



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη και υλοποίηση συστήματος καταγραφής της
θερμοκρασίας θαλάμου ψύξης με τη χρήση μικροελεγκτή

Του φοιτητή
Δημήτριου Κυρίτση
Αρ. Μητρώου: 517068

Επιβλέπων
Μαρία Παπαδοπούλου
Επίκουρη Καθηγήτρια

18/05/2026

Μελέτη και υλοποίηση συστήματος καταγραφής της θερμοκρασίας θαλάμου ψύξης
με τη χρήση μικροελεγκτή

Κωδικός Δ.Ε. 24127

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Κυρίτσης Δημήτριος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Παπαδοπούλου Μαρία

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε: 23-02-2024 Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.: 31-05-2026

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 κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία ου φοιτητή Κυρίτση Δημήτρη 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.

<Αφιέρωση>

Πρόλογος

Περίληψη

Ο έλεγχος της θερμοκρασίας σε θαλάμους ψύξης, όπως χώρους αποθήκευσης και συντήρησης τροφίμων, αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη σωστή διατήρηση των προϊόντων. Ωστόσο, η καθυστερημένη ανίχνευση πιθανών βλαβών ή αποκλίσεων στη θερμοκρασία μπορεί να προκαλέσει αλλοίωση των προϊόντων, οικονομικές απώλειες ή ακόμη και κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία. Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μελέτη και υλοποίηση ενός συστήματος απομακρυσμένης παρακολούθησης θερμοκρασίας θαλάμου ψύξης. Το σύστημα βασίζεται σε μικροελεγκτή ESP32 και ασύρματη επικοινωνία LoRa για τη μετάδοση των δεδομένων θερμοκρασίας. Οι μετρήσεις συλλέγονται από αισθητήρα θερμοκρασίας και αποστέλλονται μέσω διαδικτύου σε απομακρυσμένο server, όπου αποθηκεύονται ώστε να είναι διαθέσιμες στον χρήστη οποιαδήποτε χρονική στιγμή μέσω διαδικτυακής εφαρμογής.

Implementation of a cooling chamber temperature recording system using a micro-controller

Dimitris Kyritsis

Abstract

Temperature monitoring in refrigeration chambers, such as food storage and preservation areas, is an essential requirement for the proper maintenance of products. However, delayed detection of possible failures or temperature deviations may lead to product deterioration, financial losses, or even risks to human health.

The purpose of this thesis is the study and implementation of a remote temperature monitoring system for a refrigeration chamber. The system is based on an ESP32 microcontroller and LoRa wireless communication for the transmission of temperature data. The measurements are collected from a temperature sensor and transmitted through the internet to a remote server, where they are stored and made available to the user at any time through a web application.

Ευχαριστίες

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract.....	v
Ευχαριστίες.....	vi
Περιεχόμενα.....	vii
Κατάλογος Σχημάτων.....	x
Κατάλογος Πινάκων.....	xi
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2 - Θεωρητικό υπόβαθρο.....	3
2.1 Μέτρηση Θερμοκρασίας.....	3
2.1.1 Υφιστάμενες τεχνολογίες αισθητήρων θερμοκρασίας.....	3
2.1.2 Εφαρμογές στην πράξη.....	3
2.1.3 Ωφέλη παρακολούθησης θερμοκρασίας.....	3
2.2 Ασύρματα Πρωτόκολλα Επικοινωνίας.....	4
2.2.1 Εισαγωγή στα Ασύρματα Πρωτόκολλα για IoT.....	4
2.2.2 LoRa.....	4
2.2.3 Wi-Fi (IEEE 802.11).....	5
2.2.4 Bluetooth Low Energy (BLE).....	5
2.2.5 ZigBee (IEEE 802.15.4).....	6
2.2.6 Narrowband IoT (NB-IoT).....	6
2.2.7 Sigfox.....	6
2.3 Συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας IoT.....	7
2.4 Αιτιολόγηση Επιλογής LoRa στην Παρούσα Κατασκευή.....	8
2.5 Ανάλυση LoRa και παραμέτρων επικοινωνίας.....	8
2.5.1 Δομή ενός πακέτου LoRa.....	9
2.5.2 Τεχνολογία Chirp Spread Spectrum (CSS).....	9
2.5.3 Εύρος ζώνης (Bandwidth - BW).....	10
2.5.4 Συντελεστής διασποράς (Spreading Factor - SF).....	10
2.5.5 Ρυθμός κωδικοποίησης (Coding Rate - CR).....	11
2.5.6 Ισχύς εκπομπής (Transmission Power - TP).....	11
2.5.7 Επίδραση παραμέτρων στην απόδοση.....	11
2.5.8 Κανονισμοί EU-868 (duty-cycle & ισχύς).....	12
2.6 Σχεδιαστικές επιλογές για το σύστημα.....	12

Κεφάλαιο 3 – Σχεδίαση Συστήματος.....	13
3.1 Αρχιτεκτονική του συστήματος.....	13
3.2 Συσκευή αισθητήρα.....	13
3.3 Συσκευή δρομολογητή.....	14
3.4 Απομακρυσμένος διακομιστής.....	15
Κεφάλαιο 4 - Κατασκευή Μονάδας Αισθητήρα και Δρομολογητή.....	16
4.1 Επιλογή Υλικού.....	16
4.1.1 Μικροελεγκτής.....	16
4.1.2 Αισθητήρας θερμοκρασίας.....	17
4.1.3 Τερματικό ασύρματης επικοινωνίας LoRa.....	17
4.1.4 Υποστηρικτικά Ηλεκτρονικά Κυκλώματα.....	18
4.2 Μονάδα Αισθητήρα.....	22
4.2.1 Σύνδεση με το τερματικό LoRa.....	22
4.2.2 Σύνδεση με τον αισθητήρα θερμοκρασίας.....	22
4.2.3 Σχηματικό διάγραμμα μονάδας αισθητήρα.....	22
4.2.4 Τελική μορφή μονάδας αισθητήρα.....	23
4.3 Μονάδα δρομολογητή.....	24
4.3.1 Σύνδεση με το τερματικό LoRa.....	24
4.3.2 Σύνδεση με το τερματικό Wi-Fi.....	24
4.3.3 Τελική μορφή μονάδας δρομολογητή.....	24
Κεφάλαιο 5 – Υλοποίηση Λογισμικού.....	25
5.1 Επιλογή εργαλείων ανάπτυξης λογισμικού.....	25
5.2 Περιγραφή λογισμικού μονάδας δρομολογητή.....	26
5.2.1 Λειτουργία μονάδας δρομολογητή.....	26
5.2.2 Σύνδεση σε δίκτυο WiFi.....	27
5.2.3 Χειρισμός σφάλματος στην ροή.....	28
5.3 Περιγραφή λογισμικού συσκευής αισθητήρα.....	28
5.3.1 Λειτουργία συσκευής αισθητήρα.....	28
5.3.2 Κατάσταση αδράνειας και εξοικονόμηση ενέργειας.....	30
5.3.3 Χειρισμός σφαλμάτων στην ροή.....	30
5.4 Απομακρυσμένος διακομιστής.....	30
5.4.2 Περιγραφή βασικών αρχείων πηγαίου κώδικα.....	30
5.4.3 Βάση δεδομένων.....	31
5.4.4 Εφαρμογή χρήστη.....	32
Κεφάλαιο 6 – Υπολογισμοί χαρακτηριστικών συστήματος.....	34

6.1 Θεωρητική εκτίμηση κατανάλωσης ενέργειας.....	34
6.1.1 Κατανάλωση ενέργειας συσκευής αισθητήρα.....	34
6.1.2 Κατανάλωση ενέργειας συσκευής δρομολογητή.....	37
6.3 Θεωρητική εκτίμηση μέγιστης εμβέλειας επικοινωνίας.....	38
6.3.1 Εφαρμογή μοντέλου Okumura-Hata.....	38
Κεφάλαιο 7 – Δοκιμές και αξιολόγηση συστήματος.....	40
7.1 Περιγραφή πειράματος.....	40
7.2 Μετρήσεις.....	41
7.2.1 Αξιολόγηση μετρήσεων.....	42
7.3 Λειτουργικότητα συστήματος.....	43
7.4 Λειτουργικότητα βάσης δεδομένων.....	44
7.5 Λειτουργικότητα web-app απεικόνισης δεδομένων.....	45
Κεφάλαιο 8 - Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	47
8.1 Συμπεράσματα.....	47
8.2 Μελλοντικές επεκτάσεις.....	48
8.2.1 Βελτιστοποίηση ενεργειακής κατανάλωσης.....	48
8.2.2 Υποστήριξη πολλαπλών μονάδων μέτρησης.....	48
8.2.3 Ενσωμάτωση πρόσθετων αισθητήρων.....	48
8.2.4 Υλοποίηση συστήματος ειδοποιήσεων.....	48
8.2.5 Βελτιώσεις στη διεπαφή χρήστη.....	48
8.2.6 Υλοποίηση LoRaWAN.....	49
Βιβλιογραφία.....	50

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 – Μπλόκ διάγραμμα συστήματος.....	2
Σχήμα 2.1 - Ζώνες συχνοτήτων LoRa.....	5
Σχήμα 2.2 – Απεικόνιση chirp στη LoRa/CSS. [11].....	9
Σχήμα 2.3 - Μη διαμορφωμένο σήμα [65] Σχήμα 2.4 - Διαμορφωμένο σήμα [65]....	10
Σχήμα 2.5 - Φασματογράφημα του ίδιου LoRa συμβόλου για διαφορετικά SF. [66]..	11
Σχήμα 3.1 - Αρχιτεκτονική συστήματος.....	13
Σχήμα 3.2 - Μπλόκ-διάγραμμα συσκευής αισθητήρα.....	14
Σχήμα 3.3 - Μπλόκ διάγραμμα συσκευής δρομολογητή.....	14
Σχήμα 3.4 – Δομή λειτουργίας απομακρυσμένου διακομιστή.....	15
Σχήμα 4.1 - Αναπτυξιακή πλακέτα ESP-Wroom-32UE.....	16
Σχήμα 4.2 - Αισθητήρας θερμοκρασίας DS18B20.....	17
Σχήμα 4.3 - Τερματικό ασύρματης επικοινωνίας LoRa.....	18
Σχήμα 4.4 - Τυπικό κύκλωμα εφαρμογής του TP4056. [25].....	19
Σχήμα 4.5 - Τυπική συνδεσμολογία κυκλώματος προστασίας μπαταρίας. [25].....	20
Σχήμα 4.6 – Φύλλο δεδομένων κυκλώματος φόρτισης TP4056. [25].....	21
Σχήμα 4.7 – Σχηματικό διάγραμμα μονάδας αισθητήρα.....	23
Σχήμα 4.8 – Μονάδα Αισθητήρα.....	23
Σχήμα 4.9 - Μονάδα δρομολογητή του προτεινόμενου συστήματος.....	24
Σχήμα 5.1 - Κεντρικό παράθυρο VSCode με την επέκταση PlatformIO.....	25
Σχήμα 5.2 - Ροή λογισμικού μονάδας δρομολογητή.....	26
Σχήμα 5.3 – Δομή πακέτου πληροφορίας.....	27
Σχήμα 5.4 – Σελίδα εισαγωγής στοιχείων δικτύου WiFi.....	28
Σχήμα 5.5 - Ροή λογισμικού συσκευής αισθητήρα.....	29
Σχήμα 5.6 – Δομή πακέτου δεδομένων μονάδας αισθητήρα.....	29
Σχήμα 5.7 – Στιγμιότυπο πίνακα βάσης δεδομένων.....	32
Σχήμα 5.8 – Στιγμιότυπο εφαρμογής χρήστη.....	32
Σχήμα 6.1 – Αυτονομία συσκευής μετρήσεων.....	36
Σχήμα 7.1 – Εγκατάσταση συσκευής αισθητήρα σε ψυκτικό θάλαμο.....	40
Σχήμα 7.2 – Εγκατάσταση συσκευής δρομολογητή.....	41
Σχήμα 7.3 – Μετρήσεις θερμοκρασίας ψυκτικού θαλάμου την 28/05/26.....	42
Σχήμα 7.4 – Στιγμιότυπο βάσης δεδομένων (28/05/26).....	44
Σχήμα 7.5 – Στιγμιότυπο διαδικτυακής εφαρμογής χρήστη (28/05/26).....	45

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 – Σύγκριση τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας.....	7
Πίνακας 6.1 – Καταναλώσεις συσκευής αισθητήρα σε κατάσταση συλλογής δεδομένων.....	34
.....	34
Πίνακας 6.2 – Καταναλώσεις συσκευής αισθητήρα σε κατάσταση αποστολής πακέτου δεδομένων.....	34
Πίνακας 6.3 – Καταναλώσεις συσκευής αισθητήρα σε κατάσταση αδράνειας.....	35
Πίνακας 6.4 – Συνολικές καταναλώσεις συσκευής αισθητήρα για κάθε κατάσταση λειτουργίας.....	35
Πίνακας 6.5 – Χρονική διάρκεια παραμονής σε κάθε κατάσταση για την συσκευή αισθητήρα.....	35
Πίνακας 6.6 – Διάρκεια αυτόνομης λειτουργίας συσκευής αισθητήρα.....	36
Πίνακας 6.7 – Καταναλώσεις συσκευής δρομολογητή.....	37
Πίνακας 7.1 – Απόσπασμα αποτελεσμάτων μετρήσεων για την 28/05/26.....	42

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

Σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, η θερμοκρασία του χώρου επηρεάζει την ποιότητα των αποθηκευμένων υλικών. Πιο συγκεκριμένα, αυτό ισχύει σε θαλάμους συντήρησης τροφίμων, αποθήκες φαρμακευτικώνσκευασμάτων, καθώς και σε θερμοκήπια, όπου εμφανίζονται συχνές μεταβολές θερμοκρασίας. Ακόμη και μια μικρή απόκλιση της θερμοκρασίας διάρκειας λίγων ωρών, είναι αρκετή για να προκαλέσει ζημιές. Για παράδειγμα, σε μια αποθήκη τροφίμων, όπου τα τρόφιμα αποθηκεύονται σε ψυκτικό θάλαμο με εύρος θερμοκρασιών από 0 έως 4°C, μπορεί να συμβούν περιστατικά μηχανικής βλάβης, όπως βλάβη στον θερμοστάτη, να σταματήσει το μοτέρ, ακόμη και το πολύ συχνό φαινόμενο, να ξεχαστεί η πόρτα ανοιχτή. Αποτέλεσμα αυτών των περιπτώσεων είναι να ανέβει η θερμοκρασία του θαλάμου όπου τα αποθηκευμένα τρόφιμα θα τεθούν ακατάλληλα προς κατανάλωση, με συνέπεια την οικονομική απώλεια.

Είναι φανερό πώς, η **έγκαιρη αντίληψη** των βλαβών είναι καθοριστικός παράγοντας, ώστε να αποφευχθεί η οικονομική σπατάλη. Ωστόσο, σε μικρομεσαίες επιχειρήσεις, είναι φυσικό να μην υπάρχει δυνατότητα για συνεχή ανθρώπινη επιτήρηση. Επομένως, μία λύση που μπορεί να δοθεί, είναι ένα σύστημα **αυτόματης καταμέτρησης** της θερμοκρασίας, να **καταγράφει** τις τιμές σε τακτά χρονικά διαστήματα και να τις **μεταδίδει απομακρυσμένα**. Με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης θα μπορεί απομακρυσμένα να ενημερώνεται για τις συνθήκες θερμοκρασίας στον χώρο εγκατάστασης, δίνοντάς του έτσι την δυνατότητα έγκαιρου εντοπισμού σε τυχόν ανωμαλίες.

Το προτεινόμενο σύστημα εστιάζει στην ανάπτυξη ενός **συστήματος απομακρυσμένης παρακολούθησης θερμοκρασίας**. Σχεδιάστηκε έτσι ώστε να αξιοποιεί τεχνολογίες χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και μεγάλης εμβέλειας επικοινωνίας. Το σύστημα αποτελείται από δύο βασικές μονάδες, τη **μονάδα αισθητήρα**, η οποία τοποθετείται στον χώρο μέτρησης και αναλαμβάνει τη συλλογή των δεδομένων. Η δεύτερη είναι η **μονάδα δρομολογητή**, η οποία λαμβάνει τα δεδομένα και τα προωθεί σε απομακρυσμένο διακομιστή για αποθήκευση και επεξεργασία.

Στο σύστημα χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας **DS18B20** [1] για την μέτρηση της θερμοκρασίας, ενώ τα δεδομένα μεταδίδονται ασύρματα μέσω τεχνολογίας **LoRa** [2] στον δρομολογητή, όπου προστίθεται χρονική σήμανση πριν την μετάδοσή τους μέσω **Wi-Fi** στον απομακρυσμένο διακομιστή. Η επιλογή της τεχνολογίας **LoRa (Long Range)** για τη μετάδοση των δεδομένων ανάμεσα στις δύο μονάδες έγινε με βάση την ανάγκη για επικοινωνία σε μεγάλη εμβέλεια. Επίσης, ο **μικροελεγκτής ESP32**, επιλέχθηκε για τον έλεγχο των διαδικασιών της μονάδος αισθητήρα και του δρομολογητή. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής διαθέτει ενσωματωμένο τερματικό **Wi-Fi** και υψηλή επεξεργαστική ισχύ, που καλύπτει τις ανάγκες του συστήματος.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην **ενεργειακή αυτονομία** του συστήματος. Η λύση ήρθε μέσω του φωτοβολταϊκού πάνελ, του κυκλώματος φόρτισης TP4056 [3] και της επαναφορτιζόμενης μπαταρίας ιόντων λιθίου που ενσωματώθηκαν στο σύστημα. Με τον τρόπο αυτόν, και οι δύο μονάδες του συστήματος μπορούν να λειτουργήσουν ανεξάρτητα από το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, δίνοντας τη δυνατότητα παρακολούθησης σε απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες περιοχές.

Το σύστημα έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι ενεργειακά αυτόνομο, εύκολο στην εγκατάσταση, και ευέλικτο για να μπορεί προσαρμοστεί σε διαφορετικά σενάρια εφαρμογής. Επίσης, υπάρχει δυνατότητα τροποποίησης και επέκτασης των δυνατοτήτων του συστήματος χωρίς αλλαγή στην σχεδίαση.

Για την καλύτερη κατανόηση του συστήματος, η εργασία διαρθρώνεται σε έξι κεφάλαια. Στο παρόν πρώτο κεφάλαιο, γίνεται η εισαγωγή για την εργασία που πραγματοποιήθηκε. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό μέρος του συστήματος, με αναφορά στις τεχνολογικές παραμέτρους όπως οι αισθητήρες θερμοκρασίας, η επικοινωνία LoRa, οι μικροελεγκτές, καθώς και στα βασικά στοιχεία της ενεργειακής διαχείρισης. Το τρίτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην κατασκευή του συστήματος και αναλύει λεπτομερώς την επιλογή εξαρτημάτων, τη συνδεσμολογία και την προγραμματιστική υλοποίηση. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι δοκιμές και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Το πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζει τα συμπεράσματα και προτείνει πιθανές επεκτάσεις. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρατίθεται η βιβλιογραφία και ακολουθούν τα παραρτήματα με επιπρόσθετο υλικό.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται σε μπλόκ διάγραμμα η αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος. Τα βέλη υποδεικνύουν την πορεία της πληροφορίας, ξεκινώντας από την συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες, την αποστολή τους στην μονάδα δρομολογητή ασύρματα μέσω της τεχνολογίας LoRa, και τελικά την μετάδοσή τους στον απομακρυσμένο διακομιστή, για αποθήκευση, από την μονάδα δρομολογητή, ασύρματα με χρήση τεχνολογίας Wi-Fi.



Σχήμα 1.1 – Μπλόκ διάγραμμα συστήματος

Κεφάλαιο 2 - Θεωρητικό υπόβαθρο

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται στοιχεία θεωρίας που θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια της εργασίας. Γίνεται επίσης περιγραφή των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στα ενσωματωμένα συστήματα, τόσο για την μέτρηση της θερμοκρασίας, όσο και για την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ συσκευών.

2.1 Μέτρηση Θερμοκρασίας

Η συνεχής μέτρηση της θερμοκρασίας είναι κρίσιμος παράγοντας σε πληθώρα περιπτώσεων από ψυκτικούς θαλάμους, βιομηχανικά συστήματα, ιατρικές εγκαταστάσεις, έως αγροτικά περιβάλλοντα και αποθήκες τροφίμων. Υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων θερμοκρασίας, οι οποίοι διαφέρουν ως προς τον τρόπο λειτουργίας, την ακρίβεια, το εύρος μέτρησης, την απόκριση και το κόστος. Οι πιο βασικοί τύποι είναι οι θερμίστορ, οι αντιστάσεις θερμοκρασίας (RTDs), τα θερμοζεύγη και οι ψηφιακοί αισθητήρες.

2.1.1 Υφιστάμενες τεχνολογίες αισθητήρων θερμοκρασίας

Τα **θερμίστορ** είναι ένας τύπος αντίστασης της οποίας η τιμή μεταβάλλεται με την θερμοκρασία. Είναι οικονομικά και κατάλληλα για εφαρμογές όπου απαιτείται γρήγορη αντίδραση σε μικρό εύρος θερμοκρασιών.

Οι **αντιστάσεις θερμοκρασίας (RTDs)** λειτουργούν βάσει της γραμμικής σχέσης ανάμεσα στη θερμοκρασία και την αντίσταση ενός μεταλλικού αγωγού, συνήθως πλατίνας. Παρέχουν υψηλή ακρίβεια και σταθερότητα, αλλά έχουν υψηλό κόστος και παρουσιάζουν αυξημένη ευαισθησία σε μηχανική καταπόνηση.

Τα **θερμοζεύγη** αποτελούνται από δύο διαφορετικά μέταλλα που βρίσκονται σε επαφή, και παράγουν μια μικρή τάση που σχετίζεται με τη διαφορά θερμοκρασίας. Είναι ιδανικά για χρήσεις σε ευρύ φάσμα μέτρησης θερμοκρασιών ή λειτουργία σε ακραίες συνθήκες.

Οι **ψηφιακοί** αισθητήρες αποτελούν την ιδανική λύση για την εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος. Τα δεδομένα παρέχονται σε ψηφιακή μορφή και έτσι υπάρχει ευκολότερη πρόσβαση από τον μικροελεγκτή. Έχουν πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και διαθέτουν πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως το 1-Wire, μέσω του οποίου μπορούν να συνδεθούν πολλοί αισθητήρες στον ίδιο δίαυλο επικοινωνίας. Αυτό είναι ιδιαίτερα απαραίτητο σε εγκαταστάσεις που η μέτρηση της θερμοκρασίας είναι μέρος της διαδικασίας παραγωγής και υπάρχει περιορισμένος χώρος για καλωδίωση [1].

2.1.2 Εφαρμογές στην πράξη

Ψηφιακοί αισθητήρες για μέτρηση θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές **ψυχρής αλυσίδας** (cold chain), όπως η παρακολούθηση θερμοκρασίας σε ψυγεία φαρμάκων, τροφίμων ή βιολογικών υλικών, αλλά και σε **αγροτικές εφαρμογές**, όπως έλεγχος της θερμοκρασίας του εδάφους για βελτιστοποίηση της σποράς, της άρδευσης και της αποθήκευσης προϊόντων.

Βασική προϋπόθεση για την επιλογή κατάλληλου αισθητήρα, είναι η δυνατότητα αδιάβροχης στεγάνωσής του σε μεταλλικό περίβλημα, που επιτρέπει την τοποθέτησή του απευθείας στο έδαφος ή σε βιομηχανικό περιβάλλον [7].

2.1.3 Ωφέλη παρακολούθησης θερμοκρασίας

Σύμφωνα με έρευνες και πολλές πειραματικές εφαρμογές, τα δεδομένα που παρέχονται από την παρακολούθηση της θερμοκρασίας σε αγροτικές εγκαταστάσεις, συμβάλλουν στη βελτίωση της αποδοτικότητας των καλλιεργειών, λόγω της συνεχούς παρακολούθησης των συνθηκών του εδάφους.

Σε βιομηχανικό επίπεδο, η συλλογή και επεξεργασία δεδομένων θερμοκρασίας, συμβάλει καθοριστικά στην εξοικονόμηση πόρων, αλλά και στην διασφάλιση της τήρησης ορισμένων διαδικασιών συντήρησης και φύλαξης προϊόντων.

2.2 Ασύρματα Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

Στις σύγχρονες εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT), η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου ασύρματης επικοινωνίας είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχία και τη λειτουργικότητα του συστήματος.

Σημαντικό πλεονέκτημα της ασύρματης επικοινωνίας είναι ότι επιτρέπει σε πολλές συσκευές να συνδεθούν την ίδια στιγμή σε ένα δίκτυο προσφέροντας αξιοπιστία, αποδοτικότητα και υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων [8].

2.2.1 Εισαγωγή στα Ασύρματα Πρωτόκολλα για IoT

Οι παραδοσιακές ενσύρματες λύσεις, αν και αξιόπιστες, περιορίζονται σημαντικά όταν αυξάνονται οι απαιτήσεις. Πιο συγκεκριμένα, η τοποθέτηση σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, οι απαιτήσεις για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, και οι περιπτώσεις γρήγορης εγκατάστασης χωρίς υποδομή, είναι παράγοντες που καθιστούν τις παραδοσιακές ενσύρματες λύσεις μη βιώσιμες.

Η ασύρματη επικοινωνία μπορεί προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και λειτουργική αυτονομία από τα ενσύρματα δίκτυα [9]. Βασικό πλεονέκτημα των ασύρματων τεχνολογιών είναι ότι επιτρέπουν τη μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο χωρίς την ανάγκη καλωδίωσης. Έτσι, μειώνεται το κόστος και η δυσκολία εγκατάστασης. Το ζήτημα που τίθεται όμως, είναι η κατάλληλη επιλογή πρωτοκόλλου, σε συνάρτηση με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, όπως η απόσταση μετάδοσης, η κατανάλωση ισχύος, η αξιοπιστία και το περιβάλλον λειτουργίας [9].

Ένα τυπικό ασύρματο σύστημα στο IoT αποτελείται από έναν πομπό (συνήθως αισθητήρα με μικροελεγκτή), έναν δέκτη ή πύλη, και ένα κανάλι μετάδοσης που χρησιμοποιεί ασύρματη τεχνολογία για την ανταλλαγή δεδομένων. Τα βασικά χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τα διαθέσιμα πρωτόκολλα περιλαμβάνουν την εμβέλεια, την ταχύτητα μετάδοσης, τη συχνότητα λειτουργίας, την ενεργειακή αποδοτικότητα, την αξιοπιστία σε παρεμβολές, και φυσικά το κόστος υλοποίησης.

Η ανάγκη αυτή έχει οδηγήσει στην εμφάνιση μιας νέας γενιάς τεχνολογιών που ονομάζονται **LPWAN** (Low Power Wide Area Networks). Τα πιο γνωστά δίκτυα που χρησιμοποιούνται είναι τα LoRa, Sigfox και NB-IoT. [10]

Ειδικά για εφαρμογές όπως η παρούσα, όπου στόχος είναι η μετάδοση μετρήσεων θερμοκρασίας σε απομακρυσμένα σημεία όπως ψυγεία, αγροί ή αποθήκες, απαιτούνται συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Η τεχνολογία που θα επιλεγεί πρέπει να υποστηρίζει επικοινωνία σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις. Επίσης είναι απαραίτητο να έχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας για να υποστηριχθεί η λειτουργία με μπαταρία ή φωτοβολταϊκό.

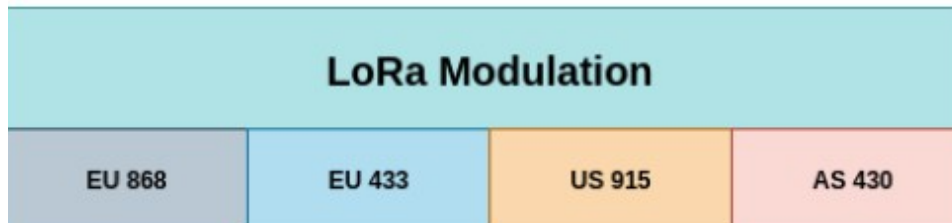
Επιπλέον, η μονάδα του αισθητήρα θα πρέπει να λειτουργεί με πλήρη αυτονομία και να μην βασίζεται σε ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις. Τέλος, θα πρέπει να προσφέρει αξιοπιστία στην αποστολή μικρών πακέτων δεδομένων σε τακτά χρονικά διαστήματα.

2.2.2 LoRa

Το LoRa (Long Range) είναι μια τεχνολογία επικοινωνίας ευρείας περιοχής χαμηλής κατανάλωσης (Low Power Wide Area Network - LPWAN). Λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένες βιομηχανικές-επιστημονικές-ιατρικές ζώνες (Industrial scientific medical - ISM), και παρέχει μεγάλη εμβέλεια επικοινωνίας που

θεωρητικά αγγίζει μέχρι και τα 10 χιλιόμετρα σε ανοιχτό πεδίο. Χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και παρ'ότι ο ρυθμός μετάδοσης είναι χαμηλός, κυμαίνεται απο 0.3 έως 27 Kbit/s , είναι επαρκής για εφαρμογές που μεταδίδουν μικρά πακέτα δεδομένων.

Διαφορετικές περιοχές επιτρέπουν τη χρήση διαφορετικών συχνοτήτων για τη λειτουργία των συσκευών LoRa. Στον Πίνακα που ακολουθεί, απεικονίζονται οι ζώνες που έχουν θεσπιστεί από τις ρυθμιστικές αρχές κάθε περιοχής. Για την Ευρώπη, οι ζώνες EU868 (863-870 MHz) και EU433 (433.05-434.79 MHz) έχουν θεσπιστεί από τον ETSI για χρήση από την τεχνολογία LoRa. Για την βόρεια Αμερική η αρμόδια ρυθμιστική αρχή FCC έχει θεσπίσει την ζώνη US915 (902-928 MHz), ενώ για την Ασία ο MIIT έχει θεσπίσει την ζώνη AS430 (410-510 MHz).



Σχήμα 2.1 - Ζώνες συχνοτήτων LoRa.

2.2.3 Wi-Fi (IEEE 802.11)

Το Wi-Fi είναι μια απο τις πιο γνωστές τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας, και χρησιμοποιείται καθημερινά τόσο σε οικιακά όσο και σε επαγγελματικά περιβάλλοντα.

Παρέχει υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, οι οποίες μπορούν να ξεπεράσουν τα 100 Mbps, ενώ υποστηρίζει και μεγάλα πακέτα δεδομένων. Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή απαιτεί **σημαντική κατανάλωση ενέργειας**, κάτι που την καθιστά ακατάλληλη για αυτόνομες εφαρμογές με περιορισμούς στην πηγή ενέργειας.

Επιπλέον, η εμβέλειά της περιορίζεται σε κάποιες δεκάδες μέτρα σε ανοιχτό χώρο ενώ η τιμή αυτή μειώνεται όταν υπάρχουν εμπόδια. Επίσης, προϋποθέτει κοντινό **router** που είναι μόνιμα ενεργό, κοντά στον αισθητήρα.

Στον μικροελεγκτή ESP32, το Wi-Fi λειτουργεί σε 802.11 b/g/n στη 2.4 GHz, με τυπικά ρεύματα TX ~150–170 mA. Συνεπώς, για **αυτόνομους** απομακρυσμένους κόμβους χωρίς διαθέσιμο δίκτυο, το Wi-Fi δεν αποτελεί πρακτική λύση. [13][18]

2.2.4 Bluetooth Low Energy (BLE)

Το BLE είναι μία βελτιστοποιημένη έκδοση του κλασικού Bluetooth, σχεδιασμένη ειδικά για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Χρησιμοποιείται σε φορητές συσκευές, όπως smartwatches και fitness trackers και σε ιατρικές εφαρμογές. Παρέχει δυνατότητα σύνδεσης σε αποστάσεις περίπου 10–30 μέτρα και ρυθμό μετάδοσης περίπου στο 1 Mbps .

Παρότι προσφέρει χαμηλή κατανάλωση, έχει περιορισμένη εμβέλεια και επίσης εξαρτάται από κοντινό δέκτη, όπως κινητό τηλέφωνο ή σταθμό BLE. Το αποτέλεσμα είναι να καθιστάται ακατάλληλο για εγκαταστάσεις σε απομακρυσμένες περιοχές ή μεγάλους χώρους, όπου ο αισθητήρας δεν μπορεί να επικοινωνήσει άμεσα με τον δέκτη. Συνεπώς, το BLE δεν καλύπτει τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής [14].

2.2.5 ZigBee (IEEE 802.15.4)

Το ZigBee είναι ένα πρωτόκολλο χαμηλής κατανάλωσης, όπου βρίσκει εφαρμογή πάνω σε εφαρμογές ελέγχου και παρακολούθησης σε εσωτερικούς χώρους. Πιο αναλυτικά, χάρη στην δικτύωση τύπου **mesh**, επιτρέπει στους κόμβους να επικοινωνούν μεταξύ τους και να αναμεταδίδουν δεδομένα.

Ωστόσο, για να υλοποιηθεί αυτός ο τύπος δικτύωσης, χρησιμοποιούνται συσκευές με ρόλους **coordinator**, **routers** και **end devices**. Υπάρχει μόνο ένας coordinator στο δίκτυο και είναι υπεύθυνος για το κανάλι και το PAN ID. Επίσης, δίνει τις 16-bit διευθύνσεις, κρατά τα κλειδιά ασφαλείας (Trust Center) και επιτρέπει την είσοδο νέων συσκευών. Μετά, το router, όπου θα πρέπει να μένει μονίμως ενεργό, προωθεί τα πακέτα των end devices. Τα end devices δεν προωθούν πακέτα μόνο στέλνει πακέτα στο ρουτερ, με δυνατότητα να μπαίνει σε sleep mode για οικονομία και να ξυπνά περιοδικά για να στείλει δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αύξηση της εμβέλειας του συστήματος [19].

Η λειτουργία του είναι στα **2.4 GHz** με τυπικό ρυθμό ΡΗΥ περίπου στα **250 kbs**, ενώ η εμβέλεια ανά κόμβο είναι **μερικές δεκάδες μέτρα** σε εσωτερικούς χώρους. Ωστόσο, για να επιτευχθεί μεγάλη κάλυψη απαιτούνται **πολλοί routers** με μόνιμη τροφοδοσία, κάτι που αυξάνει την πολυπλοκότητα εγκατάστασης και το λειτουργικό κόστος. Συνεπώς, σύμφωνα με τα ζητούμενά μας, όπου δεν είναι δυνατή η παρουσία πολλών και αυτόνομων κόμβων, το ZigBee δεν είναι βιώσιμη λύση [20].

2.2.6 Narrowband IoT (NB-IoT)

Το **NB-IoT** είναι μια τεχνολογία που βασίζεται σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (LTE), σχεδιασμένη από τον οργανισμό 3GPP. Λειτουργεί σε αδειοδοτημένες συχνότητες και παρέχει **μεγάλη εμβέλεια, υψηλή αξιοπιστία** και δυνατότητα διείσδυσης σε **υπόγειες εγκαταστάσεις**. Η ενεργειακή κατανάλωσή του είναι σχετικά χαμηλή, και το πρωτόκολλο υποστηρίζει λειτουργία σε sleep mode για εξοικονόμηση ενέργειας.

Ωστόσο, το NB-IoT προϋποθέτει **παροχή σύνδεσης από πάροχο κινητής τηλεφωνίας**. Συνεπώς, εισάγεται λειτουργικό κόστος όπως κάρτα SIM, ενώ η κάλυψη σε αγροτικές περιοχές της Ελλάδας είναι μη επαρκής. Επιπλέον, απαιτείται η τήρηση συγκεκριμένων πρωτοκόλλων ασφαλείας και η πιστοποίηση του εξοπλισμού. Συμπερασματικά, για αυτόνομους απομακρυσμένους αισθητήρες όπου ζητείται λειτουργία χωρίς εξάρτηση από δίκτυα τρίτων, άρα απορρίπτεται [21].

2.2.7 Sigfox

Το **Sigfox** είναι τεχνολογία η οποία λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένες συχνότητες ISM band στα 868 MHz στην Ευρώπη. Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει, πολύ **στενό εύρος ζώνης**, μεταφέροντας πολύ μικρά μηνύματα, περίπου **12 bytes** ανά uplink, ενώ έχει **χαμηλή κατανάλωση**.

Στο κομμάτι της εμβέλειας, είναι μια καλή λύση, όπου σε ανοικτό πεδίο μπορεί να φτάσει μερικά χιλιόμετρα. Ωστόσο, η χρήση προϋποθέτει **κάλυψη Sigfox** στην περιοχή και **δρομολόγηση μέσω του backend** του παρόχου, άρα ο χρήστης δεν έχει πλήρη έλεγχο του συστήματος. Συνεπώς, οι περιορισμοί στο μέγεθος και τον ρυθμό μηνυμάτων καθώς και η εξάρτηση από **υπηρεσίες παρόχου**. Άρα, το καθιστούν λιγότερο κατάλληλο, διότι ζητείται **ευελιξία στο payload** και λειτουργία **χωρίς πρόσθετα δίκτυα**. [22]

2.3 Συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας IoT

Η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου ασύρματης επικοινωνίας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες σχεδιασμού σε ένα σύστημα Internet of Things (IoT). Κάθε τεχνολογία παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς την εμβέλεια, την κατανάλωση ισχύος, τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, το κόστος υλοποίησης και τις απαιτήσεις υποδομής. Για τον λόγο αυτό, η επιλογή εξαρτάται άμεσα από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Το Wi-Fi (IEEE 802.11) προσφέρει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και άμεση πρόσβαση σε δίκτυα IP, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές με μεγάλες απαιτήσεις σε όγκο δεδομένων. Ωστόσο, η αυξημένη κατανάλωση ισχύος και η περιορισμένη εμβέλεια αποτελούν σημαντικά μειονεκτήματα για αυτόνομες συσκευές αισθητήρων που λειτουργούν με μπαταρία. Επιπλέον, προϋποθέτει την ύπαρξη διαθέσιμου ασύρματου δικτύου στην περιοχή εγκατάστασης.

Το Bluetooth Low Energy (BLE) σχεδιάστηκε με στόχο τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και χρησιμοποιείται ευρέως σε φορητές και ιατρικές συσκευές μικρής εμβέλειας. Παρότι εμφανίζει ιδιαίτερα χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις, η μικρή απόσταση επικοινωνίας περιορίζει τη χρήση του σε εφαρμογές απομακρυσμένης παρακολούθησης μεγάλης έκτασης.

Το ZigBee αποτελεί επίσης τεχνολογία χαμηλής κατανάλωσης, η οποία αξιοποιεί τοπολογία δικτύου τύπου mesh ώστε να αυξάνει την κάλυψη μέσω αναμετάδοσης πακέτων από ενδιάμεσους κόμβους. Παρότι το χαρακτηριστικό αυτό προσφέρει ευελιξία σε εσωτερικά δίκτυα αισθητήρων, απαιτεί περισσότερους ενεργούς κόμβους και αυξάνει την πολυπλοκότητα εγκατάστασης και συντήρησης.

Το NB-IoT βασίζεται σε κυψελοειδή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και προσφέρει μεγάλη εμβέλεια και υψηλή αξιοπιστία επικοινωνίας. Ωστόσο, η λειτουργία του εξαρτάται από πάροχο κινητής τηλεφωνίας, απαιτεί κάρτα SIM και εισάγει λειτουργικό κόστος, ενώ σε απομακρυσμένες περιοχές η κάλυψη ενδέχεται να μην είναι επαρκής.

Αντίστοιχα, η τεχνολογία Sigfox παρέχει χαμηλή κατανάλωση και μεγάλη εμβέλεια, αλλά υποστηρίζει πολύ περιορισμένο μέγεθος πακέτων και βασίζεται επίσης σε υπάρχουσα υποδομή παρόχου. Οι περιορισμοί αυτοί μειώνουν την ευελιξία του συστήματος και τον έλεγχο που διαθέτει ο χρήστης πάνω στην υποδομή επικοινωνίας.

Η παραπάνω ανάλυση παρουσιάζεται συνοπτικά στον Πίνακα 1.1 που ακολουθεί.

Τεχνολογία	Εμβέλεια	Κατανάλωση	Ρυθμός μετάδοσης	Υποδομή	Καταλληλότητα για αισθητήρες
Wi-Fi	Μικρή	Υψηλή	Πολύ υψηλός	Router Wi-Fi	Μέτρια
BLE	Πολύ μικρή	Πολύ χαμηλή	Υψηλός	Κοντινός δέκτης	Περιορισμένη
ZigBee	Μικρή-μεσαία	Χαμηλή	Μέτριος	Mesh δίκτυο	Καλή
NB-IoT	Πολύ μεγάλη	Χαμηλή	Μέτριος	Δίκτυο κινητής	Πολύ καλή
Sigfox	Πολύ μεγάλη	Πολύ χαμηλή	Πολύ χαμηλός	Πάροχος Sigfox	Καλή
LoRa	Πολύ μεγάλη	Πολύ χαμηλή	Χαμηλός	Ιδιωτικό δίκτυο	Άριστη

Πίνακας 1.1 – Σύγκριση τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας.

2.4 Αιτιολόγηση Επιλογής LoRa στην Παρούσα Κατασκευή

Σύμφωνα με τις περιγραφές των τεχνολογιών που προηγήθηκαν, η μόνη τεχνολογία που καλύπτει τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου συστήματος, πάνω στο κομμάτι της επικοινωνίας μεταξύ των δύο μονάδων, είναι η LoRa.

Ο σχεδιασμός του προτεινόμενου συστήματος βασίστηκε σε μία σειρά από συγκεκριμένες απαιτήσεις, που αφορούν τις συνθήκες στον περιβάλλον εγκατάστασης, αλλά και τις τεχνικές ανάγκες της παρακολούθησης. Σε αυτά τα περιβάλλοντα δεν είναι πάντα εφικτή η παροχή σταθερής ηλεκτρικής τροφοδοσίας, ούτε και η εγγυημένη πρόσβαση σε υφιστάμενα ασύρματα δίκτυα, όπως WiFi ή δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Συνεπώς, το σύστημα της μονάδας του αισθητήρα πρέπει να λειτουργεί με ενεργειακή αυτονομία, αξιοποιώντας πηγές όπως μπαταρίες, και να μπορεί να μεταδίδει δεδομένα χωρίς την ανάγκη σύνδεσης σε τρίτους παρόχους.

Ένας επιπλέον κρίσιμος παράγοντας είναι η αξιοπιστία της επικοινωνίας. Πιο συγκεκριμένα, ενδέχεται σε βιομηχανική περιοχή, το περιβάλλον να παρουσιάζει παρεμβολές, μεταλλικά εμπόδια ή μεγάλα φυσικά κενά. Το σύστημα είναι απαραίτητο να διατηρεί σταθερό σήμα και να εξασφαλίζει την ακεραιότητα των πακέτων δεδομένων, ακόμη και σε συνθήκες χαμηλού λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR). Επειδή οι αποστάσεις μεταξύ αισθητήρα και δέκτη ενδέχεται να φτάνουν ακόμη και αρκετά χιλιόμετρα, η τεχνολογία επικοινωνίας θα πρέπει να λειτουργεί αποδοτικά ακόμη και υπό ασθενή σήματα.

Επιπλέον, η κατασκευή έχει σχεδιαστεί για να εκπέμπει δεδομένα σε περιοδικά διαστήματα, με μικρό όγκο πληροφορίας, όπως μία τιμή θερμοκρασίας κάθε πέντε ή δέκα λεπτά. Αυτό σημαίνει ότι ο απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης είναι χαμηλός, ενώ μεγαλύτερη προτεραιότητα δίνεται στη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας ανά μετάδοση, ώστε να εξασφαλίζεται η μακροχρόνια αυτονομία της μονάδας χωρίς την ανάγκη φόρτισης ή αντικατάστασης.

Τέλος, σημαντικό κριτήριο για την επιλογή τεχνολογίας αποτελεί το κόστος υλοποίησης καθώς και η εύκολη εφαρμογή της. Στόχος είναι η εύκολη εγκατάσταση ακόμη και από τον ίδιο τον χρήστη, χωρίς την παρέμβαση εξειδικευμένου συνεργείου. Ωστόσο, είναι προτιμότερο ο χρήστης να κρατά τον έλεγχο της λειτουργίας και των δεδομένων. Δηλαδή χωρίς **δεσμεύσεις** σε συνδρομές σε πλατφόρμες και χωρίς να χρειάζεται **υπηρεσίες τρίτων** για να μένει ενεργό το σύστημα.

Μετά τη σύγκριση που έγινε στο 2.3, η επιλογή της τεχνολογίας για επικοινωνία μεταξύ των δύο μονάδων, γίνεται με βάση τις απαιτήσεις της κατασκευής. Στόχος είναι η απομακρυσμένη μέτρηση θερμοκρασίας από κόμβους που μπορεί να βρίσκονται σε σημεία χωρίς διαθέσιμο Wi-Fi ή κάλυψη κινητής, με μικρά πακέτα δεδομένων και αραιές αποστολές. Άρα, τα βασικά κριτήρια που προκύπτουν είναι η εμβέλεια, η χαμηλή κατανάλωση, η σταθερότητα της ζεύξης σε περιβάλλον με εμπόδια και παρεμβολές. Ωστόσο, ο έλεγχος της λειτουργίας του συστήματος χωρίς να χρήση από εξωτερικές υπηρεσίες είναι εξίσου κριτήριο. Με αυτά τα δεδομένα, η LoRa, είναι η επιλογή που ταιριάζει περισσότερο στο συγκεκριμένο έργο [13].

2.5 Ανάλυση LoRa και παραμέτρων επικοινωνίας

Η τεχνολογία LoRa (Long Range) είναι σχεδιασμένη ώστε να παρέχει επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας, χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, και χαμηλό ρυθμό μετάδοσης. Επιπλέον, στα χαρακτηριστικά αυτά προστίθεται το χαμηλό κόστος των τερματικών συσκευών. Τα παραπάνω καθιστούν την τεχνολογία αυτή ιδανική για χρήση από συσκευές IoT και συγκεκριμένα για την επικοινωνία μεταξύ node και gateway της παρούσας εφαρμογής, όπου το κόστος και η ενεργειακή κατανάλωση είναι παράγοντες καθοριστικής σημασίας για την σχεδίαση του συστήματος.

Η LoRa, χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση Chirp Spread Spectrum (CSS). Κωδικοποιεί την πληροφορία σε παλμούς που αποκαλούνται chirps, σήματα των οποίων η συχνότητα αυξάνεται (up-chirp) ή μειώνεται (down-chirp) γραμμικά με το χρόνο. Η διαμόρφωση αυτή είναι πολύ ανθεκτική σε παρεμβολές και θόρυβο και μπορεί να καλύψει πολύ μεγάλες αποστάσεις.

Ένα από τα χαρακτηριστικά που ξεχωρίζουν την τεχνολογία LoRa από τις υπόλοιπες είναι πως έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύει σήματα κάτω από το κατώφλι θορύβου.

Στην συνέχεια αναλύονται οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση της LoRa.

2.5.1 Δομή ενός πακέτου LoRa

Ένα τυπικό πακέτο LoRa στο φυσικό επίπεδο αποτελείται από τα πεδία **preamble**, **header**, **payload** και **CRC**.

Το **preamble** (συνήθως μερικά σύμβολα, π.χ. 8) χρησιμοποιείται για τον συγχρονισμό του δέκτη.

Το **header** περιλαμβάνει μετα-πληροφορίες του πλαισίου (όπως το μήκος και τις ρυθμίσεις κωδικοποίησης) και μπορεί να είναι **explicit** ή **implicit**, ανάλογα με το αν μεταδίδονται ρητά αυτά τα στοιχεία.

Το **payload** μεταφέρει τα δεδομένα της εφαρμογής.

Τέλος, το **CRC** (όταν είναι ενεργό) προσθέτει έλεγχο ακεραιότητας στο τέλος του πλαισίου. [11]

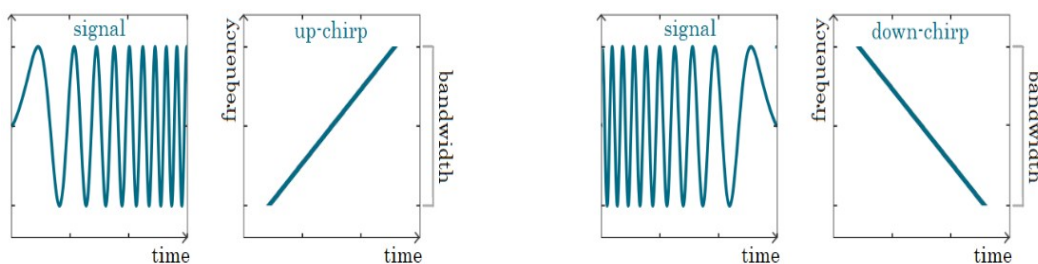
2.5.2 Τεχνολογία Chirp Spread Spectrum (CSS)

Η λειτουργία του LoRa βασίζεται στην τεχνική **Chirp Spread Spectrum (CSS)**, η οποία είναι μια παραλλαγή της διαμόρφωσης εκτεταμένου φάσματος (spread spectrum). Αντί να χρησιμοποιεί σταθερούς τόνους (όπως στο FSK), το CSS μεταδίδει τα δεδομένα μέσω **chirps**.

Η συχνότητα του σήματος αυτού μεταβάλλεται γραμμικά μέσα στο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Αυτή η τεχνική προσφέρει μεγάλη ανθεκτικότητα σε παρεμβολές και θόρυβο, ενώ επιτρέπει τη μετάδοση ακόμα και όταν το σήμα είναι κάτω από το επίπεδο θορύβου του δέκτη (negative SNR). Ο χρόνος συμβόλου δίνεται από τη μαθηματική εξίσωση:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW}$$

Συμπερασματικά, όσο **αυξάνει το SF** ή **μειώνεται το BW**, τόσο **μεγαλώνει ο χρόνος μετάδοσης** και **μειώνεται ο ωφέλιμος ρυθμός**. [11]



Σχήμα 2.2 – Απεικόνιση chirp στη LoRa/CSS. [11]

2.5.3 Εύρος ζώνης (Bandwidth - BW)

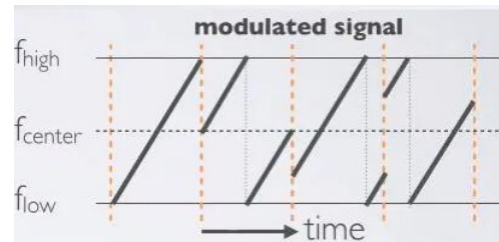
Το εύρος ζώνης καθορίζει το φάσμα συχνοτήτων που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση του σήματος. Τυπικές τιμές είναι 125 kHz, 250 kHz και 500 kHz.

- Μικρότερο BW αυξάνει την ευαισθησία του δέκτην και την εμβέλεια, αλλά μειώνει το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.
- Μεγαλύτερο BW αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης, αλλά απαιτεί περισσότερη ισχύ και μειώνει την απόσταση επικοινωνίας.

Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζεται το μη διαμορφωμένο σήμα (Σχήμα 2.4) και το διαμορφωμένο σήμα (Σχήμα 2.5). Διακρίνονται τέσσερα up-chirps τα οποία εκτείνονται γύρω από την κεντρική συχνότητα εκπομπής (f_{center}) στο διάστημα f_{low} έως f_{high} (κάθετος άξονας) που καθορίζεται από την επιλεγμένη τιμή για το bandwidth. Η διάρκειά τους στο χρόνο (οριζόντιος άξονας) καθορίζεται από το συντελεστή διασποράς που περιγράφεται παρακάτω.



Σχήμα 2.3 - Μη διαμορφωμένο σήμα [65]

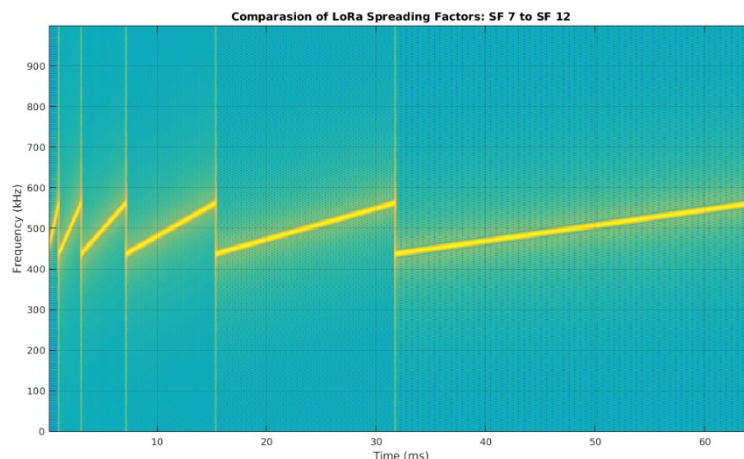


Σχήμα 2.4 - Διαμορφωμένο σήμα [65]

2.5.4 Συντελεστής διασποράς (Spreading Factor - SF)

Ο συντελεστής διασποράς καθορίζει πόσα bits αντιστοιχούν σε κάθε chirp. Οι τυπικές τιμές είναι από SF7 έως SF12. Όσο μεγαλύτερος είναι ο SF τόσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια του πακέτου και η εμβέλεια του σήματος, αλλά τόσο χαμηλότερος γίνεται ο ρυθμός μετάδοσης και αυξάνεται η καθυστέρηση (latency).

Στο Σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται το ίδιο σύμβολο διαμορφωμένο με διαφορετικό spreading factor και ίδιο bandwidth. Συγκεκριμένα ξεκινώντας από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται οι διαμορφώσεις για spreading factors από 7 έως 12. Στον οριζόντιο άξονα παρατηρούμε με αύξηση του SF κατά 1, διπλασιάζεται ο απαιτούμενος χρόνος για εκπομπή του σήματος.



Σχήμα 2.5 - Φασματογράφημα του ίδιου LoRa συμβόλου για διαφορετικά SF. [66]

2.5.5 Ρυθμός κωδικοποίησης (Coding Rate - CR)

Ο ρυθμός κωδικοποίησης καθορίζει το επίπεδο πλεονάζουσας πληροφορίας που προστίθεται για την ανίχνευση και τη διόρθωση σφαλμάτων. Οι τιμές που λαμβάνει το CR είναι από 4/5 έως 4/8. Υψηλότερος CR (π.χ. 4/8) προσφέρει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε σφάλματα και παρεμβολές μειώνει όμως το ρυθμό μετάδοσης.

2.5.6 Ισχύς εκπομπής (Transmission Power - TP)

Η ισχύς εκπομπής καθορίζει το επίπεδο ισχύος του σήματος που εκπέμπεται από τον πομπό. Αυξάνοντας την TP βελτιώνεται η εμβέλεια, αυξάνεται όμως και η κατανάλωση ενέργειας. Τυπικές τιμές για τερματικά του εμπορίου κυμαίνονται από +2dBm έως +20dBm.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς εκπομπής καθορίζεται από ρυθμιστικές αρχές, για την Ευρώπη και την Ελλάδα αρμόδια ρυθμιστική αρχή είναι το European Telecommunications Standards Institute (ETSI).

2.5.7 Επίδραση παραμέτρων στην απόδοση

- Αύξηση (μείωση) του SF οδηγεί σε αύξηση (μείωση) της εμβέλειας, μείωση (αύξηση) του ρυθμού δεδομένων και αύξηση (μείωση) της κατανάλωσης λόγω του μεγαλύτερου (μικρότερου) χρόνου μετάδοσης.
- Αύξηση (μείωση) του BW οδηγεί σε μείωση (αύξηση) της εμβέλειας, και αύξηση (μείωση) του ρυθμού δεδομένων.
- Αύξηση (μείωση) του CR οδηγεί σε αύξηση (μείωση) της εμβέλειας λόγω μεγαλύτερης ικανότητας διόρθωσης λαθών, και μείωση (αύξηση) του ρυθμού δεδομένων. Η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται διότι για τη μετάδοση του ίδιου πακέτου απαιτείται η μετάδοση περισσότερων συμβόλων.
- Αύξηση (μείωση) του TP οδηγεί σε αύξηση (μείωση) της εμβέλειας και αύξηση (μείωση) της κατανάλωσης.

Η βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων εξαρτάται από την εφαρμογή. Σε συστήματα γεωργίας ακριβείας, προτεραιότητα έχει η αξιόπιστη μετάδοση και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ενώ ο ρυθμός μετάδοσης δεν απαιτείται να είναι υψηλός δεδομένου της αραιάς συλλογής και του μικρού όγκου των δεδομένων.

2.5.8 Κανονισμοί EU-868 (duty-cycle & ισχύς)

Σε ζώνες όπως η **EU-868**, που χρησιμοποιείται στην παρούσα εφαρμογή, ισχύουν **περιορισμοί duty-cycle** (π.χ. 1% σε συγκεκριμένες υποζώνες), που σημαίνει έως 36 s εκπομπής ανά ώρα ανά υποζώνη. Επομένως, στην πράξη, η συχνότητα με την οποία αποστέλλονται τα πακέτα με ασφάλεια και χωρίς να παραβιάζονται οι κανονισμοί της EU, ορίζεται από τον ToA.[13]

Αυτό συμβαίνει ώστε να προστατευτούν οι **SRD (Short-Range Devices)**, δηλαδή συσκευές μικρής εμβέλειας που δουλεύουν σε αδειοδότηση τύπου ISM (χωρίς ατομική άδεια), όπου λειτουργούν σε χαμηλή ισχύ και εκπέμπουν μικρά πακέτα πληροφορίας. Ωστόσο, αυτές οι συσκευές, μοιράζονται το ίδιο φάσμα, δηλαδή **863–870 MHz** στην Ευρώπη και δεν έχουν εγγύηση προστασίας από παρεμβολές [13].

2.6 Σχεδιαστικές επιλογές για το σύστημα

Το προτεινόμενο σύστημα έχει στόχο την ζεύξη σε βιομηχανικό περιβάλλον με μικρά, αραιά παραγόμενα πακέτα, και λειτουργία με χαμηλή κατανάλωση.

Το payload παραμένει όσο πιο συμπαγές γίνεται, σε δυαδική μορφή, ώστε να περιορίζεται ο ToA. Πιο συγκεκριμένα, μεταδίδονται το αναγνωριστικό κόμβου (1 byte), η θερμοκρασία από τον DS18B20 ως δεκαδικοποιημένη τιμή σε int16 (2 bytes), η τάση μπαταρίας σε mV (2 bytes) και ο μετρητής πακέτου (1 byte), δηλαδή συνολικά **6 bytes**.

Στο φυσικό επίπεδο **PHY**, επιλέχθηκαν οι τιμές για εύρος ζώνης **BW=125 kHz** και ρυθμού κωδικοποίησης **CR=4/5**, με ενεργό CRC και explicit header.

Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται καλή ισορροπία μεταξύ ευαισθησίας και μικρού περιθωρίου σφαλμάτων, χωρίς να δημιουργείτε υπερβολικό πλεόνασμα. Επίσης, στην βασική λειτουργία, με παράγοντα διάδοσης **SF10**, μπορεί να καλύπτει τυπικές αποστάσεις και εμπόδια στον χώρο εγκατάστασης. Ενώ, αν χρειαστεί αντοχή στην λήψη, δηλαδή κάλυψη μεγαλύτερης απόστασης ή μετάδοση σε πιο δύσκολα περιβάλλοντα με περισσότερο εμπόδια, μπορεί να αυξηθεί σε **SF11–SF12**.

Οι μεταδόσεις πραγματοποιούνται σε κανάλια της ζώνης EU-868 (π.χ. 868.1/868.3/868.5 MHz) με ισχύ εκπομπής έως 14 dBm, ώστε να διατηρείται καλό περιθώριο χωρίς να επιβαρύνεται ο airtime. Τέλος, ο ρυθμός αποστολών είναι **αραιός**, με ένα πακέτο ανά 10 λεπτά, ώστε ο συνολικός airtime να παραμένει κάτω από το 1 % duty-cycle, ώστε να τειρούνται οι προδιαγραφές της EU.

Κεφάλαιο 3 – Σχεδίαση Συστήματος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η σχεδίαση της αρχιτεκτονικής του συστήματος, η οποία περιλαμβάνει την μονάδα αισθητήρα, τον δρομολογητή, και τον απομακρυσμένο διακομιστή.

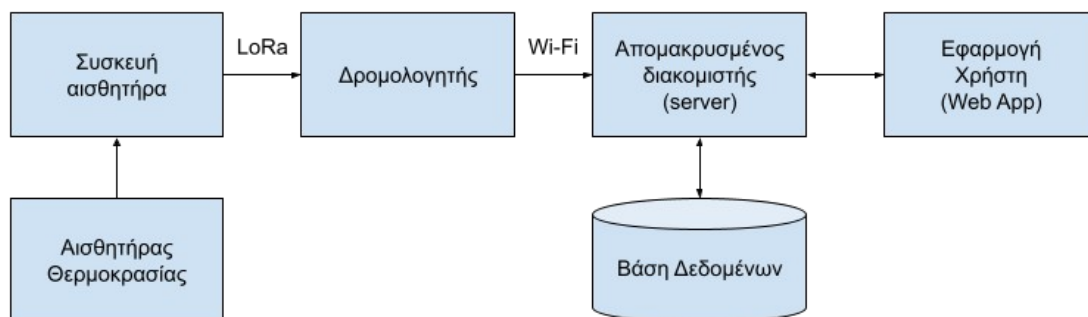
3.1 Αρχιτεκτονική του συστήματος

Η συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος, μπορεί να χωριστεί σε τρία επίπεδα, την μονάδα αισθητήρα, τον δρομολογητή και τον απομακρυσμένο διακομιστή που φιλοξενεί τον διακομιστή εφαρμογής (backend), και την εφαρμογή γραφικού περιβάλλοντος χρήστη (webapp).

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται το μπλόκ διάγραμμα του συνολικού προτεινόμενου συστήματος. Η μέτρηση των τιμών τη θερμοκρασίας πραγματοποιείται απο την συσκευή αισθητήρα, στην οποία είναι συνδεδεμένο το αισθητήριο θερμοκρασίας.

Στην συνέχεια οι μετρήσεις προωθούνται μέσω LoRa προς τον δρομολογητή, στον οποίο γίνεται η χρονοσήμανσή τους (timestamp), συντίθεται το πακέτο πληροφορίας, και προωθείται μέσω WiFi προς τον απομακρυσμένο διακομιστή.

Μετά την λήψη του πακέτου απο τον απομακρυσμένο διακομιστή, τα δεδομένα ελέγχονται και εισάγονται σε σχεσιακή βάση δεδομένων, από όπου μπορούν να αντληθούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής χρήστη για περαιτέρω οπτικοποίηση και επεξεργασία.



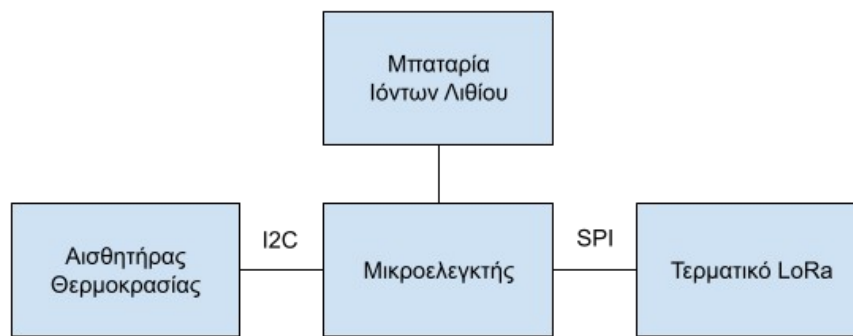
Σχήμα 3.1 - Αρχιτεκτονική συστήματος

3.2 Συσκευή αισθητήρα

Κάθε συσκευή αισθητήρα αποτελεί ένα ολοκληρωμένο υποσύστημα, σχεδιασμένο να συλλέγει δεδομένα θερμοκρασίας απο τον αισθητήρα που διαθέτει, και να αποστέλλει τα δεδομένα ασύρματα μέσω LoRa προς τον δρομολογητή.

Για την τροφοδοσία του βασίζεται σε μπαταρία ιόντων λιθίου, η οποία παρέχει την απαραίτητη αυτονομία, ώστε το σύστημα να λειτουργεί απρόσκοπτα ακόμα και σε απομακρυσμένες, δυσπρόσιτες, ή τοποθεσίες που δεν ευνοούν την χρήση σταθερής πηγής ενέργειας (π.χ. το εσωτερικό ενός ψυκτικού θαλάμου).

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται το μπλόκ-διάγραμμα των βασικών στοιχείων που συνθέτουν την συσκευή του αισθητήρα, καθώς και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία του μικροελεγκτή με τα περιφερειακά.



Σχήμα 3.2 - Μπλόκ-διάγραμμα συσκευής αισθητήρα

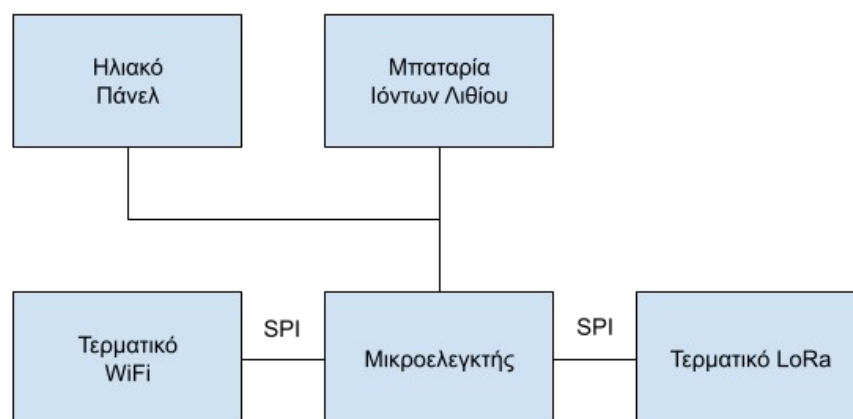
3.3 Συσκευή δρομολογητή

Η συσκευή του δρομολογητή αποτελεί στην ουσία τον συνδετήριο κρίκο ανάμεσα στην συσκευή αισθητήρα και το διαδίκτυο. Σκοπός της είναι να δέχεται τα πακέτα πληροφορίας που παράγονται από την συσκευή αισθητήρα, να τα επεξεργάζεται και να τα προωθεί μέσω WiFi στον απομακρυσμένο διακομιστή και την βάση δεδομένων.

Για την τροφοδοσία της βασίζεται σε σταθερή παροχή ενέργειας, αφού η χρήση της τεχνολογίας WiFi έχει υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια, διαθέτει όμως εφεδρικό σύστημα παροχής ενέργειας που βασίζεται σε μπαταρία ιόντων λιθίου και ηλιακό πάνελ για την αντιμετώπιση καταστάσεων διακοπής ή απώλειας της σταθερής παροχής ενέργειας.

Η χρήση της συσκευής δρομολογητή, επιτρέπει την εγκατάσταση του συστήματος σε περιβάλλοντα όπου η κάλυψη του δικτύου WiFi είναι περιορισμένη, αφού οι μεγάλες αποστάσεις επικοινωνίας που προσφέρει η τεχνολογία LoRa, επιτρέπουν την εγκατάσταση των δυο συσκευών του συστήματος σε απομακρυσμένα σημεία, κατάλληλα για την σωστή τους λειτουργία.

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται το μπλόκ-διάγραμμα των βασικών στοιχείων που συνθέτουν την συσκευή του δρομολογητή, καθώς και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία με τα περιφερειακά.



Σχήμα 3.3 - Μπλόκ διάγραμμα συσκευής δρομολογητή

3.4 Απομακρυσμένος διακομιστής

Τελευταίο δομικό στοιχείο του συστήματος αποτελεί ο απομακρυσμένος διακομιστής. Ο απομακρυσμένος διακομιστής είναι υπεύθυνος για τη λήψη των πακέτων δεδομένων από την συσκευή δρομολογητή, την εξαγωγή της χρήσιμης πληροφορίας από αυτά και αποθήκευσή της, και την παρουσίαση με τρόπο χρήσιμο προς το χρήστη, των δεδομένων που συλλέχθηκαν. Για τους σκοπούς αυτούς στον απομακρυσμένο διακομιστή φιλοξενείται ο διακομιστής εφαρμογής (backend), η βάση δεδομένων, και η υποδομή για την εφαρμογή γραφικού περιβάλλοντος χρήστη.

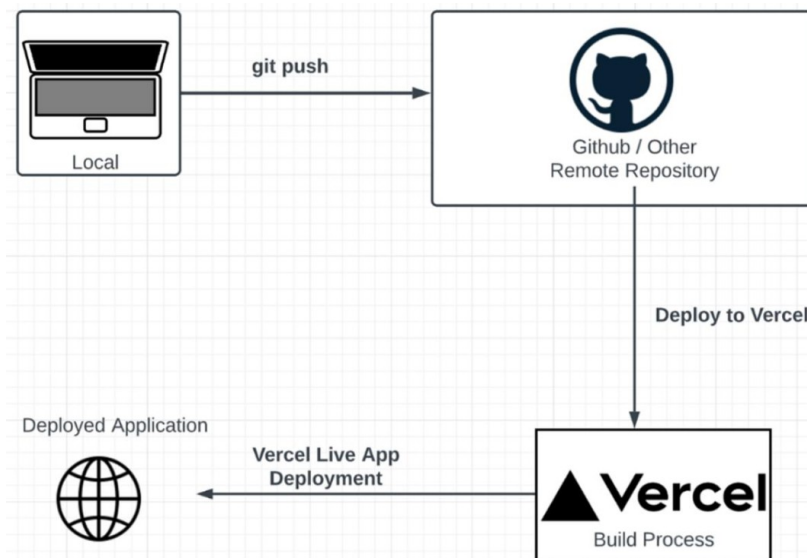
Η συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος αποτελείται από τα εξής βασικά υποσυστήματα:

1. REST API Εφαρμογής
2. Βάση Δεδομένων Supabase
3. Frontend Web Εφαρμογή
4. Υπηρεσία Deployment μέσω Vercel
5. Αποθετήριο Κώδικα GitHub

Η λειτουργία του συστήματος πραγματοποιείται ως εξής:

1. Οι μετρήσεις αποστέλλονται μέσω HTTP request στο API της εφαρμογής.
2. Το backend αποθηκεύει τα δεδομένα στη βάση Supabase.
3. Η frontend εφαρμογή ανακτά τα δεδομένα από τη βάση.
4. Τα δεδομένα παρουσιάζονται στον χρήστη σε μορφή γραφήματος ανά ημέρα.

Στην Εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η πορεία ανάπτυξης και λειτουργίας της εφαρμογής. Ο χρήστης ανεβάζει τον πηγαίο κώδικα στο αποθετήριο του GitHub, από κεί το Vercel λαμβάνει τα αρχεία και δημοσιεύει την εφαρμογή στο διαδίκτυο, από όπου είναι προσβάσιμη για όλους μέσω του δημόσιου URL.



Σχήμα 3.4 – Δομή λειτουργίας απομακρυσμένου διακομιστή.

Κεφάλαιο 4 - Κατασκευή Μονάδας Αισθητήρα και Δρομολογητή

Το παρόν κεφάλαιο πραγματευεται την αναλυτική παρουσίαση της κατασκευής του συστήματος απομακρυσμένης παρακολούθησης θερμοκρασίας. Ξεκινώντας από την επιλογή του κατάλληλου υλικού, τόσο για την συσκευή αισθητήρα όσο και για την μονάδα δρομολογητή, και καταλήγοντας στις ολοκληρωμένες συσκευές.

4.1 Επιλογή Υλικού

Τα υλικά και τα εξαρτήματα επιλέχθηκαν με κριτήριο την αξιοπιστία και την δυνατότητα αυτών για λειτουργία σε συνθήκες περιορισμένης ενεργειακής διαθεσιμότητας. Επιπλέον, για να κρατηθεί το κόστος σε όσο το δυνατόν χαμηλότερα επίπεδα, πολλά από τα εξαρτήματα που επιλέχθηκαν είναι κοινά τόσο στην συσκευή της μονάδας αισθητήρα, όσο και στην συσκευή της πύλης διασύνδεσης.

Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην επιλογή μικροελεγκτή χαμηλής κατανάλωσης, με υποστήριξη λειτουργιών αναστολής (sleep modes), καθώς και στην επιλογή αισθητήρων με χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις.

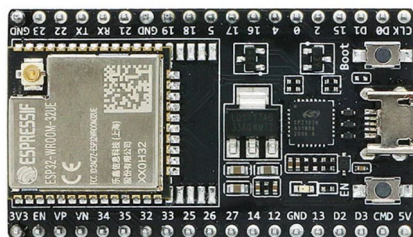
4.1.1 Μικροελεγκτής

Καρδιά της λειτουργίας τόσο της συσκευής δρομολογητή όσο και της μονάδας αισθητήρα, αποτελεί ο μικροελεγκτής αφού είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο όλων των λειτουργιών του συστήματος.

Ο μικροελεγκτής που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στην ανάπτυξη και των δύο συσκευών, είναι ο ESP-WROOM-32UE της εταιρίας Espressif. Είναι ένας διπύρηνος 32-bit μικροεπεξεργαστής με μέγιστη συχνότητα λειτουργίας έως και 240 MHz. Διαθέτει 448 KB μνήμης ROM, 520 KB μνήμης RAM, και 4 MB μνήμης Flash για την αποθήκευση του λογισμικού.

Επιπλέον, υποστηρίζει πληθώρα διεπαφών για επικοινωνία με περιφερειακά όπως UART, SPI, I2C ανάμεσα σε άλλα καθώς και ψηφιακές και αναλογικές εισόδους/εξόδους. Σημαντικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου μικροελεγκτή αποτελούν οι ενσωματωμένες δυνατότητες του για χρήση των πρωτοκόλλων Wi-Fi και Bluetooth χωρίς τη χρήση επιπλέον εξαρτημάτων ή κυκλωμάτων. Ο μικροελεγκτής λειτουργεί σε τάσεις τροφοδοσίας από 3 V έως 3,6 V και είναι σχεδιασμένος για αξιόπιστη λειτουργία σε εύρος θερμοκρασιών από -40°C έως +105°C.

Σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του μικροελεγκτή είναι το γεγονός πως υποστηρίζει λειτουργίες εξοικονόμησης ενέργειας (sleep modes), που μειώνουν την κατανάλωση ισχύος σε επίπεδα της τάξης των 10 μ A [23], στοιχείο ιδιαίτερα βοηθητικό για τη μεγιστοποίηση της αυτονομίας της μονάδας αισθητήρα, η οποία τροφοδοτείται αποκλειστικά από μπαταρία.



Σχήμα 4.1 - Αναπτυξιακή πλακέτα ESP-Wroom-32UE.

4.1.2 Αισθητήρας θερμοκρασίας

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας απο την μονάδα αισθητήρα, επιλέχθηκε ο αισθητήρας DS18B20, της εταιρίας DALLAS semiconductor.

Ο αισθητήρας αυτός επιλέχθηκε λόγω της υψηλής αξιοπιστίας, της ψηφιακής επικοινωνίας και της εύκολης ενσωμάτωσής του σε ενσωματωμένα συστήματα. Η λειτουργία του βασίζεται στο πρωτόκολλο 1-Wire και επιτρέπει τη σύνδεση πολλαπλών αισθητήρων χρησιμοποιώντας μόνο μία γραμμή δεδομένων, μειώνοντας σημαντικά την πολυπλοκότητα της καλωδίωσης και τις απαιτήσεις σε ακροδέκτες του μικροελεγκτή.

Παράλληλα, προσφέρει ικανοποιητική ακρίβεια μέτρησης ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ στην περιοχή -10°C έως $+85^{\circ}\text{C}$) και ανάλυση έως 12 bit, χαρακτηριστικά που τον καθιστούν κατάλληλο για εφαρμογές παρακολούθησης και ελέγχου θερμοκρασίας. Επιπλέον, η δυνατότητα λειτουργίας σε ευρύ φάσμα τάσης και η ανθεκτικότητά του σε ηλεκτρικό θόρυβο συμβάλλουν στη σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες.

Επιπλέον, το ανοξείδωτο προστατευτικό περίβλημα που διαθέτει, καθιστούν τον συγκεκριμένο αισθητήρα κατάλληλη επιλογή για χρήση σε βιομηχανικά ή αγροτικά περιβάλλοντα.



Σχήμα 4.2 - Αισθητήρας θερμοκρασίας DS18B20.

4.1.3 Τερματικό ασύρματης επικοινωνίας LoRa

Για την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ της μονάδας αισθητήρα και του δρομολογητή, επιλέχθηκε τερματικό LoRa που βασίζεται στο ολοκληρωμένο κύκλωμα SX1276 της εταιρίας SEMTECH.

Το τερματικό LoRa, επιλέχθηκε λόγω της δυνατότητάς του να παρέχει αξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας με ιδιαίτερα χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Η τεχνολογία LoRa που ενσωματώνει επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων σε αποστάσεις αρκετών χιλιομέτρων ακόμη και σε περιβάλλοντα με παρεμβολές ή εμπόδια, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές IoT και απομακρυσμένης παρακολούθησης.

Παράλληλα, η εύκολη διασύνδεσή του με μικροελεγκτές μέσω SPI και η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση συμβάλλουν στη δημιουργία αποδοτικών και ενεργειακά αυτόνομων συστημάτων.



Σχήμα 4.3 - Τερματικό ασύρματης επικοινωνίας LoRa.

4.1.4 Υποστηρικτικά Ηλεκτρονικά Κυκλώματα

Όπως το σύστημα επικοινωνίας και ο μικροελεγκτής, έτσι και το σύστημα τροφοδοσίας, αποτελεί σημαντικό κομμάτι της κατασκευής. Απαιτείται συγκεκριμένη τάση **τροφοδοσίας** και σύστημα **προστασίας κυκλώματος** από καταστάσεις που θα μπορούσαν να προκαλέσουν βλάβες, ειδικά όταν η συσκευή προορίζεται να λειτουργεί αυτόνομα σε περιβάλλον χωρίς σταθερή παροχή ρεύματος, και εποπτεία.

Κύκλωμα τροφοδοσίας

- Για την τροφοδοσία της μονάδας αισθητήρα, χρησιμοποιείται **επαναφορτιζόμενη μπαταρία λιθίου** τύπου 18650.
- Η τροφοδοσία του δρομολογητή βασίζεται σε σταθερή πηγή ενέργειας, ωστόσο υποστηρικτικά, υπάρχει εφεδρική παροχή μέσω φωτοβολταϊκού πάνελ και μπαταρίας λιθίου.
- Η διαδικασία φόρτισης γίνεται με χρήση του module TP4056, ενώ για τη σταθεροποίηση της τάσης λειτουργίας έχει τοποθετηθεί ένας **LDO** ρυθμιστής τάσης τύπου **TC1264**.
- Το κύκλωμα περιλαμβάνει επίσης **πυκνωτές** για τη σταθεροποίηση και φίλτρασμα των τάσεων, για σταθερότητα του LDO και αποσύζευξη (decoupling) .

Κύκλωμα φόρτισης TP4056

Η μπαταρία που χρησιμοποιήθηκε είναι επαναφορτιζόμενη μπαταρία λιθίου τύπου 18650. Μπαταρία τύπου 18650 σημαίνει ότι έχει διάμετρο 18 mm, μήκος 65 mm και ονομαστική τάση 3.6–3.7V [37] και για την φόρτιση αυτής χρησιμοποιείται το ολοκληρωμένο κύκλωμα TP4056.

Το TP4056 χρησιμοποιείται συνήθως ως **έτοιμο module** όπου περιλαμβάνει και κύκλωμα προστασίας μπαταρίας, που αποτελείται από το DW01 και διπλό MOSFET [28][29]. Η είσοδος του είναι DC, στα 5V [25]. Για την τροφοδοσία του υπάρχει θύρα USB, ενώ υπάρχει και αλλη είσοδος για σύνδεση φωτοβολταϊκού πάνελ με κατάλληλη ρύθμιση.

Το φωτοβολταϊκό πάνελ συνδέεται στην είσοδο του TP4056 και η έξοδος του κυκλώματος οδηγεί κατευθείαν στην μπαταρία. Ο ίδιος ο φορτιστής ρυθμίζει αυτόματα την τάση, και το ρεύμα φόρτισης, με τον ενσωματωμένο LDO που διαθέτει [25].

Η φόρτιση πραγματοποιείται με τη μέθοδο **CC/CV (Constant Current / Constant Voltage)**. Στην πρώτη φάση, ο TP4056 παρέχει σταθερό ρεύμα, περίπου στο 1A, το οποίο έχει καθοριστεί μέσω μιας εξωτερικής αντίστασης (Rprog). Ωστόσο, καθώς η μπαταρία φορτίζεται, η τάση της αυξάνεται μέχρι να φτάσει τα **4.2V**, με αποτέλεσμα το κύκλωμα να περνά αυτόματα στη φάση σταθερής τάσης (CV), διατηρώντας τη τάση στα 4.2V και μειώνοντας σταδιακά το ρεύμα φόρτισης.

Αν η μπαταρία είναι πολύ αποφορτισμένη, ο TP4056 ξεκινά αρχικά με μικρό ρεύμα **precharge** μέχρι

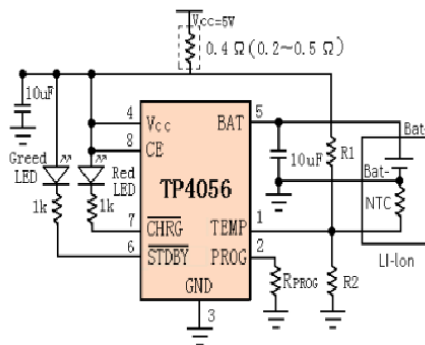
να ανέβει η τάση σε ασφαλές επίπεδο και στη συνέχεια περνά στην κανονική φάση σταθερού ρεύματος (CC). Όταν το ρεύμα πέσει κάτω από το 10% της αρχικής τιμής, η φόρτιση θεωρείται πλήρης και διακόπτεται αυτόματα, αποφεύγοντας κίνδυνο από υπερφόρτιση και υπερθέρμανση[28].

Επιπλέον, πάνω στο module υπάρχουν δύο ενδεικτικά LEDs με σκοπό την ενημέρωση της κατάστασης φόρτισης. Όταν η μπαταρία φορτίζεται εμφανίζεται κόκκινο φως (CHRG), ενώ όταν η φόρτιση ολοκληρωθεί, το LED γίνεται μπλε (STDBY).

Τέλος, διαθέτει θερμική ρύθμιση (**thermal regulation**), που σημαίνει ότι αν το ολοκληρωμένο ανεβάσει θερμοκρασία, μειώνει αυτόματα το ρεύμα φόρτισης ώστε να μην υπερθερμανθεί το κύκλωμα και η μπαταρία.[28]

Το TP4056 είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα με **8 ακροδέκτες**, δηλαδή είναι τύπου **SOP-8** ώστε να καταλαμβάνει το λιγότερο δυνατό χώρο στην πλακέτα. Στο εσωτερικό του βρίσκεται ένα **PMOS** τρανζίστορ που λειτουργεί σαν διακόπτης για να ελέγχει το το ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας αφού περιορίζει την ένταση του ρεύματος ανάλογα με την τάση και τη θερμοκρασία, αυξάνοντας την $R_{ds(on)}$ με συνέπεια να μειώνεται η gate-to-source voltage (V_{gs}). Ταυτόχρονα αποτρέπει την αντίστροφη ροή ρεύματος όταν η **τάση στην πηγή (Source)** είναι υψηλότερη από την **τάση στο Drain** και δεν χρειάζεται να προστεθεί κάποια εξωτερική δίοδος.

Επιπλέον, το κύκλωμα διαθέτει μηχανισμό **soft-start**, ώστε να αποφεύγονται οι υπερτάσεις κατά την αρχική ενεργοποίηση. Ο προγραμματισμός του ρεύματος φόρτισης γίνεται μέσω της εξωτερικής αντίστασης R_{prog} , που συνδέεται μεταξύ της αντίστοιχης ακίδας και γείωσης. Για παράδειγμα, αντίσταση **1.2kΩ οδηγεί σε ρεύμα ~1A**, ενώ αυξάνοντας την τιμή μειώνεται το ρεύμα. Ο κατασκευαστής προτείνει χρήση ρεύματος μεταξύ **500mA και 1A** για ασφαλή φόρτιση των κυψελών 18650, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη χωρητικότητα όσο και τα όρια θερμοκρασίας.[25]



Σχήμα 4.4 - Τυπικό κύκλωμα εφαρμογής του TP4056. [25]

Εκτός από την ακρίβεια στη φόρτιση, το TP4056 διαθέτει κύκλωμα για προστασία της μπαταρίας. Το κύκλωμα αυτό περιέχει το ολοκληρωμένο κύκλωμα **DW01** και δύο **MOSFET** τύπου **FS8205A**. Η επικοινωνία του DW01 με το υπόλοιπο κύκλωμα πραγματοποιείται μέσω των δύο **MOSFET**, τα οποία λειτουργούν ως διακόπτες για την έξοδο και την είσοδο της μπαταρίας. Τα MOSFET επιτρέπουν ροή ρεύματος μόνο όταν οι συνθήκες είναι ασφαλείς. Αν υπάρξει ροή μεγάλης έντασης ,όπως για παράδειγμα σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, το κύκλωμα απομονώνει άμεσα τη μπαταρία, αποτρέποντας την καταστροφή της.

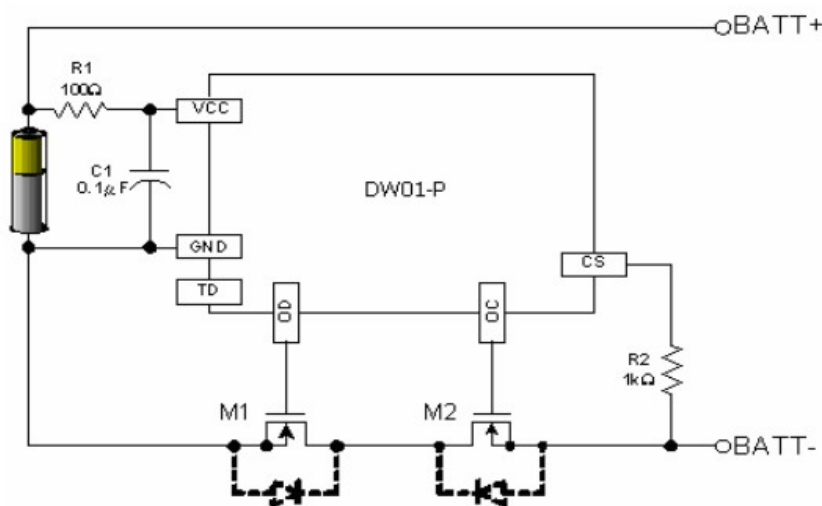
Το DW01 είναι ένα Li-Ion protection IC που θα προστατεύσει την μπαταρία από **υπερφόρτιση** (overcharge detection) , ενώ ταυτόχρονα θα κρατήσει την μονάδα υπό τάση αποτρέποντας την

υπερεκφόρτιση (overdischarge detection) και θα προστατέψει την μονάδα απο **υπερεντάσεις** (overcurrent).

Πιο συγκεκριμένα, ο εσωτερικός συγκριτής του DW01 έχει άνω τάση κατωφλίου $V_{OC} \approx 4.3V$, όταν θα ξεπεράσει αυτή την τάση θα οδύνησει την πύλη (gate) των MOSFET σε τάση αποκοπής (turn-off) και αντίθετα το κάτω κατώφλι τάσης είναι $V_{OD} \approx 2.4V$, πέφτοντας κάτω από αυτήν την τιμή τάσης, ο DW01 θα κλείσει την έξοδό του, που συνεπάγεται με άνοιγμα των μόνοςφωτ.[28]

Ο DW01 παρακολουθεί συνεχώς την τάση της μπαταρίας και επεμβαίνει όταν αυτή ξεφύγει από τα καθορισμένα όρια. Συγκεκριμένα, αν η τάση της μπαταρίας κατά την εκφόρτιση πέσει κάτω από **2.4V**, τότε διακόπτεται η παροχή προς το φορτίο (undervoltage lockout). Η παροχή αποκαθίσταται αυτόματα μόνο όταν η τάση επανέλθει πάνω από τα **2.9V**, διατηρώντας την κυψέλη εντός ασφαλούς λειτουργικού εύρους. Παράλληλα, κατά τη φόρτιση, αν η τάση της μπαταρίας ξεπεράσει τα **4.3V**, ο DW01 διακόπτει τη φόρτιση μέχρι να πέσει ξανά κάτω από τα **4.2V**, προλαμβάνοντας έτσι την υπερφόρτιση.[28]

Ακόμη, η δυνατότητα να παρέχει ρεύμα φόρτισης έως **1A** με ρύθμιση μέσω εξωτερικής αντίστασης, επιτρέπει τη χρήση του με πληθώρα τύπων κυψελών λιθίου. Η μέθοδος CC/CV προσφέρει **ακριβή έλεγχο** της φόρτισης, αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και μειώνοντας τον κίνδυνο βλάβης ή απώλειας χωρητικότητας. Παράλληλα, η **ενσωμάτωση συστήματος θερμικής ρύθμισης**, undervoltage και overvoltage προστασίας, καθώς και προστασία από βραχυκύκλωμα, εξασφαλίζουν ότι το σύστημα θα συνεχίσει να λειτουργεί με ασφάλεια ακόμη και σε δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες [25][28].



Σχήμα 4.5 - Τυπική συνδεσμολογία κυκλώματος προστασίας μπαταρίας. [25]

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
V _{CC}	Input Supply Voltage		● 4.0	5	8.0	V	
I _{CC}	Input Supply Current	Charge Mode, R _{PROG} = 1.2k StandbyMode(CHarge Terminated) Shutdown Mode (R _{PROG} Not Connected, V _{CC} < V _{BAT} , or V _{CC} < V _{IUV})	● ● ●	150 55 55	500 100 100	μA μA μA	
V _{FLOAL}	Regulated Output (Float) Voltage	0°C ≤ T _A ≤ 85°C, I _{BAT} = 40mA		4.137	4.2	4.263	V
I _{BAT}	BAT Pin Current Text condition: V _{BAT} = 4.0V	R _{PROG} = 2.4k, Current Mode R _{PROG} = 1.2k, Current Mode Standby Mode, V _{BAT} = 4.2V	● ● ●	450 950 0	500 1000 -2.5	550 1050 -6	mA mA μA
I _{TRIKL}	Trickle Charge Current	V _{BAT} < V _{TRIKL} , R _{PROG} = 1.2K	●	120	130	140	mA
V _{TRIKL}	Trickle Charge Threshold Voltage	R _{PROG} = 1.2K, V _{BAT} Rising		2.8	2.9	3.0	V
V _{TRHYS}	Trickle Charge Hysteresis Voltage	R _{PROG} = 1.2K		60	80	100	mV
T _{LIM}	Junction Temperature in Constant Temperature Mode			145			°C

Σχήμα 4.6 – Φύλλο δεδομένων κυκλώματος φόρτισης TP4056. [25]

Ρύθμιση και Σταθεροποίηση Τάσης με LDO και Φίλτρα

Απαραίτητη προϋπόθεση για την σωστή λειτουργία του κυκλώματος είναι η σταθερή και ελεγχόμενη τροφοδοσία. Η μπαταρία λιθίου τύπου 18650 που χρησιμοποιείται, παρέχει επαρκή ενέργεια, ωστόσο η τάση εξόδου της δεν είναι σταθερή. Κυμαίνεται από περίπου **4.2V** όταν είναι πλήρως φορτισμένη, έως **2.7V** όταν πλησιάζει την εκφόρτιση[37]. Αυτή η διακύμανση δεν είναι κατάλληλη για τον ESP32, ο οποίος απαιτεί **συνεχή τάση 3.3V** για να λειτουργήσει σωστά[30].

Για να διασφαλιστεί ότι ο μικροελεγκτής θα έχει πάντα σταθερή τάση, ενσωματώθηκαν και στις δυο μονάδες **LDO (Low Dropout Regulator)** και μάλιστα ο TC1264-3.3VAB για να τροφοδοτεί τον μικροελεγκτή με **σταθερή είσοδο 3.3V**.

Η λειτουργία ενός κοινού LDO είναι συνεχής όσο η τάση στην είσοδό του παραμένει τουλάχιστον 1.1V πάνω από την έξοδο (dropout voltage). Αυτό σημαίνει ότι για να δώσει σταθερά 3.3V, απαιτεί περίπου **4.4V στην είσοδο**, γεγονός που στην πράξη σημαίνει ότι το σύστημα λειτουργεί σταθερά μόνο όταν η μπαταρία είναι σχεδόν πλήρως φορτισμένη. Σε χαμηλότερες τάσεις, η έξοδος αρχίζει να πέφτει και ενδέχεται να μην καλύπτει τις απαιτήσεις του ESP32.

Την λύση θα δώσει η επιλογή ενός γραμμικού ρυθμιστή χαμηλής πτώσης τάσης (Low Dropout Voltage LDO). Το **Low Dropout** είναι η ικανότητα του ρυθμιστή να διατηρεί σταθερή τάση εξόδου ακόμη και όταν η τάση εισόδου βρίσκεται πολύ κοντά στην επιθυμητή έξοδο. Ο **TC1264** που χρησιμοποιήθηκε, έχει dropout voltage μόλις **0.27 V** στα 500 mA και άρα θα χρειαστεί η μπαταρία να έχει **3.56 V** έξοδο ώστε να συνεχίζει να τροφοδοτεί τον ESP32 με 3.3V [5].

Στην είσοδο του LDO, τοποθετείται συνήθως ένας **ηλεκτρολυτικός πυκνωτής 10μF**, ο οποίος εξομαλύνει τη μεταβαλλόμενη είσοδο από την μπαταρία και απορροφά υπερτάσεις ή στιγμιαίες πτώσεις τάσης που ενδέχεται να προκύψουν λόγω απότομων αλλαγών στη ζήτηση ενέργειας. Αντίστοιχα, στην έξοδο του LDO, προστίθεται ένας συνδυασμός με έναν **κεραμικού πυκνωτή 100nF** και ενός **ηλεκτρολυτικού 4.7μF έως 10μF** παράλληλα συνδεδεμένοι μεταξύ τους, ώστε να επιτυγχάνεται σταθερή έξοδος και να καταστέλλονται υψηλής συχνότητας θόρυβοι[5].

Εκτός από το φιλτράρισμα, οι πυκνωτές συνεισφέρουν και στη λεγόμενη **αποσύζευξη (decoupling)**, δηλαδή στην απομόνωση των επιμέρους κυκλωμάτων μεταξύ τους, ώστε διαταραχές ή αιχμές από ένα σημείο του κυκλώματος να μην επηρεάζουν αρνητικά τη λειτουργία άλλων ευαίσθητων τμημάτων, όπως ο ESP32, το WiFi ή ο αισθητήρας θερμοκρασίας.[36]

4.2 Μονάδα Αισθητήρα

Μετά την επιλογή του κατάλληλου υλικού, ακολουθεί η κατασκευή των συσκευών σε φυσικό επίπεδο. Ξεκινώντας από την μονάδα αισθητήρα, η οποία είναι υπεύθυνη για την συλλογή των μετρήσεων, τον έλεγχο και την ασύρματη αποστολή τους προς τη μονάδα δρομολογητή.

4.2.1 Σύνδεση με το τερματικό LoRa

Η σύνδεση του μικροελεγκτή με το τερματικό LoRa γίνεται μέσω διαύλου SPI (Serial Peripheral Interface). Ο μικροελεγκτής λειτουργεί ως master και το τερματικό SX1276 ως slave, με τις γραμμές SCLK, MOSI, MISO και CS (Chip Select) να χρησιμοποιούνται για την ανταλλαγή δεδομένων και τον συγχρονισμό της επικοινωνίας [11].

Πιο συγκεκριμένα, η γραμμή SCLK (Serial Clock) παρέχει το ρολόι συγχρονισμού που δημιουργείται από τον ESP32, η γραμμή MOSI (Master Out Slave In) χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων από τον μικροελεγκτή προς το LoRa module, ενώ η γραμμή MISO (Master In Slave Out) επιτρέπει τη μεταφορά δεδομένων από το SX1276 προς τον ESP32. Η γραμμή CS ενεργοποιεί το συγκεκριμένο περιφερειακό κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας, επιτρέποντας στον μικροελεγκτή να επιλέγει τότε θα πραγματοποιείται ανταλλαγή δεδομένων.

Επιπλέον, χρησιμοποιούνται και βοηθητικές γραμμές ελέγχου, όπως η RESET για την επανεκκίνηση του SX1276 και οι γραμμές DIO (Digital Input/Output), οι οποίες αξιοποιούνται για τη διαχείριση διακοπών (interrupts) και την ενημέρωση του ESP32 σχετικά με γεγονότα όπως η ολοκλήρωση λήψης ή αποστολής πακέτων.

Η επικοινωνία μέσω SPI επιλέχθηκε λόγω της υψηλής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων και της αξιοπιστίας της, χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητα για εφαρμογές ασύρματης επικοινωνίας χαμηλής κατανάλωσης και μεγάλης εμβέλειας, όπως το LoRa. Μέσω αυτής της διασύνδεσης, ο ESP32 μπορεί να ρυθμίζει τις παραμέτρους λειτουργίας του SX1276, όπως τη συχνότητα λειτουργίας, το spreading factor, το bandwidth και την ισχύ εκπομπής, καθώς και να αποστέλλει ή να λαμβάνει πακέτα δεδομένων.

4.2.2 Σύνδεση με τον αισθητήρα θερμοκρασίας

Ο αισθητήρας θερμοκρασίας που επιλέχθηκε διαθέτει μοναδική διεύθυνση 64-bit, γεγονός που επιτρέπει τη σύνδεση πολλών αισθητήρων στην ίδια γραμμή δεδομένων χωρίς να δημιουργούνται συγκρούσεις επικοινωνίας.

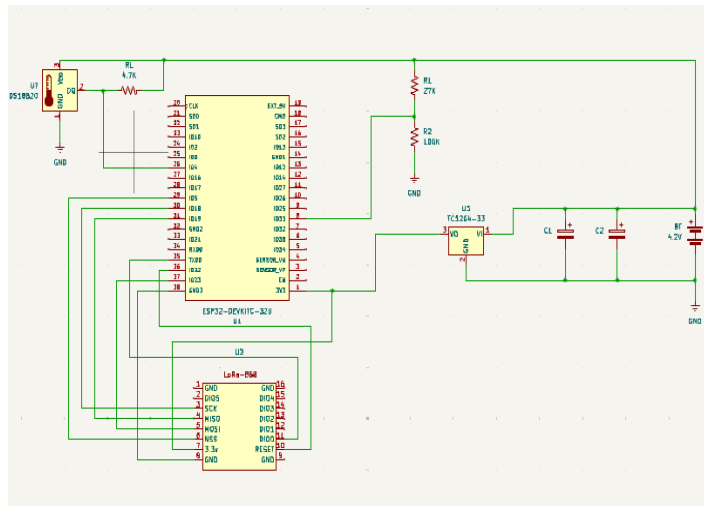
Για τη σωστή λειτουργία του διαύλου 1-Wire χρησιμοποιείται αντίσταση pull-up, τιμής 4.7 kΩ, μεταξύ της γραμμής δεδομένων και της τάσης τροφοδοσίας.

4.2.3 Σχηματικό διάγραμμα μονάδας αισθητήρα

Στο σχήμα παρουσιάζεται το κύκλωμα διασύνδεσης του μικροελεγκτή ESP32 με τον αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20 και το LoRa module SX1276. Ο αισθητήρας DS18B20 συνδέεται στον ESP32 μέσω του πρωτοκόλλου 1-Wire, με χρήση αντίστασης pull-up 4.7 kΩ στη γραμμή δεδομένων για τη σωστή λειτουργία της επικοινωνίας. Το SX1276 επικοινωνεί με τον ESP32 μέσω του διαύλου SPI, χρησιμοποιώντας τις γραμμές SCLK, MOSI, MISO και CS.

Επιπλέον, απεικονίζεται το κύκλωμα τροφοδοσίας, όπου η μπαταρία τύπου 18650 παρέχει την

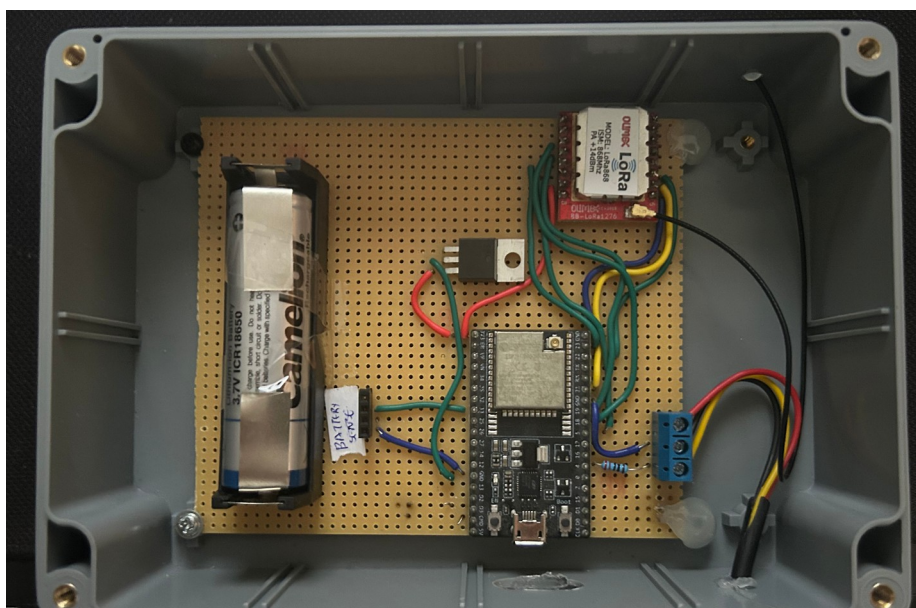
απαιτούμενη ενέργεια στο σύστημα. Η τάση ρυθμίζεται μέσω του σταθεροποιητή χαμηλής πτώσης τάσης (LDO) TC1264-3.3V, ώστε να εξασφαλίζεται σταθερή τροφοδοσία 3.3 V για την ασφαλή λειτουργία του ESP32, του SX1276 και του αισθητήρα θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.7 – Σχηματικό διάγραμμα μονάδας αισθητήρα.

4.2.4 Τελική μορφή μονάδας αισθητήρα

Στο σχήμα που ακολουθεί, απεικονίζεται η τελική μορφή της μονάδας αισθητήρα. Διακρίνεται το σύστημα τοποθετημένο εντός του προστατευτικού περιβλήματος, πιστοποιημένο με ISO67 για προστασία από σκόνη και νερό. Έτσι το σύστημα μπορεί να λειτουργεί με ασφάλεια σε περιβάλλον αγροτικό ή βιομηχανικό. Για τα εξαρτήματα που είναι αναγκαίο να εξέρχονται του περιβλήματος (κεραία LoRa, ακροδέκτης αισθητήρα θερμοκρασίας), οι οπές προστατεύονται με σιλικόνη για να διασφαλισθεί όσο το δυνατόν η συνέχεια της προστασίας.



Σχήμα 4.8 – Μονάδα Αισθητήρα

4.3 Μονάδα δρομολογητή

Ο δρομολογητής είναι αυτός που κάνει την λήψη και προώθηση των δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά προέρχεται από τις μετρήσεις που παίρνει ο αισθητήρας και μέσω LoRa γίνεται η αποστολή τους με την χρήση WiFi σε έναν υπολογιστή για επεξεργασία και αποθήκευση.

4.3.1 Σύνδεση με το τερματικό LoRa

Η σύνδεση της μονάδας δρομολογητή με το τερματικό LoRa SX1276, γίνεται με τον ίδιο τρόπο με αυτό της μονάδας αισθητήρα. Η επιλογή αυτή συμβάλει στην μείωση της πολυπλοκότητας της συνολικής υλοποίησης του συστήματος, και διευκολύνει την συντήρηση και την ανάπτυξη κώδικα.

4.3.2 Σύνδεση με το τερματικό Wi-Fi

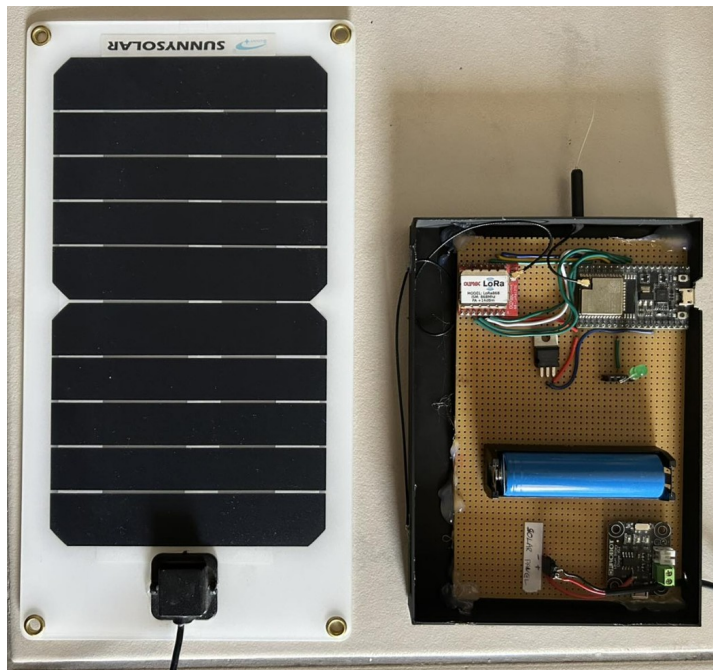
Για την σύνδεση με το τερματικό Wi-Fi, δεν απαιτούνται επιπλέον φυσικές συνδέσεις. Ο μικροελεγκτής ESP32 προσφέρει Wi-Fi λειτουργικότητα ενσωματωμένη στο ολοκληρωμένο κύκλωμα του. Έτσι αρκεί η χρήση μιας εξωτερικής κεραίας, στην κατάλληλη συχνότητα, ώστε να γίνει χρήση των δυνατοτήτων της Wi-Fi επικοινωνίας.

4.3.3 Τελική μορφή μονάδας δρομολογητή

Στο σχήμα παρουσιάζεται η ολοκληρωμένη διάταξη της ασύρματης μονάδας αισθητήρα, η οποία αποτελείται από τον μικροελεγκτή ESP32, το LoRa module SX1276, την επαναφορτιζόμενη μπαταρία τύπου 18650, το κύκλωμα φόρτισης TP4056 και το ηλιακό πάνελ τροφοδοσίας.

Ο ESP32 λειτουργεί ως κεντρική μονάδα επεξεργασίας και ελέγχου, ενώ το SX1276 αναλαμβάνει την ασύρματη επικοινωνία μέσω τεχνολογίας LoRa. Η τροφοδοσία του συστήματος πραγματοποιείται από τη μπαταρία 18650, η οποία επαναφορτίζεται μέσω του κυκλώματος TP4056. Το κύκλωμα φόρτισης διαχειρίζεται τη διαδικασία φόρτισης και προστατεύει τη μπαταρία από υπερφόρτιση και υπερεκφόρτιση.

Τέλος, διακρίνεται το φωτοβολταϊκό πάνελ, και το κύκλωμα φόρτισης της μπαταρίας μέσω αυτού, ως εφεδρική παροχή ενέργειας για το σύστημα.



Σχήμα 4.9 - Μονάδα δρομολογητή του προτεινόμενου συστήματος.

Κεφάλαιο 5 – Υλοποίηση Λογισμικού

Στο παρόν κεφάλαιο, περιγράφεται η δομή του λογισμικού και η λειτουργικότητα για όλα τα στοιχεία του προτεινόμενου συστήματος.

Οι συσκευές προγραμματίστηκαν ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή, αδιάλειπτη και αξιόπιστη ροή δεδομένων μεταξύ των δύο μονάδων. Έμφαση δόθηκε και στην εξοικονόμηση ενέργειας, με σκοπό να μεγιστοποιηθεί η ικανότητα της αυτονομίας και των δύο μονάδων.

5.1 Επιλογή εργαλείων ανάπτυξης λογισμικού

Για την ανάπτυξη του λογισμικού του προτεινόμενου συστήματος επιλέχθηκε το περιβάλλον ανάπτυξης Visual Studio Code της Microsoft.

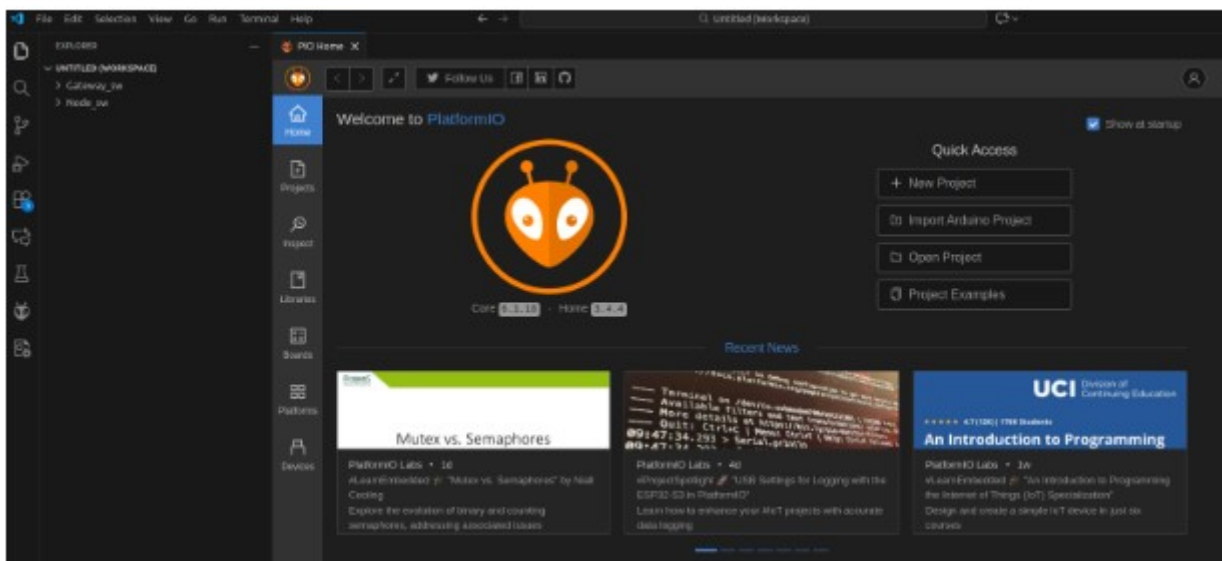
Το Visual Studio Code (VS Code) είναι ένας σύγχρονος και ιδιαίτερα δημοφιλής επεξεργαστής κώδικα, σχεδιασμένος για να κάνει τον προγραμματισμό πιο γρήγορο και αποδοτικό. Διακρίνεται για το φιλικό περιβάλλον του, που συνδυάζει απλότητα με ισχυρές δυνατότητες.

Οι γλώσσες προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας είναι ποικίλες και επιλέχθηκαν κατάλληλα για την υποστήριξη του εκάστοτε υποσυστήματος.

Για την ανάπτυξη του λογισμικού της συσκευής αισθητήρα και της μονάδας δρομολογητή χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός των γλωσσών C και C++, οι οποίες είναι ευρέως διαδεδομένες σε εφαρμογές ενσωματωμένων συστημάτων.

Για την υλοποίηση των λειτουργιών του απομακρυσμένου διακομιστή και της διαδικτυακής εφαρμογής χρησιμοποιήθηκαν οι γλώσσες Python, HTML, JavaScript και CSS.

Για την ανάπτυξη του ενσωματωμένου λογισμικού χρησιμοποιήθηκε η επέκταση PlatformIO για το VS Code, η οποία παρέχει ολοκληρωμένα εργαλεία για τη μεταγλώττιση και αποστολή του κώδικα μέσω USB στους μικροελεγκτές, καθώς και δυνατότητα παρακολούθησης της σειριακής επικοινωνίας (serial monitor) για την εμφάνιση διαγνωστικών μηνυμάτων μέσω UART.



Σχήμα 5.1 - Κεντρικό παράθυρο VSCode με την επέκταση PlatformIO.

5.2 Περιγραφή λογισμικού μονάδας δρομολογητή

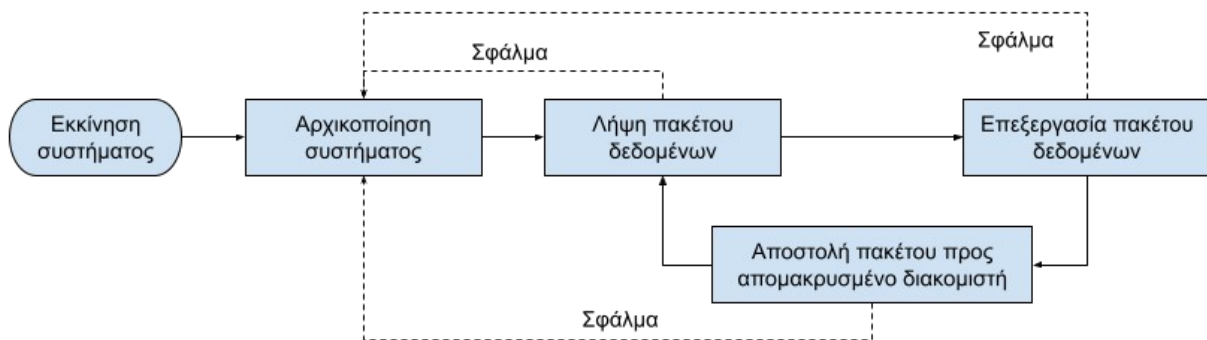
Η μονάδα δρομολογητή λειτουργεί ως ο ενδιάμεσος κόμβος, ο οποίος λαμβάνει τα δεδομένα, τα επεξεργάζεται προσθέτοντας χρονική σήμανση και τα προωθεί μέσω δικτύου WiFi σε απομακρυσμένο διακομιστή.

5.2.1 Λειτουργία μονάδας δρομολογητή

Ο ρόλος της συγκεκριμένης μονάδας χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αποτελείται από την διαδικασία λήψης των δεδομένων LoRa και παραγωγή του πακέτου πληροφορίας, και το δεύτερο μέρος αποτελείται από την προώθηση του πακέτου πληροφορίας μέσω WiFi σε HTTP endpoint του server, ώστε αυτό να αποθηκευτεί.

Τα δύο παραπάνω μέρη εκτελούνται επαναλαμβανόμενα κατά την διάρκεια λειτουργίας της συσκευής. Σε περίπτωση εντοπισμού σφάλματος σε κάποια από τις διαδικασίες που εκτελούνται, η συσκευή προσπαθεί να το επιλύσει είτε μέσω των παρεχόμενων εργαλείων από τις βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν, είτε πραγματοποιώντας επανεκκίνηση.

Στο σχήμα που ακολουθεί, απεικονίζεται το διάγραμμα ροής για το λογισμικό της μονάδας δρομολογητή. Η κανονική ροή ακολουθεί την διαδρομή που υποδεικνύεται από τα έντονα σημειωμένα βέλη, ξεκινώντας από την κατάσταση εκκίνησης του συστήματος. Με την διακεκομμένη σήμανση, σημειώνεται η πορεία που ακολουθείται σε περίπτωση σφάλματος σε κάποια κατάσταση.



Σχήμα 5.2 - Ροή λογισμικού μονάδας δρομολογητή.

- **Κατάσταση αρχικοποίησης.**

Αυτή η κατάσταση αποτελεί την εναρκτήρια κατάσταση για το λογισμικό της μονάδας δρομολογητή. Σε αυτή την κατάσταση πραγματοποιείται η σύνδεση στο δίκτυο WiFi μέσω της βιβλιοθήκης WiFiManager, ελέγχεται η σύνδεση και αρχικοποιείται ο διάυλος επικοινωνίας με τον απομακρυσμένο διακομιστή λήψη χρόνου. Τέλος, αρχικοποιείται και ελέγχεται η σύνδεση του μικροελεγκτή με το τερματικό LoRa.

- **Κατάσταση λήψης πακέτου δεδομένων**

Σε αυτή την κατάσταση, ο μικροελεγκτής, ελέγχει ανα τακτά χρονικά διαστήματα το τερματικό LoRa για άφιξη πακέτου. Σε περίπτωση που ληφθεί επιτυχώς κάποιο πακέτο απο το τερματικό, ο μικροελεγκτής το επεξεργάζεται και ελέγχεται ως προς το περιεχόμενό του. Αν το περιεχόμενο του πακέτου είναι εντός των αναμενόμενων προδιαγραφών, η ροή προχωρά στην επεξεργασία του πακέτου, αλλιώς το πακέτο απορρίπτεται και η ροή παραμένει στην ίδια κατάσταση.

- **Κατάσταση επεξεργασίας πακέτου δεδομένων**

Μετά την επιτυχή λήψη του πακέτου δεδομένων, ο μικροελεγκτής κατασκευάζει το τελικό πακέτο πληροφορίας που θα μεταδοθεί προς τον απομακρυσμένο διακομιστή. Το πακέτο πληροφορίας έχει την δομή που απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί, και αποτελείται απο την τιμή της θερμοκρασίας που λήφθηκε απο την συσκευή αισθητήρα, και την χρονοσήμανση που προστίθεται απο την μονάδα δρομολογητή κατα την προώθηση του στον απομακρυσμένο διακομιστή.

Temperature (float)	Date (DD/MM/YY)	Time (HH:MM)
---------------------	-----------------	--------------

Σχήμα 5.3 – Δομή πακέτου πληροφορίας.

- **Κατάσταση αποστολής πακέτου προς τον απομακρυσμένο διακομιστή**

Με την κατάσταση αυτή ολοκληρώνεται ο κυρίως κύκλος λειτουργίας της μονάδας δρομολογητή. Στην κατάσταση αυτή γίνεται προσπάθεια αποστολής του πακέτου προς τον απομακρυσμένο διακομιστή μέσω αιτήματος HTTP POST, και ελέγχεται η επιτυχία η αποτυχία εισαγωγής του στη βάση δεδομένων.

5.2.2 Σύνδεση σε δίκτυο WiFi

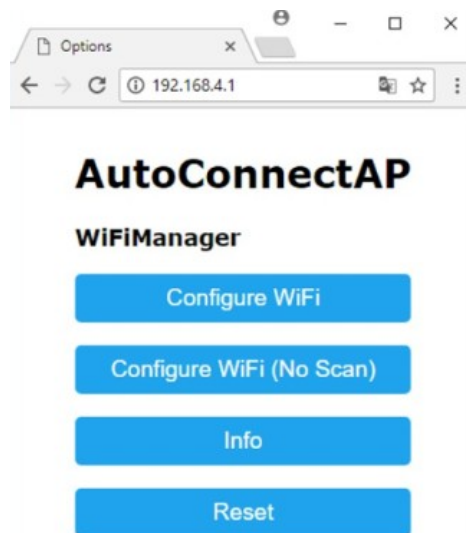
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος σύνδεσης της συσκευής με το τοπικό δίκτυο WiFi. Η εισαγωγή των στοιχείων του δικτύου ως μεταβλητές στον πηγαίο κώδικα, απαιτούν επαναπρογραμματισμό της συσκευής και αυξάνουν τις απαιτήσεις σε συντήρηση, μειώνοντας παράλληλα την φορητότητα του συστήματος.

Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε να γίνει χρήση της βιβλιοθήκης WiFiManager. Μέσω της βιβλιοθήκης αυτής και των συναρτήσεων που προσφέρει, ο χρήστης μπορεί να εισάγει τα στοιχεία του τοπικού δικτύου στον μικροελεγκτή μέσω του κινητού, του τάμπλετ η του υπολογιστή του, και να τα αποθηκεύσει για τις μετέπειτα χρήσεις.

Πιο συγκεκριμένα, η συσκευή κατα την εκκίνηση ελέγχει την εσωτερική μνήμη της για τυχόν αποθηκευμένα δίκτυα WiFi, αν δεν βρεθεί κάποιο δίκτυο, η συσκευή δημιουργεί δικό της τοπικό δίκτυο με την ονομασία “AutoConnect”. Ο χρήστης μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο αυτό, και θα οδηγηθεί αυτόματα στην σελίδα που παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί, ώστε να εισάγει τα στοιχεία του δικτύου στο οποίο θέλει να συνδεθεί η συσκευή. Τα στοιχεία που εισάγονται αποθηκεύονται στην εσωτερική μνήμη της συσκευής και χρησιμοποιούνται αυτόματα σε κάθε επανεκκίνηση.

Σε περίπτωση που η συσκευή βρεθεί εκτός εμβέλειας του αποθηκευμένου δικτύου, η παραπάνω διαδικασία επανενεργοποιείται, και ο χρήστης μπορεί να εισάγει τα στοιχεία του νέου δικτύου στο οποίο θέλει να συνδέσει την συσκευή.

Επιπλέον, σε περίπτωση που η σύνδεση με το δίκτυο χαθεί κατά την λειτουργία της συσκευής, η βιβλιοθήκη χειρίζεται το σφάλμα και πραγματοποιεί αυτόματα προσπάθεια επανασύνδεσης.



Σχήμα 5.4 – Σελίδα εισαγωγής στοιχείων δικτύου WiFi

5.2.3 Χειρισμός σφάλματος στην ροή

Σε περίπτωση που προκύψει σφάλμα σε κάποια από τις παραπάνω διαδικασίες, έχουν υλοποιηθεί μηχανισμοί ανάκαμψης, ανάλογα με την κρισιμότητα του σφάλματος.

Αρχικά γίνεται προσπάθεια επιδιόρθωσής του σφάλματος από τον μικροελεγκτή, και ανάλογα με τις δυνατότητες που αυτός έχει σε σχέση με την φύση του σφάλματος. Σε περίπτωση που το λογισμικό δεν είναι σε θέση να επιδιορθώσει το σφάλμα, πραγματοποιείται επανεκκίνηση της συσκευής, σε μια προσπάθεια να επανέλθει σε γνωστή σταθερή κατάσταση.

5.3 Περιγραφή λογισμικού συσκευής αισθητήρα

Η μονάδα αισθητήρα αποτελεί το τμήμα του συστήματος που είναι υπεύθυνο για την μέτρηση της θερμοκρασίας και την ασύρματη μετάδοση των δεδομένων προς την μονάδα δρομολογητή μέσω πρωτοκόλλου LoRa.

Η λειτουργία της σχεδιάστηκε με γνώμονα την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ώστε η συσκευή να μπορεί να λειτουργεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς ανάγκη συχνής τροφοδοσίας ή συντήρησης.

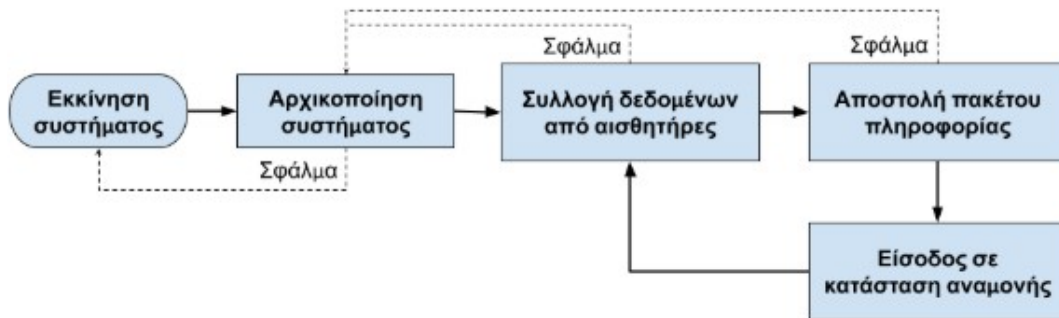
5.3.1 Λειτουργία συσκευής αισθητήρα

Η λειτουργία της μονάδας αισθητήρα βασίζεται σε έναν επαναλαμβανόμενο κύκλο ενεργειών. Αρχικά πραγματοποιείται η αρχικοποίηση του συστήματος και των επιμέρους περιφερειακών μονάδων. Στην συνέχεια ο μικροελεγκτής συλλέγει την μέτρηση θερμοκρασίας από τον αισθητήρα DS18B20, δημιουργεί το πακέτο πληροφορίας και το αποστέλλει ασύρματα μέσω LoRa προς την μονάδα δρομολογητή.

Μετά την ολοκλήρωση της αποστολής, η συσκευή εισέρχεται σε κατάσταση βαθιάς αναμονής (deep sleep), ώστε να μειωθεί σημαντικά η κατανάλωση ενέργειας. Με την λήξη του χρονικού διαστήματος αναμονής, ο μικροελεγκτής επανεκκινεί και ο κύκλος λειτουργίας επαναλαμβάνεται.

Σε περίπτωση εμφάνισης σφάλματος κατά την λειτουργία, εφαρμόζονται μηχανισμοί χειρισμού σφαλμάτων. Αν το σφάλμα δεν μπορεί να αποκατασταθεί μέσω λογισμικού, η συσκευή παραμένει σε ασφαλή κατάσταση ή πραγματοποιεί επανεκκίνηση.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ροή λειτουργίας του λογισμικού της μονάδας αισθητήρα. Η κανονική ροή λειτουργίας ακολουθεί τα έντονα βέλη, ενώ η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην πορεία που ακολουθείται σε περίπτωση σφάλματος.



Σχήμα 5.5 - Ροή λογισμικού συσκευής αισθητήρα.

- **Κατάσταση αρχικοποίησης συστήματος**

Η κατάσταση αυτή αποτελεί την αρχική κατάσταση λειτουργίας της μονάδας αισθητήρα. Κατά την εκκίνηση του μικροελεγκτή πραγματοποιείται: αρχικοποίηση της σειριακής επικοινωνίας για σκοπούς αποσφαλμάτωσης, αρχικοποίηση του αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20 μέσω της βιβλιοθήκης DallasTemperature, αρχικοποίηση και έλεγχος λειτουργίας του τερματικού LoRa.

- **Κατάσταση συλλογής δεδομένων από αισθητήρα**

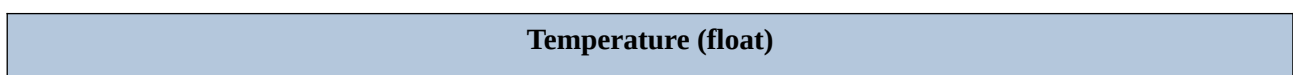
Σε αυτή την κατάσταση ο μικροελεγκτής ενεργοποιεί τον αισθητήρα θερμοκρασίας και ζητά νέα μέτρηση μέσω της συνάρτησης `requestTemperatures()`. Στην συνέχεια ανακτάται η τιμή θερμοκρασίας από τον αισθητήρα DS18B20 μέσω της συνάρτησης `getTempCByIndex(0)`.

Η τιμή που λαμβάνεται αποθηκεύεται σε μεταβλητή τύπου `float` και χρησιμοποιείται για την δημιουργία του πακέτου πληροφορίας.

- **Κατάσταση αποστολής πακέτου πληροφορίας**

Μετά την επιτυχή λήψη της μέτρησης, ο μικροελεγκτής δημιουργεί το πακέτο πληροφορίας που θα μεταδοθεί μέσω LoRa προς την μονάδα δρομολογητή.

Το πακέτο αποτελείται από την τιμή της θερμοκρασίας σε μορφή συμβολοσειράς και αποστέλλεται μέσω των συναρτήσεων `LoRa.beginPacket()`, `LoRa.print()` και `LoRa.endPacket()`. Μετά την ολοκλήρωση της αποστολής, το τερματικό LoRa τίθεται σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης μέσω της συνάρτησης `LoRa.sleep()`. Η δομή του πακέτου πληροφορίας παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 5.6 – Δομή πακέτου δεδομένων μονάδας αισθητήρα.

- **Κατάσταση εισόδου σε κατάσταση αναμονής**

Μετά την ολοκλήρωση της αποστολής δεδομένων, η μονάδα αισθητήρα εισέρχεται σε κατάσταση αναμονής (deep sleep), ώστε να μειωθεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας του συστήματος.

Η αφύπνιση της συσκευής πραγματοποιείται μέσω χρονοδιακόπτη του μικροελεγκτή, ο οποίος ρυθμίζεται από τον χρήστη ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Μετά την λήξη του χρονικού αυτού διαστήματος, ο μικροελεγκτής επανεκκινεί και εκτελεί ξανά τον κύκλο λειτουργίας του λογισμικού.

5.3.2 Κατάσταση αδράνειας και εξοικονόμηση ενέργειας

Η συσκευή της μονάδας αισθητήρα είναι σχεδιασμένη ώστε να λειτουργεί αυτόνομα σε περιβάλλον με μικρή ή μηδενική ανθρώπινη παρέμβαση, έτσι είναι αναγκαίο η διάρκεια ζωής της να παρατείνεται όσο το δυνατόν περισσότερο με χρήση τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας.

Μετά τις καταστάσεις συλλογής και αποστολής των μετρήσεων, η συσκευή εισέρχεται σε κατάσταση αδράνειας. Σε αυτή την κατάσταση, το τερματικό LoRa τίθεται σε κατάσταση ύπνου “sleep”, και ο μικροελεγκτής σε κατάσταση βαθύ ύπνου “deep sleep”. Σε αυτές τις καταστάσεις, η κατανάλωση ενέργειας από την συσκευή μειώνεται ραγδαία. Ενδεικτικά, το τερματικό LoRa σε κατάσταση ύπνου κυμαίνεται από 0,2uA έως 1uA, ενώ για τον μικροελεγκτή η κατανάλωση ενέργειας κυμαίνεται από 10uA έως 150uA.

5.3.3 Χειρισμός σφαλμάτων στην ροή

Ο χειρισμός σφαλμάτων στην ροή του λογισμικού για την συσκευή αισθητήρα, ακολουθεί παρόμοια λογική με αυτή της μονάδας δρομολογητή.

Αρχικά γίνεται προσπάθεια επιδιόρθωσής του σφάλματος από τον μικροελεγκτή, και ανάλογα με τις δυνατότητες που αυτός έχει σε σχέση με την φύση του σφάλματος. Σε περίπτωση που το λογισμικό δεν είναι σε θέση να επιδιορθώσει το σφάλμα, πραγματοποιείται επανεκκίνηση της συσκευής, σε μια προσπάθεια να επανέλθει σε γνωστή σταθερή κατάσταση.

5.4 Απομακρυσμένος διακομιστής

Η εφαρμογή που αναπτύχθηκε επιτρέπει την αποστολή μετρήσεων θερμοκρασίας μέσω HTTP αιτημάτων, την αποθήκευσή τους σε βάση δεδομένων Supabase και την οπτικοποίηση των δεδομένων σε μορφή γραφημάτων ανά ημέρα.

Η ανάπτυξη της εφαρμογής του απομακρυσμένου διακομιστή βασίστηκε στο framework Next.js, ενώ η φιλοξενία και το deployment πραγματοποιούνται μέσω της πλατφόρμας Vercel. Ο πηγαίος κώδικας της εφαρμογής φιλοξενείται στο GitHub, από όπου γίνεται αυτόματη ανάκτηση και ανάπτυξη (continuous deployment) από το Vercel.

5.4.2 Περιγραφή βασικών αρχείων πηγαίου κώδικα

- ➔ Το αρχείο **route.js** υλοποιεί το REST API endpoint της εφαρμογής. Το endpoint αυτό δέχεται HTTP αιτήματα από το sensor node, συνήθως με τη μέθοδο POST.

Οι βασικές λειτουργίες του endpoint είναι:

- Λήψη δεδομένων θερμοκρασίας
- Έλεγχος εγκυρότητας δεδομένων
- Εισαγωγή εγγραφών στη βάση Supabase
- Επιστροφή κατάλληλων HTTP responses

Η χρήση API routes στο Next.js επιτρέπει την υλοποίηση backend λειτουργιών χωρίς την ανάγκη ξεχωριστού server framework.

- ➔ Το component **TemperatureChart.js** είναι υπεύθυνο για την απεικόνιση των μετρήσεων θερμοκρασίας σε μορφή γραφήματος.

Οι βασικές λειτουργίες του component περιλαμβάνουν:

- Ανάκτηση δεδομένων θερμοκρασίας
- Ομαδοποίηση ανά ημέρα
- Δημιουργία χρονικών αξόνων
- Δυναμική ανανέωση δεδομένων
- Οπτικοποίηση με χρήση chart library

Το γράφημα επιτρέπει στον χρήστη να παρακολουθεί τη μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Το αρχείο **page.js** αποτελεί την κύρια σελίδα της εφαρμογής.

Στο αρχείο αυτό γίνεται:

- Η φόρτωση των δεδομένων
- Η ενσωμάτωση του component γραφήματος
- Η απόδοση του βασικού περιβάλλοντος χρήστη

Το αρχείο λειτουργεί ως το κύριο entry point της frontend εφαρμογής.

- ➔ Το **layout.js** καθορίζει τη γενική διάταξη (layout) της εφαρμογής, όπως:

- Δομή σελίδας
- Κοινά στοιχεία UI
- Global styles
- Metadata εφαρμογής

Η χρήση layout αρχείων στο Next.js συμβάλλει στη διατήρηση ενιαίας σχεδιαστικής δομής.

- ➔ Το **package.json** περιλαμβάνει:

- Τις βιβλιοθήκες εξαρτήσεων (dependencies)
- Scripts εκτέλεσης
- Ρυθμίσεις του project

Ενδεικτικά περιλαμβάνει βιβλιοθήκες όπως: Next.js, React, Supabase client, Chart libraries.

- ➔ Το αρχείο **vercel.json** περιλαμβάνει ρυθμίσεις deployment για την πλατφόρμα Vercel, όπως:

- Routing
- Περιβαλλοντικές μεταβλητές
- Ρυθμίσεις build
- Serverless functions configuration

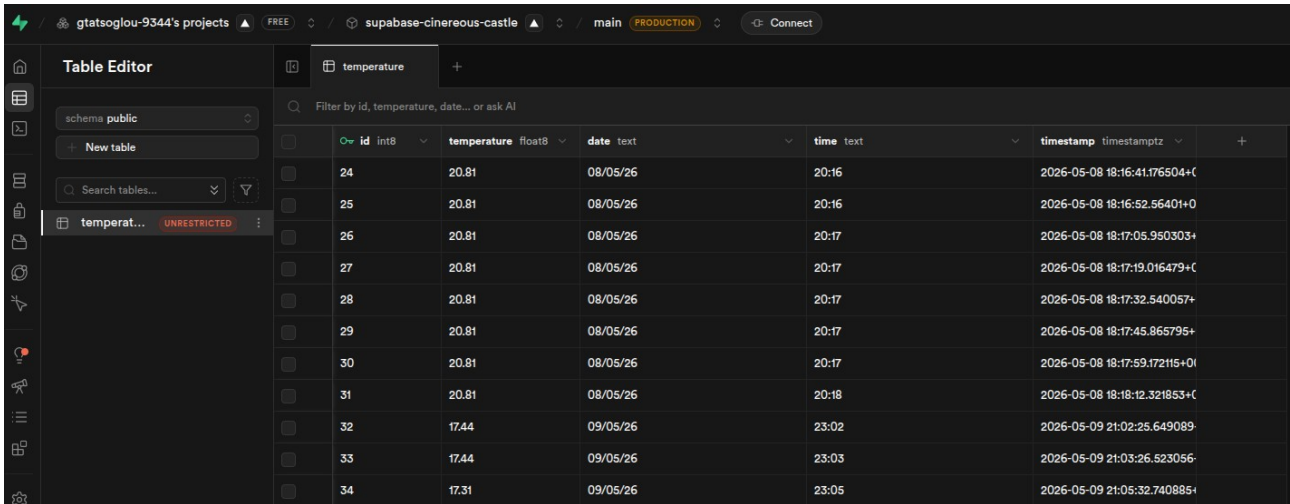
5.4.3 Βάση δεδομένων

Για την αποθήκευση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η υπηρεσία Supabase, η οποία παρέχει PostgreSQL βάση δεδομένων καθώς και RESTful και realtime δυνατότητες. Η βάση δεδομένων αποθηκεύει τις μετρήσεις θερμοκρασίας σε πίνακα που περιλαμβάνει τα πεδία id, temperature, date, time, και timestamp. Η επικοινωνία με τη Supabase πραγματοποιείται μέσω του JavaScript client SDK.

Στην Εικόνα που ακολουθεί διακρίνεται στιγμιότυπο του πίνακα στην βάση δεδομένων. Το πεδίο id

αποτελεί ένα μοναδικό αναγνωριστικό για κάθε καταχώρηση του πίνακα.

Τα πεδία temperature, date και time αποτελούνται απο τα δεδομένα του πακέτου πληροφορίας που έφτασε στην βάση όπως περιγράφηκε σε προηγούμενες ενότητες. Τέλος, το πεδίο timestamp περιέχει την χρονοσήμανση του πακέτου απο την βάση δεδομένων κατα την εγγραφή του, σε τοπική ώρα.



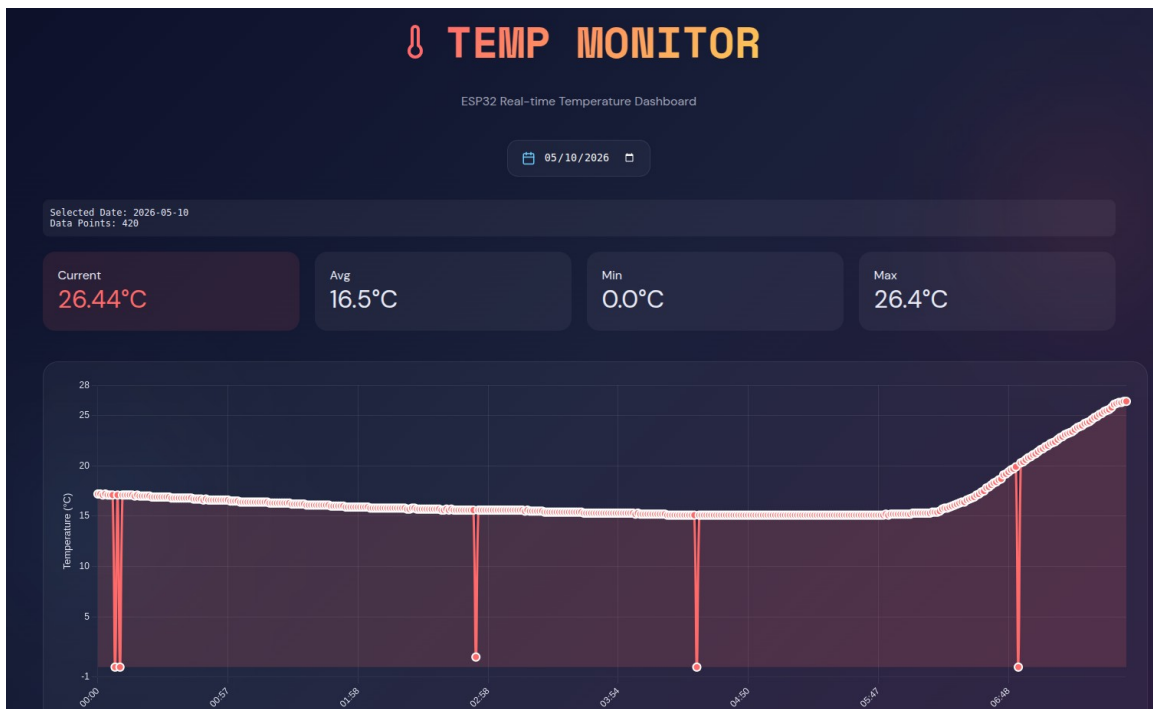
id	temperature	date	time	timestamp
24	20.81	08/05/26	20:16	2026-05-08 18:16:41.176504+03
25	20.81	08/05/26	20:16	2026-05-08 18:16:52.56401+03
26	20.81	08/05/26	20:17	2026-05-08 18:17:05.950303+03
27	20.81	08/05/26	20:17	2026-05-08 18:17:19.016479+03
28	20.81	08/05/26	20:17	2026-05-08 18:17:32.540057+03
29	20.81	08/05/26	20:17	2026-05-08 18:17:45.865795+03
30	20.81	08/05/26	20:17	2026-05-08 18:17:59.172115+03
31	20.81	08/05/26	20:18	2026-05-08 18:18:12.321853+03
32	17.44	09/05/26	23:02	2026-05-09 21:02:25.649089+03
33	17.44	09/05/26	23:03	2026-05-09 21:03:26.523056+03
34	17.31	09/05/26	23:05	2026-05-09 21:05:32.740885+03

Σχήμα 5.7 – Στιγμιότυπο πίνακα βάσης δεδομένων.

5.4.4 Εφαρμογή χρήστη

Μέσω της εφαρμογής χρήστη, ο χρήστης μπορεί να επιθεωρήσει τα δεδομένα όπου υπάρχουν αποθηκευμένα στη βάση δεδομένων για κάποια ημέρα με την μορφή γραφήματος.

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται η εφαρμογή χρήστη και απεικονίζονται τα δεδομένα όπου είναι αποθηκευμένα στη βάση δεδομένων για την ημερομηνία 10/5/26. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την ημέρα για την οποία θέλει να επιθεωρήσει τα δεδομένα μέσω του επιλογέα ημερομηνίας που υπάρχει στο μέσον της σελίδας κάτω απο τον τίτλο.



Σχήμα 5.8 – Στιγμιότυπο εφαρμογής χρήστη.

Στο παράθυρο διαλόγου, κάτω από τον επιλογέα ημερομηνίας, εμφανίζονται πληροφορίες σχετικά με την επιλεγμένη ημέρα και τον αριθμό των αποθηκευμένων καταχωρήσεων. Επιπλέον, η ακριβής τιμή κάποιας χρονικής στιγμής εμφανίζεται στον χρήστη με την επιλογή της αντίστοιχης κουκίδας στο γράφημα τιμών. Τέλος, η τιμή της τελευταίας καταχωρημένης μέτρησης και κάποια στατιστικά για όλη την ημέρα, εμφανίζονται σε ξεχωριστά πλαίσια γεγονός που διευκολύνει την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο.

Κεφάλαιο 6 – Υπολογισμοί χαρακτηριστικών συστήματος

Στο κεφάλαιο αυτό, παρατίθενται οι υπολογισμοί για την διάρκεια της αυτόνομης λειτουργίας του προτεινόμενου συστήματος, καθώς και της μέγιστης εμβέλειας επικοινωνίας LoRa. Οι υπολογισμοί έγιναν σε θεωρητικό επίπεδο, καθώς για την μέτρηση των ακριβών τιμών απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός, στον οποίο δεν υπήρχε πρόσβαση.

6.1 Θεωρητική εκτίμηση κατανάλωσης ενέργειας

Η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος εκτιμήθηκε θεωρητικά με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά των επιμέρους εξαρτημάτων.

6.1.1 Κατανάλωση ενέργειας συσκευής αισθητήρα

Για την συσκευή αισθητήρα μπορεί να γίνει αρκετά καλή θεωρητική εκτίμηση της αυτονομίας, αρκεί να ορισθούν ρεαλιστικά τα στάδια λειτουργίας και οι επιμέρους καταναλώσεις.

Για τη μονάδα αισθητήρα, ο κύκλος λειτουργίας αποτελείται από:

- Ανάγνωση αισθητήρα και πακετοποίηση δεδομένων.
- Αποστολή πακέτου μέσω LoRa.
- Είσδος σε κατάσταση ύπνου.

Στον Πίνακα 6.1 που ακολουθεί παρατίθενται οι τυπικές καταναλώσεις των βασικών εξαρτημάτων, για την κατάσταση συλλογής δεδομένων της συσκευής αισθητήρα.

Εξάρτημα	Κατάσταση	Τυπική κατανάλωση
Μικροελεγκτής ESP32	Ενεργή	~85mA
Τερματικό LoRa	Αδρανής	~1uA
Αισθητήρας DS1276	Ενεργή	~1.5mA

Πίνακας 6.1 – Καταναλώσεις συσκευής αισθητήρα σε κατάσταση συλλογής δεδομένων.

Ομοίως στον Πίνακα 6.2 που ακολουθεί παρατίθενται οι τυπικές καταναλώσεις των βασικών εξαρτημάτων, για την κατάσταση αποστολής πακέτου μέσω LoRa.

Εξάρτημα	Κατάσταση	Τυπική κατανάλωση
Μικροελεγκτής ESP32	Ενεργή	~85mA
Τερματικό LoRa	Ενεργή (μετάδοση)	~87mA
Αισθητήρας DS1276	Αδρανής	~1uA

Πίνακας 6.2 – Καταναλώσεις συσκευής αισθητήρα σε κατάσταση αποστολής πακέτου δεδομένων.

Τέλος, στον επόμενο Πίνακα 6.3, παρατίθενται οι τυπικές καταναλώσεις των βασικών εξαρτημάτων, για την κατάσταση αδράνειας (sleep mode).

Εξάρτημα	Κατάσταση	Τυπική κατανάλωση
Μικροελεγκτής ESP32	Αδρανής	~10mA
Τερματικό LoRa	Αδρανής	~1uA
Αισθητήρας DS1276	Αδρανής	~1uA

Πίνακας 6.3 – Καταναλώσεις συσκευής αισθητήρα σε κατάσταση αδράνειας.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι τιμή της κατανάλωσης για την κατάσταση deep sleep του μικροελεγκτή είναι 10mA, πολύ μεγαλύτερη από αυτή που σημειώνει ο κατασκευαστής (10uA). Η επιλογή αυτή έγινε διότι στο σύστημα χρησιμοποιείται αναπτυξιακή πλακέτα (devboard), όπου περιλαμβάνει και άλλα υποστηρικτικά κυκλώματα πέραν του μικροεπεξεργαστή, και έτσι η κατανάλωση παρουσιάζεται αυξημένη.

Έτσι, με βάση τις καταστάσεις και τις τιμές για την τυπική κατανάλωση που παρατέθηκαν παραπάνω προκύπτει η εκτίμηση για την συνολική κατανάλωση της συσκευής για κάθε κατάσταση. Οι τιμές της οποίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4 που ακολουθεί.

Κατάσταση	Τυπική κατανάλωση
Συλλογή δεδομένων	~87mA
Αποστολή πακέτου μέσω LoRa	~172mA
Κατάσταση ύπνου	~10mA

Πίνακας 6.4 – Συνολικές καταναλώσεις συσκευής αισθητήρα για κάθε κατάσταση λειτουργίας.

Στην συνέχεια, έγινε εκτίμηση της μέσης κατανάλωσης κατά την ενεργή λειτουργία της συσκευής, κατά την διάρκεια δηλαδή των καταστάσεων συλλογής δεδομένων και αποστολής πακέτου μέσω LoRa. Η διάρκεια αποστολής του πακέτου εξήχθη με βάση τις επιλεγμένες ρυθμίσεις LoRa, ενώ για την υπόλοιπη λειτουργία, ο χρόνος εξήχθη προσεγγιστικά με την προσθήκη περιθωρίου ασφαλείας. Οι τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5.

Κατάσταση	Διάρκεια
Αφύπνιση συσκευής	300ms
Λήψη μετρήσεων	700ms
Πακετοποίηση	50ms
Αποστολή πακέτου μέσω LoRa	150ms
Περιθώριο ασφαλείας	300ms

Πίνακας 6.5 – Χρονική διάρκεια παραμονής σε κάθε κατάσταση για την συσκευή αισθητήρα.

Έτσι, αθροίζοντας τις αντίστοιχες λειτουργίες, προκύπτει ο συνολικός χρόνος λειτουργίας για την κατάσταση συλλογής δεδομένων:

$$T_{\text{meas}} = 1 \text{ s}$$

Ομοίως, το άθροισμα των διαρκειών για τις λειτουργίες που αντιστοιχούν στην κατάσταση μετάδοσης του πακέτου μέσω LoRa:

$$T_{\text{trans}} = 0.5 \text{ s}$$

Τέλος, η διάρκεια παραμονής της συσκευής στην κατάσταση ύπνου αφήνεται ως μεταβλητή, καθώς εξαρτάται από τον επιλεγμένο ρυθμό εκπομπών. Έτσι η μέση κατανάλωση δίνεται από την σχέση:

$$I_{average} = \frac{I_{meas} \cdot T_{meas} + I_{trans} \cdot T_{trans} + I_{sleep} \cdot T_{sleep}}{T_{meas} + T_{trans} + T_{sleep}}$$

Ενώ η αυτονομία της συσκευής σε ώρες, με δεδομένη την χρήση μπαταρίας ιόντων λιθίου, δίνεται απο την σχέση:

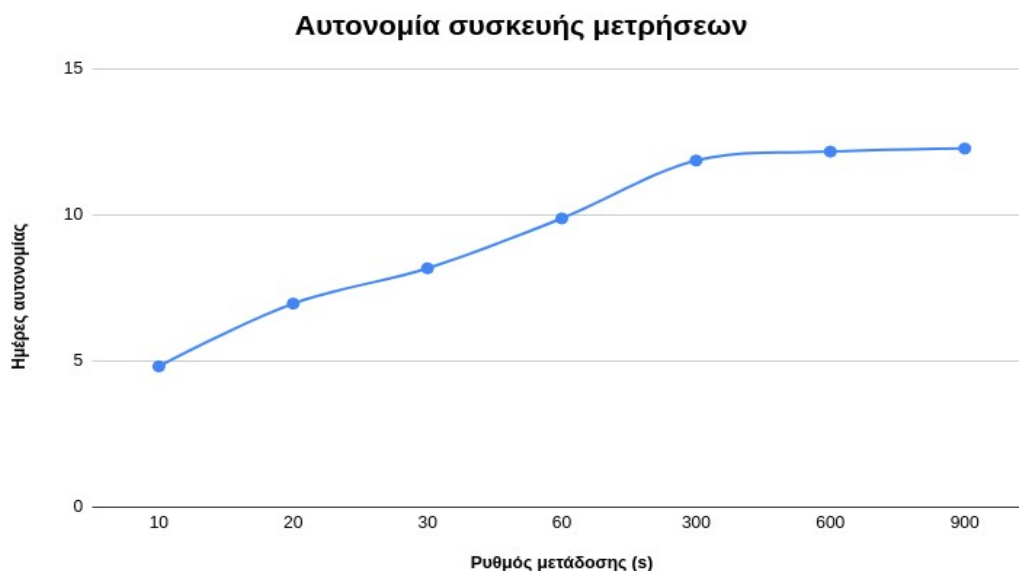
$$T_{hours} = \frac{C_{bat}}{I_{average}}$$

Με δεδομένη την χωρητικότητα της μπαταρίας στα 3000mAh, και επιλογή διαφορετικών ρυθμών μετάδοσης πακέτων προκύπτουν τα αποτελέσματα που παρατίθενται στον Πίνακα 6.6:

Ρυθμός μετάδοσης	Μέση κατανάλωση (I _{average})	Ώρες αυτονομίας (T _{hours})	Ημέρες αυτονομίας (T _{days})
10 δευτερόλεπτα	25.863	115.99	5
20 δευτερόλεπτα	17.908	167.52	7
30 δευτερόλεπτα	15.267	196.51	8
1 λεπτό	12.633	237.47	10
5 λεπτά	10.527	284.99	11
10 λεπτά	10.263	292.3	12
15 λεπτά	10.176	294.82	12

Πίνακας 6.6 – Διάρκεια αυτόνομης λειτουργίας συσκευής αισθητήρα.

Για καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται και γραφικά στο Σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 6.1 – Αυτονομία συσκευής μετρήσεων

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα, παρατηρείται ότι η αύξηση του χρονικού διαστήματος μεταξύ των μεταδόσεων οδηγεί σε μείωση της μέσης κατανάλωσης και συνεπώς σε αύξηση της αυτονομίας του συστήματος. Ωστόσο, μετά το διάστημα του ενός λεπτού, η βελτίωση της αυτονομίας γίνεται σχετικά μικρή, καθώς η κατανάλωση κατά την κατάσταση αναμονής (deep sleep) παραμένει σημαντική λόγω της χρήσης ESP32 development board. Έτσι, ακόμη και με πολύ αραιές μεταδόσεις, η μέγιστη θεωρητική αυτονομία

περιορίζεται περίπου στις 12 ημέρες. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος επηρεάζεται περισσότερο από την πλακέτα ανάπτυξης και λιγότερο από την ίδια την LoRa επικοινωνία.

6.1.2 Κατανάλωση ενέργειας συσκευής δρομολογητή

Η συσκευή δρομολογητή είναι σχεδιασμένη ώστε να δέχεται LoRa μηνύματα και να τα προωθεί άμεσα μέσω WiFi στη βάση δεδομένων. Για τον λόγο αυτό ο μικροελεγκτής και το τερματικό LoRa δεν μπορούν να εισέρχονται σε καταστάσεις εξοικονόμησης ενέργειας. Έτσι, το σύστημα προβλέπεται να είναι διαρκώς συνδεδεμένο σε σταθερή πηγή ενέργειας.

Για την διασφάλιση της αξιοπιστίας του συστήματος, η συσκευή διαθέτει μπαταρία και φωτοβολταϊκό πάνελ ως εφεδρικό σύστημα παροχής ενέργειας. Η μελέτη που ακολουθεί παρουσιάζει την κατανάλωση ενέργειας της συσκευής και παρουσιάζει την μέγιστη αυτόνομη λειτουργία σε περίπτωση ενεργοποίησης του εφεδρικού συστήματος παροχής ενέργειας.

Για τη μονάδα δρομολογητή, ο κύκλος λειτουργίας αποτελείται απο:

- Λήψη και ανάγνωση πακέτου LoRa.
- Παραγωγή πακέτου πληροφορίας και προώθηση μέσω WiFi σε απομακρυσμένο διακομιστή.

Πρακτικά, οι δυο αυτές καταστάσεις παρουσιάζουν μικρές διαφορές στην κατανάλωση ενέργειας, που οφείλονται στην ποιότητα της σύνδεσης με το WiFi, την απόσταση απο το router και τον ρυθμό αποστολής πακέτων και την κίνηση στο δίκτυο. Στην παρούσα μελέτη δεν θα γίνει διαχωρισμός και θα χρησιμοποιηθούν οι μεγαλύτερες αναμενόμενες τιμές κατανάλωσης ως άνω όριο για την εκτίμηση της συνολικής μέσης κατανάλωσης. Στον Πίνακα 6.7 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές για τα βασικά εξαρτήματα της συσκευής:

Εξάρτημα	Κατάσταση	Τυπική κατανάλωση
Μικροελεγκτής ESP32	Ενεργή + WiFi	~120mA
Τερματικό LoRa	Ενεργή (λήψη)	~11mA

Πίνακας 6.7 – Καταναλώσεις συσκευής δρομολογητή.

Αθροίζοντας τις τιμές για την τυπική κατανάλωση των εξαρτημάτων, προκύπτει το μέσο ρεύμα που καταναλώνει η συσκευή του δρομολογητή, ως:

$$I_{average} = 131 \text{ mA}$$

Έτσι, με αντικατάσταση στην παρακάτω σχέση, προκύπτει η μέγιστη διάρκεια αυτόνομης λειτουργίας της συσκευής του δρομολογητή σε ώρες με χρήση μπαταρίας ιόντων λιθίου 18650 χωρητικότητας 3000mAh:

$$T_{hours} = \frac{3000}{131} \approx 23 \text{ h}$$

Η διάρκεια αυτόνομης λειτουργίας ανέρχεται προσεγγιστικά σε 23 ώρες, ή 1 ημέρα, χρόνος αρκετός για την επιδιόρθωση της βλάβης στην παροχή ενέργειας. Στους υπολογισμούς δεν λήφθηκε υπόψιν η συμβολή του ηλιακού πάνελ, το οποίο μπορεί να παρατείνει την διάρκεια αυτόνομης λειτουργίας φορτίζοντας την μπαταρία τα διαστήματα ηλιοφάνειας.

6.3 Θεωρητική εκτίμηση μέγιστης εμβέλειας επικοινωνίας

Για την εκτίμηση της εμβέλειας ενός ασύρματου συστήματος LoRa, ένα από τα πλέον καθιερωμένα εμπειρικά μοντέλα διάδοσης είναι το μοντέλο **Okumura-Hata** [67]. Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί αναλυτική μαθηματικοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων του Okumura και προσαρμόστηκε από τον Hata ώστε να παρέχει κλειστού τύπου εξισώσεις για την πρόβλεψη των απωλειών διάδοσης σε αστικά, προαστιακά και αγροτικά περιβάλλοντα.

Το βασικό μοντέλο για αστικό περιβάλλον δίνεται από την εξίσωση:

$$L_{urban} = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(hb) - a(hm) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(hb)) \log_{10}(d)$$

όπου L_{urban} είναι οι απώλειες διάδοσης σε dB, f η συχνότητα σε MHz, hb το ύψος της κεραίας του πομπού, hm το ύψος της κεραίας του δέκτη και d η απόσταση σε km. Ο διορθωτικός παράγοντας $a(hm)$ λαμβάνει υπόψη την επίδραση του ύψους της κεραίας του δέκτη και για μικρές και μεσαίες πόλεις προσεγγίζεται από:

$$a(hm) = (1.1 \log_{10}(f) - 0.7)hm - (1.56 \log_{10}(f) - 0.8)$$

Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε εμπειρικές μετρήσεις και ενσωματώνει έμμεσα φαινόμενα όπως ανακλάσεις, περίθλαση και σκέδαση του σήματος, τα οποία είναι ιδιαίτερα έντονα σε αστικά περιβάλλοντα.

6.3.1 Εφαρμογή μοντέλου Okomura-Hata

Το προτεινόμενο σύστημα λειτουργεί στην ζώνη των 868MHz για την LoRa επικοινωνία, με χρήση συντελεστή διασποράς 7 και εύρος ζώνης 125kHz. Επιπλέον, οι κεραίες που επιλέχθηκαν τόσο για τον δέκτη (συσκευή δρομολογητή), όσο και για τον πομπό (συσκευή μετρήσεων), έχουν κέρδος 3dBi σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

Αρχικά θα γίνει ο υπολογισμός του link budget, από τον γενικό τύπο:

$$LB = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{margin} - S_{rx}$$

όπου P_{tx} είναι η ισχύς εκπομπής, G_{tx} και G_{rx} το κέρδος της κεραίας δέκτη και πομπού αντίστοιχα, L_{margin} το περιθώριο ασφαλείας, και S_{rx} η ευαισθησία του δέκτη.

Η ισχύς εκπομπής P_{tx} είναι ρυθμισμένη στα 17dBm, ενώ από το σημείωμα του κατασκευαστή για το τερματικό LoRa, προκύπτει ότι η ευαισθησία δέκτη για τις επιλεγμένες τιμές συντελεστή διασποράς και εύρους ζώνης είναι ίση με $S_{rx} = -123$ dBm. Τέλος, επιλέγοντας ένα ασφαλές περιθώριο ασφαλείας L_{margin} ίσο με 5 dB, αντικαθιστούμε στην παραπάνω σχέση και προκύπτει:

$$LB = 141 \text{ dB}$$

Η τιμή αυτή δηλώνει πως το σύστημα μπορεί να αντέξει έως περίπου 141 dB απώλεια μονοπατιού (path loss), πριν χαθεί η επικοινωνία.

Στην συνέχεια, θεωρώντας πως το σύστημα είναι εγκατεστημένο με τέτοιο τρόπο, ώστε η συσκευή δρομολογητή να βρίσκεται 5 μέτρα ψηλότερα της συσκευής μετρήσεων, και υπολογίζοντας τον διορθωτικό όρο $a(hm)$ σε υψος $hm = 1.5m$. Αντικαθιστούμε στην σχέση Okomura-Hata για αστικό περιβάλλον, και προκύπτει:

$$L_{urban} \approx 137.0 + 40.32 \log_{10}(d)$$

Τέλος, αρκεί να λύσουμε την παραπάνω σχέση χρησιμοποιώντας $L_{urban} = LB = 141$ dB, ώστε να υπολογίσουμε την μέγιστη απόσταση ασφαλούς επικοινωνίας d . Με αντικατάσταση και επίλυση προκύπτει:

$$d_{max} = 1256 \text{ m}$$

Αξίζει να σημειωθεί πως η μέγιστη απόσταση που υπολογίσθηκε αποτελεί ένα ενδεικτικό άνω όριο, στην πραγματικότητα και για αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος η απόσταση μεταξύ των συσκευών μέτρησης και κόμβου θα πρέπει να είναι μικρότερη.

Οι υπολογισμοί έχουν γίνει χρησιμοποιώντας το μοντέλο Okumura-Hata για αστικά περιβάλλοντα, όπου οι απώλειες, είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τα ημι-αστικά ή τα υπαίθρια. Έτσι σε περίπτωση εγκατάστασης του συστήματος σε περιαστικό ή αγροτικό περιβάλλον, η αναμενόμενη μέγιστη απόσταση επικοινωνίας θα είναι μεγαλύτερη.

Κεφάλαιο 7 – Δοκιμές και αξιολόγηση συστήματος

Η τελική φάση της κατασκευής είναι ο έλεγχος της σωστής λειτουργίας καθώς και η αξιοπιστία του συστήματος. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί ο έλεγχος που πραγματοποιήθηκε πάνω στην σύνδεση και την απόκριση ανάμεσα στις δύο μονάδες, η ακρίβεια στα αποτελέσματα που δίνει ο αισθητήρας, η επικοινωνία με τον server και η κατανάλωση ενέργειας κατά τη λειτουργία.

Η αξιολόγηση των παραπάνω πτυχών του συστήματος πραγματοποιήθηκε μέσω της διενέργειας πειράματος λήψης θερμοκρασίας απο ψυκτικό θάλαμο σε βιομηχανικό περιβάλλον.

7.1 Περιγραφή πειράματος

Σκοπός του πειράματος, είναι να αξιολογηθεί η ποιότητα της ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ της συσκευής αισθητήρα και της μονάδας δρομολογητή, να εξετασθεί η ακρίβεια των μετρήσεων του αισθητήρα θερμοκρασίας, και να διερευνηθεί η αυτονομία του συστήματος.

Το πείραμα έλαβε χώρα σε εγκαταστάσεις εργοστασίου στην περιοχή της Σίνδου στη Θεσσαλονίκη. Παρ'ότι το εργοστάσιο δεν είχε άμεση συνάφεια με εγκαταστάσεις υγειονομικού ενδιαφέροντος και ανάγκη για εποπτεία ψυκτικών θαλάμων, οι δοκιμές στις εγκαταστάσεις του αντιπροσωπεύουν επαρκώς τις συνθήκες λειτουργίας για τις οποίες έχει σχεδιαστεί το σύστημα.

Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ψυκτικός θάλαμος που βρίσκεται σε χώρο εργασίας. Στο χώρο αυτό εγκαταστάθηκε η συσκευή αισθητήρα, με τον αισθητήρα θερμοκρασίας εντός του θαλάμου. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται η εγκατάσταση της συσκευής αισθητήρα.



Σχήμα 7.1 – Εγκατάσταση συσκευής αισθητήρα σε ψυκτικό θάλαμο.

Η μονάδα δρομολογητή, εγκαταστάθηκε σε γειτονικό κτίριο της ίδιας επιχείρησης, σε απόσταση περίπου 400 μέτρων, ώστε να αξιολογηθεί και η αξιοπιστία της ασύρματης επικοινωνίας. Κατά την εγκατάσταση της μονάδας δρομολογητή, η συσκευή συνδέθηκε στο τοπικό δίκτυο WiFi, και τοποθετήθηκε σε σημείο τέτοιο ώστε να υπάρχει πρόσβαση σε σταθερή πηγή ενέργειας, ενώ παράλληλα το φωτοβολταϊκό πάνελ να είναι εκτεθειμένο στο ηλιακό φως. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται η εγκατάσταση της συσκευής δρομολογητή.



Σχήμα 7.2 – Εγκατάσταση συσκευής δρομολογητή.

7.2 Μετρήσεις

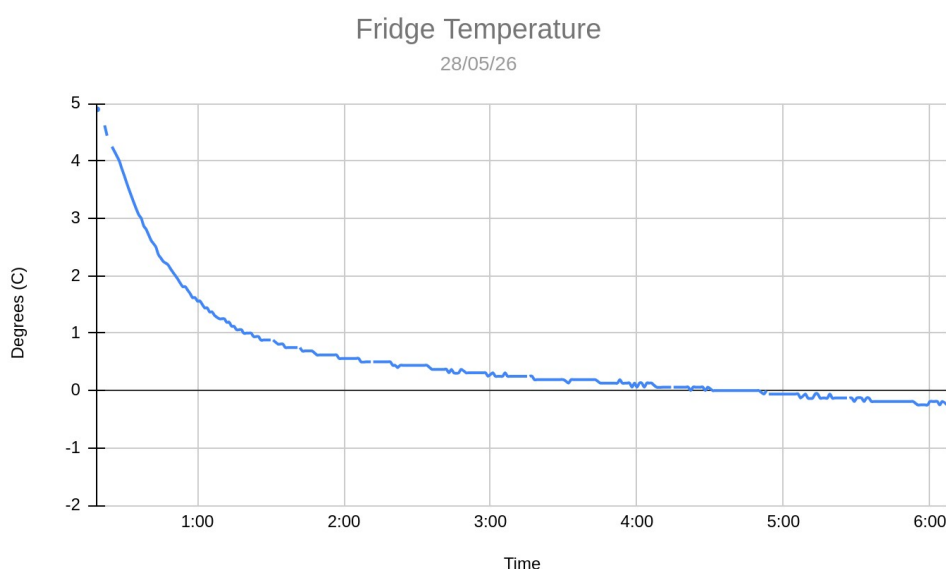
Στον Πίνακα 7.1 που ακολουθεί, απεικονίζεται απόσπασμα των μετρήσεων που καταγράφηκαν κατά την λειτουργία του συστήματος την 28/5/26 για το διάστημα από 00:01 έως 00:48. Το διάστημα αυτό επιλέχθηκε για την συντήρηση του πίνακα σε μικρές διαστάσεις για την ευκολία του αναγνώστη. Αντίστοιχοι πίνακες μπορούν να εξαχθούν από την βάση δεδομένων για κάθε ημέρα και διάστημα λειτουργίας του συστήματος.

Id	Temperature	Date	Time
1172	NULL	28/05/26	00:01
1173	5	28/05/26	00:02
1174	4.9	28/05/26	00:19
1175	NULL	28/05/26	00:21
1176	4.62	28/05/26	00:22
1177	4.44	28/05/26	00:23
1178	NULL	28/05/26	00:24
1179	4.25	28/05/26	00:25
1180	4	28/05/26	00:28
1181	3.87	28/05/26	00:29
1182	3.75	28/05/26	00:30
1183	3.5	28/05/26	00:32
1184	3.06	28/05/26	00:36

1185	3	28/05/26	00:37
1186	2.87	28/05/26	00:38
1187	2.81	28/05/26	00:39
1188	2.62	28/05/26	00:41
1189	2.56	28/05/26	00:42
1190	2.5	28/05/26	00:43
1191	2.37	28/05/26	00:44
1192	2.31	28/05/26	00:45
1193	2.25	28/05/26	00:46
1194	2.19	28/05/26	00:48

Πίνακας 7.1 – Απόσπασμα αποτελεσμάτων μετρήσεων για την 28/05/26.

Για την ίδια ημέρα (28/05/26), παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί και το διάγραμμα θερμοκρασίας για το διάστημα από 00:19 έως 06:07.



Σχήμα 7.3 – Μετρήσεις θερμοκρασίας ψυκτικού θαλάμου την 28/05/26.

7.2.1 Αξιολόγηση μετρήσεων

Η αξιολόγηση των μετρήσεων που ακολουθεί πραγματοποιήθηκε με βάση τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το σύστημα στο διάστημα που παρατίθεται στην προηγούμενη υποενότητα. Οι παρατηρήσεις που ακολουθούν, μπορούν να γενικευθούν για όλο το διάστημα λειτουργίας της συσκευής.

Από τον πίνακα και το αντίστοιχο διάγραμμα θερμοκρασίας παρατηρείται ότι οι τιμές που λαμβάνονται από τον αισθητήρα παρουσιάζουν ομαλή και ρεαλιστική μεταβολή. Η θερμοκρασία μειώνεται προοδευτικά από περίπου 5°C προς χαμηλότερες τιμές, χωρίς απότομες διακυμάνσεις ή μη φυσιολογικές μεταβολές. Η μορφή της καμπύλης είναι συμβατή με τη φυσιολογική λειτουργία ενός ψυκτικού θαλάμου κατά τη διαδικασία ψύξης, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι ο αισθητήρας θερμοκρασίας λειτουργεί με ικανοποιητική ακρίβεια και σταθερότητα.

Επιπλέον, οι διαδοχικές μετρήσεις παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους, κάτι που αποτελεί ένδειξη καλής ανάλυσης και συνέπειας του αισθητήρα. Συνεπώς, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το σύστημα είναι σε θέση να αποτυπώνει αξιόπιστα τη θερμοκρασιακή συμπεριφορά του χώρου που παρακολουθεί.

Ωστόσο, στον πίνακα καταγραφών εμφανίζονται ορισμένες εγγραφές με τιμή NULL. Οι εγγραφές αυτές πιθανότατα δεν σχετίζονται με απώλεια πακέτων κατά τη LoRa επικοινωνία, αφού τότε θα περιμέναμε πλήρη απώλεια του πακέτου, αλλά με στιγμιαία αδυναμία του αισθητήρα να επιστρέψει έγκυρη τιμή τη στιγμή που ζητήθηκε μέτρηση από το μικροελεγκτή. Ένα τέτοιο φαινόμενο μπορεί να προκύψει όταν ο αισθητήρας δεν έχει ολοκληρώσει τον προηγούμενο κύκλο μέτρησης, βρίσκεται σε κατάσταση αρχικοποίησης ή παρουσιάζεται προσωρινή αστοχία στην επικοινωνία μεταξύ αισθητήρα και μικροελεγκτή.

Το γεγονός ότι αμέσως μετά τις τιμές NULL ακολουθούν κανονικές και λογικές μετρήσεις ενισχύει την υπόθεση ότι πρόκειται για στιγμιαίο σφάλμα ανάγνωσης και όχι για γενικευμένη δυσλειτουργία του αισθητήρα. Επομένως, οι συγκεκριμένες εγγραφές μπορούν να χαρακτηριστούν ως αποτυχημένες αναγνώσεις μέτρησης (sensor read errors).

Παράλληλα, κατά την ανάλυση των δεδομένων διαπιστώθηκε ότι στο εξεταζόμενο χρονικό διάστημα καταγράφηκαν συνολικά 308 μετρήσεις, ενώ θεωρητικά αναμένονταν 348. Αυτό σημαίνει ότι απουσιάζουν 40 μετρήσεις, γεγονός που αντιστοιχεί σε ποσοστό απώλειας:

$$\frac{40}{348} \approx 11.5 \%$$

Η απώλεια αυτή πιθανότατα σχετίζεται με τη LoRa επικοινωνία και ειδικότερα με αποτυχία μετάδοσης ή λήψης ορισμένων πακέτων δεδομένων.

Σε συστήματα LoRa είναι πιθανό να εμφανίζονται τέτοιες απώλειες λόγω παρεμβολών, περιορισμών στο ασύρματο κανάλι, ιδιαίτερα σε περιβάλλον βιομηχανικής εγκατάστασης, χρονιστικών αποκλίσεων ή στιγμιαίας αδυναμίας του δέκτη να επεξεργαστεί εισερχόμενα πακέτα.

7.3 Λειτουργικότητα συστήματος

Η τελική αξιολόγηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε με στόχο τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας της ασύρματης επικοινωνίας, της αξιοπιστίας μετάδοσης των δεδομένων θερμοκρασίας και της συνολικής συνεργασίας μεταξύ της μονάδας αισθητήρα και της μονάδας δρομολογητή.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, η μονάδα αισθητήρα πραγματοποίησε επιτυχώς λήψη δεδομένων θερμοκρασίας από τον αισθητήρα DS18B20 και αποστολή τους μέσω του LoRa module SX1276 προς τη μονάδα δρομολογητή. Η μονάδα δρομολογητή λάμβανε τα πακέτα δεδομένων και στη συνέχεια τα προωθούσε μέσω σύνδεσης Wi-Fi προς τον απομακρυσμένο server και τη βάση δεδομένων Supabase.

Η επικοινωνία μέσω LoRa παρουσίασε γενικά σταθερή λειτουργία και ικανοποιητική αξιοπιστία, ακόμη και σε περιπτώσεις όπου υπήρχαν εμπόδια μεταξύ των δύο μονάδων. Η χρήση της τεχνολογίας LoRa επέτρεψε την επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις με χαμηλή κατανάλωση ισχύος, καθιστώντας το σύστημα κατάλληλο για εφαρμογές απομακρυσμένης παρακολούθησης σε αγροτικά ή βιομηχανικά περιβάλλοντα.

Ο αισθητήρας DS18B20 παρουσίασε συνολικά σταθερή λειτουργία και οι περισσότερες μετρήσεις θερμοκρασίας που λήφθηκαν ήταν συνεπείς κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος. Η ψηφιακή φύση του αισθητήρα συμβάλλει στη μείωση του ηλεκτρικού θορύβου και στην αξιόπιστη μεταφορά των δεδομένων μέσω του πρωτοκόλλου 1-Wire. Ωστόσο, κατά την ανάλυση των δεδομένων παρατηρήθηκαν ορισμένες εγγραφές με τιμή NULL, οι οποίες πιθανότατα οφείλονται σε στιγμιαία αδυναμία του αισθητήρα να επιστρέψει έγκυρη μέτρηση τη χρονική στιγμή που ζητήθηκε από το ESP32. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να σχετίζεται με καθυστέρηση ολοκλήρωσης της μέτρησης ή με προσωρινή αστοχία επικοινωνίας μεταξύ αισθητήρα και μικροελεγκτή.

Παράλληλα, κατά την αξιολόγηση των καταγραφών διαπιστώθηκε ότι σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα καταγράφηκε ποσοστό απωλειών πακέτων της τάξης του 11.5%. Οι απώλειες αυτές αποδίδονται πιθανότατα στη LoRa επικοινωνία και μπορεί να σχετίζονται με παρεμβολές, χρονιστικές αποκλίσεις ή στιγμιαία αδυναμία λήψης ορισμένων πακέτων από τη μονάδα δρομολογητή.

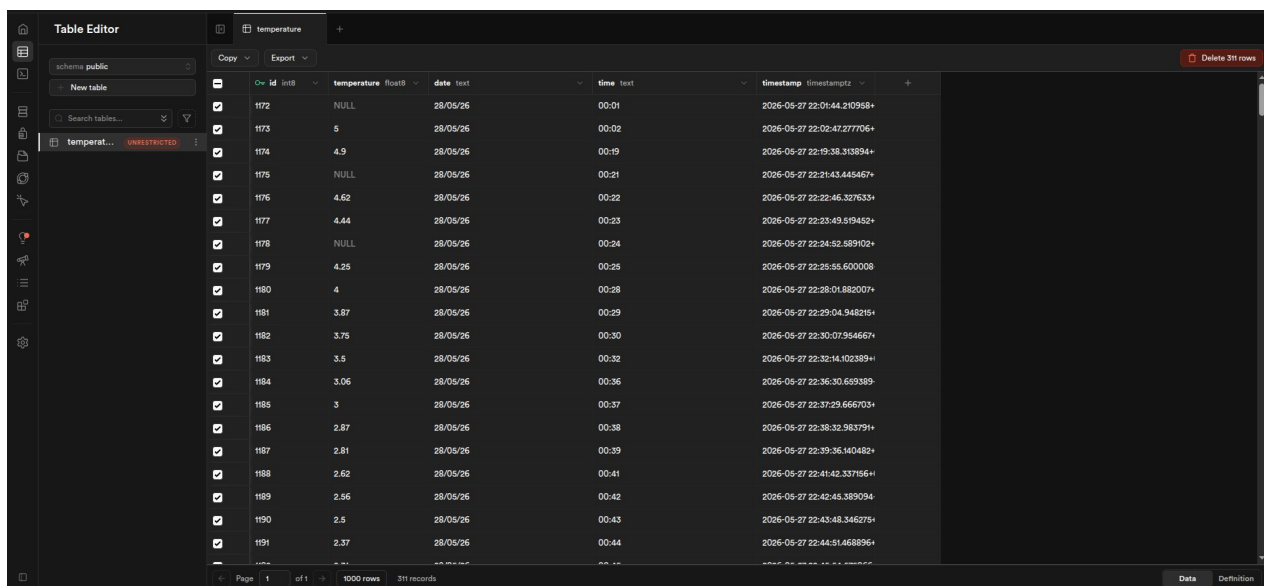
Παρότι παρατηρήθηκαν περιορισμένες αστοχίες ανάγνωσης και απώλειες πακέτων, η συνολική λειτουργία του συστήματος αξιολογείται ως ικανοποιητική. Η πλειονότητα των μετρήσεων μεταδόθηκε επιτυχώς και παρουσίασε ομαλή θερμοκρασιακή μεταβολή, γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία της αρχιτεκτονικής ESP32–LoRa για εφαρμογές Internet of Things (IoT) και απομακρυσμένης παρακολούθησης θερμοκρασίας.

7.4 Λειτουργικότητα βάσης δεδομένων

Για την αποθήκευση και διαχείριση των δεδομένων θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα Supabase, η οποία βασίζεται σε PostgreSQL βάση δεδομένων. Η βάση δεδομένων λειτούργησε ως κεντρικό σημείο αποθήκευσης όλων των μετρήσεων που λαμβάνονται από το σύστημα.

Κατά τη λειτουργία του συστήματος, κάθε μέτρηση που αποστέλλεται από τη μονάδα δρομολογητή καταχωρείται στον αντίστοιχο πίνακα της βάσης δεδομένων μέσω HTTP requests και του JavaScript SDK της Supabase. Η διαδικασία αποθήκευσης πραγματοποιήθηκε με σταθερότητα και η βάση δεδομένων ανταποκρινόταν άμεσα τόσο σε αιτήματα εισαγωγής όσο και ανάκτησης δεδομένων.

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται στιγμιότυπο του πίνακα αποθήκευσης δεδομένων εντός της βάσης δεδομένων στον απομακρυσμένο διακομιστή.



id	temperature	date	time	timestamp
1172	NULL	28/05/26	00:01	2026-05-27 22:01:44.210958+
1173	5	28/05/26	00:02	2026-05-27 22:02:47.277706+
1174	4.9	28/05/26	00:19	2026-05-27 22:19:38.333894+
1175	NULL	28/05/26	00:21	2026-05-27 22:21:43.445467+
1176	4.62	28/05/26	00:22	2026-05-27 22:22:46.327633+
1177	4.44	28/05/26	00:23	2026-05-27 22:23:49.519452+
1178	NULL	28/05/26	00:24	2026-05-27 22:24:52.589102+
1179	4.25	28/05/26	00:25	2026-05-27 22:25:55.600008+
1180	4	28/05/26	00:28	2026-05-27 22:28:01.882007+
1181	3.87	28/05/26	00:29	2026-05-27 22:29:04.948215+
1182	3.75	28/05/26	00:30	2026-05-27 22:30:07.954667+
1183	3.5	28/05/26	00:32	2026-05-27 22:32:14.102389+
1184	3.06	28/05/26	00:36	2026-05-27 22:36:30.653389+
1185	3	28/05/26	00:37	2026-05-27 22:37:29.666703+
1186	2.87	28/05/26	00:38	2026-05-27 22:38:32.983791+
1187	2.81	28/05/26	00:39	2026-05-27 22:39:36.140482+
1188	2.62	28/05/26	00:41	2026-05-27 22:41:42.337196+
1189	2.56	28/05/26	00:42	2026-05-27 22:42:45.389094+
1190	2.5	28/05/26	00:43	2026-05-27 22:43:48.346275+
1191	2.37	28/05/26	00:44	2026-05-27 22:44:51.468896+

Σχήμα 7.4 – Στιγμιότυπο βάσης δεδομένων (28/05/26).

Κατά την αξιολόγηση των δεδομένων παρατηρήθηκε ότι ορισμένες εγγραφές περιείχαν τιμή NULL στο πεδίο της θερμοκρασίας. Οι εγγραφές αυτές δεν οφείλονται σε αποτυχία της βάσης δεδομένων, αλλά προέρχονται από περιπτώσεις όπου η μονάδα αισθητήρα δεν έλαβε έγκυρη μέτρηση από τον αισθητήρα DS18B20. Η βάση δεδομένων κατέγραψε επιτυχώς ακόμη και αυτές τις περιπτώσεις, γεγονός που αποδεικνύει την ορθή λειτουργία του μηχανισμού αποθήκευσης και τη δυνατότητα διατήρησης ιστορικού σφαλμάτων ή μη έγκυρων μετρήσεων.

Επιπλέον, η σύγκριση του αριθμού των αναμενόμενων και των τελικά αποθηκευμένων μετρήσεων έδειξε ότι σε ορισμένα χρονικά διαστήματα υπήρξαν απώλειες δεδομένων πριν την αποθήκευση στη βάση. Το γεγονός αυτό σχετίζεται πιθανότατα με την ασύρματη μετάδοση μέσω LoRa και όχι με δυσλειτουργία της Supabase.

Η χρήση cloud υποδομής μέσω της Supabase προσφέρει δυνατότητες απομακρυσμένης πρόσβασης, ευκολίας διαχείρισης και επεκτασιμότητας, καθιστώντας τη λύση ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές Internet of Things (IoT). Συνολικά, η λειτουργία της βάσης δεδομένων κρίθηκε αξιόπιστη και επαρκής για τις απαιτήσεις του συστήματος.

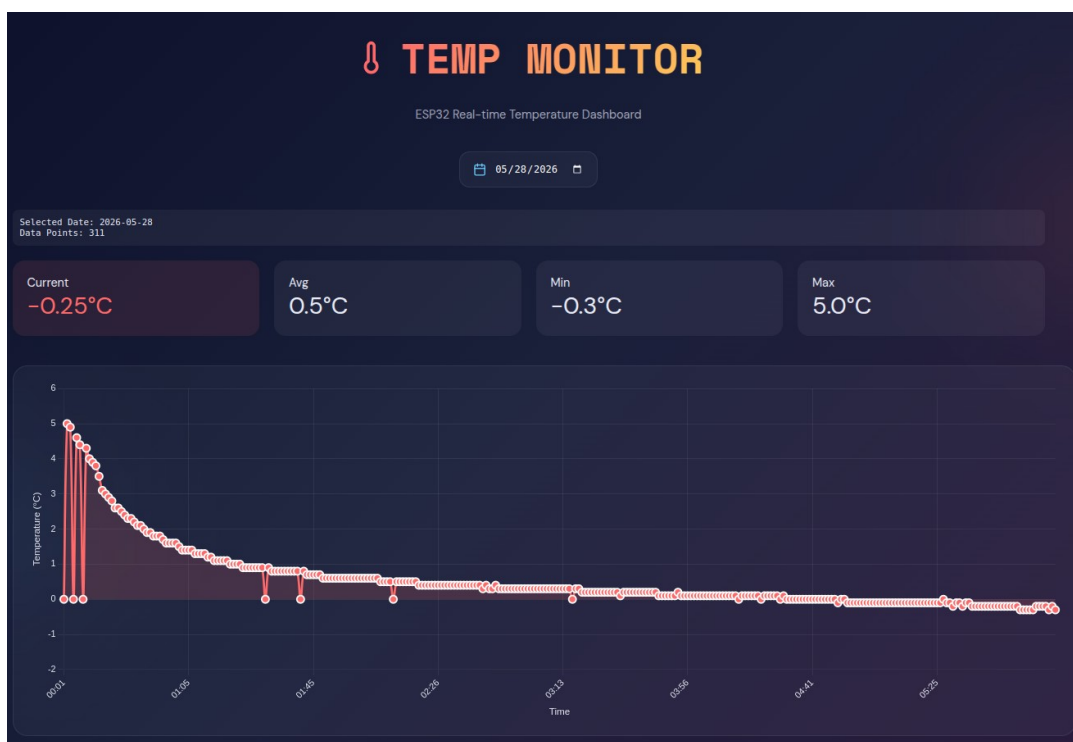
7.5 Λειτουργικότητα web-app απεικόνισης δεδομένων

Για την οπτικοποίηση των δεδομένων θερμοκρασίας αναπτύχθηκε διαδικτυακή εφαρμογή (web-app) με χρήση του framework Next.js. Η εφαρμογή φιλοξενείται στην πλατφόρμα Vercel και αντλεί τα δεδομένα απευθείας από τη βάση δεδομένων Supabase.

Η εφαρμογή παρέχει γραφική απεικόνιση των μετρήσεων θερμοκρασίας ανά ημέρα, επιτρέποντας στον χρήστη να παρακολουθεί τη μεταβολή της θερμοκρασίας τόσο σε πραγματικό χρόνο όσο και ιστορικά. Τα δεδομένα παρουσιάζονται σε μορφή διαγράμματος γραμμής, διευκολύνοντας την κατανόηση της εξέλιξης των μετρήσεων και την αναγνώριση πιθανών ανωμαλιών στη λειτουργία του συστήματος.

Κατά τις δοκιμές λειτουργίας, το web-app κατάφερε να ανακτά και να εμφανίζει επιτυχώς τα δεδομένα της βάσης χωρίς σημαντικές καθυστερήσεις ή σφάλματα λειτουργίας. Παράλληλα, η εφαρμογή εμφάνιζε και τις εγγραφές με τιμή NULL, επιτρέποντας την αναγνώριση περιπτώσεων αποτυχημένης ανάγνωσης του αισθητήρα. Με τον τρόπο αυτό ο χρήστης μπορεί να εντοπίζει πιθανά προβλήματα στη λειτουργία του συστήματος και να αξιολογεί την ποιότητα των μετρήσεων.

Στο σχήμα που ακολουθεί, απεικονίζεται στιγμιότυπο της διαδικτυακής εφαρμογής, όπου απεικονίζεται η καμπύλη θερμοκρασιών για την 28/05/26.



Σχήμα 7.5 – Στιγμιότυπο διαδικτυακής εφαρμογής χρήστη (28/05/26).

Επιπλέον, μέσω της γραφικής απεικόνισης κατέστη δυνατή η παρατήρηση πιθανών απωλειών πακέτων κατά τη LoRa επικοινωνία, καθώς σε ορισμένα χρονικά διαστήματα εμφανίζονταν λιγότερες μετρήσεις από τις αναμενόμενες. Η δυνατότητα αυτή καθιστά την εφαρμογή χρήσιμο εργαλείο όχι μόνο για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας αλλά και για τη διάγνωση της συνολικής λειτουργίας του συστήματος.

Η αρχιτεκτονική της εφαρμογής βασίζεται στον διαχωρισμό frontend και backend λειτουργιών μέσω API routes του Next.js. Τα δεδομένα αποστέλλονται από τη μονάδα δρομολογητή στο backend endpoint της εφαρμογής, αποθηκεύονται στη Supabase και στη συνέχεια ανακτώνται για την παραγωγή των γραφημάτων.

Η φιλοξενία μέσω της πλατφόρμας Vercel προσφέρει δυνατότητα συνεχούς ανάπτυξης (continuous deployment), καθώς κάθε αλλαγή στον πηγαίο κώδικα που αποθηκεύεται στο GitHub δημοσιεύεται αυτόματα στη διαδικτυακή εφαρμογή. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ευκολία συντήρησης και άμεση ενημέρωση του συστήματος.

Συνολικά, η λειτουργία της εφαρμογής κρίθηκε ιδιαίτερα ικανοποιητική, καθώς παρέχει εύκολη πρόσβαση στα δεδομένα θερμοκρασίας από οποιαδήποτε συσκευή διαθέτει σύνδεση στο διαδίκτυο, ενώ παράλληλα συμβάλλει στην αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της απόδοσης του συνολικού IoT συστήματος.

Κεφάλαιο 8 - Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

8.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε η σχεδίαση, υλοποίηση και αξιολόγηση ενός συστήματος απομακρυσμένης παρακολούθησης θερμοκρασίας με χρήση τεχνολογίας LoRa. Το σύστημα αποτελείται από δύο διακριτές μονάδες: τη μονάδα αισθητήρα και τη μονάδα δρομολογητή, οι οποίες επικοινωνούν ασύρματα μέσω LoRa για τη μετάδοση δεδομένων θερμοκρασίας.

Η μονάδα αισθητήρα, η οποία ενσωματώνει τον ψηφιακό αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20, τον μικροελεγκτή ESP32 και το τερματικό LoRa SX1276, καταφέρνει να λειτουργεί αυτόνομα με χρήση επαναφορτιζόμενης μπαταρίας ιόντων λιθίου και φωτοβολταϊκού πάνελ. Οι θεωρητικοί υπολογισμοί κατανάλωσης ενέργειας έδειξαν ότι με κατάλληλη επιλογή ρυθμού μετάδοσης πακέτων, η αυτονομία της μονάδας μπορεί να φτάσει τις 12 ημέρες.

Η μονάδα δρομολογητή λειτουργεί ως ενδιάμεσος κόμβος, λαμβάνοντας τα δεδομένα μέσω LoRa, προσθέτοντας χρονική σήμανση μέσω συγχρονισμού NTP και προωθώντας τα στον απομακρυσμένο διακομιστή μέσω WiFi. Η χρήση του πρωτοκόλλου HTTP για την επικοινωνία με τον server εξασφαλίζει συμβατότητα και ευκολία ενσωμάτωσης με διάφορες πλατφόρμες.

Η επιλογή της τεχνολογίας LoRa αποδείχθηκε ιδανική για την εφαρμογή, καθώς προσφέρει εξαιρετική εμβέλεια επικοινωνίας που σύμφωνα με τους θεωρητικούς υπολογισμούς μπορεί να φτάσει τα 1.2 χιλιόμετρα σε αστικό περιβάλλον, με ταυτόχρονα πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Η δυνατότητα λειτουργίας σε χαμηλό SNR και η ανθεκτικότητα σε παρεμβολές καθιστούν το LoRa κατάλληλο για εφαρμογές σε βιομηχανικά και αγροτικά περιβάλλοντα.

Το backend σύστημα που αναπτύχθηκε με χρήση του framework Next.js και φιλοξενείται στην πλατφόρμα Vercel, σε συνδυασμό με τη βάση δεδομένων Supabase, παρέχει αξιόπιστη αποθήκευση και διαχείριση των μετρήσεων. Η web εφαρμογή επιτρέπει την οπτικοποίηση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μέσω διαδραστικών γραφημάτων, προσφέροντας στον χρήστη εύκολη πρόσβαση από οποιαδήποτε συσκευή με σύνδεση στο διαδίκτυο.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, το σύστημα επέδειξε σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία. Δεν παρατηρήθηκαν απώλειες πακέτων κατά τη μετάδοση μέσω LoRa, ενώ η αποθήκευση στη βάση δεδομένων πραγματοποιούνταν χωρίς σφάλματα. Η ακρίβεια των μετρήσεων θερμοκρασίας ήταν εντός των προδιαγραφών του αισθητήρα DS18B20 ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$).

Ωστόσο, η χρήση αναπτυξιακών πλακετών (development boards) για τον ESP32 επηρέασε αρνητικά την ενεργειακή απόδοση του συστήματος, ιδιαίτερα στην κατάσταση αδράνειας (deep sleep). Η κατανάλωση στην κατάσταση ύπνου ήταν περίπου 10mA αντί για τα 10μA που προδιαγράφει ο κατασκευαστής, γεγονός που περιορίζει σημαντικά τη μέγιστη δυνατή αυτονομία.

Συμπερασματικά, το σύστημα που αναπτύχθηκε αποτελεί μια πλήρη και λειτουργική λύση για απομακρυσμένη παρακολούθηση θερμοκρασίας σε περιβάλλοντα όπου η παραδοσιακή καλωδιακή επικοινωνία είναι αδύνατη ή ασύμφορη. Η αρχιτεκτονική του συστήματος επιτρέπει την εύκολη επέκταση με προσθήκη περισσότερων μονάδων αισθητήρων και την ενσωμάτωση πρόσθετων τύπων αισθητήρων.

8.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Παρότι το προτεινόμενο σύστημα καλύπτει τις βασικές απαιτήσεις παρακολούθησης θερμοκρασίας, υπάρχουν διάφορες κατευθύνσεις για μελλοντική επέκταση και βελτίωση.

8.2.1 Βελτιστοποίηση ενεργειακής κατανάλωσης

Η σημαντικότερη βελτίωση που μπορεί να πραγματοποιηθεί αφορά την αντικατάσταση των αναπτυξιακών πλακετών με custom σχεδιασμό PCB που θα ενσωματώνει μόνο τα απαραίτητα εξαρτήματα. Με αυτόν τον τρόπο, η κατανάλωση στην κατάσταση αδράνειας για την συσκευή της μονάδας μέτρησης θα μπορούσε να μειωθεί στα 10-150μΑ, επιτρέποντας αυτονομία πολλών εβδομάδων ή ακόμη και μηνών ανάλογα με τον ρυθμό μετάδοσης.

Επιπλέον, θα μπορούσε να εξεταστεί η χρήση τεχνικών όπως η δυναμική ρύθμιση του spreading factor ανάλογα με την ποιότητα του σήματος, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η σχέση μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας και αξιοπιστίας επικοινωνίας.

8.2.2 Υποστήριξη πολλαπλών μονάδων μέτρησης

Το σύστημα θα μπορούσε να επεκταθεί ώστε να υποστηρίζει πολλαπλές μονάδες αισθητήρων που επικοινωνούν με έναν ή περισσότερους δρομολογητές. Αυτό θα απαιτούσε την υλοποίηση μηχανισμού αναγνώρισης κόμβων, ώστε κάθε μονάδα να διαθέτει μοναδικό αναγνωριστικό. Επίσης, θα χρειαζόταν η εφαρμογή στρατηγικής χρονικής πολυπλεξίας (time-division) για την αποφυγή συγκρούσεων κατά τη μετάδοση, καθώς και μηχανισμός επιβεβαίωσης παραλαβής (acknowledgment) για την εξασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων.

8.2.3 Ενσωμάτωση πρόσθετων αισθητήρων

Πέρα από τη θερμοκρασία, το σύστημα θα μπορούσε να εμπλουτιστεί με αισθητήρες υγρασίας (π.χ. DHT22), ατμοσφαιρικής πίεσης (π.χ. BMP280), ποιότητας αέρα (π.χ. MQ-135) ή ακόμη και αισθητήρες ανίχνευσης κίνησης. Η προσθήκη μετρητή τάσης μπαταρίας θα επέτρεπε την παρακολούθηση της ενεργειακής κατάστασης κάθε κόμβου και την έγκαιρη προειδοποίηση για χαμηλή στάθμη φόρτισης.

8.2.4 Υλοποίηση συστήματος ειδοποιήσεων

Μια κρίσιμη λειτουργικότητα που θα προσέθετε σημαντική αξία στο σύστημα είναι η δυνατότητα αυτόματης ειδοποίησης του χρήστη όταν η θερμοκρασία ξεπερνά προκαθορισμένα όρια. Οι ειδοποιήσεις θα μπορούσαν να αποστέλλονται μέσω email, SMS ή push notifications στην εφαρμογή χρήστη. Επιπλέον, θα μπορούσε να υλοποιηθεί σύστημα προειδοποίησης για απώλεια επικοινωνίας με κάποια μονάδα αισθητήρα, υποδεικνύοντας πιθανή βλάβη ή εκτός εμβέλειας λειτουργία.

8.2.5 Βελτιώσεις στη διεπαφή χρήστη

Η web εφαρμογή θα μπορούσε να επεκταθεί με πρόσθετες δυνατότητες όπως:

- Εξαγωγή δεδομένων σε μορφή CSV ή Excel για περαιτέρω ανάλυση
- Σύγκριση μετρήσεων μεταξύ διαφορετικών ημερών ή περιόδων
- Στατιστική ανάλυση με υπολογισμό μέγιστων, ελάχιστων και μέσων τιμών
- Προσαρμόσιμα dashboards με δυνατότητα προβολής πολλαπλών αισθητήρων ταυτόχρονα

8.2.6 Υλοποίηση LoRaWAN

Αντί για point-to-point επικοινωνία LoRa, το σύστημα θα μπορούσε να αναβαθμιστεί ώστε να υποστηρίζει το πρωτόκολλο LoRaWAN. Αυτό θα επέτρεπε την ενσωμάτωση με υπάρχοντα δίκτυα LoRaWAN και θα παρείχε πρόσθετες δυνατότητες όπως κρυπτογράφηση end-to-end, διαχείριση συσκευών μέσω κεντρικού network server και δυνατότητα roaming μεταξύ διαφορετικών gateways.

Οι προτεινόμενες επεκτάσεις θα μετατρέψουν το σύστημα σε μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα IoT κατάλληλη για ευρύ φάσμα εφαρμογών στους τομείς της γεωργίας, της βιομηχανίας, της διαχείρισης εφοδιαστικής αλυσίδας και των έξυπνων κτιρίων.

Βιβλιογραφία

1. Maxim Integrated. *DS18D20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. [Datasheet]. 2020. Retrieved from: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18D20.pdf>
2. Semtech Corporation. *What is LoRa®?* Semtech, 2023. Retrieved from: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>
3. [TOPPOWER/Chipsea \(κοινή ανατύπωση\)](#). *TP4056: 1A Standalone Linear Li-ion Battery Charger – Data Sheet*.
4. OpenEnergyMonitor. *Off-grid solar PV system design*. 2020. Retrieved from: <https://learn.openenergymonitor.org/pv-solar/Off-grid-solar-PV>
5. Microchip Technology. *TC1264 Low Dropout Regulator Datasheet*. 2020. Available at: <https://gr.mouser.com/datasheet/2/268/21375D-2581448.pdf>
6. Dallas Semiconductor. *Application Note 126: 1-Wire Communication Through Software*. <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/1/126.html>
7. Alabi, A., et al. "Development of a Smart Cold Chain Monitoring System Using DS18B20 Sensor." *International Journal of Engineering Research & Technology*, 12(2), 2023, 312–318.
8. Rajak, P., et al. "Internet of Things and smart sensors in agriculture: Scopes and challenges." *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 2023, 100776.
9. **Hossain, M. S., et al.** "Low-Cost Sensor Network for Real-Time Agricultural Monitoring using DS18B20." *International Journal of Smart Sensor and Ad Hoc Network*, vol. 13, no. 1, 2022, pp. 44–50.
10. **Semtech Corporation.** *What is LoRa®?* Semtech, 2023.
11. Semtech. *LoRa® Modulation Basics*. Application Note AN1200.22, **Rev. 2, May 2015**. .
12. Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., Townsley, W. M. "Long-Range & Low-Power Networks for the Internet of Things." *Sensors*, 16(9), 1466, 2016.
13. **ETSI EN 300 220-1 V3.1.1 (2017-02)**. *Short Range Devices (SRD) operating in the 25 MHz to 1 000 MHz range; Part 1: Technical characteristics and methods of measurement*. ETSI.
14. **LoRa Alliance (2025-10-08)**. *LoRaWAN® Regional Parameters RP002-1.0.5*. LoRa Alliance.
15. **CEPT/ERC Recommendation 70-03 (Edition October 2025)**. *Relating to the use of Short Range Devices (SRD)*. European Communications Office (ECO).
16. **Avenell, B.** (2015). *Noise Figure Measurement Uncertainty: A Statistical Approach*. **High Frequency Electronics** (HFE 2015).
17. **National Instruments (NI)**. (2025, Oct 20). *Noise Floor — NI-RFSA User Manual*.
18. Espressif Systems. "ESP32 Datasheet: Technical Reference Manual." Version 4.3, 2021.
19. ZigBee Alliance. *ZigBee Specification 2017*. Available online: <https://zigbeealliance.org/>
20. Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. "Low Power Wide Area Networks: An Overview." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, 2017, pp. 855–873. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>
21. **Sauter, M.** *From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*. **Wiley, 2017**.
22. **Sigfox.** *Technology Overview*. Available online: <https://www.sigfox.com/en/technology>
23. Adelantado, F., et al., "Understanding the limits of LoRaWAN," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34-40, Sep. 2017.

24. Maxim Integrated. *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Datasheet*, Rev 10, 2018.
25. NanJing Top Power ASIC Corp. *TP4056 – 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation*, Datasheet, 2017.
26. Xiao, X., et al. "Solar energy harvesting and wireless charging based temperature monitoring system for food storage." *Sensors International*, vol. 4, 2023, 100208.
27. Analog Journal. *Linear Power Charging Control for Li-Ion Battery – Application Overview*, 2020.
28. Fortune Semiconductor Corporation. *DW01 Battery Protection IC Datasheet*, Version 1.8, 2021.
29. Shenzhen Fuman Electronics Co. *FS8205A Dual N-Channel MOSFET Datasheet*, 2019.
30. Espressif Systems. *ESP32 Datasheet*. Espressif Official Documentation, 2023. Available at: <https://www.espressif.com>
31. Espressif Systems. "ESP32 Datasheet: Technical Reference Manual." Version 4.3, 2021.
32. Espressif Systems. *ESP32 Technical Reference Manual* (Version 4.1), 2022.
33. Nayyar, A., & Patil, P. *Internet of Things (IoT): Architectures, Protocols and Applications*. Apple Academic Press, 2019.
34. Gomez, C., Oller, J., & Paradells, J. "Overview and evaluation of Bluetooth Low Energy: An emerging low-power wireless technology." *Sensors*, vol. 12, no. 9, 2012, pp. 11734–11753.
35. Semtech Corporation. (2017). *SX1276/77/78/79 Datasheet*. Available at: <https://www.semtech.com>
36. Texas Instruments. "Power Supply Decoupling Techniques." Application Note SLVA630, 2014.
37. Samsung SDI Co., Ltd. "Introduction of INR18650-25R." Datasheet, Oct. 2013.
38. Dallas Semiconductor. "Understanding and Using the DS18B20 Temperature Sensor." Application Note, 2019.
39. Lee, H., Keum, J., & Lee, J. (2019). "Analysis of Low-Power Operation in ESP32 for IoT Applications." *Sensors and Materials*, vol. 31, no. 4, pp. 1173–1183.
40. **Maxim Integrated Products, Inc.** "DS18B20-PAR: 1-Wire Parasite-Power Digital Thermometer." *Datasheet*, Rev. **101207**, 19 pp., retrieved from Analog Devices (PDF), accessed **1 Jan. 2026**.
41. **Where Labs, LLC (Bus Pirate)**. "DS18B20 1-Wire Temperature Sensor." *Bus Pirate 5 Firmware Documentation*, 2025
42. **Πλευριτάκης, Γ.** «Πως επικοινωνεί ο αισθητήρας DS18B20 με το Arduino.» *Learn Electronics*, 23 Μαρτίου 2020
43. ANSI. *American National Standard for Information Systems — Coded Character Sets — 7-bit American National Standard Code for Information Interchange (ASCII) (ANSI X3.4-1986)*. American National Standards Institute, 1986.
44. IEEE. *IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic (IEEE Std 754-2019)*. IEEE, 2019.
45. Mistry, S. *Arduino LoRa Library (SX1276/77/78/79) — API/Source Code Documentation (beginPacket/print/endPacket, MAX_PKT_LENGTH)*. GitHub Repository "sandeepmistry/arduino-LoRa"
46. Mills, D. L., Martin, J., Burbank, J., & Kasch, W. "Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification." RFC 5905, IETF, 2010.
47. Postel, J. "User Datagram Protocol." RFC 768, IETF, 1980.
48. Sivrikaya, F., & Yener, B. "Time synchronization in sensor networks: A survey." *IEEE Network*, vol. 18, no. 4, 2004, pp. 45–50.
49. Fielding, R. T., & Reschke, J. "Hypertext Transfer Protocol (HTTP/1.1): Semantics and Content."

- RFC 7231, IETF, 2014.
50. Espressif Systems. *ESP32 Arduino Core Documentation – HTTPClient Library*. (ESP32 Arduino documentation).
 51. Fielding, R., Nottingham, M., & Reschke, J. “HTTP Semantics.” *RFC 9110*, IETF, 2022.
 52. Espressif Systems. “ESP-IDF Programming Guide — HTTP Client (esp_http_client).” *Espressif Documentation*, (τρέχουσα έκδοση).
 53. Espressif Systems. *Arduino-ESP32 — HTTPClient library (HTTPClient.h / HTTPClient.cpp): POST(), setTimeout(), error codes, request headers handling*. (Source code / documentation of the Arduino ESP32 core).
 54. Espressif / Arduino-ESP32 (Open-source). (2017). *HTTPClient.h* (negative error codes όπως HTTPC_ERROR_READ_TIMEOUT, default TCP timeout). Source code.
 55. Internet Assigned Numbers Authority (IANA). (2025). *HTTP Status Code Registry*. IANA.
 56. Pallets Projects. *Flask Documentation (3.1.x) — API Reference (Request.data / request handling)*. Flask.
 57. Python Software Foundation. *Python Documentation — Built-in Types: bytes.decode(encoding='utf-8', errors='strict')*.
 58. Python Software Foundation. *Python Documentation — datetime: datetime.strptime()*.
 59. The pandas development team. *pandas Documentation — pandas.read_excel()*.
 60. The pandas development team. *pandas Documentation — DataFrame.to_excel()*.
 61. The pandas development team. *pandas.DataFrame.to_excel — pandas documentation*.
 62. Microsoft. *Python df.to_excel / df.to_csv not saving — File locked by another program (Excel)*. Microsoft Q&A.
 63. MDN contributors. (2025, August 20). Using the Fetch API. MDN Web Docs. Retrieved January 31, 2026, from https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Fetch_API/Using_Fetch
 64. Chart.js contributors. (2025, October 13). API. Chart.js Documentation. Retrieved January 31, 2026, from <https://chartjs.org/docs/latest/developers/api.html>
 65. “Chip vs. Chirp in LoRaWAN: Understanding the Difference” RF Wireless World. Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.rfwireless-world.com/terminology/chip-vs-chirp-lorawan>
 66. Sakshama Ghosly, “LoRa: Symbol Generation.” Accessed: Nov. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.sghosly.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>
 67. "Hata Model," Altair WinProp User Guide, 2024. Accessed: June 3, 2026. [Online]. Available: https://help.altair.com/winprop/topics/winprop/user_guide/proman/propagation_models/proman_prop_model_hata.html