ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ

Πρόγραμμα Σπουδών: Μηχανικών Πληροφορικής

Πτυχιακή Εργασία

Σύστημα έξυπνου θερμοκηπίου μέσω τεχνολογιών IoT και RS485 BUS

Ταλαδιανός Νικόλαος

ΑΜ:ΤΠ 4571

Επιβλέπων Εκπαιδευτικός : Σπυρίδων Παναγιωτάκης.

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2025

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στο σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός έξυπνου συστήματος αυτοματισμού θερμοκηπίου με χρήση τεχνολογιών Internet of Things (IoT), μικροελεγκτών Arduino και του προτύπου επικοινωνίας RS485. Στόχος είναι η ανάπτυξη μιας αξιόπιστης και χαμηλού κόστους λύσης που επιτρέπει την παρακολούθηση κρίσιμων παραμέτρων του θερμοκηπίου και τον αυτοματοποιημένο έλεγχο λειτουργιών όπως η άρδευση, ο φωτισμός και ο εξαερισμός.

Η αρχιτεκτονική του συστήματος βασίζεται σε τρεις διακριτούς κόμβους: έναν κόμβο αισθητήρων (Sensor Node) για τη συλλογή δεδομένων περιβάλλοντος, έναν κόμβο επενεργητών (Actuator Node) για την εκτέλεση εντολών και έναν κεντρικό κόμβο (Master Node) που αναλαμβάνει την επεξεργασία των δεδομένων και τη λήψη αποφάσεων. Η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων γίνεται μέσω RS485, εξασφαλίζοντας αξιοπιστία και αντοχή σε θορυβώδη περιβάλλοντα, ενώ τα δεδομένα προωθούνται μέσω Wi-Fi σε MQTT broker (Node-RED). Από εκεί αποθηκεύονται σε InfluxDB και απεικονίζονται δυναμικά στο Grafana, παρέχοντας στον χρήστη μια ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης του θερμοκηπίου.

Το τελικό σύστημα συνιστά μια ολοκληρωμένη, λειτουργική και επεκτάσιμη λύση χαμηλού κόστους, βασισμένη σε ανοιχτές τεχνολογίες. Η ευελιξία του επιτρέπει την προσαρμογή σε διαφορετικά περιβάλλοντα και καλλιέργειες, ενώ, ακόμη και στο στάδιο του πρωτοτύπου, αποδεικνύει έμπρακτα πώς οι τεχνολογίες IoT μπορούν να υποστηρίξουν την ανάπτυξη «έξυπνων θερμοκηπίων» και να συμβάλλουν στη βιώσιμη και αποδοτική γεωργική παραγωγή.

Abstract

This thesis focuses on the design and implementation of a smart greenhouse automation system using Internet of Things (IoT) technologies, Arduino microcontrollers, and the RS485 communication standard. The main goal is to develop a reliable and low-cost solution that enables monitoring of critical greenhouse parameters and the automated control of functions such as irrigation, lighting, and ventilation.

The system architecture is structured around three distinct nodes: a Sensor Node for environmental data collection, an Actuator Node for executing control commands, and a central Master Node (Arduino Uno R4 WiFi) responsible for data processing and decision-making. Communication between the nodes is established via RS485, ensuring robustness and reliability in noisy environments, while the collected data is transmitted over Wi-Fi to an MQTT broker (Node-RED). From there, the data is stored in InfluxDB and dynamically visualized through Grafana, providing the user with a comprehensive real-time overview of the greenhouse conditions.

The final system constitutes a complete, functional, and scalable low-cost solution based on open-source technologies. Its flexibility allows easy adaptation to different environments and crops, while even at the prototype stage, it demonstrates how IoT technologies can effectively support the development of “smart greenhouses” and contribute to sustainable and efficient agricultural production.

Περιεχόμενα

Περίληψη ..... - 2 -

Abstract ..... - 3 -

Περιεχόμενα ..... - 4 -

1. Εισαγωγή ..... - 7 -

1.1 Αντικείμενο της Εργασίας ..... - 7 -

1.2 Στόχοι της Πτυχιακής Εργασίας ..... - 8 -

1.3 Δομή της Εργασίας ..... - 9 -

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο και Σχετικές Τεχνολογίες ..... - 12 -

2.1 Γεωργία ακριβείας και έξυπνα θερμοκήπια ..... - 12 -

2.2 Internet of Things. ..... - 13 -

2.2.1 Τι είναι το Internet of Things. ..... - 13 -

2.2.2 Επίπεδα Αρχιτεκτονικής του IoT. ..... - 14 -

2.2.3 Εφαρμογές του IoT στη Γεωργία. ..... - 15 -

2.3 Πρότυπο Επικοινωνίας RS485. ..... - 17 -

2.3.1 Τι είναι το RS485 ..... - 17 -

2.3.2 Εφαρμογές του RS485 σε Αυτοματισμούς. ..... - 19 -

2.4 Εξατμισοδιαπνοή: Θεωρία και Εφαρμογή της στην άρδευση ..... - 20 -

3. Ανάλυση Απαιτήσεων και Σχεδίαση του Συστήματος ..... - 24 -

3.1 Λειτουργικές Απαιτήσεις ..... - 24 -

3.2 Αρχιτεκτονική του Συστήματος ..... - 25 -

3.2.1 Μονάδα Αισθητήρων. ..... - 26 -

3.2.2 Μονάδα Επεξεργασίας. ..... - 26 -

3.2.3 Μονάδα Επενεργητών ..... - 26 -

3.2.4 Δίκτυο Επικοινωνίας ..... - 26 -

3.2.5 Αποτέλεσμα.....- 27 -
3.3 Διάγραμμα επικοινωνίας RS485.....- 27 -
3.4 Διάγραμμα Ροής και Λογική Αυτοματισμών.....- 28 -
3.5 Επιλογή Υλικού και Εξαρτημάτων. .....- 29 -
3.5.1 Αισθητήρες. .....- 29 -
3.5.2 Επενεργητές.....- 32 -
3.5.3. Επιμέρους Υλικό. .....- 35 -
3.6 Λογισμικό και εργαλεία οπτικοποίησης δεδομένων .....- 38 -
3.6.1. Node – RED. .....- 38 -
3.6.2. InfluxDB .....- 39 -
3.6.3 Grafana.....- 39 -
4.Υλοποίηση του συστήματος.....- 40 -
4.1 Φυσικό επίπεδο πρωτοκόλλου επικοινωνίας .....- 40 -
4.2 Επικοινωνία μεταξύ των node.....- 41 -
4.3 Επικοινωνία με το Διαδίκτυο μέσω Wi-Fi και MQTT.....- 46 -
4.4 Εργαλεία Οπτικοποίησης Δεδομένων .....- 49 -
4.4.1 Διασύνδεση Node-RED με MQTT Broker.....- 49 -
4.4.2 Διασύνδεση Node-RED με InfluxDB.....- 50 -
4.4.3 Διασύνδεση Grafana με InfluxDB.....- 53 -
4.5 Διασύνδεση αισθητήρων και επενεργητών.....- 55 -
4.6 Ανάπτυξη web διεπαφής.....- 56 -
4.7 Δοκιμές και αποσφαλμάτωση .....- 57 -
5. Αποτίμηση Συστήματος .....- 59 -
5.1 Δοκιμές Συστήματος σε Συνθήκες Προσομοίωσης. .....- 59 -
5.2. Ακρίβεια Μετρήσεων και Αξιοπιστία Απόκρισης.....- 64 -
5.3 Ανάλυση Ενεργειακής και Υδατικής Εξοικονόμησης .....- 64 -
5.4 Συγκριτική Αποδοτικότητα με μη Αυτοματοποιημένα Συστήματα.....- 64 -

6. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις. ..... - 66 -

6.1 Συμπεράσματα. ..... - 66 -

6.2 Περιορισμοί του Συστήματος ..... - 67 -

6.3 Προτάσεις για Μελλοντική Βελτίωση ..... - 68 -

Βιβλιογραφία ..... - 69 -

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της Εργασίας

Η γεωργία αποτελεί έναν από τους αρχαιότερους τομείς δραστηριότητας του ανθρώπου και η εξέλιξή της είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την πρόοδο του πολιτισμού. Στα πρώτα της στάδια βασιζόταν αποκλειστικά στη χειρωνακτική εργασία, με τον άνθρωπο να εκτελεί όλες τις καλλιεργητικές διαδικασίες με απλά εργαλεία. Με την πάροδο του χρόνου, η εισαγωγή των ζώων ως μέσων έλξης και μεταφοράς αποτέλεσε το πρώτο μεγάλο άλμα, καθώς αύξησε την παραγωγικότητα και επέτρεψε την καλλιέργεια μεγαλύτερων εκτάσεων.

Κατά τη διάρκεια της Βιομηχανικής Επανάστασης, η γεωργία γνώρισε μια νέα περίοδο ραγδαίας ανάπτυξης. Η μηχανοποίηση με την εισαγωγή των ατμομηχανών, των θεριστικών μηχανών και αργότερα των τρακτέρ μείωσε σημαντικά την ανάγκη για χειρωνακτική εργασία και επιτάχυνε τις γεωργικές εργασίες. Η πρόοδος αυτή οδήγησε σε αύξηση της παραγωγής και μείωση του κόστους..

Στα τέλη του 20ού αιώνα, με την έλευση της ψηφιακής τεχνολογίας και των ηλεκτρονικών υπολογιστών, η γεωργία εισήλθε σε μια νέα εποχή. Η χρήση δορυφορικών εικόνων, συστημάτων γεωεντοπισμού (GPS) και αισθητήρων πεδίου γέννησε τη γεωργία ακριβείας, όπου η λήψη αποφάσεων βασίζεται σε πραγματικά δεδομένα. Ο παραγωγός μπορούσε πλέον να εφαρμόζει λιπάσματα, φυτοφάρμακα και νερό με στοχευμένο τρόπο, μειώνοντας τις απώλειες και αυξάνοντας την απόδοση.

Η πιο πρόσφατη φάση, που συχνά αποκαλείται Γεωργία 4.0, βασίζεται στο Διαδίκτυο των Αντικειμένων (Internet of Things – IoT), την τεχνητή νοημοσύνη και τις τεχνολογίες μεγάλων δεδομένων. Η αξιοποίηση του διαδικτύου και των ψηφιακών υποδομών υπήρξε καταλυτική, καθώς κατέστησε δυνατή τη συλλογή, αποθήκευση και ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, τα «έξυπνα» συστήματα, μέσω αισθητήρων και αυτοματισμών, παρακολουθούν συνεχώς τις συνθήκες του περιβάλλοντος και παρεμβαίνουν αυτόματα για να διατηρήσουν ιδανικές συνθήκες ανάπτυξης. Η εξέλιξη αυτή βρίσκει εφαρμογή ιδιαίτερα στα θερμοκήπια, τα οποία μετατρέπονται σε αυτορυθμιζόμενα οικοσυστήματα.

Σε αυτό το πλαίσιο εντάσσεται και η παρούσα εργασία, η οποία επικεντρώνεται στο σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός έξυπνου συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου βασικών λειτουργιών θερμοκηπίου, με χρήση μικροελεγκτών Arduino, της ενσύρματης επικοινωνίας RS485 και τεχνολογιών IoT. Μέσω αισθητήρων, το σύστημα καταγράφει σε πραγματικό χρόνο παραμέτρους του θερμοκηπίου όπως, θερμοκρασία, υγρασία αέρα, υγρασία εδάφους και ηλιακή ακτινοβολία και ενεργοποιεί σημαντικούς αυτοματισμούς για την ανάπτυξη των καλλιεργειών, όπως την άρδευση, τον εξαερισμό και τον τεχνητό φωτισμό.

Η επικοινωνία μεταξύ των μονάδων γίνεται μέσω RS485, ενώ τα συγκεντρωμένα δεδομένα μεταφέρονται ασύρματα μέσω Wi-Fi από τον Master Node σε Node-RED, όπου γίνεται η σύνδεση με MQTT broker. Από εκεί, τα δεδομένα αποθηκεύονται σε InfluxDB και απεικονίζονται σε πραγματικό χρόνο μέσω Grafana Dashboards. Σημαντικό να αναφερθεί είναι ότι το σύστημα προσφέρει απομακρυσμένη παρακολούθηση αλλά όχι απομακρυσμένο έλεγχο.

Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια λειτουργική και επεκτάσιμη λύση χαμηλού κόστους, προσαρμοσμένη στις ανάγκες της γεωργίας ακριβείας, που βοηθά τους παραγωγούς να παρακολουθούν εύκολα τις συνθήκες του θερμοκηπίου και να βελτιστοποιούν τις παρεμβάσεις τους.

1.2 Στόχοι της Πτυχιακής Εργασίας

Στόχος της πτυχιακής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου, χαμηλού κόστους και επεκτάσιμου συστήματος αυτοματισμού θερμοκηπίου, ικανού να λειτουργεί αυτόνομα σε πραγματικές συνθήκες και να παρέχει απομακρυσμένη παρακολούθηση δεδομένων, χωρίς να απαιτείται χειροκίνητος έλεγχος από απόσταση.

Η εργασία στοχεύει στη δημιουργία μιας λύσης που θα επιτρέπει τη συνεχή καταγραφή κρίσιμων περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία του αέρα, η ένταση φωτός και η υγρασία του εδάφους, και θα μετατρέπει τις μετρήσεις αυτές σε χρήσιμες ενέργειες ελέγχου, όπως η ενεργοποίηση της άρδευσης, του εξαερισμού και του φωτισμού. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η ανάγκη συνεχούς παρουσίας του παραγωγού μέσα στο θερμοκήπιο, ενώ βελτιώνεται η αποδοτικότητα και εξασφαλίζεται πιο ορθολογική χρήση των διαθέσιμων πόρων.

Παράλληλα, στόχος της εργασίας δεν είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου εμπορικού συστήματος, αλλά η δημιουργία ενός λειτουργικού πρωτοτύπου που αποδεικνύει στην πράξη τη δυνατότητα χρήσης τεχνολογιών IoT και ενσύρματης επικοινωνίας RS485 σε εφαρμογές θερμοκηπίου. Το σύστημα είναι σχεδιασμένο με τρόπο ώστε να μπορεί να επεκταθεί ή να αναβαθμιστεί με την ενσωμάτωση πιο ακριβών αισθητήρων και αποδοτικότερων μηχανισμών ελέγχου, καθιστώντας το μια ισχυρή βάση για μελλοντικές βελτιώσεις.

Τελικός στόχος της υλοποίησης είναι να αναδειχθεί πώς ο συνδυασμός τεχνολογιών ανοιχτού κώδικα, όπως οι μικροελεγκτές Arduino, οι πλατφόρμες Node-RED, InfluxDB και Grafana, σε συνδυασμό με την επικοινωνία RS485, μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για τη δημιουργία «έξυπνων θερμοκηπίων» που διευκολύνουν τον παραγωγό, μειώνουν τις απώλειες και συμβάλλουν σε μια πιο βιώσιμη και αποδοτική γεωργική παραγωγή

1.3 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είναι οργανωμένη σε έξι κύρια κεφάλαια, τα οποία διαρθρώνονται με τρόπο που να αναδεικνύεται τόσο το θεωρητικό υπόβαθρο του θέματος όσο και η πρακτική του υλοποίηση.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Το εισαγωγικό κεφάλαιο παρουσιάζει το γενικό πλαίσιο στο οποίο εντάσσεται η εργασία, περιγράφοντας τις τεχνολογικές εξελίξεις που καθιστούν εφικτή την ανάπτυξη συστημάτων γεωργίας ακριβείας. Γίνεται αναφορά στην ανάγκη για αυτοματοποίηση σε θερμοκηπιακά περιβάλλοντα και περιγράφονται συνοπτικά οι βασικές λειτουργίες του υπό υλοποίηση συστήματος. Επιπλέον, διατυπώνονται οι στόχοι της πτυχιακής εργασίας και περιγράφεται συνοπτικά η διάρθρωση του κειμένου.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο και Σχετικές Τεχνολογίες

Το δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζει το θεωρητικό και τεχνολογικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο στηρίζεται η ανάπτυξη του συστήματος. Γίνεται αναφορά στις αρχές της γεωργίας ακριβείας και στα έξυπνα θερμοκήπια, αναλύεται το πλαίσιο του Διαδικτύου των Αντικειμένων (IoT), τα επίπεδα αρχιτεκτονικής του και οι εφαρμογές του στη γεωργία. Παρουσιάζονται τα βασικά

χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα του προτύπου επικοινωνίας RS485, καθώς και η έννοια της εξατμισοδιαπνοής και ο ρόλος της στη βέλτιστη διαχείριση της άρδευσης. Τέλος, περιγράφονται οι αισθητήρες και οι επενεργητές που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των συνθηκών μέσα στο θερμοκήπιο.

Κεφάλαιο 3: Ανάλυση Απαιτήσεων και Σχεδίαση Συστήματος

Στο τρίτο κεφάλαιο καταγράφονται οι λειτουργικές και τεχνικές απαιτήσεις του συστήματος. Παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του έργου, συμπεριλαμβανομένης της διάκρισης των ρόλων μεταξύ των επιμέρους μονάδων Arduino. Περιγράφεται το δίκτυο επικοινωνίας μέσω RS485, καθώς και η γενική ροή δεδομένων και εντολών μεταξύ των υποσυστημάτων. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα κριτήρια επιλογής του υλικού και των εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του συστήματος

Κεφάλαιο 4: Υλοποίηση του Συστήματος

Το τέταρτο κεφάλαιο εστιάζει στην πρακτική υλοποίηση του συστήματος. Περιγράφεται η συνδεσμολογία μεταξύ αισθητήρων, Επενεργητών και μικροελεγκτών. Παρουσιάζονται σημαντικά τμήματα του λογισμικού που αναπτύχθηκε στο Arduino IDE, τόσο για την ανάγνωση των μετρήσεων όσο και για τον έλεγχο των εξόδων. Εξηγείται επίσης η ενσωμάτωση του συστήματος με τις πλατφόρμες Node-RED, InfluxDB και Grafana, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη συλλογή και οπτικοποίηση των δεδομένων.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα και Αξιολόγηση

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση και αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος. Αναλύεται η απόκριση των επενεργητών βάσει των μετρήσεων, η ακρίβεια των αισθητήρων και η αξιοπιστία της επικοινωνίας μέσω RS485. Επιπλέον, εξετάζεται η δυνατότητα εξοικονόμησης νερού μέσω του υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής και συγκρίνεται η απόδοση του συστήματος με μη αυτοματοποιημένες λύσεις.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Μελλοντική Επέκταση

Το τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζει τα συμπεράσματα της εργασίας, παρουσιάζοντας τα οφέλη και τους περιορισμούς του συστήματος. Προτείνονται τρόποι μελλοντικής επέκτασης, όπως η προσθήκη επιπλέον αισθητήρων, η υποστήριξη απομακρυσμένου ελέγχου και η αξιοποίηση τεχνητής νοημοσύνης για πρόβλεψη και βελτιστοποίηση της αρδευσης.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο και Σχετικές Τεχνολογίες

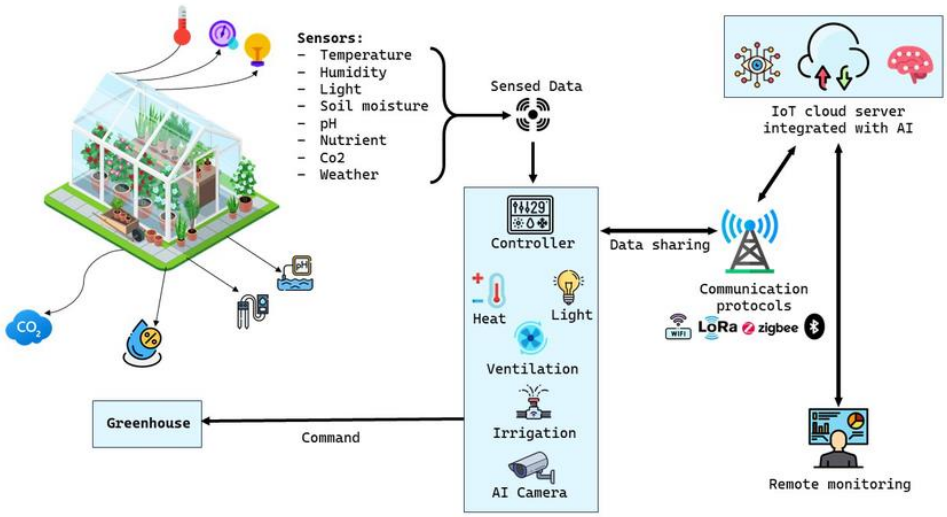
2.1 Γεωργία ακριβείας και έξυπνα θερμοκήπια

Η γεωργία ακριβείας συνιστά μια καινοτόμα προσέγγιση στη διαχείριση της αγροτικής παραγωγής, η οποία βασίζεται στη συστηματική παρακολούθηση και στοχευμένη διαχείριση των καλλιεργειών με τη βοήθεια σύγχρονων τεχνολογιών. Κύριος στόχος της είναι η μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας και η ελαχιστοποίηση της σπατάλης πόρων, όπως το νερό, τα λιπάσματα, τα φυτοφάρμακα και η ενέργεια. Μέσα από την αξιοποίηση αισθητήρων, δορυφορικών δεδομένων, καθώς και πληροφοριακών συστημάτων, ο παραγωγός έχει τη δυνατότητα να γνωρίζει με ακρίβεια τις ανάγκες κάθε τμήματος της καλλιέργειας και να παρεμβαίνει μόνο όταν και όπου αυτό απαιτείται.

Η εφαρμογή της γεωργίας ακριβείας έχει αποδειχθεί ότι επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε επίπεδο παραγωγής και διαχείρισης πόρων. Σύμφωνα με διεθνείς μελέτες, η χρήση των σχετικών τεχνολογιών οδηγεί σε αύξηση της απόδοσης των καλλιεργειών κατά περίπου 4 %, ενώ η αποδοτικότητα στην εφαρμογή λιπασμάτων βελτιώνεται κατά 7 %. Παράλληλα, παρατηρείται μείωση της χρήσης ζιζανιοκτόνων και φυτοφαρμάκων της τάξης του 9 %, καθώς και μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων κατά 6 %. Επιπλέον, η κατανάλωση νερού μπορεί να μειωθεί κατά περίπου 4 %, γεγονός που συμβάλλει στη βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Τα στοιχεία αυτά αναδεικνύουν τη συμβολή της γεωργίας ακριβείας τόσο στη βελτίωση της παραγωγικότητας όσο και στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της γεωργικής δραστηριότητας [1].

Μία από τις πλέον χαρακτηριστικές εφαρμογές της γεωργίας ακριβείας είναι τα έξυπνα θερμοκήπια, τα οποία λειτουργούν ως ολοκληρωμένα συστήματα ελέγχου και παρακολούθησης καλλιεργειών. Σε αυτά, δίκτυα αισθητήρων συλλέγουν σε πραγματικό χρόνο κρίσιμα δεδομένα για τις περιβαλλοντικές συνθήκες, τα οποία αναλύονται και αξιοποιούνται από πληροφοριακά συστήματα και αλγορίθμους αυτοματισμού. Η Εικόνα 1 παρουσιάζει ενδεικτικά την αρχιτεκτονική ενός έξυπνου θερμοκηπίου, όπου αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας, υγρασίας, φωτός και υγρασίας εδάφους αποστέλλουν δεδομένα σε έναν κεντρικό ελεγκτή, ο οποίος, μέσω ασύρματων πρωτοκόλλων επικοινωνίας, τα μεταφέρει σε πλατφόρμα cloud για αποθήκευση, ανάλυση και απομακρυσμένο έλεγχο. Η συνεχής αυτή προσαρμογή δημιουργεί ένα βέλτιστο μικροκλίμα για την ανάπτυξη των φυτών, αυξάνει την παραγωγικότητα και βελτιώνει την ποιότητα των προϊόντων, ενώ παράλληλα μειώνει την

κατανάλωση πόρων και περιορίζει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, συμβάλλοντας σε μια πιο βιώσιμη γεωργία.



Εικόνα 1. Έξυπνο θερμοκήπιο

2.2 Internet of Things.

2.2.1 Τι είναι το Internet of Things.

Το Internet of Things (IoT) ή αλλιώς Διαδίκτυο των Αντικειμένων, αποτελεί ένα σύγχρονο τεχνολογικό πλαίσιο που επιτρέπει τη σύνδεση και αλληλεπίδραση φυσικών αντικειμένων με το διαδίκτυο, δίνοντάς τους τη δυνατότητα να συλλέγουν, να ανταλλάσσουν και να επεξεργάζονται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Τα «αντικείμενα» μπορεί να είναι αισθητήρες, επενεργητές, οικιακές συσκευές, βιομηχανικά μηχανήματα, οχήματα ή ακόμα και γεωργικός εξοπλισμός, τα οποία διαθέτουν κατάλληλα ενσωματωμένα κυκλώματα, λογισμικό και μονάδες επικοινωνίας.

Κεντρικό χαρακτηριστικό ενός συστήματος IoT είναι η αυτονομία στη συλλογή και μετάδοση πληροφοριών, χωρίς την ανάγκη συνεχούς ανθρώπινης παρέμβασης. Οι συσκευές είναι σε θέση να αντιλαμβάνονται αλλαγές και να αλληλεπιδρούν είτε μεταξύ τους είτε με κεντρικά πληροφοριακά συστήματα, όπως πλατφόρμες συλλογής και ανάλυσης δεδομένων.

2.2.2 Επίπεδα Αρχιτεκτονικής του IoT.

Η αρχιτεκτονική ενός συστήματος IoT (Διαδίκτυο των Αντικειμένων) είναι μια πολυεπίπεδη δομή που αποτελείται από αρκετά επίπεδα, τα οποία συνεργάζονται για να εξασφαλίσουν ότι τα δεδομένα από το φυσικό περιβάλλον φτάνουν με ασφάλεια και σωστά στην τελική εφαρμογή. Με απλά λόγια, τα δεδομένα περνούν από διάφορα στάδια επεξεργασίας και μετάδοσης πριν φτάσουν στον χρήστη ή την εφαρμογή που τα χρειάζεται. Κάθε επίπεδο έχει συγκεκριμένο ρόλο και λειτουργεί ως ενδιάμεσος κρίκος στην αλυσίδα της πληροφορίας. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2 , η αρχιτεκτονική του IoT διακρίνεται σε τρία κύρια επίπεδα: το Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer), το Επίπεδο Δικτύου (Network Layer) και το Επίπεδο Εφαρμογών (Application Layer).

1. Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer)

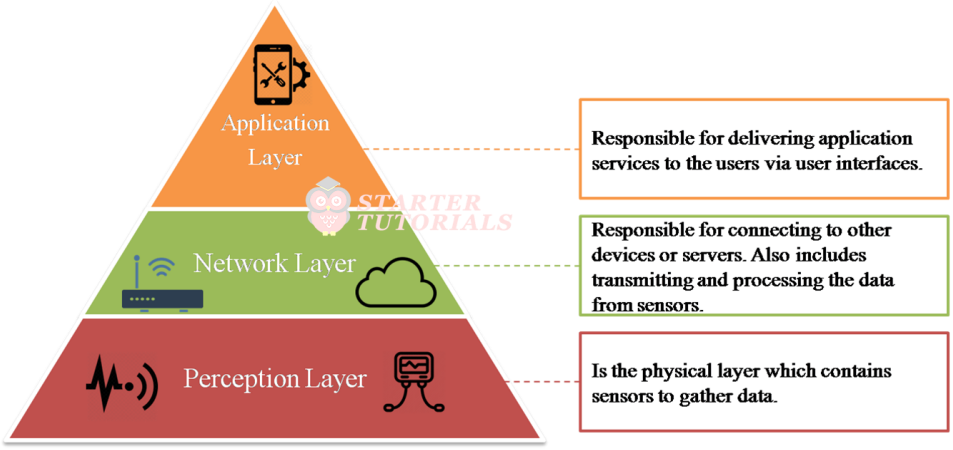
Το Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer) αποτελεί το θεμέλιο κάθε αρχιτεκτονικής IoT και λειτουργεί ως το σημείο αλληλεπίδρασης μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου του δικτύου. Σε αυτό περιλαμβάνονται οι αισθητήρες και οι επενεργητές που βρίσκονται τοποθετημένοι στο φυσικό περιβάλλον. Οι αισθητήρες συλλέγουν πληροφορίες από το περιβάλλον και τις μετατρέπουν σε ψηφιακά δεδομένα, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να μεταδοθούν και να αναλυθούν. Οι επενεργητές, από την άλλη, εκτελούν φυσικές ενέργειες βάσει εντολών που λαμβάνονται από τα ανώτερα επίπεδα, λειτουργώντας ως ο μηχανισμός «αντίδρασης» του συστήματος.

2. Επίπεδο Δικτύου (Network Layer)

Το Επίπεδο Δικτύου (Network Layer) είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά των δεδομένων που συλλέγονται από το Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer) προς τα κεντρικά συστήματα επεξεργασίας ή αποθήκευσης, λειτουργώντας ως η «γέφυρα» που συνδέει τον φυσικό κόσμο με το υπολογιστικό περιβάλλον. Για την υλοποίηση της επικοινωνίας αξιοποιείται ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών, τόσο ασύρματων όσο και ενσύρματων. Στις ασύρματες λύσεις περιλαμβάνονται τεχνολογίες όπως το Wi-Fi, το Bluetooth και το LoRa. Στις ενσύρματες περιλαμβάνονται πρωτόκολλα όπως, το Ethernet και το RS485

3. Επίπεδο Εφαρμογών (Application Layer)

Το Επίπεδο Εφαρμογών αποτελεί το ανώτερο επίπεδο της αρχιτεκτονικής του Διαδικτύου των Αντικειμένων και είναι υπεύθυνο για την αλληλεπίδραση του συστήματος με τον τελικό χρήστη. Στο επίπεδο αυτό, τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί και μεταφερθεί μέσω των κατώτερων επιπέδων υποβάλλονται σε επεξεργασία, ανάλυση και απεικόνιση, ώστε να μετατραπούν σε χρήσιμες πληροφορίες που υποστηρίζουν τη λήψη αποφάσεων, την αυτοματοποίηση ή την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 2. Επίπεδα IoT

2.2.3 Εφαρμογές του IoT στη Γεωργία.

Η ενσωμάτωση τεχνολογιών του Διαδικτύου των Αντικειμένων (Internet of Things – IoT) στη γεωργική παραγωγή έχει συμβάλλει καθοριστικά στη μετάβαση από παραδοσιακές, εμπειρικές μεθόδους σε συστήματα βασισμένα σε δεδομένα και αυτοματισμούς. Το IoT λειτουργεί ως ο τεχνολογικός «συνδετικός ιστός» που επιτρέπει τη συλλογή, τη μετάδοση και την ανάλυση πληροφοριών από το πεδίο, υποστηρίζοντας τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων και τη βελτιστοποίηση των καλλιεργητικών πρακτικών.

Οι εφαρμογές του IoT στη γεωργία καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων, από την παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών έως την αυτοματοποίηση κρίσιμων γεωργικών διεργασιών. Ένα από τα πλέον διαδεδομένα πεδία είναι η έξυπνη άρδευση, όπου αισθητήρες εδάφους και μετεωρολογικοί σταθμοί παρέχουν δεδομένα που επιτρέπουν τον ακριβή υπολογισμό των αναγκών των φυτών σε νερό. Με βάση τις πληροφορίες αυτές και κατάλληλα

μοντέλα, όπως η εξατμισοδιαπνοή, τα συστήματα ενεργοποιούν την άρδευση μόνο όταν είναι απαραίτητο, επιτυγχάνοντας σημαντική εξοικονόμηση υδάτινων πόρων και βελτιώνοντας ταυτόχρονα την ανάπτυξη των καλλιεργειών.

Εξίσου σημαντική είναι η παρακολούθηση της υγείας των καλλιεργειών, η οποία βασίζεται στη συνεχή συλλογή δεδομένων σχετικά με την θερμοκρασία, την υγρασία,την υγρασία εδάφους και άλλες κρίσιμες μεταβλητές. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση συνθηκών που ευνοούν την ανάπτυξη ασθενειών ή παρασίτων, δίνοντας τη δυνατότητα για έγκαιρες και στοχευμένες παρεμβάσεις. Ως αποτέλεσμα, μειώνεται η ανάγκη εκτεταμένης χρήσης φυτοφαρμάκων, περιορίζονται οι απώλειες παραγωγής και βελτιώνεται η συνολική υγεία της καλλιέργειας.

Σημαντική θέση κατέχει επίσης η παρακολούθηση της ποιότητας του εδάφους και του νερού, μέσω αισθητήρων που μετρούν παραμέτρους όπως το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η περιεκτικότητα σε θρεπτικά στοιχεία. Οι πληροφορίες αυτές αξιοποιούνται για την ακριβέστερη και πιο ορθολογική εφαρμογή λιπασμάτων, την αποφυγή υπερβολών και τη βελτίωση της θρεπτικής διαχείρισης, με άμεσα οφέλη τόσο για την παραγωγικότητα όσο και για το περιβάλλον.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της πρακτικής εφαρμογής του IoT αποτελεί η καλλιέργεια τομάτας σε έξυπνα θερμοκήπια, όπου αισθητήρες και αυτοματισμοί χρησιμοποιούνται για τον ακριβή έλεγχο της άρδευσης και της θρέψης των φυτών. Σύμφωνα με μελέτη με τίτλο *Improving Yield of Tomatoes Grown in Greenhouses Using IoT Based Nutrient Management System*, η εφαρμογή ενός ολοκληρωμένου συστήματος έξυπνης διαχείρισης θρεπτικών στοιχείων και άρδευσης οδήγησε σε αύξηση της παραγωγής κατά 62,92 % σε σύγκριση με την παραδοσιακή μέθοδο, ενώ ταυτόχρονα επιτεύχθηκε μείωση της κατανάλωσης νερού κατά 14,84 **%**. Η συνεχής παρακολούθηση κρίσιμων μεταβλητών, όπως η υγρασία και η θρεπτική κατάσταση του εδάφους, σε συνδυασμό με την αυτοματοποιημένη ρύθμιση της παροχής νερού και λιπασμάτων, δημιούργησε ιδανικές μικροκλιματικές συνθήκες για την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Το αποτέλεσμα ήταν η σημαντική βελτίωση τόσο της αποδοτικότητας των εισροών όσο και της συνολικής παραγωγικότητας του συστήματος [2].

Συνολικά, οι εφαρμογές του IoT στη γεωργία ενισχύουν την παραγωγικότητα, μειώνουν το λειτουργικό κόστος και προάγουν μια πιο βιώσιμη και ανταγωνιστική γεωργική παραγωγή. Μέσω της συνεχούς ροής δεδομένων και της αξιοποίησής τους σε πραγματικό χρόνο, το IoT

μετασχηματίζει τον τροπο με τον οποίο οργανώνονται, παρακολουθούνται και βελτιστοποιούνται οι γεωργικές διεργασίες, θέτοντας τα θεμέλια για μια νέα εποχή ψηφιακής γεωργίας.

2.3 Πρότυπο Επικοινωνίας RS485.

2.3.1 Τι είναι το RS485.

Η αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ συσκευών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα σε κάθε σύστημα αυτοματισμού, ιδιαίτερα σε εγκαταστάσεις που εκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις ή λειτουργούν σε περιβάλλοντα με έντονο ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο. Το πρότυπο RS485 προσφέρει μια στιβαρή και ευέλικτη λύση ενσύρματης σειριακής επικοινωνίας, καθιστώντας το ιδιαίτερα κατάλληλο για βιομηχανικές και αγροτικές εφαρμογές.

Σε αντίθεση με τα πρότυπα RS232 ή UART που βασίζονται σε μονοτερματική μετάδοση, το RS485 χρησιμοποιεί διαφορική μετάδοση σήματος. Στη μονοτερματική μετάδοση, η πληροφορία μεταφέρεται μέσω ενός και μόνο αγωγού, ενώ η γείωση λειτουργεί ως κοινό σημείο αναφοράς για τον πομπό και τον δέκτη. Ο δέκτης προσδιορίζει την τιμή του σήματος μετρώντας την τάση του σε σχέση με τη γείωση. Αντίθετα, στη διαφορική μετάδοση του RS485 χρησιμοποιούνται δύο αγωγοί, οι οποίοι αναφέρονται ως γραμμές A και B, στους οποίους μεταδίδονται σήματα με αντίθετη πολικότητα. Ο δέκτης δεν ενδιαφέρεται για την απόλυτη τιμή της τάσης σε καθεμία από τις γραμμές, αλλά για τη διαφορά μεταξύ τους. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται υψηλή ανοσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, καθώς τυχόν εξωτερικός θόρυβος επηρεάζει και τις δύο γραμμές σχεδόν το ίδιο, με αποτέλεσμα να ακυρώνεται στο στάδιο λήψης. Η τεχνική αυτή καθιστά το RS485 ιδιαίτερα αξιόπιστο για μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις και σε περιβάλλοντα με αυξημένες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, όπως είναι οι αγροτικές ή βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Η βασική αρχή λειτουργίας βασίζεται στη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο γραμμών. Όταν η τάση στη γραμμή A είναι υψηλότερη από τη γραμμή B κατά τουλάχιστον 200 mV, το σήμα ερμηνεύεται ως λογικό “1”. Αντίθετα, όταν η τάση στη γραμμή A είναι χαμηλότερη από τη γραμμή B κατά τουλάχιστον 200 mV, το σήμα αντιστοιχεί σε λογικό “0”. Οι διαφορές τάσης συνήθως κυμαίνονται μεταξύ ±1,5 V και ±5 V, ενώ το επιτρεπτό εύρος λειτουργίας του διαύλου είναι από −7 V έως +12 V, παρέχοντας μεγάλη ανθεκτικότητα έναντι παρεμβολών ή πτώσεων τάσης. Ο δέκτης ανιχνεύει αποκλειστικά αυτή τη διαφορά δυναμικού (VA − VB),

γεγονός που του επιτρέπει να αγνοεί κοινές μεταβολές θορύβου που επηρεάζουν και τις δύο γραμμές εξίσου. Με αυτόν τον τρόπο, το RS485 εξασφαλίζει αξιόπιστη επικοινωνία ακόμη και σε εγκαταστάσεις όπου υπάρχουν κινητήρες, αντλίες ή άλλες πηγές ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

Η μετάδοση των δεδομένων γίνεται συνήθως μέσω ενός τυπικού σειριακού πρωτοκόλλου UART. Ο μικροελεγκτής μετατρέπει τα δεδομένα σε σειριακή ροή bit, η οποία περιλαμβάνει ένα bit έναρξης (start bit), τα οκτώ bits δεδομένων, προαιρετικό bit ισοτιμίας και ένα ή περισσότερα bits τερματισμού (stop bits). Ο οδηγός RS485 μετασχηματίζει αυτά τα bits σε διαφορικά ηλεκτρικά σήματα πάνω στις γραμμές A και B, όπου κάθε λογική κατάσταση αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη πολικότητα τάσης. Έτσι, η μετάδοση ενός byte πραγματοποιείται μέσω εναλλαγής διαφορικών επιπέδων τάσης, επιτρέποντας στο δέκτη να αναγνωρίσει με ακρίβεια τα δεδομένα ακόμη και σε μεγάλες αποστάσεις.

Στην παρούσα εργασία δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιο προκαθορισμένο πρωτόκολλο επικοινωνίας, όπως το Modbus RTU, αλλά σχεδιάστηκε ένα απλό και ελαφρύ πλαίσιο επικοινωνίας ειδικά προσαρμοσμένο στις ανάγκες του συστήματος. Η απουσία τυποποιημένου πρωτοκόλλου δεν επηρεάζει τη φυσική μετάδοση των δεδομένων, καθώς το RS485 λειτουργεί αποκλειστικά στο φυσικό επίπεδο, μετατρέποντας τα TTL σήματα του UART σε διαφορικά ηλεκτρικά σήματα. Συνεπώς, ο τρόπος κωδικοποίησης των bits στο bus παραμένει ο ίδιος, ανεξάρτητα από τη δομή ή τη μορφή των πακέτων που ορίζονται από το ανώτερο επίπεδο επικοινωνίας.

Το RS485 λειτουργεί συνήθως σε half-duplex διαμόρφωση, πράγμα που σημαίνει ότι οι συσκευές δεν μπορούν να αποστέλλουν και να λαμβάνουν ταυτόχρονα δεδομένα. Για τον λόγο αυτό, κάθε συσκευή ενεργοποιεί τον οδηγό της μόνο όταν χρειάζεται να μεταδώσει, ενώ τις υπόλοιπες στιγμές λειτουργεί ως δέκτης. Η Εικόνα 3 παρουσιάζει τη διαμόρφωση του διαύλου RS-485 σε half-duplex λειτουργία, όπου όλες οι συσκευές είναι συνδεδεμένες πάνω στον ίδιο δίαυλο δύο αγωγών (A και B), ο οποίος τερματίζεται στα άκρα με αντιστάσεις 120 Ω (RT) ώστε να αποφεύγονται ανακλάσεις σημάτων. Κάθε μονάδα διαθέτει τα σήματα DE (Driver Enable) και RE (Receiver Enable) που ελέγχουν τη λειτουργία πομπού ή δέκτη αντίστοιχα, εξασφαλίζοντας τη σωστή εναλλαγή κατά τη μετάδοσης. Όταν το DE είναι ενεργό, η συσκευή στέλνει δεδομένα στο δίαυλο· όταν είναι ανενεργό, παραμένει σε κατάσταση λήψης. Για να διατηρείται σταθερό το ηλεκτρικό επίπεδο του bus όταν καμία συσκευή δεν μεταδίδει, τοποθετούνται αντιστάσεις τερματισμού 120 Ω στα άκρα του καλωδίου, καθώς και

αντιστάσεις προκατάληψης (bias resistors) που κρατούν τις γραμμές σε γνωστή λογική κατάσταση.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα του RS485 είναι η δυνατότητα δημιουργίας δικτύου πολλαπλών σημείων (multi-drop). Σε έναν ενιαίο δίαυλο μπορούν να συνδεθούν έως και 32 συσκευές, ή και περισσότερες με τη χρήση ενισχυτών σήματος, επιτρέποντας τη δημιουργία απλών και επεκτάσιμων τοπολογιών επικοινωνίας χωρίς περίπλοκη καλωδίωση. Η δομή αυτή καθιστά δυνατή την ανάπτυξη κατανεμημένων συστημάτων ελέγχου με σαφή διαχωρισμό ρόλων ανά κόμβο. Επιπλέον, το RS485 υποστηρίζει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, που μπορούν να φτάσουν τα αρκετά Mbit/s σε μικρές αποστάσεις, ενώ παραμένει σταθερό σε χαμηλότερους ρυθμούς ακόμη και σε καλώδια μήκους άνω του ενός χιλιομέτρου. Η χρήση απλών, οικονομικών καλωδίων δύο αγωγών, όπως twisted pair, το καθιστά ιδιαίτερα προσιτό, ενώ η ανθεκτικότητά του στις παρεμβολές το καθιερώνει ως μία από τις πλέον αξιόπιστες τεχνολογίες σειριακής επικοινωνίας για εφαρμογές όπου προέχει η σταθερότητα και η ακρίβεια της μετάδοσης.

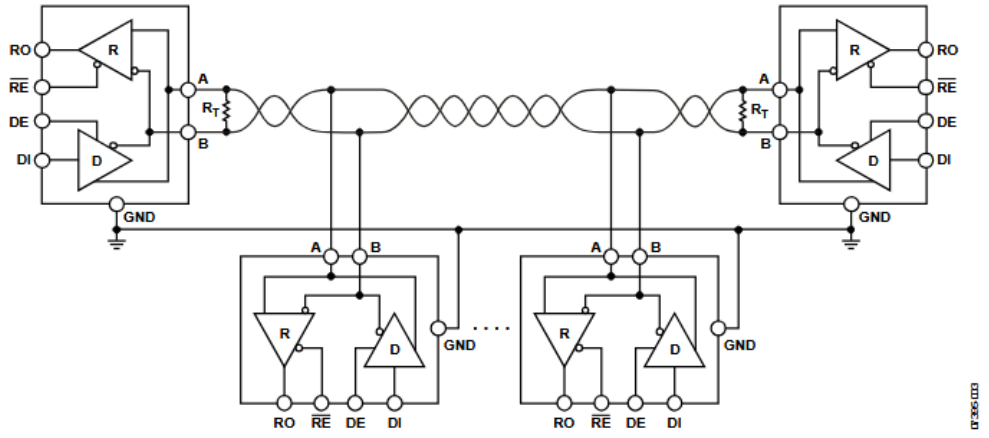


Figure 3. Half-Duplex RS-485 Bus Configuration

Εικόνα 3. Διαφορική μετάδοση σήματος στο πρότυπο RS485

2.3.2 Εφαρμογές του RS485 σε Αυτοματισμούς.

Στον χώρο της βιομηχανικής αυτοματοποίησης, το RS485 αποτελεί τη βάση για γνωστά πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως το Modbus RTU, Profibus-DP και BACnet MS/TP. Μέσω αυτών, αισθητήρες, επενεργητές, προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές (PLCs) και

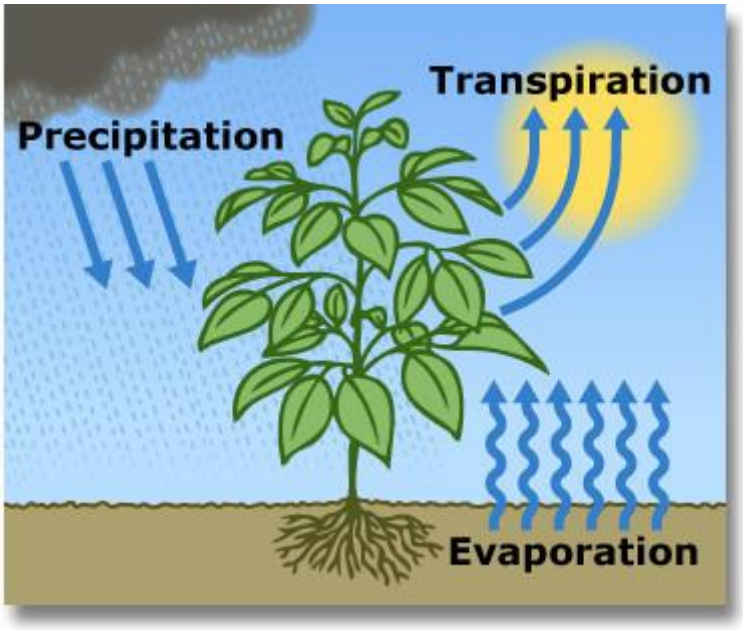
συστήματα ελέγχου διεργασιών μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, ακόμη και σε θορυβώδη ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα.

Στον τομέα των κτιριακών εγκαταστάσεων, το RS485 αξιοποιείται σε εφαρμογές διαχείρισης κτιρίων για τον έλεγχο του φωτισμού,της θέρμανσης,του εξαερισμού,του κλιματισμού και των συστημάτων ασφαλείας. Η σταθερότητα του πρωτοκόλλου και η δυνατότητα εύκολης διασύνδεσης πολλών συσκευών καθιστούν το RS485 ιδανικό για την ανάπτυξη εκτεταμένων δικτύων ελέγχου σε μεγάλες εγκαταστάσεις.

Στον αγροτικό τομέα και ειδικότερα στη γεωργία ακριβείας, το RS485 βρίσκει ολοένα και περισσότερες εφαρμογές σε περιβάλλοντα όπου οι αποστάσεις μεταξύ αισθητήρων, επενεργητών και κεντρικών μονάδων είναι μεγάλες και οι συνθήκες λειτουργίας απαιτητικές. Εφαρμόζεται σε δίκτυα παρακολούθησης θερμοκηπίων, συστήματα άρδευσης, ελέγχου κλιματολογικών συνθηκών και αποθήκευσης αγροτικών προϊόντων, εξασφαλίζοντας αξιόπιστη ανταλλαγή δεδομένων χωρίς την ανάγκη πολύπλοκης υποδομής ή ακριβών ασύρματων λύσεων.

2.4 Εξατμισοδιαπνοή: Θεωρία και Εφαρμογή της στην άρδευση

Η εξατμισοδιαπνοή (Evapotranspiration – ET) αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους δείκτες στη γεωργική επιστήμη, καθώς αντικατοπτρίζει το σύνολο των απωλειών νερού από μια καλλιέργεια μέσω δύο αλληλένδετων φυσικών διεργασιών: της εξάτμισης (evaporation) και της διαπνοής (transpiration) . Η Εικόνα 4 απεικονίζει σχηματικά τις δύο αυτές διεργασίες, όπου η εξάτμιση αναφέρεται στην απώλεια νερού από την εδαφική επιφάνεια προς την ατμόσφαιρα, ενώ η διαπνοή περιγράφει τη μεταφορά νερού από τις ρίζες προς τα φύλλα και την αποβολή του με τη μορφή υδρατμών μέσω των στομάτων. Ο συνδυασμός αυτών των δύο μηχανισμών εκφράζει την πραγματική υδατική απαίτηση μιας καλλιέργειας, αποτελώντας κρίσιμη παράμετρο για τη σωστή διαχείριση της άρδευσης.



Εικόνα 4. Εξατμισοδιαπνοή

Η ένταση της εξατμισοδιαπνοής επηρεάζεται από ένα σύνολο κλιματικών, περιβαλλοντικών και φυτικών παραγόντων. Μεταξύ αυτών, η θερμοκρασία του αέρα, η σχετική υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο, καθώς καθορίζουν το μικροκλίμα γύρω από το φύλλωμα και την εδαφική επιφάνεια. Παράλληλα, το είδος και το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας καθορίζουν το ρυθμό διαπνοής, καθώς διαφορετικά φυτά παρουσιάζουν διαφορετική ικανότητα διαχείρισης του νερού. Η κατανόηση και ποσοτικοποίηση της εξατμισοδιαπνοής αποτελεί βασικό βήμα για τη βέλτιστη κατανομή των υδατικών πόρων και την αποφυγή τόσο της υπερβολικής άρδευσης όσο και της υδατικής καταπόνησης των φυτών.

Η εφαρμογή της εξατμισοδιαπνοής στην άρδευση στηρίζεται στην αρχή ότι η ποσότητα του νερού που πρέπει να χορηγηθεί σε μια καλλιέργεια αντιστοιχεί στο νερό που έχει χαθεί μέσω εξάτμισης και διαπνοής μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Έτσι, η εξατμισοδιαπνοή χρησιμοποιείται ως δείκτης για τον προσδιορισμό των πραγματικών αναγκών άρδευσης, επιτρέποντας στο σύστημα ελέγχου να αποφασίζει πότε και σε ποια ποσότητα θα πρέπει να παρέχεται νερό. Αντί να εφαρμόζονται σταθερά, προγραμματισμένα διαστήματα ποτίσματος, η άρδευση προσαρμόζεται δυναμικά στις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες, βελτιστοποιώντας τη χρήση του νερού και μειώνοντας τις απώλειες.

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής έχουν προταθεί διάφορα εμπειρικά και φυσικομαθηματικά μοντέλα. Το πιο διαδεδομένο διεθνώς είναι το μοντέλο FAO Penman–Monteith, το οποίο προσφέρει μεγάλη ακρίβεια, αλλά απαιτεί πληθώρα μετεωρολογικών δεδομένων όπως ταχύτητα ανέμου, πίεση, καθαρή ακτινοβολία, τα οποία δεν είναι πάντοτε διαθέσιμα σε μικρές ή πειραματικές εγκαταστάσεις. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί απλοποιημένα μοντέλα εξατμισοδιαπνοής, τα οποία χρησιμοποιούν περιορισμένο αριθμό παραμέτρων διατηρώντας ικανοποιητική ακρίβεια για εφαρμογές σε μικρές καλλιέργειες, θερμοκήπια ή πρωτότυπα συστήματα αυτοματισμού.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας υιοθετείται η εξίσωση Turc, η οποία αναπτύχθηκε το 1961 από τον Γάλλο υδρολόγο Louis Turc. Πρόκειται για ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο εμπειρικό μοντέλο που παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα σε περιοχές με υγρό ή εύκρατο κλίμα και απαιτεί ελάχιστες εισόδους: τη μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα, τη σχετική υγρασία και την ηλιακή ακτινοβολία. Η εξίσωση για υγρά κλίματα έχει την εξής μορφή:

$$ET0=0.013\cdot(Rs+50)\cdot(T)/(T+15)$$

όπου:

- ET0: ημερήσια αναφορά εξατμισοδιαπνοής (mm/ημέρα)
- T: μέση ημερήσια θερμοκρασία (°C)
- Rs: ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία (MJ/m²/ημέρα)

Για περιπτώσεις χαμηλής σχετικής υγρασίας εφαρμόζεται διορθωτικός παράγοντας που λαμβάνει υπόψη την ξηρότητα της ατμόσφαιρας:

$$ET0=0.013\cdot(Rs+50)\cdot(T)/(T+15)\cdot((1)+(50-RH)/70)$$

όπου RH είναι η σχετική υγρασία σε ποσοστό %.

Η επιλογή της εξίσωσης Turc βασίζεται στην απλότητά της και στη συμβατότητά της με τα διαθέσιμα δεδομένα του συστήματος που αναπτύσσεται. Στο θερμοκήπιο της παρούσας

εργασίας δεν χρησιμοποιείται πυρανόμετρο για την άμεση μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίθετα, επειδή το σύστημα φωτισμού αποτελείται από σταθερές πηγές LED, ο παράγοντας Rs θεωρείται σταθερή τιμή, η οποία αντιπροσωπεύει την ενεργειακή συνεισφορά του τεχνητού φωτισμού σε ημερήσια βάση. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατή η εκτίμηση της ET0 με ικανοποιητική ακρίβεια χωρίς την ανάγκη πολύπλοκου εξοπλισμού. Οι μεταβλητές θερμοκρασίας και υγρασίας παρέχονται σε πραγματικό χρόνο από τους αισθητήρες.

Η τεχνική εφαρμογή της προσέγγισης αυτής έγκειται στη δυναμική προσαρμογή της άρδευσης με βάση την υπολογιζόμενη ημερήσια εξατμισοδιαπνοή. Όταν η τιμή της εξατμισοδιαπνοής υπερβεί ένα προκαθορισμένο όριο, το σύστημα ενεργοποιεί αυτόματα τον μηχανισμό ποτίσματος, εξασφαλίζοντας ότι παρέχεται η απαιτούμενη ποσότητα νερού χωρίς σπατάλες. Επιπλέον, οι μετρήσεις υγρασίας εδάφους λειτουργούν ως μηχανισμός επιβεβαίωσης της αποτελεσματικότητας της άρδευσης, ελέγχοντας αν η υγρασία αυξάνεται όπως αναμένεται μετά από κάθε κύκλο ποτίσματος.

Η χρήση της εξατμισοδιαπνοής ως κριτήριο άρδευσης συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της χρήσης των υδατικών πόρων, μειώνει τα λειτουργικά κόστη και ενισχύει τη βιωσιμότητα της παραγωγής, ειδικά σε περιόδους αυξανόμενης πίεσης στους φυσικούς πόρους λόγω κλιματικής αλλαγής [3].

3. Ανάλυση Απαιτήσεων και Σχεδίαση του Συστήματος.

3.1 Λειτουργικές Απαιτήσεις

Το υπό ανάπτυξη σύστημα αυτοματισμού θερμοκηπίου έχει σχεδιαστεί ώστε να καλύπτει ένα σύνολο βασικών λειτουργικών απαιτήσεων που διασφαλίζουν την αυτόνομη και αξιόπιστη λειτουργία του.

Αρχικά, απαιτείται η συλλογή δεδομένων περιβαλλοντικών παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο, μέσω αισθητήρων. Οι μετρήσεις αυτές μεταδίδονται μέσω ενσύρματης επικοινωνίας RS485 από τη μονάδα αισθητήρων προς τη μονάδα επεξεργασίας.

Στη συνέχεια, η μονάδα επεξεργασίας υπολογίζει κρίσιμους δείκτες, όπως η εξατμισοδιαπνοή, με βάση τις περιβαλλοντικές παραμέτρους, και εφαρμόζει προκαθορισμένους κανόνες ελέγχου για την ενεργοποίηση λειτουργιών όπως η άρδευση, ο εξαερισμός και ο φωτισμός. Οι εντολές ελέγχου αποστέλλονται στη μονάδα επενεργητών μέσω του ίδιου RS485 διαύλου, η οποία με τη σειρά της υλοποιεί τις αντίστοιχες φυσικές ενέργειες.

Παράλληλα, το σύστημα πραγματοποιεί ασύρματη μετάδοση δεδομένων μέσω Wi-Fi προς έναν MQTT broker (Node-RED) και αποθήκευση των μετρήσεων σε βάση δεδομένων InfluxDB, επιτρέποντας την ιστορική παρακολούθηση των συνθηκών του θερμοκηπίου. Τα δεδομένα απεικονίζονται σε πραγματικό χρόνο μέσω της πλατφόρμας Grafana, παρέχοντας στον χρήστη μια πλήρη και εύληπτη εικόνα της λειτουργίας του συστήματος.

Τέλος, το σύστημα έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί αυτόνομα, χωρίς συνεχή ανθρώπινη παρέμβαση.

Συνοπτικά, οι βασικές λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματος είναι οι εξής:

1. Συλλογή δεδομένων από αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο.

2. Ενσύρματη μετάδοση δεδομένων μέσω RS485 από τη μονάδα αισθητήρων στη μονάδα επεξεργασίας.

3. Επεξεργασία μετρήσεων και υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής.

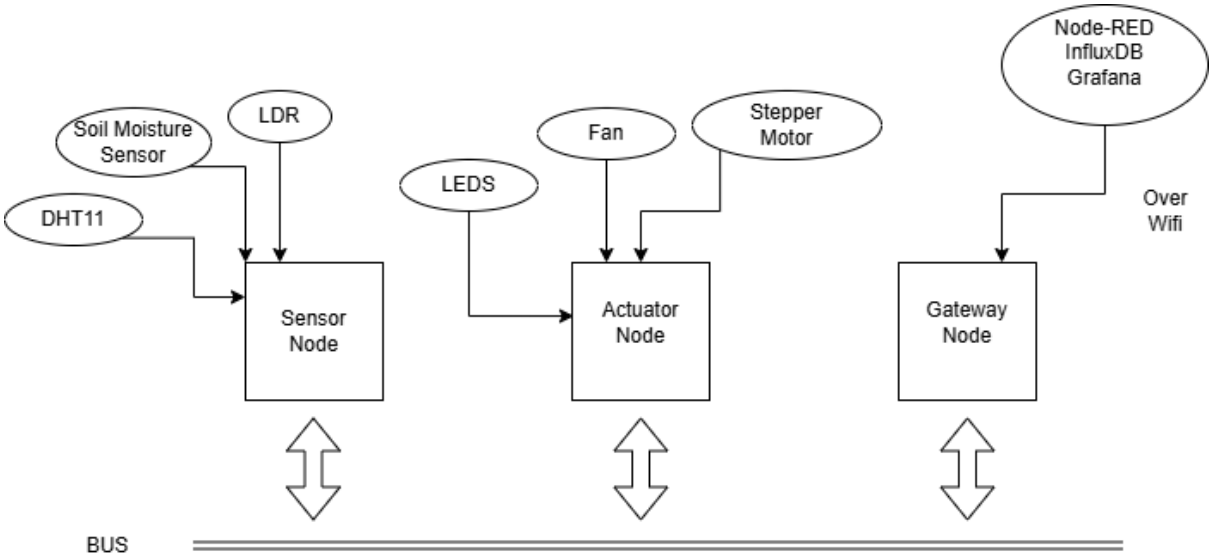
4. Λήψη αποφάσεων αυτοματισμού με βάση περιβαλλοντικές παραμέτρους και προκαθορισμένα όρια.

5. Αποστολή εντολών στη μονάδα επενεργητών μέσω RS485 για εκτέλεση ενεργειών.

6. Ασύρματη μετάδοση και αποθήκευση δεδομένων μέσω MQTT – InfluxDB.

7. Οπτικοποίηση μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο μέσω Grafana.

8. Αυτόνομη λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 1. Εννοιολογική αποτύπωση των ρόλων του συστήματος

3.2 Αρχιτεκτονική του Συστήματος

Η αρχιτεκτονική του υπό μελέτη συστήματος βασίζεται στη διασύνδεση ανεξάρτητων μονάδων που συνεργάζονται για την παρακολούθηση και τον αυτοματοποιημένο έλεγχο του περιβάλλοντος ενός θερμοκηπίου. Ο σχεδιασμός ακολουθεί μια ιεραρχική δομή, με σαφώς διακριτούς ρόλους για κάθε επιμέρους υποσύστημα, διασφαλίζοντας την ευελιξία, την επεκτασιμότητα και την αξιοπιστία της συνολικής λειτουργίας.

Η συνολική αρχιτεκτονική αποτελείται από τρεις βασικές μονάδες (βλ. Σχήμα 1) , τη μονάδα αισθητήρων, τη μονάδα επεξεργασίας και τη μονάδα επενεργητών. Κάθε μία από αυτές

υλοποιείται με τη χρήση μικροελεγκτών Arduino, και συνδέεται με τις υπόλοιπες μέσω ενός κοινού ενσύρματου διαύλου επικοινωνίας, βασισμένου στο πρότυπο RS485.

3.2.1 Μονάδα Αισθητήρων.

Η μονάδα αισθητήρων έχει ως κύριο στόχο τη συλλογή κρίσιμων περιβαλλοντικών παραμέτρων. Ενσωματώνει αισθητήρες για τη θερμοκρασία και υγρασία του αέρα, την υγρασία του εδάφους και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι τιμές που συλλέγονται μεταδίδονται περιοδικά προς την κεντρική μονάδα μέσω του RS485 bus, με έναν ελαφρύ αλλά σταθερό ρυθμό δειγματοληψίας.

3.2.2 Μονάδα Επεξεργασίας.

Η μονάδα επεξεργασίας, που υλοποιείται με το Arduino Uno R4 WiFi, λειτουργεί ως ο «εγκέφαλος» του συστήματος. Λαμβάνει τα δεδομένα από τη μονάδα αισθητήρων, τα επεξεργάζεται, υπολογίζει την εξατμισοδιαπνοή και λαμβάνει αποφάσεις σε σχέση με τις ανάγκες της καλλιέργειας. Παράλληλα, είναι υπεύθυνη για την ασύρματη αποστολή των δεδομένων στο δίκτυο μέσω Wi-Fi, κάνοντας χρήση του MQTT πρωτοκόλλου επικοινωνίας. Η πληροφορία αυτή μεταφέρεται σε μια διεπαφή Node-RED και καταλήγει σε βάση δεδομένων InfluxDB, από όπου μπορεί να οπτικοποιηθεί σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση του Grafana.

3.2.3 Μονάδα Επενεργητών

Η μονάδα επενεργητών εκτελεί τις εντολές που προέρχονται από τη μονάδα επεξεργασίας, ενεργοποιώντας ή απενεργοποιώντας συσκευές όπως ηλεκτροβάνες ποτίσματος, ανεμιστήρες ή φώτα. Η επικοινωνία γίνεται και εδώ μέσω RS485, με τη μονάδα να λειτουργεί ως δέκτης και εκτελεστής εντολών, χωρίς να συμμετέχει στη λήψη αποφάσεων.

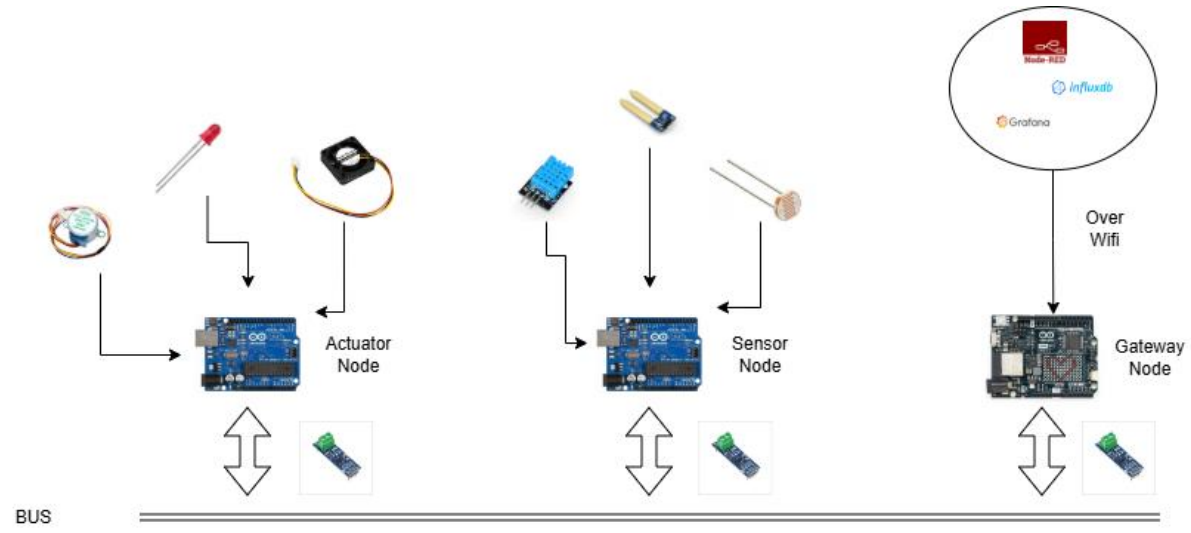
3.2.4 Δίκτυο Επικοινωνίας

Η ενσύρματη επικοινωνία μεταξύ των μονάδων υλοποιείται με το πρωτόκολλο RS485, το οποίο παρέχει αξιοπιστία σε συνθήκες ηλεκτρομαγνητικού θορύβου και μεγάλων αποστάσεων. Η MQTT επικοινωνία χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την αποστολή δεδομένων προς το περιβάλλον απομακρυσμένης παρακολούθησης, χωρίς δυνατότητα αποστολής εντολών από τον χρήστη προς το θερμοκήπιο.

3.2.5 Αποτέλεσμα

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική βασίζεται στην αρχή της κατανομής ρόλων (distributed control), διαχωρίζοντας τις ευθύνες κάθε μονάδας για λόγους ευκολίας συντήρησης και δυνατότητας μελλοντικής επέκτασης. Παράλληλα, η χρήση του RS485 ως μέσου επικοινωνίας εξασφαλίζει σταθερότητα, ενώ η σύνδεση Wi-Fi ανοίγει τον δρόμο για απομακρυσμένη εποπτεία των δεδομένων.

Το αποτέλεσμα είναι ένα σύστημα αρθρωτής δομής, στο οποίο η κάθε μονάδα επιτελεί μια εξειδικευμένη λειτουργία, συμβάλλοντας στην αυτονομία της εγκατάστασης. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει όχι μόνο την ορθή λειτουργία αλλά και τη δυνατότητα προσαρμογής του συστήματος σε ευρύτερες ή διαφορετικές αγροτικές εφαρμογές. Το Σχήμα 2 παρουσιάζει τη συνολική αρχιτεκτονική επικοινωνίας του συστήματος, όπου ο κόμβος αισθητήρων (Sensor Node) συλλέγει δεδομένα από τους αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, φωτός και υγρασίας εδάφους, ο κόμβος επενεργητών (Actuator Node) ελέγχει τις συσκευές εξόδου, όπως ανεμιστήρες, φωτισμό και μοτέρ, ενώ ο κεντρικός κόμβος (Master Node) αναλαμβάνει τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων, καθώς και την αποστολή τους στο περιβάλλον IoT μέσω Wi-Fi.



Σχήμα 2. Αρχιτεκτονική του Συστήματος

3.3 Διάγραμμα επικοινωνίας RS485

Η επικοινωνία μεταξύ των τριών μονάδων του συστήματος βασίζεται στην ενσύρματη σύνδεση μέσω του προτύπου RS485. Το επικοινωνιακό σχήμα ακολουθεί τη δομή ενός διαύλου (bus), στον οποίο συνδέονται και οι τρεις μονάδες.

Η καλωδίωση του RS485 περιλαμβάνει δύο γραμμές μετάδοσης (A και B), οι οποίες συνδέονται σε όλους τους κόμβους μέσω των κατάλληλων TTL–RS485 μετατροπέων. Παρότι στη συγκεκριμένη εφαρμογή ο αριθμός των κόμβων είναι μικρός , η επιλογή του RS485 διασφαλίζει ότι το σύστημα μπορεί μελλοντικά να επεκταθεί με την προσθήκη επιπλέον συσκευών χωρίς να απαιτείται αλλαγή του επικοινωνιακού πρωτοκόλλου.

Η ροή της πληροφορίας γίνεται με τη μορφή απλών, προκαθορισμένων μηνυμάτων. Ο master ζητά από τον κόμβο αισθητήρων να του στείλει μετρήσεις, τις επεξεργάζεται, υπολογίζει παραμέτρους όπως η εξατμισοδιαπνοή, και κατόπιν αποφασίζει αν και πότε θα αποσταλεί εντολή ενεργοποίησης στους αντίστοιχους επενεργητές. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική προσφέρει καθαρό διαχωρισμό λειτουργιών, μειώνοντας το φορτίο στους δευτερεύοντες κόμβους και επιτρέποντας ευκολότερο εντοπισμό και αποσφαλμάτωση σε περίπτωση βλάβης.

3.4 Διάγραμμα Ροής και Λογική Αυτοματισμών

Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται σε μια προκαθορισμένη λογική αυτοματισμού, η οποία υλοποιείται μέσω του λογισμικού του κεντρικού μικροελεγκτή. Ο κεντρικός κόμβος συγχρονίζει τη λειτουργία των επιμέρους μονάδων, επεξεργάζεται τις μετρήσεις που λαμβάνει και λαμβάνει αποφάσεις για την ενεργοποίηση των κατάλληλων μηχανισμών ελέγχου, χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση.

Η λειτουργική ροή ξεκινά με τη συνεχή ανάγνωση αισθητηρίων δεδομένων από τη μονάδα αισθητήρων μέσω RS485. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής με βάση τις τρέχουσες περιβαλλοντικές συνθήκες, καθώς και έλεγχος προκαθορισμένων ορίων. Ανάλογα με τα αποτελέσματα, ο κεντρικός κόμβος αποφασίζει την ενεργοποίηση λειτουργιών, όπως η άρδευση ή ο εξαερισμός, αποστέλλοντας τις αντίστοιχες εντολές στη μονάδα επενεργητών μέσω RS485. Τέλος, τα δεδομένα αποστέλλονται ασύρματα μέσω MQTT σε InfluxDB για ιστορική αποθήκευση και απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο μέσω Grafana.

Η παραπάνω διαδικασία εκτελείται σε κυκλική βάση ώστε το σύστημα να παραμένει συγχρονισμένο με τις εκάστοτε συνθήκες του θερμοκηπίου και να αντιδρά έγκαιρα σε κάθε μεταβολή.

Βασικά βήματα λειτουργίας:

1. Ανάγνωση αισθητήρων μέσω RS485.

2. Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής.

3. Έλεγχος κατωφλίων (υγρασία εδάφους, θερμοκρασία κ.λπ.).

4. Λήψη αποφάσεων αυτοματισμού.

5. Αποστολή εντολών στη μονάδα επενεργητών.

6. Αποστολή δεδομένων σε MQTT → InfluxDB → Grafana.

7. Επανάληψη της διαδικασίας σε σταθερό χρονικό κύκλο.

3.5 Επιλογή Υλικού και Εξαρτημάτων.

Η επιλογή του υλικού για την υλοποίηση του συστήματος βασίστηκε σε τρεις βασικούς άξονες, χαμηλό κόστος, συμβατότητα με τεχνολογίες IoT και ευκολία ανάπτυξης τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και λογισμικού. Στόχος ήταν η δημιουργία ενός λειτουργικού πρωτοτύπου που να μπορεί να επεκταθεί και να τροποποιηθεί εύκολα, χωρίς να απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός ή υψηλό κόστος εγκατάστασης.

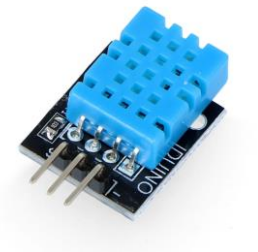
3.5.1 Αισθητήρες.

Οι αισθητήρες αποτελούν βασικό στοιχείο κάθε συστήματος αυτοματισμού και επιτήρησης, καθώς λειτουργούν ως τα «αισθητήρια όργανα» που επιτρέπουν στο σύστημα να αντιλαμβάνεται το περιβάλλον του. Μέσω της καταγραφής φυσικών μεγεθών, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία ή η φωτεινότητα, μετατρέπουν τα δεδομένα του πραγματικού κόσμου σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία από μικροελεγκτές ή άλλες υπολογιστικές μονάδες.

Οι αισθητήρες διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το φυσικό μέγεθος που μετρούν (π.χ. θερμικοί, οπτικοί, υγρασίας), τον τρόπο λειτουργίας τους (αναλογικοί ή ψηφιακοί) και τον τύπο εξόδου που παρέχουν. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, μπορούν να είναι απλοί και οικονομικοί ή πιο σύνθετοι.

Η αξιοπιστία, η ακρίβεια και η ευαισθησία ενός αισθητήρα επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα των δεδομένων που συλλέγονται και, κατά συνέπεια, την αποτελεσματικότητα των αποφάσεων που λαμβάνονται από το σύστημα. Επομένως, η σωστή επιλογή αισθητήρων και η κατάλληλη τοποθέτησή τους αποτελούν κρίσιμα βήματα στη σχεδίαση κάθε συστήματος αυτοματισμού.

3.5.1.1 Αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας DHT11

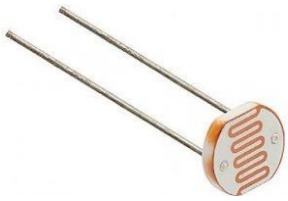


Εικόνα 5. DHT11

Για την καταγραφή των βασικών συνθηκών του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου χρησιμοποιείται ο αισθητήρας DHT11, ο οποίος προσφέρει τη δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Ο αισθητήρας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5, ενσωματώνει ένα θερμίστορ για τη θερμοκρασία και έναν πυκνωτικό αισθητήρα για την υγρασία, ενώ τα δεδομένα που συλλέγει αποστέλλονται στο Arduino μέσω μιας και μόνο ψηφιακής γραμμής, διευκολύνοντας τη συνδεσμολογία.

Ο DHT11 καλύπτει περιοχή θερμοκρασιών από 0°C έως 50°C με ακρίβεια ±2°C, και υγρασίας από 20% έως 90% με ακρίβεια περίπου ±5%. Η ταχύτητα απόκρισης του και η σταθερή απόδοσή του τον καθιστούν κατάλληλο για εφαρμογές βασικής παρακολούθησης, ενώ η ευρεία συμβατότητα με την πλατφόρμα Arduino επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωσή του στο σύστημα [4].

3.5.1.2 Φωτοαντίσταση (LDR)



Εικόνα 6. Φωτοαντίσταση

Η εκτίμηση της φωτεινότητας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης μιας φωτοαντίστασης τύπου LDR (Light Dependent Resistor), η οποία φαίνεται στην Εικόνα 6. Η συγκεκριμένη διάταξη βασίζεται στην ιδιότητα των υλικών να μεταβάλλουν την ηλεκτρική τους αντίσταση ανάλογα με την ένταση του φωτός που προσπίπτει στην επιφάνειά τους. Όσο υψηλότερη είναι η φωτεινότητα, τόσο μικρότερη γίνεται η αντίσταση της LDR.

Η μέτρηση της φωτεινότητας υλοποιείται μέσω ενός αναλογικού διαύλου, με το Arduino να καταγράφει την τιμή της τάσης που προκύπτει από έναν απλό διαιρέτη τάσης. Η πληροφορία αυτή, αν και δεν παρέχει απόλυτη τιμή σε lux, αρκεί για τη σχετική εκτίμηση του επιπέδου ηλιακής ακτινοβολίας, και μπορεί να αξιοποιηθεί σε αποφάσεις που αφορούν τη φωτοπερίοδο και τον φωτισμό του θερμοκηπίου.

3.5.1.3 Αισθητήρας Υγρασίας Εδάφους.



Εικόνα 7.Μετρητής υγρασίας εδάφους

Η υγρασία του εδάφους αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη βιωσιμότητα και την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Για την παρακολούθηση αυτής της παραμέτρου, χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας αγωγιμότητας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7 ο οποίος αξιοποιεί την ιδιότητα του υγρού εδάφους να επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ δύο μεταλλικών ακίδων. Όσο υψηλότερη είναι η υγρασία, τόσο μικρότερη

είναι η ηλεκτρική αντίσταση του υποστρώματος, με αποτέλεσμα την αντίστοιχη μεταβολή της αναλογικής τάσης εξόδου.

Ο αισθητήρας αυτός συνδέεται σε μία αναλογική είσοδο του Arduino και παρέχει συνεχή ροή δεδομένων που επιτρέπει τη δυναμική αξιολόγηση των συνθηκών άρδευσης. Αν και η μακροχρόνια χρήση του επηρεάζεται από την οξείδωση των ακίδων, η οικονομική του κατασκευή τον καθιστά κατάλληλο για ερευνητικές ή μικρής κλίμακας εφαρμογές, όπως η παρούσα.

3.5.2 Επενεργητές.

Οι επενεργητές αποτελούν το εκτελεστικό τμήμα ενός συστήματος αυτοματισμού, καθώς αναλαμβάνουν να μετατρέψουν τις εντολές του μικροελεγκτή σε φυσικές ενέργειες που επιδρούν στο περιβάλλον. Ενώ οι αισθητήρες παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες για την παρακολούθηση των συνθηκών, οι επενεργητές επιτρέπουν στο σύστημα να αλληλεπιδρά ενεργά με αυτές, υλοποιώντας λειτουργίες ελέγχου.

Ανάλογα με τον τύπο και τον ρόλο τους, οι επενεργητές μπορούν να ελέγχουν διάφορες φυσικές παραμέτρους, όπως τη ροή νερού, τη θερμοκρασία, τον φωτισμό ή την κίνηση μηχανισμών. Τυπικά παραδείγματα επενεργητών σε ενσωματωμένα συστήματα περιλαμβάνουν ηλεκτροβάνες, κινητήρες συνεχούς ρεύματος, stepper motors, ανεμιστήρες, ρελέ και φωτιστικά σώματα LED. Μέσω της ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης αυτών των μηχανισμών, το σύστημα μπορεί να εκτελεί προκαθορισμένες λειτουργίες με ακρίβεια και συνέπεια.

Οι επενεργητές διακρίνονται ανάλογα με το είδος της ενέργειας που παράγουν ή ελέγχουν (ηλεκτρομηχανικοί, πνευματικοί, ηλεκτροϋδραυλικοί) και τον τρόπο λειτουργίας τους (διακοπτικοί ή αναλογικοί). Σε μικρές ή πειραματικές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται κυρίως ηλεκτρονικοί επενεργητές, οι οποίοι ελέγχονται απευθείας από τον μικροελεγκτή μέσω απλών ψηφιακών ή αναλογικών σημάτων.

Η αξιοπιστία, η ταχύτητα απόκρισης και η ενεργειακή απόδοση των επενεργητών αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη σωστή λειτουργία ενός αυτοματοποιημένου συστήματος. επενεργητές χαμηλής ποιότητας ή ακατάλληλα επιλεγμένοι μπορούν να οδηγήσουν σε

καθυστερήσεις, σφάλματα ή αναποτελεσματική εκτέλεση εντολών. Αντίθετα, η κατάλληλη επιλογή και ενσωμάτωσή τους εξασφαλίζει σταθερή λειτουργία και αποδοτική χρήση πόρων.

3.5.2.1 LED.



Εικόνα 8. LED

Η οπτική απεικόνιση της κατάστασης του θερμοκηπίου επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης τριών LEDs διαφορετικού χρώματος. Η Εικόνα 8 απεικονίζει τα LEDs που χρησιμοποιούνται στο σύστημα, τα οποία παρέχουν άμεση και κατανοητή οπτική ένδειξη για τις συνθήκες λειτουργίας του θερμοκηπίου. Το κίτρινο LED χρησιμοποιείται ως ένδειξη για τα επίπεδα υγρασίας του αέρα, το κόκκινο LED για την κατάσταση θέρμανσης ή ψύξης, ενώ το πράσινο LED για τον φωτισμό. Η ενεργοποίησή τους γίνεται κατόπιν εντολών που αποστέλλει ο Master Node στον Actuator Node, και προσφέρει άμεση και ευδιάκριτη αναφορά στον χρήστη για τις τρέχουσες συνθήκες ή για την κατάσταση λειτουργίας των μηχανισμών.

3.5.2.2 Step Motor.



Εικόνα 9. Βηματικός κινητήρας

Η άρδευση υλοποιείται με τη χρήση βηματικού κινητήρα τύπου 28BYJ-48 5V DC, ο οποίος απεικονίζεται στην Εικόνα 9. Μέσω κατάλληλης μηχανικής διάταξης, ο κινητήρας αυτός μπορεί να κινεί μια μικρή αντλία νερού. Ο συγκεκριμένος κινητήρας είναι ευρέως διαδεδομένος σε εφαρμογές αυτοματισμού λόγω της χαμηλής κατανάλωσης, της αξιοπιστίας του και της δυνατότητας ακριβούς ελέγχου θέσης και βημάτων. Σε συνδυασμό με το κύκλωμα

οδήγησης LN298N H-Bridge, επιτρέπει την περιστροφή σε προκαθορισμένα βήματα, ώστε το σύστημα να ελέγχει με ακρίβεια τη διάρκεια και την ποσότητα της άρδευσης. Με αυτόν τον τρόπο, το νερό παρέχεται μόνο όταν η υγρασία του εδάφους πέσει κάτω από τα επιθυμητά όρια, εξασφαλίζοντας ορθολογική χρήση των πόρων και αποφυγή υπερβολικής κατανάλωσης.

3.5.2.3 Ανεμιστήρας Εξαερισμού.



Εικόνα 10. Ανεμιστήρας

Η ρύθμιση της θερμοκρασίας και η κυκλοφορία του αέρα στο θερμοκήπιο επιτυγχάνονται με τη χρήση ανεμιστήρα Waveshare FAN-4010-5V, ο οποίος απεικονίζεται στην Εικόνα 10, και λειτουργεί με τάση 5V συνεχούς ρεύματος. Πρόκειται για μικρού μεγέθους ανεμιστήρα (40×40×10 mm), σχεδιασμένο για αξιόπιστη λειτουργία σε συστήματα ηλεκτρονικών, με χαμηλή κατανάλωση και ικανότητα να δημιουργεί επαρκή ροή αέρα για εφαρμογές εξαερισμού μικρών χώρων. Ο ανεμιστήρας συνδέεται στο Actuator Node και οδηγείται μέσω κυκλώματος MOSFET ισχύος, το οποίο λειτουργεί ως ηλεκτρονικός διακόπτης και επιτρέπει στο Arduino να τον ενεργοποιεί ή να τον απενεργοποιεί χωρίς να επιβαρύνεται από την κατανάλωσή του. Η χρήση του είναι καθοριστική για τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας και την αποφυγή υπερθέρμανσης στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

3.5.3. Επιμέρους Υλικό.

3.5.3.1 H-Bridge L298N.



Εικόνα 11. H-Bridge L298N

Στην Εικόνα 11 βλέπουμε το κύκλωμα L298N το αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους οδηγούς κινητήρων και χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία για τον έλεγχο του βηματικού κινητήρα 28BYJ-48. Το L298N υποστηρίζει την οδήγηση δύο κινητήρων συνεχούς ρεύματος ή ενός βηματικού κινητήρα, παρέχοντας τη δυνατότητα ελέγχου τόσο της κατεύθυνσης περιστροφής όσο και της ταχύτητας. Στην υλοποίηση του συστήματος, το L298N συνεργάζεται με το Arduino Actuator Node, λαμβάνοντας εντολές μέσω ψηφιακών pins και κατευθύνοντας την αντλία νερού με ακρίβεια. Η επιλογή του βασίστηκε στη σταθερότητα, τη χαμηλή τιμή του και την ευρεία υποστήριξη σε εφαρμογές εκπαίδευσης και αυτοματισμών.

3.5.3.2 Arduino Uno R3.



Εικόνα 12. Arduino Uno R3

Στην Εικόνα 12 βλέπουμε το Arduino Uno R3, το οποίο χρησιμοποιήθηκε τόσο στον κόμβο αισθητήρων όσο και στον κόμβο επενεργητών. Με μικροελεγκτή ATmega328P, διαθέτει 14 ψηφιακές εισόδους/εξόδους και 6 αναλογικές εισόδους, επαρκείς για τη συλλογή δεδομένων

και τον έλεγχο απλών μηχανισμών. Η αξιοπιστία του, η απλότητα χρήσης και η τεράστια κοινότητα υποστήριξης το καθιστούν ιδανικό για τέτοιου είδους εφαρμογές.

3.5.3.3 Arduino Uno R4 WiFi.



Εικόνα 13. Arduino Uno R4 WiFi

Ο Master Node βασίστηκε στο Arduino Uno R4 WiFi, το οποίο βλέπουμε στην Εικόνα 13. Η πλατφόρμα αυτή διαθέτει ισχυρότερο 32-bit μικροελεγκτή Renesas RA4M1, μεγαλύτερη μνήμη, αυξημένη ταχύτητα και ενσωματωμένη ασύρματη συνδεσιμότητα Wi-Fi. Το Uno R4 WiFi αποτέλεσε την ιδανική επιλογή για τον κεντρικό κόμβο, αφού του επιτρέπει να διαχειρίζεται τα δεδομένα που λαμβάνει από τον RS485, να υπολογίζει κρίσιμες παραμέτρους (όπως την εξατμισοδιαπνοή) και να τα προωθεί στο οικοσύστημα IoT μέσω Node-RED, InfluxDB και Grafana.

3.5.3.4 MOSFET BUZ11



Εικόνα 14. MOSFET BUZ11

Η Εικόνα 14 μας δείχνει το MOSFET BUZ11, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο του ανεμιστήρα και αποτελεί ένα N-channel MOSFET ισχύος. Το BUZ11 μπορεί να χειριστεί σχετικά υψηλά ρεύματα (έως 30A) και να λειτουργήσει σε χαμηλές τάσεις, καθιστώντας το ιδανικό για την οδήγηση του ανεμιστήρα 5V που χρησιμοποιήθηκε στο θερμοκήπιο. Το Arduino στέλνει χαμηλής ισχύος σήμα στην πύλη του MOSFET, το οποίο λειτουργεί ως

ηλεκτρονικός διακόπτης και ελέγχει την παροχή ρεύματος στον ανεμιστήρα. Το BUZ11 διασφαλίζει την ασφαλή λειτουργία του κυκλώματος και την προστασία του μικροελεγκτή από αιχμές τάσης.

3.5.3.5 Καλώδιο UTP



Εικόνα 15. Καλώδιο UTP

Για τη σύνδεση των RS485 modules χρησιμοποιήθηκε καλώδιο UTP το οποίο βλέπουμε στην Εικόνα 15. Η επιλογή του βασίστηκε στην ανθεκτικότητα, την ευκολία εύρεσης και τη δυνατότητα αξιόπιστης μετάδοσης δεδομένων σε αποστάσεις αρκετών μέτρων χωρίς σημαντικές απώλειες σήματος. Τα συνεστραμμένα ζεύγη του καλωδίου Ethernet μειώνουν τον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, προσφέροντας καθαρό σήμα και σταθερή επικοινωνία μεταξύ των κόμβων.

3.5.3.6 Μετατροπείς TTL σε RS485



Εικόνα 16. Μετατροπείς TTL σε RS485

Η επικοινωνία μεταξύ των επιμέρους μονάδων του συστήματος επιτυγχάνεται μέσω του πρωτοκόλλου RS485, το οποίο είναι σχεδιασμένο για ανθεκτικότητα σε βιομηχανικά

περιβάλλοντα και μεγάλες αποστάσεις μετάδοσης. Για να μπορέσει το Arduino να επικοινωνήσει μέσω αυτού του πρωτοκόλλου, απαιτείται η χρήση ειδικών μετατροπέων σήματος έναν από τους οποίους βλέπουμε στην Εικόνα 16. Οι μετατροπείς αυτοί μετασχηματίζουν τη λογική στάθμη TTL του Arduino στο διαφορικό σήμα του RS485. Οι μετατροπείς TTL σε RS485 που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία βασίζονται σε ολοκληρωμένα κυκλώματα τύπου MAX485, τα οποία προσφέρουν αμφίδρομη επικοινωνία μέσω μόνο δύο καλωδίων (A και B). Οι συσκευές αυτές προσφέρουν αξιόπιστη και σταθερή μετάδοση δεδομένων, μειώνοντας την πιθανότητα λαθών λόγω παρεμβολών ή απώλειας σήματος. Η ενσωμάτωσή τους στο σύστημα επέτρεψε τη δημιουργία ενός σταθερού επικοινωνιακού διαύλου μεταξύ των μονάδων αισθητήρων, επεξεργασίας και επενεργητών.

3.6 Λογισμικό και εργαλεία οπτικοποίησης δεδομένων

Η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος αυτοματισμού θερμοκηπίου δεν περιορίζεται μόνο στο επίπεδο του υλικού, αλλά απαιτεί και την ενσωμάτωση εργαλείων λογισμικού που θα επιτρέψουν την αποθήκευση, την ανάλυση και την οπτικοποίηση των δεδομένων. Στην παρούσα εργασία αξιοποιήθηκαν τρεις βασικές πλατφόρμες ανοιχτού κώδικα, το Node-RED, η InfluxDB και το Grafana. Κάθε μία από αυτές επιτελεί διαφορετικό ρόλο μέσα στο οικοσύστημα του IoT και συμβάλλει στη συνολική λειτουργικότητα του συστήματος.

3.6.1. Node – RED.

Το Node-RED αποτελεί ένα εργαλείο ανάπτυξης εφαρμογών που βασίζεται σε ροές (flow-based programming). Δημιουργήθηκε από την IBM και προσφέρει γραφικό περιβάλλον όπου οι λειτουργίες υλοποιούνται με τη σύνδεση κόμβων, χωρίς να απαιτείται η συγγραφή μεγάλου όγκου κώδικα. Είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο στον χώρο του IoT, καθώς υποστηρίζει πλήθος πρωτοκόλλων επικοινωνίας, όπως MQTT, HTTP και WebSockets. Στην παρούσα υλοποίηση, το Node-RED χρησιμοποιείται ως ενδιάμεσος κόμβος επικοινωνίας, λαμβάνοντας τις μετρήσεις από το Arduino μέσω MQTT και προωθώντας τα δεδομένα στη βάση InfluxDB.

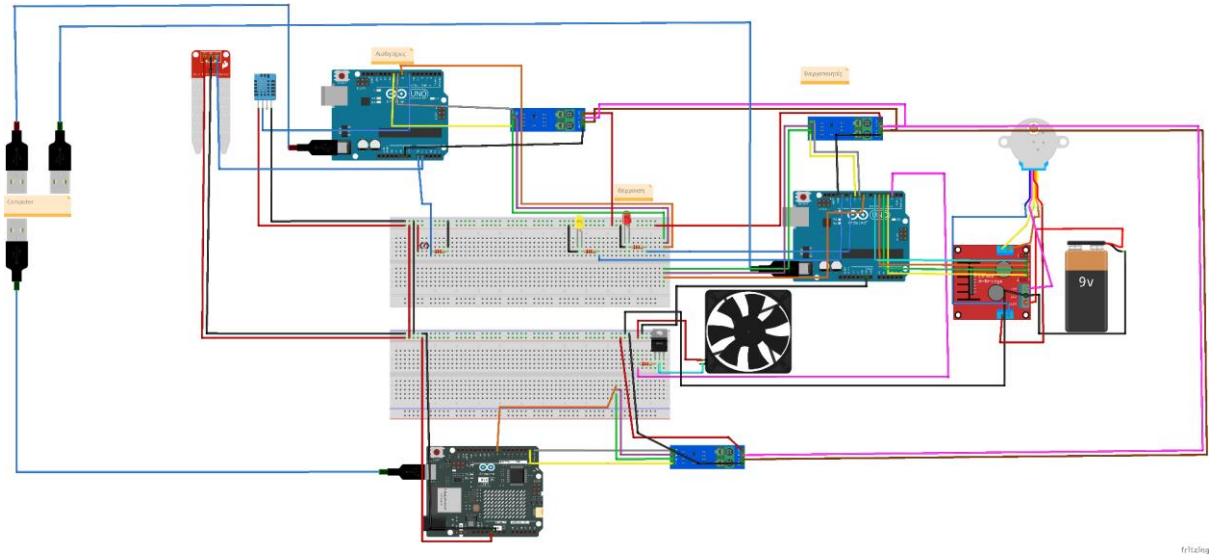
3.6.2. InfluxDB

Η InfluxDB είναι μία εξειδικευμένη βάση δεδομένων που έχει σχεδιαστεί για την αποθήκευση χρονοσειρών (time series data). Σε αντίθεση με τις κλασικές σχεσιακές βάσεις δεδομένων, η InfluxDB είναι βελτιστοποιημένη για δεδομένα που αλλάζουν συνεχώς με το χρόνο, όπως οι μετρήσεις αισθητήρων. Κάθε καταχώρηση συνοδεύεται από χρονοσήμανση, γεγονός που επιτρέπει την αξιόπιστη παρακολούθηση των μεταβολών των περιβαλλοντικών παραμέτρων στο θερμοκήπιο. Η χρήση της επιτρέπει τόσο την αποθήκευση σε πραγματικό χρόνο όσο και την ιστορική ανάλυση, παρέχοντας σημαντικά πλεονεκτήματα στην αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος.

3.6.3 Grafana

Το Grafana είναι μια πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα για την οπτικοποίηση και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Υποστηρίζει τη σύνδεση με πλήθος βάσεων δεδομένων και συστημάτων συλλογής μετρήσεων, όπως η InfluxDB, επιτρέποντας τη δημιουργία δυναμικών και διαδραστικών dashboards. Μέσω γραφημάτων, δεικτών, πινάκων και χρονικών απεικονίσεων, προσφέρει στον χρήστη τη δυνατότητα να παρακολουθεί εύκολα πολύπλοκα σύνολα δεδομένων και να εντοπίζει τάσεις ή αποκλίσεις.

4.Υλοποίηση του συστήματος



Σχήμα 3. Κυκλώματα διασύνδεσης των επιμέρους εξαρτημάτων

Το Σχήμα 3 παρουσιάζει το πλήρες κύκλωμα συνδεσμολογίας του συστήματος, όπως υλοποιήθηκε στο περιβάλλον Fritzing. Στο διάγραμμα αποτυπώνεται η διασύνδεση των τριών μικροελεγκτών Arduino, καθώς και όλων των αισθητήρων και επενεργητών που χρησιμοποιήθηκαν.

4.1 Φυσικό επίπεδο πρωτοκόλλου επικοινωνίας

Η επικοινωνία μεταξύ των Arduino κόμβων πραγματοποιείται μέσω ενός ενσύρματου διαύλου RS485 σε λειτουργία half-duplex, με τη χρήση μετατροπέων TTL ↔ RS485. Κάθε μετατροπέας παρεμβάλλεται μεταξύ του Arduino και των γραμμών A/B του διαύλου και διαθέτει τρεις βασικούς ακροδέκτες ελέγχου και δεδομένων:

- **DI (Driver Input)**: Είναι η είσοδος του πομπού. Σε αυτό το pin συνδέεται η έξοδος TX της σειριακής θύρας του Arduino (στην υλοποίηση χρησιμοποιείται SoftwareSerial). Ό,τι στέλνει το Arduino μέσω της εντολής `SoftwareSerial.write()` περνάει από το DI και μετατρέπεται σε διαφορικό σήμα που μεταδίδεται στις γραμμές A/B του RS485.

- **RO (Receiver Output)**: Είναι η έξοδος του δέκτη. Από αυτό το pin λαμβάνει δεδομένα το RX της σειριακής του Arduino. Με τον τρόπο αυτό, ό,τι φτάνει στις γραμμές A/B

αποκωδικοποιείται από τον μετατροπέα και καταλήγει στο Arduino ως σειριακά bytes τα οποία μπορούν να διαβαστούν με `Serial.read()`.

- **DE/RE (Driver Enable / Receiver Enable)**: Είναι ο ακροδέκτης που καθορίζει αν η συσκευή «μιλά» ή «ακούει». Όταν το DE/RE είναι σε λογικό HIGH, ενεργοποιείται ο πομπός και το Arduino μπορεί να στείλει δεδομένα στο δίαυλο. Όταν είναι σε LOW, ενεργοποιείται ο δέκτης και το Arduino «ακούει» τη γραμμή. Στην υλοποίηση, ο έλεγχος του DE/RE γίνεται μέσω ενός ψηφιακού pin (D8). Πριν από κάθε αποστολή, το pin τίθεται σε HIGH, αποστέλλονται τα δεδομένα, και στη συνέχεια επανέρχεται σε LOW για να συνεχιστεί η ακρόαση.

Με αυτόν τον μηχανισμό, κάθε Arduino μπορεί να εναλλάσσει δυναμικά τον ρόλο του μεταξύ αποστολέα και δέκτη στον ίδιο δίαυλο, χωρίς να προκύπτουν συγκρούσεις, αφού τη δεδομένη στιγμή μόνο ένας κόμβος έχει ενεργό τον πομπό του. Έτσι επιτυγχάνεται αξιόπιστη επικοινωνία πολλών κόμβων με μία μόνο γραμμή μεταφοράς δεδομένων.

4.2 Επικοινωνία μεταξύ των node

Η διαδικασία επικοινωνίας μεταξύ των τριών Arduino βασίζεται σε μια απλή αλλά αποτελεσματική ακολουθία ελέγχου και ανταλλαγής δεδομένων μέσω του διαύλου RS485. Ο Master Node λειτουργεί ως κόμβος εκκίνησης της επικοινωνίας. Αρχικά, τίθεται το pin DE/RE σε λογικό HIGH ώστε να ενεργοποιηθεί ο πομπός, και αποστέλλεται μέσω της σειριακής θύρας (Serial.write) μια σύντομη συμβολοσειρά ενεργοποίησης προς τον δίαυλο.

```
if (Serial.available())
{
digitalWrite(RS_DE_RE, HIGH);
RS_Master.write(Serial.read());
delay(10);
digitalWrite(RS_DE_RE,LOW);
}
```

Στην πλευρά του Sensor Node, ο κώδικας βρίσκεται συνεχώς σε κατάσταση ακρόασης και ελέγχει επαναληπτικά αν υπάρχει εισερχόμενο μήνυμα με τη μέθοδο `RS_Slave.available()`. Μόλις ανιχνευτεί μήνυμα, διαβάζεται με `readStringUntil('\n')` και ελέγχεται αν αντιστοιχεί στην προκαθορισμένη ακολουθία ("ab").

```
if(RS_Slave.available())
{
String s = RS_Slave.readStringUntil('\n');
delay(10);
Serial.println(s);
if(s=="ab")
{
  lets_go();
}
}
```

Αν το μήνυμα ταιριάζει, ο Sensor Node ξεκινά τη διαδικασία δειγματοληψίας των αισθητήρων του. Οι τιμές θερμοκρασίας, υγρασίας αέρα, φωτεινότητας και υγρασίας εδάφους μετρώνται και αποθηκεύονται σε τοπικές μεταβλητές.

```
 air_temp = DHT.temperature;
 air_hum = DHT.humidity;
 lightSensorValue = analogRead(lightSensor);
 moistureLevel = analogRead(moistureSenor);
```

Στη συνέχεια, ο Sensor Node αλλάζει ρόλο, ενεργοποιεί τον πομπό του και και αποστέλλει ομαδοποιημένα τις τέσσερις μετρήσεις ως 4 bytes με μία κλήση `write()`:

```
digitalWrite(RS_DE_RE, HIGH);
delayMicroseconds(100);
readings[0] =  (uint8_t)air_hum;
readings[1] =  (uint8_t)air_temp;
readings[2] =  (uint8_t)lightSensorValue;
readings[3] = (uint8_t)moistureLevelToSend;
RS_Slave.write(readings, 4);
delay(100);
delayMicroseconds(100);
digitalWrite(RS_DE_RE, LOW);
```

Ο Master Node, αφού ολοκληρώσει την αποστολή της συμβολοσειράς και επαναφέρει το σήμα DE/RE σε κατάσταση λήψης (LOW), παραμένει σε αναμονή για τη λήψη των δεδομένων. Καθώς οι τιμές καταφθάνουν, τις διαβάζει από τη σειριακή θύρα συνεχόμενα χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `readBytes()` και τις αποθηκεύει διαδοχικά σε έναν πίνακα (array). Η σειρά αποθήκευσης διατηρείται σταθερή, ώστε κάθε θέση του πίνακα να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη παράμετρο. Με αυτόν τον τρόπο, σε κάθε κύκλο επικοινωνίας ο Master διαθέτει έναν ενημερωμένο πίνακα με όλες τις τρέχουσες μετρήσεις των αισθητήρων, έτοιμες για περαιτέρω επεξεργασία και λήψη αποφάσεων.

```
RS_Master.setTimeout(50);
size_t n = RS_Master.readBytes(sensor_readings, 4);
if ( n == 4) {
rhB    = sensor_readings[0];
tB     = sensor_readings[1];
```

```
lB    = sensor_readings[2];
soilB = sensor_readings[3];
 }
```

Αφού επεξεργαστεί τα δεδομένα (π.χ. υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής με την εξίσωση Turc, εξομάλυνση μέσω μέσων όρων, έλεγχος κατωφλίων για θερμοκρασία, υγρασία και φωτεινότητα), ο Master Node συνθέτει ένα νέο πλαίσιο (frame) εντολών, το οποίο περιλαμβάνει τους χαρακτήρες που αντιστοιχούν στις επιθυμητές καταστάσεις των επενεργητών. Πριν το αποστείλει στον Actuator Node, συγκρίνει το νέο πλαίσιο με το προηγούμενο που είχε σταλεί. . και το αποστέλλει ως ένα πακέτο πάνω στον δίαυλο RS-485. Η αποστολή πραγματοποιείται μόνο εφόσον έχει εντοπιστεί κάποια αλλαγή, ώστε να αποφεύγεται η άσκοπη κυκλοφορία πανομοιότυπων δεδομένων στον δίαυλο RS485 και να μειώνεται η χρήση πόρων. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται αποδοτική επικοινωνία και ταυτόχρονα άμεση ενημέρωση του Actuator Node σε περίπτωση πραγματικών μεταβολών.

```
char frame[6];
frame[0] = '[';
frame[1] = yellow_led;
frame[2] = heater;
frame[3] = green_led;
frame[4] = pump_state;
frame[5] = ']';
for (int i=1; i<5; ++i)
{
if (frame[i] != last_frame[i])
{
changed = true;
}
```

```
}

if(changed){

Serial.flush();

delay(100);

digitalWrite(RS_DE_RE, HIGH);

delayMicroseconds(100);

RS_Master.write(frame, sizeof(frame));

delay(10);

digitalWrite(RS_DE_RE, LOW);

}
```

Ο Actuator Node συγχρονίζεται με τα εισερχόμενα πλαίσια διαβάζοντας διαδοχικά bytes από τη σειριακή θύρα, μέχρι να εντοπίσει τον χαρακτήρα έναρξης `'['`. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ότι η ανάγνωση ξεκινά από το σωστό σημείο του πλαισίου. Στη συνέχεια διαβάζει πέντε bytes — τέσσερα για το ωφέλιμο φορτίο και έναν για τον χαρακτήρα λήξης `']'` — τα οποία αποθηκεύει σε έναν πίνακα χαρακτήρων `values[4]`. Κάθε θέση του πίνακα αντιστοιχεί σε μία λειτουργία ελέγχου: υγρασία (κίτρινο LED), θερμοκρασία (ανεμιστήρας/θερμαντικό σώμα), φωτεινότητα (πράσινο LED) και αντλία ποτίσματος (βηματικός κινητήρας).

```
void loop(){

char payload_plus_end[5];

RS_Actuators.setTimeout(50);

int ch;

do {

ch = RS_Actuators.read();

if (ch == -1) return;
```

```
                } while ((char)ch != '[');
    size_t n = RS_Actuators.readBytes(payload_plus_end, 5);
    if (n != 5 || payload_plus_end[4] != ']') return;
                    char values[4];
    for (int i=0;i<4;i++) values[i] = payload_plus_end[i];
```

Η ροή αυτή —αποστολή σήματος από Master, απόκριση Sensor, αποθήκευση δεδομένων, υπολογισμοί, και αποστολή εντολών σε Actuator— πραγματοποιείται περιοδικά, με τον Sensor Node να ενεργοποιείται κάθε κάποια δευτερόλεπτα. Η αλληλουχία DE/RE εγγυάται ότι τη δεδομένη στιγμή μόνο ένας κόμβος «μιλά» στον δίαυλο, αποτρέποντας συγκρούσεις, ενώ η χρήση πινάκων για την αποθήκευση των τιμών επιτρέπει δομημένη και αξιόπιστη διαχείριση της πληροφορίας σε κάθε κόμβο.

4.3 Επικοινωνία με το Διαδίκτυο μέσω Wi-Fi και MQTT

Το Arduino Uno R4 WiFi (Master Node) είναι η μονάδα που συνδέει όλο το σύστημα με το Διαδίκτυο. Για να πραγματοποιηθεί αυτή η σύνδεση, στον κώδικα δηλώνονται αρχικά το όνομα του Wi-Fi δικτύου (SSID) και ο κωδικός πρόσβασης.

```
const char* ssid = "ssid";
const char* password = "password";
```

Στη συνέχεια, καλείται η εντολή `WiFi.begin(ssid, password)` για να ξεκινήσει η διαδικασία σύνδεσης. Το Arduino μπαίνει σε έναν βρόχο αναμονής και ελέγχει επαναλαμβανόμενα αν η σύνδεση έχει ολοκληρωθεί.

```
                WiFi.begin(ssid, password);
                while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
                delay(500);
    Serial.print("Attempting to connect to network: ");
                Serial.println(ssid);
```

```
            Serial.println("still not connected");
             }
```

Μόλις η σύνδεση πετύχει, το Arduino παίρνει αυτόματα μια διεύθυνση IP και μπορεί να επικοινωνήσει με άλλες συσκευές στο δίκτυο.

Το επόμενο βήμα είναι η σύνδεση με τον MQTT broker, δηλαδή τον «διαμεσολαβητή» που αναλαμβάνει να δέχεται και να διανέμει τα μηνύματα μεταξύ των συσκευών. Στον κώδικα δηλώνεται η διεύθυνση IP του broker και η θύρα του.

```
const char* mqtt_server = "192.168.1.64";

const int mqtt_port = 1884;
```

Στη συνέχεια καλείται μια συνάρτηση επανασύνδεσης (`reconnect()`), η οποία προσπαθεί να δημιουργήσει τη σύνδεση. Αν αυτή αποτύχει, εμφανίζεται μήνυμα λάθους και το Arduino ξαναδοκιμάζει μετά από λίγο.

```
                void reconnect() {
                // Reconnect loop
                while (!client.connected()) {
        Serial.print("Attempting MQTT connection...");
                if (client.connect()) {
                Serial.println("connected");
                client.subscribe(mqtt_topic);
                } else {
                Serial.print("failed, rc=");
                Serial.print(client.state());
                Serial.println(" try again in 5 seconds");
                delay(5000);
```

```
                    }

                    }

                    }
```

Αφού η σύνδεση με τον broker ολοκληρωθεί, το Arduino μπορεί να δημοσιεύει (publish) τα δεδομένα που έχει συλλέξει. Για να γίνει αυτό, πρώτα δημιουργείται μια συμβολοσειρά σε μορφή JSON, η οποία περιέχει όλες τις τρέχουσες μετρήσεις των αισθητήρων.

```
void sendtonode()

{

    StaticJsonDocument<200> jsonDoc;

    jsonDoc["humidity"] = sensor_readings[0];

    jsonDoc["temperature"] = sensor_readings[1];

    jsonDoc["light"] = sensor_readings[2];

    jsonDoc["soil"] = sensor_readings[3];

    char jsonString[200];

    serializeJson(jsonDoc, jsonString);

    Serial.print("Publishing JSON: ");

    Serial.println(jsonString);

    client.publish(mqtt_topic, jsonString);

  }
```

Αυτή η συμβολοσειρά στέλνεται στον broker χρησιμοποιώντας ένα topic, δηλαδή ένα «κανάλι» επικοινωνίας με συγκεκριμένο όνομα. Όποια συσκευή είναι «συνδρομητής» σε αυτό το topic μπορεί να λάβει το μήνυμα.

```
const char* mqtt_topic = "test/topic";
```

Στην πράξη, το Node-RED είναι συνδεδεμένο στο ίδιο topic και μόλις λάβει το JSON μήνυμα από το Arduino, το εμφανίζει στην κονσόλα Debug της πλατφόρμας, δίνοντας στον χρήστη τη δυνατότητα να δει σε πραγματικό χρόνο τις τιμές που έχουν μεταδοθεί από το σύστημα.

Για να διατηρείται σταθερή η σύνδεση, μέσα στη συνάρτηση `loop()` του Arduino εκτελείται συνεχώς η `client.loop()`, η οποία ελέγχει αν ο MQTT client είναι ακόμα συνδεδεμένος.

```
void loop() {
client.loop();
}
```

Αν διακοπεί η σύνδεση, η `reconnect()` δοκιμάζει ξανά αυτόματα. Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται ότι το σύστημα συνεχίζει να στέλνει δεδομένα ακόμα κι αν υπάρξει προσωρινή απώλεια σήματος.

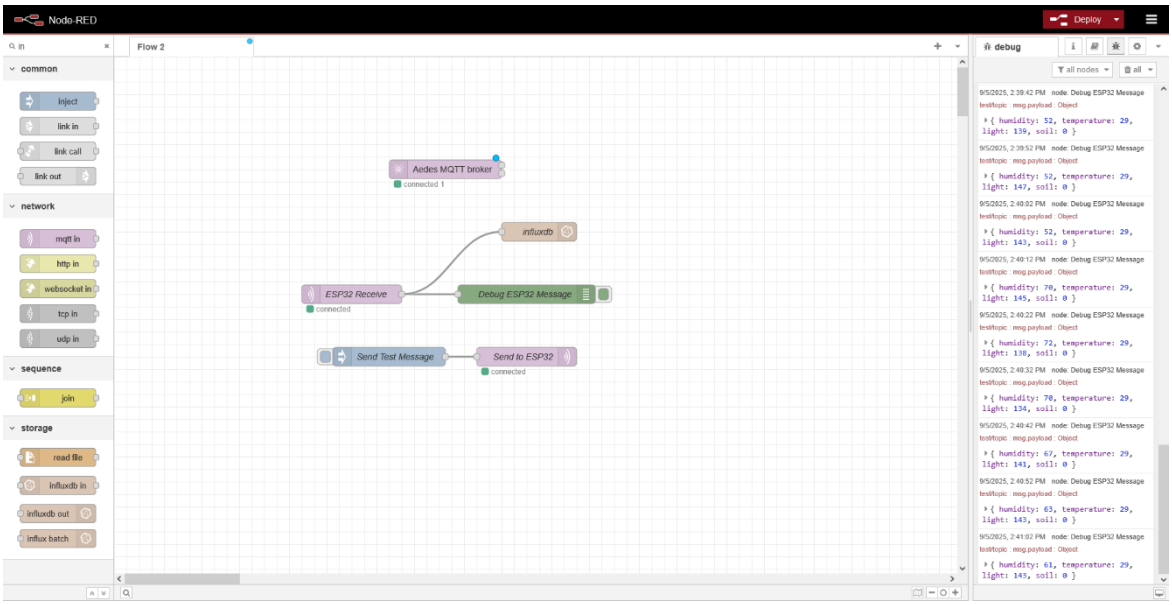
4.4 Εργαλεία Οπτικοποίησης Δεδομένων

4.4.1 Διασύνδεση Node-RED με MQTT Broker

Αφού εγκατασταθεί το Node-RED στον υπολογιστή, ανοίγεται το περιβάλλον ροών (flows) μέσω του browser στη διεύθυνση `http://localhost:1880`. Το πρώτο βήμα είναι η προσθήκη ενός Aedes MQTT Broker node μέσα στο flow. Ο Aedes λειτουργεί ως τοπικός MQTT broker και επιτρέπει στο Arduino (ή σε άλλες συσκευές) να δημοσιεύουν δεδομένα απευθείας στο Node-RED. Στις ρυθμίσεις του broker καθορίζεται η θύρα επικοινωνίας (port), η οποία στην υλοποίηση έχει οριστεί σε `1884`.

Στη συνέχεια, προστίθεται ένας MQTT In node, ο οποίος χρησιμοποιείται για να «ακούει» τα μηνύματα που δημοσιεύει το Arduino. Στις ρυθμίσεις του κόμβου καθορίζεται η διεύθυνση του MQTT server, η οποία είναι `mqtt://localhost:1884` εφόσον ο broker τρέχει τοπικά στον ίδιο υπολογιστή, καθώς και το topic στο οποίο το Arduino δημοσιεύει τα δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε φορά που ο Master Node στέλνει ένα JSON μήνυμα με τις μετρήσεις του, το MQTT In node το λαμβάνει αυτόματα.

Ακολουθεί η προσθήκη ενός InfluxDB Out node, μέσω του οποίου το Node-RED αποθηκεύει τα εισερχόμενα δεδομένα στην InfluxDB. Η Εικόνα 17 δείχνει το διάγραμμα της ροής στο Node-RED, όπου φαίνονται οι κόμβοι MQTT, InfluxDB και τα debug μηνύματα που επιβεβαιώνουν τη λήψη των δεδομένων.

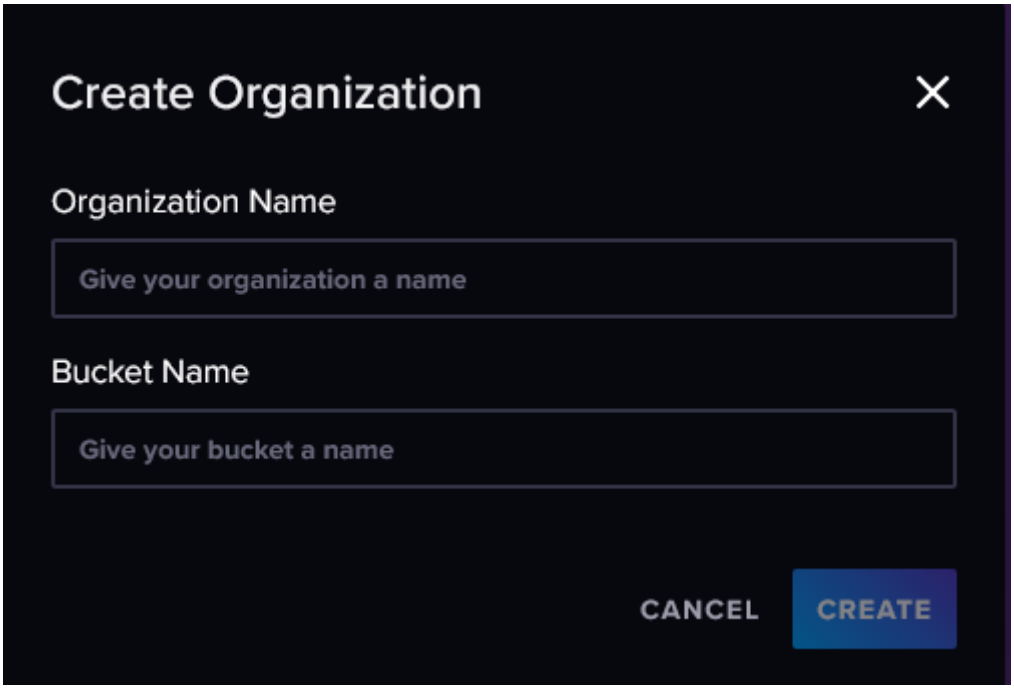


Εικόνα 17. Προγραμματισμός σε περιβάλλον Node-RED

4.4.2 Διασύνδεση Node-RED με InfluxDB

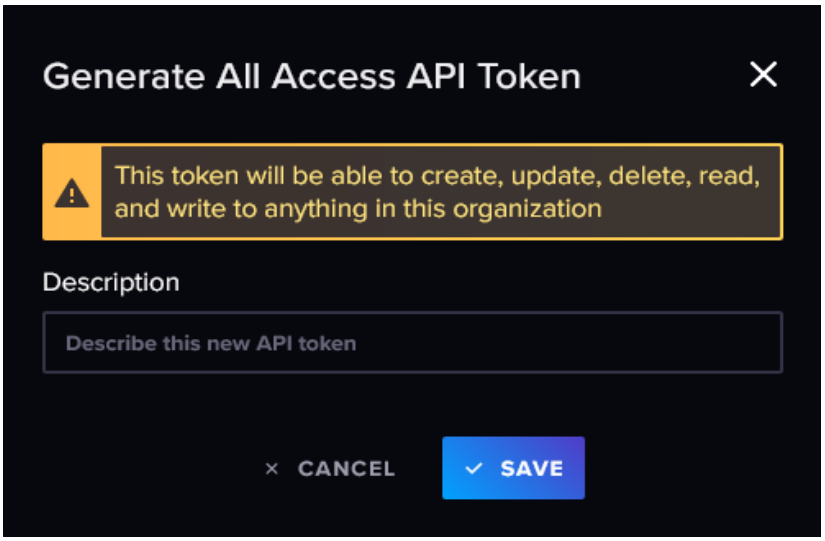
Αφού ολοκληρωθεί η εγκατάσταση του InfluxDB στον υπολογιστή, η εφαρμογή μπορεί να ανοίξει μέσω browser στη διεύθυνση http://localhost:8086

Μόλις γίνει επιτυχώς το login, το πρώτο βήμα είναι η δημιουργία ενός Organization και ενός bucket (βλ. Εικόνα 18).



Εικόνα 18. Δημιουργία Organization & Bucket στην InfluxDB

Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία ενός Token. Το Token είναι ένας κωδικός ασφαλείας που δίνει σε άλλες εφαρμογές τη δυνατότητα να έχουν πρόσβαση στο InfluxDB. Δημιουργούμε ένα το οποίο παρέχει δικαιώματα εγγραφής στο συγκεκριμένο bucket. Το Token αυτό θα το αντιγράψουμε και θα το χρησιμοποιήσουμε μέσα στο Node-RED. Η διαδικασία δημιουργίας του Token φαίνεται στην Εικόνα 19.

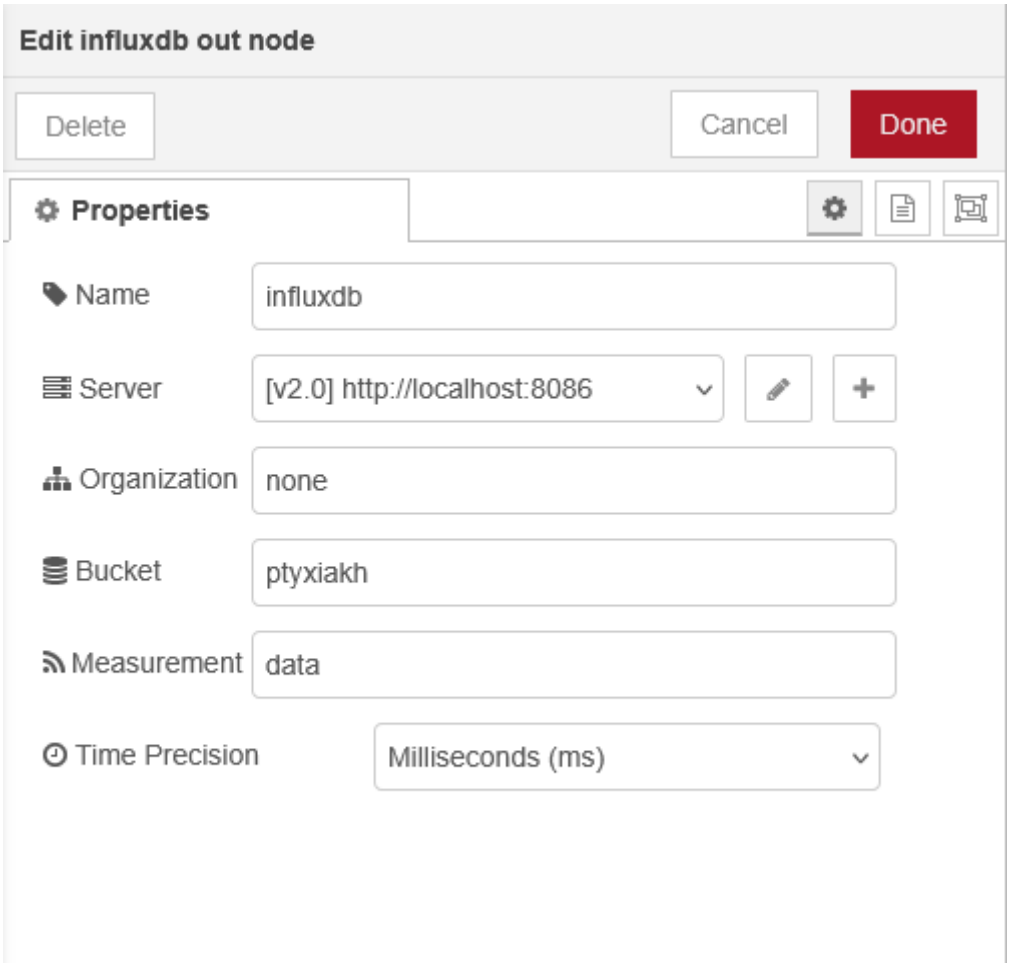


Εικόνα 19. Δημιουργία API Token

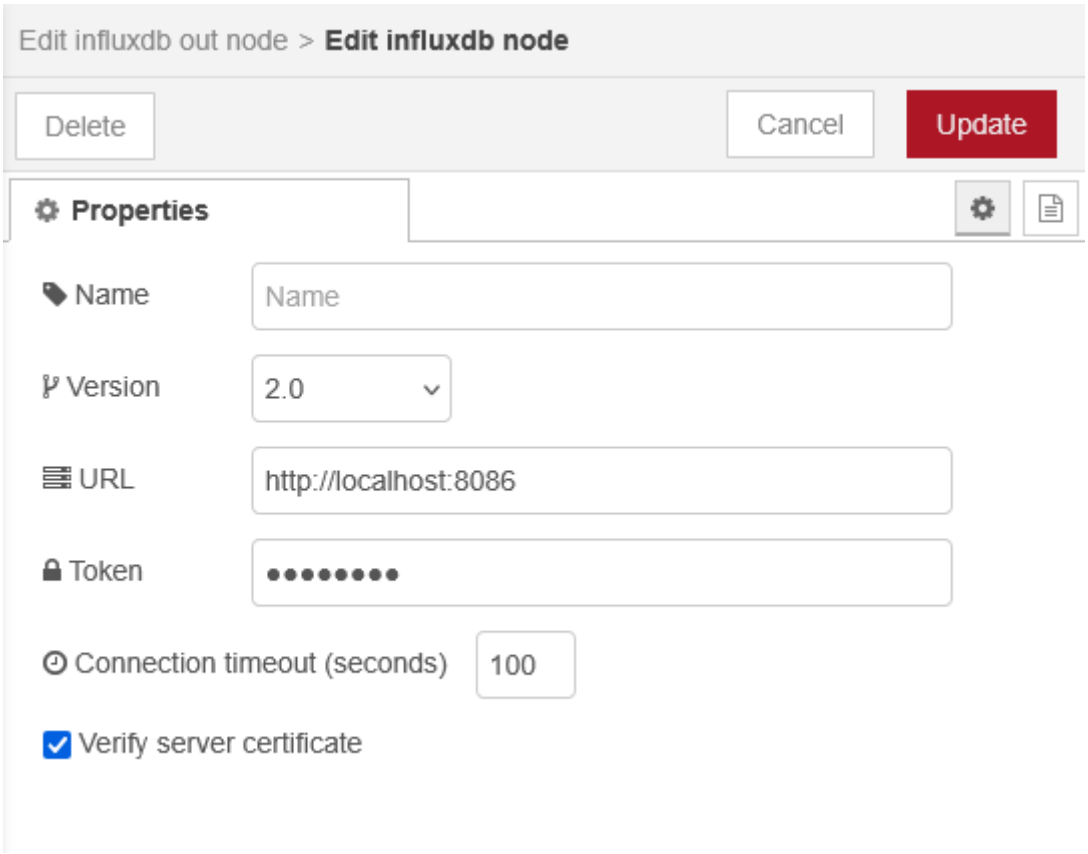
Αφού δημιουργήσουμε ένα organization, ένα bucket και ένα API Token, μεταβαίνουμε στο Node-RED, όπου μέσα στο flow επεξεργαζόμαστε το InfluxDB out node. Στις ρυθμίσεις του node, εισάγουμε:

- το Organization Name που δημιουργήσαμε,
- το Bucket Name,
- τη διεύθυνση του InfluxDB server
- και το API Token που αντιγράψαμε από το InfluxDB.

Η Εικόνα 20 και η Εικόνα 21 παρουσιάζουν τη διαμόρφωση του κόμβου InfluxDB μέσα στο Node-RED, όπου ορίζονται τα πεδία σύνδεσης.



Εικόνα 20. Παραμετροποίηση Influxdb Out Node



Εικόνα 21. Παραμετροποίηση Influxdb Out Node

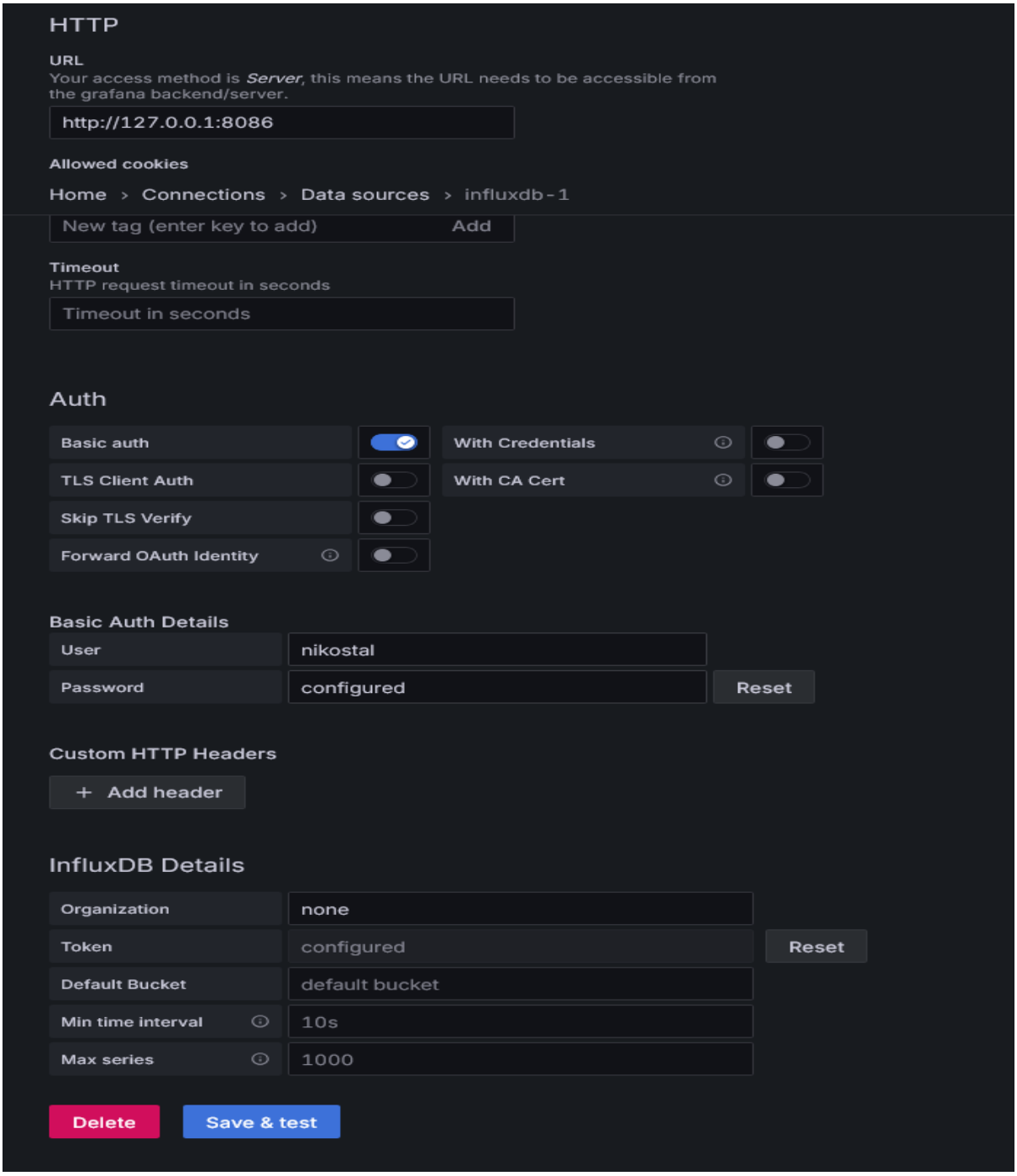
Με αυτόν τον τρόπο, το Node-RED αποκτά πρόσβαση στη βάση και μπορεί να αποθηκεύει σε πραγματικό χρόνο τα δεδομένα που λαμβάνει από το Master Node.

4.4.3 Διασύνδεση Grafana με InfluxDB

Αφού ολοκληρωθεί η εγκατάσταση του Grafana, ανοίγουμε τον browser και πληκτρολογούμε τη διεύθυνση `http://localhost:3000.`

Κατά την πρώτη είσοδο, χρησιμοποιούνται τα προκαθορισμένα στοιχεία σύνδεσης (username: admin, password: admin), τα οποία μπορούμε να αλλάξουμε αμέσως.

Το πρώτο βήμα για να μπορέσει το Grafana να «δει» τα δεδομένα που συλλέγονται από το σύστημα, είναι να δημιουργήσουμε μια σύνδεση με την InfluxDB, η οποία θα λειτουργεί ως πηγή δεδομένων. Για να το κάνουμε αυτό, μεταβαίνουμε από το αριστερό μενού στην επιλογή Connections, επιλέγουμε Data Sources και στη συνέχεια πατάμε Add data source. Από τη λίστα των διαθέσιμων επιλογών εντοπίζουμε και επιλέγουμε InfluxDB.



Εικόνα 22. Ρύθμιση Grafana Dashboards

Στην οθόνη ρυθμίσεων που εμφανίζεται (βλ. Εικόνα 22) , εισάγουμε τα απαραίτητα στοιχεία για τη σύνδεση:

- Query Language: Επιλέγουμε Flux, καθώς είναι η γλώσσα που χρησιμοποιείται από τις σύγχρονες εκδόσεις του InfluxDB.

- URL: Καθορίζουμε τη διεύθυνση του InfluxDB server, η οποία στις τοπικές εγκαταστάσεις είναι συνήθως http://localhost:8086.
- Organization: Συμπληρώνουμε το Organization Name που δημιουργήσαμε προηγουμένως στην InfluxDB.
- Token: Εισάγουμε το API Token που δημιουργήθηκε στην InfluxDB.
- Default Bucket: Συμπληρώνουμε το όνομα του Bucket στο οποίο αποθηκεύονται τα δεδομένα μας.

Αφού ολοκληρωθεί η συμπλήρωση των πεδίων, πατάμε Save & Test. Αν η σύνδεση είναι επιτυχής, το Grafana εμφανίζει μήνυμα επιβεβαίωσης και από εκείνη τη στιγμή μπορεί να αντλεί δεδομένα απευθείας από το InfluxDB.

4.5 Διασύνδεση αισθητήρων και επενεργητών

Ο αισθητήρας DHT11, υπεύθυνος για τη μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας αέρα, συνδέθηκε στο ψηφιακό pin D7. Ο φωτοαντιστάτης, που μετρά την ένταση του φωτός, συνδέθηκε στην αναλογική είσοδο A0. Αντίστοιχα, ο αισθητήρας υγρασίας εδάφους τοποθετήθηκε στην είσοδο A1,. Όλες αυτές οι μετρήσεις αποστέλλονται στον Master μέσω ενός RS485 module, το οποίο συνδέθηκε στα pins D9 και D10 για λήψη και αποστολή δεδομένων αντίστοιχα, με το D8 να ελέγχει την κατεύθυνση της επικοινωνίας.

Στον κόμβο επενεργητών, ένα κίτρινο LED συνδεδεμένο στο pin D13, λειτουργεί ως ένδειξη για την υγρασία του αέρα, ενώ το κόκκινο LED στο D11 σχετίζεται με τη θέρμανση και το πράσινο LED στο D12 με τον φωτισμό. Ο ανεμιστήρας συνδέθηκε στο pin D2 μέσω κατάλληλου κυκλώματος οδήγησης, ώστε να είναι δυνατή η τροφοδοσία του με ασφάλεια και να προστατεύεται το Arduino από την υπερφόρτωση. Η αντλία άρδευσης υλοποιήθηκε με τη χρήση βηματικού κινητήρα, ο οποίος συνδέθηκε μέσω H-Bridge στις εξόδους D3 έως D6. Όπως και στον κόμβο αισθητήρων, η επικοινωνία με τον Master γίνεται μέσω RS485, αξιοποιώντας τα ίδια pins (D9, D10 και D8).

Ο Master Node, δεν διαθέτει απευθείας αισθητήρες ή επενεργητές συνδεδεμένους πάνω του, αλλά επιτελεί τον ρόλο του κεντρικού ελεγκτή. Μέσω του RS485 επικοινωνεί με τους δύο υπόλοιπους κόμβους, συλλέγει δεδομένα από τον Sensor Node, τα επεξεργάζεται και λαμβάνει

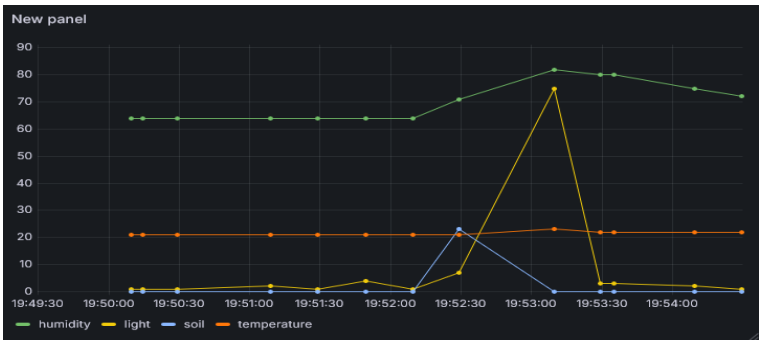
αποφάσεις, οι οποίες μετατρέπονται σε εντολές προς τον Actuator Node. Επιπλέον, μέσω της ενσωματωμένης δυνατότητας Wi-Fi, συνδέεται με το Node-RED και προωθεί τα δεδομένα στο οικοσύστημα IoT για αποθήκευση και ανάλυση. Η συνολική διασύνδεση των αισθητήρων και των επενεργητών συνθέτει ένα ολοκληρωμένο δίκτυο όπου κάθε κόμβος έχει συγκεκριμένο ρόλο και συμβάλλει στη συνολική λειτουργικότητα του συστήματος.

4.6 Ανάπτυξη web διεπαφής

Η διαδικτυακή διεπαφή του συστήματος βασίζεται στη διασύνδεση του Master Node με το οικοσύστημα του Internet of Things, επιτρέποντας την αποθήκευση και οπτικοποίηση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Το Arduino Uno R4 WiFi, μέσω της ενσωματωμένης δυνατότητας ασύρματης σύνδεσης, επικοινωνεί με τον MQTT broker που έχει εγκατασταθεί στο Node-RED, αποστέλλοντας τις μετρήσεις του Sensor Node σε μορφή JSON.

Το Node-RED λειτουργεί ως ενδιάμεσος κόμβος που λαμβάνει τα δεδομένα από το Arduino και τα προωθεί στην InfluxDB, μια βάση δεδομένων βελτιστοποιημένη για χρονοσειρές. Εκεί αποθηκεύονται με χρονοσήμανση, επιτρέποντας αξιόπιστη ιστορική παρακολούθηση.

Η οπτικοποίηση των δεδομένων υλοποιείται μέσω του Grafana , το οποίο συνδέεται με την InfluxDB και παρέχει διαδραστικά dashboards σε πραγματικό χρόνο. Στην Εικόνα 23 παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό γράφημα από την πλατφόρμα Grafana, όπου απεικονίζονται οι μετρήσεις θερμοκρασίας, υγρασίας, φωτεινότητας και υγρασίας εδάφους που λαμβάνονται από το θερμοκήπιο. Αν και δεν υποστηρίζεται απομακρυσμένος έλεγχος επενεργητών, η διεπαφή προσφέρει ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης του θερμοκηπίου, διευκολύνοντας την εξαγωγή συμπερασμάτων και την λήψη αποφάσεων.



Εικόνα 23. Οπτικοποίηση δεδομένων σε Grafana

4.7 Δοκιμές και αποσφαλμάτωση

Η διαδικασία ανάπτυξης του συστήματος συνοδεύτηκε από συνεχείς δοκιμές και φάσεις αποσφαλμάτωσης, ώστε να διασφαλιστεί η αξιόπιστη λειτουργία του σε πραγματικές συνθήκες. Κάθε επιμέρους υποσύστημα ελέγχθηκε ανεξάρτητα πριν ενσωματωθεί στο συνολικό δίκτυο, γεγονός που διευκόλυνε τον εντοπισμό σφαλμάτων και την προσαρμογή του κώδικα.

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν δοκιμές επικοινωνίας RS485 μεταξύ των κόμβων. Η αξιοπιστία της σειριακής επικοινωνίας ήταν κρίσιμη, καθώς οποιαδήποτε απώλεια δεδομένων θα επηρέαζε άμεσα τη λήψη αποφάσεων. Μέσα από διαδοχικές μετρήσεις και ελέγχους με τη χρήση της σειριακής οθόνης, επιβεβαιώθηκε ότι τα πακέτα δεδομένων μεταφέρονται σωστά από τον Sensor Node στον Master και από εκεί στον Actuator Node. Παράλληλα, ελέγχθηκε η καθυστέρηση μετάδοσης, η οποία παρέμεινε σε αποδεκτά επίπεδα για την εφαρμογή σε θερμοκήπιο.

Στη συνέχεια, δοκιμάστηκε η ορθότητα των μετρήσεων των αισθητήρων. Ο αισθητήρας DHT11 συγκρίθηκε με αναφορά θερμομέτρου, προκειμένου να διαπιστωθεί η ακρίβεια των ενδείξεων. Αντίστοιχα, ο αισθητήρας υγρασίας εδάφους επαληθεύτηκε με χειροκίνητη μέτρηση της υγρασίας του υποστρώματος, ενώ η λειτουργία του φωτοαντιστάτη εξετάστηκε σε διαφορετικά επίπεδα φωτισμού. Μέσα από αυτές τις διαδικασίες προέκυψε ότι, παρά τους περιορισμούς των χαμηλού κόστους αισθητήρων, οι μετρήσεις κρίνονται επαρκείς για τον σκοπό του έργου.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις δοκιμές των επενεργητών. Οι εντολές του Master Node ελέγχθηκαν ως προς την άμεση και σωστή απόκρισή τους στον Actuator Node. Για παράδειγμα, παρατηρήθηκε η άμεση ενεργοποίηση του ανεμιστήρα όταν η θερμοκρασία ξεπερνούσε το καθορισμένο όριο. Σε κάθε περίπτωση, η λογική των κανόνων αποδείχθηκε λειτουργική, αν και έγιναν μικρές προσαρμογές στα όρια (thresholds) για να ανταποκρίνονται καλύτερα στις πραγματικές συνθήκες.

Παράλληλα με τις δοκιμές υλικού, πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές συνδεσιμότητας μέσω Wi-Fi και επικοινωνίας με τον MQTT broker. Ελέγχθηκε ότι τα δεδομένα που αποστέλλονται σε μορφή JSON από το Arduino Master γίνονται σωστά δεκτά στο Node-RED, αποθηκεύονται στην InfluxDB και απεικονίζονται στο Grafana. Στις πρώτες εκδόσεις του κώδικα παρουσιάστηκαν προβλήματα σύνδεσης, τα οποία οφείλονταν σε καθυστερήσεις

επανασύνδεσης στο MQTT broker. Το ζήτημα επιλύθηκε με την προσθήκη ρουτίνας επανασύνδεσης στον κώδικα του Master.

Η αποσφαλμάτωση περιλάμβανε επίσης την ανάλυση πιθανών αστοχιών κατά τη διάρκεια λειτουργίας. Για παράδειγμα, η επικοινωνία μέσω RS485 απαιτούσε σωστό συγχρονισμό στη μετάδοση και λήψη, με αποτέλεσμα να δοκιμαστούν διαφορετικοί χρόνοι καθυστέρησης (delays) ώστε να επιτευχθεί σταθερή λειτουργία χωρίς απώλειες δεδομένων.

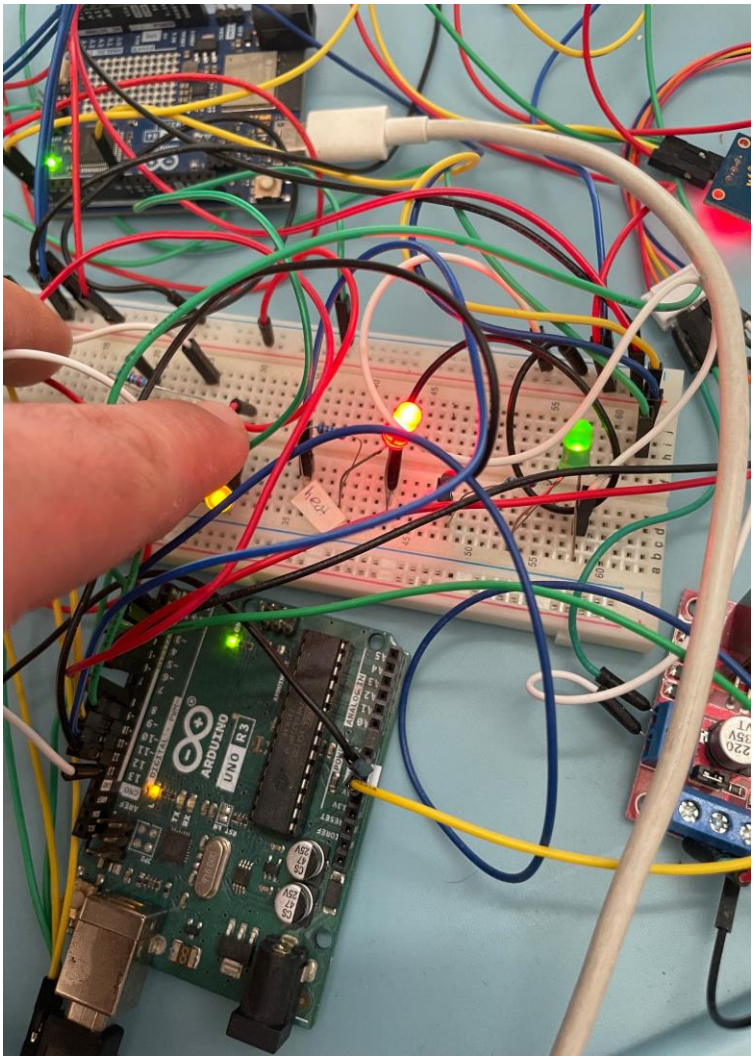
Συνολικά, οι δοκιμές και η αποσφαλμάτωση απέδειξαν ότι το σύστημα είναι λειτουργικό και ανταποκρίνεται στις βασικές απαιτήσεις. Παρότι πρόκειται για πειραματική υλοποίηση με εξαρτήματα χαμηλού κόστους, το τελικό αποτέλεσμα κρίνεται ικανοποιητικό, καθώς εξασφαλίζεται τόσο η σωστή συλλογή δεδομένων όσο και η αξιόπιστη εκτέλεση των αυτοματισμών.

5. Αποτίμηση Συστήματος

5.1 Δοκιμές Συστήματος σε Συνθήκες Προσομοίωσης.

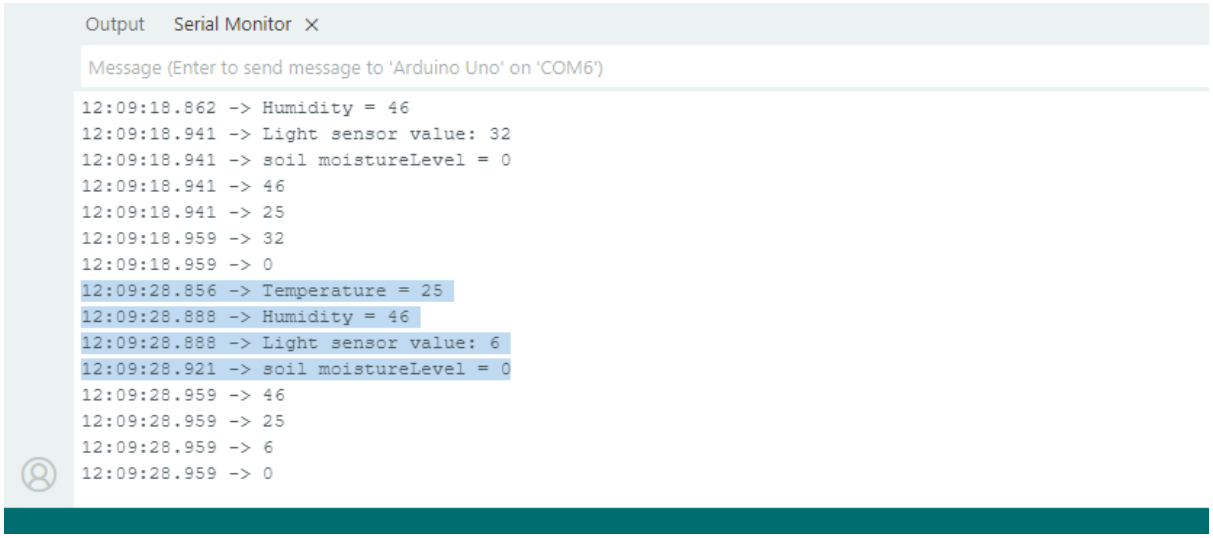
Η λειτουργικότητα του συστήματος ελέγχου θερμοκηπίου αξιολογήθηκε σε εργαστηριακό περιβάλλον, όπου πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις μεταβολών στις περιβαλλοντικές παραμέτρους. Οι αισθητήρες δοκιμάστηκαν με απλές μεθόδους, ώστε να επιβεβαιωθεί η σωστή ανταπόκριση του συστήματος στις μεταβολές του περιβάλλοντος.

Ο αισθητήρας φωτεινότητας (LDR) καλύφθηκε με το χέρι, προκειμένου να μειωθεί η ένταση του φωτός και να προσομοιωθούν συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειας. Η συγκεκριμένη δοκιμή επέτρεψε την παρατήρηση της απόκρισης του συστήματος σε μεταβολές της φωτεινότητας, ενεργοποιώντας αντίστοιχα τον μηχανισμό τεχνητού φωτισμού (Εικόνα 24).



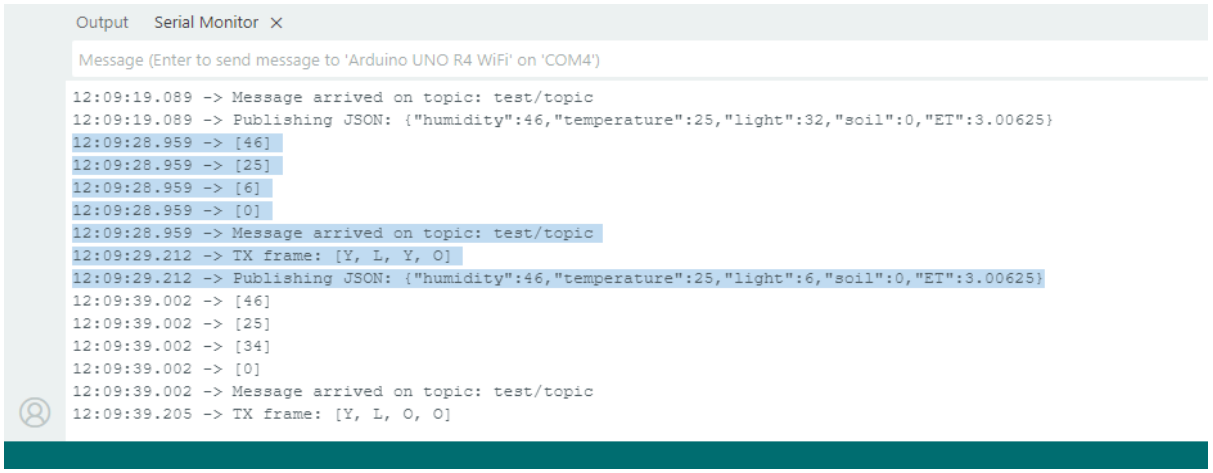
Εικόνα 24. Κάλυψη φωτοαντίστασης

Οι μετρήσεις των αισθητήρων θερμοκρασίας, υγρασίας, φωτεινότητας και υγρασίας εδάφους καταγράφονται στον Serial Monitor του Sensor Node, όπως φαίνεται στην Εικόνα 25. Τα δεδομένα ανανεώνονται περιοδικά, παρέχοντας σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες για το μικροκλίμα του θερμοκηπίου.



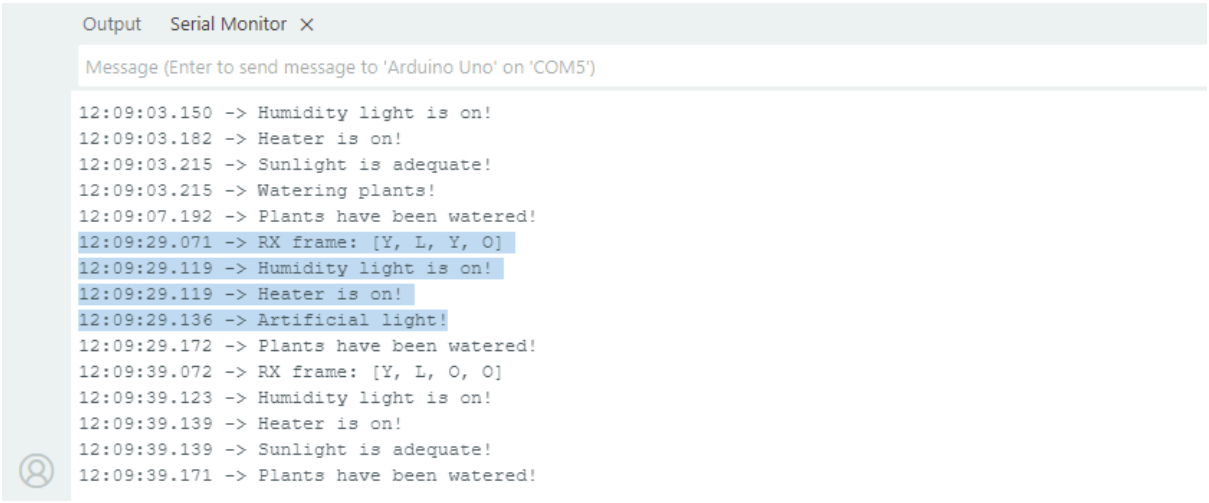
Εικόνα 25. Μετρήσεις Sensor Node

Τα δεδομένα που συλλέγονται αποστέλλονται μέσω του διαύλου RS485 προς τον Master Node, ο οποίος αναλάμβανει να τα επεξεργαστεί και να τα δημοσιεύσει σε μορφή JSON στον MQTT broker. Η Εικόνα 26 παρουσιάζει τη λήψη των δεδομένων από τον Master Node και τη δημιουργία του JSON αντικειμένου που περιλαμβάνει τις τιμές θερμοκρασίας, υγρασίας, φωτεινότητας, υγρασίας εδάφους και την υπολογισμένη τιμή εξατμισοδιαπνοής (ET).



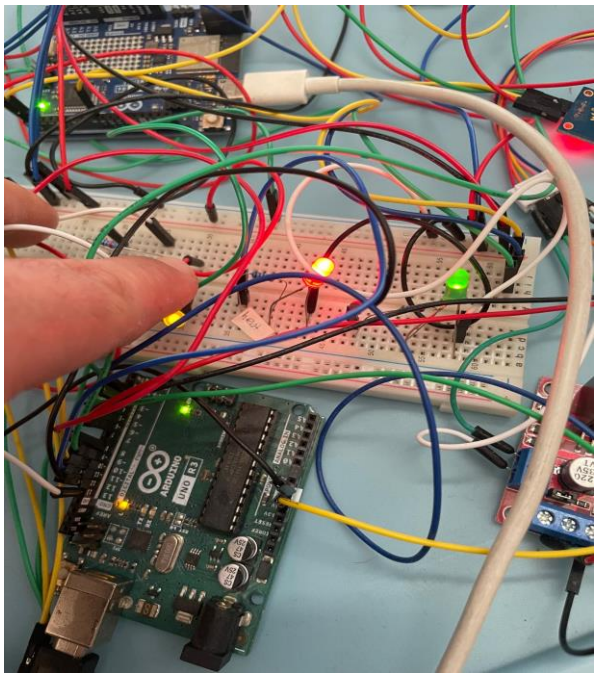
Εικόνα 26. Λήψη στο Master Node

Αντίστοιχα, ο Actuator Node λαμβάνει τα μηνύματα εντολών που αποστέλλονται από τον Master Node, ενεργοποιώντας τους αντίστοιχους επενεργητές ανάλογα με τις τιμές των αισθητήρων. Η ορθή λήψη και εκτέλεση των εντολών φαίνεται στην Εικόνα 27.



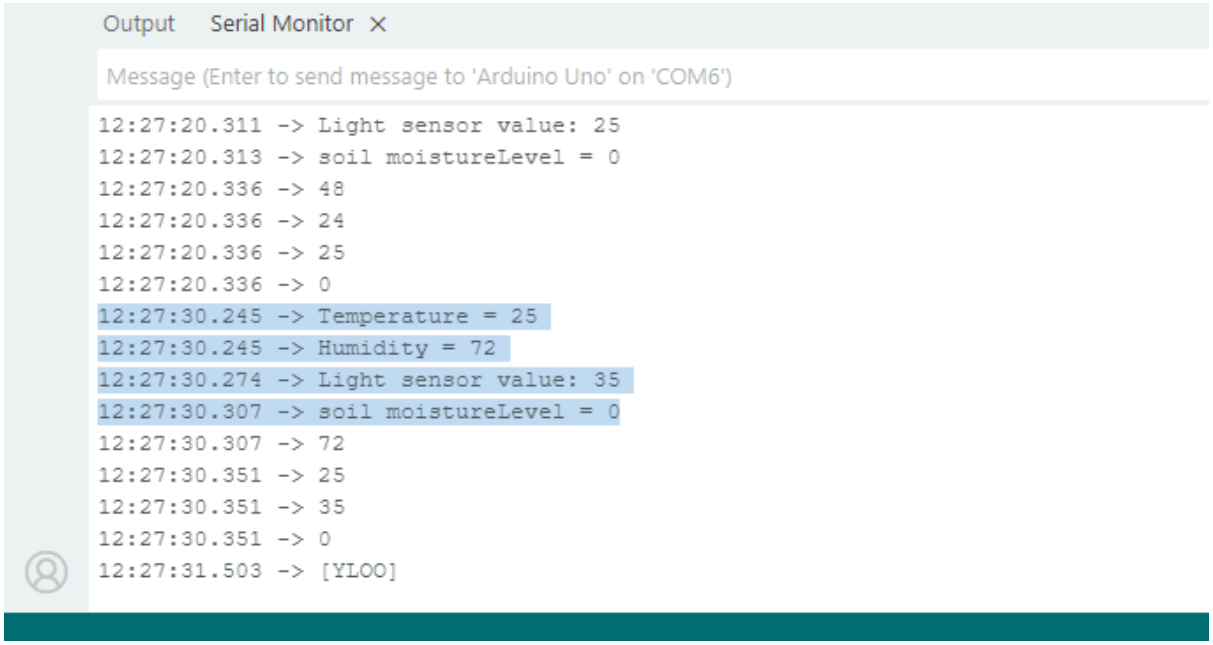
Εικόνα 27. Λήψη στο Actuator Node

Η επιτυχής ενεργοποίηση των LEDs επιβεβαιώνεται οπτικά. Στην Εικόνα 28 φαίνεται η ενεργοποίηση του πράσινου LED, το οποίο λειτουργεί ως ένδειξη του φωτισμού, επιβεβαιώνοντας ότι ο Actuator Node ανταποκρίνεται σωστά στα σήματα του Master Node.



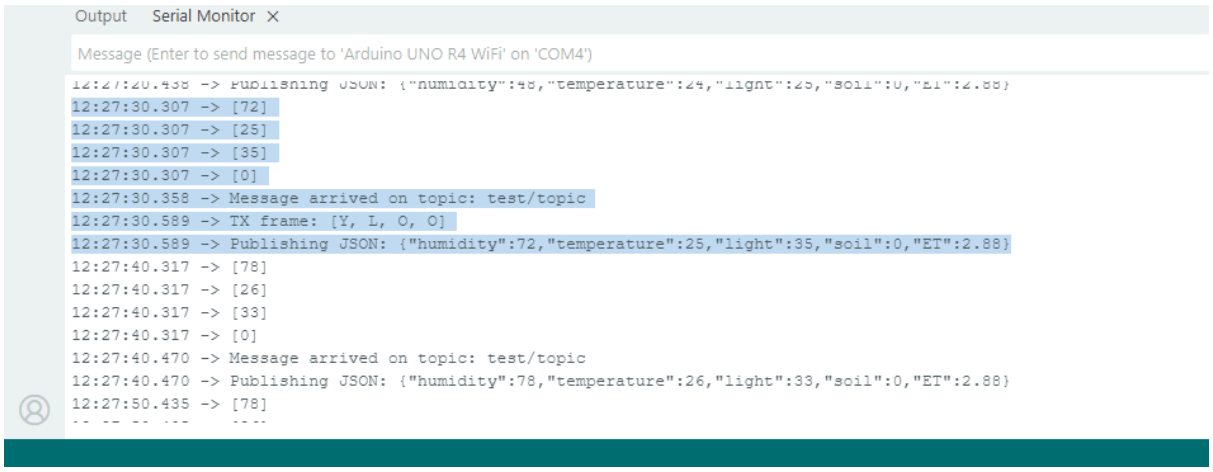
Εικόνα 28. Άναμμα πράσινου LED

Σε επόμενη δοκιμή, αυξάνεται η υγρασία του αέρα, γεγονός που προκαλεί αντίστοιχες μεταβολές στις μετρήσεις του αισθητήρα DHT11. Οι νέες τιμές που καταγράφονται από τον Sensor Node φαίνονται στην Εικόνα 29.



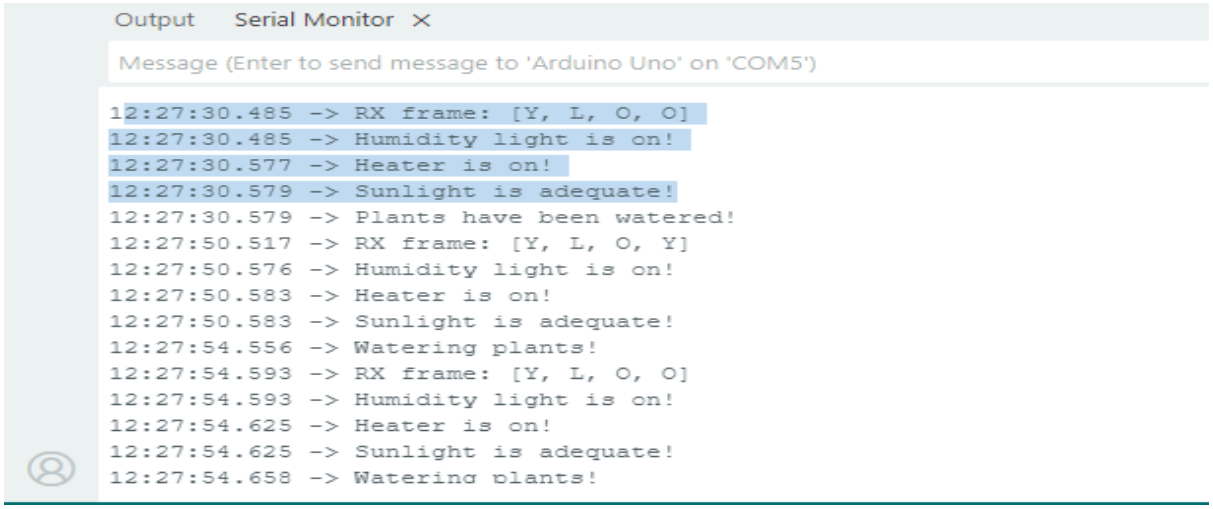
Εικόνα 29. Μετρήσεις Sensor Node

Οι τιμές αυτές αποστέλλονται εκ νέου στον Master Node, ο οποίος αποστέλλει ενημερωμένα πακέτα δεδομένων προς τον Actuator Node. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 30.



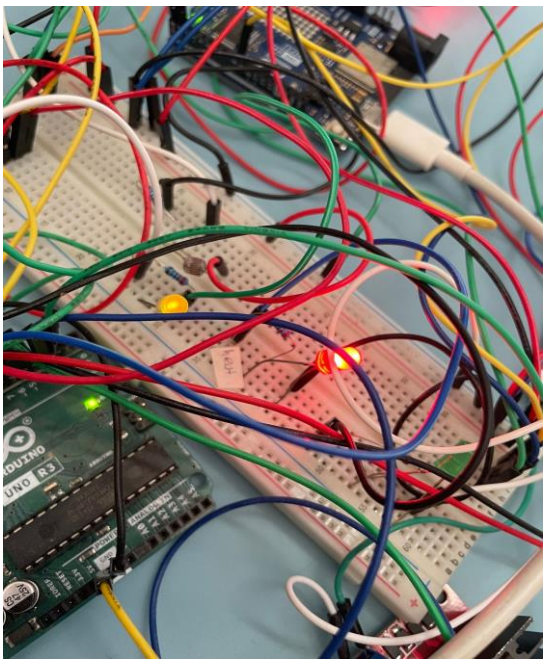
Εικόνα 30. Λήψη στο Master Node

Ακολούθως, ο Actuator Node λαμβάνει το πλαίσιο εντολών και εκτελεί τις αντίστοιχες λειτουργίες. Η Εικόνα 31 δείχνει την έξοδο του Serial Monitor, όπου καταγράφονται τα μηνύματα επιβεβαίωσης των εντολών που ελήφθησαν, αποδεικνύοντας τη σωστή λειτουργία της επικοινωνίας.



Εικόνα 31. Λήψη στο Actuator Node

Η επιτυχής εκτέλεση των εντολών οδηγεί στην ενεργοποίηση του κίτρινου LED, το οποίο χρησιμοποιείται ως ένδειξη υγρασίας στο περιβάλλον. Η Εικόνα 32 παρουσιάζει τη στιγμή ενεργοποίησής του.



Εικόνα 32. Άναμμα κίτρινου LED

5.2. Ακρίβεια Μετρήσεων και Αξιοπιστία Απόκρισης

Η ακρίβεια των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι περιορισμένη, καθώς ο DHT11 διαθέτει ανοχή ±2 °C στη θερμοκρασία και ±5% στη σχετική υγρασία, ενώ ο αισθητήρας υγρασίας εδάφους παρέχει ενδεικτικές τιμές και όχι απόλυτες μετρήσεις. Ωστόσο, για σκοπούς αυτοματισμού οι μετρήσεις κρίνονται επαρκείς, αφού επιτρέπουν τη λήψη αποφάσεων με βάση σχετικές μεταβολές και όχι απόλυτες τιμές.

Η απόκριση του συστήματος αξιολογήθηκε ποιοτικά και διαπιστώθηκε ότι είναι άμεση. Όταν οι τιμές των αισθητήρων ξεπερνούσαν τα όρια που είχαν τεθεί, οι επενεργητές ανταποκρίνονταν χωρίς αισθητή καθυστέρηση. Αυτό επιβεβαιώνει ότι η επικοινωνία μέσω RS485 και η λογική ελέγχου που υλοποιήθηκε στο Master Node είναι αξιόπιστες.

5.3 Ανάλυση Ενεργειακής και Υδατικής Εξοικονόμησης

Δεν πραγματοποιήθηκαν ποσοτικές μετρήσεις κατανάλωσης ενέργειας ή νερού, ωστόσο η αρχιτεκτονική του συστήματος υποδεικνύει δυνατότητες σημαντικής εξοικονόμησης. Η χρήση αισθητήρων υγρασίας εδάφους σε συνδυασμό με τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής επιτρέπει την άρδευση μόνο όταν είναι πραγματικά απαραίτητη, μειώνοντας έτσι τη σπατάλη νερού.

Σε επίπεδο ενέργειας, το σύστημα βασίζεται σε μικροελεγκτές χαμηλής κατανάλωσης και σε επενεργητές που λειτουργούν μόνο όταν απαιτείται. Έτσι, αποφεύγεται η συνεχής λειτουργία αντλιών ή ανεμιστήρων, ενώ τα LEDs χρησιμοποιούνται μόνο ως ενδείξεις. Η εξοικονόμηση ενέργειας και πόρων επιτυγχάνεται μέσω της ακριβούς εκτέλεσης ενεργειών και της μείωσης των περιττών λειτουργιών, ελαχιστοποιώντας έτσι τη σπατάλη και βελτιστοποιώντας τη χρήση των διαθέσιμων πόρων.

5.4 Συγκριτική Αποδοτικότητα με μη Αυτοματοποιημένα Συστήματα

Παρά το γεγονός ότι δεν πραγματοποιήθηκαν συγκριτικά πειράματα με μη αυτοματοποιημένα συστήματα, η διεθνής βιβλιογραφία αναφέρει ότι η χρήση τεχνολογιών IoT και αισθητήρων στη γεωργία μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση νερού έως και 4% σε σχέση με την παραδοσιακή άρδευση. Αντίστοιχα, η βελτιστοποίηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας αέρα έχει θετική επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών και στη μείωση ασθενειών.

Το προτεινόμενο σύστημα, αν και σε επίπεδο πρωτοτύπου, μπορεί να προσφέρει αντίστοιχα οφέλη, καθώς ενσωματώνει βασικές αρχές της γεωργίας ακριβείας. Για την πλήρη τεκμηρίωση των πλεονεκτημάτων του, απαιτούνται μελλοντικές δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες καλλιέργειας και μετρήσεις σε βάθος χρόνου.

6. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις.

6.1 Συμπεράσματα.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ανέδειξε τη δυνατότητα σχεδίασης και υλοποίησης ενός ολοκληρωμένου συστήματος αυτοματισμού θερμοκηπίου, βασισμένου σε τεχνολογίες Διαδικτύου των Αντικειμένων (IoT), ενσύρματης επικοινωνίας RS485 και μικροελεγκτών Arduino. Μέσα από την αξιοποίηση χαμηλού κόστους υλικών και ανοιχτού λογισμικού, επιτεύχθηκε η κατασκευή ενός λειτουργικού πρωτοτύπου, ικανού να παρακολουθεί και να επεμβαίνει αυτόνομα σε κρίσιμες παραμέτρους του θερμοκηπίου.

Το σύστημα διαχωρίστηκε σε τρεις επιμέρους μονάδες (αισθητήρων, επενεργητών και κεντρικής επεξεργασίας) επιτρέποντας τη σαφή κατανομή ρόλων και την εύκολη μελλοντική επεκτασιμότητα. Η επικοινωνία μεταξύ των μονάδων μέσω του RS485 bus αποδείχθηκε σταθερή και αξιόπιστη, επιβεβαιώνοντας την καταλληλότητά της για εφαρμογές σε περιβάλλοντα με ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, όπως τα θερμοκήπια.

Οι αισθητήρες που ενσωματώθηκαν παρείχαν ακριβή και χρήσιμα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, τα οποία αξιοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής, μιας κρίσιμης παραμέτρου για τον υπολογισμό των αναγκών άρδευσης. Με βάση τις μετρήσεις αυτές, ενεργοποιούνταν αυτόματα ποτιστικά συστήματα ή ανεμιστήρες, επιτυγχάνοντας συνθήκες που προάγουν την υγιή ανάπτυξη των καλλιεργειών και την εξοικονόμηση πόρων.

Επιπλέον, η διασύνδεση του συστήματος με πλατφόρμες όπως το Node-RED, η InfluxDB και το Grafana προσέφερε τη δυνατότητα απομακρυσμένης εποπτείας, καταγραφής και οπτικοποίησης των δεδομένων, ενισχύοντας τον χαρακτήρα της γεωργίας ακριβείας και δημιουργώντας μια πλήρως ελεγχόμενη μικροκλιματική υποδομή.

Η εργασία αυτή αποδεικνύει ότι ακόμη και με περιορισμένους πόρους και χρήση εμπορικά διαθέσιμων εργαλείων, είναι εφικτή η υλοποίηση ενός προηγμένου συστήματος παρακολούθησης και αυτοματισμού για γεωργικές εφαρμογές. Η επιτυχής ολοκλήρωση του έργου θέτει τις βάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις και επεκτάσεις, με στόχο την περαιτέρω ενσωμάτωση τεχνολογιών και την αύξηση της αποδοτικότητας των καλλιεργειών.

6.2 Περιορισμοί του Συστήματος

Αν και το προτεινόμενο σύστημα αυτοματισμού θερμοκηπίου απέδειξε την αξία και τη λειτουργικότητά του σε πειραματικές συνθήκες, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που πρέπει να επισημανθούν και να ληφθούν υπόψη για μελλοντική εξέλιξη και εφαρμογή του σε πραγματικά παραγωγικά περιβάλλοντα.

Πρώτον, η αρχιτεκτονική του συστήματος, αν και ευέλικτη και αρθρωτή, βασίζεται σε συγκεκριμένα μοντέλα μικροελεγκτών και αισθητήρων, τα οποία ενδέχεται να παρουσιάσουν περιορισμούς ως προς την ακρίβεια, τη σταθερότητα ή τη μακροχρόνια ανθεκτικότητα υπό δύσκολες συνθήκες λειτουργίας, όπως αυξημένη υγρασία ή θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Επιπλέον, οι αισθητήρες φθηνής κατασκευής, όπως ο DHT11 ή ο απλός αναλογικός αισθητήρας υγρασίας εδάφους, επηρεάζονται εύκολα από τη φθορά και τη διαβρωτική επίδραση του νερού.

Δεύτερον, το σύστημα επί του παρόντος παρέχει μόνο δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης και όχι απομακρυσμένου ελέγχου μέσω του διαδικτύου. Αν και αυτό εξασφαλίζει την αυτονομία και την ασφάλεια της εγκατάστασης, περιορίζει την ευελιξία του χρήστη να παρέμβει σε πραγματικό χρόνο, π.χ. σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης ή προσαρμογής των αυτοματισμών.

Τρίτον, η μετάδοση δεδομένων βασίζεται σε ενσύρματη επικοινωνία RS485 και Wi-Fi, γεγονός που απαιτεί σωστή καλωδίωση, επαρκές σήμα, και σταθερή πρόσβαση σε δίκτυο. Σε μεγάλες εγκαταστάσεις ή σε θερμοκήπια με αυξημένο ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, η επικοινωνία μπορεί να παρουσιάσει καθυστερήσεις ή απώλειες που ενδέχεται να επηρεάσουν την απόκριση του συστήματος.

Τέλος, η λογική αυτοματισμού είναι βασισμένη σε στατικά κατώφλια και απλές συνθήκες, χωρίς να υπάρχει δυνατότητα για δυναμική μάθηση, προσαρμογή ή χρήση προγνωστικών μοντέλων. Αν και αυτό καθιστά το σύστημα εύχρηστο και σταθερό, περιορίζει το εύρος της "έξυπνης" αντίδρασης του συστήματος σε πιο πολύπλοκα ή μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα.

Παρά τους περιορισμούς αυτούς, το σύστημα αποτελεί ένα σταθερό και επεκτάσιμο σημείο εκκίνησης, το οποίο μπορεί να εξελιχθεί σημαντικά με τη χρήση πιο προηγμένων τεχνολογιών, τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και λογισμικού.

6.3 Προτάσεις για Μελλοντική Βελτίωση

Η υλοποίηση του παρόντος συστήματος προσφέρει ένα σταθερό και λειτουργικό θεμέλιο για την ανάπτυξη πιο προηγμένων λύσεων στον τομέα της γεωργίας ακριβείας. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετές δυνατότητες βελτίωσης και επέκτασης, τόσο ως προς την τεχνολογική υποδομή όσο και ως προς τις δυνατότητες που προσφέρονται στον τελικό χρήστη.

Μια πρώτη και σημαντική κατεύθυνση αφορά τη βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των αισθητήρων. Η αντικατάσταση των βασικών φθηνών αισθητήρων με πιο ακριβείς, βιομηχανικού τύπου αισθητήρες μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ποιότητα των μετρήσεων και τη μακροχρόνια αξιοπιστία του συστήματος.

Παράλληλα, προτείνεται η ενσωμάτωση μηχανισμών απομακρυσμένου ελέγχου μέσω ασφαλούς σύνδεσης, δίνοντας τη δυνατότητα στον χρήστη να παρεμβαίνει στο σύστημα , όπως για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση των ηλεκτροβανών, σε περιπτώσεις που αυτό κρίνεται αναγκαίο. Η δυνατότητα αυτή μπορεί να επιτευχθεί μέσω κατάλληλου web interface ή εφαρμογής κινητού.

Ένα ακόμα βήμα προς την αυτονομία και την ευφυΐα του συστήματος είναι η χρήση δυναμικών αλγορίθμων πρόβλεψης και τεχνητής νοημοσύνης. Η αξιοποίηση ιστορικών δεδομένων από την InfluxDB σε συνδυασμό με μοντέλα πρόβλεψης καιρού ή φυτικής ανάπτυξης, θα μπορούσε να επιτρέψει στο σύστημα να προσαρμόζει δυναμικά τις ενέργειές του με βάση πιο σύνθετα σενάρια και όχι απλούς στατικούς κανόνες.

Επιπλέον, η ενεργειακή αυτονομία θα μπορούσε να αποτελέσει έναν στόχο μακροπρόθεσμης βελτίωσης, μέσω της ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών πηγών ενέργειας και συστημάτων αποθήκευσης ,όπως μπαταρίες, ώστε το σύστημα να μπορεί να λειτουργεί και σε απομακρυσμένες περιοχές χωρίς εξάρτηση από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Τέλος, η δυνατότητα επέκτασης του συστήματος σε πολλαπλά θερμοκήπια ή καλλιεργητικές ζώνες μέσω δυναμικής διαχείρισης πολλαπλών κόμβων RS485 ή ακόμα και ασύρματων κόμβων.

Η συνεχής τεχνολογική πρόοδος και η ευκολία πρόσβασης σε νέες λύσεις επιτρέπουν την εξέλιξη του συστήματος σε μια πλήρως έξυπνη υποδομή, ικανή να υποστηρίξει τις σύγχρονες απαιτήσεις της αγροτικής παραγωγής και να προσφέρει στους παραγωγούς πραγματικά εργαλεία παρακολούθησης, πρόβλεψης και βελτιστοποίησης των καλλιεργειών τους.

Βιβλιογραφία

[1] *Geopard Tech. The environmental Benefits of Precision Agriculture. Διαθέσιμο στο : https://geopard.tech/blog/the-environmental-benefits-of-precision-agriculture/ (πρόσβαση: Αύγουστος 2025)*

[2] *Improving Yield of Tomatoes Grown in Greenhouses Using IoT Based Nutrient Management System. Διαθέσιμο στο : https://www.researchgate.net/publication/373700376_Improving_Yield_of_Tomatoes_Grown_in_Greenhouses_Using_IoT_Based_Nutrient_Management_System*

[3] *Turc, L. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climatic formula evolved up to date. Annales Agronomiques, 12, 13-14.*

[4] *https://www.tme.eu/Document/7a4fd48d400b8c4c8309ef1e2b13cdd4/MR003-005-1.pdf (πρόσβαση: Αύγουστος 2025)*