα της μέτρησης του ποσοστού μπαταρίας (**battery read**), ορίστηκε η ελάχιστη και μέγιστη τιμή της τάσης της μπαταρίας ($lowBat = 3.4V$, $fullBat = 4.2V$), για τη σωστή βαθμονόμηση του ποσοστού της και ορίστηκε το πλήθος του δείγματος ($voltSample = 20$) και ο ρυθμός λήψης του ($samplingRate = 30$). Ακόμη, δηλώθηκαν οι καθολικές μεταβλητές $sumVolts$, για την αποθήκευση του αθροίσματος των τιμών των μετρήσεων και $batPercentage$, για την αποθήκευση της τιμής του ποσοστού μπαταρίας.

Κατά την αρχικοποίηση του προγράμματος στη συνάρτηση `setup` μπαταρίας, ορίστηκε ο ακροδέκτης A4 του Arduino ως η είσοδος των μετρήσεων αναλογικής τάσης και καλείται για πρώτη φορά η συνάρτηση λήψης `batteryRead`. Κατά την επαναλαμβανόμενη λειτουργία του προγράμματος, μέσα στη συνάρτηση `loop`, καλείται ξανά η συνάρτηση `batteryRead`. Η λειτουργία της συνάρτησης απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 3.5.



Σχήμα 3.5. Διάγραμμα ροής της συνάρτησης `batteryRead`

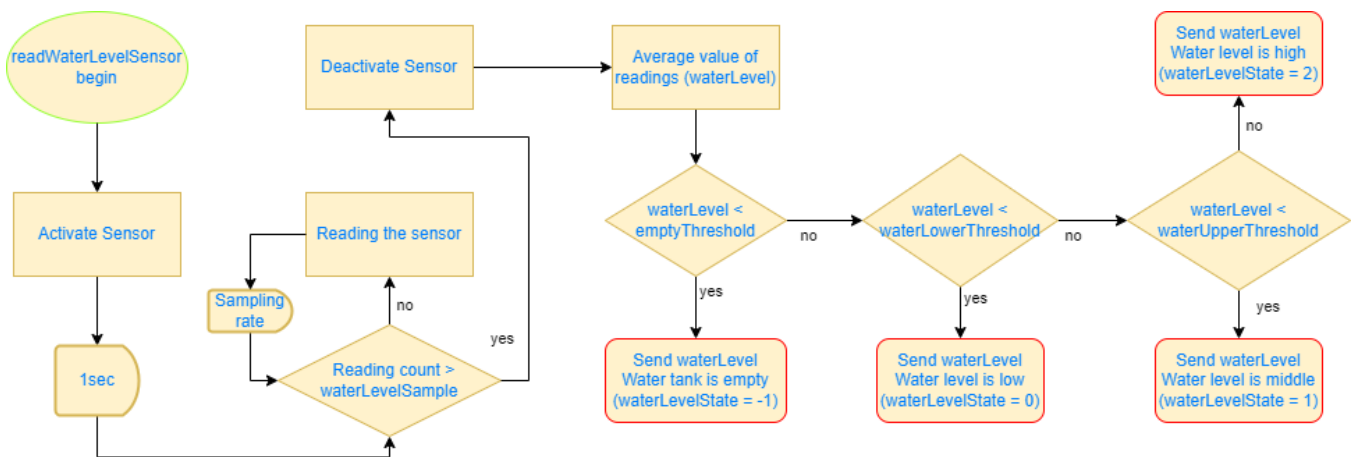
Αρχικά, ελέγχεται αν η τιμή τάσης που θα μετρηθεί υπερβαίνει το πλήθος του δείγματος των μετρήσεων. Αν δεν το υπερβαίνει, το σύστημα λαμβάνει την αναλογική τιμή τάσης της μπαταρίας από τον A4 ακροδέκτη του Arduino και έπειτα περιμένει `samplingRate ms`. Κατόπιν, υπολογίζεται η πραγματική τιμή της τάσης με βάση τον παράγοντα `voltsc`, ο οποίος προκύπτει από τη διαίρεση της τάσης αναφοράς του Arduino (~5V) με το 1024. Αυτό συμβαίνει γιατί ο ADC (analog to digital converter) του Arduino, για να μετατρέψει την αναλογική τάση σε ψηφιακή, τη διαχωρίζει σε αριθμούς (από 0 έως 1023). Έτσι για να υπολογιστεί η πραγματική τάση αρκεί να πολλαπλασιαστεί αυτός ο αριθμός με τον παράγοντα `voltsc` και να αποθηκευτεί στον πίνακα `volts`. Στη συνέχεια επαναλαμβάνεται ο βρόχος. Αν η τιμή τάσης που θα μετρηθεί, υπερβαίνει το πλήθος του δείγματος, σηματοδοτείται το πέρας των μετρήσεων και γίνεται έξοδος από το βρόγχο. Έπειτα υπολογίζεται η μέση τιμή του πίνακα `volts` και το ποσοστό της μπαταρίας, βάσει των παραμέτρων βαθμονόμησης.

Μετά τη μέτρηση του ποσοστού μπαταρίας έπεται η μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα από τον DHT11 (**temp&humid read**). Όσον αφορά στον κώδικα της, αρχικά συμπεριλήφθηκαν οι βιβλιοθήκες `Adafruit_Sensor.h` και `DHT.h`. Στη συνέχεια αρχικοποιήθηκε ο αισθητήρας DHT11 για να επικοινωνεί με το Arduino, με ακροδέκτη επικοινωνίας τον D8 και δηλώθηκαν οι καθολικές μεταβλητές: `humid`, για το ποσοστό υγρασίας, `temp`, για τη θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου και `hlc`, για τον δείκτη αίσθησης θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου.

Στη συνάρτηση `setup` καλείται η συνάρτηση `dht.begin` της βιβλιοθήκης `DHT.h`, για να ξεκινήσει η επικοινωνία μεταξύ των δύο μικροελεγκτών. Ακόμη, καλείται για πρώτη φορά η συνάρτηση `tempRead`, για να ληφθούν οι απαραίτητες μετρήσεις. Μέσα στη συνάρτηση `loop` καλείται επαναλαμβανόμενα η συνάρτηση `tempRead`, ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Όσον αφορά τον κώδικα της μέτρησης της στάθμης νερού της δεξαμενής (**water level read**), αρχικά ορίστηκε το κάτω (`waterLowerThreshold=170`) και το άνω όριο (`waterUpperThreshold=300`), αλλά και το όριο κάτω από το οποίο η δεξαμενή θα θεωρείται άδεια (`emptyThreshold=70`). Ακόμη, ορίστηκε το πλήθος του δείγματος των μετρήσεων (`waterLevelSample=20`) και ο ρυθμός δειγματοληψίας (`samplingRate=30`). Επιπλέον, δηλώθηκαν οι καθολικές μεταβλητές `waterLevel`, για την αποθήκευση της αμέριστης τιμής της στάθμης της δεξαμενής και `waterLevelState`, για την κατάσταση της δεξαμενής.

Στη συνάρτηση `setup`, δηλώνεται σαν είσοδος ο A5 ακροδέκτης του Arduino και σαν έξοδος ο D5 και του ανατίθεται η τιμή 0 (LOW), ώστε η έξοδος του πολυπλέκτη να συνδέεται με τον αισθητήρα στάθμης. Ακόμη, ορίζεται ο D13 ακροδέκτης του Arduino ως έξοδος, για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του αισθητήρα και αρχικοποιείται στην τιμή LOW (απενεργοποιημένο). Έπειτα, καλείται για πρώτη φορά η συνάρτηση `readWaterLevelSensor`, για να ληφθούν οι πρώτες μετρήσεις, ενώ μέσα στη συνάρτηση `loop` καλείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η λειτουργία της συνάρτησης `readWaterLevelSensor` απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 3.6.

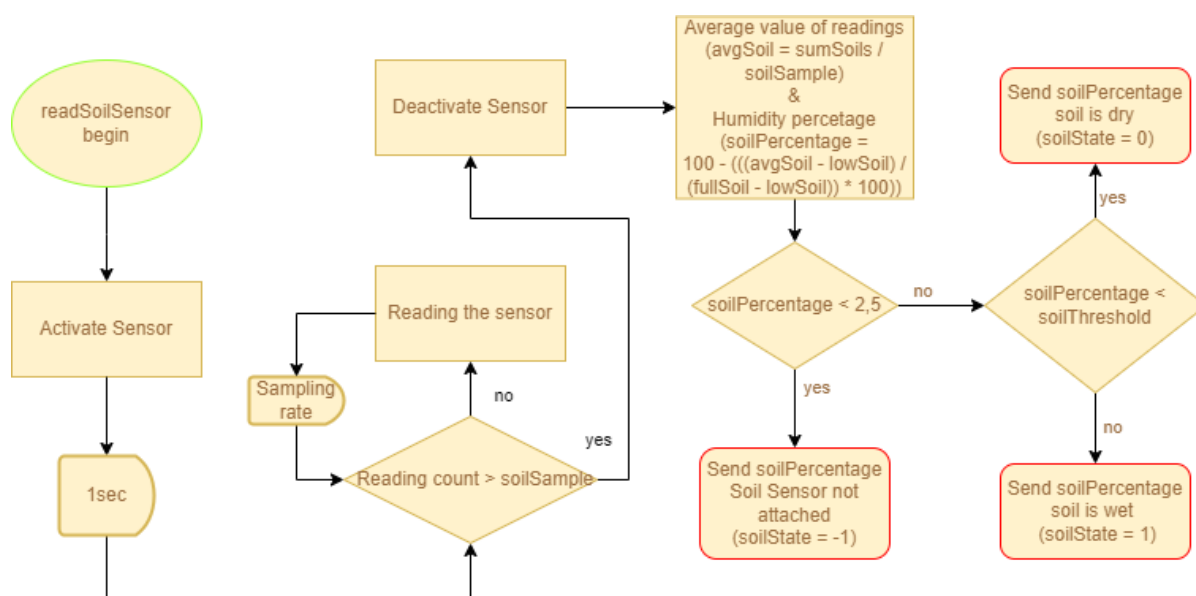


Σχήμα 3.6. Διάγραμμα ροής της συνάρτησης readWaterLevelSensor

Με την κλήση της συνάρτησης readWaterLevelSensor, αρχικά ενεργοποιείται ο αισθητήρας στάθμης νερού, μέσω του D13 ακροδέκτη του Arduino και έπεται μία καθυστέρηση του ενός δευτερολέπτου για να διασφαλιστεί η σωστή τροφοδοσία του αισθητήρα για σωστές μετρήσεις. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μία διαδοχική λήψη μετρήσεων για την εύρεση μίας εγκυρότερης τιμής, καθώς υπάρχουν σφάλματα. Αυτό γίνεται αρχικά ελέγχοντας αν η μέτρηση που θα ακολουθήσει ξεπερνά το πλήθος του δείγματος (waterLevelSample). Αν δε συμβαίνει αυτό, τότε το Arduino λαμβάνει τη μέτρηση διαβάζοντας τον αισθητήρα και περιμένει samplingRate ms. Στη συνέχεια επαναλαμβάνεται ο βρόχος για τη λήψη όλου του πλήθους του δείγματος. Αν η μέτρηση που θα ακολουθήσει υπερβαίνει το πλήθος του δείγματος, τερματίζεται η διαδικασία των μετρήσεων και απενεργοποιείται ο αισθητήρας στάθμης νερού. Κατόπιν, υπολογίζεται η μέση τιμή των μετρήσεων (waterLevel) και ελέγχεται αν είναι μικρότερο από το όριο άδειας δεξαμενής (emptyThreshold). Αν είναι τότε στη μεταβλητή της κατάστασης της δεξαμενής (waterLevelState) ανατίθεται η τιμή -1 και επιστρέφεται η τιμή της μέτρησης waterLevel. Αν η τιμή βρίσκεται μεταξύ του ορίου άδειας δεξαμενής και του κάτω ορίου, τότε η μεταβλητή της κατάστασης της δεξαμενής παίρνει την τιμή 0 και επιστρέφεται η τιμή της μέτρησης. Αν η τιμή βρίσκεται μεταξύ του άνω και του κάτω ορίου τότε στη μεταβλητή της κατάστασης της δεξαμενής, ανατίθεται η τιμή 1 και επιστρέφεται η τιμή της μέτρησης, ενώ αλλιώς ανατίθεται η τιμή 2 και επιστρέφεται η waterLevel.

Όσον αφορά τον κώδικα της μέτρησης του ποσοστού της υγρασίας του εδάφους (**soil humidity read**), αρχικά ορίστηκε το όριο κάτω από το οποίο το έδαφος θεωρείται ξηρό (soilThreshold). Η προκαθορισμένη τιμή του είναι 50%, αλλά μπορεί να αλλάξει μέσα από την εφαρμογή. Ακόμη, ορίστηκε το πλήθος του δείγματος των μετρήσεων (soilSample=20) και ο ρυθμός δειγματοληψίας (samplingRate=30). Επιπλέον, δηλώθηκαν οι καθολικές μεταβλητές soilHumidity, για την αποθήκευση της ακέραιας τιμής του ποσοστού υγρασίας του εδάφους και soilState, για την κατάσταση του εδάφους. Τέλος, δηλώθηκαν οι μεταβλητές lowSoil και fullSoil με τιμές 200 και 1023 αντίστοιχα, για τη βαθμονόμηση του ποσοστού υγρασίας.

Στη συνάρτηση setup, αφού πρώτα ληφθεί η μέτρηση της στάθμης νερού, ενεργοποιείται ο D5 ακροδέκτης του Arduino, ώστε η έξοδος του πολυπλέκτη να συνδέεται με τον αισθητήρα εδάφους. Ακόμη, ορίζεται ο D12 ακροδέκτης του Arduino ως έξοδος, για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του αισθητήρα και αρχικοποιείται στην τιμή LOW (απενεργοποιημένο). Έπειτα, καλείται για πρώτη φορά η συνάρτηση readSoilSensor, για να ληφθούν οι πρώτες μετρήσεις, ενώ μέσα στη συνάρτηση loop καλείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η λειτουργία της συνάρτησης readSoilSensor απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 3.7.



Σχήμα 3.7. Διάγραμμα ροής της συνάρτησης readSoilSensor

Με την κλήση της συνάρτησης readSoilSensor, αρχικά ενεργοποιείται ο αισθητήρας εδάφους μέσω του D12 ακροδέκτη του Arduino και έπεται μία καθυστέρηση του ενός δευτερολέπτου για να διασφαλιστεί η σωστή τροφοδοσία του αισθητήρα για σωστές μετρήσεις. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μία διαδοχική λήψη μετρήσεων για την εύρεση μίας εγκυρότερης τιμής, καθώς υπάρχουν σφάλματα. Αυτό γίνεται αρχικά ελέγχοντας αν η μέτρηση που θα ακολουθήσει ξεπερνά το πλήθος του δείγματος (soilSample). Αν δε συμβαίνει αυτό, τότε το Arduino λαμβάνει τη μέτρηση διαβάζοντας τον αισθητήρα και περιμένει samplingRate ms. Στη συνέχεια επαναλαμβάνεται ο βρόχος στη λήψη όλου του πλήθους του δείγματος. Αν η μέτρηση που θα ακολουθήσει υπερβαίνει το πλήθος του δείγματος, τερματίζεται η διαδικασία των μετρήσεων και απενεργοποιείται ο αισθητήρας εδάφους. Κατόπιν, υπολογίζεται η μέση τιμή των μετρήσεων (avgSoil) και το ποσοστό υγρασίας (soilPercentage) και ελέγχεται αν είναι μικρότερο από 2.5%. Αν είναι τότε στη μεταβλητή της κατάστασης του εδάφους (soilState) ανατίθεται η τιμή -1 και επιστρέφεται η τιμή της μέτρησης soilPercentage. Αν η τιμή βρίσκεται μεταξύ του 2.5% και του soilThreshold τότε η μεταβλητή της κατάστασης της δεξαμενής παίρνει την τιμή 0 και επιστρέφεται η τιμή της μέτρησης. Αν η τιμή υπερβαίνει την τιμή του soilThreshold, τότε στη μεταβλητή της κατάστασης της δεξαμενής ανατίθεται η τιμή 1 και επιστρέφεται η τιμή του ποσοστού υγρασίας.

3.6) Συναρτήσεις αποστολής και λήψης

Για να επιτευχθεί η αποστολή και η λήψη των πληροφοριών του αυτόματου και αυτόνομου αρδευτικού συστήματος από την εφαρμογή Virtuino 6, είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί ένας αξιόπιστος κώδικας, αποτελούμενος από κατάλληλες βιβλιοθήκες και συναρτήσεις.

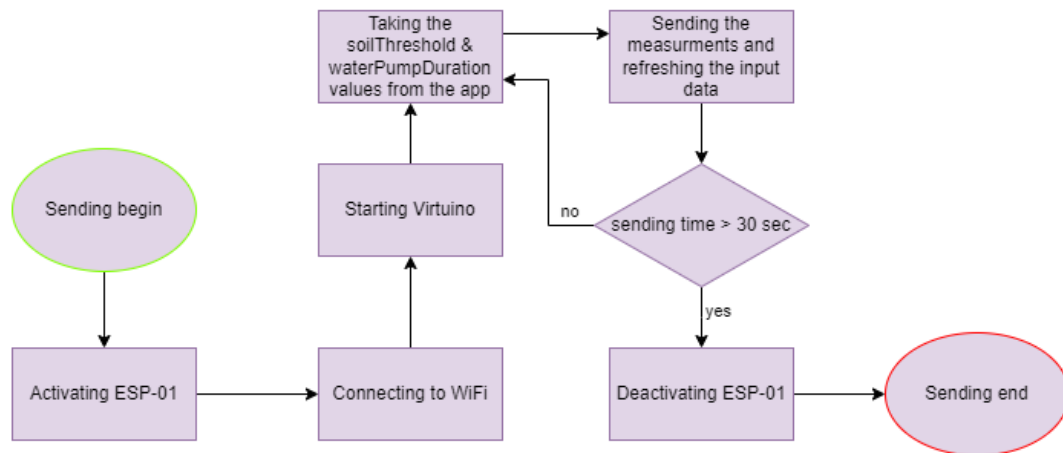
Την επικοινωνία μεταξύ του Arduino Uno R3 και του ESP-01, αναλαμβάνει η βιβλιοθήκη SoftwareSerial.h. Αυτή η βιβλιοθήκη επιτρέπει τη δημιουργία σειριακών θυρών επικοινωνίας μεταξύ των δύο συσκευών, επιτρέποντας τη μεταφορά δεδομένων και τον έλεγχο μέσω του πρωτοκόλλου UART. Χρησιμοποιώντας αυτήν τη βιβλιοθήκη, ο προγραμματιστής μπορεί να διαμορφώσει το Arduino Uno R3 ώστε να επικοινωνεί απροβλημάτιστα με το ESP-01 δημιουργώντας μια αποδοτική σύνδεση μεταξύ των δύο μικροελεγκτών. Ακόμη, καλείται η συνάρτηση SoftwareSerial(2,3), για να επιτευχθεί η σύνδεση μεταξύ των δύο, από τους ακροδέκτες D2 και D3 του Arduino.

Για να διασφαλιστεί η επικοινωνία και η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ της εφαρμογής Virtuino 6 και του ESP-01, ήταν αναγκαίο να συμπεριληφθεί στον κώδικα η βιβλιοθήκη VirtuinoCM.h. Μέσω αυτής της βιβλιοθήκης εξοπλίζεται το Arduino IDE με όργανα για την εύκολη διαμόρφωση και αλληλεπίδραση με τα στοιχεία ελέγχου της εφαρμογής Virtuino, δημιουργώντας μια πιο φιλική για τον χρήστη διεπαφή.

Στο πάνω μέρος του κώδικα, στη δήλωση των μεταβλητών και των βιβλιοθηκών, αφού κληθούν οι παραπάνω βιβλιοθήκες, είναι απαραίτητη η προσθήκη του ονόματος του WiFi δικτύου, ο κωδικός του, η θύρα και η διεύθυνση IP του server που δημιουργήθηκε από την εφαρμογή. Αυτό γίνεται αναθέτοντας τις αντίστοιχες τιμές στις μεταβλητές ssid, password, port, serverIP. Η προκαθορισμένη τιμή της θήρας είναι 8000, ενώ η διεύθυνση IP πρέπει να ταυτίζεται με τη διεύθυνση που υπάρχει στην εφαρμογή και να έχει τους τρεις πρώτους αριθμούς ίδιους με την IP του router. Έπειτα, δηλώνεται ο ακροδέκτης D4 του Arduino ως το chip power down pin του ESP-01, για να μπορεί να απενεργοποιείται όταν δε χρειάζεται.

Κατά την αρχικοποίηση του προγράμματος, μέσα στη συνάρτηση setup, αφού ρυθμιστεί το baud rate της σειριακής επικοινωνίας του Arduino στα 9600 bps, ενεργοποιείται το ESP-01, μέσω του Ch_Pd pin του. Έπειτα, ρυθμίζεται το baud rate της επικοινωνίας του ESP και το μέγιστο χρονικό διάστημα αναμονής των πληροφοριών της σειριακής επικοινωνίας. Έπειτα συνδέεται στο δίκτυο WiFi με τη συνάρτηση connectToWiFiNetwork() και συνδέεται στο Virtuino με τη συνάρτηση virtuino.begin. Κατόπιν, αναγνωρίζει αν έγινε κάποια αλλαγή στους δύο ρυθμιστές ολίσθησης της εφαρμογής και αποθηκεύει τις νέες τιμές. Το virtual pin της εφαρμογής που αποθηκεύει την τιμή του soilThreshold είναι το V[9], ενώ το virtual pin που αποθηκεύει την τιμή του waterPumpDuration είναι το V[8]. Στη συνέχεια, αφού πρώτα μετρηθεί η υγρασία του εδάφους συγκρίνεται με το soilThreshold, για να προκύψει η κατάσταση του εδάφους και στέλνονται όλα τα δεδομένα στην εφαρμογή μέσω των εικονικών τους ακροδεκτών. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβλητή waterLevelValue αποθηκεύεται στο V[1] pin, η hic (heat index) στο V[2], η humid στο V[3], η batPercentage στο V[4], η temp στο V[5], η soilHumidity στο V[7], η soilThreshold στο V[11], η waterPumpDuration στο V[12], η upDownDegrees στο V[13], η leftRightDegrees στο V[14], η trackingState στο V[15], η soilState στο V[16] και η μεταβλητή waterlevel στο V[17] pin του Virtuino. Αυτή η διαδικασία διαρκεί 30 δευτερόλεπτα για να διασφαλιστεί ότι τα δεδομένα θα φτάσουν στον προορισμό τους, ακόμη και έπειτα από αρκετές ανεπιτυχείς απόπειρες. Τέλος, το ESP-01 απενεργοποιείται για εξοικονόμηση ενέργειας.

Ο ίδιος κώδικας που υπάρχει στη συνάρτηση setup βρίσκεται και στη συνάρτηση loop με τη διαφορά ότι δε ρυθμίζονται οι αρχικές παράμετροι της σειριακής επικοινωνίας. Η λειτουργία της κατάστασης αποστολής και λήψης (Sending State) απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 3.8.



Σχήμα 3.8. Διάγραμμα ροής της κατάστασης αποστολής και λήψης

Μία ακόμη συνάρτηση που ανήκει στη βιβλιοθήκη VirtuinoCM.h και συντελεί στην επικοινωνία μεταξύ της εφαρμογής και του ESP-01 είναι η συνάρτηση onReceived, η οποία καλείται κάθε φορά που η εφαρμογή στέλνει ένα αίτημα στο server για να αλλάξει την τιμή ενός εικονικού ακροδέκτη και πραγματοποιεί την αλλαγή. Ακόμη, η συνάρτηση onRequest καλείται όταν η εφαρμογή αιτείται να διαβάσει ένα virtual pin και επιστρέφει τις τιμές όλων των εικονικών ακροδεκτών, η virtuinoRun που υλοποιεί τον ρόλο της αποστολής και λήψης δεδομένων ανάμεσα στο Arduino Uno R3 και το ESP-01, τα οποία χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία με το Virtuino. Η συνάρτηση waitForResponse, η οποία χρησιμοποιείται για την αναμονή της εμφάνισης μίας συγκεκριμένης απάντησης από τη σειριακή θύρα με χρονικό όριο και επιστρέφει 'true' εάν βρέθηκε η επιθυμητή απάντηση κατά τη διάρκεια της αναμονής και 'false' αν όχι. Τέλος, μία σημαντική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε αντικαθιστώντας τη συνάρτηση delay είναι η vDelay, η οποία επιτρέπει την παράλληλη προσπέλαση των εντολών του προγράμματος και τη διασφάλιση της συνεχούς επικοινωνίας μεταξύ του Arduino και του ESP-01, για όσο χρόνο είναι ενεργό. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να τρέχουν ταυτόχρονα πολλές διεργασίες, χωρίς να χρειαστεί να διακοπεί ή να παραταθεί κάποια από αυτές.

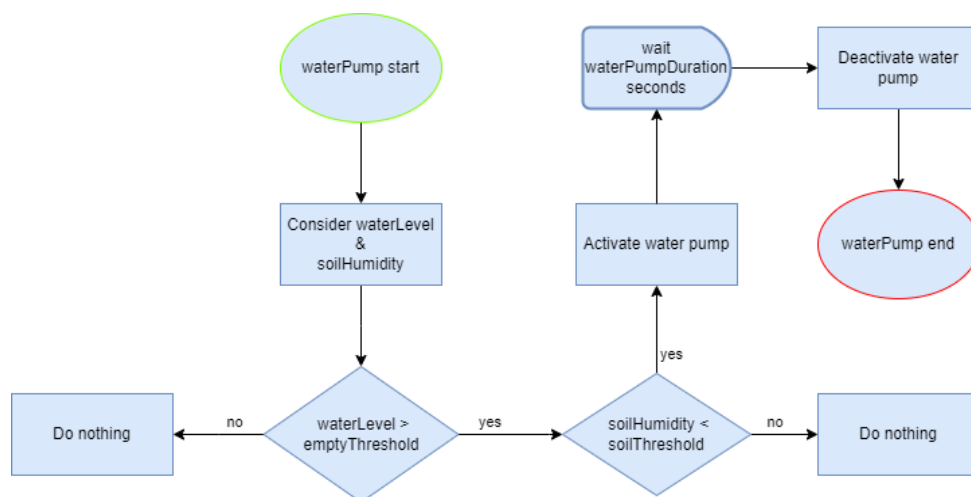
3.7) Συνάρτηση ποτίσματος

Για την επίτευξη της σωστής άρδευσης του φυτού, ήταν αναγκαία η δημιουργία ενός αξιόπιστου κώδικα, που να λαμβάνει υπόψιν της διάφορες παραμέτρους και να βελτιστοποιεί τη διαδικασία του ποτίσματος.

Στην αρχή του προγράμματος δηλώθηκε η μεταβλητή waterPumpDuration, για να αποθηκεύει τη διάρκεια λειτουργίας της αντλίας σε δευτερόλεπτα, για κάθε κύκλο ποτίσματος. Αυτή η μεταβλητή προκαθορίστηκε με την τιμή 5, αν και μπορεί να μεταβληθεί από την εφαρμογή απομακρυσμένου ελέγχου. Στη συνάρτηση setup αρχικά ορίστηκε ο D7 ακροδέκτης του Arduino για

τον έλεγχο της τροφοδοσίας της αντλίας και έπειτα αρχικοποιήθηκε στην τιμή LOW (απενεργοποιημένο). Αφού ολοκληρωθούν όλες οι υπόλοιπες διαδικασίες, οι οποίες αφορούν την αρχικοποίηση της φωτοβολταϊκής κυψέλης, τη λήψη των μετρήσεων και την αποστολή τους προς τον χρήστη, καλείται για πρώτη φορά η συνάρτηση waterPump.

Ο κώδικας κατά την επαναλαμβανόμενη λειτουργία του προγράμματος (loop), δε διαφέρει κατά πολύ από τη συνάρτηση setup. Η μόνη διαφορά είναι ότι στη συνάρτηση loop δεν αρχικοποιείται ο ακροδέκτης ελέγχου και ότι η συνάρτηση waterPump καλείται επανειλημμένα. Η λειτουργία της συνάρτησης waterPump απεικονίζεται στο σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9. Διάγραμμα ροής της συνάρτησης waterPump

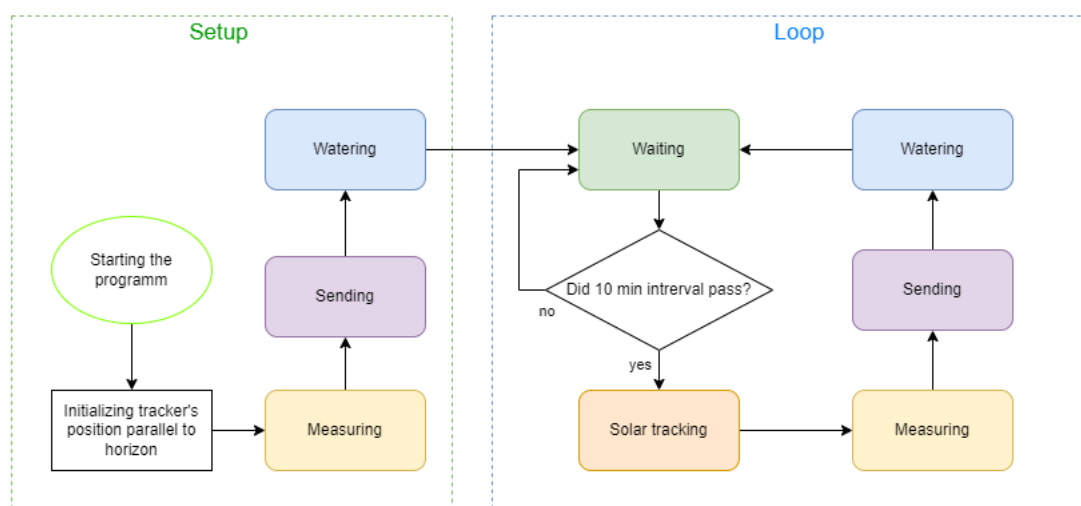
Αμέσως μετά από την κλήση της συνάρτησης και αφού έχουν ληφθεί οι μετρήσεις στάθμης νερού (waterLevel) και ποσοστού υγρασίας εδάφους (soilHumidity), ελέγχεται αν η στάθμη νερού υπερβαίνει το όριο άδειας δεξαμενής (emptyThreshold). Αν δεν το υπερβαίνει, ακυρώνεται η διαδικασία της άρδευσης για εξοικονόμηση πόρων, καθώς δεν υπάρχει διαθέσιμο νερό. Αν το υπερβαίνει, τότε ελέγχεται αν η υγρασία του εδάφους βρίσκεται κάτω από το όριο εδάφους (soilThreshold). Αν δεν ισχύει, τότε το έδαφος είναι υγρό, οπότε δε χρειάζεται πότισμα. Αν από την άλλη ισχύει η συνθήκη, τότε ενεργοποιείται η αντλία, μέσω της ανάθεσης της τιμής HIGH στον D7 ακροδέκτη του Arduino. Στη συνέχεια παραμένει ενεργοποιημένη για waterPumpDuration δευτερόλεπτα και έπειτα απενεργοποιείται. Έτσι ολοκληρώνεται ένας κύκλος ποτίσματος του φυτού.

3.8) Χρονισμός του κύριου βρόχου

Ο χρονισμός του κύριου βρόχου του προγράμματος είναι η κινητήρια δύναμη πίσω από την ομαλή λειτουργία και την αποδοτικότητα του συστήματος άρδευσης. Μέσω αυτού του βρόχου, η φωτοβολταϊκή κυψέλη ακολουθεί τον ήλιο, οι αισθητήρες μετρήσεων ανιχνεύουν τις συνθήκες του περιβάλλοντος, η εφαρμογή Virtuino 6 αλληλεπιδρά με το σύστημα, ενώ η συνάρτηση ποτίσματος λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με το πότισμα του φυτού. Ο σωστός χρονισμός αυτός είναι ουσιώδης

για τη διασφάλιση της συνεχής και αποδοτικής άρδευσης, προάγοντας την υγιή ανάπτυξη του φυτού και εξοικονομώντας πόρους.

Οι δύο βασικές ανεξάρτητες λειτουργίες που διαθέτει το σύστημα και χρήζουν χρονισμού είναι η λειτουργία ανίχνευσης (Tracking Operation) και η λειτουργία εργασίας (Working Operation). Αυτές είναι εμφανείς στο γενικό διάγραμμα ροής του σχήματος 3.1. Η μέγιστη διάρκεια της λειτουργίας ανίχνευσης είναι 50 δευτερόλεπτα, λόγω του ορίου trackingTimeOut και της λειτουργίας ανίχνευσης περίπου 60 δευτερόλεπτα. Επειδή και οι δύο λειτουργίες έχουν μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις, είναι ανάγκη να αποφευχθεί η παράλληλη ενεργοποίηση τους. Έτσι, στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε το διάστημα των 10 λεπτών μεταξύ των διαδοχικών ενεργοποιήσεων έκαστης, με πρώτη να ενεργοποιείται η λειτουργία ανίχνευσης και με το πέρας της να ακολουθεί η λειτουργία εργασίας. Αυτό σημαίνει ότι κάθε 10 λεπτά θα πραγματοποιείται η ανίχνευση του ηλίου για το πολύ 50 δευτερόλεπτα, και έπειτα θα λαμβάνονται οι μετρήσεις, θα στέλνονται στην εφαρμογή και θα πραγματοποιείται η άρδευση, που διαρκούν το πολύ 60 δευτερόλεπτα, ολοκληρώνοντας ένα κύκλο λειτουργίας μέγιστης διάρκειας 110 δευτερολέπτων. Το διάγραμμα ροής του χρονισμένου συστήματος φαίνεται στο σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10. Διάγραμμα ροής χρονισμένου συστήματος

4^ο κεφάλαιο: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗΣ ΚΑΛΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

4.1) Λογική Δοκιμών

Ένα από τα σημαντικότερα στάδια της διαδικασίας της ανάπτυξης ενός αξιόπιστου συστήματος άρδευσης είναι οι δοκιμές που πραγματοποιούνται για τη διασφάλιση της αποτελεσματικής λειτουργίας του. Κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας δόθηκε η απαραίτητη προσοχή σε αυτή τη διαδικασία, πραγματοποιώντας πολλαπλές δοκιμές σε όλα τα υποσυστήματα, τόσο στο καθένα ξεχωριστά όσο και στο σύνολο τους προκειμένου να διασφαλιστεί ότι αυτά θα λειτουργούν αξιόπιστα σε όλες τις καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθούν. Η λογική σειρά που ακολουθήθηκε ήταν να διασφαλιστεί αρχικά, ότι το κάθε κύκλωμα, ο κάθε αισθητήρας και το κάθε εξάρτημα μπορεί να λειτουργεί αξιόπιστα και χωρίς απρόβλεπτες συμπεριφορές, ξεχωριστά το ένα από το άλλο. Αυτό επιβεβαιωνόταν με πολλαπλές και ποικίλες δοκιμές, καθώς με μία δοκιμή δεν μπορεί κανείς να είναι απόλυτα σίγουρος για τη λειτουργικότητα ενός συστήματος. Αφού διασφαλιζόταν ότι ένα υποσύστημα λειτουργεί μόνο του χωρίς προβλήματα, δοκιμαζόταν σε συνδυασμό και με άλλα υποσυστήματα, για να ελεγχθεί η συνολική λειτουργικότητα. Έπειτα, προσθέτοντας με τη σειρά και τα υπόλοιπα υποσυστήματα, ένα τη φορά, χτίστηκε το συνολικό σύστημα του υπολογιστή πτήσης. Αυτός ο τρόπος παρείχε τη δυνατότητα του εύκολου εντοπισμού πιθανών σφαλμάτων. Αν δοκιμαζόταν κατευθείαν το σύστημα όλο μαζί δε θα ήταν εύκολος ο εντοπισμός του υποσυστήματος που προκαλεί το πρόβλημα σε περίπτωση λάθος αποτελεσμάτων.

Έπειτα ακολούθησαν οι πιο σημαντικές δοκιμές του συνόλου του αρδευτικού συστήματος. Οι δοκιμές αυτές ήταν πιο ρεαλιστικές και βασισμένες στη λειτουργία που θα επιτελεί το σύστημα υπό πραγματικές συνθήκες. Η ίδια η φύση της διπλωματικής εργασίας όμως εισάγει κάποιους περιορισμούς στα πειράματα τα οποία μπορούν να πραγματοποιηθούν προκειμένου να δοκιμαστεί. Επειδή το σύστημα κατασκευάστηκε με εκτεθειμένα τα εξαρτήματά του, χωρίς κάποια στεγανοποίηση ή μόνωση, ήταν δύσκολη η δοκιμή του σε ακραίες καιρικές συνθήκες όπως βροχή, χιόνι, αέρας. Γι' αυτό πραγματοποιήθηκαν δοκιμές, κατά τη διάρκεια ημερών με ηλιοφάνεια ή αραιή συννεφιά, για να μην προκληθεί κάποια μόνιμη βλάβη στο σύστημα.

Έχοντας λάβει υπόψιν τα προαναφερθέντα, σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται τα βήματα και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, προκειμένου να θεωρηθεί το αυτόνομο και αυτόματο αρδευτικό σύστημα έτοιμο να δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες.

4.2) Δοκιμές των υποσυστημάτων

Το συγκεκριμένο σύστημα άρδευσης αποτελείται από τέσσερα υποσυστήματα τα οποία συσχετίζονται με τις καταστάσεις που μπορεί να βρεθεί κατά τη λειτουργία του. Πιο συγκεκριμένα, πρώτο υποσύστημα είναι αυτό του ανιχνευτή ηλίου, ο οποίος αναλαμβάνει τον εντοπισμό της θέσης του ηλίου και την περιστροφή της φωτοβολταϊκής κυψέλης προς αυτόν. Σε αυτόν περιλαμβάνονται οι σερβοκινητήρες με τα κυκλώματα προστασίας και τροφοδοσίας τους, οι φωτοαντιστάσεις με τα κυκλώματα τους και η περιστρεφόμενη σε δύο άξονες αλουμινένια κατασκευή. Κατά την ενεργοποίηση του ηλιακού ανιχνευτή το σύστημα εισέρχεται στην κατάσταση ανίχνευσης (Tracking State) και κατά την απενεργοποίησή του εξέρχεται και μεταβαίνει στην επόμενη. Δεύτερο υποσύστημα είναι αυτό που αναλαμβάνει τη λήψη των μετρήσεων από τους περιφερειακούς αισθητήρες. Σε αυτό ανήκει ο αισθητήρας στάθμης νερού και ο αισθητήρας εδάφους, με τα κυκλώματα τροφοδοσίας τους, ο αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας και το κύκλωμα μέτρησης

του ποσοστού μπαταρίας. Κατά τη σειριακή ενεργοποίηση των εξαρτημάτων του υποσυστήματος μετρήσεων, το σύστημα εισέρχεται στην κατάσταση λήψης μετρήσεων (Measuring State) και κατά την απενεργοποίηση του εξέρχεται. Τρίτο υποσύστημα είναι αυτό του απομακρυσμένου ελέγχου. Αυτό αποτελείται από το ESP-01 WiFi module και την εφαρμογή Virtuino 6. Μόλις ενεργοποιηθεί το ESP-01 ξεκινά η αποστολή και η λήψη των πληροφοριών, μεταβαίνοντας στην κατάσταση αποστολής και λήψης (SendingState), ενώ όταν απενεργοποιηθεί το σύστημα μεταβαίνει σε επόμενη κατάσταση. Τέταρτο και τελευταίο υποσύστημα του αρδευτικού συστήματος είναι αυτό του ποτίσματος. Σε αυτό ανήκει η αντλία, με το κύκλωμα προστασίας και τροφοδοσίας της, η δεξαμενή νερού και το αρδευτικό δίκτυο που ενώνει τη δεξαμενή με το φυτό. Κατά την ενεργοποίηση της αντλίας το σύστημα περνά στην κατάσταση ποτίσματος (Watering State), ενώ κατά την απενεργοποίησή της εξέρχεται από αυτήν.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι δοκιμές που έγιναν σε καθένα από τα τέσσερα αυτά υποσυστήματα, για τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας έκαστου.

4.2.1) Δοκιμή ανιχνευτή ηλίου

Οι δοκιμές του ανιχνευτή ηλίου ξεκίνησαν μετρώντας τις τιμές αντίστασης των φωτοαντιστάσεων με το πολύμετρο, όταν αυτές βρίσκονται στο σχήμα σταυρού, χρησιμοποιώντας έναν απλό φακό ως πηγή φωτός. Παρατηρήθηκε ότι οι σκιασμένες φωτοαντιστάσεις είχαν παρόμοια και μεγαλύτερη αντίσταση, από αυτές που ήταν εκτεθειμένες στο φως του φακού και είχαν επίσης παρόμοια τιμή. Έπειτα από την εξακρίβωση ότι οι φωτοαντιστάσεις λειτουργούν σωστά, αλλά με ένα μικρό σφάλμα, δοκιμάστηκε η μέτρηση, από το Arduino, των αναλογικών τάσεων, που προκύπτουν από το κύκλωμα των φωτοαντιστάσεων. Χρησιμοποιώντας έναν απλό κώδικα για το διάβασμα τεσσάρων αναλογικών εισόδων (μία για κάθε φωτοαντίσταση), λήφθηκαν οι πρώτες μετρήσεις των τιμών τάσης από το Arduino Uno, που διακρίνονται στον πίνακα 4.1. Οι ακέραιοι αριθμοί που προκύπτουν στη σειριακή οθόνη έχουν εύρος από 0 έως 1023, λόγω του ADC (Analog to Digital converter), που ενσωματώνει το Arduino και διαχωρίζει τη λαμβανόμενη αναλογική τάση σε 1024 κομμάτια, ψηφιοποιώντας τη. Για τις τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1 χρησιμοποιήθηκε ο φακός ενός smartphone σε ένα σκοτεινό περιβάλλον και σε κοντινή και σταθερή απόσταση από τις φωτοαντιστάσεις. Η T-L συμβολίζει την πάνω αριστερά φωτοαντίσταση στο σχήμα σταυρού, η T-R την πάνω δεξιά, η D-L την κάτω αριστερά και η D-R την κάτω δεξιά. Το πάνω αριστερά κελί αντιστοιχεί στη θέση του φακού πάνω και αριστερά από το κέντρο των φωτοαντιστάσεων, το μεσαίο και δεξιά στη θέση του φακού δεξιά από το κέντρο κλπ. Το κεντρικό κελί αντιστοιχεί στη θέση του φακού ακριβώς πάνω από το κέντρο των φωτοαντιστάσεων. Οι επισημασμένες με κόκκινο χρώμα τιμές, αφορούν τις φωτοαντιστάσεις που είναι εκτεθειμένες στο φως, ενώ οι υπόλοιπες τις σκιασμένες.

Πίνακας 4.1. Εννιά διαφορετικές μετρήσεις φωτοαντιστάσεων σε σχήμα σταυρού από το Arduino.

T-L= 90	T-R= 630	T-L= 99	T-R= 95	T-L= 610	T-R= 87
D-L= 560	D-R= 770	D-L= 750	D-R= 732	D-L= 802	D-R= 540
T-L= 103	T-R= 670	T-L= 105	T-R= 98	T-L= 679	T-R= 119
D-L= 99	D-R= 710	D-L= 102	D-R= 112	D-L= 660	D-R= 121
T-L= 546	T-R= 762	T-L= 698	T-R= 685	T-L= 734	T-R= 597
D-L= 85	D-R= 545	D-L= 98	D-R= 89	D-L= 621	D-R= 95

Έπειτα από τη δοκιμή των φωτοαντιστάσεων πραγματοποιήθηκε η δοκιμή των σερβοκινητήρων και των κυκλωμάτων που τα τροφοδοτούν. Έτσι, χρησιμοποιώντας έναν απλό κώδικα και κατασκευάζοντας τα επιμέρους κυκλώματα, επιτεύχθηκε ο έλεγχος της θέσης των σερβοκινητήρων καθώς και η ενεργοποίηση και η απενεργοποίηση τους, ενώ ταυτόχρονα μετρήθηκε με το αμπερόμετρο το ρεύμα αναμονής τους, που εκμηδενίστηκε λόγω των κυκλωμάτων τροφοδοσίας. Στη συνέχεια κατασκευάστηκε η περιστρεφόμενη σε δύο άξονες βάση της φωτοβολταϊκής κυψέλης από φύλλα αλουμινίου 1mm, στις διαστάσεις του πάνελ (165x135mm) για την ελαχιστοποίηση του βάρους και τη διατήρηση της αντοχής. Ακόμη, τοποθετήθηκαν οι δύο σερβοκινητήρες στις εσοχές του ανιχνευτή, όπου και κολλήθηκαν μόνιμα και τοποθετήθηκε το πάνελ στην κορυφή του ανιχνευτή, μαζί με το σχήμα σταυρού των φωτοαντιστάσεων.

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία κατασκευής του υποσυστήματος και όλων των κυκλωμάτων που το απαρτίζουν, έγινε ο αρχικός προγραμματισμός του μικροελεγκτή για τον έλεγχο λειτουργίας του. Με βάση το εύρος των κινήσεων που μπορεί να πραγματοποιήσει ο ανιχνευτής, οριοθετήθηκαν τα επιμέρους κατώφλια (UpThreshold=30, DownThreshold=150, LeftThreshold=0, RightThreshold=180), ώστε να μπορεί να ακολουθεί την πορεία του ηλίου κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά και κατά την αυγή και το σούρουπο, χωρίς να περιπλέκονται τα καλώδια του πάνελ και των φωτοαντιστάσεων. Ο ανιχνευτής δοκιμάστηκε αρχικά, σε μη πραγματικές συνθήκες με πηγή φωτός έναν φακό. Αφού ορίστηκαν οι μεταβλητές σφάλματος των φωτοαντιστάσεων (errorValue=200) και το όριο μεταξύ ημέρας και νύχτας (night=500), με βάση τις τρέχουσες συνθήκες, διαπιστώθηκε η ομαλή λειτουργία του ανιχνευτή. Κατά τις δοκιμές, ο ανιχνευτής κατάφερνε να εντοπίσει την πηγή φωτός σε κάθε προσπάθεια και σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, ανεξαρτήτως της σχετικής του θέσης προς αυτήν. Βασικός περιορισμός όμως ήταν, η πηγή να βρίσκεται στο εύρος που μπορεί να ανιχνεύσει και να είναι στραμμένη προς αυτόν.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με πηγή φωτός τον ήλιο. Εκεί παρατηρήθηκε ότι το σύστημα ανίχνευσης δε λειτουργούσε και συγκεκριμένα δεν πραγματοποιούσε καμία κίνηση. Αυτό συνέβαινε γιατί οι φωτισμένες και οι σκισμένες φωτοαντιστάσεις είχαν μικρότερη διαφορά από το errorValue που είχε τεθεί κατά τις δοκιμές σε εσωτερικό χώρο, λόγω της ισχυρότερης πηγής φωτός. Έτσι δημιουργήθηκε ένας πιο βελτιωμένος αλγόριθμος, που προσαρμόζει το errorValue ανάλογα με την ένταση του φωτός που προσπίπτει στις φωτοαντιστάσεις, πετυχαίνοντας τη σωστή λειτουργία του ανιχνευτή από την αυγή έως τη δύση του ηλίου. Ο αλγόριθμος αυτός προέκυψε από πολλές δοκιμές σε διάφορες ώρες τη μέρα, για να επιτευχθεί η αξιόπιστη λειτουργία του.

4.2.2) Δοκιμή αισθητήρων

Κατά τις δοκιμές του υποσυστήματος μέτρησης, δοκιμάστηκαν οι αισθητήρες στάθμης νερού, υγρασίας εδάφους, θερμοκρασίας και υγρασίας αέρα και το κύκλωμα μέτρησης του ποσοστού μπαταρίας, τόσο ξεχωριστά, όσο και μαζί.

Όσον αφορά τον αισθητήρα στάθμης νερού (**Water Level Sensor**), αρχικά συνδέθηκε στο Arduino Uno και στη συνέχεια τοποθετήθηκε μέσα σε ένα δοχείο με νερό. Αφού προγραμματίστηκε κατάλληλα το Arduino, ώστε να λαμβάνει διαδοχικές μετρήσεις ανά 1 δευτερόλεπτο, παρατηρήθηκε ότι κατά τις μετρήσεις του αισθητήρα σε μία σταθερή στάθμη, η σειριακή έξοδος εμφάνιζε τιμές

παραπλήσιες μεταξύ τους, αλλά όχι ακριβώς ίδιες. Αυτό σημαίνει ότι ο αισθητήρας λειτουργεί με ένα μικρό σφάλμα. Για να αποφευχθεί η μέτρηση λανθασμένης τιμής από αυτόν, χρησιμοποιήθηκε ένας πιο βελτιωμένος κώδικας, που λαμβάνει πολλές τιμές και βρίσκει το μέσο όρο τους. Αφού δοκιμάστηκε το κύκλωμα τροφοδοσίας του, επιβεβαιώθηκε ότι δεν εμποδίζει την ορθή του λειτουργία και εκμηδενίζει το ρεύμα αναμονής, δοκιμάστηκε ο αισθητήρας σε πολλές διαφορετικές στάθμες νερού. Τα αποτελέσματα των τιμών που προέκυψαν στη σειριακή οθόνη είναι εμφανή στον πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2. Διάφορες μετρήσεις στάθμης νερού από το Arduino.

Ποσοστό Στάθμης	Μέτρηση Αισθητήρα
100%	494
75%	297
50%	211
25%	160
5%	90
0%	0

Με βάση τις μετρήσεις του αισθητήρα στάθμης νερού σε σχέση με το ποσοστό της στάθμης, επιλέχθηκαν τα κατώφλια στάθμης (emptyThreshold=70, LowerThreshold=170, UpperThreshold=300), ώστε να διαχωρίζεται η στάθμη της δεξαμενής σε τρεις περιοχές, για την ευκολία ανάγνωσης από τον χρήστη.

Όσον αφορά τον **αισθητήρα εδάφους (Soil Sensor)**, με την ίδια λογική, συνδέθηκε κατάλληλα στο Arduino Uno, το οποίο προγραμματίστηκε να λαμβάνει μετρήσεις κάθε ένα δευτερόλεπτο και τοποθετήθηκε μέσα στο ξηρό χώμα μίας γλάστρας. Κατά τις μετρήσεις όμως στη σειριακή οθόνη του Arduino IDE, παρατηρήθηκαν μικρές αποκλίσεις στις διαδοχικές μετρήσεις. Για αυτό εφαρμόστηκε και σε αυτή την περίπτωση, κώδικας λήψης πολλών μετρήσεων και εύρεσης της μέσης τιμής τους. Αφού δοκιμάστηκε σε συνδυασμό με το κύκλωμα τροφοδοσίας του και επιβεβαιώθηκε η σωστή του λειτουργία, δοκιμάστηκε σε πολλές καταστάσεις εδάφους, όσον αφορά στην υγρασία. Τα πειράματα έδειξαν ότι η μέγιστη τιμή στη σειριακή οθόνη (1023) παρατηρείται όταν ο αισθητήρας δεν είναι τοποθετημένος, ενώ η ελάχιστη τιμή παρατηρείται όταν αυτός τοποθετηθεί σε έδαφος κορεσμένο με νερό (200). Σε ενδιάμεσες καταστάσεις εδάφους παρατηρήθηκαν ανάλογες μεταβολές στις μετρήσεις. Γι'αυτό χρησιμοποιήθηκε μία φόρμουλα εύρεσης του τρέχοντος ποσοστού υγρασίας, ανάλογα με τις ακραίες τιμές.

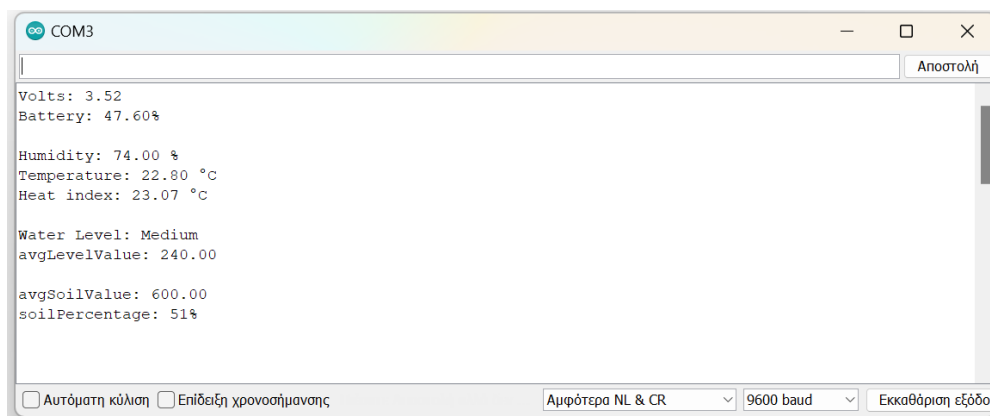
Η διαδικασία επιβεβαίωσης της καλής λειτουργίας του **αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας (DHT11)**, ήταν μία εύκολη διαδικασία. Αρχικά συνδέθηκε κατάλληλα με το Arduino Uno μέσω ενός ψηφιακού ακροδέκτη, τροφοδοτήθηκε και στη συνέχεια προγραμματίστηκε από τις ήδη υπάρχουσες βιβλιοθήκες. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας ως σημείο αναφοράς ένα εξωτερικό θερμόμετρο και υγρασιόμετρο, πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές μετρήσεις, σε διαφορετικές

θερμοκρασίες και υγρασίες. Αυτές επιβεβαίωσαν τη σωστή λειτουργία του αισθητήρα σε εσωτερικό και εξωτερικό χώρο.

Όσον αφορά το **κύκλωμα μέτρησης του ποσοστού μπαταρίας**, προκειμένου να μετρά σωστά την τρέχουσα τάση της μπαταρίας και να υπολογίζει το ποσοστό της, χρειάστηκαν πολλές δοκιμές. Αρχικά κατασκευάστηκε το κύκλωμα, δηλαδή συνδέθηκε ο θετικός πόλος της μπαταρίας σε μία αναλογική είσοδο του Arduino. Στη συνέχεια έγινε ο κατάλληλος προγραμματισμός, ώστε η σειριακή οθόνη να μην εμφανίσει την ψηφιοποιημένη μορφή της τάσης (ακέραιος αριθμός από 0 έως 1023), αλλά την πραγματική τάση σε Volt. Κατόπιν, παρατηρήθηκε ότι υπάρχει μία μικρή διακύμανση στις διαδοχικές μετρήσεις, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθεί και σε αυτή την περίπτωση η τεχνική εύρεσης της μέσης τιμής. Έχοντας ως σημείο αναφοράς ένα πολύμετρο, επιτεύχθηκε η σωστή μέτρηση της τάσης. Για την εύρεση του ποσοστού μπαταρίας χρησιμοποιήθηκε η τρέχουσα τάση της μπαταρίας μείον την ελάχιστη τάση προς τη μέγιστη μείον την ελάχιστη τάση. Έπειτα από μία πλήρη φόρτιση και αποφόρτιση της μπαταρίας, παρατηρήθηκαν οι τάσεις 4.2V και 2.9V αντίστοιχα.

Μετά από τις επιμέρους δοκιμές των παραπάνω αισθητήρων, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές που αφορούν τη σειριακή λειτουργία τους. Έγινε γρήγορα αντιληπτό το γεγονός, ότι ο αριθμός των αναλογικών εισόδων του Arduino Uno δεν επαρκούν για την υποστήριξη όλων των εξαρτημάτων καθώς διαθέτει μόλις έξι, ενώ χρειάζονται επτά (τέσσερις για κάθε φωτοαντίσταση, μία για τον αισθητήρα στάθμης νερού, μία για τον αισθητήρα εδάφους και μία για τη μέτρηση του ποσοστού μπαταρίας). Έτσι επιλέχθηκε ένας πολυπλέκτης για να επεκτείνει μία από τις αναλογικές εισόδους σε δύο. Επιλέχθηκε να έχει σαν εισόδους τους δύο ακροδέκτες σήματος του αισθητήρα νερού και του αισθητήρα εδάφους.

Έπειτα από την ολοκλήρωση της κατασκευής όλου του υποσυστήματος μετρήσεων, έγιναν οι δοκιμές ενεργοποιώντας σειριακά το κύκλωμα μέτρησης του ποσοστού της μπαταρίας, το θερμόμετρο και υγρασιόμετρο, τον αισθητήρα στάθμης νερού και τον αισθητήρα εδάφους. Δοκιμάστηκαν αρκετές διαφορετικές περιπτώσεις, με μία από αυτές να απεικονίζεται στην εικόνα 4.1. Κατά την περίπτωση αυτή, η μπαταρία του συστήματος μετρήθηκε στα 3.52V και το ποσοστό της προέκυψε 47.6%. Η υγρασία του αέρα βρισκόταν στο 74%, η θερμοκρασία στους 22.8 °C, ενώ η αίσθηση θερμοκρασίας στους 23.07 °C. Η στάθμη νερού βρισκόταν στη μέση της δεξαμενής, έχοντας τιμή 240 και ο αισθητήρας εδάφους μέτρησε την τιμή 600, δημιουργώντας το ποσοστό υγρασίας του εδάφους στο 51%.



Εικόνα 4.1. Αποτελέσματα του υποσυστήματος μετρήσεων στη σειριακή οθόνη.

4.2.3) Δοκιμή απομακρυσμένου ελέγχου

Κατά τις δοκιμές της λειτουργίας του απομακρυσμένου ελέγχου, δοκιμάστηκε το ESP-01 WiFi module και η εφαρμογή Virtuino 6 σε συνδυασμό με αυτό.

Αρχικά, αφού το ESP-01 συνδέθηκε κατάλληλα το Arduino Uno και προσαρμόστηκε η εφαρμογή Virtuino 6 στα δεδομένα του τοπικού δικτύου, δοκιμάστηκε η συνεργασία μεταξύ τους. Παρατηρήθηκε ότι το WiFi module δεν μπορούσε να συνδεθεί στην εφαρμογή. Αυτό συνέβαινε γιατί διέθετε μη συμβατό firmware, με αποτέλεσμα την ανάγκη για αναβάθμιση. Αφού αναβαθμίστηκε ξεκίνησαν οι πρώτες δοκιμές.

Στις πρώτες δοκιμές του απομακρυσμένου ελέγχου με τη χρήση του ESP-01 σε συνδυασμό με την εφαρμογή Virtuino 6, η προτεραιότητα ήταν να εξασφαλιστεί η σταθερή σύνδεση και επικοινωνία μεταξύ των συσκευών. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η σωστή διαμόρφωση και εγκατάσταση του ESP-01, με έλεγχο της ανταπόκρισής του. Στη συνέχεια, η εφαρμογή Virtuino 6 διαμορφώθηκε για να αναγνωρίζει και να αλληλεπιδρά με το ESP-01, επιτρέποντας τον απομακρυσμένο έλεγχο του συστήματος. Κατά τη διάρκεια αυτών των πρώτων δοκιμών ελέγχθηκε η αξιοπιστία και η ακρίβεια της επικοινωνίας, καθώς και η απόκριση του συστήματος στις εντολές από την εφαρμογή Virtuino 6. Αυτές οι δοκιμές αποτελούν ένα κρίσιμο βήμα προς τον αξιόπιστο απομακρυσμένο έλεγχο του συστήματος και απέδωσαν σημαντικά στην επιτυχία του συνολικού έργου.

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια των δοκιμών μελετήθηκε ο χρόνος που χρειάζεται για να σταλούν οι πληροφορίες από την εφαρμογή στο WiFi module και αντίστροφα. Έπειτα από πολλές δοκιμές διαφόρων μεταβλητών, αποφασίστηκε ο χρόνος των 30 δευτερολέπτων για την αποστολή και λήψη πληροφοριών από και προς το ESP-01. Ο χρόνος αυτός εγγυάται την αξιόπιστη μετάδοση των δεδομένων ακόμα και σε συνθήκες ασθενέστερου σήματος, καθώς δίνεται η ευκαιρία σε αυτό το υποσύστημα να ξαναστέλνει τα δεδομένα μέχρι να ληφθούν.

Τέλος, δοκιμάστηκε η εξοικονόμηση ενέργειας του WiFi module απενεργοποιώντας τον Ch_Pd ακροδέκτη του από το Arduino. Επιβεβαιώθηκε ότι αφού αρχικοποιηθεί, αν λίγο πριν τη διαδικασία αποστολής και λήψης ενεργοποιηθεί και με το πέρας της απενεργοποιηθεί, δεν επηρεάζεται καθόλου η λειτουργία του. Έτσι καταναλώνει σημαντικά λιγότερο ρεύμα στο μεγαλύτερο μέρος του χρόνου, βοηθώντας στην ελάττωση του ενεργειακού προϋπολογισμού.

4.2.4) Δοκιμή αντλίας

Το υποσύστημα αυτό περιλαμβάνει την αντλία νερού, τη δεξαμενή και το δίκτυο που ενώνει τη δεξαμενή με το φυτό.

Κατά τη διαδικασία επιβεβαίωσης της σωστής λειτουργίας του υποσυστήματος, δοκιμάστηκε η δύναμη της αντλίας, η λειτουργία του κυκλώματος προστασίας και τροφοδοσίας της, καθώς και ο βέλτιστος τρόπος τοποθέτησής της και του δικτύου της. Οι δοκιμές επικεντρώθηκαν στην εκτίμηση της αντλίας, να ανταποκρίνεται αποτελεσματικά στις απαιτήσεις ροής νερού, εξασφαλίζοντας έτσι τη σωστή παροχή. Επιπλέον, διερευνήθηκε η λειτουργία του συστήματος προστασίας και τροφοδοσίας της αντλίας, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η αντλία θα λειτουργεί σωστά σε περιπτώσεις υπερφόρτωσης ή άλλων ανωμαλιών. Τέλος, διεξήχθησαν πειράματα για τη βέλτιστη τοποθέτηση της αντλίας στη δεξαμενή και του δικτύου διανομής, ώστε να διασφαλιστεί η

αποτελεσματική κυκλοφορία του νερού και η εξοικονόμηση ενέργειας. Οι παραπάνω δοκιμές αποτέλεσαν ουσιώδη μέρος της διαδικασίας επιβεβαίωσης της αξιοπιστίας της αντλίας και του συστήματος που την υποστηρίζει.

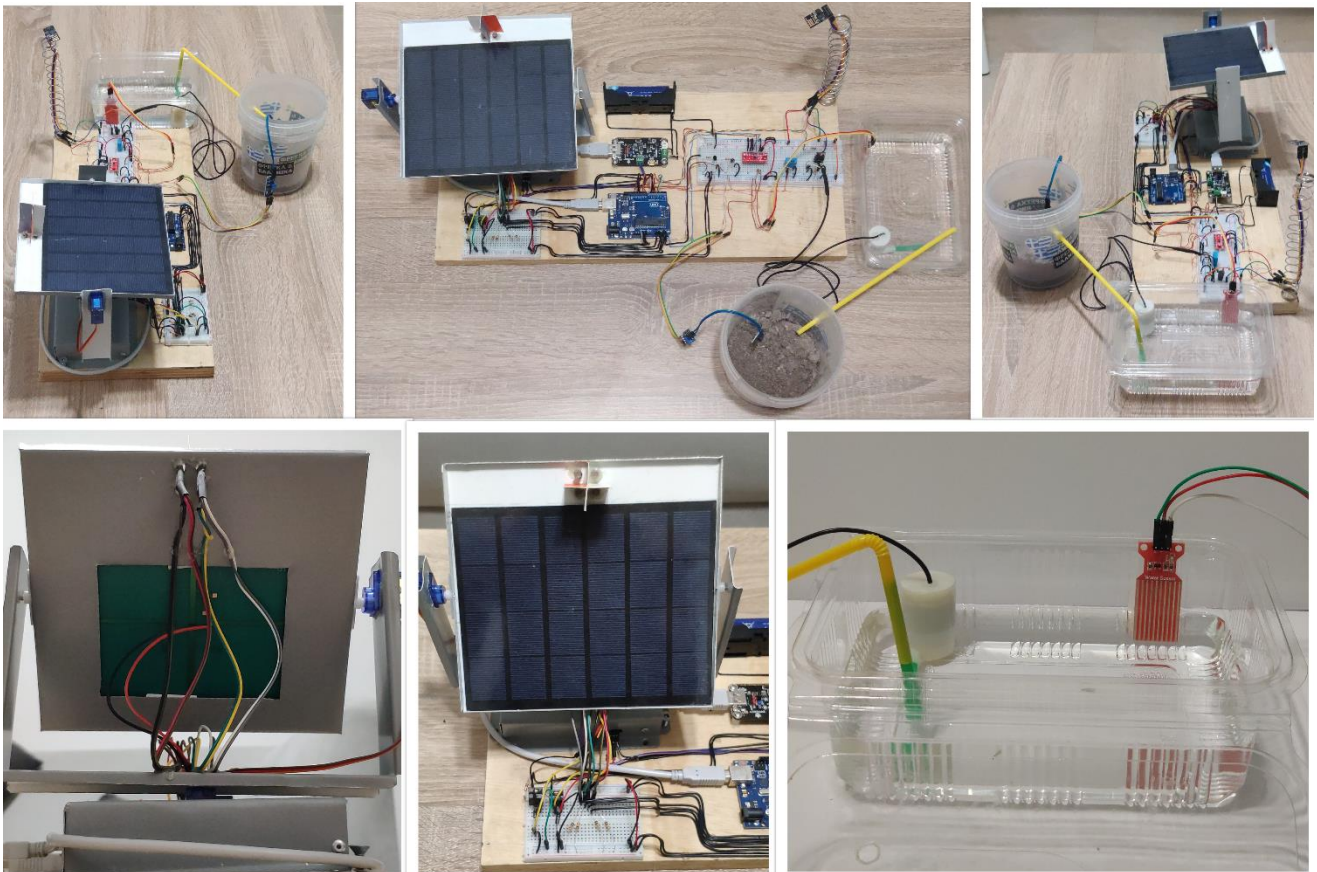
Πιο συγκεκριμένα, συνδέοντας κατάλληλα την αντλία και το κύκλωμα τροφοδοσίας της στο Arduino Uno και αφού έγινε ο απαραίτητος προγραμματισμός του μικροελεγκτή, έγινε αντιληπτό ότι η αντλία λειτουργεί κανονικά. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε μέσα σε ένα δοχείο με νερό και προσκολλήθηκε σε αυτήν ένα κατακόρυφο σωληνάκι μεγάλου μήκους και διαμέτρου 6mm, για να εξακριβωθεί το ύψος, στο οποίο μπορεί να μεταφέρει το νερό, με την τρέχουσα προσφερόμενη ισχύ. Παρατηρήθηκε ότι το μέγιστο ύψος ήταν 40 εκατοστά από τη βάση του δοχείου, αριθμός ικανοποιητικός για τη φύση της διπλωματικής, καθώς αυτό δείχνει ότι η δεξαμενή έχει τη δυνατότητα να τοποθετηθεί χαμηλότερα υψομετρικά από τη γλάστρα με το φυτό, αν χρειαστεί.

Έπειτα σχεδιάστηκε η δεξαμενή, της οποίας απαραίτητη προϋπόθεση ήταν, να έχει ύψος ίσο με το ύψος του αισθητήρα στάθμης, για μην είναι δυνατή η υπέρβαση του και οδηγήσει σε λανθασμένες μετρήσεις ή σε βλάβη του αισθητήρα. Η αντλία τοποθετήθηκε με την είσοδο του νερού σε αυτήν, στο κάτω μέρος της δεξαμενής, για να μπορεί να μεταφέρει τη μέγιστη ποσότητα νερού, χωρίς αυτό να περισσέψει και να μείνει ανεκμετάλλευτο.

Για να επιτευχθεί η μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας από το υποσύστημα της αντλίας, έπρεπε αυτή να μην καταναλώνει πολλή ισχύ, αλλά να μπορεί ταυτόχρονα να ποτίζει αξιόπιστα και για όσο χρόνο χρειάζεται το φυτό. Έτσι ήταν ανάγκη, κατά τη μεταφορά του νερού από την αντλία προς το φυτό, να μην παρουσιάζεται μεγάλη υψομετρική διαφορά, ώστε να μη δαπανάται επιπρόσθετη ενέργεια. Για το λόγο αυτό το φυτό τοποθετήθηκε στο ίδιο ύψος με τη δεξαμενή και το σωληνάκι μεταφοράς, κατά την έξοδό του από το πάνω μέρος της δεξαμενής, συνδέθηκε απευθείας.

Σε αυτή τη διάταξη υπολογίστηκε η παροχή της αντλίας, μετρώντας τον χρόνο που χρειάζεται ένας συγκεκριμένος όγκος νερού να μεταφερθεί εξολοκλήρου. Η τιμή της παροχής που προέκυψε είναι 1 λίτρο ανά λεπτό και επειδή η φύση της διπλωματικής πραγματεύεται την άρδευση σε ένα μικρό φυτό, αποφασίστηκε η μέγιστη διάρκεια ποτίσματος σε κάθε κύκλο αρδεύσεως να είναι 20 δευτερόλεπτα. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε κύκλο (κάθε 10 λεπτά) υπάρχει η δυνατότητα να μεταφερθούν μέχρι και περίπου 300ml νερού, για το πότισμα του φυτού.

Αφού δοκιμάστηκαν επιτυχώς όλα τα υποσυστήματα, συναρμολογήθηκε και δοκιμάστηκε η λειτουργία της ολοκληρωμένης διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, προσαρμόστηκαν όλα τα υποσυστήματα πάνω σε ένα 45x20x2cm κομμάτι κόντρα πλακέ, ενώ το ESP-01 υπερυψώθηκε, για την ενίσχυση του σήματος. Τοποθετήθηκαν κοντά στη διάταξη, η δεξαμενή νερού και μία γλάστρα με χώμα και ενοποιήθηκε ο κώδικας των επιμέρους υποσυστημάτων, ώστε να λειτουργούν συλλογικά, με τον τελικό χρονισμό. Η συνολική διάταξη απεικονίζεται στην εικόνα 4.2, μαζί με τη δεξαμενή νερού και τη γλάστρα με το χώμα.

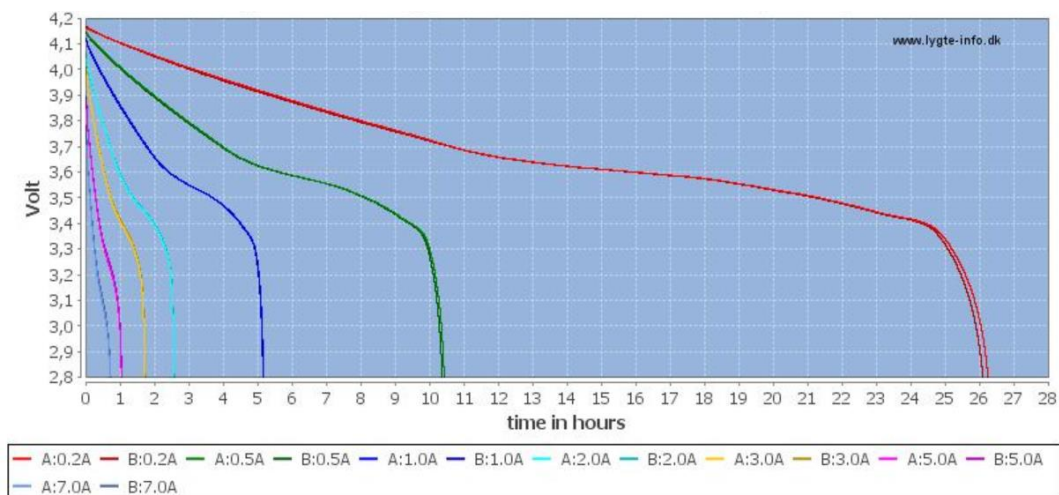


Εικόνα 4.2. Φωτογραφίες ολοκληρωμένης διάταξης.

4.3) Δοκιμή αυτονομίας μπαταρίας

Κρίσιμης σημασίας δοκιμή, για τη διασφάλιση της επιτυχής λειτουργίας του αυτόματου και αυτόνομου συστήματος άρδευσης, αποτελεί η δοκιμή της μπαταρίας και η αυτονομία της για τη διαρκή τροφοδότηση όλων των υποσυστημάτων του. Έχοντας πραγματοποιήσει τους θεωρητικούς υπολογισμούς σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας στην ενότητα 2.5, υλοποιήθηκε η ολοκληρωμένη διάταξη, η οποία δοκιμάζεται με σκοπό την εύρεση της πραγματικής κατανάλωσης ενέργειας. Αυτή η διάταξη περιλαμβάνει την μπαταρία, ως μοναδική πηγή ενέργειας, η οποία τροφοδοτεί το Arduino Uno, μέσω του ηλιακού φορτιστή, χωρίς όμως να έχει συνδεθεί σε αυτόν η φωτοβολταϊκή κυψέλη. Το Arduino Uno με τη σειρά του, αφού προγραμματιστεί κατάλληλα, τροφοδοτεί και ελέγχει όλα τα υπόλοιπα υποσυστήματα.

Αν η μπαταρία καταφέρει να τροφοδοτήσει το αρδευτικό σύστημα για ικανοποιητικό χρονικό διάστημα, τότε αυτό σημαίνει ότι θα είναι ικανή να τροφοδοτήσει σύστημα σε πραγματικές συνθήκες. Η μπαταρία η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος είναι η XTAR 3.7V 5.200mAh. Η καμπύλη αποφόρτισης μίας μπαταρίας με ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά παρουσιάζεται στο γράφημα 4.1 [20].



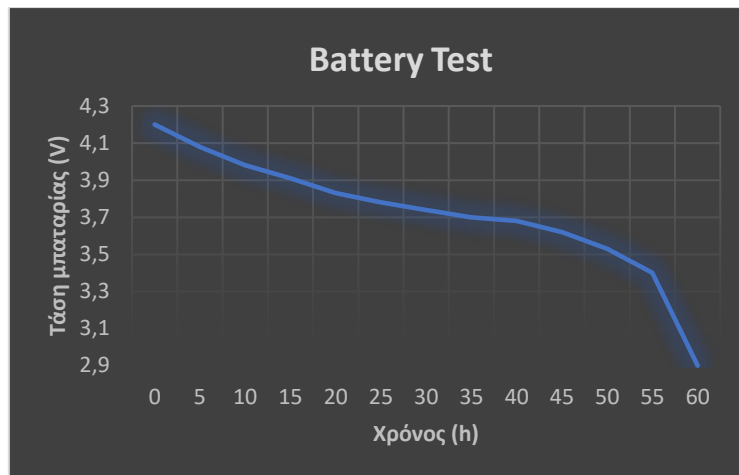
Γράφημα 4.1. Καμπύλη αποφόρτισης παρόμοιας μπαταρίας με την XTAR 26650 3.7V 5200mAh.

Ο κατακόρυφος άξονας περιέχει τις τιμές τάσης της μπαταρίας, ενώ ο οριζόντιος τον χρόνο σε ώρες. Οι διαφορές στις κλίσεις των καμπυλών υπάρχουν λόγω των διαφορετικών ρευμάτων. Έτσι είναι λογικό, όσο μικρότερο το ρεύμα τροφοδοσίας, τόσο μεγαλύτερη η αυτονομία της μπαταρίας. Από το διάγραμμα ακόμη προκύπτει ότι η μέγιστη τάση της μπαταρίας είναι περίπου 4.2V και η ελάχιστη περίπου 2.9 V, στο σημείο δηλαδή που η καμπύλη αποκτά σχεδόν κάθετη κλίση. Το σημείο αυτό αποτέλεσε το όριο κάτω από το οποίο η μπαταρία θεωρείται ανεπαρκής για να τροφοδοτήσει το σύστημα.

Η δοκιμή λοιπόν που πραγματοποιήθηκε, διαρκεί έως ότου διακοπεί η τροφοδοσία του συστήματος, δηλαδή αποφορτιστεί πλήρως η μπαταρία. Με τη χρήση ενός πολυμέτρου, παρακολουθείται διαρκώς η τάση της μπαταρίας και αναγράφεται για διαφορετικές χρονικές στιγμές. Στόχος προκειμένου να θεωρηθεί πετυχημένη η δοκιμή, είναι η αυτονομία της μπαταρίας να είναι ικανοποιητική και να μπορεί να τροφοδοτεί ολόκληρο το σύστημα για τουλάχιστον δύο ημέρες.

Πίνακας 4.3. Δοκιμή μπαταρίας (Τιμές τάσεις - Χρόνος).

Χρόνος (h)	0	5	10	15	20
Τάση (V)	4.2	4.08	3.98	3.91	3.83
Χρόνος (h)	25	30	35	40	45
Τάση (V)	3.78	3.74	3.7	3.68	3.62
Χρόνος (h)	50	55	60	65	70
Τάση (V)	3.53	3.4	2.91	2.89	2.88



Γράφημα 4.2 Διάγραμμα Τάσης Μπαταρίας – Χρόνου.

Το παραπάνω διάγραμμα εκφράζει την τάση της μπαταρίας σε Volt σε σχέση με το χρόνο σε ώρες. Παρατηρώντας τόσο τα δεδομένα όσο και το διάγραμμα φαίνεται μια αρχική πιο απότομη πτώση τάσης όπως ακριβώς και στο γράφημα 4.1. Έπειτα η κλίση γίνεται μικρότερη και παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι την αρχή της πτήσης της με τιμή 3.4V στις 55 ώρες. Με το πέρας των 60 ωρών η τιμή της τάσης της μπαταρίας φτάνει στα 2.9V και παρατηρείται η διακοπή λειτουργίας του συστήματος. Οι τιμές 4.2V και 3.4V χρησιμοποιήθηκαν τελικά για τον υπολογισμό του ποσοστού μπαταρίας βάσει της τρέχουσας τάσης, καθώς όπως φαίνεται η κλίση της ευθείας είναι σχεδόν σταθερή. Έτσι αντικαταστάθηκαν οι προηγούμενες θεωρητικές τιμές βαθμονόμησης του ποσοστού (4.2, 2.9), που προέκυψαν στις προηγούμενες δοκιμές, αφού η πτώση τάσης από τα 3.4 έως τα 2.9V πραγματοποιείται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα και αντιστοιχεί σε πολύ μικρό ποσοστό μπαταρίας. Μπορεί εύκολα δηλαδή, να γίνει ο υπολογισμός του ποσοστού χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή, αν θεωρηθεί ότι τα 4.2V ταυτίζονται με το 100%, ενώ τα 3.4V με το 0%. Η δοκιμή θεωρείται επιτυχημένη, καθώς η μπαταρία κατάφερε να τροφοδοτήσει το σύστημα για περίπου 60 ώρες ή 2.5 μέρες.

4.4) Δοκιμή σε πραγματικές συνθήκες

Κατά τις ρεαλιστικές δοκιμές ολόκληρου του συστήματος, πραγματοποιήθηκε μία 24ωρή δοκιμή σε εξωτερικό χώρο στα μέσα του καλοκαιριού. Πιο συγκεκριμένα δοκιμάστηκε το υποσύστημα του ανιχνευτή ηλίου σε ηλιόλουστη μέρα, η λειτουργία όλων των υποσυστημάτων συνεταίρικά και καταγράφηκαν τα απαραίτητα δεδομένα.

Αρχικά τοποθετήθηκε η δεξαμενή, με τον αισθητήρα στάθμης και την αντλία, σε παρόμοιο ύψος με μία μικρή γλάστρα με ένα μικρό φυτό. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε το σωληνάκι, ώστε να ενώνει την αντλία με τη γλάστρα και τοποθετήθηκε ο αισθητήρας εδάφους στο χώμα του φυτού. Έπειτα, μεταφέρθηκε η διάταξη κοντά στη δεξαμενή και το φυτό, για να συνδεθούν οι αισθητήρες και η αντλία και στη συνέχεια ενεργοποιήθηκε το σύστημα. Για τις αρχικές συνθήκες του συστήματος ίσχυε ότι η αρχική στάθμη του νερού ήταν η μέγιστη δυνατή και το χώμα του φυτού ήταν ξηρό. Στο όριο υγρασίας εδάφους, κάτω από το οποίο πραγματοποιείται άρδευση, δόθηκε η τιμή 60%, ενώ στην τιμή της διάρκειας λειτουργίας της αντλίας σε κάθε κύκλο λειτουργίας (10min), δόθηκε η τιμή

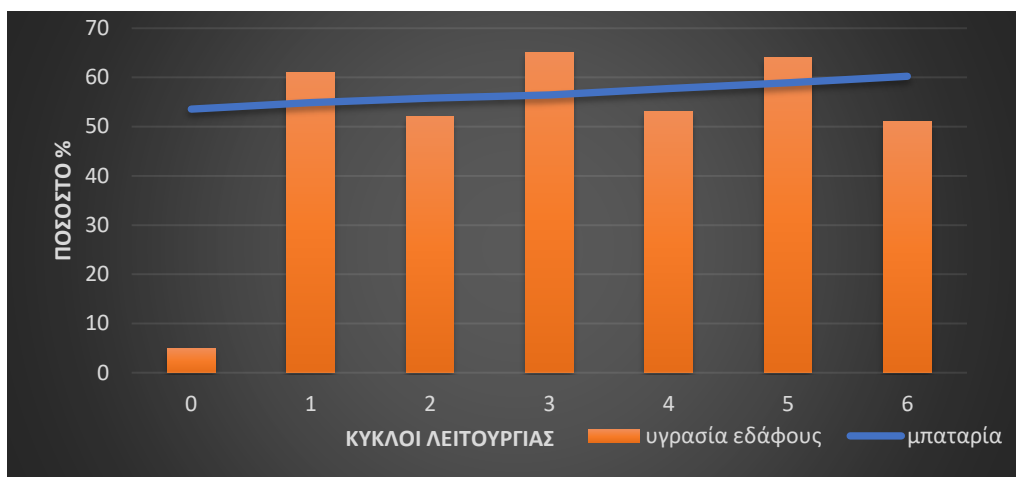
5 sec. Ακόμη, η ενεργοποίηση του συστήματος ξεκίνησε στις 10 το πρωί και απενεργοποιήθηκε μετά από 24 ώρες ακριβώς. Τα αποτελέσματα της δοκιμής λήφθηκαν από την εφαρμογή Virtuino 6 και φαίνονται στον πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4. 24ωρη δοκιμή συστήματος σε πραγματικές συνθήκες.

Ώρα	10:00	10:10	11:00	16:00	20:00	1:00	7:00	10:00
Ποσοστό μπαταρίας	53.57%	54.9%	60.24%	100%	99.6%	93.7%	86.23%	92.3%
Κατάσταση εδάφους	Dry	Wet	Dry	Wet	Wet	Wet	Wet	Wet
Υγρασία εδάφους	5%	61%	51%	65%	62%	72%	65%	63%
Κατάσταση στάθμης	High	High	High	Medium	Medium	Medium	Medium	Low
Τιμή Στάθμης	512	425	423	267	223	201	171	145
Θερμοκρασία	31.52°C	31.67°C	31.87°C	32.43°C	29.70°C	25.30°C	24.00°C	30.37°C
Υγρασία	52.3%	52.2%	52.3%	51.7%	53.3%	63.4%	67.5%	51.6%
Κατάσταση ανιχνευτή	Centralized	Centralized	Centralized	Centralized	Centralized	Night	Night	Centralized
T-D Degrees	90°	76°	85°	92°	120°	90°	90°	74°
L-R Degrees	90°	46°	48°	45°	40°	90°	90°	45°

Στον πίνακα 4.4 παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της ημέρας με ηλιοφάνεια, το ποσοστό μπαταρίας ανεβαίνει, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας φθίνει. Αυτό συμβαίνει γιατί ο ηλιακός φορτιστής χρησιμοποιεί ένα μέρος της παραγόμενης ενέργειας του φωτοβολταϊκού, για να τροφοδοτήσει το σύστημα, ενώ το υπόλοιπο διοχετεύεται στην μπαταρία φορτίζοντάς τη. Ακόμη, παρατηρείται ότι το χώμα του φυτού διατηρείται κοντά στην όριο εδάφους (60%), αφού πραγματοποιούνται τακτικοί έλεγχοι για πότισμα. Αυτός είναι και ο λόγος που η στάθμη της δεξαμενής σταδιακά φθίνει. Η θερμοκρασία και υγρασία αέρα έπαιρναν έγκυρες τιμές, αφού συγκρίνονταν με εξωτερικό θερμόμετρο και υγρασιόμετρο. Τέλος, είναι φανερό ότι ο ανιχνευτής ηλίου εντοπίζει αξιοπρεπώς τη θέση του ηλίου κατά τη διάρκεια της ημέρας και επιστρέφει στην αρχική του θέση κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Αξίζει παρατηρηθούν οι μεταβολές των τιμών του ποσοστού υγρασίας εδάφους και μπαταρίας ανά κύκλο λειτουργίας, για να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία του συστήματος. Ενδεικτικά στο γράφημα 4.3 παρουσιάζονται οι μεταβολές αυτές, για τους πρώτους 6 κύκλους λειτουργίας από την αρχή των δοκιμών, δηλαδή για μία ώρα, από τις 10:00 έως τις 11:00 π.μ.



Γράφημα 4.3 Διάγραμμα υγρασίας εδάφους & μπαταρίας – κύκλων λειτουργίας, σε πρωινές ώρες.

Είναι φανερό ότι το ποσοστό μπαταρίας αυξάνεται σχεδόν γραμμικά, αφού υπάρχει σταθερή παροχή ενέργειας από τον φωτοβολταϊκό και το σύστημα έχει σχετικά σταθερή κατανάλωση. Ακόμη φαίνεται ότι κατά την εκκίνηση του προγράμματος πραγματοποιήθηκε η άρδευση του φυτού, αφού το αρχικό ποσοστό υγρασίας ήταν 5% και στον πρώτο κύκλο μετρήθηκε 61%. Έτσι, στον πρώτο κύκλο δεν πραγματοποιήθηκε πότισμα, με αποτέλεσμα στον δεύτερο κύκλο το ποσοστό υγρασίας να είναι μικρότερο. Κατά τη διάρκεια αυτών των 6 κύκλων, εναλλάσσεται η απόφαση για το αν θα γίνει ή όχι το πότισμα του φυτού, με αποτέλεσμα η υγρασία του εδάφους του να έχει τιμές κοντά στο όριο εδάφους (60%).

Στο γράφημα 4.4 παρουσιάζονται οι μεταβολές του ποσοστού υγρασίας εδάφους και μπαταρίας ανά κύκλο λειτουργίας, για τους 6 κύκλους λειτουργίας, από τις 1:00 έως τις 2:00 π.μ.



Γράφημα 4.4 Διάγραμμα υγρασίας εδάφους & μπαταρίας – κύκλων λειτουργίας, σε βραδινές ώρες.

Στο γράφημα φαίνεται ότι το ποσοστό μπαταρίας φθίνει σχεδόν γραμμικά, αφού το σύστημα καταναλώνει σχετικά σταθερή ενέργεια και το φωτοβολταϊκό δεν παρέχει ενέργεια στο σύστημα, καθώς οι συγκεκριμένη δοκιμή πραγματοποιήθηκε βραδινές ώρες. Ακόμη είναι φανερό ότι στους πρώτους 2 κύκλους δεν έγινε το πότισμα του φυτού και για αυτό το ποσοστό υγρασίας φθίνει, ενώ στον τρίτο κύκλο ποτίστηκε, αφού είχε το ποσοστό υγρασίας μετρήθηκε 54%, και για αυτό στον επόμενο κύκλο το ποσοστό αυτό πάλι αυξήθηκε.

Συγκρίνοντας τα γραφήματα 4.3 και 4.4, δηλαδή τη λειτουργία του συστήματος κατά τη διάρκεια της μέρας και της νύχτας, παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της μέρας το ποσοστό μπαταρίας αυξάνεται και η άρδευση γίνεται αρκετά συχνά, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας το ποσοστό μπαταρίας φθίνει και η άρδευση γίνεται σπανιότερα. Αυτό παρατηρείται, διότι με την άνοδο της θερμοκρασίας και την πτώση της υγρασίας του αέρα κατά τη διάρκεια της ημέρας, το νερό ποτίσματος εξατμίζεται γρηγορότερα από ότι κατά τη διάρκεια της νύχτας, συμβάλλοντας στη συχνότερη ενεργοποίηση της αντλίας. Και στις δύο περιπτώσεις όμως, διατηρείται σχετικά σταθερό και κοντά στο επιθυμητό όριο, το επίπεδο υγρασίας του εδάφους.

4.4) Πραγματικός ενεργειακός προϋπολογισμός

Κατά τη δοκιμή της ολοκληρωμένης διάταξης του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες μετρήθηκε η κατανάλωση ενέργειας της κάθε κατάστασης, για να προκύψει ο πραγματικός, συνολικός ενεργειακός προϋπολογισμός. Ακόμη, μετρήθηκαν και αναλύθηκαν τα δεδομένα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας της φωτοβολταϊκής κυψέλης στον ηλιακό φορτιστή. Πιο συγκεκριμένα μετρήθηκε η τάση και το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού κατά τη διάρκεια ηλιοφάνειας και συννεφιάς. Κατά την περίοδο ηλιοφάνειας το φωτοβολταϊκό κατάφερε να αποδώσει 3.5Watt, παρέχοντας 6.1V τάση εξόδου και 570mA ρεύμα εξόδου, ενώ κατά την περίοδο συννεφιάς απέδωσε 0.8Watt, παρέχοντας 5V τάση εξόδου και 160mA ρεύμα εξόδου.

Αφού καταγράφηκαν οι απαραίτητες μετρήσεις ενεργειακών απαιτήσεων, κατασκευάστηκε ο πίνακας 4.5.

Πίνακας 4.5. Πραγματικός ενεργειακός προϋπολογισμός.

System's State	Supply Voltage(V)	Operating Current (mA)	Standby Current (mA)	Duty Cycle (Operating Time/Total time)	How much mWh (per Hour) When Operating	How much mWh (per Hour) When on Standby	Total mWh (per Hour)	Operation (Estimated time: 1 Day & 1 Week)
Tracking	5	250	0	2,50%	31,25	0,00	31,25	
Sending	5	150	0	5,10%	38,25	0,00	38,25	
Measuring	5	65	0	1,70%	5,53	0,00	5,53	
Watering	5	250	0	3,40%	42,50	0,00	42,50	
Waiting	5	45	0	87,30%	196,43	0,00	196,43	
								Total Daily Consumption (mWh): 7535,04
								Total Weekly Consumption (mWh) 52745,28
Sky condition/Solar Panel	Output Voltage (V)	Output Current (mA)	Output Power (W)	Energy production per day (mWh)	Energy production per day to system (mWh)	Energy production per week (mWh)	Energy production per week to system (mWh)	Supplied Energy by battery (mWh): 18838
sunny	6.1	570	3.5	21000	18060	147000	126420	
cloudy	5	160	0.8	4800	4128	33600	28896	

Η μέτρηση της κατανάλωσης ρεύματος λειτουργίας της κάθε κατάστασης, πραγματοποιήθηκε παρεμβάλλοντας το αμπερόμετρο στο καλώδιο USB, που συνδέει τον ηλιακό φορτιστή με το Arduino Uno. Λαμβάνοντας υπόψιν το πιο ενεργειακά απαιτητικό σενάριο, υπολογίστηκαν οι κύκλοι λειτουργίας (duty cycles). Συγκεκριμένα ο κύκλος λειτουργίας του ανιχνευτή ανέρχεται στο 2.5% του συνολικού χρόνου, αναλογιζόμενης της χειρότερης περίπτωσης λειτουργίας του, για 50 δευτερόλεπτα κάθε 10 λεπτά, κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο κύκλος λειτουργίας της κατάστασης αποστολής και λήψης ανέρχεται στο 5.1% του χρόνου, αφού λειτουργεί κάθε 10 λεπτά για 30 δευτερόλεπτα και ο κύκλος λειτουργίας της κατάστασης μετρήσεων στο 1.7%, αφού λειτουργεί κάθε 10 λεπτά για 10 δευτερόλεπτα. Αν η αντλία χρησιμοποιείται σε κάθε κύκλο λειτουργίας με τη μέγιστη

δυνατή διάρκεια (20sec), τότε το duty cycle της κατάστασης ποτίσματος ανέρχεται στο 3,4%. Τέλος, κατά το υπολειπόμενο ποσοστό χρόνου (87,3%), το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση αναμονής.

Γνωρίζοντας την τάση τροφοδοσίας, το ρεύμα λειτουργίας και τον κύκλο λειτουργίας, υπολογίζεται η ωριαία κατανάλωση ενέργειας της κάθε κατάστασης. Εάν προστεθούν οι επιμέρους καταναλώσεις προκύπτει η συνολική ωριαία κατανάλωση του συστήματος και έπειτα υπολογίζεται η ημερήσια και η εβδομαδιαία.

Όσον αφορά τα δεδομένα του φωτοβολταϊκού πάνελ, υπολογίστηκαν οι εβδομαδιαίες παροχές ενέργειας σε δύο διαφορετικές συνθήκες καιρού, που παραμένουν σταθερές. Πιο συγκεκριμένα, το πάνελ παράγει περίπου 21000mWh ενέργειας αποδίδοντας τη μέγιστη ισχύ για περίπου 6 ώρες μία ηλιόλουστη μέρα, ενώ σε μία συννεφιασμένη παράγει περίπου 4800mWh σε 6 ώρες, αποδίδοντας 0.8W ισχύ. Ακόμη λήφθηκαν υπόψιν οι ονομαστικές απώλειες του ηλιακού φορτιστή, ο οποίος φορτίζει την μπαταρία με περίπου 73% απόδοση, ενώ τροφοδοτεί το σύστημα με περίπου 86% απόδοση και προέκυψαν οι τιμές ενέργειας που τροφοδοτούν το σύστημα σε κάθε περίπτωση. Να σημειωθεί επίσης ότι κατά τις μετρήσεις το φωτοβολταϊκό βρισκόταν κάθετα στον ήλιο, όπως ακριβώς και κατά τη λειτουργία του σε πραγματικές συνθήκες. Η μπαταρία από την άλλη πλευρά, κατά την αποφόρτιση της το βράδυ, χάνει περίπου 3800mWh οι οποίες πρέπει να ανανεωθούν μέσω της φόρτισης, για να επιτευχθεί η διαρκής λειτουργία του συστήματος. Για να καλυφθούν όμως και οι ημερήσιες ανάγκες του συστήματος και η ανανέωση της χαμένης ενέργειας κατά τη διάρκεια της νύχτας, υπολογίστηκε ότι το φωτοβολταϊκό πρέπει να παρέχει σταθερά 9200mWh ενέργειας τη μέρα, δηλαδή να αποδίδει το βέλτιστο (3.5W) για περίπου 2.5 ώρες τη μέρα ή περίπου 0.8W για 12 ώρες τη μέρα.

Σε βάθος χρόνου μίας εβδομάδας με σταθερή ηλιοφάνεια, το σύστημα μπορεί να καλύψει και με το παραπάνω τις ενεργειακές του ανάγκες, αφού το πάνελ παρέχει στο σύστημα υπερδιπλάσια ενέργεια από αυτή που χρειάζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ τις βραδινές ώρες η μπαταρία μπορεί με ευκολία να τροφοδοτήσει το σύστημα και να επαναφορτιστεί την επόμενη. Στην περίπτωση όμως που ο ουρανός διατηρείται για μία εβδομάδα νεφελωμένος, η ενέργεια που προσφέρει το πάνελ στο σύστημα κατά τη διάρκεια την ημέρας υπερβαίνει για λίγο αυτή που χρειάζεται, χωρίς να περισσεύει πολλή ενέργεια για να φορτιστεί η μπαταρία. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια της μέρας, η μπαταρία θα φορτίζεται με αργούς ρυθμούς, καθώς ο διαχειριστής ενέργειας θα τη φορτίζει με το υπόλοιπο μέρος της ενέργειας από το φωτοβολταϊκό, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας θα αποφορτίζεται κανονικά. Με βάση την ημερήσια κατανάλωση του συστήματος, την ημερήσια παροχή του πάνελ και με πλήρως φορτισμένη μπαταρία, προκύπτει ότι κάθε μέρα η μπαταρία θα αποφορτίζεται κατά περίπου 3,400mWh μέχρι να αποφορτιστεί εντελώς, γεγονός που θα συμβεί μετά από 5,5 μέρες. Συνεπώς, είναι αναγκαία η ύπαρξη ηλιοφάνειας για της αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος.

5^ο κεφάλαιο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ

Στο τελευταίο κεφάλαιο αυτής της διπλωματικής εργασίας θα σχολιαστούν τα συμπεράσματα και τα προβλήματα τα οποία προέκυψαν καθώς και κάποιες πιθανές βελτιώσεις ως μελλοντικά βήματα.

5.1) Συμπεράσματα και προβλήματα που προέκυψαν

Τα προβλήματα τα οποία προέκυψαν ήταν ποικίλα και εμφανίστηκαν σε διάφορες φάσεις της διπλωματικής εργασίας. Παρακάτω αναλύονται με χρονολογική σειρά, μαζί με τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν κατά τη διαδικασία αντιμετώπισης τους.

Κατά τη διαδικασία σχεδίασης των κυκλωμάτων και της επιλογής των εξαρτημάτων, μπαίνει κανείς στη θέση να διαλέξει τα εξαρτήματα τα οποία θα λειτουργήσουν όσο το δυνατόν πιο κοντά στο ιδανικό γίνεται. Καθώς τα κυκλώματα σχεδιάζονται σταδιακά, τα εξαρτήματα τα οποία χρησιμοποιούνται επίσης επιλέγονται σταδιακά. Η διαδικασία της σχεδίασης από μόνη της μπορεί να διαρκέσει μέχρι και μερικούς μήνες, ανάλογα με την περιπλοκότητα του project και τα εξαρτήματα συνήθως παραγγέλλονται όλα μαζί στο τέλος, μιας και τις περισσότερες φορές είναι από τον ίδιο πάροχο, άρα συμφέρει οικονομικά να γίνει μια μεγάλη συνολική παραγγελία.

Το πρώτο πρόβλημα που προκύπτει, είναι το γεγονός ότι μπορεί να βρεθεί ένα εξάρτημα το οποίο είναι ιδανικό για το κύκλωμα, αλλά να έχει υψηλό κόστος και να πρέπει να αντικατασταθεί από μια λιγότερη ιδανική, πιο οικονομική επιλογή. Το δεύτερο πρόβλημα είναι αυτό της διαθεσιμότητας. Καθώς τα εξαρτήματα είναι πολλά και επιλέγονται σταδιακά, μέχρι να γίνει η τελική παραγγελία, κάποιο από αυτά μπορεί να μην είναι πλέον διαθέσιμο. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να επιλεγεί κάποιο διαφορετικό εξάρτημα, για να το αντικαταστήσει.

Κατά τον υπολογισμό του θεωρητικού ενεργειακού προϋπολογισμού, έγινε αντιληπτό ότι δεν είναι δυνατή η διασφάλιση την αυτονομίας του συστήματος, βάσει των θεωρητικών καταναλώσεων των επιμέρους εξαρτημάτων. Το πρόβλημα αυτό λύθηκε με τη χρήση κυκλωμάτων διακοπών και άλλες τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας, ώστε να εξαρτήματα να μην καταναλώνουν ενέργεια όταν δε χρησιμοποιούνται.

Στη διάρκεια σχεδίασης της ολοκληρωμένης διάταξης, έγινε αντιληπτό ότι οι αναλογικές είσοδοι του Arduino δεν επαρκούν για την πλήρη λειτουργία του συστήματος. Για να μην αναβαθμιστεί η πλακέτα του μικροελεγκτή σε μία με περισσότερες εισόδους, διαδικασία εξαιρετικά χρονοβόρα και κοστοβόρα, το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε χρησιμοποιώντας ένα πολυπλέκτη. Σκοπός του ήταν σε μία είσοδο του Arduino να στέλνει μετρήσεις από δύο διαφορετικούς αισθητήρες σε διαφορετικές χρονικές στιγμές από τον καθένα. Έτσι το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε σχετικά εύκολα.

Κατά τη διαδικασία κατασκευής της διάταξης χρειάστηκε να γίνουν κάποιες κολλήσεις με κολλητήρι και καλάνι, γιατί παρατηρήθηκαν δυσλειτουργίες. Αυτές πραγματοποιήθηκαν στο υποσύστημα του ανιχνευτή ηλίου και συγκεκριμένα στις ενώσεις των ακροδεκτών των φωτοαντιστάσεων. Ακόμη, πραγματοποιήθηκε η κόλληση εξωτερικών ακροδεκτών στον πολυπλέκτη, για να γίνει συμβατός με breadboard και να γίνει ευκολότερη η διαχείρισή του.

Η αρχική συγγραφή του κώδικα ήταν μία διαδικασία κατά την οποία δεν αντιμετωπίστηκαν σημαντικά προβλήματα. Το προγραμματιστικό περιβάλλον Arduino IDE προσφέρει πάρα πολλές δυνατότητες σε συνδυασμό με την κοινότητα Arduino. Από εκεί και πέρα, η διαδικασία συγγραφής συμπεριλαμβάνει δοκιμές και διορθώσεις μέχρι να υπάρχει το αναμενόμενο αποτέλεσμα.

Τελευταίο και πιο σημαντικό στάδιο στην ανάπτυξη του αρδευτικού συστήματος, καθώς και αυτό που προκάλεσε το περισσότερα προβλήματα ήταν η φάση των δοκιμών. Στη φάση των δοκιμών εμφανίζονται λάθη τα οποία είχαν γίνει στις προηγούμενες φάσεις και δεν είχαν ανακαλυφθεί. Είναι η διαδικασία κατά την οποία δοκιμάζεται εντατικά και σε διάφορες συνθήκες η συνεργασία των διαφόρων εξαρτημάτων και η ολική λειτουργικότητα του συστήματος, ώστε να βρεθούν πιθανά λάθη για να μην προκύψουν κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του. Κατά τη διάρκεια δοκιμών προέκυψε ένα σημαντικό πρόβλημα. Αυτή ήταν η λειτουργία του απομακρυσμένου ελέγχου του συστήματος. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η δημοφιλής εφαρμογή Blynk IoT, η οποία λειτουργούσε κανονικά στις δοκιμές του υποσυστήματος απομακρυσμένου ελέγχου, αλλά όχι κατά τις δοκιμές της ολοκληρωμένης διάταξης. Αυτό γιατί χρησιμοποιούσε ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό της μνήμης του Arduino Uno σε συνδυασμό με το υπόλοιπο πρόγραμμα, με αποτέλεσμα να μην καταφέρνει να λαμβάνει και να στέλνει τα δεδομένα. Έτσι αντικαταστάθηκε από την εφαρμογή απομακρυσμένου ελέγχου Virtuino 6, η οποία έχει μικρότερες απαιτήσεις μνήμης. Κατά τις πρώτες δοκιμές της εφαρμογής Virtuino 6, παρατηρήθηκε η αδυναμία αλληλεπίδρασης με το ESP-01. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε γρήγορα αναβαθμίζοντας το firmware του WiFi module.

Ένα ακόμα πρόβλημα που προέκυψε είναι, ότι δεν μπορούν να προσομοιωθούν εύκολα οι καιρικές συνθήκες σε μια ρεαλιστική μακροχρόνια δοκιμή επίδοσης της φωτοβολταϊκής κυψέλης, καθώς τα μετεωρολογικά φαινόμενα μεταβάλλονται διαρκώς. Έτσι μελετήθηκε η παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού στις περιπτώσεις ηλιοφάνειας και αραιής συννεφιάς, σχηματίζοντας δύο διαφορετικά προσδόκιμα λειτουργίας.

Φυσικά, σε πολλές από τις δοκιμές προέκυψαν τεχνικά προβλήματα. Πολλές από αυτές χρειάστηκε να επαναληφθούν πολλές φορές μέχρι να επιτευχθεί αξιόπιστα και με συνέπεια το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αυτά όμως δε θεωρούνται σημαντικά προβλήματα, καθώς αυτή είναι η λογική των δοκιμών. Κάποιες από τις δοκιμές προκάλεσαν ακόμα και ζημιές σε διάφορα εξαρτήματα, τα οποία έπρεπε αργότερα να αντικατασταθούν. Ακόμα και αυτό όμως είναι μέρος της διαδικασίας του να προετοιμαστεί το αυτόματο και αυτόνομο αρδευτικό σύστημα, όσο το δυνατόν περισσότερο, για τη λειτουργία του σε πραγματικές συνθήκες.

5.2) Πιθανές βελτιώσεις και μελλοντικά βήματα

Στην τελευταία ενότητα αυτής της διπλωματικής εργασίας αναφέρονται οι πιθανές βελτιώσεις οι οποίες θα μπορούσαν να γίνουν καθώς και τα μελλοντικά βήματα. Στόχος είναι να αναγνωριστούν οι αδυναμίες του αρδευτικού συστήματος, οι οποίες θα μπορούσαν να βελτιωθούν, αλλά και να προσδιοριστούν τα μελλοντικά βήματα, τα οποία θα γινόταν, προκειμένου να δοκιμαστεί περισσότερο το σύστημα άρδευσης, για να θεωρηθεί μια αξιόπιστη λύση, για το ελεγχόμενο πότισμα ενός φυτού.

Μία από τις αρχικές βελτιώσεις οι οποίες θα μπορούσαν να γίνουν είναι η επιλογή καλύτερων εξαρτημάτων και η σχεδίαση και κατασκευή μίας ενιαίας πλακέτας για την εξοικονόμηση

χώρου, ενώ θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί και η αδιαβροχοποίηση της διάταξης για την ενίσχυση της αντοχής και της μακροζωίας του συστήματος. Η αγορά ηλεκτρονικών είναι γεμάτη με μικροελεγκτές πολύ πιο γρήγορους, εξελιγμένους ενεργειακά οικονομικότερους από αυτόν του αρδευτικού συστήματος, ενώ υπάρχουν αισθητήρες εδάφους, στάθμης νερού και θερμοκρασίας, που έχουν πολύ καλύτερη ακρίβεια και χαμηλότερη κατανάλωση. Το σύστημα απομακρυσμένου ελέγχου, θα μπορούσε να χρησιμοποιεί, αντί του WiFi module, ένα GPRS/GSM module, ώστε να πραγματοποιείται σύνδεση στο διαδίκτυο μέσω μιας κάρτας SIM, χωρίς να είναι απαραίτητη η ύπαρξη δικτύου WiFi, δηλαδή ακόμη και σε αγροτικές καλλιέργειες. Ακόμη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μπαταρία μεγαλύτερης χωρητικότητας, για την αύξηση της αυτονομίας του συστήματος, αλλά και μία εξωτερική γεννήτρια η οποία θα ενεργοποιείται για να τροφοδοτήσει το σύστημα, όταν το ποσοστό της μπαταρίας είναι πολύ χαμηλό, ώστε ακόμη και σε μεγάλα χρονικά διαστήματα πυκνής συννεφιάς, να διασφαλίζεται η αυτονομία του. Επίσης, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μία πιο αποδοτική και ποιοτική αντλία, με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Προφανώς, όταν γινόταν η επιλογή των εξαρτημάτων λήφθηκαν όλοι αυτοί οι παράγοντες υπόψιν. Η χαμηλή τιμή, η διαθεσιμότητα και η ευκολία στον προγραμματισμό ήταν από τους κύριους λόγους για τους οποίους επιλέχθηκαν τα περισσότερα εξαρτήματα αντί άλλων, με καλύτερες επιδόσεις. Κάποιος θα μπορούσε να επιλέξει το καλύτερο θερμόμετρο της αγοράς και να ξοδέψει μήνες γράφοντας τον κώδικα που χρειάζεται, για να λειτουργήσει. Από την οπτική της υλοποίησης της συγκεκριμένης διπλωματικής, οι επιλογές που έγιναν ήταν οικονομικά και χρονικά λογικές, ενώ παρέμεναν επαρκείς και ικανοποιητικές, για την ανάπτυξη ενός καλού και λειτουργικού αυτόματου και αυτόνομου αρδευτικού συστήματος.

Συνεχίζοντας με τον κώδικα του συστήματος, υπάρχουν διάφορες τεχνικές οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η αξιοπιστία και η εμπειρία χρήσης. Θα μπορούσε, για παράδειγμα, να υπάρχει συνεχόμενη παρακολούθηση των δεδομένων των αισθητήρων και όχι κάθε 10 λεπτά. Αυτό βέβαια θα σήμαινε τη διαρκή λειτουργία των υποσυστημάτων μέτρησης και αποστολής και λήψης, με αποτέλεσμα τη δραματική αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας και την ενδεχόμενη αντικατάσταση του υποσυστήματος παροχής ενέργειας. Ακόμη, κατά τη δοκιμή του συστήματος παρατηρήθηκε ότι οι μετρήσεις των αισθητήρων παρουσιάζουν θόρυβο και ανακρίβειες στις μετρήσεις. Αυτό μπορεί να εξομαλυνθεί με τη χρήση φίλτρων, ένα από τα πιο διαδεδομένα είναι το Kalman filter. Παρόλα αυτά ενδέχεται οι υπολογισμοί οι οποίοι γίνονται να καθυστερούν το μικροελεγκτή, άρα να πρέπει να αντικατασταθεί από κάποιον γρηγορότερο για να μην επιβραδυνθεί συνολικά, ο αλγόριθμος. Οι μετρήσεις των αισθητήρων που δοκιμάστηκαν κρίθηκαν αρκετά ικανοποιητικές και αρκούσαν για να λαμβάνονται οι σωστές αποφάσεις, άρα αυτό το σενάριο βελτίωσης δεν ερευνήθηκε περαιτέρω.

Προχωρώντας με τη φάση των δοκιμών, οι αισθητήρες του συστήματος θα μπορούσαν να είχαν δοκιμαστεί περεταίρω, προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία τους. Ενδεικτικά ο αισθητήρας στάθμης νερού, θα μπορούσε να δοκιμαστεί σε δεξαμενές με νερό διαφορετικής θερμοκρασίας και σύστασης, παράγοντες που επηρεάζουν την αγωγιμότητα του και ενδεχομένως τις τιμές των μετρήσεων. Ακόμη, ο αισθητήρας εδάφους θα μπορούσε να δοκιμαστεί σε εδάφη διαφορετικής χημικής σύστασης και σε διαφορετικές υγρασίες, για να εξασφαλιστούν εγκυρότερες μετρήσεις και να κατασκευαστεί μία πιο βελτιωμένη φόρμουλα στην εύρεση του ακριβούς ποσοστού υγρασίας. Επιπλέον, θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν εντατικές δοκιμές της επίδοσης της φωτοβολταϊκής κυψέλης σε διαφορετικές συνθήκες καιρού και θερμοκρασίας, για τον

ακριβέστερο υπολογισμό της παρεχόμενης ενέργειας και την εύρεση ενός εγκυρότερου ενεργειακού προϋπολογισμού. Δεδομένου ότι όλες αυτές οι δοκιμές απαιτούσαν μη διαθέσιμο χρόνο και εξοπλισμό, δεν ήταν δυνατή η πραγματοποίησή τους. Μιας και τα εξαρτήματα τα οποία χρησιμοποιούνται είναι ευρέως διαδεδομένα και αρκετά δοκιμασμένα, τόσο από τις κατασκευάστριες εταιρίες, όσο και από άλλους χρήστες, ώστε να θεωρούνται αξιόπιστα. Παρόλα αυτά, οι δοκιμές αυτές, θα μπορούσαν σίγουρα να αποτελούν μελλοντικά βήματα της ανάπτυξης του αρδευτικού συστήματος, καθώς θα συντελούσαν στη διασφάλιση της καλύτερης λειτουργίας του.

Όλες οι παραπάνω δοκιμές προετοιμάζουν το σύστημα όσο περισσότερο γίνεται, προκειμένου να αυξήσουν τις πιθανότητες του να λειτουργήσει σωστά σε πραγματικές συνθήκες. Για να θεωρείται όμως ολοκληρωμένη η διαδικασία της ανάπτυξης και δοκιμής ενός αυτόματου και αυτόνομου αρδευτικού συστήματος στα πλαίσια παραγωγής, οφείλει να δοκιμαστεί πολλαπλές φορές η λειτουργικότητα του σε πραγματικές συνθήκες και να τοποθετηθεί σε ένα πιο κομψό και στιβαρό πακέτο. Για το λόγο αυτό, πρωτεύων μελλοντικό βήμα είναι η κατασκευή ενός PCB που να περιέχει όλα τα εξαρτήματα της διάταξης και να διαθέτει ακροδέκτες για τη σύνδεση των αισθητήρων, της αντλίας, των σερβοκινητήρων και των φωτοαντιστάσεων. Μία ακόμα μελλοντική κίνηση είναι, η σχεδίαση και η κατασκευή ενός αδιάβροχου πλαστικού κουτιού μέσω 3D εκτυπωτή, για να τοποθετηθεί μέσα η πλακέτα, και στο πάνω μέρος του να φιλοξενεί τον ανιχνευτή ηλίου.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, εξετάστηκε λεπτομερώς η σχεδίαση, κατασκευή και οι δοκιμές ενός αυτόματου και αυτόνομου αρδευτικού συστήματος. Η διαδικασία αυτή αποδείχθηκε απαιτητική, περίπλοκη και δαπανηρή. Παρουσιάστηκαν πρακτικά παραδείγματα και αναλύθηκαν λεπτομερώς πολλά από τα βήματα που απαιτούνται για την υλοποίηση αυτού του έργου. Επιπλέον, προτάθηκαν βελτιώσεις και μελλοντικά βήματα τα οποία, παρά τη δυσκολία τους, παραμένουν εφικτά. Μέσα από τη δική μου εμπειρία, επιδίωξα να προσφέρω μια ολοκληρωμένη εικόνα των απαραίτητων βημάτων για την ανάπτυξη αυτού του συστήματος. Ελπίζω ότι η εργασία αυτή θα βοηθήσει τον αναγνώστη να αποκτήσει μια ευρύτερη και πιο σφαιρική κατανόηση της διαδικασίας αυτής και ότι, έστω και ελάχιστα, θα συμβάλλει στη διάδοση του ενδιαφέροντος κλάδου της γεωργικής τεχνολογίας στην Ελλάδα.

Βιβλιογραφία

- [1] Green, G., Sunding, D. L., Zilberman, D., & Parker, D. (1996). Explaining Irrigation Technology Choices: A Microparameter approach. *American Journal of Agricultural Economics*, 78(4), 1064–1072. <https://doi.org/10.2307/1243862>
- [2] Elijah, O., Rahman, T. A., Orikumhi, I., Leow, C. Y., & Hindia, M. N. (2018). An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(5), 3758–3773. <https://doi.org/10.1109/jiot.2018.2844296>
- [3] *Arduino - home*. (n.d.). <https://www.arduino.cc/> (Last accessed: 28/10/2023)
- [4] https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74HC_HCT4051.pdf (Last accessed: 28/10/2023)
- [5] <https://www.microchip.ua/wireless/esp01.pdf> (Last accessed: 28/10/2023)
- [6] <https://components101.com/modules/soil-moisture-sensor-module> (Last accessed: 28/10/2023)
- [7] <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/p2n2222a-d.pdf> (Last accessed: 28/10/2023)
- [8] <https://www.biomaker.org/block-catalogue/2021/12/17/water-level-sensor-tzt-water-level-sensor> (Last accessed: 28/10/2023)
- [9] <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf> (Last accessed: 28/10/2023)
- [10] *SG90 datasheet*. (n.d.). <https://datasheetspdf.com/pdf-file/791970/TowerPro/SG90/1> (Last accessed: 28/10/2023)
- [11] <https://www.vishay.com/docs/91017/irf520.pdf> (Last accessed: 28/10/2023)
- [12] <https://www.vishay.com/docs/88525/1n5817.pdf> (Last accessed: 28/10/2023)
- [13] <https://5.imimg.com/data5/IQ/GJ/PF/SELLER-1833510/dc-mini-submersible-water-pump.pdf> (Last accessed: 28/10/2023)
- [14] <https://www.xtar.cc/product/XTAR-26650-5200mAh-Battery-72.html> (Last accessed: 28/10/2023)
- [15] <https://store.arduino.cc/products/6-volt-3-5-watt-solar-panel> (Last accessed: 28/10/2023)
- [16] https://wiki.dfrobot.com/Solar_Power_Manager_5V_SKU_DFR0559 (Last accessed: 28/10/2023)
- [17] <https://www.kth.se/social/files/54ef17dbf27654753f437c56/GL5537.pdf> (Last accessed: 28/10/2023)
- [18] <https://www.arduino.cc/en/software> (Last accessed: 28/10/2023)
- [19] <https://virtuino.com> (Last accessed: 28/10/2023)
- [20] <https://budgetlightforum.com/t/test-review-of-keeppower-26650-5200mah-black-2014/27328> (Last accessed: 28/10/2023)