

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ανάπτυξη Ηλεκτρονικής Διάταξης Υποβοήθησης στην
Καλλιέργεια του Ελαιόδεντρου»



Του φοιτητή
Βασίλειου Παναγιώτη Κεχαγιά
Αρ. Μητρώου: 2020069

Επιβλέπων
Ιορδάνης Κιοσκερίδης
Καθηγητής

Ημερομηνία 06/01/2026

Τίτλος Δ.Ε.: Ανάπτυξη ηλεκτρονικής διάταξης υποβοήθησης στην καλλιέργεια του ελαιόδεντρου

Κωδικός Δ.Ε.: 25120

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Βασίλης Παναγιώτης Κεχαγιάς

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Ιορδάνης Κιοσκερίδης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.: 07-04-2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.: 06/01/2026

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

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

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

Πρόλογος

Η επιλογή του θέματος για την Διπλωματική μου εργασία βασίζεται στο ενδιαφέρον μου για την διασύνδεση της τεχνολογίας με τον αγροτικό τομέα, πιο συγκεκριμένα με την καλλιέργεια της ελιάς η οποία αποτελεί σημαντικό κομμάτι της ελληνικής και γενικότερα μεσογειακής αγροτικής παραγωγής.

Στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος μέσα από το οποίο δίνεται η δυνατότητα στον ελαιοπαραγωγό να παρακολουθεί τον ελαιώνα του. Βασικοί πυλώνες της εφαρμογής είναι δύο μικροελεγκτές ESP32 με συνδεσιμότητα τύπου Master/Slave. Διαθέτουν αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας εδάφους για την συλλογή δεδομένων του χώματος, καθώς και αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας αέρα για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος.

Η εκπόνηση της εργασίας μου έδωσε την ευκαιρία να συνδυάσω, αλλά και να αναπτύξω τις γνώσεις μου στον προγραμματισμό και την ηλεκτρονική. Μου προσέφερε πρακτική εμπειρία στην ανάπτυξη IoT συστημάτων για την σύγχρονη γεωργία αλλά και θεωρητικό υπόβαθρο στην ανάπτυξη εφαρμογών Android.

Περίληψη

Ο τομέας της ελαιοκαλλιέργειας αποτελεί έναν από τους πιο βασικούς πυλώνες του πρωτογενούς τομέα της Ελλάδας. Η ανάγκη για πιο αποδοτική διαχείριση των καλλιεργειών καθιστούν απαραίτητη την ενσωμάτωση σύγχρονων τεχνολογιών, όπως το Internet of Things στην διαδικασία των αγροτικών εργασιών. Στο πλαίσιο αυτό η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου ηλεκτρονικού συστήματος και μιας εφαρμογής Android για την απεικόνιση των πληροφοριών σχετικά με την καλλιέργεια των ελαιόδεντρων.

Το σύστημα βασίζεται στην χρήση δύο μικροελεγκτών ESP32 σε διάταξη Master/Slave αξιοποιώντας αισθητήρες για την άντληση κρίσιμων περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία του εδάφους και του αέρα. Τα δεδομένα συλλέγονται και αποστέλλονται σε πραγματικό χρόνο μέσω ασύρματων πρωτοκόλλων επικοινωνίας, προσφέροντας την δυνατότητα για πλήρη απομακρυσμένη παρακολούθηση των δέντρων. Παράλληλα, μέσω της εφαρμογής Android παρουσιάζονται στον παραγωγό όλες οι μετρήσεις από τους αισθητήρες, πλήρες ιστορικό των δεδομένων για τις προηγούμενες ημέρες αλλά και προγνωστικά καιρού για την τοποθεσία του ελαιώνα. Αξιοποιούνται διαδικτυακές πλατφόρμες, όπως το HiveMQ για την άμεση αποστολή των μετρήσεων, το Firebase για την μόνιμη αποθήκευση των μετρήσεων με σκοπό την δημιουργία ιστορικού, αλλά και το Open Meteo που προσφέρει καιρικά προγνωστικά για την τοποθεσία που ορίζει ο ελαιοπαραγωγός.

Η υλοποίηση της εργασίας και του συστήματος, επιβεβαιώνει την χρησιμότητα των τεχνολογιών IoT στον κλάδο της ελαιοκομίας, συμβάλλοντας στην βελτίωση της διαχείρισης των καλλιεργειών και στην μείωση των απωλειών. Η εργασία παρουσιάζει τις δυνατότητες της έξυπνης γεωργίας στην ελαιοπαραγωγή και θέτει βάσεις για μελλοντική ανάπτυξη του συστήματος.

«Development of an Electronic Support System for Olive Tree Cultivation»

«Vassileios Panagiotis Kechagias»

Abstract

The olive cultivation is one of the most fundamental pillars of Greece's primary sector. The need of efficient crop management makes the integration of new technologies, such as the Internet of Things systems an essential upgrade for the agricultural practices. In this context, this diploma thesis focuses on the development of a comprehensive electronic system, equipped with an Android application for displaying important information about olive tree cultivation.

The system relies on the use of two ESP32 microcontrollers in a Master/Slave configuration, with the use of sensors to collect critical environmental parameters, such as soil and air temperature and moisture. The data is collected and sent in real time via wireless communication protocols, giving a complete remote monitoring of the olive trees. At the same time, the Android app handles the viewing of all the measurements from the sensors to the producer, keeps a complete history of the measures for the previous days and shows weather forecast for the location of the olive grove. The use of online platforms such as HiveMQ contributes to the immediate transmission of the measurements, Firebase as well is used to store permanently the data from the sensors, and last Open Meteo which is providing weather forecast for the specified location by the olive producer.

The implementation of the project and the system proves the useful assets of the IoT technologies in the agriculture and specifically in the olive industry, contributing to improved crop management and reduced losses. The project presents the key factors of smart agriculture in olive cultivation and lays the foundations for future development of the system.

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την οικονομική και κυρίως ψυχολογική υποστήριξη αυτά τα τελευταία 5 χρόνια της ακαδημαϊκής μου πορείας. Τον υπεύθυνο καθηγητή της εργασίας μου, τον κ. Ιορδάνη Κιοσκερίδη για την καθοδήγηση του κατά την υλοποίηση της εργασίας αλλά και κατά την πορεία των μαθημάτων της σχολής. Τέλος, τους φίλους μου που έδειξαν ενδιαφέρον για την πορεία της διπλωματικής μου και πιο συγκεκριμένα τον Σεραφείμ για την παροχή της αρχικής πληροφορίας ως προς τον κλάδο της ελαιοκομίας.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iii
Περίληψη	iv
Abstract.....	v
Ευχαριστίες	vi
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος Σχημάτων	ix
Κατάλογος Πινάκων	x
Κατάλογος Εικόνων.....	xi
Συντομογραφίες.....	xii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	1
1.1 Τεχνολογία στον αγροτικό τομέα.....	1
1.2 Η καλλιέργεια της ελιάς στην Ελλάδα	1
1.2.1 Νεαρά ελαιόδεντρα και κύκλος ζωής	2
1.3 Συνθήκες ανάπτυξης και παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή	2
1.3.1 Θερμοκρασία.....	3
1.3.2 Υγρασία.....	3
1.3.3 Εδαφικές συνθήκες	3
1.3.4 Άνεμος και ηλιακή ακτινοβολία	4
1.3.5 Ασθένειες του ελαιόδεντρου	4
1.4 Η τεχνολογία στην γεωργία	5
1.5 Σκοπός και στόχοι της εργασίας.....	7
1.6 Δομή της εργασίας.....	7
Κεφάλαιο 2ο: Τεχνολογικό υπόβαθρο και θεωρία.....	8
2.1 Η έννοια του Internet of Things	8
2.2 Εφαρμογές του IoT στον αγροτικό τομέα.....	8
2.3 Ο μικροελεγκτής ESP32 - Χαρακτηριστικά και λειτουργία	10
2.4 Πλατφόρμες επικοινωνίας και αποθήκευσης δεδομένων	12
2.4.1 WiFi	13
2.4.2 ESP-NOW	13
2.4.3 MQTT	13
2.4.4 Firebase	13
2.5 Αισθητήρες περιβαλλοντικών μετρήσεων	14

2.5.1	DHT22	14
2.5.2	DS18B20.....	15
2.5.3	Soil Moisture Sensor.....	16
2.6	Πίνακας Εξαρτημάτων.....	18
Κεφάλαιο 3ο: Υλοποίηση Συστήματος.....		19
3.1	Αρχιτεκτονική του Συστήματος	19
3.2	Σχεδίαση και σύνδεση υλικού.....	21
3.3	Λειτουργία λογισμικού ESP32.....	25
3.3.1	Master ESP.....	25
3.3.2	Slave ESP.....	28
3.4	Σύνδεση με πλατφόρμες HiveMQ και Firebase	30
3.4.1	HiveMQ	30
3.4.2	Firebase	31
3.5	Ανάπτυξη Android εφαρμογής.....	33
3.5.1	Τεχνολογίες και αρχιτεκτονική της εφαρμογής.....	33
3.5.2	Διεπαφή χρήστη.....	35
3.5.3	Οθόνη Live Μετρήσεων.....	36
3.5.4	Οθόνη Μετεωρολογικού σταθμού	38
3.5.5	Οθόνη ιστορικού των μετρήσεων	40
3.5.6	Μηχανισμός ειδοποιήσεων.....	42
3.6	Συνολική λειτουργία του συστήματος.....	43
3.7	Δοκιμές και παρατηρήσεις.....	44
3.8	Ενσωμάτωση πολλαπλών Slave κόμβων	46
Κεφάλαιο 4ο: Αποτελέσματα και Σύγκριση.....		47
4.1	Παρουσίαση μετρήσεων	47
4.2	Αξιολόγηση λειτουργίας συστήματος	51
4.3	Ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	52
Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις.....		53
5.1	Συμπεράσματα και αξιολόγηση τεχνολογικής λύσης.....	53
5.2	Προτάσεις βελτίωσης	54
5.3	Μελλοντικές εξελίξεις	56
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		57
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Μετρήσεις Αισθητήρων.....		63
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Αποσπάσματα κώδικα του Slave ESP.....		67

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3.1: Αρχιτεκτονική του συστήματος.....	32
Σχήμα 3.2: Συνδεσμολογία των αισθητήρων	35
Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ροής Master κόμβου.....	39
Σχήμα 3.4: Διάγραμμα ροής Slave κόμβου.....	41
Σχήμα 3.5: Αρχιτεκτονική λειτουργίας της εφαρμογής.....	46
Σχήμα 3.6: Μετατροπή MQTT μηνύματος σε μεταβλητές.....	49
Σχήμα 3.7: Παράδειγμα επικοινωνίας της εφαρμογής με τα APIs.....	51
Σχήμα 3.8: Σύστημα πολλαπλών Slave κόμβων με ενδιάμεση επικοινωνία.....	58
Σχήμα 4.1a: Διακυμάνσεις θερμοκρασιών εδάφους και αέρα 01-12.....	59
Σχήμα 4.1b: Διακυμάνσεις υγρασίας εδάφους και αέρα 01-12.....	60
Σχήμα 4.2a: Διακυμάνσεις θερμοκρασιών εδάφους και αέρα 02-12.....	60
Σχήμα 4.2b: Διακυμάνσεις υγρασίας εδάφους και αέρα 02-12.....	61
Σχήμα 4.3a: Διακυμάνσεις μέσω των θερμοκρασιών εδάφους και αέρα.....	62
Σχήμα 4.3b: Διακυμάνσεις μέσης υγρασίας εδάφους και αέρα.....	62
Παραρτήματα:	
Σχήμα A1a: Διακυμάνσεις θερμοκρασιών εδάφους και αέρα 03-12-2025.....	76
Σχήμα A1b : Διακυμάνσεις υγρασίας εδάφους και αέρα 03-12-2025	76
Σχήμα A2a: Διακυμάνσεις θερμοκρασιών εδάφους και αέρα 04-12-2025.....	77
Σχήμα A2b: Διακυμάνσεις υγρασίας εδάφους και αέρα 04-12-2025	77
Σχήμα A3a: Διακυμάνσεις θερμοκρασιών εδάφους και αέρα 05-12-2025.....	78
Σχήμα A3b: Διακυμάνσεις υγρασίας εδάφους και αέρα 05-12-2025	78

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Τιμές περιβαλλοντικών παραμέτρων	16
Πίνακας 2.1: Τρόποι τροφοδοσίας και λειτουργία ακροδεκτών	23
Πίνακας 2.2: Τεχνικές προδιαγραφές DHT22.....	27
Πίνακας 3.1: Συνδεσμολογία και ονομασία pins των αισθητήρων	33
Πίνακας 4.1: Μέσοι όροι μετρήσεων ανά ημέρα	61

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Ελαιώνας	14
Εικόνα 1.2: Ελαιόδεντρο ενός έτους.....	14
Εικόνα 1.3: GPS, RTK Systems	17
Εικόνα 1.4: UAV	17
Εικόνα 1.5: Μηχάνημα Αυτόματου διαχωρισμού ελιών	19
Εικόνα 2.1: Διάταξη ακροδεκτών ESP32	22
Εικόνα 2.2: Απλή αναπαράσταση επικοινωνιών σε σύστημα IoT	24
Εικόνα 2.3: DHT22 και Pin layout	26
Εικόνα 2.4: DS18B20 και αρίθμηση των Pins	27
Εικόνα 2.5: DS18B20 με module	28
Εικόνα 2.6: Grove Soil Moisture Sensor.....	29
Εικόνα 3.1: ESP32.....	34
Εικόνα 3.2: Slave ESP σε λειτουργία	34
Εικόνα 3.3: Μονάδα φόρτισης 18650.....	34
Εικόνα 3.4: Φυσική σύνδεση των αισθητήρων με τον ESP Master	35
Εικόνα 3.5: (A) Αισθητήρας υγρασίας εδάφους, (B) DS18B20, (C) DHT22	36
Εικόνα 3.6: Δομή δημοσιευμένου μηνύματος.....	43
Εικόνα 3.7: Πεδία τελικού εγγράφου μετρήσεων στον Firebase.....	44
Εικόνα 3.8: Μενού πλοήγησης	47
Εικόνα 3.9: Splash Screen.....	47
Εικόνα 3.10: Ένδειξη σύνδεσης MQTT.....	48
Εικόνα 3.11: Οθόνη Live Μετρήσεις.....	49
Εικόνα 3.12: Οθόνη Μετεωρολογικού Σταθμού	51
Εικόνα 3.13: Οθόνη Ιστορικού μετρήσεων.....	53
Εικόνα 3.14: Ειδοποίηση από τιμή αισθητήρα.....	54
Εικόνα 3.15: Ειδοποίηση από πρόγνωση του Open Meteo.....	54
Εικόνα 3.16: Ελαιώνας όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις	57
Εικόνα 3.17: Τοποθέτηση αισθητήρων.....	57
Εικόνα 3.18: Ελαιόδεντρο και Master κόμβος	57
Εικόνα 5.1: ESP32 με ενσωματωμένο T-A7670G και κάρτα SIM	66
Εικόνα 5.2: a. Διάβρωση στον Groove soil moisture sensor b. Αισθητήρας SEN0308.....	67
Εικόνα 5.3: Αισθητήρας υγρασίας και θερμοκρασίας SHT35	67

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
IoT	Internet of Things
ΕΛΣΤΑΤ	Ελληνική Στατιστική Αρχή
RTK	Real Time Kinematics
GPS	Global Positioning System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
LiDAR	Light Detection and Ranging
ESP	Espressif Microcontroller
ADC	Analog to Digital Converter
DAC	Digital to Analog Converter
PWM	Pulse Width Modulation
VIN	Voltage Input
USB	Universal Serial Bus
WiFi	Wireless Fidelity
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
ESP-NOW	Espressif Now
MAC	Medium Access Control
API	Application Programming Interface
JSON	JavaScript Object Notation
SQL	Structured Query Language
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
IDE	Integrated Development Environment
SDK	Software Development Kit
BLE	Bluetooth Low Energy

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Τεχνολογία στον αγροτικό τομέα

Ένας από τους βασικούς πυλώνες του πρωτογενούς τομέα στην Ελλάδα είναι η ελαιοκαλλιέργεια, καθώς η χώρα είναι από τους κορυφαίους παραγωγούς διεθνώς. Τα δεδομένα της ΕΛΣΤΑΤ παρουσιάζουν πως η συνολική έκταση ελαιώνων στην Ελλάδα ανέρχεται στα 7,5 εκατομμύρια στρέμματα, ενώ η παραγωγή της ελιάς και του ελαιόλαδου αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για τις εξαγωγές και την οικονομία του αγροτικού τομέα[1].

Πέρα από το οικονομικό και κοινωνικό όφελος της ελαιοκαλλιέργειας οι παραγωγοί αντιμετωπίζουν προκλήσεις και δυσκολίες, μεταβολές στις κλιματικές συνθήκες, δύσκολη παρακολούθηση συνθηκών στον ελαιώνα καθώς και ανάγκη για αποδοτική και οικολογική αξιοποίηση των φυσικών πόρων

Η τεχνολογία ανοίγει νέους δρόμους για τον αγροτικό τομέα, προσφέρει λύσεις με συστήματα IoT για απομακρυσμένη παρακολούθηση των αγρών, σηματοδοτώντας έτσι την εποχή της Έξυπνης Γεωργίας. Έρευνες δείχνουν πως οι λύσεις IoT σε συνδυασμό με αισθητήρες και πλατφόρμες απομακρυσμένης παρακολούθησης δύναται να αυξήσουν την παραγωγικότητα αλλά και να μειώσουν τις απώλειες από άσκοπα ποτίσματα[2].

Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα εργασία προτείνει ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης ελαιόδεντρων. Βασιζόμενο σε δύο μικροελεγκτές ESP32, προσομοιώνει ένα δίκτυο αισθητήρων για μεγάλες εκτάσεις ελαιώνων. Με την χρήση αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας επιτυγχάνεται μια ολοκληρωμένη καταγραφή των συνθηκών του περιβάλλοντος, καθώς και με μια εφαρμογή για Android συσκευές δίνεται η δυνατότητα για απομακρυσμένη παρακολούθηση από τον ελαιοπαραγωγό.

1.2 Η καλλιέργεια της ελιάς στην Ελλάδα

Η ελιά είναι ένα από τα σημαντικότερα δέντρα στον Μεσογειακό πρωτογενή τομέα, αποτελεί επίσης βασικό στοιχείο στην Ελληνική αγροτική παραγωγή. Η παρουσία της ελιάς καταγράφεται από την αρχαιότητα στον Ελληνικό πολιτισμό, υιοθετώντας τον ρόλο συναλλάγματος. Στην εποχή αυτή πλέον, στηρίζει την οικονομία του εθνικού πρωτογενή τομέα αλλά προσφέρει και ανάπτυξη σε μικρές τοπικές κοινωνίες[3].

Σύμφωνα με στατιστικές έρευνες που έχουν διεξαχθεί η χώρας μας κατατάσσεται στην πέμπτη θέση παγκοσμίως ως προς την παραγωγή ελαιόλαδου. Μετρήσεις επιβεβαιώνουν πως η συνολική έκταση των ελαιώνων ξεπερνάει τα 7,5 εκατομμύρια στρέμματα, δηλαδή πάνω από 130 εκατομμύρια ελαιόδεντρα καλλιεργούνται σε εθνικό επίπεδο[4]. Με βάση ερευνών από τον FAO(Food and Agricultural Organization) οι 10 πρώτες χώρες σε παραγωγή ελιάς βρίσκονται στην Μεσόγειο, εκμεταλλεζόμενες άμεσα από τα οικονομικά οφέλη αυτού του κλάδου[5].

Οι ελαιώνες στην χώρα μας εκτίνονται σε πολλά γεωγραφικά σημεία, ιδιαίτερη συγκέντρωση παρουσιάζουν περιοχές όπως η Κρήτη, η Πελοπόννησος και η Στερεά Ελλάδα. Περιοχές όπου το μεσογειακό κλίμα είναι έντονο, με ήπιους χειμώνες χωρίς μεγάλες περιόδους παγωνιάς, με υψηλή ηλιοφάνεια και σποραδικές βροχές[6].

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές ποικιλίες ελιάς που ευδοκμοούν στην Ελλάδα, οι κυριότερες από αυτές είναι η Καλαμών, η Αμφίσσης και η Χαλκιδικής και η Κορωνέικη. Η Κορωνέικη αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό της Ελληνικής παραγωγής και αγγίζει το 60%[7],[8].

Στην εικόνα 1.1 παρουσιάζεται ένας τυπικός Ελληνικός ελαιώνας, με ελαιόδεντρα που δεν ξεπερνάνε τον ένα χρόνο από την φύτευση τους. Στην εικόνα 1.2 στην βάση του κορμού του δέντρου φαίνεται μια πορτοκαλί μεμβράνη, αυτή προστατεύει το δέντρο από το πολύ κρύο και βοηθάει στην παρεμπόδιση εντόμων από το να ανέβουν στον κορμό του δέντρου.



Εικόνα 1.1: Ελαιώνας



Εικόνα 1.2: Ελαιόδεντρο ενός έτους

1.2.1 Νεαρά ελαιόδεντρα και κύκλος ζωής

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία τα νεαρά δέντρα παρουσιάζουν αυξημένες ευαίσθησιες στις περιβαλλοντικές μεταβολές. Διαθέτουν μικρό ριζικό σύστημα και χρειάζονται χρόνο για την σωστή εγκατάσταση τους μέσα στο έδαφος. Η αργή αποκατάσταση του ριζικού συστήματος μετά από την φύτευση και οι διαφορές του μεταξύ του επίγειου τμήματος, καθιστούν τα νέα ελαιόδεντρα άμεσα εξαρτώμενα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν[9]. Παράλληλα, οι περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η υγρασία, η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζουν την φυσιολογία και την διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένο στρες και περιορισμό στην ανάπτυξη των νεαρών ελαιόδεντρων, όπου αρκετοί μηχανισμοί δεν έχουν αναπτυχθεί πλήρως[10].

Το ελαιόδεντρο ακολουθεί ένα μεγάλο βιολογικό κύκλο όπου μετά το στάδιο της νεαρής ηλικίας, περνάει στην φυτική ανάπτυξη, στην παραγωγική φάση, στην καρπόδεση και στην ωρίμανση του καρπού. Η ελιά είναι ένα μακρόβιο είδος δέντρων, με ορισμένα να έχουν φτάσει μέχρι και τα 1000 έτη σε ηλικία. Κατά την μετάβαση στο παραγωγικό στάδιο, η ελιά παρουσιάζει έντονη εξάρτηση από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Διαδικασίες όπως η διαφοροποίηση των οφθαλμών, η άνθηση και η καρπόδεση επηρεάζονται από την θερμοκρασία, την διάθεση νερού και την φωτοσύνθεση που κάνει το δέντρο. Η σωστή άνθηση και καρπόδεση είναι καθοριστικά σημεία για τον κύκλο ζωής του ελαιόδεντρου, μικρά ποσοστά καρπόδεσης της τάξης του 1-2% μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εμπορική χρήση[11]. Λόγω της ευαισθησίας που παρουσιάζουν τα ελαιόδεντρα, είναι κρίσιμης σημασίας η παρακολούθηση των δέντρων στα πρώιμα στάδια της ζωής τους.

1.3 Συνθήκες ανάπτυξης και παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή

Η ανάπτυξη της παραγωγής της ελιάς εξαρτάται άμεσα από τις περιβαλλοντικές και εδαφικές συνθήκες που επικρατούν στο μέρος όπου έχουν φυτευτεί. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η

υγρασία του εδάφους και του αέρα, η βροχόπτωση, η ηλιοφάνεια και η σύσταση του εδάφους επηρεάζουν σημαντικά την καρποφορία του δέντρου αλλά και την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος. Η ελιά είναι ένα είδος το οποίο χαρακτηρίζεται από μεγάλη ανθεκτικότητα σε διαφαινόμενες καιρικές συνθήκες, ωστόσο παρουσιάζει ιδιαίτερες απαιτήσεις σε ορισμένα στάδια της ζωής αλλά και του ετήσιου βιολογικού της κύκλου.

1.3.1 Θερμοκρασία

Το ελαιόδεντρο ευδοκμεί σε διάφορα εδάφη και μέρη με διαφορετικές θερμοκρασίες, αυτές οι περιοχές έχουν κατά μέσο όρο θερμοκρασιακές τιμές από 10-30°C. Οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από τιμές -4°C τον χειμώνα μέχρι και 40°C τους θερινούς μήνες του χρόνου. Αν και το ελαιόδεντρο είναι ένα ανθεκτικό δέντρο ως προς τα κρύα, έχοντας την δυνατότητα να αντέξει σταδιακή πτώση θερμοκρασίας μέχρι και -12°C, αυτό σε συνδυασμό με την υγρασία και την διάρκεια των πολύ χαμηλών θερμοκρασιών μπορεί να επιφέρει ζημιές στον καρπό ή σε όλο το επίγειο δέντρο. Γενικά θεωρείται πως η θερμοκρασία δεν πρέπει να πέφτει κάτω από τους -7°C γιατί σε συνδυασμό με άλλες καιρικές συνθήκες ζημιώνει τα δέντρα. Επίσης, υπάρχουν ποικιλίες όπου χρειάζονται κάποιες ώρες ανά τον χρόνο με χαμηλές θερμοκρασίες μικρότερες των 7°C, αυτό επιφέρει πλεονεκτήματα στην διαδικασία της καρποφορίας. Τόσο οι χαμηλές όσο και οι υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν τα δέντρα, οι υψηλές θερμοκρασίες του καλοκαιριού ευθύνονται για την καρπότητα[8].

1.3.2 Υγρασία

Η ατμοσφαιρική υγρασία είναι ένας ακόμα παράγοντας ο οποίος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην καλλιέργεια του ελαιόδεντρου. Ως ένα δέντρο που απλώνεται σε περιοχές με μεσογειακό κλίμα, μπορεί να καρποφορεί και να αναπτυχθεί σε εναλλαγές από βροχή σε ξηρό καιρό. Από τους φθινοπωρινούς μήνες έως και τους πρώτους ανοιξιάτικους, υπάρχει αρκετή ηλιοφάνεια η οποία δεν επιτρέπει την διατήρηση υψηλής υγρασίας για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ως ιδανικές τιμές για ατμοσφαιρική υγρασία θεωρείται το 40-50%, χωρίς αυτό όμως να σημαίνει πως στις περιοχές όπου υπάρχει εκτεταμένη καλλιέργεια ελαιόδεντρων δεν παρατηρούνται διαφοροποιήσεις σε αυτές τις τιμές. Ο συνδυασμός όμως χαμηλής υγρασίας, μικρότερη από 40% σε συνδυασμό με υψηλές θερμοκρασίες μπορούν μακροπρόθεσμα να προκαλέσουν προβλήματα. Επίσης, η υψηλή υγρασία, πάνω από 80% ευνοεί μυκητολογικές ασθένειες βλαβερές προς τον καρπό και το δέντρο[8].

1.3.3 Εδαφικές συνθήκες

Η ελιά δεν έχει ιδιαίτερα αυστηρές απαιτήσεις για την σύσταση του εδάφους, μπορεί να αναπτυχθεί από σχετικά και ξερά μέχρι και σε πετρώδεις περιοχές. Ωστόσο, για επαρκή καρποφορία και για κανονική ανάπτυξη το καταλληλότερο έδαφος πρέπει να είναι πλούσιο σε ιχνοστοιχεία και νερό. Η ελιά έχει πλούσιο ριζικό σύστημα το οποίο είναι ανάλογο με την υγρασία του εδάφους όπου καλλιεργείται. Η ανάπτυξη πυκνού ριζικού συστήματος συνδέεται θετικά με την αντοχή στην ξηρασία και την ικανότητα της απορρόφησης νερού. Για αυτό τον λόγο, τιμές υγρασίας εδάφους από 20-40% επιφέρουν πλεονεκτήματα τόσο στην δημιουργία αντοχών, όσο και στην σωστή ρίζωση του ελαιόδεντρου. Το έδαφος όπου καλλιεργείται η ελιά δεν πρέπει να έχει πολλά νερά καθώς συνεισφέρουν αρνητικά πνίγοντας τον το δέντρο. Επίσης, ο συνδυασμός θερμοκρασιών υπό το 0, σε συνδυασμό με υψηλή υγρασία επιφέρει κίνδυνο καθώς μπορεί να παγώσει το έδαφος και οι ρίζες του δέντρου. Τέλος, οι ελιές αναπτύσσονται και παράγουν καρπό σε εδάφη ελαφρώς όξινα, με pH από 6,5-8. Πρέπει πάντως να αποφεύγεται έδαφος με pH πάνω από 8,5 καθώς περιορίζει την βλάστηση του δέντρου[8],[12].

1.3.4 Άνεμος και ηλιακή ακτινοβολία

Η ταχύτητα του ανέμου δρα άμεσα στην ανάπτυξη των νέων δέντρων, προκαλώντας μεταβολές στην ανάπτυξη του. Οι αυξημένες ταχύτητες ανέμου μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση του ύψους αλλά και της επιφάνειας των φύλλων. Επίσης ένα ακόμα φαινόμενο είναι η αύξηση της διαμέτρου του κορμού, με σκοπό την ενίσχυση της σταθερότητας του δέντρου. Παράλληλα ο άνεμος επηρεάζει και την λειτουργία του δέντρου. Η αυξημένη ροή ανέμου οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες νερού καθώς αυξάνει την εξάτμιση μέσω των φύλλων[13]. Από την άλλη, η ηλιακή ακτινοβολία είναι πολύ σημαντική για την φωτοσυνθετική διαδικασία του ελαιόδεντρου. Η επαρκής έκθεση συμβάλει θετικά στην απόδοση και στην ανάπτυξη της παραγωγικότητας[14].

1.3.5 Ασθένειες του ελαιόδεντρου

Ο δάκος της ελιάς (*Dacus oleae*), αποτελεί τον βασικό εχθρό της ελαιοπαραγωγής. Είναι ένα έντομο που προσβάλλει τον καρπό και δημιουργεί στοές με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η ποσότητα και η ποιότητα της παραγωγής. Εμφανίζονται κυρίως τους θερινούς μήνες όπου και είναι πολύ δραστήρια, οι υψηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με υψηλή υγρασία από άρδευση δείχνουν ότι αυξάνεται σημαντικά ο αριθμός τους σε σχέση με ένα πιο ξηρό έδαφος.

Η καρκίνωση της ελιάς από το βακτήριο *Pseudomonas savastanoi* προκαλεί την δημιουργία εξογκωμάτων στον κορμό και στα κλαδιά του δέντρου. Το βακτήριο αυτό μεταφέρεται εύκολα μέσω του νερού της βροχής και μολύνει το δέντρο μέσα από πληγές ή τομές που γίνανε από κλάδεμα. Οι μολύνσεις γίνονται συνήθως σε υγρό καιρό με πολλές βροχές, κυρίως τους φθινοπωρινούς, χειμερινούς και ανοιξιάτικους μήνες του έτους. Το σωστό κλάδεμα και οι ψεκασμοί τους ευνοϊκούς, για το βακτήριο μήνες αλλά και μετά από χαλαζόπτωση είναι τρόποι να προστατευτούν τα δέντρα.

Τέλος, η βερτισιλλίωση (*Verticillium dahliae*) είναι ένα παθογόνο που προκαλεί αρχικά την σταδιακή ξήρανση των φύλλων μέχρι να φτάσει σε όλο το δέντρο. Τα συμπτώματα ποικίλλουν ανάλογα με την εποχή και το στέλεχος του παθογόνου, το καλοκαίρι εκδηλώνεται με κιτρίνισμα και κλείσιμο των φύλλων σε μορφή σωλήνα. Οι ιδανικές συνθήκες για να αναπτυχθεί ο μύκητας είναι 23-25°C θερμοκρασία περιβάλλοντος και 5,5-7,2 Ph εδάφους[8].

Πίνακας 1.1 :Τιμές περιβαλλοντικών παραμέτρων

	Ανώτατη	Κατώτατη	Βέλτιστη
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	40°C	-7°C	10-30°C
Υγρασία περιβάλλοντος	Άνω 80%	Κάτω 40%	40-50%
Θερμοκρασία εδάφους	-	0C	-
Υγρασία εδάφους	Άνω 80%	-	20-40%
Ph	8,5	-	6,5-8

1.4 Η τεχνολογία στην γεωργία

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια έχει αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η καθημερινότητα, το ίδιο ισχύει και στον αγροτικό τομέα. Ο πρωτογενής τομέας βρίσκεται στην νέα εποχή Γεωργίας 4.0 (Agriculture 4.0), όπου στοχεύει στην βελτίωση των αγροτικών εργασιών καθώς και στην αύξηση την παραγωγικότητας παράλληλα με την μείωση του κόστους[15]. Μέσω τεχνολογιών πληροφορικής και αυτοματισμού που ενσωματώνονται στην παραγωγική διαδικασία στοχεύουν στην συνεχή καταγραφή δεδομένων ώστε να χρησιμοποιηθούν στην διαδικασία λήψης αποφάσεων, κρίσιμων για την καλλιέργεια. Στόχος είναι η αναβάθμιση της αγροτικής παραγωγής, σε μια νέα μορφή όπου μέσω την τεχνολογίας η τακτικές και οι αποφάσεις θα λαμβάνονται βάση πραγματικών συνθηκών, προς όφελος του παραγωγού[16].

Τα σύγχρονα αυτόνομα τρακτέρ είναι το επόμενο βήμα που έχει κάνει η τεχνολογία στον αγροτικό τομέα. Διαθέτουν συστήματα καθοδήγησης μέσω GPS και σύστημα RTK (εικόνα 1.3) για την ακριβή καθοδήγηση σε συγκεκριμένες γραμμές μέσα στο χωράφι. Με αυτά τα συστήματα, τα τρακτέρ μπορούν να εκτελούν εργασίες όπως όργωμα, σπορά και λίπανση του εδάφους με πολύ μικρή ανθρώπινη παρέμβαση στην διαδικασία, μειώνοντας έτσι τα σφάλματα και αυξάνοντας την λειτουργικότητα[17]. Σε συνδυασμό με ενσωματωμένες κάμερες επάνω στα μηχανήματα ο υπολογιστής του τρακτέρ μπορεί να εντοπίζει εμπόδια μπροστά του και να κινεί την πορεία του με βάση τα προκαθορισμένα μονοπάτια που του έχουν ανατεθεί από τον χειριστή[18]. Επίσης, τα συστήματα ρομποτικής συγκομιδής, όπου αναπτύχθηκαν βασισμένα σε συστήματα αναγνώρισης καρπών και εντοπισμού, προσδίδουν ταχύτητα στην διαδικασία όπου σε άλλη περίπτωση θα την έκανε ένας άνθρωπος[19].



Εικόνα 1.3: GPS, RTK Systems (Tractorgps.gr)



Εικόνα 1.4: UAV (ag.dji.com)

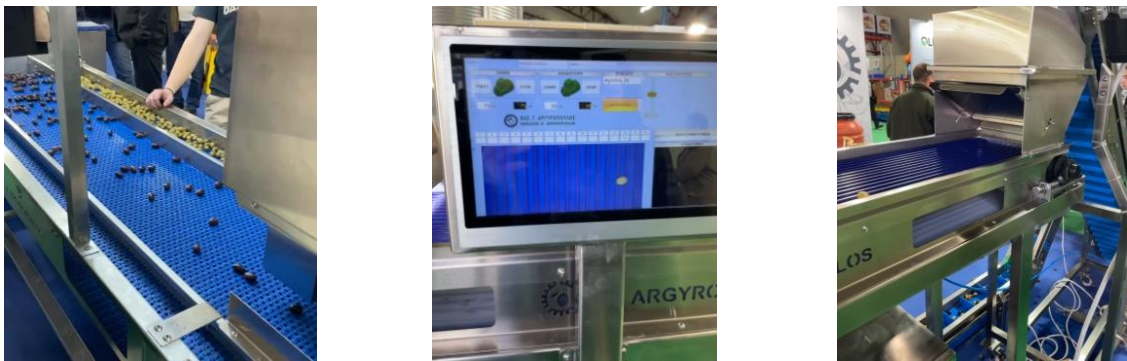
Σημαντική θέση στον σύγχρονο αγροτικό τομέα έχουν τα UAV(Unmanned Aerial Vehicles) ή αλλιώς Drones. Είναι εξοπλισμένα με θερμικές κάμερες, αισθητήρες και συστήματα GPS είναι ικανά να αναλύουν και να εντοπίζουν αυτόματα προβλήματα στο χωράφι. Υπάρχουν πολλές κατηγορίες UAVs στον αγροτικό τομέα, μια από αυτές είναι τα drone που βοηθούν στην παρακολούθηση της ανάπτυξης των καλλιεργειών καθώς και στην χαρτογράφηση του ίδιου του χωραφιού με σκοπό την βελτίωση του προγραμματισμού των εργασιών[20]. Επίσης, υπάρχουν τα drone που είναι κατασκευασμένα να αποθηκεύουν ποσότητες λιπάσματος ή φάρμακου σε υγρή μορφή με σκοπό τον εναέριο ψεκασμό του χωραφιού χωρίς να υπάρχει η ανάγκη να πατήσει κάποιο μηχανήμα ή άνθρωπος μέσα στην καλλιέργεια (εικόνα 1.4)[21]. Θετικό αντίκτυπο της χρήσης των UAV είναι η μείωση της χρήσης περιττής ποσότητας φυτοφαρμάκων αλλά και η πρόβλεψη ασθενειών που οφείλονται σε ζιζάνια και ζώφια. Τέλος η εναέρια λειτουργία τους κάνει την διαδικασία πιο γρήγορη χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να καταστραφεί ποσότητα των φυτών, όπως είναι πιθανό με τα επίγεια μηχανήματα[22].

Η εξέλιξη του Internet of Things (IoT) έχει πλέον εισέλθει στον αγροτικό τομέα, εξελίσσεται συνεχώς και αποτελεί βασικό παράγοντα στην μετάβαση προς την έξυπνη γεωργία. Μέσω συνδεδεμένων αισθητήρων και συστημάτων επεξεργασίας δεδομένων επιτρέπει την συλλογή και αξιοποίηση πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο. Δεδομένα από μετεωρολογικούς αισθητήρες, από αισθητήρες υγρασίας, θερμοκρασίας και ποιότητας φυτών αξιοποιούνται για την ανάλυση της σοδιάς και την έγκαιρη παρέμβαση σε περίπτωση επερχόμενου προβλήματος[23]. Η ενσωμάτωση δικτύων χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, όπως το LoRa WAN (Long Range) και υπηρεσιών cloud, επιτρέπει την συνεχή και απομακρυσμένη ανάλυση δεδομένων, αποσκοπώντας σε πιο αποδοτικές και εξειδικευμένες αγροτικές πρακτικές[24]. Σε πρακτικό επίπεδο, ένα σύστημα IoT βασισμένο σε LoRaWAN παρέχει εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μπορεί να επιτύχει εμβέλεια μέχρι 15km, ιδανικό για απομακρυσμένα αγροτικά περιβάλλοντα. Μέσω πλατφόρμας cloud γίνεται η ανάλυση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και λαμβάνονται αυτοματοποιημένες ενέργειες για την άρδευση των φυτών. Το σύστημα αυτό αποδεικνύει την δυνατότητα του IoT να μετατρέψει μια απλή γεωργική παραγωγή σε μια εφαρμογή έξυπνης καλλιέργειας[25].

Μαζί με την εξέλιξη της τεχνολογίας στον γενικότερο αγροτικό τομέα, νέες τεχνικές και συστήματα έχουν εμφανιστεί στις ελαιοκαλλιέργειες. Η εφαρμογή γεωργίας ακριβείας αποτελεί πλέον βασικό εργαλείο για την διαχείριση των ελαιώνων. Τα συστήματα αυτά αξιοποιούν αισθητήρες, δορυφορικά και τοπικά δεδομένα για την παρακολούθηση των καλλιεργειών σε πραγματικό χρόνο. Οι βασικές εφαρμογές περιλαμβάνουν οπτικούς αισθητήρες καθώς και αισθητήρες εδάφους και φυλλώματος για να την μέτρηση της θρεπτικής κατάστασης του φυτού αλλά και την ποιότητα του εδάφους. Με αυτόν τον τρόπο οι ελαιοπαραγωγοί μπορούν να εφαρμόζουν στοχευόμενα λιπάσματα και να ρυθμίζουν την άρδευση ανάλογα με τις πραγματικές ανάγκες της καλλιέργειας[26].

Η χρήση UAV εφαρμόζεται και στους ελαιώνες, μέσω LiDAR αισθητήρων σχηματίζεται μια τρισδιάστατη απεικόνιση των φυτών που διευκολύνει την σωστή ρύθμιση των ψεκασμών και των κλαδεμάτων των δέντρων. Παράλληλα, η ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης και της τεχνητής νοημοσύνης στην διαδικασία επεξεργασίας όλων των δεδομένων δίνει την δυνατότητα για πρόβλεψη της σοδιάς, ανίχνευση πρώιμων σταδίων ασθενειών και λήψη αυτόματων αποφάσεων με βάση τις παραμέτρους. Ο συνδυασμός όλων αυτών των συστημάτων με τα αυτόματα μηχανήματα και το IoT δημιουργούν ολοκληρωμένα συστήματα καλλιέργειας ελαιόδεντρων[26],[27].

Τέλος, στο στάδιο της επεξεργασίας της ελιάς, οι νέες τεχνολογίες επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα της ίδιας της ελιάς, όσο και του παραγόμενου ελαιόλαδου. Μηχανήματα που χρησιμοποιούν οπτοηλεκτρονικά συστήματα επιτρέπουν την αυτόματη ταξινόμηση των ελιών πριν τα επόμενα στάδια επεξεργασίας τους (εικόνα 1.5). Με την χρήση καμερών υψηλής ταχύτητας και ανάλυσης το σύστημα εντοπίζει το χρώμα και την κατάσταση του καρπού, διαχωρίζοντας τις ελιές σε κατηγορίες ανάλογα με το στάδιο ωρίμανσης και την παρουσία φθορών. Η μέθοδος αυτή βελτιώνει σημαντικά την ποιότητα του ελαιόλαδου λόγω της απομάκρυνσης ακατάλληλων καρπών. Με τον τρόπο αυτό, το ελαιόλαδο μπορεί είτε να διαχωρίζεται είτε όχι σε κατηγορίες ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε παραγωγού[28].



Εικόνα 1.5: Μηχάνημα Αυτόματου διαχωρισμού ελιών (Agrotica 2024, Argyropoulos)

1.5 Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως κύριο σκοπό την μελέτη και την υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης των περιβαλλοντικών συνθηκών σε έναν ελαιώνα. Το σύστημα στοχεύει στην συλλογή, την επεξεργασία και απεικόνιση των δεδομένων θερμοκρασίας και υγρασίας του εδάφους και του αέρα. Σκοπός της εφαρμογής αυτής είναι η ευκολότερη αξιολόγηση των συνθηκών ανάπτυξης των ελαιόδεντρων και κυρίως νέων ριζών και μικρών δέντρων ώστε να διευκολυνθεί η διαδικασία λήψης αποφάσεων από τον παραγωγό.

Η εργασία συνδυάζει τεχνολογικά και γεωπονικά στοιχεία και προτείνει μια χαμηλού κόστους λύση με καλή ενεργειακή απόδοση για την συλλογή δεδομένων καθώς και την διαχείριση τους μέσω cloud. Η συσκευή που αναπτύχθηκε βασίστηκε σε δύο μικροελεγκτές ESP32 σε συνδυασμό με αισθητήρες υγρασίας και θερμοκρασίας εδάφους και αέρα. Τα δεδομένα συλλέγονται από τον βασικό μικροελεγκτή και αποστέλλονται μέσω WiFi στην πλατφόρμα HiveMQ, για την παρακολούθηση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, και στην υπηρεσία Firebase, για την αποθήκευση των πληροφοριών με σκοπό την απεικόνιση στατιστικών και ιστορικού.

Στο πλαίσιο του συστήματος έχει αναπτυχθεί και εφαρμογή για λειτουργικό σύστημα Android μέσω της οποίας γίνεται η απομακρυσμένη προβολή των δεδομένων των αισθητήρων. Παράλληλα, παρέχεται η δυνατότητα ειδοποιήσεων βάσει προκαθορισμένων ορίων των μετρήσεων ή των επερχόμενων καιρικών συνθηκών. Τέλος, διατηρεί πλήρες ιστορικό του μέσου όρου των μετρήσεων για τις προηγούμενες ημέρες με σκοπό την πλήρη εικόνα των κλιματικών μεταβολών στην καλλιέργεια.

1.6 Δομή της εργασίας

Η εργασία αποτελείται από πέντε συνολικά κεφάλαια. Αρχικά στην εισαγωγή παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για την ελαιοκαλλιέργεια καθώς και η τεχνολογία στον πρωτογενή τομέα. Στην συνέχεια, αναλύεται το τεχνολογικό κομμάτι της εργασίας, όπου περιγράφεται το IoT, οι αισθητήρες, ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και οι πλατφόρμες επικοινωνίας που ενσωματώθηκαν. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η υλοποίηση του συστήματος, η σύνδεση του εξοπλισμού, η λειτουργία του λογισμικού αλλά και η ανάπτυξη της εφαρμογής Android. Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει μετρήσεις από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν από το σύστημα καθώς και αξιολόγηση της λειτουργίας του. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας, μαζί με προτάσεις βελτίωσης που προέκυψαν και μελλοντικές ιδέες για την περαιτέρω εξέλιξη του συστήματος.

Κεφάλαιο 2ο: Τεχνολογικό υπόβαθρο και θεωρία

2.1 Η έννοια του Internet of Things

Το Internet of Things, ή αλλιώς Διαδίκτυο των Πραγμάτων αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές εξελίξεις της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια. Εισάγει την δυνατότητα αλληλεπίδρασης και επικοινωνίας μεταξύ φυσικών συσκευών και αντικειμένων μέσω του διαδικτύου. Ο όρος υπάρχει από το 1999 από τον Kevin Ashton περιγράφοντας ένα δίκτυο συσκευών που συλλέγουν και διαμοιράζονται δεδομένα χωρίς την παραμικρή ανθρώπινη παρέμβαση[29]. Το IoT συνδυάζει τεχνολογίες αισθητήρων, μικροελεγκτών, συστημάτων ενσωματωμένου λογισμικού και πλατφόρμες υπολογιστικού νέφους (cloud) ώστε να προσφέρει νέες δυνατότητες αυτοματοποίησης και ευφυούς ανάλυσης δεδομένων[30].

Η λειτουργία του IoT βασίζεται στην επικοινωνία πολλών έξυπνων κόμβων, όπως μικρές συσκευές με υπολογιστική δύναμη και δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας, που έχουν την δυνατότητα να παρακολουθούν το περιβάλλον τους και να στέλνουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Οι κόμβοι μεταξύ τους χρησιμοποιούν τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών για να μοιράζονται τα δεδομένα τους, η πιο διαδεδομένη τεχνολογία είναι το LPWAN (low power wide area network). Επίσης το Sigfox, το LoRa αλλά και το NB-IoT είναι πολύ διαδεδομένα πρωτόκολλα επικοινωνιών καθώς πληρούν τις απαιτήσεις ενός τέτοιου συστήματος, αυξημένη εμβέλεια με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας[31].

Οι εφαρμογές του IoT ενσωματώνονται σε πολλούς τομείς, στις έξυπνες πόλεις όπου χρησιμοποιούνται, για παράδειγμα στην διαχείριση της κυκλοφορίας ή τον έλεγχο ποιότητας του αέρα. Επίσης, εφαρμογές IoT εφαρμόζονται και στην βιομηχανία 4.0 για την παρακολούθηση των μηχανών και την αυτοματοποίηση των διαδικασιών παραγωγής. Στην έξυπνη γεωργία, όπου μέσω συσκευών IoT συλλέγονται σημαντικά περιβαλλοντικά δεδομένα για την υγιή ανάπτυξη των καλλιεργειών[32]. Σύμφωνα με την Statista το 2025 υπάρχουν 19,8 δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές IoT, ο αριθμός αυτός προβλέπεται να αυξηθεί στα 40,6 δισεκατομμύρια συσκευές μέχρι το έτος 2034[33].

Όλα αποδεικνύουν πως η τεχνολογία του IoT εξαπλώνεται ραγδαία, μαζί με τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας έρχονται και ορισμένες προκλήσεις, σχετικά με την ασφάλεια των δεδομένων αλλά και την ενεργειακή αποδοτικότητα των συσκευών. Παρ' όλα αυτά, το IoT αποτελεί βασικό πυλώνα της εξέλιξης του διαδικτύου, ενός δικτύου που θα είναι βασισμένο σε πραγματικά δεδομένα που πηγάζουν από τον φυσικό κόσμο[34].

2.2 Εφαρμογές του IoT στον αγροτικό τομέα

Η ενσωμάτωση του Internet of Things στην αγροτική παραγωγή έχει φέρει μεγάλη αλλαγή στον τρόπο καλλιέργειας και διαχείρισης των αγροτικών πόρων. Ο συνδυασμός WSN (Wireless Sensor Networks) με μικροελεγκτές χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και συστημάτων cloud επιτρέπει την συλλογή και ανάλυση πραγματικών δεδομένων από τις καλλιέργειες. Η εξέλιξη του τεχνολογικού μέρους στον αγροτικό τομέα οδηγεί την απλή παραδοσιακή αγροτική παραγωγή στην νέα γενιά την έξυπνης γεωργίας ή αλλιώς γεωργία ακριβείας. Μέσω του IoT δίνεται η δυνατότητα στους παραγωγούς να γνωρίζουν ανά πάσα στιγμή μετρήσεις για την υγρασία την θερμοκρασία, την

ηλιοφάνεια αλλά και άλλες κρίσιμες παραμέτρους που σχετίζονται με ανάπτυξη των καλλιεργειών τους[35].

Η εφαρμογή του IoT στον αγροτικό τομέα έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών πρακτικών εφαρμογών και λύσεων που βελτιώνουν την αποδοτικότητα και την βιωσιμότητα της γεωργίας. Ένα από τα πιο διαδεδομένα παραδείγματα είναι τα συστήματα έξυπνης άρδευσης, βασισμένα σε αισθητήρες υγρασίας και θερμοκρασίας εδάφους μπορούν να καθορίσουν την συχνότητα και την ποσότητα νερού που χρειάζονται τα φυτά. Το σύστημα βοηθάει στην εξοικονόμηση νερού αποτρέποντας την υπερβολική άρδευση, σε αντίθεση με το παραδοσιακό πότισμα όπου το περιττό νερό απλώς θα απορροφηθεί από το έδαφος χωρίς να ωφεληθούν τα φυτά[36].

Παράλληλα υπάρχουν τα συστήματα που βασίζονται στ IoT και είναι σχεδιασμένα να παρακολουθούν το μικροκλίμα της καλλιέργειας. Γίνεται συνεχής μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας με στόχο την βελτιστοποίηση της παραγωγής. Συστήματα σαν αυτά αποτελεί και η αναπτυσσόμενη συσκευή στην παρούσα εργασία, ενσωματώνει αισθητήρες, μικροελεγκτές, ασύρματα πρωτόκολλα επικοινωνίας και cloud πλατφόρμες. Παρόμοιες εφαρμογές αναπτύχθηκαν με σκοπό να αποδείξουν την σημασία της μικροκλιματικής διαφοροποίησης[37]. Τα δεδομένα από αυτά τα συστήματα μπορούν να αναλυθούν μέσω Big Data και την τεχνητής νοημοσύνης με σκοπό την δημιουργία μοντέλων που θα λαμβάνουν αυτόματες αποφάσεις και θα προβλέπουν μελλοντικές κινήσεις[38].

Μέσω των συλλεγόμενων δεδομένων είναι επίσης δυνατή η πρόβλεψη της απόδοσης των καλλιεργειών αλλά και η πρόβλεψη ασθενειών. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν ως εργαλεία καθοδήγησης αποφάσεων για τους αγρότες και τους παραγωγούς, παρέχουν προβλέψεις σε πραγματικό χρόνο και επιτρέπουν πιο στοχευόμενες αποφάσεις[39].

Ακόμα ένα παράδειγμα εφαρμογής του IoT έρχεται με τον συνδυασμό των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN) με τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs). Με την χρήση καμερών και αισθητήρων τα drone είναι ικανά να φωτογραφίζουν και να εντοπίζουν ανωμαλίες και προβλήματα, όπως ασθένειες μέσα στα φυτά. Παράλληλα μπορούν να διαθέτουν μικρές ποσότητες λιπάσματος ή ζιζανιοκτόνων σε υγρή μορφή με σκοπό την εφαρμογή τους σε σημεία όπου κρίνεται απαραίτητο[40].

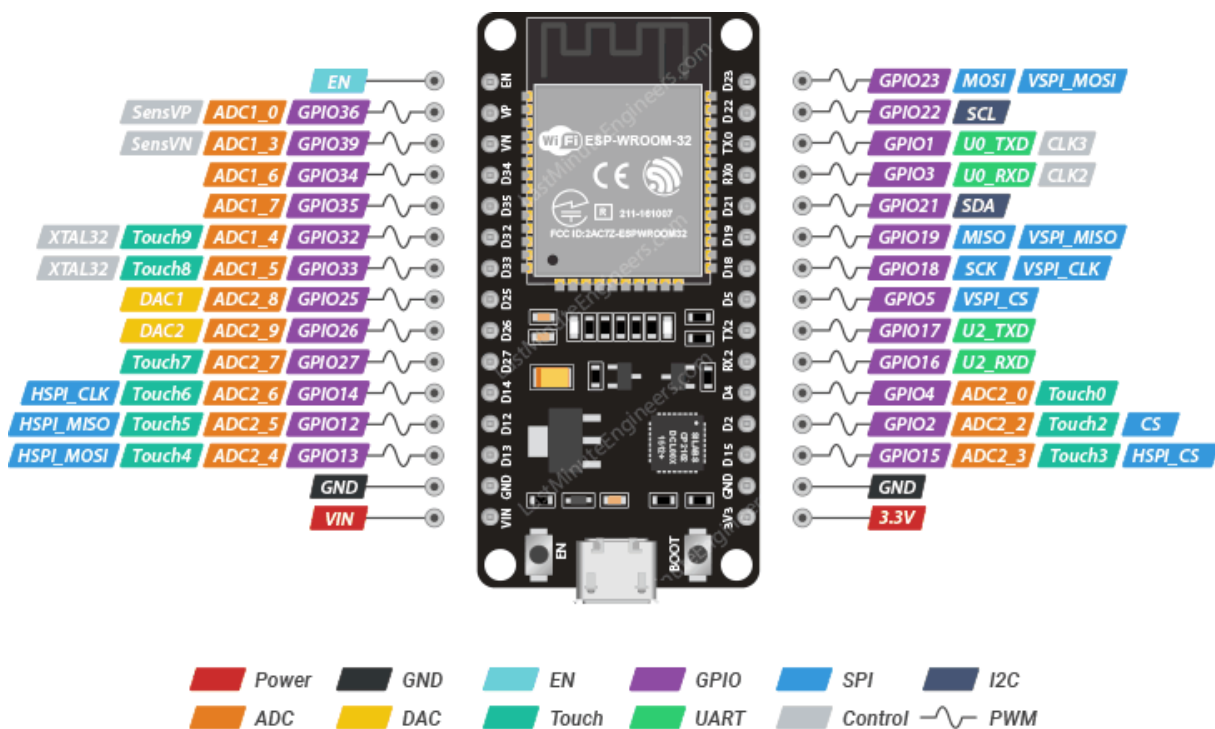
Πέρα από την παρακολούθηση των καλλιεργειών τα συστήματα IoT χρησιμοποιούνται και σε άλλους τομείς που σχετίζονται με τον πρωτογενή τομέα. Η προγνωστική συντήρηση είναι μια στρατηγική διαχείρισης των μηχανημάτων με σκοπό την σωστή λειτουργία αυτών. Στον αγροτικό τομέα όπου τα μηχανήματα λειτουργούν σε δύσκολες και μεταβαλλόμενες καταστάσεις η συντήρηση με βάση την πραγματική τους κατάσταση επιτρέπει την πρόληψη φθορών που μπορούν να οδηγήσουν σε δαπανηρές βλάβες. Τέτοιου είδους συστήματα αξιοποιούν αισθητήρες για να αναλύουν τις δονήσεις του μηχανήματος, τις θερμοκρασίες λειτουργίας, την κατάσταση της λίπανσης αλλά και του ήχου λειτουργίας με σκοπό τον εντοπισμό αστοχιών στα μηχανικά μέρη. Η αναλύσεις των δεδομένων γίνονται μέσω μικροελεγκτών, όπως σε όλα τα κοινά IoT συστήματα, ενώ μέσω αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης γίνεται η πρόβλεψη και η λήψη αποφάσεων. Η εφαρμογή της predictive Maintenance μειώνει σημαντικά τις απρογραμμάτιστες διακοπές λειτουργίας των μηχανημάτων, αυξάνει την αξιοπιστία και την διαθεσιμότητα του εξοπλισμού αλλά και μειώνει το συνολικό κόστος των συντηρήσεων[41].

2.3 Ο μικροελεγκτής ESP32 - Χαρακτηριστικά και λειτουργία

Ο μικροελεγκτής ESP32 αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες πλατφόρμες για ανάπτυξη εφαρμογών IoT, λόγω του συνδυασμού υψηλών επιδόσεων, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, μικρού κόστους και πολλών δυνατοτήτων ασύρματης επικοινωνίας. Έχει αναπτυχθεί από την εταιρία Espressif Systems και έχει καθιερωθεί ως βασικό εργαλείο για ευφυή συστήματα που απαιτούν συλλογή δεδομένων, απομακρυσμένο έλεγχο και επικοινωνία με πλατφόρμες cloud. Ο τρόπος που έχει αναπτυχθεί το ESP32 ώστε να προσφέρει μεγάλη υπολογιστική δύναμη, χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και ευελιξία το καθιστά κατάλληλο για απομακρυσμένες εφαρμογές παρακολούθησης και αυτοματισμού[42].

Το ESP32(εικόνα 2.1) διαθέτει επεξεργαστή Tensilica Xtensa LX6 με δύο πυρήνες, λειτουργεί στα 240MHz και παρουσιάζει πολύ αυξημένες αποδόσεις συγκριτικά με άλλους της κατηγορίας του. Διαθέτει ενσωματωμένη μνήμη για την αποθήκευση δεδομένων και αρχείων λογισμικού καθώς προσφέρει και την δυνατότητα εξωτερικής μνήμης. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του είναι οι δυνατότητες συνδεσιμότητας που διαθέτει. Ενσωματώνει πρωτόκολλα WiFi 802.11 b/g/n καθώς και Bluetooth 4.2, Bluetooth Low Energy(BLE) και ESP-NOW επιτρέποντας την επικοινωνία τόσο με τοπικά δίκτυα όσο και με κινητές συσκευές.

Επιπλέον υποστηρίζει πρωτόκολλα επικοινωνίας SPI και I2C όπου χρησιμοποιούνται για την γρήγορη και αποδοτική μεταφορά δεδομένων, το UART που επιτρέπει την σειριακή επικοινωνία με τον μικροελεγκτή. Επίσης, το PWM, ADC και DAC χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την μετατροπή αναλογικών σημάτων από αισθητήρες και ενεργοποιητές[43].



ESP32 Dev. Board Pinout

Last Minute ENGINEERS.com

Εικόνα 2.1: Διάταξη ακροδεκτών ESP32

Το ESP32 μπορεί να τροφοδοτηθεί από πηγή 5V μέσω του ενσωματωμένου USB-C που διαθέτει πάνω η πλακέτα ή από τον ακροδέκτη VIN μέσω εξωτερικής πηγής. Επίσης μπορεί να τροφοδοτηθεί με τάση 3.3V στον ακροδέκτη 3v3. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στον τρόπο τροφοδοσίας καθώς ο ακροδέκτης 3v3 δεν καλύπτεται από τον ενσωματωμένο ρυθμιστή τάσης όπως το VIN, για αυτό τον λόγο η τάση εκεί πρέπει να είναι σταθερά 3.3V. Σε εφαρμογές IoT όπου γίνεται συχνά η χρήση σε απομακρυσμένα σημεία είναι χρήσιμη η τροφοδοσία από εξωτερικές μπαταρίες, συχνά χρησιμοποιούμενη μπαταρία είναι η 18650 στα 3.7V όπου μπορεί να συνδεθεί απευθείας στο VIN ώστε ο ρυθμιστής τάσης να την κάνει 3,3V[43].

Πίνακας 2.1 : Τρόποι τροφοδοσίας και λειτουργία ακροδεκτών

Τύπος τροφοδοσίας	Pin τροφοδοσίας	Παρατήρηση
USB-C	5V via cable	3v3 pin is output
External 5V	5V via VIN pin	3v3 pin is output
External 3.3V	3.3V via 3v3 pin	3v3 pin is input
18650 battery	Input via VIN only	3v3 pin is output

Από την πλευρά της ενεργειακής αυτονομίας και κατανάλωσης το ESP32 μπορεί να απενεργοποιεί λειτουργίες όπως το WiFi, το Bluetooth ή άλλα εξαρτήματα όταν δεν είναι σε χρήση ώστε να εξοικονομεί ενέργεια. Επίσης διαθέτει πέντε καταστάσεις λειτουργίας, Active όπου λειτουργεί κανονικά, Modem sleep όπου είναι απενεργοποιημένα το WiFi/Bluetooth, το Light-sleep mode που βάζει σε αναστολή τον επεξεργαστή αλλά όχι τα περιφερειακά στα pins, το Deep-sleep mode όπου μόνο η μνήμη είναι ενεργή για να αποθηκεύει δεδομένα λειτουργίας και τέλος το Hibernation mode όπου είναι όλη η συσκευή απενεργοποιημένη και ενεργοποιείται με χρονόμετρο από το RTC (Real Time Clock)[44].

Τέλος ο προγραμματισμός του ESP32 είναι ιδιαίτερα ευέλικτος και μπορεί να πραγματοποιηθεί από αρκετά περιβάλλοντα ανάπτυξης. Το πιο διαδεδομένο είναι το Arduino IDE όπου επιτρέπει την χρήση γλωσσών υψηλού επιπέδου καθώς και έτοιμες βιβλιοθήκες καθιστώντας έτσι τον προγραμματισμό πιο εύκολο. Επιπλέον υπάρχουν επεκτάσεις σε περιβάλλοντα ανάπτυξης κώδικα μέσα από τις οποίες μπορείς να προγραμματίσεις την πλακέτα. Στα πλαίσια της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το VS Code με την επέκταση PlatformIO όπου είναι ένα περιβάλλον ανάπτυξης για ενσωματωμένα συστήματα. Η επικοινωνία για τον προγραμματισμό με τον υπολογιστή γίνεται θύρας USB, μέσω του ενσωματωμένου μετατροπέα USB-UART γίνεται η φόρτωση του προγράμματος καθώς και η απεικόνιση των δεδομένων στο serial monitor[45].

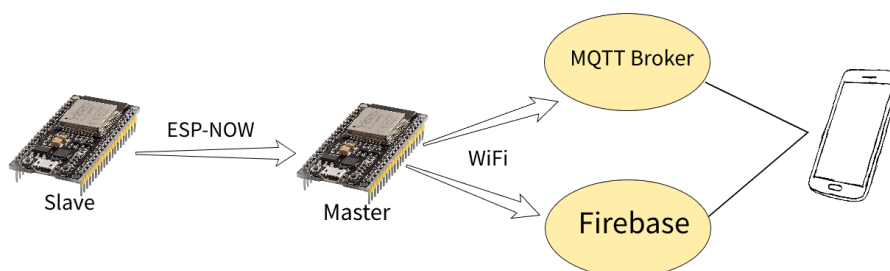
2.4 Πλατφόρμες επικοινωνίας και αποθήκευσης δεδομένων

Η αποτελεσματική λειτουργία ενός IoT συστήματος βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις τεχνολογίες επικοινωνίας που ενσωματώνει καθώς και στις πλατφόρμες αποθήκευσης και διαχείρισης των δεδομένων που συλλέγονται. Σε εφαρμογές όπως αυτή του αγροτικού τομέα που γίνεται συνεχής παρακολούθηση κλιματικών μεταβολών και συλλογή δεδομένων από αισθητήρες είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός αξιόπιστου μηχανισμού ο οποίος θα μεταδίδει τα δεδομένα από τα απομακρυσμένα σημεία μέτρησης σε ένα κεντρικό κόμβο ή μια cloud υπηρεσία. Οι πλατφόρμες αυτές επιτρέπουν την συνεχή ροή δεδομένων, την ασφαλή και δυναμική αποθήκευση του καθώς και την δυνατότητα προβολής και επεξεργασίας σε πραγματικό χρόνο.

Στα σύγχρονα συστήματα συχνά χρησιμοποιείται ένα συνδυασμός από πρωτόκολλα επικοινωνίας με σκοπό να βελτιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας, η εμβέλεια, η ταχύτητα της μετάδοσης και η αξιοπιστία του συστήματος. Για παράδειγμα σε μια τοπική ασύρματη επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων και κόμβων συλλογής δεδομένων χρησιμοποιείται ένα ελαφρύ πρωτόκολλο όπως το ESP-NOW, το οποίο προσφέρει γρήγορη και ενεργειακά αποδοτική μεταφορά μικρών πακέτων δεδομένων ανάμεσα σε κοντινά σημεία[46]. Παράλληλα η αποστολή δεδομένων από τους κεντρικούς κόμβους προς τις cloud υπηρεσίες γίνεται με LTE ή συχνά με WiFi, επιλογές που προσφέρουν υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης και αυξημένη εμβέλεια[47].

Για την αποθήκευση και την διαχείριση των δεδομένων αξιοποιούνται πλατφόρμες cloud, όπου επιτρέπουν εύκολη πρόσβαση, επεκτασιμότητα καθώς και ασφαλή αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων. Υπηρεσίες όπως το Firebase της Google παρέχουν δυνατότητες δυναμικής δημιουργίας βάσεων δεδομένων, ο κεντρικός κόμβος αποστέλλει πακέτα δεδομένων στην υπηρεσία και δημιουργείται νέο αρχείο για τις νέες καταχωρήσεις[48]. Παράλληλα η χρήση πρωτοκόλλων ανταλλαγής μηνυμάτων, όπως το MQTT(Message Queuing Telemetry Transport) επιτρέπει την αποδοτική και αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων μεταξύ του Master κόμβου, του cloud και των τελικών συσκευών[49].

Επιγραμματικά, η λειτουργία ενός IoT συστήματος, όπως και αυτό της παρούσας εργασίας, βασίζεται σε πολλές τεχνολογίες επικοινωνιών ώστε να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία του συστήματος, η ακρίβεια στην μεταφορά των δεδομένων και των μετρήσεων και η άμεση λήψη αποφάσεων σε κρίσιμες καταστάσεις. Συχνό σχήμα σε μια εφαρμογή IoT χρησιμοποιεί ESP-NOW για την επικοινωνία των κόμβων (ESP) προς τον κεντρικό κόμβο, στην συνέχεια με την χρήση WiFi αποστέλλονται τα δεδομένα στον Firebase και στην υπηρεσία MQTT (εικόνα 2.2) . Τέλος, οι τελικές συσκευές μπορούν να λάβουν τα δεδομένα από το cloud με σκοπό την προβολή, την επεξεργασία και την ανάλυση των μετρήσεων.



Εικόνα 2.2: Απλή αναπαράσταση επικοινωνιών σε σύστημα IoT (www.vecteezy.com, www.az-delivery.de)

2.4.1 WiFi

Το WiFi είναι μια τεχνολογία αρκετά διαδεδομένη στις εφαρμογές IoT λόγω της σταθερότητας που προσφέρει στην σύνδεση, τον υψηλό ρυθμό μετάδοσης τους σήματος και την συμβατότητα με πολλούς μικροελεγκτές. Λειτουργεί στην ζώνη των 2.4GHz και 5GHz και μπορεί να μεταδώσει δεδομένα με μεγάλους ρυθμούς μέχρι και 100 μέτρα απόσταση[50]. Παρά τις ευκολίες που προσφέρει το WiFi στην συνδεσιμότητα είναι μια ενεργειακά μη βέλτιστη επιλογή, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου οι συσκευές πρέπει να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα βασιζόμενες σε περιορισμένη παροχή ενέργειας. Σε πειραματικό και ερευνητικό επίπεδο χρησιμοποιείται πολύ το WiFi σε IoT εφαρμογές όπου και υπάρχει σταθερή πρόσβαση σε δίκτυο. Μελέτες δείχνουν επίσης πως προσφέρει υψηλή αξιοπιστία και μικρή καθυστέρηση στην μετάδοση σε τοπικά δίκτυα[51].

2.4.2 ESP-NOW

Το ESP-NOW είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας που αναπτύχθηκε από την Espressif για τις πλατφόρμες ESP8266 και ESP32. Επιτρέπει την απευθείας επικοινωνία μεταξύ των συσκευών χωρίς την ανάγκη ύπαρξης router ή κλασικής WiFi σύνδεσης. Το πρωτόκολλο επιτρέπει πολύ μικρή καθυστέρηση και σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με το WiFi. Για αυτόν τον λόγο ενσωματώνεται συχνά σε συστήματα IoT που μεταδίδουν μικρά πακέτα δεδομένων από αισθητήρες υγρασίας ή θερμοκρασίας. Για να γίνει η μετάδοση της πληροφορίας από το ένα ESP σε ένα άλλο απαιτείται η MAC διεύθυνση του παραλήπτη. Το ESP-NOW είναι ιδανικό για low-power IoT δίκτυα και μπορεί να προσφέρει σταθερή επικοινωνία σε αποστάσεις των 190 μέτρων σε συνθήκες ανοιχτού περιβάλλοντος, όπως για παράδειγμα σε έναν ελαιώνα[52].

2.4.3 MQTT

Το MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) αποτελεί το πιο διαδεδομένο πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων στο IoT. Η αρχιτεκτονική του ακολουθεί την μορφή Publisher/Subscriber, οι κόμβοι-αισθητήρες δημοσιεύουν τα πακέτα δεδομένων με τις μετρήσεις σε topics, οι συσκευές όπου γίνεται η απεικόνιση των δεδομένων κάνουν συνδρομή στα topic με σκοπό να λάβουν τις πληροφορίες μέσω του broker. Αναπτύχθηκε ειδικά για συσκευές χαμηλής ισχύος και για ιδιαίτερα ασταθή δίκτυα, προσφέροντας χαμηλή επιβάρυνση και πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας. Παράδειγμα MQTT υπηρεσίας είναι το HiveMQ, όπου χρησιμοποιείται στην υλοποίηση της εργασίας. Μέσα από την υπηρεσία δημιουργούνται μοναδικοί κωδικοί ανάλογα με την ιδιότητα, με σκοπό την προστασία των δεδομένων από μη εξουσιοδοτημένες συσκευές[53].

2.4.4 Firebase

Το Firebase είναι μια πλατφόρμα cloud που έχει αναπτυχθεί από την Google και παρέχει υπηρεσίες αποθήκευσης και διαχείρισης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Το Firebase Database είναι μια cloud βάση όπου αποθηκεύει τα δεδομένα σε μορφή JSON και υποστηρίζει άμεσο συγχρονισμό με όλες τις συνδεδεμένες συσκευές. Σε αντίθεση με την παραδοσιακή SQL λογική, λειτουργεί με event driven μηχανισμό, όπου κάθε αλλαγή στα δεδομένα προκαλεί ενημέρωση της βάσης σε πραγματικό χρόνο χωρίς να χρειάζεται κώδικα από την μεριά του server. Αποτελεί ιδανική λύση για IoT συστήματα καθώς προσφέρει εύκολη αποθήκευση αρχείων από τους αισθητήρες, υποστηρίζει άμεση ενημέρωση των δεδομένων καθώς και παρέχει ασφάλεια στα δεδομένα. Επιπλέον η πλατφόρμα προσφέρει και Cloud Storage, το οποίο επιτρέπει την αποθήκευση μεγάλων αρχείων, όπως εικόνες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές γεωργίας ακριβείας. Τέλος, το Firebase προσφέρει μια ολοκληρωμένη και εύκολη λύση για την αποθήκευση και την διαχείριση των δεδομένων[48].

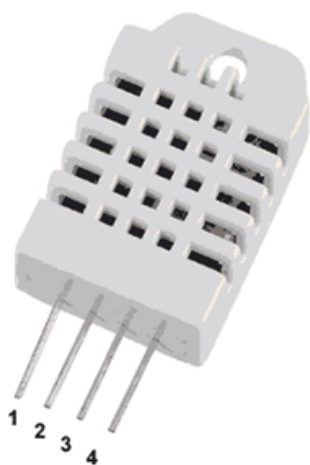
2.5 Αισθητήρες περιβαλλοντικών μετρήσεων

Στο παρόν σύστημα χρησιμοποιούνται διάφοροι αισθητήρες περιβαλλοντικών μετρήσεων για την συλλογή κρίσιμων δεδομένων που επηρεάζουν την καλλιέργεια των ελαιόδεντρων. Οι αισθητήρες αυτοί αποτελούν το βασικό μέσο αλληλεπίδρασης του μικροελεγκτή με το φυσικό περιβάλλον παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο τα οποία αποστέλλονται στο cloud για αποθήκευση και ανάλυση. Κάθε ένας από τους αισθητήρες εξυπηρετεί διαφορετικό τύπο μέτρησης, όπως θερμοκρασία και υγρασία αέρα αλλά και θερμοκρασία και υγρασία εδάφους. Η επιλογή τους έγινε με βάση την αξιοπιστία, το κόστος, την κατανάλωση ενέργειας καθώς και με την συμβατότητα με τον μικροελεγκτή ESP32. Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά και η λειτουργία των αισθητήρων που επιλέχθηκαν.

2.5.1 DHT22

Ο αισθητήρας DHT22 είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας σε εφαρμογές IoT, λόγω του χαμηλού κόστους, της αξιοπιστίας και της ψηφιακής εξόδου. Είναι ένας αισθητήρας πλήρως βαθμονομημένος από την κατασκευή του και παρέχει τα δεδομένα ψηφιακά μέσω ενός μόνο data pin προσφέροντας έτσι απλότητα στην ενσωμάτωση στον ESP32[54].

Το εύρος μέτρησης του DHT22 για την θερμοκρασία κυμαίνεται από -40°C έως $+80^{\circ}\text{C}$ με ακρίβεια μικρότερη από $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ και ευαισθησία μεταβολής θερμοκρασίας 0.1°C . Αντίστοιχα, το εύρος μέτρησης για την υγρασία είναι 0-100% RH (Relative Humidity) με ακρίβεια μέτρησης $\pm 2\%$ RH και ευαισθησία μεταβολής 0.1% RH. Ο αισθητήρας έχει ρυθμό ανανέωσης των μετρήσεων κάθε 2 δευτερόλεπτα, ενώ επίσης παρουσιάζει σταθερότητα μακροπρόθεσμα και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, 1-1,5 mA σε κατάσταση μέτρησης ενώ σε αναμονή 40-50 μA (Πίνακας 2.2). Η τροφοδοσία του πραγματοποιείται από τον μικροελεγκτή στο pin 1 με σταθερή τάση 3.3V, ενώ παράλληλα υποστηρίζει τάση τροφοδοσίας από 3,3V έως 6V (Εικόνα 2.3)[55].



DHT22 pins	
1	VCC
2	DATA
3	NC
4	GND

Εικόνα 2.3: DHT22 και Pin layout (www.instructables.com)

Το Pin 1 χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του αισθητήρα, το Pin 2 μεταφέρει τα δεδομένα υγρασίας και θερμοκρασίας στον μικροελεγκτή, το Pin 3 δεν χρησιμοποιείται και τέλος το Pin 4 είναι η γείωση του αισθητήρα.

Πίνακας 2.2: Τεχνικές προδιαγραφές DHT22[49]

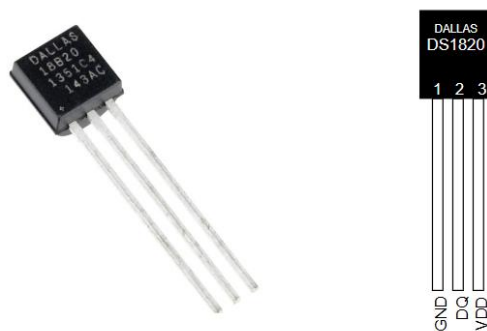
Model	DHT22
Power supply	3.3-6V DC
Output signal	digital signal via single-bus
Sensing element	Polymer capacitor
Operating range	humidity 0-100%RH; temperature -40~80Celsius
Accuracy	humidity +-2%RH(Max +-5%RH); temperature <+-0.5Celsius
Resolution or sensitivity	humidity 0.1%RH; temperature 0.1Celsius
Repeatability	humidity +-1%RH; temperature +-0.2Celsius
Humidity hysteresis	+/-0.3%RH
Long-term Stability	+/-0.5%RH/year
Sensing period	Average: 2s
Interchangeability	fully interchangeable
Dimensions	small size 14*18*5.5mm; big size 22*28*5mm

2.5.2 DS18B20

Ο DS18B20 είναι ένας ψηφιακός αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας υψηλής ακρίβειας και είναι κατάλληλος για εφαρμογές IoT με απαιτήσεις για αξιόπιστες και σταθερές μετρήσεις. Βασίζεται στο πρωτόκολλο 1-Wire που σημαίνει πως χρησιμοποιεί ένα Pin για να μεταφέρει τα δεδομένα στον μικροελεγκτή (εικόνα 2.4). Ο κάθε αισθητήρας έχει έναν μοναδικό κωδικό με αποτέλεσμα μέσω μιας σύνδεσης σε ένα Pin του μικροελεγκτή να μπορούν να συνδεθούν περισσότεροι από ένας DS18B20.

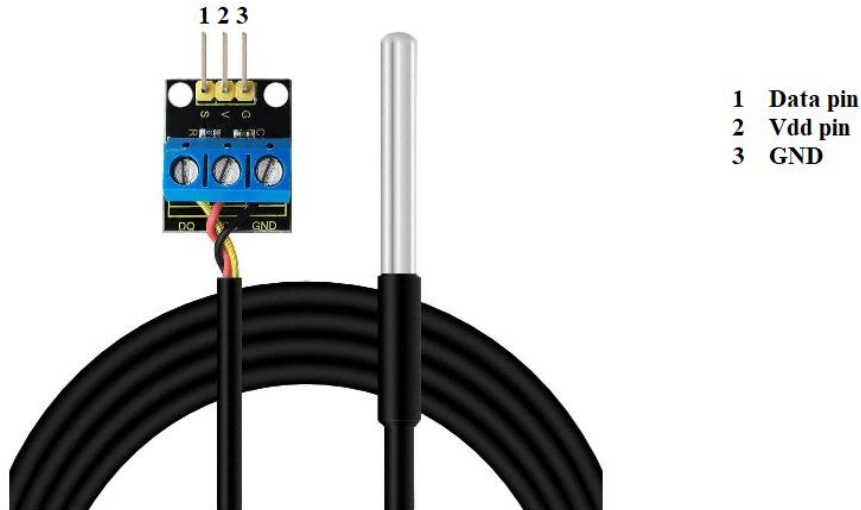
Το εύρος των μετρήσεων θερμοκρασίας κυμαίνεται από τους -55°C έως τους $+125^{\circ}\text{C}$ με την ακρίβεια στις μετρήσεις να είναι $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ όταν οι τιμές είναι ανάμεσα στους -10°C έως $+85^{\circ}\text{C}$. Η ευαισθησία στις μεταβολές της θερμοκρασίας είναι προγραμματιζόμενη από 9 έως 12 bits, $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ στην χαμηλότερη ρύθμιση και $\pm 0.0625^{\circ}\text{C}$ στην μεγαλύτερη. Ανάλογα με την ρύθμιση ευαισθησίας αλλάζει και χρόνος μετατροπής της θερμοκρασίας από μια αναλογική τιμή όπως μετριέται στην ψηφιακή μορφή που στέλνεται στον μικροελεγκτή, 93ms για τα 9 bits και 750ms για τα 12 bits. Αυτή η λειτουργία τον καθιστά ιδανικό για διάφορων ειδών εφαρμογές, ανάλογα με τις απαιτήσεις ακριβείας των μετρήσεων.

Η τάση λειτουργίας του αισθητήρα επιτρέπει τροφοδοσία από 3.0V μέχρι και 5.5V, καθιστώντας τον ιδανικό για εφαρμογές σε συνδυασμό με μικροελεγκτές όπως ο ESP32. Η κατανάλωση είναι πολύ χαμηλή, 1-1,5mA κατά την διάρκεια μέτρησης και μετατροπής ενώ σε κατάσταση αναμονής δεν καταναλώνει ενέργεια[56].



Εικόνα 2.4: DS18B20 και αρίθμηση των Pins

Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε ο αδιάβροχος αισθητήρας DS18B20 σε συνδυασμό με ένα module, όπως στην εικόνα 2.5, το οποίο ενσωματώνει μια αντίσταση pull-up των 4,7kΩ μεταξύ του Pin δεδομένων (DQ) και της Vdd(Εικόνα 2.4). Αυτό γίνεται με σκοπό την μείωση του θορύβου στο κανάλι και την σωστή λειτουργία του 1-Wire, η τάση παραμένει HIGH μέχρι την στιγμή που θα μεταφέρει δεδομένα ο αισθητήρας που γίνεται LOW[57].

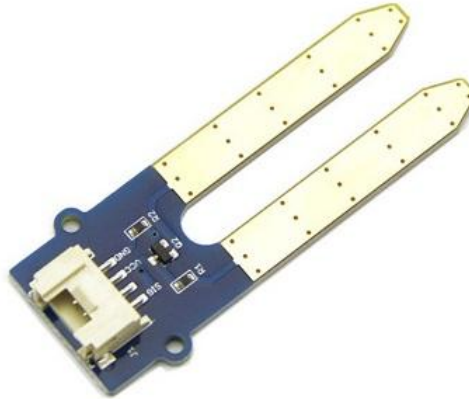


Εικόνα 2.5: DS18B20 με module (www.why.gr)

2.5.3 Soil Moisture Sensor

Ο αισθητήρας υγρασίας εδάφους που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της εργασίας είναι ο Grove Moisture Sensor της Seeed Studio, είναι ένας αρκετά διαδεδομένος αισθητήρας υγρασίας εδάφους σε μικρά IoT συστήματα λόγω του χαμηλού κόστους και της απλής λειτουργίας του. Ο αισθητήρας βασίζεται στην μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, με την αύξηση της υγρασίας στο έδαφος αυξάνεται και η αγωγιμότητα ανάμεσα στα δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια (Εικόνα 2.6) με αποτέλεσμα να δίνει μεγαλύτερη αναλογική τιμή στην έξοδο. Οι τυπικές τιμές λειτουργίας είναι το 0 όταν ο αισθητήρας βρίσκεται στον αέρα, 0-300 για ξηρό έδαφος, 300-700 για σχετικά υγρό έδαφος και τέλος τιμές κοντά στις 950 και πάνω όταν ο αισθητήρας βρίσκεται μέσα σε νερό. Είναι ικανός να αποδώσει μια αξιόπιστη εικόνα για την κατάσταση υγρασίας του εδάφους χωρίς όμως να δίνει απευθείας ποσοστό από μόνος του[58].

Για να μπορέσει ο αισθητήρας να αποδώσει τιμές σε μορφή ποσοστού και όχι απλώς μια αναλογική τιμή είναι απαραίτητη η διαδικασία βαθμονόμησης με βάση τις πραγματικές τιμές που δίνουν οι μετρήσεις. Στο πλαίσιο της εργασίας πραγματοποιήθηκε μια απλή βαθμονόμηση δύο σημείων, μετρήθηκε η έξοδος του αισθητήρα με τους ακροδέκτες στον αέρα με τιμή 0 καθώς και η έξοδος του όταν οι ακροδέκτες ήταν βυθισμένοι σε νερό με τιμή 2600. Με βάση αυτά τα δύο σημεία εφαρμόστηκε γραμμική παρεμβολή ώστε οι τιμές να μετατρέπονται στο εύρος 0-100% αντίστοιχα. Παρότι η μέθοδος αυτή είναι λειτουργική και εφαρμόζεται σε πολλά συστήματα χαμηλού κόστους, δεν αποτυπώνεται με ακρίβεια η σχέση αγωγιμότητας και υγρασίας. Για καλύτερη ακρίβεια απαιτείται πολυωνυμική βαθμονόμηση με πολλαπλά σημεία ώστε να αποδίδεται με ακρίβεια η μέτρηση της υγρασίας. Η γραμμική βαθμονόμηση όμως, για τον σκοπό της εργασίας, κρίνεται επαρκής καθώς ο στόχος είναι η παρακολούθηση των σχετικών τιμών και μεταβολών της υγρασίας και όχι η απόλυτη ακριβής μέτρηση[59],[60].











Εικόνα 2.6: Grove Soil Moisture Sensor

Παρά την εφαρμογή απλής γραμμικής βαθμονόμησης που ακολουθήθηκε στην υλοποίηση της εργασίας, αξίζει να επισημάνουμε την διαδικασία της πολυωνυμικής βαθμονόμησης για εφαρμογή σε συστήματα με μεγαλύτερες απαιτήσεις ακρίβειας. Αρχικά γίνονται επαναλαμβανόμενες μετρήσεις με τον αισθητήρα σε διαφορετικές καταστάσεις, στον αέρα, σε ξηρό χώμα, σε μέτρια νωπό χώμα, σε υγρό χώμα και μέσα σε νερό, με σκοπό να καλυφθεί μεγάλο εύρος τιμών σε όλο το μήκος της λειτουργικής περιοχής. Για κάθε επίπεδο μέτρησης δημιουργείται ένα ζεύγος δεδομένων ανάμεσα στην τιμή αισθητήρα και την πραγματική τιμή, από ένα αξιόπιστο όργανο αναφοράς, στα σημεία αυτά εφαρμόζεται μαθηματική εξίσωση που περιγράφει την μη γραμμική καμπύλη του αισθητήρα. Η εφαρμογή πολυωνυμικής εξίσωσης δεύτερου βαθμού έδειξε πως αυτό το μοντέλο μπορεί να αποτυπώσει με μεγάλη ακρίβεια την πραγματική συμπεριφορά του αισθητήρα σε όλο το εύρος λειτουργίας του[61].

Τέλος, ο αισθητήρας καλύπτει επαρκώς τις πειραματικές ανάγκες της εργασίας καθώς υποστηρίζει εύκολη συνδεσιμότητα με τον μικροελεγκτή και τροφοδοτείται με τάση από 3.3-5V απευθείας από το ESP32. Η κατανάλωση ενέργειας είναι μικρή και κυμαίνεται γύρω στα 35mA[62]. Ο τρόπος κατασκευής και λειτουργίας του έχουν κάποια μειονεκτήματα που τον καθιστούν ιδανικό μόνο για βραχυχρόνια χρήση καθώς διαβρώνεται μέσω της ηλεκτρόλυσης[60].

2.6 Πίνακας Εξαρτημάτων

	<p>2x ESP32-ZY</p>
	<p>Samsung 18650 3,7V battery</p>
	<p>Optum Solderless breadboard</p>
	<p>Optum Lithium Battery Charging Module</p>
	<p>Θήκη μπαταρίας 18650</p>
	<p>Keystudio DS18650</p>
	<p>Seed Αισθητήρας Υγρασίας Εδάφους</p>
	<p>Haitronic DHT22</p>

Κεφάλαιο 3ο: Υλοποίηση Συστήματος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η υλοποίηση του συστήματος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας. Περιγράφεται η αρχιτεκτονική του συστήματος, η σχεδίαση και η σύνδεση του hardware, η λειτουργία του λογισμικού των μικροελεγκτών καθώς και ο τρόπος επικοινωνίας με τις πλατφόρμες HiveMQ και Firebase Database. Επιπλέον παρουσιάζεται και αναλύεται η ανάπτυξη της εφαρμογής Android στην οποία πραγματοποιείται η απεικόνιση των δεδομένων, μαζί με διαγράμματα ροών των δεδομένων. Τέλος, παρουσιάζεται μια σειρά από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν κατά την ανάπτυξη του συστήματος μαζί με παρατηρήσεις και προβλήματα που προέκυψαν σε όλη την πορεία της ανάπτυξης.

3.1 Αρχιτεκτονική του Συστήματος

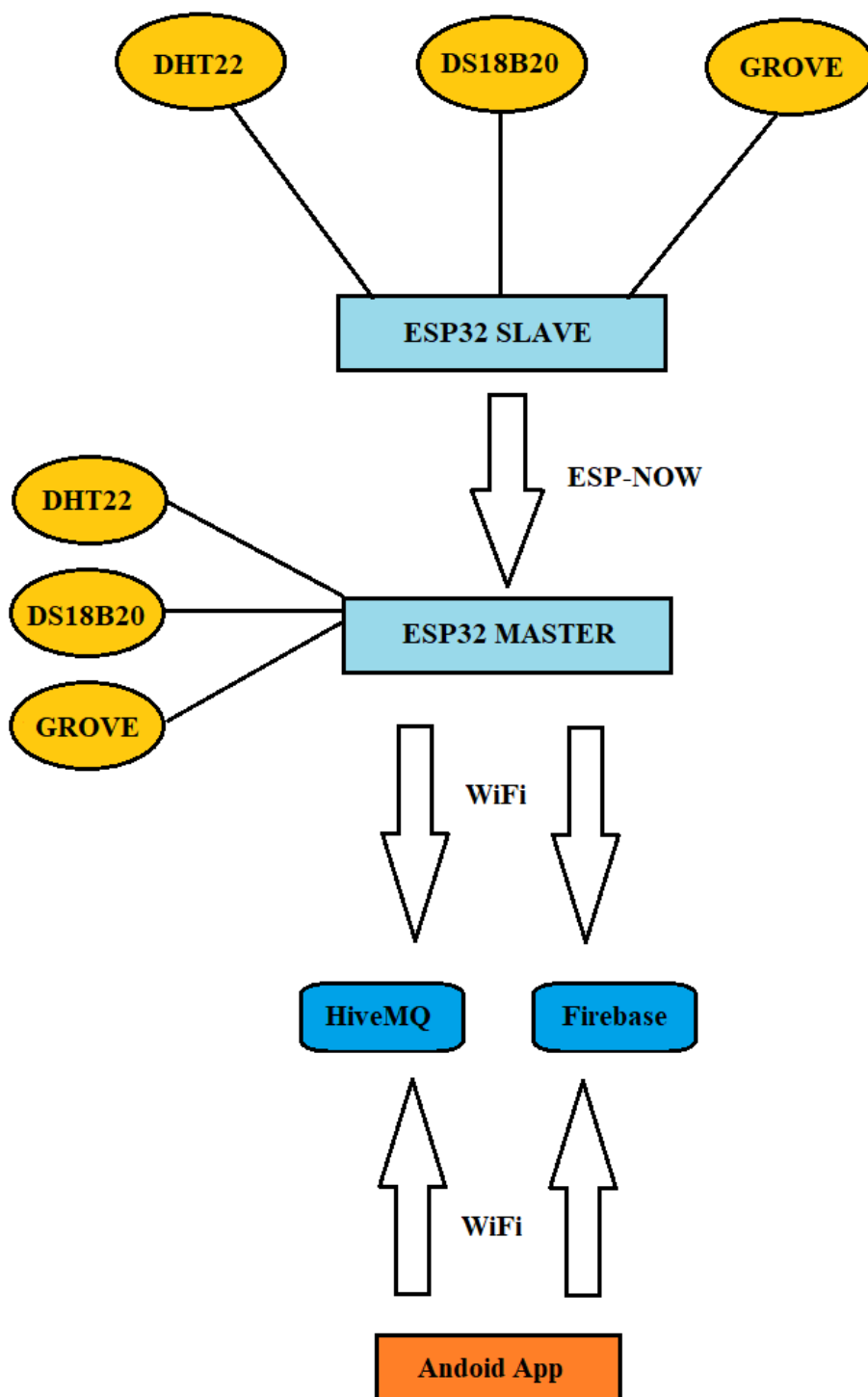
Η αρχιτεκτονική του συστήματος βασίζεται στην συνεργασία δύο μικροελεγκτών ESP32 οι οποίοι λειτουργούν ως δύο ξεχωριστοί κόμβοι συλλογής και μετάδοσης δεδομένων. Ο σχεδιασμός βασίζεται στην λογική Master/Slave. όπου ο κόμβος slave έχει την ιδιότητα να συλλέγει μετρήσεις ενώ ο κεντρικός κόμβος master συγκεντρώνει τα δεδομένα από τον slave και μαζί με τις δικές του μετρήσεις αναλαμβάνει την μετάδοση τους στο cloud. Με αυτόν τον τρόπο δομείται ένα σύστημα που μπορεί να λειτουργεί σε πραγματικές συνθήκες ελαιώνα χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση, με επιπλέον δυνατότητες επέκτασης σε μεγαλύτερο δίκτυο αισθητήρων.

Για το πλαίσιο της εργασίας και της υλοποίησης του συστήματος μόνο ο Master μετράει πραγματικές περιβαλλοντικές τιμές από αισθητήρες, στον κόμβο Slave δεν έχουν τοποθετηθεί πραγματικοί αισθητήρες, οι τιμές που παράγει και αποστέλλει στον Master είναι τυχαίες τιμές. Υπάρχει η δυνατότητα, με μικρές αλλαγές στον κώδικα του μικροελεγκτή, να συνδεθούν αισθητήρες και να λειτουργεί με κανονικές μετρήσεις. Για την ευκολία γραφής της υπόλοιπης εργασίας θα θεωρείται πως ο Slave συλλέγει και αποστέλλει μετρήσεις.

Στο χαμηλότερο επίπεδο το σύστημα περιλαμβάνει την άμεση συλλογή των δεδομένων από τους αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας εδάφους και αέρα. Οι αισθητήρες είναι συνδεδεμένοι στους δύο μικροελεγκτές, με τον Slave να συλλέγει μετρήσεις και να τις προωθεί αποκλειστικά στον Master, ο οποίος λειτουργεί ως κόμβος συγχώνευσης και μετάδοσης. Η επικοινωνία μεταξύ των δύο ESP32 γίνεται μέσω του πρωτοκόλλου ESP-NOW που επιτρέπει την απευθείας ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ ESP μικροελεγκτών χωρίς την ανάγκη σύνδεσης WiFi στον Slave. Η επιλογή του ESP-NOW κρίθηκε κατάλληλη λόγω της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, της χαμηλής καθυστέρησης μετάδοσης και της αξιοπιστίας σε εξωτερικά και αγροτικά περιβάλλοντα.

Ο Master αποτελεί κεντρικό σημείο σύνδεσης του συστήματος με το διαδίκτυο. Μέσω WiFi 2.4GHz αποστέλλει τις μετρήσεις σε δύο ανεξάρτητες cloud υπηρεσίες, το HiveMQ και το Firebase. Η αποστολή στο HiveMQ γίνεται μέσω του πρωτοκόλλου MQTT, το οποίο εξασφαλίζει άμεση και συνεχόμενη ενημέρωση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα το Firebase χρησιμοποιείται για την μόνιμη αποθήκευση μετρήσεων, επιπλέον έτσι την δημιουργία ιστορικού με σκοπό την απεικόνιση στατιστικών και μέσω των όρων στην εφαρμογή Android. Με αυτόν τον συνδυασμό το σύστημα υποστηρίζει τόσο την ζωντανή ροή των δεδομένων όσο και την μακροχρόνια αποθήκευση αυτών προσφέροντας πλήρη εικόνα για τις μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών στον ελαιώνα.

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η ροή των δεδομένων και η αρχιτεκτονική του συστήματος.



Σχήμα 3.1: Αρχιτεκτονική του συστήματος

Τέλος για την διασφάλιση της σταθερής επικοινωνίας μεταξύ των δύο κόμβων, η μετάδοση των μετρήσεων μέσω του ESP-NOW βασίζεται σε μια σταθερή δομή η οποία περιλαμβάνει τις τέσσερις βασικές μεταβλητές του συστήματος. Ο Master λαμβάνει την δομή και προσθέτει τις δικές του μετρήσεις παράγοντας ένα ενιαίο μήνυμα σε μορφή JSON. Ο ρυθμός αποστολής έχει οριστεί σταθερά για την αποστολή του slave στα 6 δευτερόλεπτα, για το MQTT από τον master στα 10 δευτερόλεπτα και για την αποστολή στον Firebase στα 5 λεπτά. Έτσι αποφεύγονται άσκοπες αποστολές και υπερφόρτωση του δικτύου αλλά και μειώνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις των δύο κόμβων.

Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζεται αναλυτικά η σχεδίαση του υλικού, η συνδεσμολογία των αισθητήρων και των μικροελεγκτών καθώς και η λειτουργία του λογισμικού των συσκευών και της εφαρμογής Android, μέσα από τα οποία δομείται η αρχιτεκτονική του σχήματος 3.1.

3.2 Σχεδίαση και σύνδεση υλικού

Η υλοποίηση βασίζεται σε δύο μικροελεγκτές ESP32 όπου λειτουργούν με την λογική Master Slave. Στην παρούσα εφαρμογή οι αισθητήρες είναι συνδεδεμένοι στον Master, ο οποίος λαμβάνει παράλληλα και τις μετρήσεις του Slave. Οι μικροελεγκτές διαθέτουν 30 ακροδέκτες, 15 από την κάθε πλευρά για την σύνδεση των αισθητήρων προσφέροντας γρήγορη ανάπτυξη και δοκιμή των κυκλωμάτων.

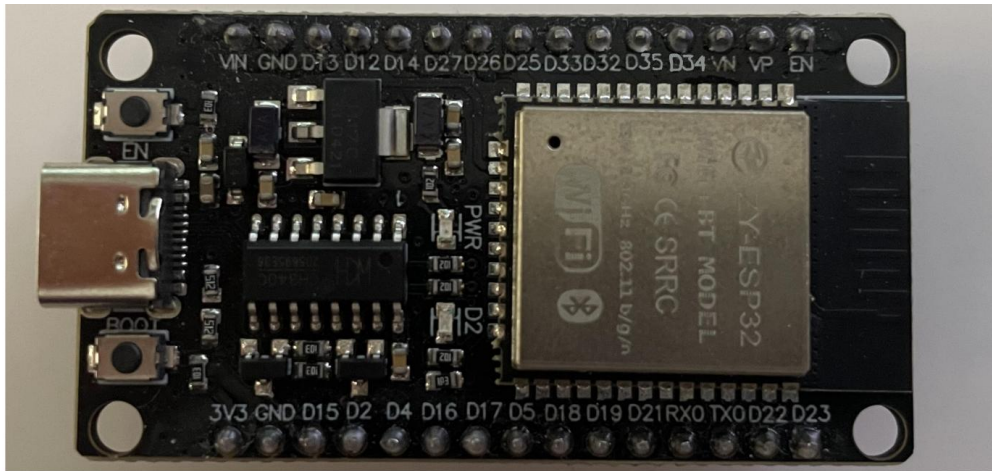
Η συνδεσμολογία των αισθητήρων βασίστηκε στις απαιτήσεις των συσκευών και στην ανάγκη χρήσης σταθερής αναλογικής εισόδου για τον αισθητήρα υγρασίας εδάφους. Όπως αποτυπώνεται και από τον πίνακα 3.1, ο αισθητήρας υγρασίας και θερμοκρασίας αέρα DHT22 συνδέθηκε στην ψηφιακή είσοδο GPIO25, αντίστοιχα ο αισθητήρα θερμοκρασίας εδάφους συνδέθηκε στην GPIO14, ενώ ο αναλογικός αισθητήρας υγρασίας εδάφους συνδέθηκε σε ένα από τα διαθέσιμα ADC pins και συγκεκριμένα το ADC1_7. Οι αισθητήρες τροφοδοτούνται με τάση 3,3V από το Pin 3v3 του μικροελεγκτή ESP32 και έχουν κοινή γείωση μαζί με τον μικροελεγκτή.

Πίνακας 3.1: Συνδεσμολογία και ονομασία pins των αισθητήρων

Αισθητήρας	Pin	Ονομασία Pin	Τροφοδοσία	Τύπος
DHT22	GPIO25	D25	3,3V	Ψηφιακός
DS18B20	GPIO14	D14	3,3V	Ψηφιακός
SOIL MOISTURE	ADC1_7	D35	3,3V	Αναλογικός

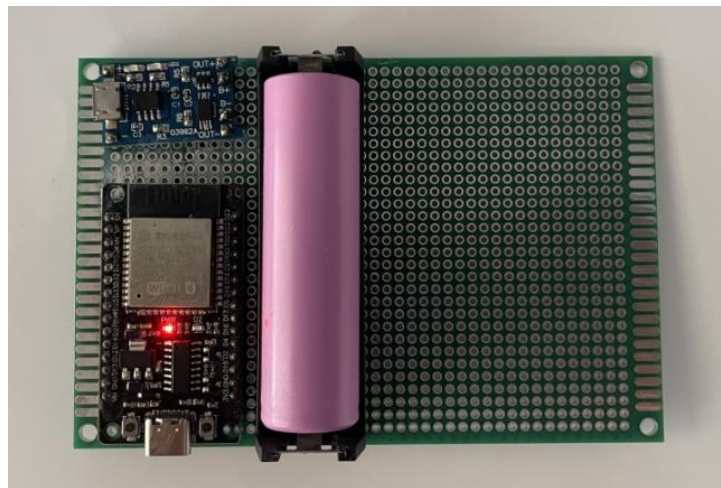
Στον παραπάνω πίνακα αναγράφονται τα pins του μικροελεγκτή όπου έχουν συνδεθεί οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται, η τρίτη στήλη αναφέρεται στην ονομασία του ακροδέκτη όπως αναγράφεται επάνω στον ESP32 που έχει χρησιμοποιηθεί για την φυσική υλοποίηση του συστήματος (εικόνα 3.1).

Η σύνδεση όλως των εξαρτημάτων έχει υλοποιηθεί επάνω σε ένα breadboard για την ευκολία των δοκιμών αλλά και την διόρθωσης προβλημάτων κατά την πορεία της δημιουργίας της συσκευής. Ο κεντρικός κόμβος, Master ESP τροφοδοτείται μέσω της ενσωματωμένης θύρας usb type-c που διαθέτει καθώς επιτρέπει πολύωρη ενεργειακή επάρκεια για την διαδικασία των δοκιμών και των πειραμάτων. Ο Slave ESP τροφοδοτείται από μια μπαταρία 18650 3,7V.



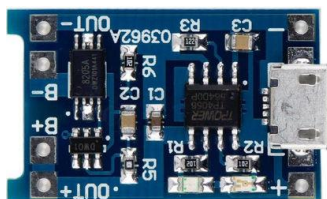
Εικόνα 3.1: ESP32

Ο Slave ESP στην εικόνα 3.2 τροφοδοτείται από μια μπαταρία 18650 3,7V, σε πραγματικές συνθήκες ελαϊώνα η τροφοδότηση και των δύο μικροελεγκτών μπορεί να γίνεται από αυτού του είδους μπαταρίες. Πρέπει να σημειωθεί ξανά, πως στα πλαίσια της εργασίας θεωρούμε πως υπάρχουν αισθητήρες συνδεδεμένοι στον Slave και οι τιμές που στέλνει είναι από πραγματικές μετρήσεις.

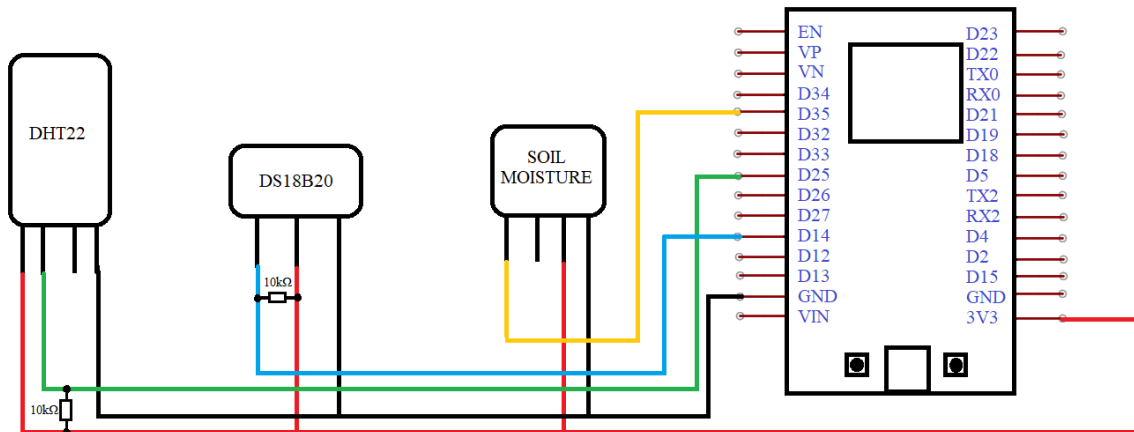


Εικόνα 3.2: Slave ESP σε λειτουργία

Για την επαναφόρτιση της μπαταρίας 18650 χρησιμοποιείται μια έτοιμη μονάδα φόρτισης μπαταριών λιθίου, την Optum TP4056 (εικόνα 3.3). Η συγκεκριμένη μονάδα εφαρμόζει το πρότυπο φόρτισης Constant Current - Constant Voltage (CCCV) που αποτελεί την βέλτιστη διαδικασία φόρτισης για αυτού του είδους μπαταρίες[63]. Επιπλέον φροντίζει να αποτρέπει καταστάσεις υπερφόρτισης και υπερεκφόρτισης που μπορούν να οδηγήσουν σε υποβάθμιση ή και καταστροφή της μπαταρίας.



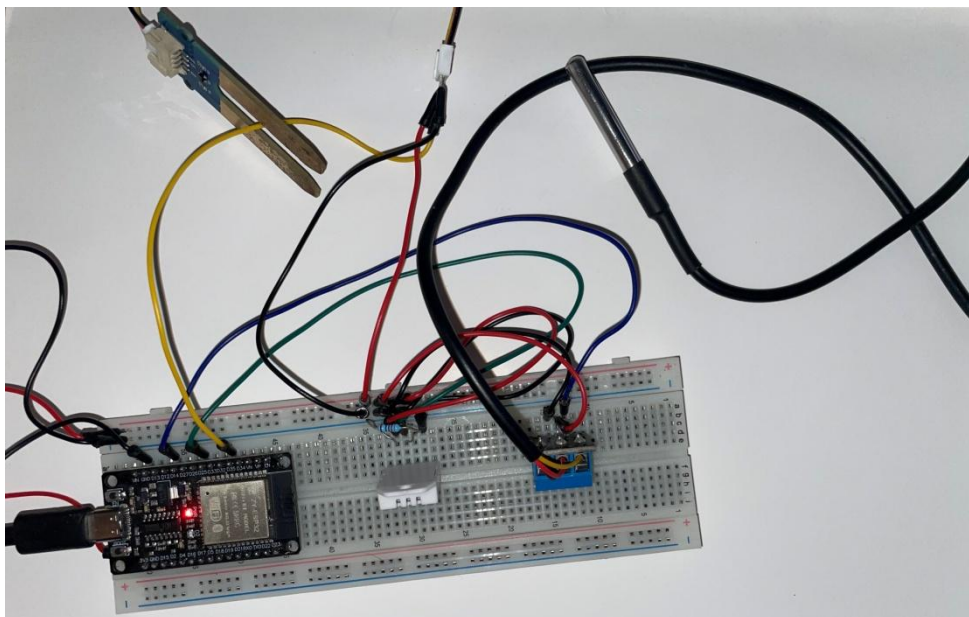
Εικόνα 3.3: Μονάδα φόρτισης 18650 (www.skrouz.gr)



Σχήμα 3.2: Συνδεσμολογία των αισθητήρων

Από την πλευρά της σύνδεσης των αισθητήρων, καλωδίωση στον Master μικροελεγκτή πραγματοποιήθηκε όπως περιγράφεται στον πίνακα 3.1. Ο DHT22 συνδέθηκε σε ψηφιακή είσοδο με την χρήση μιας αντίστασης 10kΩ ως pull-up μεταξύ της Vdd και του Data pin για την σταθεροποίηση της γραμμής και την αποφυγή θορύβου κατά την μετάδοση[64]. Αντίστοιχα ο DS18B20 συνδέθηκε σε ψηφιακή γραμμή με μια ίδια αντίσταση η οποία ενσωματώνεται στο module του αισθητήρα. Τέλος ο αναλογικός αισθητήρας συνδέθηκε σε ADC θήρα όπως προαναφέρθηκε. Το σχήμα 3.2 αποτυπώνει ακριβώς τα σημεία σύνδεσης πάνω στην πλακέτα.

Η συνδεσμολογία που φαίνεται στο σχήμα 3.2 αφορά τον Master ESP, όμως στην περίπτωση ενσωμάτωσης αισθητήρων και στον Slave ESP, μπορεί να εφαρμοστεί η ίδια συνδεσμολογία. Η σύνδεση των μπαταριών 18650 γίνεται στον ακροδέκτη VIN, το + της μπαταρίας και στο κοινό με τους αισθητήρες GND, το - της μπαταρίας. Στην εικόνα 3.4 παρακάτω φαίνεται ο Master ESP με τις πραγματικές συνδέσεις των αισθητήρων, όπως ορίζει το σχεδιάγραμμα που είδαμε προηγουμένως.



Εικόνα 3.4: Φυσική σύνδεση των αισθητήρων με τον ESP Master

Οι αισθητήρες που είναι υπεύθυνοι για της μετρήσεις των εδαφικών συνθηκών τοποθετούνται με τρόπο έτσι ώστε να εξασφαλίζεται σταθερή μέτρηση. Ο αναλογικός αισθητήρας υγρασίας εδάφους τοποθετήθηκε στο χώμα σε μικρό βάθος, όπως φαίνεται από την εικόνα 3.5A, αρκετό ώστε να μετράει την σχετική υγρασία κοντά στον κορμό. Από την άλλη ο DS18B20 τοποθετήθηκε με στεγανοποιημένο περίβλημα σε μεγαλύτερο βάθος μέσα στο χώμα (εικόνα 3.5B), με σκοπό να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις του από τις μεταβολές του αέρα. Τέλος ο DHT22 στην εικόνα 3.5C, συνδεδεμένος άμεσα επάνω στο raster δίπλα από τον Master ESP, τοποθετήθηκε σε σημείο με καλή κυκλοφορία αέρα χωρίς να εκτίθεται σε άμεση ηλιακή ακτινοβολία.



(A)



(B)



(C)

Εικόνα 3.5: (A) Αισθητήρας υγρασίας εδάφους, (B) DS18B20, (C) DHT22

Η συνολική συνδεσμολογία οργανώθηκε έτσι ώστε να είναι εύκολη η αντικατάσταση των αισθητήρων και η προσθήκη νέων κόμβων για μελλοντικές επεκτάσεις του συστήματος. Κατά την διάρκεια της κατασκευής και των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε breadboard ως βάση για την ευκολία ανάπτυξης και αντιμετώπισης προβλημάτων, η τελική μορφή σε πραγματικές μακροχρόνιες συνθήκες ελαιώνα μπορεί να υλοποιηθεί με σταθερή πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος PCB ή διάτρητο raster. Βασική ανάγκη για την προστασία του κυκλώματος αποτελεί ένα στεγανό περίβλημα ώστε να προστατεύεται από την βροχή. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται αναλυτικά η λειτουργία του λογισμικού των δύο μικροελεγκτών, μέσω των οποίων υλοποιείται η διαδικασία συλλογής, συγχώνευσης και μετάδοσης των δεδομένων προς το cloud.

3.3 Λειτουργία λογισμικού ESP32

Η λειτουργία του λογισμικού αποτελεί κρίσιμο τμήμα της συνολικής υλοποίησης της εφαρμογής, καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι δύο μικροελεγκτές συνεργάζονται για την συλλογή, συγχώνευση και προώθηση των δεδομένων. Για το σύστημα της εργασίας αναπτύχθηκαν δύο ανεξάρτητα λογισμικά, ένα για τον Master και ένα για τον Slave ESP32, τα οποία έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν συμπληρωματικά το ένα με το άλλο βασισμένα στην αρχιτεκτονική Master/Slave όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Η ανάπτυξη του λογισμικού πραγματοποιήθηκε μέσω της πλατφόρμας PlatformIO στο Visual Studio Code, καθώς προσφέρει υποστήριξη για αυτόματη διαχείριση βιβλιοθηκών, σύνθεσης του προγράμματος και προγραμματισμό της πλακέτας. Η επιλογή της πλατφόρμας έγινε για την οργάνωση που προσφέρει στα αρχεία, την δυνατότητα χρήσης πολλαπλών βιβλιοθηκών χωρίς να απαιτείται χειροκίνητη εγκατάσταση και την ευκολία ρύθμισης του ESP32[65].

Το λογισμικό και στους δύο μικροελεγκτές βασίζεται στην γλώσσα προγραμματισμού C++. Στο τμήμα `setup()` πραγματοποιούνται οι αρχικοποιήσεις των αισθητήρων, του WiFi και του ESP-NOW και στο τμήμα `loop()` εκτελούνται οι επαναλαμβανόμενες λειτουργίες όπως η ανάγνωση τιμών, η ενημέρωση των μεταβλητών και η αποστολή ή λήψη των πακέτων δεδομένων. Η λειτουργία του συστήματος στον Master βασίζεται στην χρήση χρονομέτρων με την συνάρτηση `millis()`, σε αντίθεση με τον Slave όπου λειτουργεί με `delay`. Σκοπός αυτής της τακτικής είναι να μην διακόπτεται το υπόλοιπο πρόγραμμα, όπως ανάγνωση τιμών, επιτρέποντας παράλληλη λειτουργία των διαδικασιών. Η δομή και η φιλοσοφία της λειτουργίας του Slave δεν απαγορεύει προς το παρόν παύση στην ροή για αυτό γίνεται χρήση πιο απλής λύσης `delay` αντί του χρονομέτρου.

Με αυτή την δομή, ο Slave στέλνει περιοδικά τις τιμές του μέσω ESP-NOW ενώ ο Master συνδυάζει τις μετρήσεις από τους αισθητήρες του μαζί με τις τιμές του Slave σε ένα πακέτο και το προωθεί προς τις πλατφόρμες cloud, διαδικασία η οποία περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 3.4. Στην συνέχεια, στις υποενότητες που ακολουθούν παρουσιάζεται αναλυτικά το λογισμικό και οι επιμέρους λειτουργίες του Master και του Slave ESP32.

3.3.1 Master ESP

Ο Master ESP32 αποτελεί το κεντρικό στοιχείο του συστήματος, αναλαμβάνει τόσο την συλλογή των δικών του μετρήσεων όσο και την λήψη των δεδομένων του Slave. Στο λογισμικό του ενσωματώνονται όλες οι απαραίτητες λειτουργίες δικτύου, οι βιβλιοθήκες των αισθητήρων και ο μηχανισμός ασύρματης επικοινωνίας με ESP-NOW, έτσι, ο κόμβος αυτός λειτουργεί και ως μονάδα μετρήσεων αλλά και ως γέφυρα προς τις πλατφόρμες cloud.

Κατά την εκκίνηση ο Master συνδέεται στο ασύρματο δίκτυο WiFi και ρυθμίζει το κανάλι λειτουργίας του έτσι ώστε να συμπίπτει με το κανάλι λειτουργίας του router. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζει ότι το πρωτόκολλο ESP-NOW μπορεί να λειτουργεί παράλληλα με το WiFi χωρίς παρεμβολές. Στην συνέχεια ο μηχανισμός του ESP-NOW καταχωρεί την συνάρτηση υποδοχής των πακέτων η οποία καλείται αυτόματα κάθε φορά που ο Slave αποστέλλει ένα νέο σύνολο τιμών. Τα δεδομένα που στέλνει ο slave αποθηκεύονται σε μια σταθερή δομή δεδομένων η οποία ανανεώνεται κάθε φορά με τις νέες μεταβλητές που λαμβάνονται.

Η επικοινωνία των δύο κόμβων ελέγχεται από έναν μηχανισμό ελέγχου συνδεσιμότητας. Ο Master καταγράφει την πιο πρόσφατη χρονική στιγμή που έλαβε δεδομένα, στην περίπτωση που στα επόμενα έντεκα δευτερόλεπτα δεν λάβει νέες τιμές, θεωρεί πως η σύνδεση μεταξύ των δύο κόμβων έχει χαθεί.

Σε αυτήν την περίπτωση οι τιμές του slave μηδενίζονται με σκοπό να αποφεύγεται η χρήση παλιών και μη έγκυρων μετρήσεων. Με αυτήν την τεχνική το σύστημα είναι ανθεκτικό σε προσωρινές αστοχίες της επικοινωνίας ή στην περίπτωση απώλειας τροφοδοσίας του slave κόμβου.

Παράλληλα με την λήψη των δεδομένων, ο master εκτελεί ανάγνωση των αισθητήρων που είναι συνδεδεμένοι σε αυτόν. Η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα λαμβάνονται από τον αισθητήρα DHT22, η θερμοκρασία του εδάφους από τον DS18B20 και η υγρασίας του εδάφους μέσω του αναλογικού μετρητή. Οι μετρήσεις αυτές εκτελούνται με την χρήση χρονομέτρων μέσω της συνάρτησης `millis()` χωρίς την χρήση καθυστέρησης `delay` στην ροή του κώδικα.

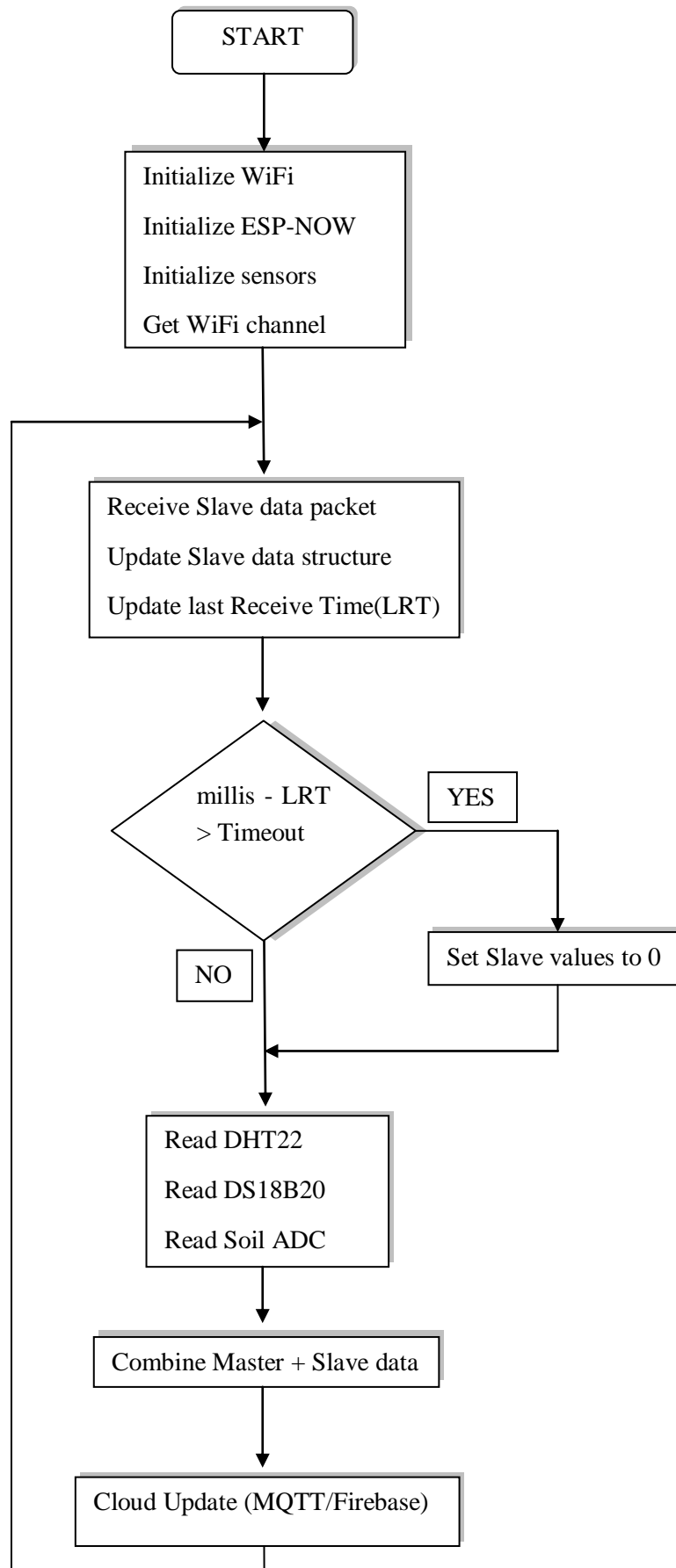
Πέρα από τις βασικές λειτουργίες ανάγνωσης και λήψης μετρήσεων ο master λειτουργεί και ως κόμβος συγχώνευσης των μετρήσεων του συστήματος. Οι τιμές που προέρχονται από τις μετρήσεις των τοπικών αισθητήρων και οι τιμές που λαμβάνει από τον Slave κόμβο οργανώνονται σε δύο ομάδες, στην συνέχεια ενοποιούνται σε ένα ενιαίο πακέτο προς αποστολή. Μέσω της διαδικασίας αυτής το σύστημα αντιμετωπίζει τους κόμβους ως δύο ξεχωριστές πηγές πληροφορίας όπου συνθέτουν τα δεδομένα τους σε μια ολοκληρωμένη εικόνα των περιβαλλοντικών συνθηκών. Το σύνολο αυτό αποτελεί την είσοδο για τις διαδικασίες μεταφοράς των δεδομένων προς τις πλατφόρμες HiveMQ και Firebase, των οποίων η τεχνική ανάλυση γίνεται στην ενότητα 3.4.

Η λειτουργία του Master βασίζεται επίσης στην χρήση πολλών χρονικών διαστημάτων. Κάθε ομάδα λειτουργιών δηλαδή, από την ανάγνωση των αισθητήρων, τον έλεγχο την σύνδεσης με τον slave κόμβο, την προετοιμασία των πακέτων προς αποστολή, εκτελείται σε διαφορετική χρονική στιγμή. Μέσω της συνάρτησης `millis` ορίζεται η χρονική στιγμή όπου θα εκτελεστεί ξανά μια λειτουργία και ενεργοποιείται μόνο όταν περάσει ο προκαθορισμένος χρόνος. Με αυτή την τακτική, οι λειτουργίες που εκτελούνται διαδοχικά μέσα στον ίδιο βρόχο δεν μπορούν να εμποδίσουν ή να καθυστερήσουν η μια την άλλη, δίνοντας έτσι την εντύπωση παράλληλης εκτέλεσης των εργασιών.

Η λογική στην οποία αναπτύχθηκε το λογισμικό του master επιτρέπει στον κόμβο να λειτουργεί κανονικά σε περιπτώσεις απώλειας πρόσβασης στο διαδίκτυο. Ακόμη και σε περιπτώσεις που η σύνδεση WiFi δεν είναι διαθέσιμη, εξακολουθεί να συλλέγει μετρήσεις, να δημιουργεί ενιαία πακέτα με τα δεδομένα του slave και να διατηρεί το σύστημα ενεργό. Με αυτόν τον τρόπο μέσω των αυτόματων προσπαθειών επανασύνδεσης, όταν αποκατασταθεί η πρόσβαση στο διαδίκτυο, θα είναι έτοιμα τα δεδομένα προς αποστολή στο cloud. Η λειτουργία αυτή ενισχύει την ανθεκτικότητα του κόμβου και εξασφαλίζει ότι μπορεί να λειτουργεί ως αυτόνομος κόμβος μετρήσεων ενώ παράλληλα λειτουργεί και ως gateway προς το διαδίκτυο.

Τέλος πρέπει να επισημανθεί πως τα πακέτα που δημιουργεί για την κοινοποίηση προς τις δύο υπηρεσίες cloud είναι ξεχωριστά και έχουν διαφορετική δομή. Για το HiveMQ το πακέτο διαμορφώνεται σε μορφή JSON και περιλαμβάνει δύο ομάδες μετρήσεων, μια για τον master(esp1) και μια για τον slave(esp2) μαζί με τις αντίστοιχες μεταβλητές των μετρήσεων τους. Από την άλλη, για τον firebase δημιουργείται ένα ενιαίο μήνυμα με ξεχωριστά πεδία για την κάθε μεταβλητή και αποστέλλεται μέσω HTTP. Για περισσότερες πληροφορίες στην Ενότητα 3.4.

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται συνοπτικά η ροή λειτουργίας του λογισμικού του Master ESP32, από την αρχικοποίηση και την λήψη των δεδομένων μέχρι και την εξαγωγή του τελικού πακέτου μετρήσεων στο cloud.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ροής Master κόμβου

3.3.2 Slave ESP

Ο Slave ESP32 αποτελεί τον δεύτερο κόμβο του συστήματος και έχει ως βασικό σκοπό την δημιουργία και την μετάδοση των μετρήσεων του μέσω ESP-NOW στον Master κόμβο. Σε αντίθεση με τον Master, δεν πραγματοποιεί σύνδεση στο διαδίκτυο και δεν επικοινωνεί άμεσα με καμία πλατφόρμα cloud, λειτουργεί αποκλειστικά ως απομακρυσμένη μονάδα συλλογής δεδομένων και αποστολής πακέτων μικρού μεγέθους με χαμηλή καθυστέρηση. Η σχεδίαση αυτή μειώνει πολύ την κατανάλωση ενέργειας της συσκευής και επιτρέπει την αποτελεσματική λειτουργία σε απομακρυσμένα μέρη που μπορεί να μην φτάνει η σύνδεση WiFi.

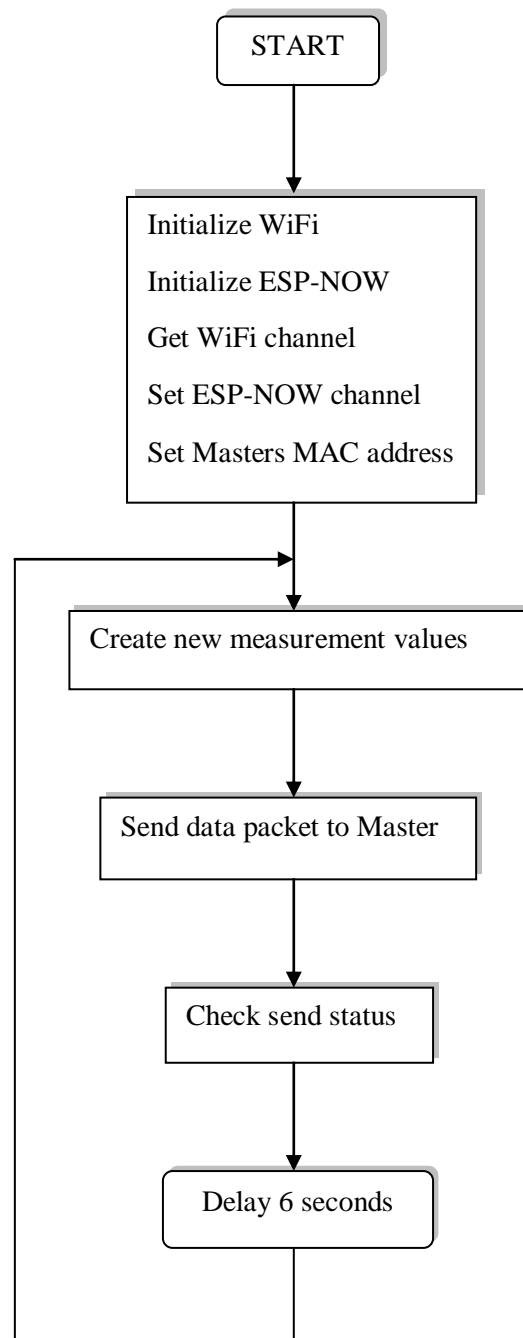
Κατά την εκκίνηση του κόμβου Slave, ενεργοποιείται το σύστημα WiFi σε λειτουργία σταθμού (STA) με σκοπό να εντοπίσει το κανάλι λειτουργίας του router όπου θα συνδεθεί ο Master κόμβος. Η ταύτιση του καναλιού είναι σημαντική καθώς το ESP-NOW λειτουργεί πιο αποτελεσματικά όταν οι δύο κόμβοι που επικοινωνούν βρίσκονται στο ίδιο κανάλι. Έτσι εξασφαλίζεται η βέλτιστη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων και αποφεύγονται οι παρεμβολές από άλλα σήματα και δίκτυα. Στην συνέχεια ενεργοποιείται το πρωτόκολλο ESP-NOW και δημιουργείται μια συνάρτηση επιβεβαίωσης που έχει ως σκοπό να ενημερώνει τον χρήστη αν έχει αποσταλεί κάθε με πακέτο με επιτυχία ή όχι. Τέλος, δηλώνεται ο Master, μέσω της MAC διεύθυνσης του, ως μοναδικός αποδέκτης των πακέτων που στέλνει, ολοκληρώνοντας την διαδικασία αρχικοποίησης.

Για να γίνεται η αποκωδικοποίηση των πακέτων δεδομένων πιο εύκολη, οι μετρήσεις που μεταδίδει ο Slave οργανώνονται σε μια σταθερή δομή δεδομένων, ίδια με αυτή στον Master κόμβο, όπου το κάθε πακέτο έχει ίδιο μέγεθος και ίδια μορφή. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, όπως έχει επισημανθεί, ο Slave δεν διαθέτει συνδεδεμένους αισθητήρες, επομένως παράγει τυχαίες τιμές εντός προκαθορισμένου εύρους ώστε να προσομοιώσει την λειτουργία ενός πραγματικού κόμβου μετρήσεων. Οι τιμές αυτές δημιουργούνται σε κάθε κύκλο του προγράμματος και αντιστοιχούν στις ίδιες τέσσερις μεταβλητές που παρέχει ο Master κόμβος με τους αισθητήρες, δηλαδή θερμοκρασία αέρα, υγρασία αέρα και αντίστοιχα υγρασία και θερμοκρασία εδάφους. Παρόλο που το σύστημα αυτή την στιγμή λειτουργεί με πλασματικά δεδομένα, ο κώδικας έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε με μικρές προγραμματιστικές αλλαγές, να μπορεί να δεχθεί πραγματικούς αισθητήρες χωρίς να αλλάξει η αρχιτεκτονική της επικοινωνίας.

Όταν δημιουργείται ένα νέο πακέτο με τις τιμές των μετρήσεων, αποστέλλεται στον Master μέσω ESP-NOW. Η διαδικασία είναι ιδιαίτερα γρήγορη και ενεργειακά αποδοτική, το πακέτο αποστέλλεται απευθείας στην Mac διεύθυνση του παραλήπτη χωρίς την ύπαρξη σύνδεσης WiFi. Μετά την αποστολή, η συνάρτηση επιβεβαίωσης καλείται για να δώσει ενημέρωση στον διαχειριστή σχετικά με την επιτυχία ή την αποτυχία παράδοσης του πακέτου. Έτσι παρέχεται μια ένδειξη της ποιότητας της σύνδεσης που βοηθάει στο στάδιο των πειραμάτων και της ρύθμισης.

Σε αντίθεση με τον Master, λειτουργεί σε ένα σταθερό διάστημα αποστολής, με κάθε νέο πακέτο να δημιουργείται και να αποστέλλεται κάθε έξι δευτερόλεπτα. Η υλοποίηση βασίζεται στην χρήση καθυστέρησης delay() καθώς αυτός ο κόμβος δεν απαιτεί παράλληλη εκτέλεση πολλαπλών διεργασιών, ούτε χρειάζεται να παραμένει διαθέσιμος για λήψη πακέτων. Σε μελλοντική επέκταση του συστήματος, αν προστεθούν επιπλέον κόμβοι που θα επικοινωνούν σειριακά, είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση της λογικής του Master.

Συνοπτικά, ο κόμβος Slave εκτελεί τον ρόλο του στο σύστημα μετά την παραγωγή πακέτων σταθερής δομής και αποστολή αυτών στο κεντρικό κόμβο. Στο αντίστοιχο σχήμα 3.4 της υποενότητας παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής και η λειτουργία του Slave κόμβου.



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα ροής Slave κόμβου

3.4 Σύνδεση με πλατφόρμες HiveMQ και Firebase

Το βασικό χαρακτηριστικό στην λειτουργία δεν είναι μόνο η τοπική λήψη και μετάδοση των δεδομένων αλλά επεκτείνεται και σε υπηρεσίες cloud ώστε τα δεδομένα να είναι άμεσα προσβάσιμα από απόσταση. Όπως αναφέρθηκε ο Master κόμβος είναι αυτός που έχει αναλάβει τον ρόλο της γέφυρας προς το διαδίκτυο προωθώντας όλες τις μετρήσεις σε δύο ανεξάρτητες πλατφόρμες, τον MQTT broker της HiveMQ και την βάση δεδομένων Firebase.

Η ενσωμάτωση δύο διαφορετικών υπηρεσιών στην εφαρμογή εξυπηρετεί διαφορετικές ανάγκες στην λειτουργία του συστήματος. Η πλατφόρμα HiveMQ αξιοποιεί την άμεση ενημέρωση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο μέσω του πρωτοκόλλου MQTT, δίνοντας την δυνατότητα για ζωντανή παρακολούθηση των παραμέτρων στον ελαιώνα. Ενώ από την άλλη το Firebase χρησιμοποιείται για την μόνιμη αποθήκευση των μετρήσεων σε μορφή εγγράφων με την αντίστοιχη χρονοσήμανση. Μέσω αυτών των αποθηκευμένων εγγράφων, η εφαρμογή έχει την δυνατότητα να προβάλλει ιστορικό μετρήσεων.

Ο Master σε κάθε κύκλο λειτουργίας του συγκεντρώνει τις τιμές των δύο κόμβων και δημιουργεί πακέτα δεδομένων, κατάλληλα για την αποστολή σε κάθε μια από τις πλατφόρμες. Για το HiveMQ τα δεδομένα οργανώνονται σε ένα μήνυμα JSON και δημοσιεύονται στο προκαθορισμένο topic που έχει δημιουργηθεί. Από την άλλη για το Firebase εκτελείται ένα αίτημα HTTP προς την βάση για την δημιουργία του κατάλληλου αρχείου, στην συνέχεια στέλνει τα δεδομένα και μετονομάζει το αντίστοιχο αρχείο με την ώρα και την ημερομηνία αποστολής. Τα πακέτα αποστέλλονται στις πλατφόρμες σε διαφορετικούς χρόνους ώστε να επιτυγχάνεται η συχνή και συνεχής ενημέρωση των δεδομένων αλλά από την άλλη να μην δημιουργείται υπερβολική καταγραφή ιστορικού.

Στις υποενότητες που ακολουθούν παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος ενσωμάτωσης των δύο υπηρεσιών HiveMQ και Firebase στην λειτουργία του Master κόμβου, καθώς και η διαδικασία δημιουργίας, μορφοποίησης και αποστολής του κάθε πακέτου στην αντίστοιχη πλατφόρμα.

3.4.1 HiveMQ

Η πλατφόρμα HiveMQ είναι ο MQTT broker όπου αποτελεί το κεντρικό μέσο αποστολής των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο. Το MQTT είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα πρωτόκολλα επικοινωνίας σε εφαρμογές Internet of Things καθώς είναι σχεδιασμένο για συσκευές με περιορισμένους ενεργειακούς πόρους και μικρής υπολογιστικής δύναμης. Το πρωτόκολλο ακολουθεί την λογική Publish/Subscribe που το καθιστά πολύ ευέλικτο, ο Master δημοσιεύει τα δεδομένα του σε ένα συγκεκριμένο topic και οι συνδρομητές από την δική τους μεριά για να λάβουν τα δεδομένα, κάνουν συνδρομή στο αντίστοιχο topic.

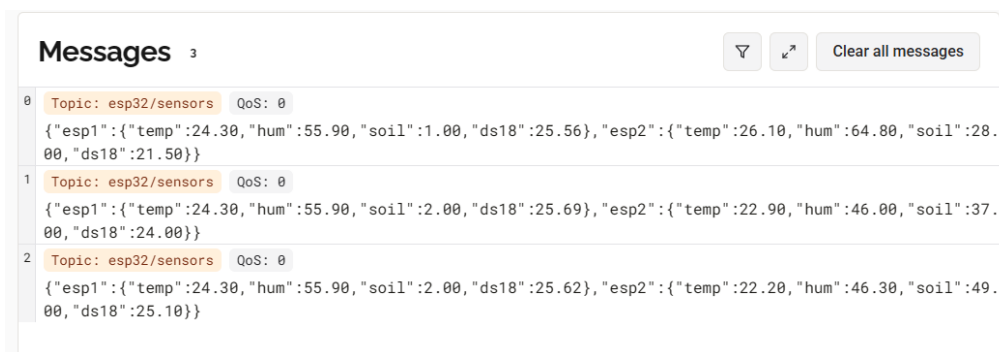
Μέσα στην δομή του κώδικα στον Master κόμβο συμπεριλαμβάνονται οι πληροφορίες που απαιτούνται για την επιτυχή σύνδεση με τον διακομιστή. Για την επικοινωνία με τον Server δηλώνεται η διεύθυνση του στην αρχή, η οποία παρέχεται από την υπηρεσία. Κάθε σύνδεση, έτσι και ο Master, διαθέτει ένα username και ένα password ώστε να μπορεί να συνδεθεί και να δημοσιεύει δεδομένα σε κάποιο topic. Αφού γίνει η σύνδεση με επιτυχία ο κόμβος αποκτά πρόσβαση στο topic του συστήματος esp32/sensors, μέσα στο οποίο δημοσιεύει όλες τις μετρήσεις που προέρχονται από τους δύο κόμβους.

Κάθε πακέτο που είναι έτοιμο προς αποστολή στον MQTT broker αποτελείται από τις μετρήσεις του esp1 και του esp2 και οργανώνονται σε μια δομή. Το πακέτο JSON περιλαμβάνει δύο κύριες ενότητες, η πρώτη αφορά τα δεδομένα του Master(esp1) και η δεύτερη του Slave(esp2). Μέσα σε

κάθε ενότητα περιλαμβάνονται οι τιμές από τις 4 βασικές μεταβλητές του συστήματος, η θερμοκρασία εδάφους και αέρα καθώς και η υγρασία εδάφους και αέρα. Η δομή αυτή (εικόνα 3.6) επιτρέπει στον τελικό αποδέκτη, την εφαρμογή Android στην περίπτωση της εφαρμογής, να γνωρίζει σε σαφήνεια από ποιο κόμβο προέρχεται κάθε τιμή και να επεξεργάζεται σωστά το σύνολο των τιμών.

Η αποστολή των πακέτων στην υπηρεσία HiveMQ πραγματοποιείται με σταθερό χρονικό περιθώριο δέκα δευτερολέπτων. Το διάστημα αυτό εξασφαλίζει πως τα δεδομένα θα ενημερώνονται συχνά με στόχο μιας σχεδόν πραγματικού χρόνου εικόνας των περιβαλλοντικών συνθηκών αλλά ταυτόχρονα δεν θα προκαλούν υπερφόρτωση στον server ή αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση από τις επαναλαμβανόμενες μεταδόσεις των συσκευών. Η χρήση χρονομέτρου που αναλύθηκε στην υποενότητα 3.3.1 επιτρέπει την ομαλή ροή λειτουργία και επιτρέπει την ταυτόχρονη λήψη πακέτων και μετρήσεων στο διάστημα που περιμένει να γίνει η επόμενη αποστολή MQTT.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του MQTT είναι πως ο Master δεν χρειάζεται να γνωρίζει ποιος είναι ο αποδέκτης των δεδομένων. Οι τελικοί κόμβοι που επιθυμούν να λάβουν τα δεδομένα, είτε είναι εφαρμογές κινητών τηλεφώνων είτε ιστοσελίδες παρακολουθούν το topic και έχουν την δυνατότητα να λάβουν τα δεδομένα. Με τον τρόπο αυτό το σύστημα αποκτάει υψηλή επεκτασιμότητα καθώς μπορούν να προστεθούν νέοι συνδρομητές, χωρίς να χρειάζεται κάποια αλλαγή στον κώδικα του κεντρικού κόμβου. Αντίστοιχα, η εφαρμογή android, που θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα 3.5, διαθέτει εξατομικευμένα διαπιστευτήρια με σκοπό την σύνδεση στην υπηρεσία και την συνδρομή στο topic.



Εικόνα 3.6: Δομή δημοσιευμένου μηνύματος

3.4.2 Firebase

Η πλατφόρμα Firebase χρησιμοποιείται στην εφαρμογή ως μόνιμη βάση αποθήκευσης των μετρήσεων με σκοπό την ανάπτυξη ιστορικού και την υποστήριξη λειτουργιών που απαιτούν πρόσβαση σε παλαιότερες τιμές. Επιγραμματικά, η υπηρεσία Firebase της Google είναι μια noSQL βάση δεδομένων που παρέχει την δυνατότητα ευέλικτης οργάνωσης σε καταλόγους και υποκαταλόγους, επιτρέποντας έτσι την εύκολη καταγραφή αλλά και ανάκτηση των πληροφοριών που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

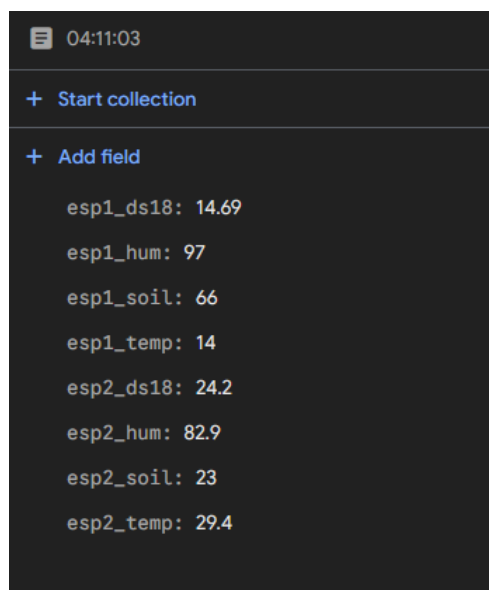
Η επικοινωνία του Master με το Firebase πραγματοποιείται μέσω του REST API της Firestore χρησιμοποιώντας HTTP αιτήματα. Στον κώδικα του esp έχει οριστεί η διεύθυνση της βάσης, η οποία περιλαμβάνει το URL του έργου στο Firebase καθώς και το μονοπάτι των εγγράφων που θα δημιουργούνται. Πριν δημιουργηθεί το τελικό μονοπάτι, ο esp συγχρονίζει το εσωτερικό του ρολόι μέσω NTP(Network Time Protocol) με βάση την ζώνη ώρας της Ελλάδας. Μέσα από αυτή την διαδικασία εξάγεται η ημερομηνία αλλά και η ώρα της μέτρησης. Η ημερομηνία μορφοποιείται ως Year-Month-Day και χρησιμοποιείται για την δημιουργία ενός επιπέδου στην δομή των εγγράφων.

Αντίστοιχα, η ώρα έχει την μορφή Hour-Minutes-Seconds και αποτελεί το όνομα του εκάστοτε αρχείου που περιέχει τις μετρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται το μονοπάτι `.../measurements/Ημερομηνία/data/Ωρα` όπου το τελευταίο πεδίο είναι το αρχείο της κάθε μέτρησης. Ο κατάλογος `data` είναι απαραίτητος καθώς το πεδίο `Ημερομηνία` είναι ένα αρχείο και δεν μπορεί να έχει από κάτω πολλαπλά αρχεία.

Σε αντίθεση με την δομή μηνύματος προς το MQTT, η μορφή προς το Firebase είναι ένα ενιαίο JSON όπου τα δεδομένα για τους δύο κόμβους γράφονται όλα ξεχωριστά. Κάθε πεδίο αποτελείται από ένα `String` όπου δείχνει ποια τιμή περιέχεται και ένα `DoubleValue` που περιέχει την μέτρηση. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.7, για τις μετρήσεις του Master χρησιμοποιούνται τα πεδία `esp1_temp`, `esp1_hum`, `esp1_soil` και `esp1_ds18` ενώ για τις μετρήσεις του Slave αντίστοιχα `esp2_temp`, `esp2_hum`, `esp2_soil` και `esp2_ds18`. Η ονομασία των πεδίων επιτρέπει στην τελική εφαρμογή που θα προσπαθήσει να ανακτήσει τα δεδομένα να γνωρίζει από ποιον κόμβο προέρχεται η κάθε τιμή και ποια μέτρηση αντιπροσωπεύει.

Η αποστολή των δεδομένων προς το firebase γίνεται σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με το HiveMQ, ο Master δημιουργεί και αποστέλλει ένα νέο έγγραφο κάθε πέντε λεπτά. Το χρονικό διάστημα αυτό επιλέχθηκε για να εξασφαλιστεί η επαρκής πυκνότητα των καταγραφών αλλά ταυτόχρονα για την μείωση του φόρτου στο δίκτυο και την εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων. Πριν πραγματοποιηθεί η κάθε αποστολή γίνεται έλεγχος ότι το ESP παραμένει συνδεδεμένο στο WiFi, με σκοπό την αποφυγή αποτυχημένων αιτημάτων αποστολής. Στα πλαίσια της ανάπτυξης ενσωματώθηκε επίσης καταγραφή του κώδικα κατάστασης που επιστρέφει ο διακομιστής παρέχοντας ένδειξη για την επιτυχία της καταγραφής.

Τέλος, η υλοποίηση που πραγματοποιήθηκε επιτρέπει την απευθείας αξιοποίηση των δεδομένων από την εφαρμογή android που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας. Η εφαρμογή μπορεί να διαβάζει τους καταλόγους και τα έγγραφα που είναι καταχωρημένα στο Firebase, να τα φιλτράρει βάση της ημερομηνίας και της ώρας με σκοπό την δημιουργία ιστορικού μετρήσεων. Στην αντίστοιχη ενότητα 3.5 παρουσιάζεται ο τρόπος που η εφαρμογή αξιοποιεί τις αποθηκευμένες μετρήσεις.



Εικόνα 3.7: Πεδία τελικού εγγράφου μετρήσεων στον Firebase.

3.5 Ανάπτυξη Android εφαρμογής

Η εφαρμογή android έχει αναπτυχθεί με στόχο να λειτουργεί ως ο κεντρικός πίνακας παρακολούθησης του συστήματος, επιτρέποντας την εμφάνιση των μετρήσεων των δύο κόμβων σε πραγματικό χρόνο. Επίσης ενσωματώνει λειτουργία πρόγνωσης καιρού και έχει πρόσβαση στο ιστορικό των παλιότερων μετρήσεων. Η ανάπτυξη της εφαρμογής πραγματοποιήθηκε στο Android Studio με την χρήση της γλώσσας Kotlin.

Η αρχιτεκτονική της εφαρμογής χωρίζεται ανάλογα με την πηγή δεδομένων, χωρίζεται δηλαδή σε τέσσερις βασικές σελίδες. Στην σελίδα Live μετρήσεις, όπου παρουσιάζονται οι μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο, η εφαρμογή αντλεί πληροφορίες από τον broker της HiveMQ. Στην σελίδα μετεωρολογικός σταθμός γίνεται ενσωμάτωση δύο διαδικτυακών APIs που είναι υπεύθυνα για την λήψη συντεταγμένων της πόλης και την εμφάνιση προγνωστικού δελτίου καιρού. Τέλος, στην σελίδα ιστορικό μετρήσεων γίνεται επικοινωνία με την βάση Firebase της Firestore για να ανακτήσει ιστορικά δεδομένα των προηγούμενων ημερών.

Η εφαρμογή λειτουργεί συμπληρωματικά με το σύστημα των μικροελεγκτών, συγκεντρώνει πληροφορίες και δεδομένα από τις διαφορετικές υπηρεσίες και τα παρουσιάζει με έναν ενιαίο και απλό τρόπο. Έτσι ο χρήστης αποκτάει μια πλήρη εικόνα της τρέχουσας κατάστασης του ελαιώνα καθώς και του ιστορικού.

Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζεται αναλυτικά η δομή της εφαρμογής, οι λειτουργίες του UI και ο τρόπος ενσωμάτωσης των διαδικτυακών υπηρεσιών Firebase και HiveMQ καθώς και η χρήση των APIs.

3.5.1 Τεχνολογίες και αρχιτεκτονική της εφαρμογής

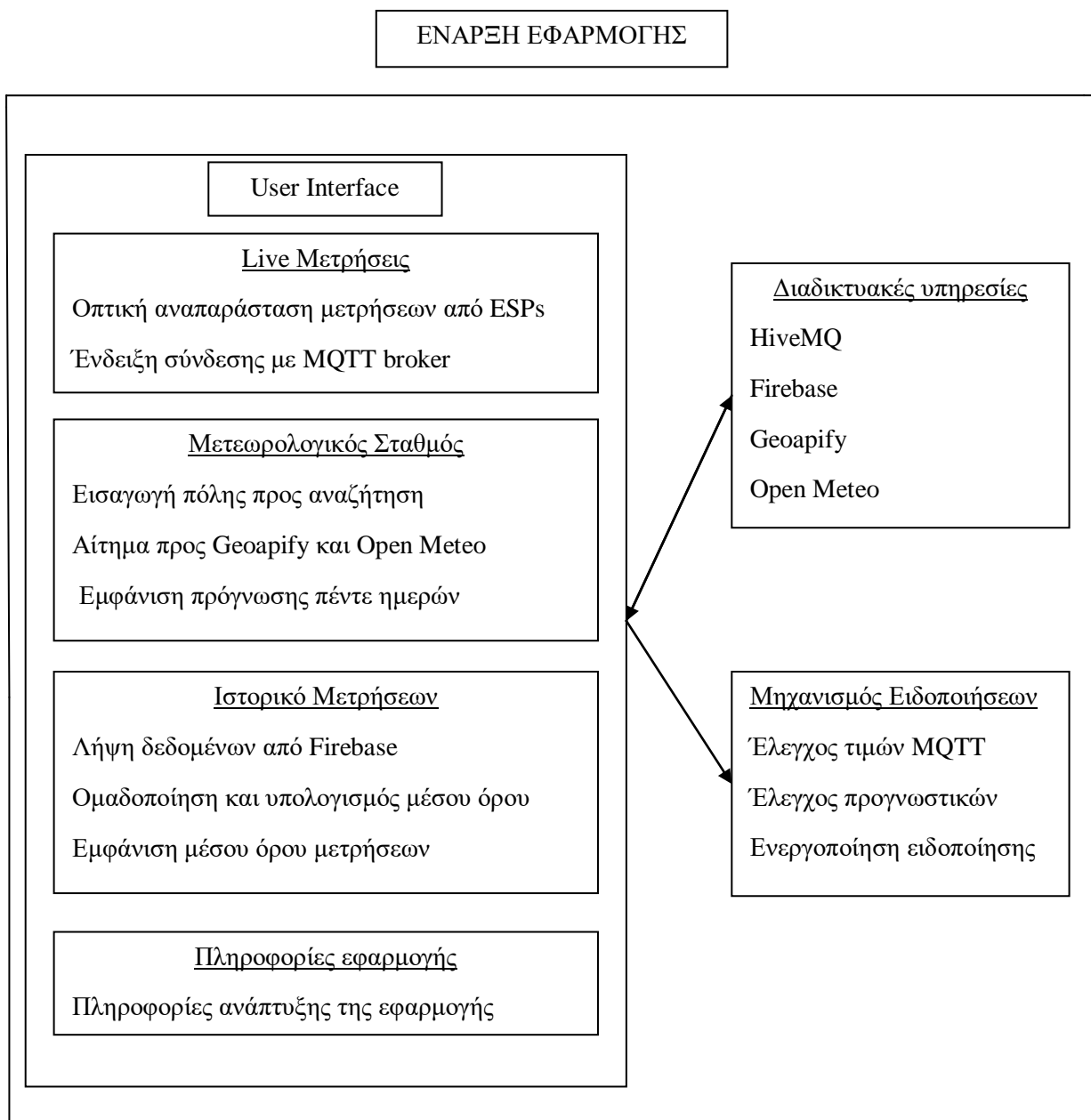
Η επικοινωνία με τον HiveMQ broker απαιτεί την κατάλληλη ενσωμάτωση της βιβλιοθήκης Eclipse Paho η οποία ενσωματώνεται σε μια ειδική κλάση μέσα στον κώδικα. Η κλάση αυτή είναι υπεύθυνη για την σύνδεση με τον διακομιστή, για την εγγραφή στο κατάλληλο topic από όπου δέχεται και διαχειρίζεται κατάλληλα τα εισερχόμενα πακέτα. Η λήψη των νέων JSON μηνυμάτων οδηγεί στην άμεση ενημέρωση της διεπαφής της εφαρμογής, η λειτουργία των μηχανισμών της Kotlin επιτρέπουν στο UI να ανταποκρίνεται στις εσωτερικές μεταβολές της κατάστασης χωρίς να χρειάζεται χειροκίνητη ενημέρωση.

Παράλληλα, η εφαρμογή ενσωματώνει λειτουργία ανάκτησης ιστορικού μετρήσεων από την βάση Firebase. Η εφαρμογή μπορεί και επικοινωνεί με την βάση μέσω του επίσημων εργαλείων ανάπτυξης του Firebase, πραγματοποιώντας ερωτήματα που αναζητούν τις συλλογές των τελευταίων ημερών. Λαμβάνει τα αρχεία που έχουν δημιουργηθεί από τον Master esp, δημιουργεί τον μέσω όρο των προηγούμενων ημερών και παρουσιάζει τις τιμές στον χρήστη με τρόπο που διευκολύνει την αξιολόγηση των ημερήσιων τάσεων και μεταβολών στις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Για την λειτουργία πρόγνωσης του καιρού ενσωματώθηκαν δύο ανεξάρτητες διαδικτυακές υπηρεσίες, το Geoapify και το Open Meteo. Το Geoapify χρησιμοποιείται για την μετατροπή την πόλης που εισάγει ο χρήστης σε γεωγραφικές συντεταγμένες, ενώ το Open Meteo λαμβάνει τις συντεταγμένες και επιστρέφει προγνωστικά στοιχεία για την επόμενες πέντε ημέρες. Η επικοινωνία με τα APIs πραγματοποιείται μέσω HTTP αιτημάτων τα οποία διαμορφώνονται και αποστέλλονται ασύγχρονα μεταξύ τους. Η λύση αυτή εξασφαλίζει πως η εφαρμογή θα παραμένει πλήρως λειτουργική και θα ανταποκρίνεται ομαλά στις απαιτήσεις του χρήστη, ακόμα και την στιγμή όπου πραγματοποιούνται πολλαπλές κλήσεις προς εξωτερικές υπηρεσίες.

Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό της εφαρμογής είναι το ενσωματωμένο σύστημα ειδοποιήσεων. Η εφαρμογή διαθέτει έναν μηχανισμό ο οποίος παρακολουθεί τις τιμές που λαμβάνονται από τον HiveMQ και παράγει ειδοποιήσεις σε περιπτώσεις όπου οι μετρήσεις ξεπερνούν ορισμένα όρια (Βλέπε πίνακας 1.1, Σελ. 15). Ο μηχανισμός αυτός λειτουργεί με χρονικό περιορισμό με σκοπό να αποφεύγονται φαινόμενα συνεχόμενων ειδοποιήσεων για κάθε ενημέρωση των δεδομένων μιας συνθήκης. Με αυτόν τον τρόπο η εφαρμογή πέρα από τον ρόλο της παθητικής προβολής των δεδομένων, φροντίζει να ενημερώνει άμεσα τον χρήστη για επικίνδυνες συνθήκες.

Στο σχεδιάγραμμα 3.5 παρακάτω παρουσιάζεται συνολική αρχιτεκτονική και η λογική της λειτουργίας της εφαρμογής. Στις παρακάτω υποενότητες θα εμβαθύνουμε στον σχεδιασμό του UI και τον τρόπο που ενσωματώθηκαν οι λειτουργίες και οι διαδικτυακές υπηρεσίες.



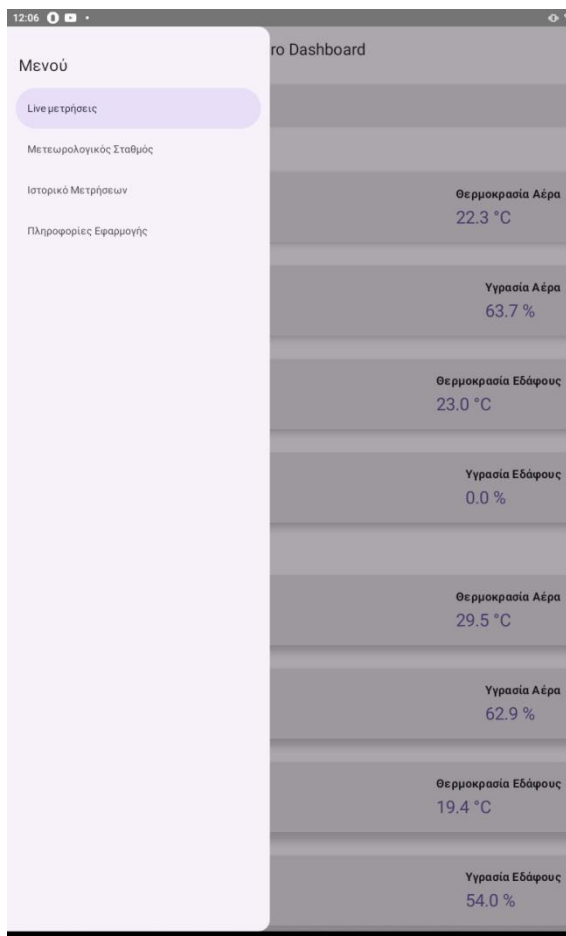
Σχήμα 3.5: Αρχιτεκτονική λειτουργίας της εφαρμογής

3.5.2 Διεπαφή χρήστη

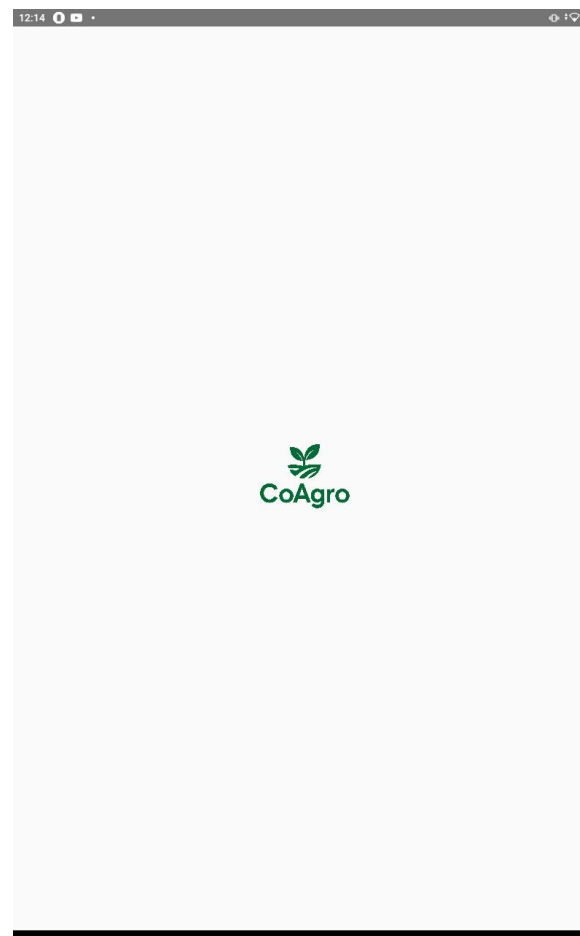
Η διεπαφή χρήστη της εφαρμογής έχει σχεδιαστεί με τρόπο ώστε να παρέχει άμεση πρόσβαση σε όλες τις λειτουργίες του συστήματος, ενώ παράλληλα παραμένει απλή και εύχρηστη. Η ανάπτυξη πραγματοποιήθηκε με την χρήση του Jetpack Compose όπου επιτρέπει την δημιουργία δυναμικών στοιχείων διεπαφής. Έτσι, κάθε αλλαγή που συμβαίνει στα δεδομένα των αισθητήρων ή στις διαδικτυακές υπηρεσίες, αντικατοπτρίζεται αυτόματα στην οθόνη χωρίς να απαιτείται χειροκίνητη ανανέωση από τον χρήστη.

Το περιβάλλον της εφαρμογής ακολουθεί αρχιτεκτονική πολλαπλών οθονών, οι οποίες οργανώνονται ανάλογα με τον σκοπό της κάθε λειτουργίας και την πηγή των δεδομένων. Η πλοήγηση μεταξύ των οθονών γίνεται μέσω ενός πλαϊνού μενού, το οποίο προσφέρει άμεση πρόσβαση στις τέσσερις κύριες ενότητες της εφαρμογής. Στην εικόνα 3.8 παρουσιάζεται η δομή του μενού πλοήγησης.

Κατά την εκκίνηση της εφαρμογής εμφανίζεται ένα σύντομο splash screen στο οποίο παρουσιάζεται το όνομα και το λογότυπο της εφαρμογής(εικόνα 3.9). Αμέσως μετά, ο χρήστης βρίσκεται αυτόματα στην οθόνη των Live Μετρήσεις, όπου εμφανίζονται σε πραγματικό χρόνο οι μετρήσεις των αισθητήρων. Αριστερά επάνω βρίσκεται το κουμπί πλοήγησης με τις 4 βασικές οθόνες της εφαρμογής, την οθόνη των Live Μετρήσεων, του Μετεωρολογικού Σταθμού, του Ιστορικού μετρήσεων και την σελίδα πληροφοριών της εφαρμογής.



Εικόνα 3.8:Μενού πλοήγησης



Εικόνα 3.9: Splash Screen

Στις επόμενες υποενότητες αναλύονται μεμονωμένα οι διαφορετικές οθόνες και παρουσιάζονται οι λειτουργίες της εφαρμογής ανά ενότητα.

3.5.3 Οθόνη Live Μετρήσεων

Η οθόνη Live μετρήσεων αποτελεί τον πυρήνα της λειτουργίας της εφαρμογής, καθώς σε αυτήν παρουσιάζονται σε πραγματικό χρόνο τα δεδομένα που προέρχονται από τους αισθητήρες των κόμβων Master και Slave ESP. Η σελίδα αυτή παρέχει άμεση εποπτεία στον χρήστη για τις τιμές που αφορούν τις συνθήκες του εδάφους και του αέρα. Η σχεδίαση έχει γίνει με στόχο την ευκολία της ανάγνωσης, της λειτουργικότητας και της άμεσης απόκρισης σε μεταβολές των τιμών.

Η οθόνη χωρίζεται σε οριζόντιες ενότητες οι οποίες οργανώνονται με σκοπό την εύκολη διάκριση των μετρήσεων του Master esp από του Slave esp. Στο επάνω μέρος την οθόνης εμφανίζεται μια καρτέλα κατάστασης που ενημερώνει τον χρήστη σχετικά με την κατάσταση σύνδεσης της εφαρμογής με τον MQTT broker. Η ένδειξη 'Συνδεδεμένο με MQTT' ή 'Αποσυνδεδεμένο' αναγράφεται με μπλε ή κόκκινο χρώμα αντίστοιχα(εικόνα 3.10), προσφέροντας άμεση και ευκολότερη οπτική ενημέρωση για την κατάσταση της σύνδεσης του συστήματος.



Εικόνα 3.10: Ένδειξη σύνδεσης MQTT

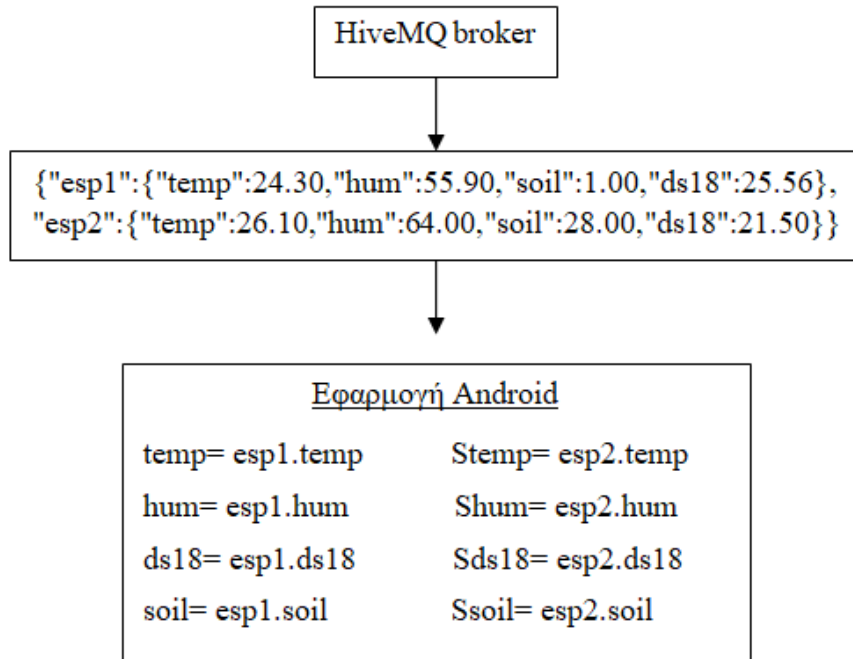
Ακολουθούν οι δυο ενότητες που αφορούν τις μετρήσεις των αισθητήρων. Πρώτα παρουσιάζονται οι μετρήσεις του Master κόμβου ο οποίος στο πλαίσιο της εργασίας είναι αυτός που συλλέγει πραγματικές μετρήσεις από τον ελαιώνα. Κάθε μέτρηση προβάλλεται σε ξεχωριστή καρτέλα όπου δεξιά αναγράφεται η τιμή της μέτρησης και ο τίτλος, ενώ στα αριστερά περιλαμβάνεται ένας κυκλικός δείκτης προόδου. Η οπτική αναπαράσταση αυτή προσφέρει άμεση κατανόηση της μεταβολής ανάμεσα στις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις και δίνει την αίσθηση μιας πιο δυναμικής αναπαράστασης των τιμών.

Η ίδια λογική ακολουθείται και για τις μετρήσεις του Slave κόμβου, όπου τα δεδομένα του προβάλλονται στην αντίστοιχη καρτέλα ακριβώς από κάτω. Με αυτόν τον διαχωρισμό γίνεται η διάκριση των μετρήσεων ανά κόμβο, αλλά καθιστά και την εύκολη σύγκριση των μεταξύ τους τιμών για πιθανές διαφορές. Οι διαφορές των δύο συσκευών σε πραγματικές συνθήκες, μεταφράζονται ως διαφορές στις συνθήκες μεταξύ δύο σημείων μέσα στον ελαιώνα.

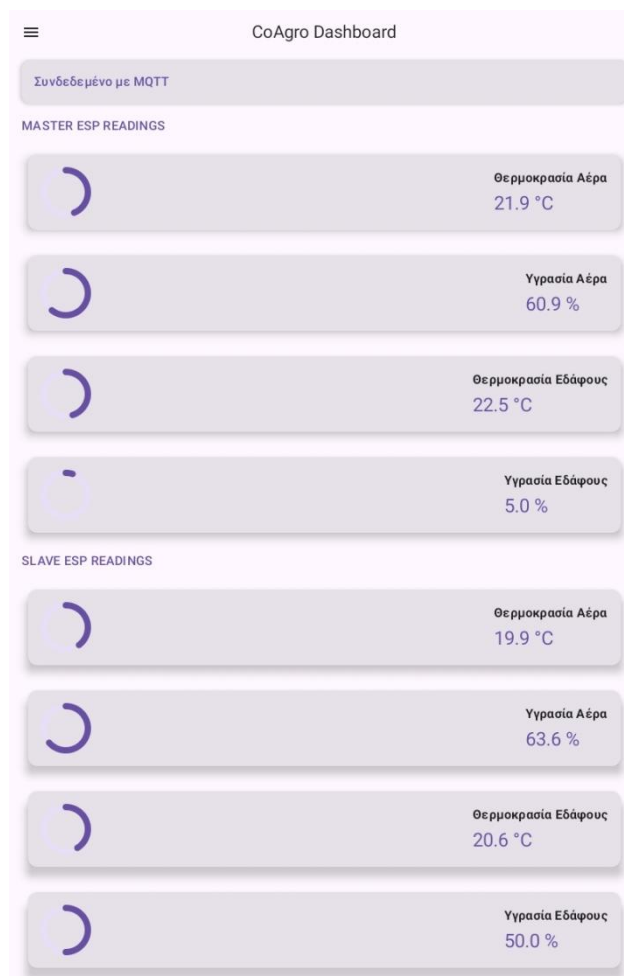
Στην εικόνα 3.11 της επόμενης σελίδας, φαίνεται η οθόνη Live Μετρήσεις με τις χωριστές ενότητες ανά συσκευή καθώς και ο τρόπος αναπαράστασης των μετρήσεων από τους αισθητήρες του κάθε ESP.

Τέλος, ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της οθόνης αυτής είναι η πλήρως αντιδραστική και δυναμική συμπεριφορά της. Η εφαρμογή δέχεται τις τιμές των αισθητήρων μέσω την κλάσης MqttManager η οποία διαθέτει μια κατάσταση ροής. Έτσι, αποθηκεύει κάθε φορά τα πιο πρόσφατα δεδομένα που έχει λάβει από τον HiveMQ broker. Κάθε φορά που ένα νέο πακέτο JSON λαμβάνεται από τον broker η εφαρμογή το αναλύει και ενημερώνει τις εσωτερικές του τιμές, λόγω της δυναμικής λειτουργίας το UI ενημερώνει αυτόματα την οθόνη και προβάλλει τις νεότερες τιμές στον χρήστη.

Στο σχήμα 3.6 φαίνεται η τεχνική συμπεριφορά της εφαρμογής, καθώς αναλύει το μήνυμα του MQTT broker και ενημερώνει μέσα από τα δεδομένα του τις τοπικές μεταβλητές, που αφορούν τις μετρήσεις των αισθητήρων των δύο ESP.



Σχήμα 3.6: Μετατροπή MQTT μηνύματος σε μεταβλητές



Εικόνα 3.11: Οθόνη Live Μετρήσεις

3.5.4 Οθόνη Μετεωρολογικού σταθμού

Η οθόνη μετεωρολογικός σταθμός έχει σχεδιαστεί με σκοπό να προσφέρει τον χρήστη μια ολοκληρωμένη εικόνα των επικείμενων καιρικών συνθηκών, στην περιοχή ενδιαφέροντος που αυτός εισάγει. Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες λειτουργίες της εφαρμογής, όπου επικεντρώνονται στα δεδομένα που προέρχονται από τις μετρήσεις των αισθητήρων, η παρούσα λειτουργία βασίζεται σε εξωτερικά δεδομένα πρόγνωσης καιρού. Η προσθήκη αυτής την δυνατότητας προσφέρει ιδιαίτερα σημαντικές πληροφορίες στον χρήστη, καθώς στο αγροτικό περιβάλλον οι καιρικές μεταβολές αποτελούν βασικό παράγοντα για την σωστή ανάπτυξη της καλλιέργειας. Με βάση των επίγνωση των καιρικών συνθηκών, ο ελαιοπαραγωγός έχει την δυνατότητα να λάβει σωστές αποφάσεις και να προνοήσει για την ασφάλεια των ελαιόδεντρών του.

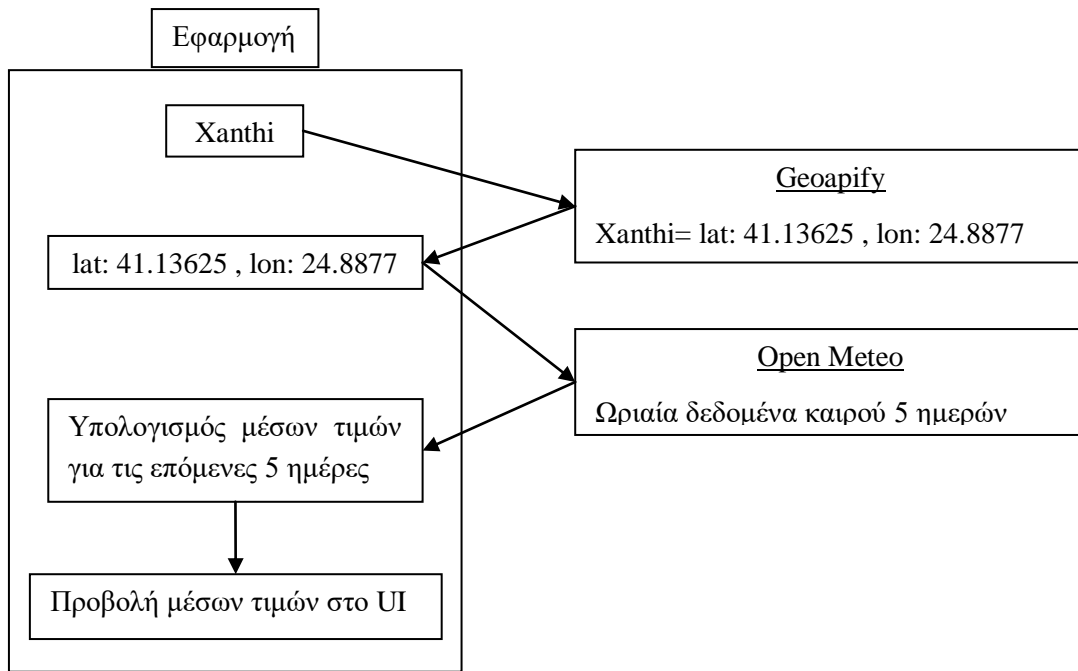
Κατά την είσοδο στην οθόνη, ζητείται από τον χρήστη να εισάγει την πόλη ή την περιοχή ενδιαφέροντος. Αφού γίνει αυτό, η εφαρμογή ξεκινάει μια διαδικασία δύο σταδίων στο παρασκήνιο, ώστε να εντοπίσει τις ακριβείς γεωγραφικές συντεταγμένες και να λάβει τα προγνωστικά δεδομένα των επόμενων ημερών.

Στο πρώτο στάδιο γίνεται κλήση στο Georify API, μια διαδικτυακή υπηρεσία που είναι υπεύθυνη για την εξαγωγή του γεωγραφικού πλάτους και του γεωγραφικού μήκους της περιοχής που έχει πληκτρολογήσει ο χρήστης. Η υπηρεσία επιστρέφει ένα αναλυτικό μήνυμα JSON που περιλαμβάνει όλες τα πιθανά ζεύγη συντεταγμένων που ταιριάζουν με το όνομα που εισήγαγε ο χρήστης. η εφαρμογή επιλέγει το πρώτο και πιο έγκυρο αποτέλεσμα και προχωράει στο δεύτερο στάδιο, το οποίο αφορά την λήψη πραγματικών καιρικών προγνωστικών δεδομένων[66].

Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται η κλήση στον Open Meteo API, μια υπηρεσία που έχει σχεδιαστεί αποκλειστικά για την παροχή μετεωρολογικών προβλέψεων και δεδομένων. Η εφαρμογή στέλνει τις συντεταγμένες που έλαβε από το Georify και ζητάει από την υπηρεσία να στείλει ωριαίες τιμές θερμοκρασίας, υγρασίας, νεφοκάλυψης, βροχόπτωσης και χιονόπτωσης για τις επόμενες 5 ημέρες. Η υπηρεσία στέλνει ένα μήνυμα JSON που περιλαμβάνει αναλυτικές τιμές για τις παραμέτρους που ζητήθηκαν[67]. Η εφαρμογή στην συνέχεια, επεξεργάζεται τα δεδομένα που έλαβε στο παρασκήνιο με σκοπό να προβάλει στην οθόνη του χρήστη χρήσιμες πληροφορίες. Για κάθε ημέρα υπολογίζεται ο μέσος όρος της θερμοκρασίας, της υγρασίας, της νεφοκάλυψης αλλά και το ποσοστό των ωρών που προβλέπεται βροχόπτωση και χιονόπτωση. Η διαδικασία της επεξεργασίας αυτής διευκολύνει τον χρήστη καθώς βλέπει μια γενική εικόνα των προβλέψεων, αρκετή για του δώσει την απαραίτητη εικόνα που χρειάζεται.

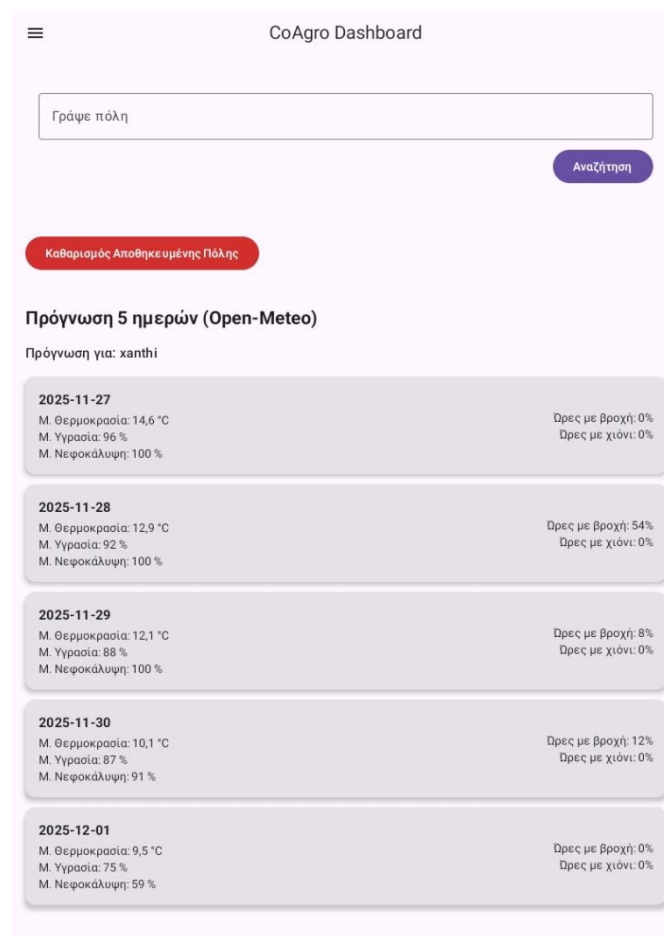
Η παρουσίαση των δεδομένων στην οθόνη γίνεται μέσα από ξεχωριστές ενότητες, όπου κάθε μια αφορά και μια ξεχωριστή ημέρα. Η κάθε ενότητα περιλαμβάνει την ημερομηνία τον μέσο όρων για τις βασικές καιρικές παραμέτρους καθώς και τα ποσοστά βροχόπτωσης και χιονόπτωσης. Η διάταξη έχει επιλεγεί με στόχο ο χρήστης να μπορεί εύκολα να διακρίνει τις καιρικές τάσεις. Τέλος, η οθόνη περιλαμβάνει και λειτουργία αποθήκευσης της τελευταίας πόλης που εισήγαγε ο χρήστης. Η τιμή αυτή αποθηκεύεται τοπικά στην συσκευή ώστε την επόμενη φορά που θα ανοίξει η οθόνη, αυτόματα η εφαρμογή θα τρέχει την διαδικασία δύο σταδίων με σκοπό να εμφανίζει τα προγνωστικά δεδομένα. Ο χρήστης, έχει την δυνατότητα να διαγράψει την αποθηκευμένη επιλογή μέσω κουμπιού ή μέσω μια νέας εισαγωγής στο πλαίσιο αναζήτησης.

Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθεί η εφαρμογή από την στιγμή εισαγωγής της πόλης από τον χρήστη, μέχρι και στο σημείο όπου γίνεται η παρουσίαση των δεδομένων στην οθόνη του χρήστη.



Σχήμα 3.7: Παράδειγμα επικοινωνίας της εφαρμογής με τα APIs

Στην εικόνα 3.12 φαίνεται το πλαίσιο αναζήτησης περιοχής για τον χρήστη, καθώς και η δομή της οθόνης με προγνωστικά δεδομένα, ως παράδειγμα για την πόλη της Ξάνθης.



Εικόνα 3.12: Οθόνη Μετεωρολογικού Σταθμού

3.5.5 Οθόνη ιστορικού των μετρήσεων

Η οθόνη ιστορικού μετρήσεων έχει σχεδιαστεί ώστε να παρέχει στον χρήστη μια ολοκληρωμένη εικόνα των μετρήσεων και των δεδομένων των αισθητήρων για τις προηγούμενες ημέρες. Ενώ η οθόνη των live μετρήσεων προβάλλει την κατάσταση του συστήματος στιγμιαία και σε πραγματικό χρόνο, η οθόνη του ιστορικού εστιάζει στην αποτύπωση των τιμών που έχουν καταγραφεί και έχουν αποθηκευτεί στην βάση δεδομένων. Μέσα από αυτή την λειτουργία μπορεί ο χρήστης να αναλύει τις μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών και να εντοπίζει μεταβολές σε βάθος ημερών.

Η λειτουργία του ιστορικού βασίζεται στην επικοινωνία της εφαρμογής με την βάση δεδομένων Firebase, από όπου αντλεί τις καταγεγραμμένες μετρήσεις των δύο esp. Στο Firebase τα δεδομένα αποτελούνται από ένα στιγμιότυπο των μετρήσεων των αισθητήρων και αποθηκεύονται ανά ημέρα. Κατά την είσοδο του χρήστη στην οθόνη του ιστορικού η εφαρμογή ανακτά αυτόματα τις μετρήσεις από τις τελευταίες πέντε ημέρες, πραγματοποιώντας αιτήματα προς το Firebase στο παρασκήνιο.

Αφού η εφαρμογή λάβει τα δεδομένα των τελευταίων πέντε ημερών, πραγματοποιεί μια επεξεργασία ώστε να υπολογίζει τον μέσο όρο των τιμών. Με βάση τις μετρήσεις που λαμβάνει για κάθε ημέρα, υπολογίζει τον μέσο όρο της θερμοκρασίας και της υγρασίας του εδάφους και του αέρα, με σκοπό να δημιουργήσει χρήσιμη πληροφορία. Έτσι, ο χρήστης δεν χρειάζεται να εξετάζει λεπτομερώς όλες τις μετρήσεις των προηγούμενων ημερών, αλλά βλέπει συνοπτικά τις συνολικές συνθήκες που επικρατούσαν κάθε μέρα. Η διαδικασία αυτή κρίθηκε απαραίτητη, καθώς σε μια ενεργή εφαρμογή σε έναν ελαιώνα τα δεδομένα ιστορικού ενδέχεται να αποτελούνται από εκατοντάδες τιμές για κάθε παράμετρο.

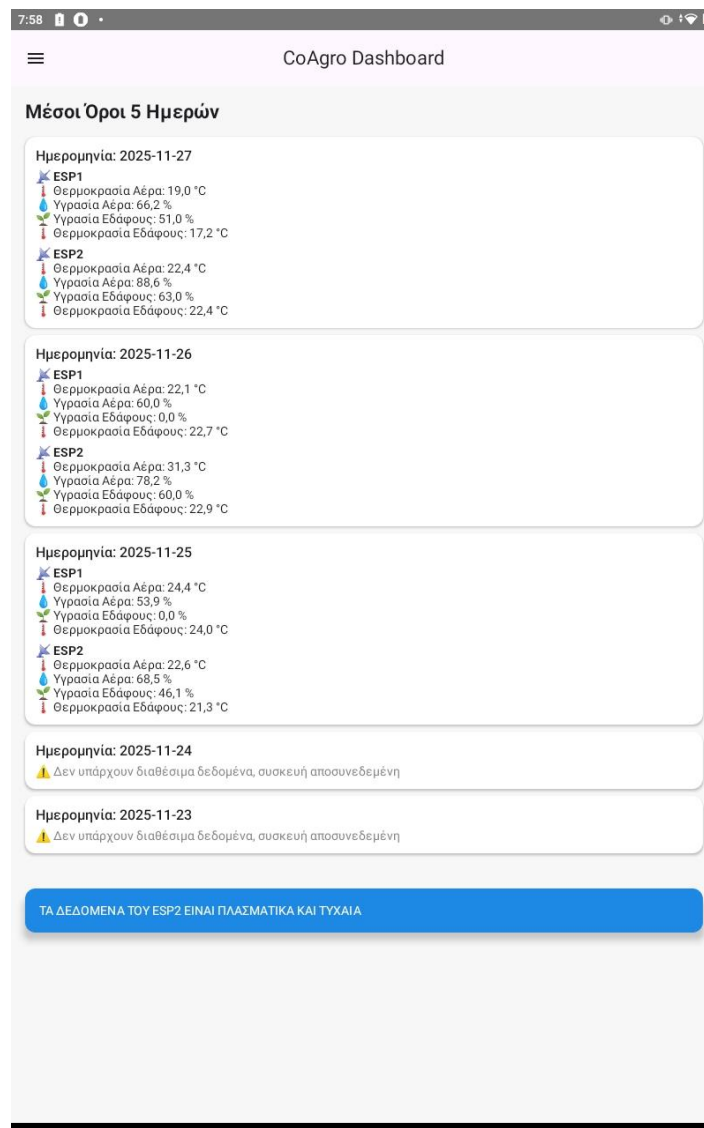
Η παρουσίαση των πληροφοριών στον χρήστη γίνεται μέσω ενός συμπλέγματος από καρτέλες, οργανωμένες ανά ημέρα. Η κάθε καρτέλα αποτελεί τις μετρήσεις μιας ημέρας, περιλαμβάνει την ημερομηνία που αντιστοιχούν οι μετρήσεις καθώς και τους μέσους όρους για κάθε μια από τις παραμέτρους. Οι κάθε ημέρα είναι ευδιάκριτα χωρισμένη από τις άλλες, προσφέροντας εύκολη ανάγνωση και σύγκριση των τιμών με τις άλλες. Οι μετρήσεις της κάθε ημέρας παρουσιάζονται χωριστά για τις τιμές από τον κάθε ένα κόμβο. Οι τιμές του esp1 αφορούν τα δεδομένα από τους αισθητήρες του Master κόμβου, ενώ οι τιμές του esp2 αφορούν τον Slave κόμβο. Επιπλέον, για το πλαίσιο της εργασίας όπου οι μετρήσεις από την esp2 είναι τυχαίες τιμές που αποστέλλει ο Slave στον Master, έχει ενσωματωθεί κατάλληλο μήνυμα στο κάτω μέρος της οθόνης.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στον χειρισμό των ημερών όπου δεν διαθέτουν αποθηκευμένα δεδομένα. Σε αυτήν την περίπτωση, όταν η συσκευή ήταν εκτός λειτουργίας, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ούτε μια αποθηκευμένη μέτρηση στον Firebase, η εφαρμογή εμφανίζει κατάλληλο μήνυμα στην αντίστοιχη καρτέλα ημέρας. Η λειτουργία αυτή εξασφαλίζει ότι η εφαρμογή θα προβάλλει σωστή και σαφή εικόνα της κατάστασης, αποφεύγοντας παρανοήσεις σχετικά με την ημέρα και την ύπαρξη δεδομένων.

Η επικοινωνία της εφαρμογής με την βάση δεδομένων, καθώς και η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται με ασύγχρονο τρόπο. Αυτό εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία της εφαρμογής κατά την διάρκεια λήψης των δεδομένων ή της δημιουργίας των μέσω τιμών. Κατά την φόρτωση των πληροφοριών, εμφανίζεται στην οθόνη μια τελίτσα που υποδεικνύει την ομαλή ροή της διαδικασίας. Μόλις ολοκληρωθεί η ανάκτηση και η επεξεργασία των δεδομένων, η οθόνη εμφανίζει άμεσα τα στοιχεία χωρίς να χρειάζεται κάποια ενέργεια από τον χρήστη.

Η συγκεκριμένη οθόνη αποτελεί σημαντικό εργαλείο για το σύνολο της εφαρμογής, προσφέρει μια γενική εικόνα της πορείας των καιρικών μεταβολών στον ελαιώνα. Σε αντίθεση με την προβολή συνθηκών σε πραγματικό χρόνο, μέσα από το ιστορικό παρουσιάζεται μια συνολική εικόνα για την καλλιέργεια. Αυτό δίνει την δυνατότητα στον παραγωγό να κατανοεί και να επιτηρεί τις μεταβολές, για παράδειγμα στην θερμοκρασία ή στη υγρασία του εδάφους και να εντοπίζει πιθανές παράξενες συνθήκες. Συνολικά η ενσωμάτωση ιστορικού μετρήσεων ενισχύει σημαντικά την λειτουργικότητα της εφαρμογής και δίνει δυνατότητες για σωστή και ολοκληρωμένη παρακολούθηση των δέντρων.

Στην εικόνα 3.13 φαίνεται η οθόνη του ιστορικού μετρήσεων, όπως ακριβώς εμφανίζεται στον χρήστη. Συμπεριλαμβάνονται ημέρες όπου δεν υπήρξαν αποθηκευμένες μετρήσεις, καθώς και το μήνυμα που εμφανίζει η εφαρμογή σε αυτήν την περίπτωση.

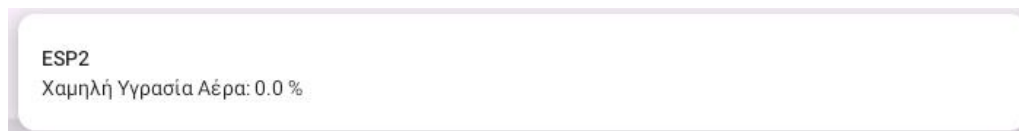


Εικόνα 3.13: Οθόνη Ιστορικού μετρήσεων

3.5.6 Μηχανισμός ειδοποιήσεων

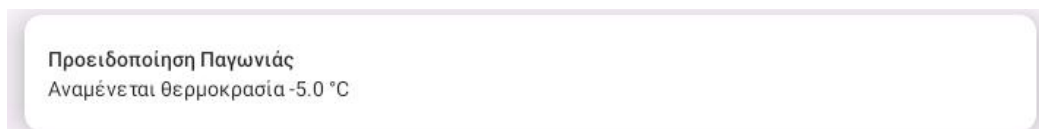
Ο μηχανισμός ειδοποιήσεων που έχει ενσωματωθεί στην λειτουργία της εφαρμογής, έχει ως στόχο να ενημερώνει άμεσα τον χρήστη για τυχόν επικίνδυνες ή ασυνήθιστες τιμές. Σε ένα σύστημα παρακολούθησης των συνθηκών σε μια καλλιέργεια η έγκαιρη προειδοποίηση είναι εξίσου σημαντική με της σωστές και ακριβείς μετρήσεις. Για αυτό τον λόγο, η εφαρμογή περιλαμβάνει έναν πλήρως αυτόνομο μηχανισμό ειδοποιήσεων όπου επιβλέπει τις τιμές που λαμβάνονται μέσω MQTT ή μέσω των καιρικών προγνώσεων με σκοπό την άμεση ενημέρωση του χρήστη.

Η διαδικασία ξεκινάει από την στιγμή όπου η εφαρμογή θα λάβει ένα νέο JSON από τον HiveMQ broker. Το μήνυμα αυτό αποτελείται από τις νέες μετρήσεις των δύο κόμβων που βρίσκονται στον ελαιώνα. Μετά από ανάλυση του μηνύματος ο μηχανισμός ειδοποιήσεων αξιολογεί ξεχωριστά κάθε παράμετρο, συγκρίνοντας την με τα όρια που έχουν ενσωματωθεί στο σύστημα. Τα όρια έχουν αναλυθεί έπειτα από βιβλιογραφική αναζήτηση και αναγράφονται συνοπτικά στον πίνακα 1.1 της σελίδας 4. Όταν ο μηχανισμός εντοπίσει μια τιμή που ξεπερνάει τα προκαθορισμένα όρια, ενεργοποιεί άμεσα μια ειδοποίηση στην συσκευή Android του χρήστη. Η ειδοποίηση εμφανίζεται ως αναδυόμενο μήνυμα στην μπάρα ειδοποιήσεων της συσκευής και περιλαμβάνει το είδος της ειδοποίησης καθώς και την τιμή όπου προκάλεσε την ενεργοποίησή της. Παράδειγμα αν η τιμή της υγρασίας αέρα στον κόμβο esp2 είναι κάτω από 30% εμφανίζεται το αντίστοιχο μήνυμα στην ειδοποίηση, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.14.



Εικόνα 3.14:Ειδοποίηση από τιμή αισθητήρα

Εκτός από την ανάλυση των τιμών από τους αισθητήρες, ο μηχανισμός παρακολουθεί και τις καιρικές προγνώσεις που λαμβάνει από το Open Meteo. Μετά την λήψη των δεδομένων από το API, η εφαρμογή εξετάζει τις τιμές των επόμενων ημερών και παράγει ειδοποίηση σε περίπτωση που προβλέπονται επικίνδυνα καιρικά φαινόμενα. Αυτό δίνει την δυνατότητα στην εφαρμογή να μπορεί να δώσει ενημέρωση έγκαιρα στον ελαιοπαραγωγό σε περιπτώσεις που προβλέπεται παγετός, έντονη βροχόπτωση ή χιονόπτωση. Για παράδειγμα σε περίπτωση που ο μηχανισμός ειδοποιήσεων εντοπίσει πρόβλεψη θερμοκρασίας υπό τους 0°C, εμφανίζει μήνυμα στον χρήστη και τον ενημερώνει ότι αναμένονται χαμηλές θερμοκρασίες(εικόνα 3.15).



Εικόνα 3.15:Ειδοποίηση από πρόγνωση του Open Meteo

Τέλος είναι σημαντικό να σημειωθεί, κατά την λειτουργία της εφαρμογής οι τιμές στην οθόνη Live μετρήσεων ανανεώνονται ανά λίγα δευτερόλεπτα. Για να διαχειριστεί η εφαρμογή φαινόμενα πολλαπλών ίδιων ειδοποιήσεων από μια παράμετρο, περιλαμβάνει χρονικό περιορισμό ώστε να αποτρέπει την επανεμφάνιση της ίδιας ειδοποίησης μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Έτσι, μια μέτρηση για χαμηλή θερμοκρασία αέρα στον κόμβο esp1 θα προκαλεί μια ειδοποίηση ανά πέντε λεπτά αντί για μια κάθε δέκα δευτερόλεπτα όπου θα ανανεώνεται από την νέα λήψη μετρήσεων. Με αυτόν τον τρόπο η εφαρμογή εξασφαλίζει την άμεση ενημέρωση του χρήστη, χωρίς να προκαλείται υπερφόρτωση ειδοποιήσεων.

3.6 Συνολική λειτουργία του συστήματος

Το σύστημα αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας και συνδυάζει την τεχνολογίες ασύρματων αισθητήρων, υπηρεσιών cloud, διαχείρισης δεδομένων και ανάπτυξη εφαρμογής Android. Στόχος είναι η δημιουργία ενός συστήματος που παρέχει ολοκληρωμένη παρακολούθηση και ανάλυση των περιβαλλοντικών συνθηκών σε έναν ελαιώνα. Η συνολική λειτουργία του συστήματος στηρίζεται στην αλληλεπίδραση των δύο esp κόμβων, την επικοινωνία με τις διαδικτυακές πλατφόρμες HiveMQ και Firebase αλλά και στην εφαρμογή Android. Όλα τα στάδια του συστήματος συνδυάζονται για να υποστηρίξουν μια αδιάκοπη και πλήρως αυτοματοποιημένη λειτουργία, που προσφέρει δυνατότητες άμεσης αλλά και μακροχρόνιας παρακολούθησης.

Επιγραμματικά, η λειτουργία ξεκινάει από τους δύο κόμβους esp οι οποίοι βρίσκονται στον ελαιώνα, τοποθετημένοι σε σημεία κοντά στην ρίζα των δέντρων. Η ύπαρξη δύο κόμβων προσφέρει μια ολοκληρωμένη εικόνα της καλλιέργειας, όπου οι μετρήσεις βασίζονται σε δύο ξεχωριστά και απομακρυσμένα σημεία. Ο κάθε κόμβος διαθέτει τους βασικούς αισθητήρες με σκοπό την μέτρηση των συνθηκών στο σημείο όπου είναι τοποθετημένοι. Στην συνέχεια, η ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των δύο esp επιτρέπει στον κόμβο slave να κοινοποιήσει τα δεδομένα που έχει συλλέξει στον master, από όπου γίνεται η κοινοποίηση όλων των μετρήσεων στο διαδίκτυο.

Από πλευρά διαδικτύου, τα δεδομένα κοινοποιούνται σε δύο ξεχωριστές υπηρεσίες cloud, όπου η κάθε μια εξυπηρετεί διαφορετικό σκοπό στην συνολική λειτουργία του συστήματος. Η υπηρεσία HiveMQ είναι υπεύθυνη για την κοινοποίηση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, βασίζεται στο πρωτόκολλο MQTT Publish/Subscribe. Ο Master κόμβος δημιουργεί δημοσιεύσεις σε ένα συγκεκριμένο topic κάθε δέκα δευτερόλεπτα, γράφοντας τις τιμές από του αισθητήρες όλων των κόμβων. Η ενσωμάτωση της βάσης δεδομένων Firebase προσφέρει στο σύστημα την δυνατότητα μόνιμης αποθήκευσης δεδομένων. Κάθε πέντε λεπτά ο master esp εκτελεί μια διαδικασία κοινοποίησης των μετρήσεων και στην βάση δεδομένων, εκεί δημιουργείται κατάλληλο αρχείο ανά ημέρα όπου αποθηκεύονται ξεχωριστά αρχεία μετρήσεων. Το όνομα του κάθε αρχείου μετρήσεων δείχνει και την χρονική στιγμή όπου δημιουργήθηκε με σκοπό την σωστή κατανομή των δεδομένων.

Από την πλευρά της εφαρμογής, είναι υπεύθυνη για την προβολή όλων των δεδομένων στον τελικό χρήστη. Διαθέτει τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες, η πρώτη αφορά την παρουσίαση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο μέσω του MQTT. Η εφαρμογή κάνει subscribe στο κατάλληλο topic ώστε να λάβει τα δεδομένα των αισθητήρων. Η δεύτερη κατηγορία δεν συνδυάζεται με δεδομένα από τους αισθητήρες, αλλά δέχεται προγνωστικά δεδομένα για τον καιρό από της διαδικτυακή υπηρεσία Open Meteo. Σε αυτή την κατηγορία ο χρήστης μπορεί να έχει εικόνα των επερχόμενων καιρικών συνθηκών στον τόπο της καλλιέργειας. Στην τρίτη κατηγορία παρουσιάζεται το πλήρες ιστορικό των μετρήσεων για τις τελευταίες πέντε ημέρες. Η εφαρμογή λαμβάνει τα δεδομένα που είναι αποθηκευμένα στην βάση Firebase και πραγματοποιεί μια επεξεργασία ώστε να δώσει μια γενική αλλά χρήσιμη εικόνα των περιβαλλοντικών συνθηκών στον ελαιώνα. Τέλος, υπάρχει μια τέταρτη οθόνη ενσωματωμένη στην εφαρμογή όπου παραθέτει λίγες πληροφορίες για την εφαρμογή και το πλαίσιο για το οποίο δημιουργήθηκε.

Συνοψίζοντας, η γενική λειτουργία του συστήματος περιγράφεται αναλυτικά σε όλη την τρίτη ενότητα της εργασίας. Το σύνολο της εφαρμογής, των αισθητήρων και των υπηρεσιών cloud δημιουργούν μια ολοκληρωμένη εφαρμογή που μπορεί να υποστηρίξει τον παραγωγό στην διαδικασία της καλλιέργειας νέων, αλλά και ώριμων, ελαιόδεντρων.

3.7 Δοκιμές και παρατηρήσεις

Για την αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τόσο σε πραγματικές συνθήκες σε χώρο καλλιέργειας, όσο και σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Στόχος των δοκιμών είναι η εξέταση και η αξιολόγηση της σταθερότητας των κόμβων, η επιτήρηση συμπεριφοράς της εφαρμογής Android και η συνέπεια κοινοποίησης των δεδομένων στις υπηρεσίες cloud. Η πιο βασική ιδιαιτερότητα που παρατηρήθηκε αφορά κατασκευαστικά τον ίδιο τον ESP32 μικροελεγκτή. Για την επιτυχή λειτουργία του Master esp, κατά την πρώτη εκκίνηση απαιτείται το πάτημα του πλήκτρου boot που διαθέτει επάνω του. Ένα εργοστασιακό σφάλμα τον αποτρέπει από τον να κάνει φυσιολογική εκκίνηση με αποτέλεσμα να μην τρέχει ο κώδικας, παρόλα αυτά, με την χρήση του πλήκτρου boot λειτουργεί κάθε φορά φυσιολογικά.

Οι αρχικές δοκιμές αποτελούσαν οδηγό για την ρύθμιση των esp, των χρόνων που θα εκτελούν αποστολές δεδομένων αλλά και την μορφή που θα έχουν τα μηνύματα. Το διάστημα που πραγματοποιεί κοινοποίηση ο Slave esp32 αποδείχθηκε πως πρέπει να είναι μικρότερος από τον χρόνο όπου ο Master esp32 στέλνει τα δεδομένα με MQTT. Αυτό έγινε καθώς σε περιπτώσεις απώλειας ενός πακέτου στην ESP NOW επικοινωνία, το επόμενο πακέτο στον HiveMQ συμπεριλάμβανε μηδενικές μετρήσεις για τον Slave κόμβο καθώς περνούσε το χρονικό όριο που έχει ρυθμιστεί.

Για την μόνιμη αποθήκευση αρχικά εφαρμόστηκε τοπική αποθήκευση στην συσκευή όπου είναι εγκατεστημένη η εφαρμογή Android, απευθείας από τον HiveMQ. Η ενσωμάτωση της διαδικτυακής υπηρεσίας Firebase όμως επέτρεψε στο σύστημα να μπορεί να αποθηκευθεί μετρήσεις ακόμα και στις περιπτώσεις όπου η κινητή συσκευή παρέμενε ανενεργή. Επίσης, στην λειτουργία των προγνωστικών καιρού, αρχικά ενσωματώθηκε λειτουργία του αυτόματου εντοπισμού μέσω του GPS της κινητής συσκευής. Αυτό άλλαξε σε χειροκίνητη εισαγωγή της τοποθεσίας καθώς η γεωγραφική θέση των esp συστημάτων, μπορεί σε περιπτώσεις να απέχει πολλά χιλιόμετρα από την θέση του κινητού. Αυτό έλυσε το πρόβλημα λανθασμένων πληροφοριών καιρού λόγω της γεωγραφικής απόστασης.

Πραγματοποιήθηκαν επίσης δοκιμές αξιοπιστίας σε συνθήκες σταδιακής απομάκρυνσης των δύο esp32 κόμβων με σκοπό την μέτρηση της μέγιστης φυσικής απόστασης στην οποία μπορούν να διατηρήσουν σύνδεση. Θεωρητικά το πρωτόκολλο ESP NOW μπορεί να προσφέρει σταθερή επικοινωνία σε απόσταση 150 μέτρων σε αγροτικό περιβάλλον. Μέσα από δοκιμή που πραγματοποιήθηκε σε απομακρυσμένο σημείο μακριά από παρεμβολές, παρατηρήθηκε επιτυχής μετάδοση δεδομένων μέχρι και στα 100 μέτρα. Το ίδιο πείραμα εφαρμόστηκε συγκεκριμένα στον Master κόμβο όπου διατηρεί σύνδεση με WiFi, με σκοπό την παρατήρηση της συμπεριφοράς του σε περίπτωση αποσύνδεσης και επανασύνδεσης. Ο Master ESP32 ανταποκρίθηκε σταθερά και πραγματοποίησε αυτόματα επανασύνδεση μόλις αποκαταστάθηκε η κάλυψη WiFi. Τέλος, οι δύο κόμβοι αρχικά είχανε δυσκολία στην μεταξύ τους επικοινωνία. Για την λύση αυτού του προβλήματος, ο Slave κόμβος κατά την εκκίνηση του συγχρονίζει το κανάλι του με αυτό του WiFi router που θα συνδεθεί ο Master. Μετά από αυτήν την αλλαγή η σύνδεση ήταν πολύ σταθερή και υπήρχαν λίγες έως μηδενικές απώλειες πακέτων.

Τέλος, αλλαγές γίνανε και στην λειτουργία των ειδοποιήσεων της android εφαρμογής. Στην αρχή, ερχόντουσαν πολλαπλές ειδοποιήσεις κάθε φορά που γινόταν ενημέρωση μιας παραμέτρου από το MQTT μήνυμα. Στην συνέχεια για την αποφυγή αυτού του φαινομένου, προστέθηκαν ονομασίες σε κάθε ένα είδος ειδοποίησης και εφαρμόστηκε χρονόμετρο όπου αποτρέπει την επανεμφάνιση της ίδιας ειδοποίησης για πέντε λεπτά.

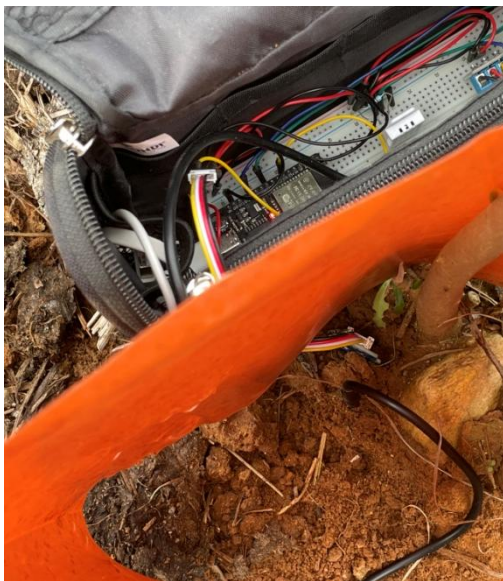
Το πείραμα εκτελέστηκε σε έναν ελαιώνα με νεαρά δέντρα, ηλικίας λίγο μεγαλύτερα από ενός έτους. Το χωράφι βρίσκεται στο χωριό Πέρνη του νομού Καβάλας και επιλέχθηκε καθώς βρίσκεται σε κοντινή απόσταση και δόθηκε άδεια από τον ιδιοκτήτη να πραγματοποιηθεί το πείραμα των μετρήσεων. Το υψόμετρο του ελαιώνα ανέρχεται στα 70 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας.

Η έκταση του ελαιώνα ανέρχεται στα 4.000 τετραγωνικά μέτρα περίπου και αποτελείται από 150 ρίζες περίπου. Διαθέτει 9 σειρές δέντρων όπου η κάθε μια έχει 17 δέντρα, με την απόσταση ανάμεσα στα δέντρα να είναι περίπου στα 5 μέτρα. Ο κόμβος Master συνδέθηκε στην ακριανή σειρά στον ελαιώνα, φροντίζοντας να μην υπάρχουν σκιές από διπλανά δέντρα. Στην εικόνα 3.16 φαίνεται ο ελαιώνας όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.



Εικόνα 3.16: Ελαιώνας όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις

Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στον τρόπο τοποθέτησης των αισθητήρων στο έδαφος ώστε οι μετρήσεις να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβείς γίνεται. Οι αισθητήρες υγρασίας και θερμοκρασίας εδάφους τοποθετήθηκαν κοντά στον κορμό του ελαιόδεντρου (Εικόνα 3.17) και ο αισθητήρας υγρασίας και θερμοκρασίας αέρα, μαζί με την συσκευή σε μια αδιάβροχη θήκη που είχε ικανοποιητικό αερισμό. Επίσης στην εικόνα 3.18 φαίνεται από κοντά το νεαρό ελαιόδεντρο και η τοποθετημένη συσκευή.



Εικόνα 3.17: Τοποθέτηση αισθητήρων



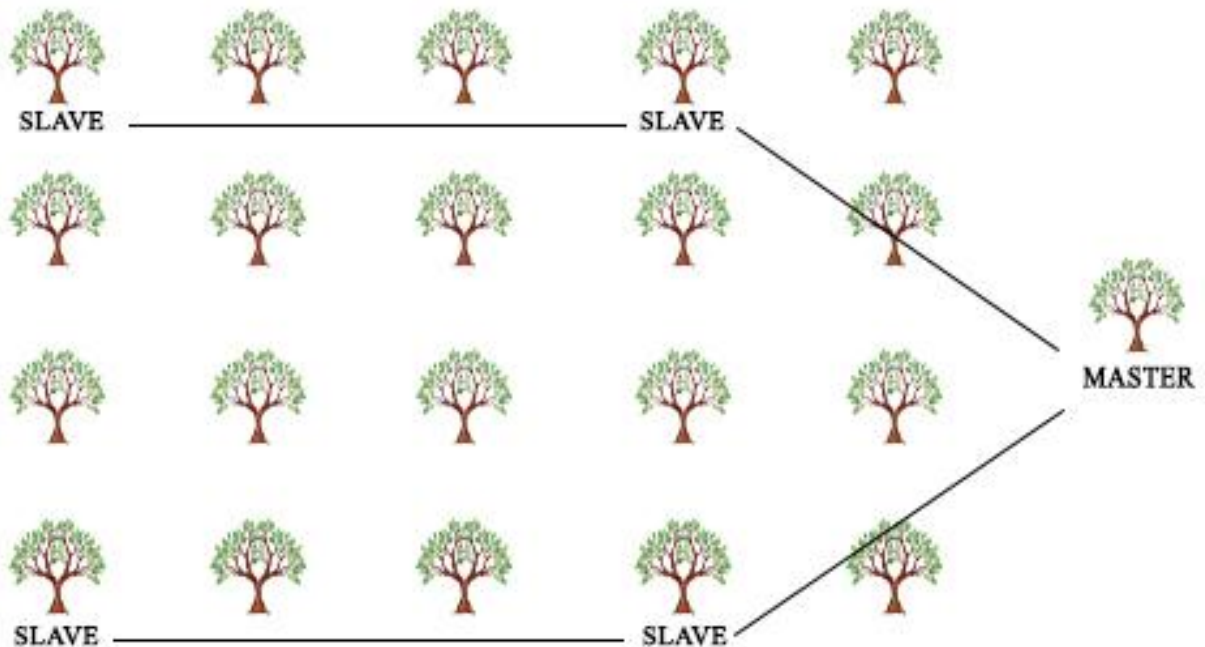
Εικόνα 3.18: Ελαιόδεντρο και Master κόμβος

3.8 Ενσωμάτωση πολλαπλών Slave κόμβων

Η αρχιτεκτονική του συστήματος που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της εργασίας αποτελεί μια μικρογραφία ενός πραγματικού συστήματος για ελαιώνες. Για αυτόν τον λόγο προβλέπεται η ενσωμάτωση πολλαπλών κόμβων Slave οι οποίοι θα είναι τοποθετημένοι σε διαφορετικά σημεία μέσα στον ελαιώνα συλλέγοντας μετρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να διαμορφωθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα των περιβαλλοντικών δεδομένων σε οποιοδήποτε σημείο μέσα στο χωράφι.

Λόγω του πρωτοκόλλου ESP-NOW που επιλέχθηκε για την επικοινωνία των κόμβων μεταξύ τους προστίθεται ένας περιορισμός στην απόσταση επικοινωνίας μεταξύ των φυσικών συσκευών. Η απόσταση αυτή, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα από τις δοκιμές, είναι στο μέγιστο της τα 100 μέτρα. Σε περιπτώσεις δηλαδή όπου ένας Slave κόμβος είναι σε μεγάλη απόσταση από τον Master και αδυνατεί να επικοινωνήσει άμεσα με αυτόν, μπορεί να στείλει τα δεδομένα του σε έναν γειτονικό Slave κόμβο όπου αυτός στην συνέχεια θα κοινοποιήσει τις δίκες του μετρήσεις, μαζί με του άλλου κόμβου στον Master. Με αυτή την λογική μπορούν να σχηματιστούν δίκτυα Mesh από τους κόμβους Slave, όπου θα διαμοιράζονται τα δεδομένα τους μεταξύ τους με σκοπό την αύξηση της εμβέλειας του δικτύου.

Με αυτήν την λογική, ο Master έχει τον ρόλο να συγκεντρώνει τα δεδομένα από τους αισθητήρες των Slave, να συλλέγει τις δίκες του μετρήσεις και έπειτα να τα αποστέλλει στις cloud πλατφόρμες. Οι κόμβοι όπου βρίσκονται σε κοντινή απόσταση με τον Master συνδέονται απευθείας σε αυτόν, ενώ οι Slave όπου βρίσκονται μακριά αποστέλλουν τα δεδομένα τους σε αυτόν μέσω άλλων κόμβων Slave. Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα δίκτυο πολλαπλών Slave κόμβων, καθώς και η λογική προώθησης των δεδομένων μεταξύ αυτών.



Σχήμα 3.8: Σύστημα πολλαπλών Slave κόμβων με ενδιάμεση επικοινωνία.

Κεφάλαιο 4ο: Αποτελέσματα και Σύγκριση

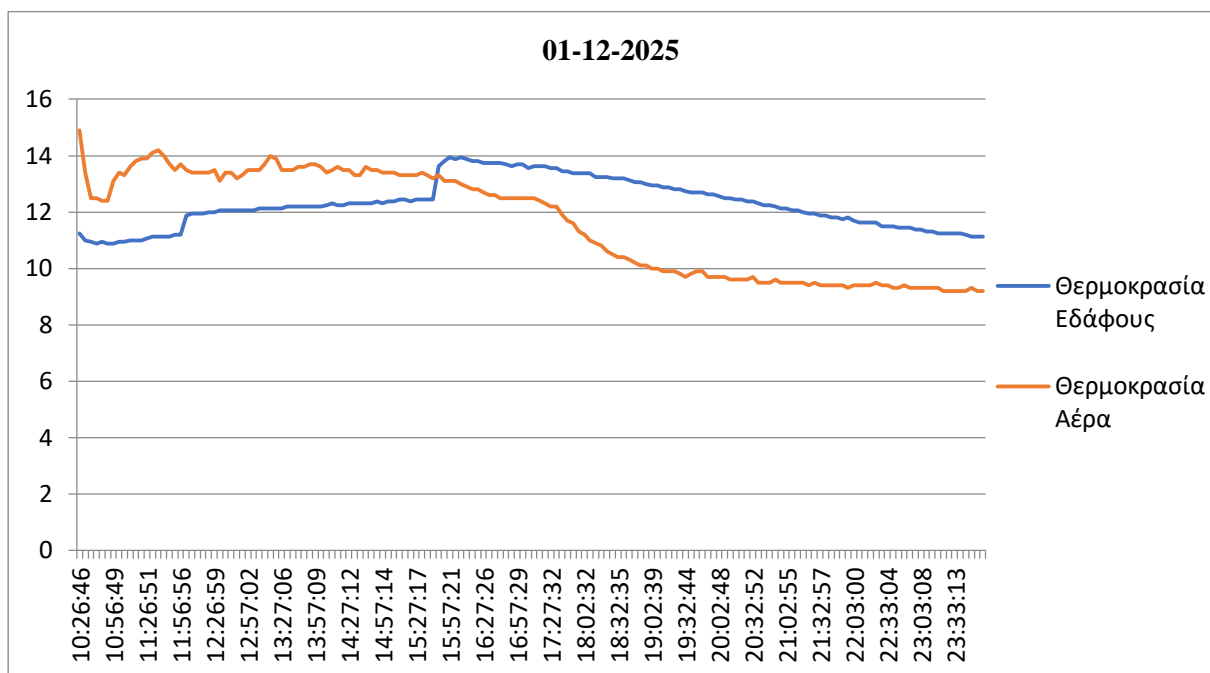
4.1 Παρουσίαση μετρήσεων

Πραγματοποιήθηκε δοκιμή για πέντε συνεχόμενες ημέρες με σκοπό την άντληση δεδομένων και μετρήσεων για την αξιολόγηση του συστήματος. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ελεγχόμενο μέρος, από 01-12-2025 μέχρι τα μεσάνυχτα της 05-12-2025.

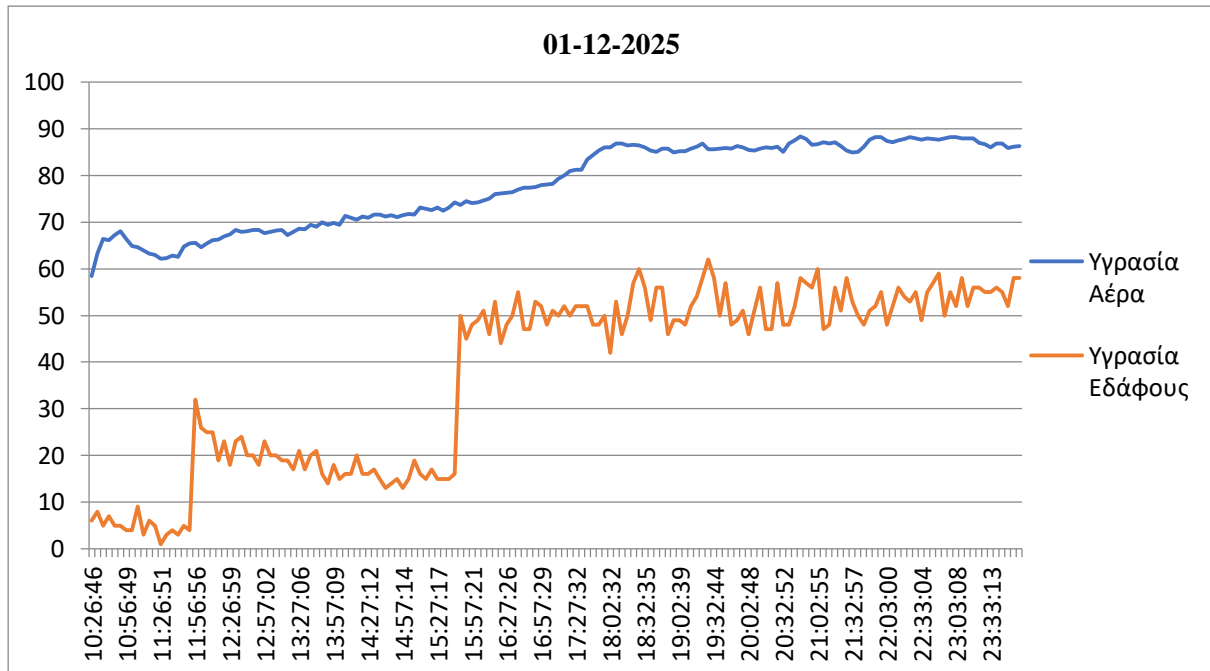
Το σύστημα παρουσίασε μια πολύ σταθερή λειτουργία, χωρίς διακοπές τόσο στις μετρήσεις, όσο και στην επικοινωνία με την πλατφόρμα αποθήκευσης των δεδομένων. Οι αισθητήρες λειτούργησαν αξιόπιστα, παρουσιάζοντας αναμενόμενες μετρήσεις χωρίς να εμφανίζονται ανωμαλίες στα δεδομένα. Στα δεδομένα που συλλέχθηκαν δεν εμφανίζεται καμία μηδενική τιμή, πράγμα που αποδεικνύει την αξιόπιστη και συνεχή επικοινωνία των αισθητήρων με τις διαδικτυακές πλατφόρμες. Σε συγκεκριμένη στιγμή όπου διακόπηκε η επικοινωνία του Master ESP32 με το WiFi λόγω διακοπής ρεύματος, το σύστημα πραγματοποιούσε επανεκκινήσεις μέχρι που αποκαταστάθηκε η επικοινωνία.

Το σύστημα κατά την διάρκεια της δοκιμής πραγματοποίησε συνολικά περίπου 1310 διαφορετικές καταχωρήσεις μετρήσεων, η κάθε καταχώρηση αποτελείται από τις τέσσερις βασικές παραμέτρους, θερμοκρασία εδάφους και αέρα καθώς και υγρασία εδάφους και αέρα. Η κάθε καταχώρηση αποτελείται από τις μετρήσεις του Master και του Slave ESP32, για την ανάλυση όμως θα χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις των αισθητήρων από τον Master.

Στα σχεδιαγράμματα 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται οι μεταβολές των μετρήσεων δύο ενδεικτικών ημερών, στη 01-12 και στις 02-12. Η επιλογή των ημερών έγινε καθώς αποτυπώνονται οι μεταβολές στις μετρήσεις λόγω εξωτερικών παραγόντων. Την πρώτη ημέρα των μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν δύο ποτίσματα στο ελαιόδεντρο, ένα γύρω στις 11:45 το πρωί και ένα γύρω στις 4:00 το μεσημέρι, αυτό αποτυπώνεται με την αύξηση της υγρασίας (σχήμα 4.1a) αλλά και της θερμοκρασιακής αλλαγής στο έδαφος (σχήμα 4.1b).



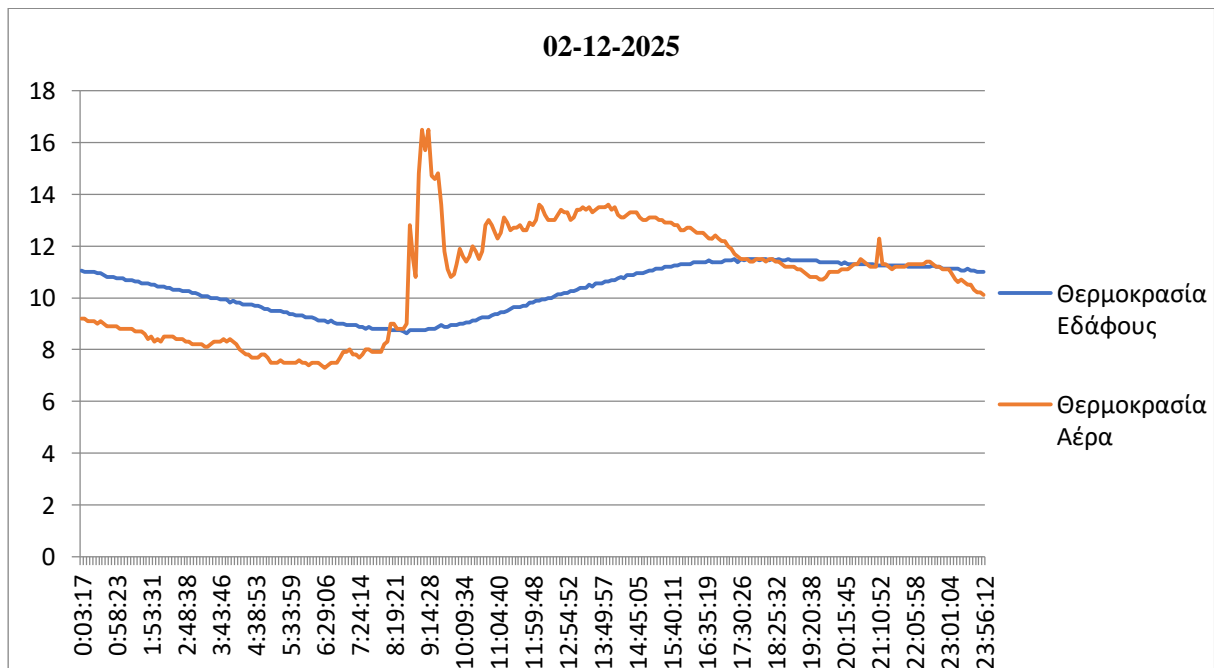
Σχήμα 4.1a: Διακυμάνσεις θερμοκρασιών εδάφους και αέρα 01-12



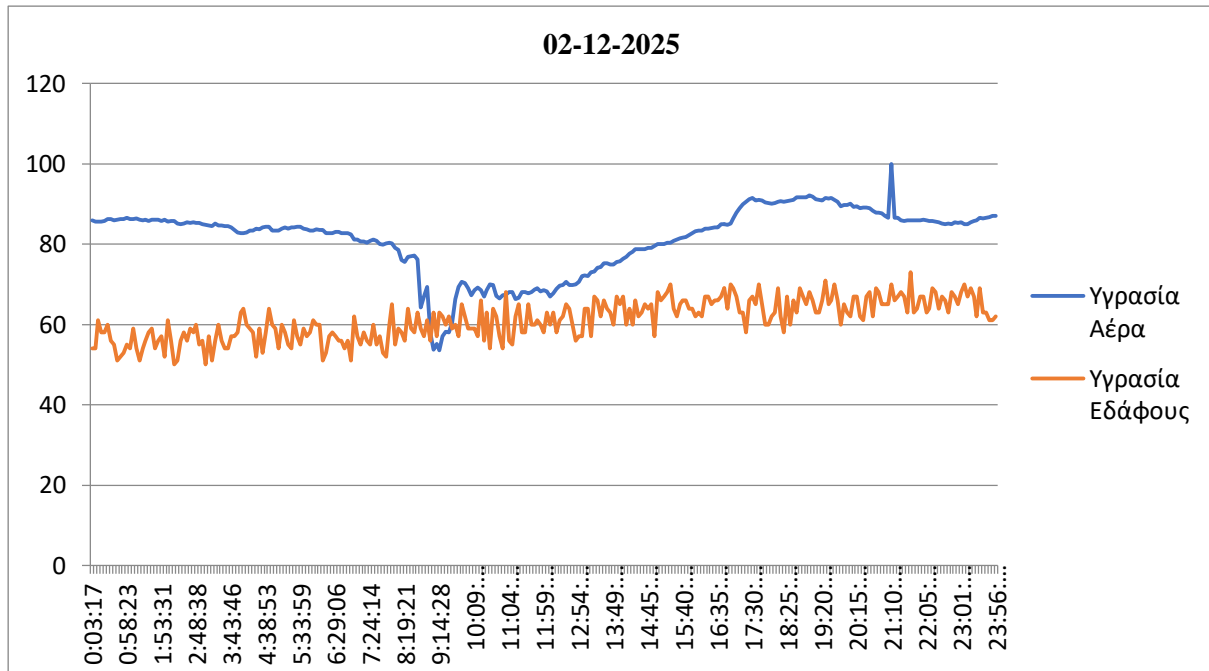
Σχήμα 4.1b: Διακυμάνσεις υγρασίας εδάφους και αέρα 01-12

Πρέπει να σημειωθεί πως οι μετρήσεις και των πέντε ημερών κυμαίνονται ως προς το αναμενόμενο, την νύχτα μειώνεται η θερμοκρασία και αυξάνεται η υγρασία ενώ τις πρωινές ώρες αυξάνεται η θερμοκρασία και μειώνεται η υγρασία.

Στο αντίστοιχο σχήμα της δεύτερης ημέρας, παρατηρήθηκε μια ανωμαλία στις μετρήσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα. Αυτό οφείλεται σε ηλιακή ακτινοβολία την οποία εκτέθηκε ο αισθητήρας DHT22 για περίπου μία ώρα, αυτό αποτυπώνεται στα δεδομένα με μια αύξηση στην θερμοκρασία(Σχήμα 4.2a) καθώς και πτώση στην σχετική υγρασία(Σχήμα 4.2b).



Σχήμα 4.2a: Διακυμάνσεις θερμοκρασιών εδάφους και αέρα 02-12



Σχήμα 4.2b: Διακυμάνσεις υγρασίας εδάφους και αέρα 02-12

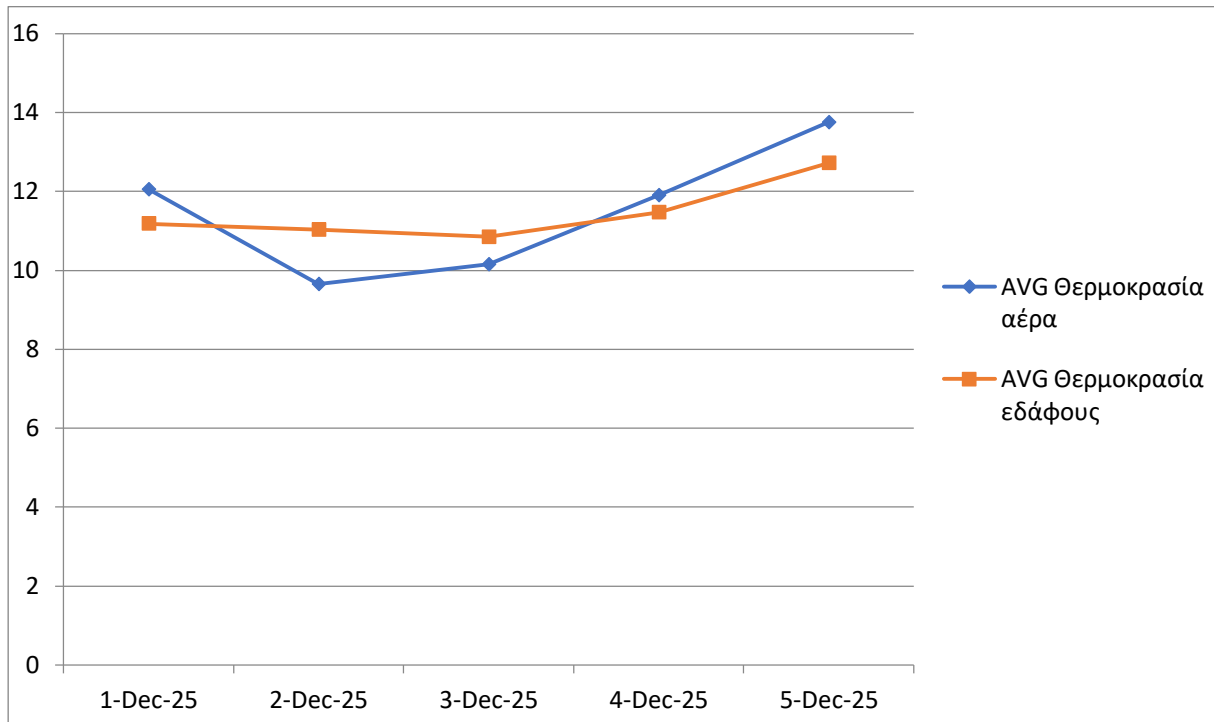
Για τις πέντε ημέρες που πραγματοποιήθηκε η δοκιμή του συστήματος υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι κάθε μιας παραμέτρου. Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι (AVG) της θερμοκρασίας και της υγρασίας, εδάφους και αέρα, για όλες τις επιμέρους ημέρες.

Πίνακας 4.1: Μέσοι όροι μετρήσεων ανά ημέρα

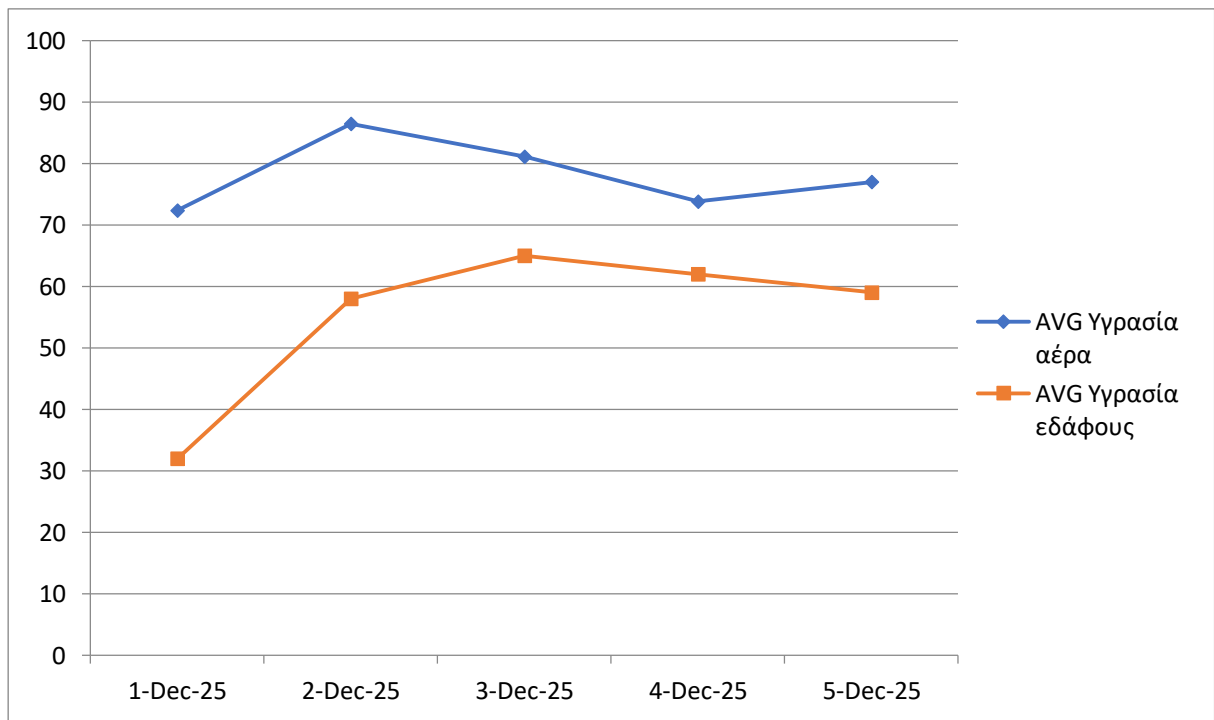
Ημερομηνία	AVG Θερμοκρασία αέρα	AVG Υγρασία αέρα	AVG Υγρασία εδάφους	AVG Θερμοκρασία εδάφους
1/12/2025	12.05	72.35	32	11.185
2/12/2025	9.65	86.45	58	11.03
3/12/2025	10.15	81.1	65	10.845
4/12/2025	11.9	73.8	62	11.47
5/12/2025	13.75	77	59	12.72

Μαζί με τον πίνακα, για πιο εύκολη ανάγνωση στο σχήμα 4.3 της επόμενης σελίδας παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις των μέσων τιμών θερμοκρασίας εδάφους και αέρα (4.3a) και της υγρασίας εδάφους και αέρα (4.3b). Στο παράρτημα Α στο τέλος της εργασίας, παρουσιάζονται τα σχεδιαγράμματα των υπόλοιπων ημερών της δοκιμής καθώς και ένα απόσπασμα του πίνακα με τις ημερήσιες μετρήσεις του Master και του Slave.

Κεφάλαιο 4



Σχήμα 4.3a: Διακυμάνσεις μέσων θερμοκρασιών εδάφους και αέρα



Σχήμα 4.3b: Διακυμάνσεις μέσης υγρασίας εδάφους και αέρα

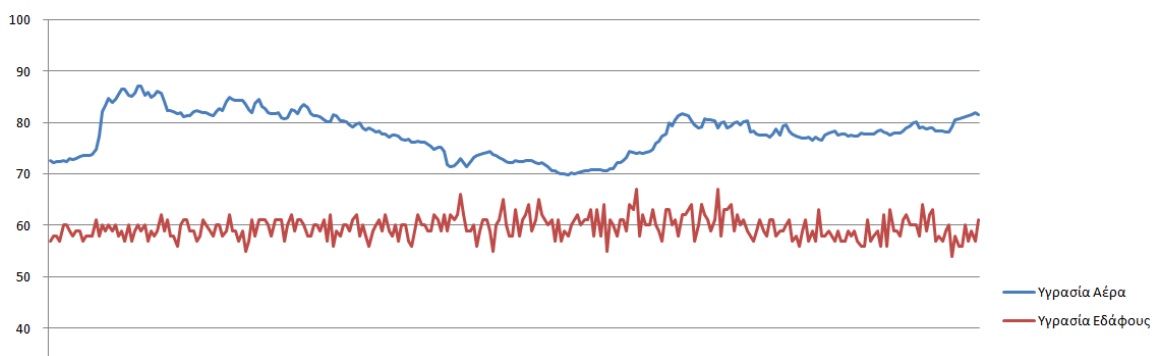
4.2 Αξιολόγηση λειτουργίας συστήματος

Η αξιολόγηση της λειτουργίας βασίζεται στην πενήθημερη δοκιμή που πραγματοποιήθηκε σε πραγματικές συνθήκες. Σκοπός ήταν η εκτίμηση της αξιοπιστίας των μετρήσεων καθώς και της σταθερότητας των συσκευών αλλά και των διαδικτυακών υπηρεσιών.

Σε όλη την διάρκεια των δοκιμών το σύστημα λειτουργούσε με σταθερό ρυθμό δειγματοληψίας αλλά και αποστολής των μετρήσεων στο cloud. Τα δεδομένα που συλλέχτηκαν από το σύστημα δεν εμφανίζουν κενά αλλά ούτε μηδενισμό των τιμών, αυτό υποδηλώνει την ορθή λειτουργία και αποστολή των μετρήσεων από τους κόμβους προς το cloud. Κατά την διάρκεια της δοκιμής υπήρξε μια αστάθεια στην σύνδεση του Master κόμβου με το δίκτυο, αλλά όπως αναφέρθηκε η επανασύνδεση έγινε αυτόματα μόλις αποκαταστάθηκε το WiFi.

Στα ενδεικτικά διαγράμματα που παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 4.1 φαίνονται κάποιες απότομες αυξομειώσεις στην θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα, αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς δεν ήταν επαναλαμβανόμενο φαινόμενο. Επίσης, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.1 οι μετρήσεις της υγρασίας του χώματος παρουσιάζουν ιδιαίτερη αστάθεια με συνεχείς αυξομειώσεις. Αυτό οφείλεται στην φύση του αισθητήρα καθώς υπολογίζει την υγρασία μέσα από τις αλλαγές της αγωγιμότητας του χώματος, ως αποτέλεσμα οι μετρήσεις να διαφοροποιούνται συνεχώς. Για την εφαρμογή όμως δεν αποτελεί άμεσο πρόβλημα καθώς οι τιμές τείνουν να διατηρούν μια σταθερή πορεία, με αποτέλεσμα ο μέσος όρος τους να δίνει μια ικανοποιητική εικόνα για την σχετική υγρασία. Όπως αναφέρεται και στην υποενότητα 5.2 η αλλαγή του αισθητήρα υγρασίας εδάφους, μπορεί να περιορίσει αυτού του είδους φαινόμενα.

Για την εκτίμηση της ακρίβειας των μετρήσεων από τους αισθητήρες δεν υπήρχε κάποιο διαθέσιμο όργανο ως σημείο αναφοράς στο σημείο της δοκιμής. Ως ενδεικτική σημείο λήφθηκαν δεδομένα από κοντινό μετεωρολογικό σταθμό της περιοχής, των οποίων οι μετρήσεις είχαν μικρές αποκλίσεις. Ωστόσο, στο στάδιο ανάπτυξης του συστήματος έγιναν δοκιμές του DHT22 με οικιακή συσκευή παρουσιάζοντας αποκλίσεις 0,4-0,5 °C και 3-4% στην σχετική υγρασία. Τέλος, οι αναμενόμενες διακυμάνσεις μετά από πότισμα ή κατά τις νυχτερινές και πρωινές ώρες ενισχύουν την αξιοπιστία των μετρήσεων.



Εικόνα 4.1: Αυξομειώσεις στις τιμές της υγρασίας εδάφους (δείγμα ημέρας 05-12)

Συνολικά, το σύστημα έδειξε υψηλή σταθερότητα και καλή αξιοπιστία στις μετρήσεις κατά την δοκιμή. Τόσο η επικοινωνία με την εφαρμογή Android, όσο και με τις διαδικτυακές υπηρεσίες ήταν αδιάκοπη, χωρίς να παρουσιαστούν απώλειες. Η σταθερή λειτουργία του συστήματος, οι ικανοποιητικές μετρήσεις των αισθητήρων, αποδεικνύουν την καταλληλότητα του για παρακολούθηση των ελαιόδεντρων.

4.3 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Στην παρούσα ενότητα συγκρίνονται οι τιμές που συλλέχθηκαν από την πενθήμερη δοκιμή, με τις τιμές όπου αναφέρει η βιβλιογραφία στο κεφάλαιο 1. Σκοπός αυτής την σύγκρισης είναι η αξιολόγηση των συνθηκών που επικρατούν στην καλλιέργεια αλλά και η εκτίμηση για το κατά πόσο οι τιμές αυτές είναι κοντά στις θεωρητικά βέλτιστες για την ανάπτυξη του ελαιόδεντρου.

Θερμοκρασία Αέρα

Βάση των θεωρητικών τιμών η θερμοκρασία περιβάλλοντος συνήθως βρίσκεται μεταξύ των 10-30°C, ενώ η κατώτατη τιμή θεωρούνται οι -7 °C. Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με το σύστημα η θερμοκρασία του αέρα κυμάνθηκε από τους 9,6 °C μέχρι τους 13.6 °C. Παρατηρείται πως οι τιμές των μετρήσεων βρίσκονται πολύ κοντά στο όριο των βέλτιστων θερμοκρασιών. Λόγω της εποχής που πραγματοποιήθηκε το πείραμα το φαινόμενο αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα λόγω των γενικευμένων χαμηλών θερμοκρασιών. Επίσης, οι θερμοκρασίες κυμάνθηκαν αρκετά πιο πάνω από τα κατώτατα όρια αντοχής, οπότε οι θερμοκρασίες που λάβαμε είναι φυσιολογικές για την εποχή και μη ζημιογόνες για τα ελαιόδεντρα.

Θερμοκρασία Εδάφους

Για την θερμοκρασία εδάφους, η βιβλιογραφία ορίζει κατώτατη τιμή τους 0 °C, μια τιμή όπου για μεγάλο χρονικό διάστημα μπορεί να βλάψει το ριζικό σύστημα. Οι μετρήσεις που λήφθηκαν από το σύστημα, παρουσιάζουν διακυμάνσεις της θερμοκρασίας χώματος από τους 10,8 °C μέχρι 12,7 °C. Οι τιμές αυτές είναι σημαντικά πάνω από το κατώτατο όριο και παρουσιάζουν μια μικρές αλλαγές, αποδεικνύοντας την θερμική σταθερότητα του εδάφους. Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 4.3a οι τιμές της θερμοκρασίας εδάφους ακολουθούν τις μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα, αλλά με μικρότερο εύρος διακύμανσης.

Υγρασία Αέρα

Οι βέλτιστες θεωρητικές τιμές για την υγρασία περιβάλλοντος είναι ανάμεσα στο 40-50%, ενώ ως ανώτατο όριο θεωρείται άνω του 80%. Σε υψηλές τιμές υγρασίας, όπως αναφέρει και η βιβλιογραφία, το δέντρο είναι πιο ευάλωτο σε ασθένειες. Από τις μετρήσεις που λάβαμε από τις δοκιμές παρατηρούνται τιμές από 72% έως 86%, ποσοστά τα οποία είναι πολύ κοντά ή και επάνω από το θεωρητικό όριο. Ωστόσο, οι τιμές αυτές θεωρούνται αναμενόμενες για την χειμερινή περίοδο όπου πραγματοποιήθηκε η δοκιμή. Πρέπει να σημειωθεί πως περιπτώσεις όπου παρατηρούνται συνεχώς αυξημένες τιμές υγρασίας μπορεί να οφείλεται σε ελλιπή ηλιακή έκθεση, γεγονός που απαιτεί προσοχή από τον παραγωγό.

Υγρασία Εδάφους

Με βάση τις θεωρητικές τιμές, το βέλτιστο εύρος της εδαφικής υγρασίας είναι μεταξύ του 20-40%, ενώ τιμές άνω του 80% θεωρούνται υπερβολικές. Οι μετρήσεις του συστήματος έδειξαν τιμές που κυμαίνονται μεταξύ του 32% έως 65%, κατά το μεγαλύτερο κομμάτι των μετρήσεων οι τιμές ήταν επάνω από το βέλτιστο εύρος τιμών. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε πρόσφατο πότισμα του ελαιόδεντρου και δεν αποτελεί άμεσο πρόβλημα για την υγεία της καλλιέργειας καθώς βρίσκεται αρκετά κάτω από την ανώτατη τιμή. Οι τιμές της υγρασίας εδάφους που συλλέχθηκαν δηλώνουν πως στις επόμενες ημέρες καθώς και σε βάθος χρόνου, πρέπει να ρυθμιστεί σωστά η άρδευση για την εξασφάλιση της σωστής ανάπτυξης των ριζών των μικρών ελαιόδεντρων.

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

5.1 Συμπεράσματα και αξιολόγηση τεχνολογικής λύσης

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας απέδειξε πως η αξιοποίηση των σύγχρονων τεχνολογιών IoT μπορεί να συμβάλει θετικά στην διαδικασία της παρακολούθησης των περιβαλλοντικών συνθηκών σε καλλιέργειες ελαιόδεντρων. Η ενσωμάτωση δύο ξεχωριστών κόμβων ESP32 και η χρήση αισθητήρων για την μέτρηση κρίσιμων παραμέτρων, έδωσαν την δυνατότητα για συλλογή μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι οι κόμβοι μπορούν να λειτουργήσουν αδιάκοπα για μεγάλα χρονικά διαστήματα, διατηρώντας ταυτόχρονα την επικοινωνία με τις cloud υπηρεσίες μεταδίδοντας τα δεδομένα χωρίς απώλειες.

Η επιλογή του πρωτοκόλλου MQTT αποδείχθηκε κατάλληλη για τις ανάγκες συνεχούς μετάδοσης του συστήματος καθώς προσφέρει ικανοποιητικές ταχύτητες, μικρή κατανάλωση ενεργειακών πόρων και υψηλή σταθερότητα. Ο broker της HiveMQ λειτούργησε αξιόπιστα ως μεσολαβητής ανταλλαγής δεδομένων, προσφέροντας σταθερή και αξιόπιστη σύνδεση σε όλη την διάρκεια των πειραμάτων αλλά και της ανάπτυξης του συστήματος. Παράλληλα, η χρήση της δυναμικής βάσης δεδομένων Firebase της Firestore εξασφάλισε την ασφαλή αποθήκευση των μετρήσεων των ESP χωρίς να παρουσιαστούν προβλήματα κατά την εγγραφή ή την ανάγνωση των δεδομένων από τα αποθηκευμένα αρχεία. Ο συνδυασμός των δύο υπηρεσιών προσέφερε πολύτιμες λειτουργίες στο σύνολο του συστήματος, χωρίς να παρουσιαστούν προβλήματα.

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν μια σταθερή συμπεριφορά στα δεδομένα, οι αισθητήρες λειτούργησαν χωρίς κάποιο πρόβλημα και έδιναν σταθερό και αξιόπιστο αποτέλεσμα. Σε συνθήκες πραγματικών μετρήσεων σε ελαιόδεντρο, τοποθετήθηκαν με συγκεκριμένο τρόπο έτσι ώστε να μην επηρεάζονται από εξωτερικούς παράγοντες. Από την πλευρά της εφαρμογής Android, δημιουργήθηκε ένα σταθερό και αξιόπιστο μέσω παρακολούθησης, το οποίο λειτουργεί αξιόπιστα. Δίνει την δυνατότητα προβολής των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο και προβάλλει αναλυτικό ιστορικό μετρήσεων για να έχει την δυνατότητα ο χρήστης να γνωρίζει τις συνθήκες των προηγούμενων ημερών. Επιπλέον, η αξιοποίηση των διαδικτυακών APIs έδωσε στην εφαρμογή αυξημένες δυνατότητες. Εμπλούτισε την πλατφόρμα με προγνωστικά καιρικών δεδομένων και έδωσε την λειτουργία στον χρήστη να παρακολουθεί όποια περιοχή αυτός επιλέξει.

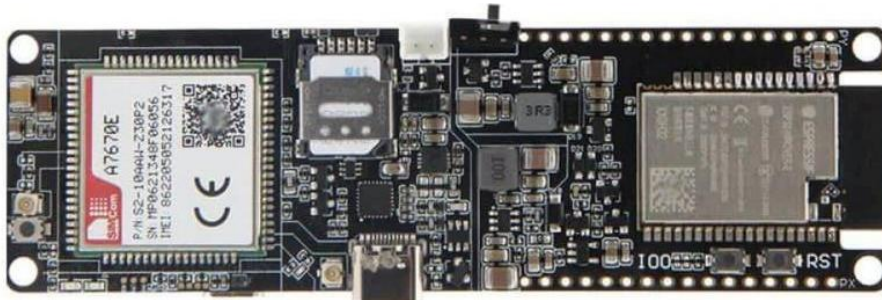
Ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι της λειτουργίας της εφαρμογής αποτελεί ο μηχανισμός ειδοποιήσεων, ο οποίος προσθέτει ένα επιπλέον στρώμα ασφαλείας στην καλλιέργεια. Μέσα από εξατομικευμένες ειδοποιήσεις, ενημερώνεται ο παραγωγός για τυχών επικίνδυνες και ασυνήθιστες μετεωρολογικές προβλέψεις ή μετρήσεις από τους αισθητήρες στον ελαιώνα.

Το αποτέλεσμα μέσα από τον συνδυασμό των αισθητήρων πεδίου, της εφαρμογής Android και από τις διαδικτυακές υπηρεσίες, δημιούργησε ένα ολοκληρωμένο σύστημα υποβοήθησης στην καλλιέργεια του ελαιόδεντρου. Μέσα από την εφαρμογή νέων τεχνολογιών στον αγροτικό τομέα μπορεί να ενισχυθεί σημαντικά η παραγωγή και να εκσυγχρονιστεί ο τρόπος όπου λαμβάνονται οι αποφάσεις για τις εργασίες. Μέσα από σύστημα που δημιουργήθηκε, ο παραγωγός μπορεί να γνωρίζει ανά πάσα στιγμή την κατάσταση των δέντρων του, αλλά και να μπορεί να επέμβει σε περιπτώσεις όπου κινδυνεύει η παραγωγή του. Τέλος, το συμπέρασμα που προκύπτει δείχνει πως το σύστημα είναι λειτουργικό και επεκτάσιμο καθώς μπόρεσε να επιτύχει όλους τους προκαθορισμένους στόχους που τέθηκαν. Τα διαφορετικά εξαρτήματα που συνδυάστηκαν έδωσαν ένα ενιαίο και ολοκληρωμένο αποτέλεσμα, το οποίο μπορεί να αποτελεί βάση για μελλοντική εξέλιξη και ανάπτυξη.

5.2 Προτάσεις βελτίωσης

Παρότι το σύστημα αποδείχθηκε, μέσα από τις δοκιμές, ότι λειτουργεί με ιδιαίτερη σταθερότητα και αξιοπιστία, εντοπίστηκαν ορισμένα σημεία στα οποία υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης. Οι προτάσεις αυτές δεν αποτελούν σφάλματα του συστήματος, αλλά στοχεύουν στην περαιτέρω βελτίωση και ενίσχυση του. Σε μικρής κλίμακας δοκιμές, όπως πραγματοποιήθηκαν σε όλη την διάρκεια της ανάπτυξης του συστήματος, τα εξαρτήματα που επιλέχθηκαν ολοκλήρωσαν επιτυχώς τις μετρήσεις και τις απαιτούμενες λειτουργίες. Από την άλλη, σε εφαρμογές που αφορούν μακροχρόνια και εμπορική χρήση, υπάρχουν ορισμένες αλλαγές στην σύσταση των συσκευών όπου θα έδιναν μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις, πιο εύκολη επικοινωνία με το διαδίκτυο και θα καθιστούσαν το σύστημα πιο εύχρηστο.

Αρχικά στο κομμάτι του μικροελεγκτή, το σύστημα όπως έχει σχεδιαστεί τώρα απαιτεί από τον Master ESP32 να είναι συνδεδεμένος στο WiFi. Αυτό, σε περιπτώσεις όπου κοντά στις καλλιέργειες ελαιοδεντρων υπάρχει σύνδεση σε κάποιον δρομολογητή, είναι εύκολα υλοποιήσιμο καθώς συνδέεται άμεσα μέσω WiFi, όπως γίνεται και στο σύστημα που αναπτύχτηκε. Στις περισσότερες ελαιοκαλλιέργειες όμως, αυτή η πολυτέλεια δεν υφίσταται καθώς βρίσκονται σε απομακρυσμένες αγροτικές εκτάσεις. Για να καλυφθεί αυτό το μειονέκτημα του συστήματος προτείνεται η αλλαγή του βασικού μικροελεγκτή, δηλαδή του Master, σε ένα μοντέλο όπου θα υποστηρίζει κάρτα SIM. Με αυτή την αλλαγή, είναι δυνατή η αξιοποίηση του ασύρματου δικτύου τηλεφωνίας για τις ανάγκες σύνδεσης στο διαδίκτυο μέσω του πρωτοκόλλου 4G και NB-IoT. Έτσι το σύστημα δεν θα στηρίζεται σε κάποιο WiFi δίκτυο και θα είχε δυνατότητες πλήρους λειτουργίας σε απομονωμένα γεωγραφικά σημεία, με την μόνη προϋπόθεση να υπάρχει κάλυψη κυψελοειδούς δικτύου[68]. Υπάρχουν έτοιμες λύσεις που ενσωματώνουν τον μικροελεγκτή esp32 και ένα module, το οποίο περιλαμβάνει το σύστημα και την υποδοχή της κάρτας SIM, όπως το ESP32 T-A7670G(εικόνα 5.1). Εκτός από έτοιμες λύσεις υπάρχει και η δυνατότητα σύνδεσης του module σε ένα απλό esp32, όπως αυτός που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα.



Εικόνα 5.1: ESP32 με ενσωματωμένο T-A7670G και κάρτα SIM. (randomnerdtutorials.com)

Ένα ακόμα σημείο που μπορεί να βελτιωθεί αφορά τους αισθητήρες περιβαλλοντικών μετρήσεων. Στο παρόν σύστημα χρησιμοποιείται ένα κλασικός αναλογικός αισθητήρας υγρασίας εδάφους με αντίσταση, ο οποίος λειτουργεί ικανοποιητικά και αξιόπιστα αλλά παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς σε μακροχρόνιες εφαρμογές. Μέσα από την λειτουργία για μεγάλα χρονικά διαστήματα, η έκθεση των ακροδεκτών σε συνθήκες υγρασίας προκαλεί την διάβρωση των μεταλλικών απολήξεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, μετά από μεγάλα χρονικά διαστήματα όπου ο αισθητήρας θα λειτουργεί, μπορεί να μειωθεί η ακρίβεια στις μετρήσεις που δίνει. Μέσα από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με το σύστημα, παρατηρήθηκαν σε μικρό βαθμό φαινόμενα διάβρωσης, αλλά δεν ήταν αρκετά ώστε να επηρεαστεί η αξιοπιστία των μετρήσεων από τον αισθητήρα. Σε εναλλακτική λύση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αισθητήρας βιομηχανικού τύπου, όπου θα προσφέρει

μεγαλύτερη σταθερότητα σε βάθος χρόνου και θα μπορεί να εκτελεί μετρήσεις σε μεγαλύτερο βάθος μέσα στο χώμα, πλησιάζοντας το σύστημα ριζών του ελαιόδεντρου. Ένας αισθητήρας που θα μπορούσε να αντικαταστήσει τον ήδη υπάρχων, είναι ο SKU SEN0308. Είναι ένας αδιάβροχος χωρητικός αισθητήρας που είναι σχεδιασμένος για μακροχρόνιες εγκαταστάσεις. Μετράει την υγρασία μέσω χωρητικότητας και διαθέτει ειδική επικάλυψη προστασίας που του προσφέρει αυξημένη αντοχή στην διάβρωση[69]. Στην εικόνα 5.2a παρουσιάζεται ο αισθητήρας groove με την διάβρωση που υπέστη μετά από τρεις μήνες πειραμάτων, ενώ στην 5.2b είναι ο αισθητήρας SEN0308.



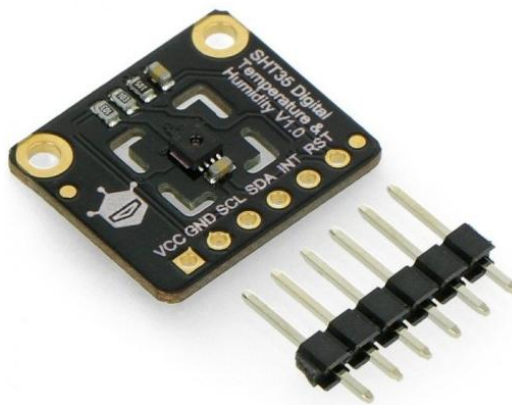
(a)



(b)

Εικόνα 5.2: a.Διάβρωση στον Groove soil moisture sensor b.Αισθητήρας SEN0308(wiki.dfrobot.com)

Τέλος, ένα ακόμα εξάρτημα που έχει περιθώρια βελτίωσης είναι ο αισθητήρας DHT22. Παρότι ο αισθητήρας αυτός αποτελεί μια οικονομική λύση με ικανοποιητική απόδοση, παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς σε μακροχρόνιες εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και σταθερότητα. Όταν εκτεθεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε υψηλά ποσοστά υγρασίας τείνει να χάνει την ακρίβεια του με την πάροδο του χρόνου. Επίσης, όταν βρίσκεται σε θέση που δεν έχει σκιά επηρεάζεται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία και εμφανίζει απόκλιση στις μετρήσεις του. Ένας αισθητήρας που θα μπορούσε να τον αντικαταστήσει είναι ο SHT35(εικόνα 5.3), ο οποίος παρουσιάζει βελτιωμένα χαρακτηριστικά και νεότερη τεχνολογία. Έχει μεγαλύτερη ακρίβεια τόσο στην μέτρηση της υγρασίας όσο και της θερμοκρασίας αλλά και καλύτερη θερμική σταθερότητα[70].



Εικόνα 5.3: Αισθητήρας υγρασίας και θερμοκρασίας SHT35 (grobotronics.com)

5.3 Μελλοντικές εξελίξεις

Το σύνολο του συστήματος αν και ικανοποιεί του στόχους της παρούσας εργασίας, μπορεί να εξελιχθεί με σκοπό τον εμπλουτισμό με νέες λειτουργίες και ικανότητες. Μια πρόταση θα αφορούσε την προσθήκη μεγαλύτερου αριθμού κόμβων με σκοπό την κάλυψη μεγαλύτερης έκτασης ελαιόδεντρων. Ο κάθε κόμβος θα ήταν τοποθετημένος σε απόσταση από τους άλλους και θα πραγματοποιούσε μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία μέσα στην καλλιέργεια, ώστε να προσφέρει μια πιο διευρυμένη εικόνα στον ελαιοπαραγωγό για τις συνθήκες της παραγωγής του.

Μια ακόμη προσθήκη αφορά τις μετρήσεις όπου εκτελεί ο κάθε κόμβος μέσω των αισθητήρων του. Σε επόμενη εξέλιξη του συστήματος μπορούν να προστεθούν αισθητήρες που παρακολουθούν την ποιότητα του εδάφους. Αισθητήρες PH θα έδιναν μια ολοκληρωμένη εικόνα στον παραγωγό και θα του έδιναν την δυνατότητα να γνωρίζει ανά πάσα στιγμή την ποιότητα του αγρού του. Αυτό θα είχε ως θετικό αποτέλεσμα την πρόληψη ασθενειών και παθογόνων που μπορούν να βλάψουν τα δέντρα και να μειώσουν την ποσότητα και την ποιότητα της παραγωγής του.

Ένα από τα πιο σημαντικά σημεία μελλοντικής αναβάθμισης αφορά την εφαρμογή μηχανισμών αυτοματισμού. Μέσα από τις μετρήσεις και τα στατιστικά που προέρχονται από τους αισθητήρες στα ελαιόδεντρα, μπορούν να αυτοματοποιηθούν ορισμένες διαδικασίες. Για παράδειγμα, η προσθήκη ηλεκτρικών αντλιών άρδευσης δίνει την δυνατότητα για αυτοματοποίηση της διαδικασίας του ποτίσματος, αυτόματα βάση των μετρήσεων από τους αισθητήρες στους κόμβους. Επίσης ανάλογα με τις μετρήσεις από τους αισθητήρες Ph, να εφαρμόζονται αυτόματα ειδικά λιπάσματα και ρυθμιστές Ph για να διατηρούν το εδάφος στην μέγιστη δυνατή ποιότητα.

Τέλος από πλευρά την εφαρμογής Android, είναι δυνατή η αξιοποίηση τεχνικών μηχανικής μάθησης για την πρόβλεψη μελλοντικών περιβαλλοντικών συνθηκών. Μέσα από τα δεδομένα που αποθηκεύονται στο Firebase δίνεται η δυνατότητα ανάπτυξης μοντέλων πρόβλεψης, τα οποία θα ενημερώνουν τον χρήστη για τις μελλοντικές πορείες των παραμέτρων. Σε προσωπικό επίπεδο, στο μέλλον προβλέπεται η ανάπτυξη του συστήματος με αισθητήρες νέου τύπου ώστε να αυξηθεί η αξιοπιστία των μετρήσεων σε βάθος χρόνου. Επίσης, σχεδιάζεται η αναβάθμιση του κεντρικού ESP32 ώστε να επικοινωνεί μέσω δικτύου κινητής τηλεφωνίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Annual agricultural statistical survey: 2022, ΕΛΣΤΑΤ: www.statistics.gr
- [2] Othmane Friha, Mohamed Amine Ferrag, Lei Shu, Leandros Maglaras, Xiaochan Wang. Internet of Things for the Future of Smart Agriculture: A Comprehensive Survey of Emerging Technologies[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2021, 8(4): 718-752. doi: 10.1109/JAS.2021.1003925
- [3] Angeliki Loumou and C. Giourga, “Olive groves: ‘The life and identity of the Mediterranean,’” *Agriculture and Human Values*, vol. 20, no. 1, pp. 87–95, Mar. 2003, doi: <https://doi.org/10.1023/a:1022444005336>.
- [4] Ioannis Charalampopoulos, Fotoula Droulia, Androniki Mavridi, and P. A. Roussos, “Mapping the Climatic Suitability for Olive Groves in Greece,” *Agronomy*, vol. 15, no. 11, p. 2604, Nov. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy15112604>.
- [5] C. H. Crisosto, L. Ferguson, and G. D. Nanos, “Olive (*Olea europaea* L.),” *Elsevier eBooks*, pp. 63–87e, Jan. 2011, doi: <https://doi.org/10.1533/9780857092618.63>.
- [6] G. Michalopoulos *et al.*, “Adaptation of Mediterranean Olive Groves to Climate Change through Sustainable Cultivation Practices,” *Climate*, vol. 8, no. 4, p. 54, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/cli8040054>.
- [7] M. Kafkaletou, G. Ouzounidou, and E. Tsantili, “Fruit Ripening, Antioxidants and Oil Composition in Koroneiki Olives (*Olea europea* L.) at Different Maturity Indices,” *Agronomy*, vol. 11, no. 1, p. 122, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy11010122>.
- [8] Θεριός, Ι., Ελαιοκομία. Εκδόσεις Γαρταγάνη, Θεσσαλονίκη. ISBN:960-88706-0-7
- [9] W. T. Watson, “Influence of Tree Size on Transplant Establishment and Growth,” *HortTechnology*, vol. 15, no. 1, pp. 118–122, Jan. 2005, doi: <https://doi.org/10.21273/horttech.15.1.0118>.
- [10] del Pilar, Yahia Rharrabti, and M. E. Yamani, “Drought-Induced Changes in Morphology and Phenology of Olive Trees (*Olea europaea* L.),” *Plants*, vol. 14, no. 23, pp. 3624–3624, Nov. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/plants14233624>.
- [11] Esmail Seifi, Guerin J, B. N. Kaiser, and M. Sedgley, “Flowering and fruit set in olive: a review,” *ResearchGate*, vol. 5, no. 2, pp. 1263–1272, 2015, Available: https://www.researchgate.net/publication/302241607_Flowering_and_fruit_set_in_olive_a_review
- [12] J. E. Fernández and F. Moreno, “Water Use by the Olive Tree,” *Journal of Crop Production*, vol. 2, no. 2, pp. 101–162, Sep. 2000, doi: https://doi.org/10.1300/j144v02n02_05.

- [13] H. Wang *et al.*, “Stronger wind, smaller tree: Testing tree growth plasticity through a modeling approach,” *Frontiers in Plant Science*, vol. 13, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.971690>.
- [14] F. J. Ladux, E. R. Trentacoste, P. S. Searles, and M. Cecilia Rousseaux, “Light Quality Environment and Photomorphological Responses of Young Olive Trees,” *Horticulturae*, vol. 7, no. 10, pp. 369–369, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/horticulturae7100369>.
- [15] S. O. Araújo, R. S. Peres, J. Barata, F. Lidon, and J. C. Ramalho, “Characterising the Agriculture 4.0 Landscape—Emerging Trends, Challenges and Opportunities,” *Agronomy*, vol. 11, no. 4, p. 667, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040667>.
- [16] D. Pascoal, N. Silva, T. Adão, R. D. Lopes, E. Peres, and R. Morais, “A technical survey on practical applications and guidelines for IoT sensors in precision agriculture and viticulture,” *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, Nov. 2024, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80924-y>.
- [17] Moorehead, Stewart J., et al. "Automating orchards: A system of autonomous tractors for orchard maintenance." *Proceedings of the IEEE international conference of intelligent robots and systems, workshop on agricultural robotics*. 2012.
- [18] E. Vrochidou, D. Oustadakis, A. Kefalas, and G. A. Papakostas, “Computer Vision in Self-Steering Tractors,” *Machines*, vol. 10, no. 2, p. 129, Feb. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/machines10020129>.
- [19] E. Vrochidou, V. N. Tsakalidou, I. Kalathas, T. Gkrimpizis, T. Pachidis, and V. G. Kaburlasos, “An Overview of End Effectors in Agricultural Robotic Harvesting Systems,” *Agriculture*, vol. 12, no. 8, p. 1240, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture12081240>.
- [20] P. Velusamy, S. Rajendran, R. K. Mahendran, S. Naseer, M. Shafiq, and J.-G. Choi, “Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in Precision Agriculture: Applications and Challenges,” *Energies*, vol. 15, no. 1, p. 217, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/en15010217>.
- [21] C. Ju and H. Son, “Multiple UAV Systems for Agricultural Applications: Control, Implementation, and Evaluation,” *Electronics*, vol. 7, no. 9, p. 162, Aug. 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics7090162>.
- [22] H. Chen, Y. Lan, B. K. Fritz, W. Clint Hoffmann, and S. Liu, “Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV),” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 38–49, 2021, doi: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211401.5714>.
- [23] J. Xu, B. Gu, and G. Tian, “Review of agricultural IoT technology,” *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol. 6, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2022.01.001>.
- [24] M. S. Farooq, S. Riaz, A. Abid, T. Umer, and Y. B. Zikria, “Role of IoT Technology in Agriculture: a Systematic Literature Review,” *Electronics*, vol. 9, no. 2, p. 319, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics9020319>.

- [25] D. Davcev, K. Mitreski, S. Trajkovic, V. Nikolovski, and N. Koteli, "IoT agriculture system based on LoRaWAN," *2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, Jun. 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/wfcs.2018.8402368>.
- [26] E. Roma and P. Catania, "Precision Oliviculture: Research Topics, Challenges, and Opportunities—A Review," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 7, p. 1668, Mar. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/rs14071668>.
- [27] G. Messina and G. Modica, "The Role of Remote Sensing in Olive Growing Farm Management: A Research Outlook from 2000 to the Present in the Framework of Precision Agriculture Applications," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 23, p. 5951, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/rs14235951>.
- [28] S. Violino *et al.*, "Superior EVOO Quality Production: An RGB Sorting Machine for Olive Classification," *Foods*, vol. 11, no. 18, pp. 2917–2917, Sep. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/foods11182917>.
- [29] K. Ashton, That "Internet of Things" thing, *RFiD Journal* (2009)
- [30] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, Sep. 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>.
- [31] Hye Won Yoon, Dong Jun Kim, M. Lee, Chaehee Weon, and A. Smith, "L & M Farm: A Smart Farm based on LoRa & MQTT," Aug. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/coins49042.2020.9191387>.
- [32] R. Chataut, A. Phoummalayvane, and R. Akl, "Unleashing the Power of IoT: A Comprehensive Review of IoT Applications and Future Prospects in Healthcare, Agriculture, Smart Homes, Smart Cities, and Industry 4.0," *Sensors*, vol. 23, no. 16, p. 7194, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/s23167194>.
- [33] "IoT connected devices worldwide 2019-2030," *Statista*. <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide>
- [34] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The Internet of Things: a Survey," *Computer Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, Oct. 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.
- [35] T. Ojha, S. Misra, and N. S. Raghuwanshi, "Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 118, pp. 66–84, Oct. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.011>.
- [36] None Chaitra Basavaraj Gandarotti, None Jyothi, None Akash H M, None Jaahnawwie A, and None Faisal K, "Smart Irrigation System," *International Journal of Advanced Research in Science Communication and Technology*, pp. 398–402, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.48175/ijarsct-22857>.

- [37] C. Gonzalez, A. Espinosa, D. Ponte, and S. Gibeaux, “Smart-IoT Platform to Monitor Microclimate Conditions in Tropical Regions,” *IOP conference series. Earth and environmental science*, vol. 835, no. 1, pp. 012011–012011, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/835/1/012011>.
- [38] S. Wolfert, L. Ge, C. Verdouw, and M.-J. Bogaardt, “Big Data in Smart Farming – A review,” *Agricultural Systems*, vol. 153, no. 1, pp. 69–80, May 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>.
- [39] M. Lee, J. Hwang, and H. Yoe, “Agricultural Production System Based on IoT,” *2013 IEEE 16th International Conference on Computational Science and Engineering*, Dec. 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/cse.2013.126>.
- [40] P. K. Singh and A. Sharma, “An intelligent WSN-UAV-based IoT framework for precision agriculture application,” *Computers and Electrical Engineering*, vol. 100, p. 107912, May 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.107912>.
- [41] R. Khodabakhshian, “Maintenance management of tractors and agricultural machinery: Preventive maintenance systems,” *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 15, no. 4, pp. 147–159, Nov. 2013, Available: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2616>
- [42] D. Hercog, T. Lerher, M. Truntič, and O. Težak, “Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices,” *Sensors*, vol. 23, no. 15, p. 6739, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/s23156739>.
- [43] “ESP32 Series Datasheet Version 5.1, Espressif Documentation,” www.espressif.com, 2025. https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf
- [44] L. E. Staff, “Insight Into ESP32 Sleep Modes & Their Power Consumption,” *Last Minute Engineers*, Dec. 23, 2018. <https://lastminuteengineers.com/esp32-sleep-modes-power-consumption>
- [45] F. Rak and J. Wiora, “Comparison of ESP programming platforms,” *Computer Science and Information Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 77–86, 2025, Accessed: Nov. 12, 2025. [Online]. Available: <http://85.187.128.170/index.php/csit/article/view/128/46>
- [46] Dnislam Urazayev, A. Eduard, M. Ahsan, and D. Zorbas, “Indoor Performance Evaluation of ESP-NOW,” May 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/sist58284.2023.10223585>.
- [47] J. Sheth and B. Dezfouli, “Enhancing the Energy-Efficiency and Timeliness of IoT Communication in WiFi Networks,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 9085–9097, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/jiot.2019.2927588>.
- [48] L. Moroney, “An Introduction to Firebase,” *The Definitive Guide to Firebase*, pp. 1–24, 2017, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2943-9_1.
- [49] Miloš Živić, D. Nemeč, and Živko Bojović, “MQTT protocol in IoT environment: Comparison with CoAP and ZeroMQ protocols,” Nov. 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/telFor59449.2023.10372710>.

- [50] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, Jun. 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>.
- [51] A. James, A. Seth, and Subhas Chandra Mukhopadhyay, “WiFi Based IoT System,” *Smart sensors, measurement and instrumentation*, pp. 105–136, Sep. 2021, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85863-6_6.
- [52] R. Pasic, I. Kuzmanov, and K. Atanasovski, “ESP-NOW communication protocol with ESP32,” doi: <https://doi.org/10.37886/ip.2021.019>.
- [53] P. Gupta and I. O. Prabha. M, “A Survey of Application Layer Protocols for Internet of Things,” *IEEE Xplore*, Jun. 01, 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9510140> (accessed Dec. 19, 2021).
- [54] Y. A. Ahmad, T. Surya Gunawan, H. Mansor, B. A. Hamida, A. Fikri Hishamudin, and F. Arifin, “On the Evaluation of DHT22 Temperature Sensor for IoT Application,” *IEEE Xplore*, Jun. 01, 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9467147> (accessed Jan. 06, 2023).
- [55] T. Liu, “Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302) Capacitive-type humidity and temperature module/sensor.” Available: <https://ardustore.dk/error/DHT22%20Datasheet.pdf>
- [56] alldatasheet.com, “DS18B20 PDF,” *Alldatasheet.com*, 2025. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/58557/DALLAS/DS18B20.html>
- [57] B. Horan, “A Simple Temperature Sensor,” *Apress eBooks*, pp. 37–60, Jan. 2013, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4302-4972-6_3.
- [58] “Grove -Moisture Sensor User Manual.” Available: https://www.mouser.com/datasheet/2/744/Seeed_101020008-1217463.pdf
- [59] S. Bircher *et al.*, “Soil moisture sensor calibration for organic soil surface layers,” *Geoscientific instrumentation, methods and data systems*, vol. 5, no. 1, pp. 109–125, Apr. 2016, doi: <https://doi.org/10.5194/gi-5-109-2016>.
- [60] J. C. Songara and J. N. Patel, “Calibration and comparison of various sensors for soil moisture measurement,” *Measurement*, vol. 197, p. 111301, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111301>.
- [61] A. Jamil *et al.*, “Polynomial Regression Calibration Method of Total Dissolved Solids Sensor for Hydroponic Systems,” *Pertanika Journal of Science and Technology*, vol. 31, no. 6, pp. 2769–2782, Sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.47836/pjst.31.6.08>.
- [62] “Grove - Moisture Sensor | Seeed Studio Wiki,” *Seeedstudio.com*, Jan. 09, 2023. https://wiki.seeedstudio.com/Grove-Moisture_Sensor (accessed Nov. 15, 2025).

- [63] P. Keil and A. Jossen, “Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life—An experimental study with different 18650 high-power cells,” *Journal of Energy Storage*, vol. 6, pp. 125–141, May 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2016.02.005>.
- [64] Y. Razak, “Development of a forum to implement IOT that showcases the weather information of a building within a community.,” *Theseus.fi*, 2024, doi: <https://www.theseus.fi/handle/10024/876604>.
- [65] “PlatformIO IDE for VSCode — PlatformIO latest documentation,” *Platformio.org*, 2014. <https://docs.platformio.org/en/latest/integration/ide/vscode.html>
- [66] “Geoapify / My Projects,” *Geoapify.com*, 2025. <https://myprojects.geoapify.com/projects> (accessed Nov. 27, 2025).
- [67] “Free Open-Source Weather API | Open-Meteo.com,” *open-meteo.com*. <https://open-meteo.com>
- [68] N. H. Qasim, A. J. Salman, H. M. Salman, A. A. AbdelRahman, and Anastasiia Kondakova, “Evaluating NB-IoT within LTE Networks for Enhanced IoT Connectivity,” pp. 552–559, Apr. 2024, doi: <https://doi.org/10.23919/fruct61870.2024.10516400>.
- [69] “Waterproof_Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0308-DFRobot,” https://wiki.dfrobot.com/Waterproof_Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0308
- [70] “DFRobot SHT35 Digital Temperature and Humidity Sensor Wiki - DFRobot,” <https://wiki.dfrobot.com/SHT35%20Digital%20Temperature%20and%20Humidity%20Sensor%20SKU:%20SEN0333> (accessed Dec. 04, 2025).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Μετρήσεις Αισθητήρων

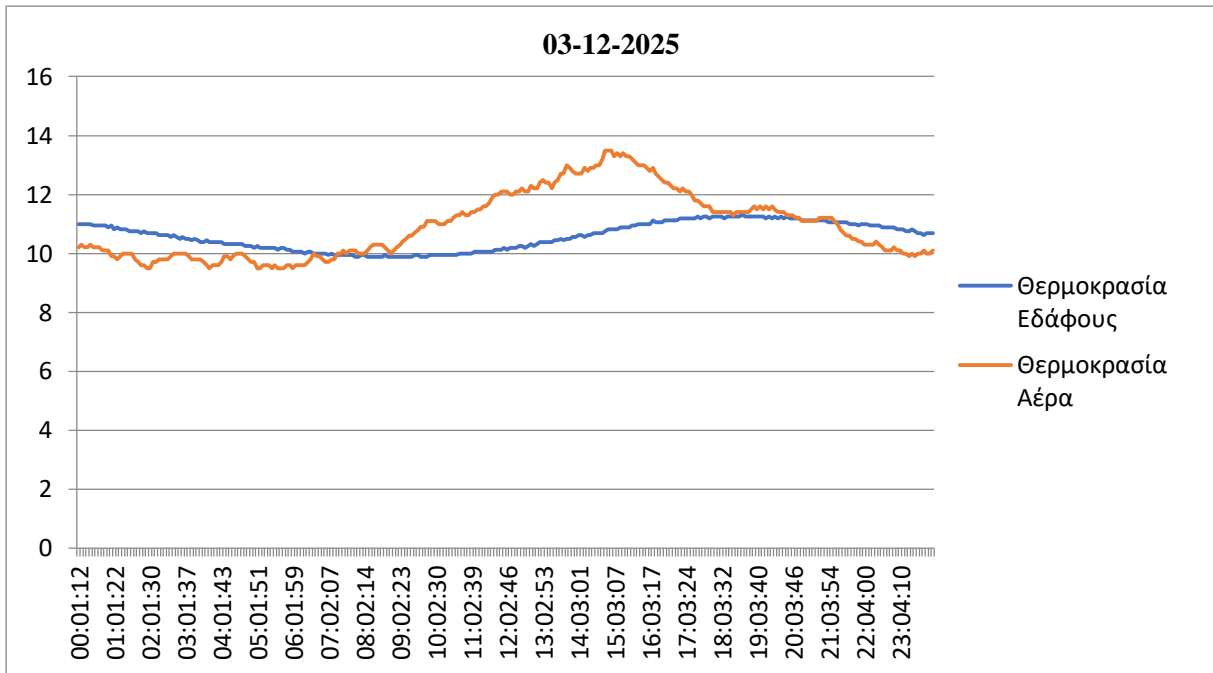
Στην εικόνα Α1 παρουσιάζεται ένα απόσπασμα από τις μετρήσεις του συστήματος, όπως ακριβώς καταγράφονται στο Firebase, στις 03-12-2025 κατά τις πρώτες ώρες του εικοσιτετραώρου. Οι μετρήσεις συνεχίζουν με την ίδια συχνότητα μέχρι το τέλος της ημέρας, με την τελευταία μέτρηση να είναι στις 11:59 το βράδυ.

timestamp	esp1_ds18	esp1_hum	esp1_soil	esp1_temp	esp2_ds18	esp2_hum	esp2_soil	esp2_temp
00:01:12	11	87	62	10.2	15.8	49.8	21	19.2
00:06:13	11	86.7	64	10.3	18.2	61.4	33	31.3
00:11:14	11	85.4	65	10.2	27.8	74.1	16	24.8
00:16:15	11	85	65	10.2	16.8	32.2	14	19.8
00:21:16	11	84.7	65	10.3	18.9	37.2	65	19.1
00:26:16	10.94	84.5	66	10.2	27.4	60.1	13	18.4
00:31:17	10.94	84.7	62	10.2	25.2	39.4	42	30.5
00:36:18	10.94	85	64	10.2	25.3	40.4	44	27.2
00:41:18	10.94	85.1	66	10.1	21.4	37.6	50	26
00:46:19	10.94	85.4	60	10.1	27.8	76.9	56	29.3
00:51:20	10.88	85.4	64	10.1	21.9	44.5	53	24.5
00:56:21	10.94	85.2	62	9.9	16.5	75.5	43	26.1
01:01:22	10.81	85.1	67	9.9	27.7	47.2	19	21.6
01:06:22	10.88	85.1	60	9.8	19	42.7	17	30.3
01:11:23	10.81	85	68	9.9	26.4	78	69	22.9
01:16:24	10.81	84.2	67	10	25.4	52.9	46	21.1
01:21:24	10.81	84.1	66	10	21.5	42.5	17	21.4
01:26:25	10.75	83.8	66	10	18.2	30.9	58	28
01:31:25	10.75	83.7	61	10	21.5	32.9	10	27.9
01:36:26	10.75	83.6	69	9.8	21	54.4	30	28.9
01:41:27	10.75	84.1	69	9.7	18.6	69.7	14	21
01:46:28	10.69	84.4	60	9.6	23.5	44.4	25	31.8
01:51:28	10.75	84.6	64	9.6	19.8	35	39	18.8
01:56:29	10.69	84.9	64	9.5	17.1	61.4	69	20.9
02:01:30	10.69	85	69	9.5	27.5	35.2	12	30.3
02:06:31	10.69	84.7	66	9.7	26.7	56	48	23
02:11:31	10.69	84.3	66	9.7	28.3	57.1	11	23.6
02:16:32	10.63	84	64	9.8	29.8	81	64	26.8
02:21:33	10.63	84.2	66	9.8	29.3	72.4	41	26

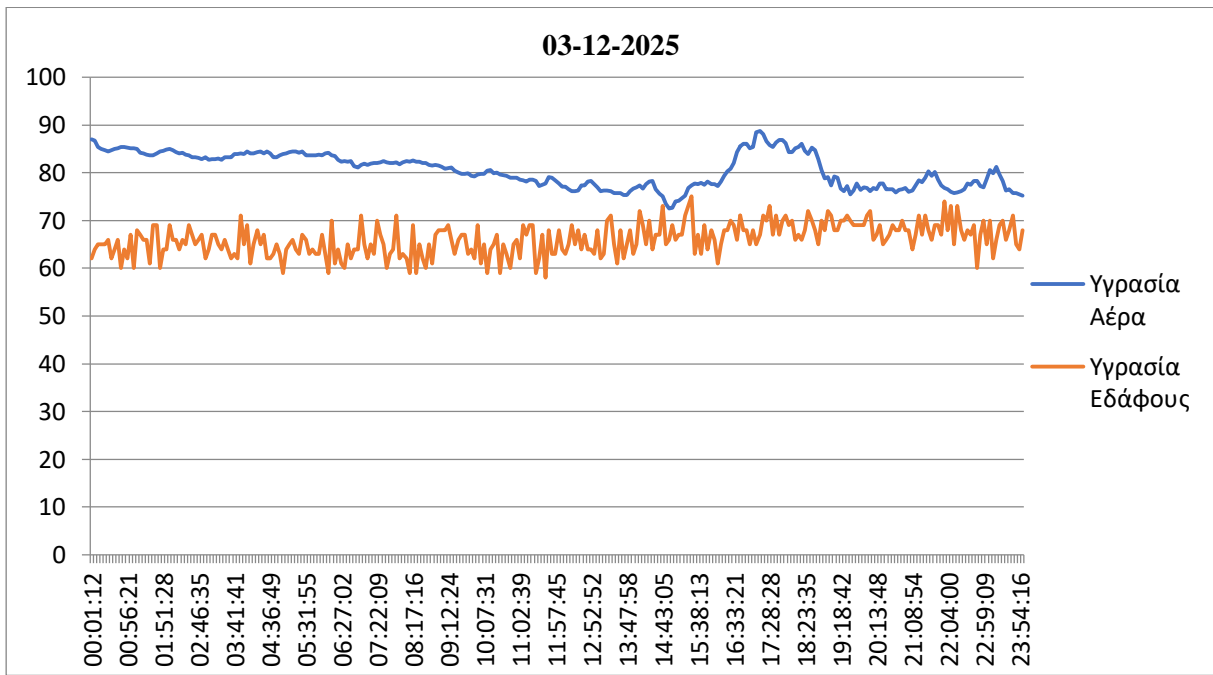
Εικόνα Α1: Μετρήσεις στις 03-12-2025

Στο επόμενο σχήμα Α1 παρουσιάζεται το διάγραμμα των μετρήσεων στις 03-12-2025. Στο σχήμα Α2 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της 04-12-2025 και αντίστοιχα στο σχήμα Α3 οι μετρήσεις της τελευταίας ημέρας των δοκιμών, 05-12-2025.

Στην εικόνα Α2 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των μετρήσεων για τις 03-12, αντίστοιχα στην εικόνα Α3 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι για τις 04-12 και τέλος στην εικόνα Α4 οι μέσοι όροι για τις 05-12.



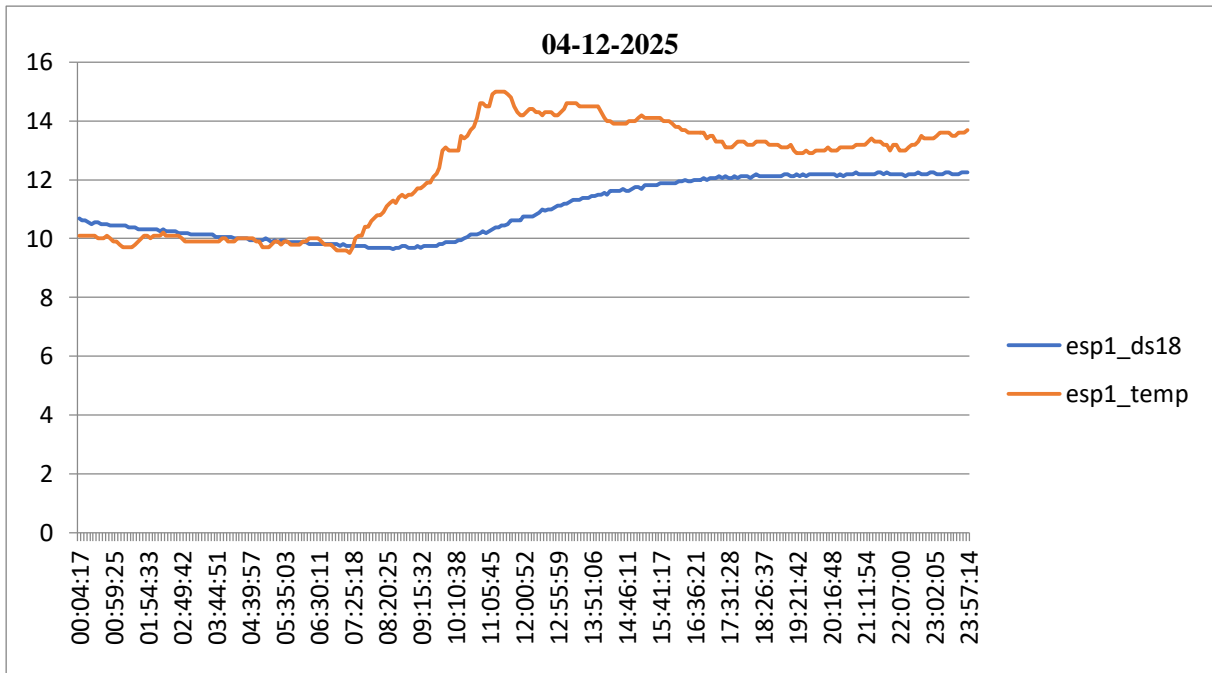
Σχήμα Α1α: Διακυμάνσεις θερμοκρασιών εδάφους και αέρα 03-12-2025



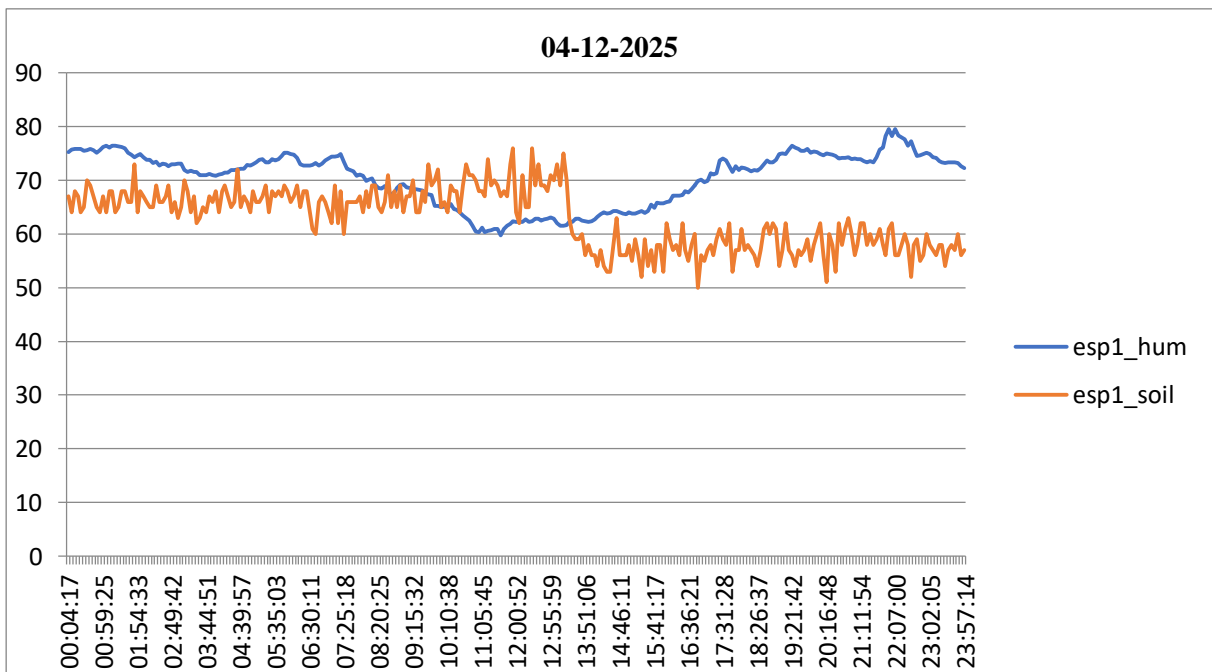
Σχήμα Α1β: Διακυμάνσεις υγρασίας εδάφους και αέρα 03-12-2025

ESP1 AVG	TEMP	HUM	SOIL HUM	SOIL TEMP
	10.15	81.1	65	10.845

Εικόνα Α2: Μέσοι όροι μετρήσεων για 03-12-2025



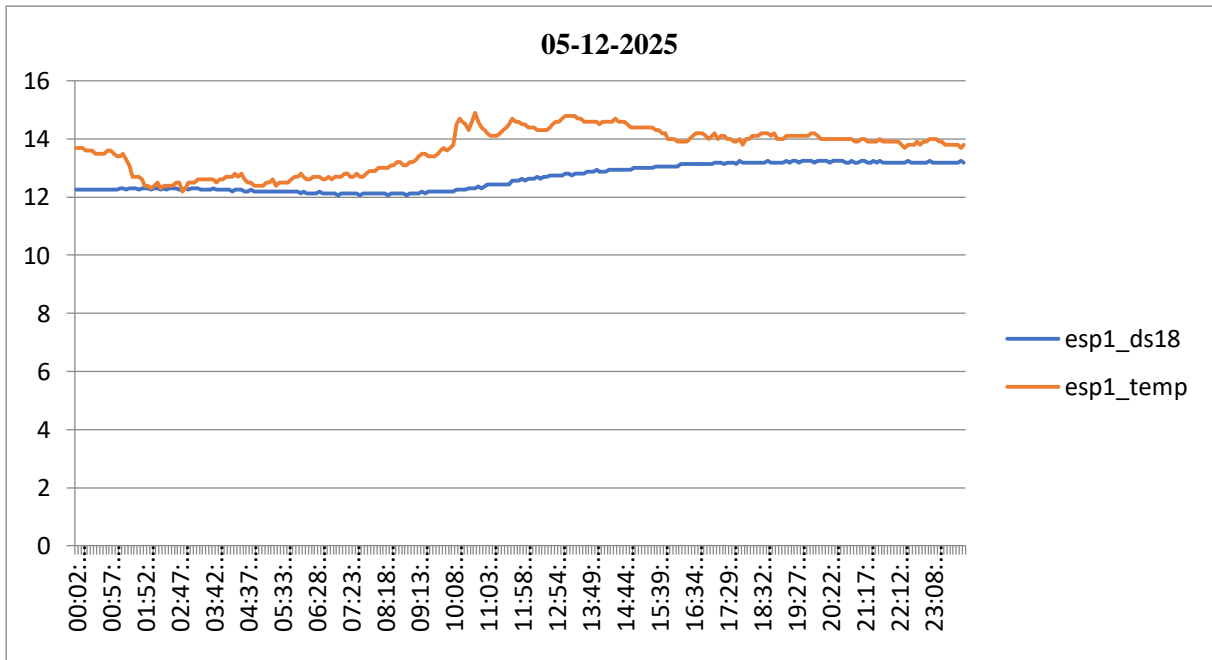
Σχήμα Α2α: Διακυμάνσεις θερμοκρασιών εδάφους και αέρα 04-12-2025



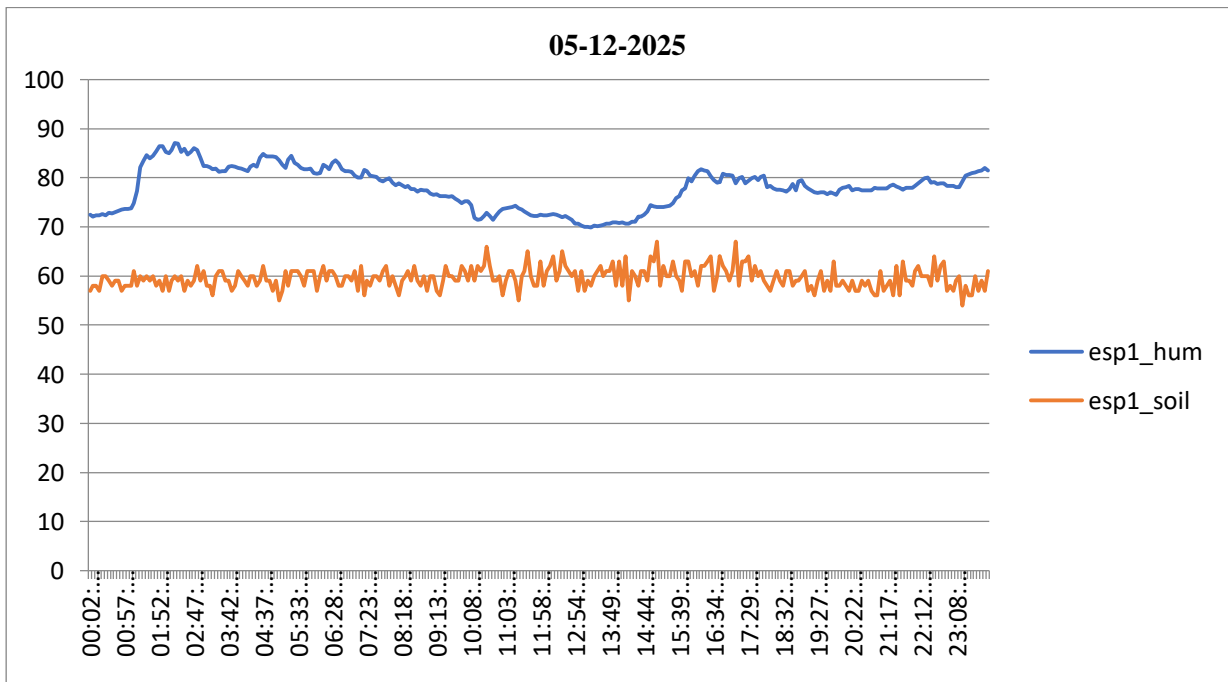
Σχήμα Α2β: Διακυμάνσεις υγρασίας εδάφους και αέρα 04-12-2025

ESP1 AVG	TEMP	HUM	SOIL HUM	SOIL TEMP
	11.9	73.8	62	11.47

Εικόνα Α3: Μέσοι όροι μετρήσεων για 04-12-2025



Σχήμα Α3α: Διακυμάνσεις θερμοκρασιών εδάφους και αέρα 05-12-2025



Σχήμα Α3β: Διακυμάνσεις υγρασίας εδάφους και αέρα 05-12-2025

ESP1 AVG	TEMP	HUM	SOIL HUM	SOIL TEMP
	13.75	77	59	12.72

Εικόνα Α4: Μέσοι όροι μετρήσεων για 05-12

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Αποσπάσματα κώδικα του Slave ESP

Για την ανάπτυξη του κώδικα των δύο μικροελεγκτών που ενσωματώνονται στην εργασία χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον του Visual Studio Code, στην πλατφόρμα ανάπτυξης PlatformIO. Παρακάτω παρουσιάζονται τα απόσπασμα του κώδικα όπου φαίνεται ο τρόπος επικοινωνίας του Slave ESP με τον Master.

```
14
15 //----- 14:33:5C:0F:92:A4 -----
16 uint8_t masterAddress[] = {0x14, 0x33, 0x5C, 0x0F, 0x92, 0xA4};
17
```

```
91
92 // Αποστολή
93 esp_err_t result = esp_now_send(masterAddress, (uint8_t *)&myData, sizeof(myData));
94
```

Επίσης, προς απόδειξη της διαδικασίας δημιουργίας των τιμών που αποστέλλονται στον Master, παρουσιάζεται παρακάτω το απόσπασμα από τον κώδικα του Slave ESP όπου δηλώνεται η δομή αλλά και όπου δημιουργούνται οι τιμές για κάθε μια παράμετρο.

```
6 typedef struct struct_message {
7     float temp;
8     float hum;
9     float soil;
10    float ds18;
11 } struct_message;
```

```
86
87 myData.temp = random(180, 320) / 10.0; // 18.0 - 32.0 °C
88 myData.hum = random(300, 900) / 10.0; // 30.0 - 90.0 %
89 myData.soil = random(10, 70); // 10 - 70 %
90 myData.ds18 = random(150, 300) / 10.0; // 15.0 - 30.0 °C
91
```