



INTERNATIONAL HELLENIC UNIVERSITY

DEPARTMENT OF INFORMATION AND ELECTRONIC ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

Environmental Wireless Monitoring System



Student:

Krikis Michail-Panagiotis
Student ID: 164804

Supervisor:

Aggelos Giakoumis

02 September 2026

Title of Dissertation: Environmental Wireless Monitoring System

Code of Dissertation 23101

Student's full name Krikis Michail-Panagiotis

Supervisor's full name Aggelos Giakoumis

Date of undertaking 08-06-2025

Date of completion 06-09-2026

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 του φοιτητή Κρίκη Μιχαήλ-Παναγιώτη που την εκπόνησε/αν. 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.

Acknowledgement

This work is dedicated to my supervisor Professor Aggelos Giakoumis whose guidance and support have been invaluable in the completion of this study. His insightful criticism, patient encouragement, and rigorous academic standards have set a benchmark I will strive to meet throughout my career.

I would also like to thank my family for their continuous support throughout my studies.

Moreover, special thanks to the company Impact-BZ Ltd for providing me with their omnidirectional antenna especially developed for IoT applications and test code for the LoRa gateway and node.

Prolog

The Internet of Things did not begin with an idea. It began with a price curve. For decades, the driving force behind connected devices was not vision but economics: the relentless cheapening and shrinking of semiconductors, following the trajectory Gordon Moore predicted in 1965. Every two years or so, transistor density roughly doubled while costs fell, and this compounding effect eventually made it possible to embed meaningful computing power into objects that had never contained a processor before — light bulbs, thermostats, door locks, shipping pallets, and industrial machinery.

The first ingredient was the microcontroller. Once a single chip could combine a processor, memory, and input/output peripherals for a few dollars or less, manufacturers no longer needed a full computer to add intelligence to a device. This alone would not have created an "Internet" of things, though — it merely created smart, isolated objects.

The second ingredient was radio. The miniaturization of RF transceivers, and later the arrival of low-power wireless standards like Bluetooth Low Energy, Wi-Fi, Zigbee, and LoRa, meant that connectivity itself became a commodity component rather than an engineering feat. A single chip could now sense, compute, and transmit, all while consuming no more than a few milliwatts of power. As many IoT devices rely on batteries or energy harvesting, and connectivity that once consumed too much power to be practical, suddenly became viable for prolonged unattended operation.

The third ingredient was sensing. MEMS (micro-electromechanical systems) fabrication which allowed accelerometers, gyroscopes, temperature sensors, and gas detectors to be produced at the same scale and cost as logic chips. Sensing, computation, and communication became integrated into the same semiconductor.

Together, these trends diminished the cost of building a connected device and shrank its footprint substantially. The result is a world where objects report their own status, environments sense themselves, and machines coordinate without human intervention.

Abstract

This thesis presents the design and implementation of a low-power, long-range environmental monitoring system based on Internet of Things (IoT) principles. The system utilizes environmental sensors to measure parameters such as temperature and humidity and transmits the collected data via the LoRa (Long Range) communication protocol. The research addresses the growing need for reliable data acquisition in remote or infrastructure-limited environments, proposing an efficient solution with minimal energy consumption and operational cost.

A modular approach was followed in the development process, combining open-source hardware platforms (e.g., Arduino, ESP32) with LoRa transceivers to construct sensor nodes capable of wireless communication with a centralized gateway. Data was then forwarded to a central processing unit for storage and visualization. The system was tested under real-world conditions to evaluate signal reliability, range, and accuracy of measurements. Results indicate that LoRa is suitable for rural or hard-to-reach areas where conventional mobile or Wi-Fi networks are unreliable. The project concludes by highlighting the scalability of the solution and its potential applications in agriculture, smart cities, and environmental research.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός συστήματος παρακολούθησης περιβάλλοντος χαμηλής ισχύος και μεγάλης εμβέλειας, βασισμένου στις αρχές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Το σύστημα χρησιμοποιεί περιβαλλοντικούς αισθητήρες για τη μέτρηση παραμέτρων όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, και μεταδίδει τα καταγεγραμμένα δεδομένα μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας LoRa (Long Range). Το ερευνητικό κομμάτι απευθύνεται στην αυξανόμενη ανάγκη για αξιόπιστη συλλογή δεδομένων σε απομακρυσμένες περιοχές ή με περιορισμένη υποδομή, προτείνοντας μια αποτελεσματική λύση με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και λειτουργικό κόστος.

Η ανάπτυξη του συστήματος πραγματοποιήθηκε σε στάδια, συνδυάζοντας πλατφόρμες υλικού ανοιχτού κώδικα (π.χ., Arduino, ESP32) με πομποδέκτες LoRa για την κατασκευή κόμβων αισθητήρων ικανών για ασύρματη επικοινωνία με μια κεντρική πύλη. Στη συνέχεια, τα δεδομένα προωθήθηκαν σε μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας για αποθήκευση και οπτικοποίηση. Το σύστημα δοκιμάστηκε σε πραγματικές συνθήκες για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας του σήματος, της εμβέλειας και της ακρίβειας των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το LoRa είναι κατάλληλο για αγροτικές ή δυσπρόσιτες περιοχές όπου τα συμβατικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας ή Wi-Fi δεν αποτελούν αξιόπιστη λύση. Η εργασία ολοκληρώνεται επισημαίνοντας την επεκτασιμότητα της λύσης και τις πιθανές εφαρμογές της στη γεωργία, τις έξυπνες πόλεις και την περιβαλλοντική έρευνα.

Contents

Acknowledgement	3
Prolog	4
Abstract	5
Περίληψη	6
1. Εισαγωγή.....	9
1.1 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας	9
1.2 Κίνητρα και Σημασία του Συστήματος.....	9
1.3 Δομή της Εργασίας	10
2. Στάθμη της Γνώσης.....	11
2.1 Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT).....	11
2.1.1 Ιστορική Αναδρομή από το RFID στο IoT.....	11
2.1.2 Αρχιτεκτονική IoT Συστημάτων (Edge – Gateway – Server)	13
2.1.3 Εφαρμογές και Παραδείγματα Χρήσης	13
2.1.4 Προκλήσεις και Προβληματισμοί.....	15
2.1.5 Αρχιτεκτονικά Μοντέλα και Επίπεδα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT).....	16
2.2 Τεχνολογία LoRa και LoRaWAN	19
2.2.1 LoRa.....	19
2.2.2 LoRaWan	20
2.2.3 Ενεργειακή Απόδοση και Διαχείριση Ισχύος σε Δίκτυα LoRaWAN	21
2.2.4 Σύγκριση Τεχνολογιών Ασύρματης Επικοινωνίας για IoT	21
2.2.5 Ασφάλεια σε Δίκτυα LoRaWAN	22
2.2.6 Ζώνες Συχνοτήτων LoRa και Κανονισμοί Ανά Περιοχή	23
3. Αρχιτεκτονική και Σχεδίαση Συστήματος	25
3.1 Μικροελεγκτές.....	25
3.1.1 Επιλογή Μικροελεγκτή	28
3.2 Ασύρματα μόντεμ LoRa	30
3.2.1 Επιλογή Μόντεμ LoRa.....	31
3.3 Αισθητήρες Περιβαλλοντικών Μετρήσεων.....	33
3.3.1 Αισθητήρες Θερμοκρασίας.....	33
3.3.2 Αισθητήρες Υγρασίας	35

3.3.3	Αισθητήρες Μονοξειδίου – Διοξειδίου του Άνθρακα	36
3.3.4	Επιλογή Αισθητήρα Καταγραφής Περιβαλλοντικών Συνθηκών	38
3.4	Μπαταρίες	41
3.4.1	Προϋπολογισμός ισχύος	42
3.5	Σύνοψη Αρχιτεκτονικής Συστήματος	43
4.	Τεχνική Υλοποίηση	45
4.1	Πρώτο Στάδιο – Αισθητήρας	45
4.1.1	Sensor Hardware	45
4.1.2	Sensor Firmware	46
4.1.3	Επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας.....	48
4.2	Δεύτερο Στάδιο - LoRa	51
4.2.1	Node Hardware	51
4.2.2	Node Firmware	54
4.2.3	Gateway Firmware	56
4.3	Σύνοψη Υλοποιημένου Συστήματος	57
5.	Μετρήσεις και Απόδοση του Συστήματος	58
5.1	Μετρήσεις σε εσωτερικό χώρο - Μπαταρία/Θερμοκρασία/Υγρασία/CO ₂	58
5.2	Μέτρηση σε εξωτερικό χώρο - Εμβέλεια	61
5.2.1	Σύγκριση Κεραιών Πύλης.....	62
5.2.2	Σύγκριση Συντελεστή Διασποράς - Spreading Factor (SF)	63
5.2.3	Δοκιμή Κυκλικής Πόλωσης.....	64
6.	Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	65
6.1	Συμπεράσματα	65
6.2	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	65
	Βιβλιογραφία.....	66

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός συστήματος περιβαλλοντικής παρακολούθησης βασισμένου στις αρχές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT), αξιοποιώντας την τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας LoRa/LoRaWAN. Το σύστημα στοχεύει στη συλλογή, μετάδοση, αποθήκευση και απεικόνιση περιβαλλοντικών δεδομένων, όπως η θερμοκρασία και η ποιότητα του αέρα, με έμφαση στη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και τη μεγάλη εμβέλεια επικοινωνίας. Οι βασικοί στόχοι της εργασίας συνοψίζονται ως εξής:

- Η κατανόηση και ανάλυση των βασικών εννοιών του IoT και των τεχνολογιών LoRa και LoRaWAN.
- Η επιλογή κατάλληλων μικροελεγκτών και αισθητήρων για περιβαλλοντικές μετρήσεις.
- Ο σχεδιασμός μιας αποδοτικής αρχιτεκτονικής IoT συστήματος (κόμβοι – πύλη – backend).
- Η υλοποίηση ενός λειτουργικού συστήματος ασύρματης μετάδοσης δεδομένων με χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση.
- Η αξιολόγηση της αξιοπιστίας, της απόδοσης και της πρακτικής χρησιμότητας του συστήματος μέσω δοκιμών.

1.2 Κίνητρα και Σημασία του Συστήματος

Η ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών IoT και η αυξανόμενη ανάγκη για αξιόπιστη παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων αποτέλεσαν το βασικό κίνητρο για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Η κλιματική αλλαγή, η ποιότητα του αέρα και η ανάγκη για έγκαιρη συλλογή δεδομένων σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές καθιστούν απαραίτητη τη χρήση ενεργειακά αποδοτικών και οικονομικά βιώσιμων λύσεων. Η τεχνολογία LoRa/LoRaWAN προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με παραδοσιακές μεθόδους ασύρματης επικοινωνίας, όπως η μεγάλη εμβέλεια, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και η δυνατότητα ανάπτυξης ιδιωτικών δικτύων χωρίς εξάρτηση από παρόχους κινητής τηλεφωνίας. Τα χαρακτηριστικά αυτά την καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές περιβαλλοντικής παρακολούθησης, αγροτικής ανάπτυξης, έξυπνων πόλεων και βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Η σημασία του συστήματος που αναπτύσσεται στην εργασία έγκειται τόσο στη θεωρητική κατανόηση των τεχνολογιών IoT όσο και στην πρακτική εφαρμογή τους. Το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να αποτελέσει βάση για μελλοντικές επεκτάσεις και πραγματικές εφαρμογές, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη και επεκτάσιμη λύση συλλογής και ανάλυσης περιβαλλοντικών δεδομένων.

1.3 Δομή της Εργασίας

Η εργασία που ακολουθεί έχει ως στόχο να παρουσιάσει με δομημένο τρόπο την ανάπτυξη ενός συστήματος βασισμένου στο IoT, από τη θεωρητική θεμελίωση μέχρι την πρακτική εφαρμογή. Μέσα από την ανάλυση των σχετικών τεχνολογιών, την επιλογή εξαρτημάτων, τον σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής και την τελική υλοποίηση, ο αναγνώστης θα έχει την ευκαιρία να κατανοήσει τόσο τις βασικές αρχές όσο και τις τεχνικές λεπτομέρειες του συστήματος.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο, το οποίο περιλαμβάνει βασικές έννοιες γύρω από το IoT, τις τεχνολογίες LoRa και LoRaWAN. Επίσης, γίνεται αναφορά σε παραδείγματα εφαρμογών.

Το κεφάλαιο 3 επικεντρώνεται στον σχεδιασμό του συστήματος, περιλαμβάνοντας την αρχιτεκτονική του, την επιλογή μικροελεγκτών και αισθητήρων, τη σύνδεση των επιμέρους μονάδων και τον σχεδιασμό του LoRa δικτύου.

Στο κεφάλαιο 4 αναλύεται η διαδικασία της υλοποίησης, τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και λογισμικού. Περιγράφεται η ρύθμιση και ο προγραμματισμός των κόμβων, η σύνδεση στο LoRa δίκτυο και η δημιουργία του backend για την αποθήκευση και προβολή των μετρήσεων.

Το κεφάλαιο 5 αφορά την αξιολόγηση του συστήματος. Εξετάζονται η ακρίβεια, η αξιοπιστία και η απόδοση της λύσης, ενώ παρουσιάζονται συγκριτικά στοιχεία και αποτελέσματα δοκιμών.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 διατυπώνονται τα συμπεράσματα της εργασίας και προτείνονται πιθανοί δρόμοι για μελλοντική βελτίωση και επέκταση του συστήματος.

2. Στάθμη της Γνώσης

2.1 Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT)

Το Internet of Things, που συντομογραφείται ως IoT, αναφέρεται στο τεράστιο δίκτυο φυσικών συσκευών σε όλο τον κόσμο που είναι συνδεδεμένες στο διαδίκτυο, συλλέγοντας και ανταλλάσσοντας δεδομένα. Χάρη στην εξέλιξη φθηνών ημιαγωγών και την ευρεία παρουσία ασύρματων δικτύων, είναι πλέον δυνατό να μετατραπεί οποιοδήποτε προϊόν ή αντικείμενο σε μέρος ενός IoT οικοσυστήματος. Αυτή η ενοποίηση του ψηφιακού και του φυσικού κόσμου έχει ανοίξει μια νέα εποχή τεχνολογίας που βελτιώνει την αποτελεσματικότητα της καθημερινής μας ζωής, ενισχύει την ασφάλεια και συμβάλλει στην οικονομία με νέους τρόπους [1].

Το IoT αποτελεί πλέον βασικό κομμάτι της καθημερινότητας, επηρεάζοντας κρίσιμους τομείς όπως οι πόλεις, τα σπίτια και οι επιχειρήσεις. Καθώς ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών αυξάνεται ραγδαία, το δίκτυο IoT επεκτείνεται συνεχώς. Αυτή η ανάπτυξη υποστηρίζεται από τη μείωση του κόστους των αισθητήρων και την ευρύτερη διαθεσιμότητα σε υψηλής ταχύτητας σύνδεση στο διαδίκτυο, καθιστώντας το IoT πιο προσβάσιμο και εφαρμόσιμο σε διαφορετικούς κλάδους, από τη βιομηχανία έως την υγειονομική περίθαλψη [2].

2.1.1 Ιστορική Αναδρομή από το RFID στο IoT

Η τεχνολογία ταυτοποίησης μέσω ραδιοσυχνοτήτων RFID (radio frequency identification) είναι ουσιαστικά ο πρόδρομος του IoT επειδή καθιέρωσε αρκετές βασικές ιδέες που αργότερα θα πλαισίωναν την τεχνολογία και θα οδηγούσαν στην ευρεία διάδοσης της [3].

Η τεχνολογία RFID:

- Παρέχει μοναδική ταυτότητα σε μεμονωμένα φυσικά αντικείμενα με την βοήθεια ενός μηχανικά αναγνώσιμου σειριακού αριθμού EPC (Electronic Product Code), ενσωματωμένου σε μια ετικέτα που μπορεί να διαβαστεί χωρίς οπτική επαφή. Στο παρελθόν, οι υπολογιστές χειρίζονταν κυρίως δεδομένα που πληκτρολογούσαν οι άνθρωποι. Η RFID σήμαινε ότι ένα πράγμα μπορούσε να δηλώσει "Είμαι αυτό το συγκεκριμένο αντικείμενο" σε ένα τερματικό / πύλη [4]. Αυτή είναι η βάση της αρχής "κάθε αντικείμενο είναι προσβάσιμο" του IoT.
- Γεφύρωσε τον φυσικό και τον ψηφιακό κόσμο χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Ένας εργαζόμενος στην αποθήκη δεν χρειάζεται να σαρώσει έναν γραμμωτό κώδικα (barcode) χειροκίνητα ή να πληκτρολογήσει ένα σειριακό αριθμό / ετικέτα, καθώς τα δεδομένα μεταδίδονται αυτόματα μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και κεραιών ενός τερματικού. Αυτή η αυτόματη, χωρίς επίβλεψη καταγραφή της κατάστασης του φυσικού κόσμου σε ένα ψηφιακό σύστημα είναι ακριβώς αυτό που

κάνουν οι αισθητήρες IoT σήμερα, με επιπλέον περισσότερα δεδομένα (θερμοκρασία, κίνηση, τοποθεσία) αντί μόνο με έναν αναγνωριστικό αριθμό.

- Όρισε την κλασική αρχιτεκτονική έξυπνης κεντρικής υποδομής με φθηνούς κόμβους στην άκρη. Συγκεκριμένα φθηνές, χαμηλής ισχύος και συχνά παθητικές (χωρίς τροφοδοσία) ετικέτες στην άκρη, τροφοδοτούν δεδομένα σε κεντρικά σύστημα επεξεργασίας δεδομένων συχνά συνδεδεμένο στο ευρύτερο διαδίκτυο.
- Εδραίωσε την παρακολούθηση εφοδιαστικής αλυσίδας και περιουσιακών στοιχείων ως την κορυφαία εφαρμογή, αναγνωρίζοντας αυτόματα και σε μεγάλη κλίμακα πού βρίσκονται τα φορτία, παλέτες, πακέτα ή πράγματα.

Το IoT βασίστηκε στις προαναφερθείσες αρχές, αλλά πρόσθεσε αμφίδρομη επικοινωνία, πλουσιότερη ανίχνευση και πραγματική συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο αντί για κλειστά ιδιόκτητα δίκτυα ανάγνωσης.

Το IoT προσέθεσε επιπλέον:

- Οι συσκευές IoT αποκτούν πληθώρα διαφορετικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας όπως WiFi, BLE, LoRa, κινητή τηλεφωνία. Με αυτόν τον τρόπο οι επιμέρους συσκευές μπορούν να αναγνωριστούν ποικιλοτρόπως ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής και να αποκτήσουν απευθείας πρόσβαση στο διαδίκτυο χωρίς την ανάγκη πύλης.
- Ανίχνευση πέρα από την ταυτότητα τους προϊόντος / συσκευής με την προσθήκη αισθητήρων. Πέρα από την πληροφορία της αναγνώρισης και της σχετικής θέσης μια συσκευής RFID, μια περεταίρω εξελιγμένη συσκευή IoT μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον της, όπως θερμοκρασία, υγρασία, επιτάχυνση και άλλα.
- Αποκεντρωμένη υπολογιστική δύναμη με την βοήθεια φθηνών μικροελεγκτών και μικροεπεξεργαστών. Σε αντίθεση με το RFID, οι κόμβοι IoT μπορούν να επεξεργαστούν δεδομένα και εντολές τοπικά, να εκτελέσουν λογική, να ενεργήσουν και να επικοινωνήσουν με άλλους κόμβους χωρίς την ανάγκη πύλης και ενός κεντρικού υπολογιστή.

Η προέλευση του όρου «Διαδίκτυο των Πραγμάτων» δεν είναι ξεκάθαρη με διάφορες αναφορές να την τοποθετούν στην περίοδο 1985-2000 [5]. Σημαντική είναι η αναφορά στον Kevin Ashton, που χρησιμοποίησε τον όρο αρχικά σε μια παρουσίαση της Procter & Gamble το 1999 και αργότερα ενώ εργαζόταν επάνω στην τεχνολογία RFID στο Κέντρο Auto-ID του MIT [6]. Ο Ashton θεωρούσε πως η τεχνολογία ταυτοποίησης μέσω ραδιοσυχνότητας (RFID) θα ήταν καθοριστική για την ανάπτυξη του IoT, επιτρέποντας στους υπολογιστές να διαχειρίζονται μεμονωμένα αντικείμενα.

Το βασικό χαρακτηριστικό του Διαδικτύου των Πραγμάτων είναι η ενσωμάτωση μικρής εμβέλειας κινητών πομποδεκτών σε διάφορες συσκευές και καθημερινά αντικείμενα, δημιουργώντας νέους τρόπους επικοινωνίας όχι μόνο μεταξύ ανθρώπων και πραγμάτων, αλλά και μεταξύ των ίδιων των πραγμάτων.

2.1.2 Αρχιτεκτονική IoT Συστημάτων (Edge – Gateway – Server)

Η αρχιτεκτονική ενός IoT συστήματος βασίζεται στη συνεργασία διαφορετικών επιπέδων, καθένα από τα οποία επιτελεί συγκεκριμένο ρόλο στη συλλογή, μετάδοση και επεξεργασία δεδομένων. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία, η αρχιτεκτονική αυτή περιγράφεται συνήθως με τα επίπεδα edge, gateway και server.

Το επίπεδο **edge** περιλαμβάνει τις τελικές συσκευές κόμβους, όπως αισθητήρες και μικροελεγκτές, οι οποίες συλλέγουν δεδομένα από το φυσικό περιβάλλον. Οι συσκευές αυτές είναι συνήθως πολυάριθμες και φθηνές, ενώ χαρακτηρίζονται από περιορισμένους υπολογιστικούς και ενεργειακούς πόρους και είναι υπεύθυνες για τη βασική επεξεργασία και τη μετάδοση των δεδομένων.

Το επίπεδο **gateway** λειτουργεί ως ενδιάμεση πύλη, λαμβάνοντας τα δεδομένα από τις edge συσκευές και προωθώντας τα προς το κεντρικό σύστημα. Στα δίκτυα LoRaWAN, οι πύλες (gateways) παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διασύνδεση των ασύρματων κόμβων με το διαδίκτυο.

Το επίπεδο **server** αποτελεί το ανώτερο στρώμα της αρχιτεκτονικής και είναι υπεύθυνο για την αποθήκευση, ανάλυση και απεικόνιση των δεδομένων. Μέσω server και δυνητικά cloud πλατφορμών, παρέχεται η δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων, δημιουργίας γραφημάτων και λήψης αποφάσεων βασισμένων σε πραγματικές μετρήσεις..

2.1.3 Εφαρμογές και Παραδείγματα Χρήσης

Η εξέλιξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) δεν περιορίζεται μόνο στην τεχνολογική καινοτομία, αλλά επεκτείνεται δυναμικά σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που επηρεάζουν την καθημερινή ζωή, τις επιχειρήσεις και τις πόλεις. Από τις πρώτες “έξυπνες” συσκευές όπως αυτόματους πωλητές και ψυγεία, έως την καθιέρωση βιομηχανικών αισθητήρων, φορητών συσκευών υγείας και την ανάπτυξη «έξυπνων πόλεων», το IoT μετασχηματίζει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο αλληλοεπιδρούμε με τον κόσμο γύρω μας. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές χαρακτηριστικές εφαρμογές του IoT, από τομείς όπως η υγειονομική περίθαλψη, η βιομηχανική παραγωγή, οι μεταφορές, η γεωργία, η ενεργειακή διαχείριση και η οικιακή αυτοματοποίηση, πάντα με στόχο τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας, της ασφάλειας και της ποιότητας ζωής.

Στην εργασία [7] περιγράφεται ένα αυτόματο γεωργικό σύστημα για την παρακολούθηση της ποιότητας του εδάφους. Οι εν λόγω κόμβοι περιλαμβάνουν μια σειρά από αισθητήρες που καταγράφουν μετρήσεις όπως pH, συγκέντρωση CO₂, ένταση φωτός και υγρασία. Μία κάμερα τραβάει φωτογραφίες ανά τακτά

χρονικά διαστήματα και ένα τερματικό GPS αναγνωρίζει την θέση των επιμέρους κόμβων, ενώ η ενέργεια παρέχεται στους κόμβους μέσω μικρών φωτοβολταϊκών πάνελ. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω μίας πύλης σε μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας δεδομένων μέσω πρωτοκόλλου Zigbee.

Στην εργασία [8] παρουσιάζεται μία εφαρμογή IoT για την βελτιστοποιημένη διαχείριση μια «έξυπνης πόλης» με το παράδειγμα της πόλης της Πάντοβας στην Ιταλία. Μεταξύ άλλων, δεδομένα που καλείται το σύστημα να καταγράψει και να διαχειριστεί περιλαμβάνουν ηχορύπανση, διαχείριση αποβλήτων, ατμοσφαιρική ρύπανση, έξυπνος φωτισμός, έλεγχος κυκλοφορίας, κατανάλωση ενέργειας, διαθεσιμότητα χώρου στάθμευσης. Για κάθε μία εφαρμογή προτείνονται διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας και παροχής ενέργειας των κόμβων, ανάλογα με την υπάρχουσα υποδομή και την εν λόγω αναγκαία επένδυση. Καθότι το σύστημα υλοποιείται εντός αστικού ιστού η συνδεσιμότητα των κόμβων απλοποιείται και σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται και ενσύρματη επικοινωνία, με το κύριο προτέρημα την ευκολία διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων και την καταχώρηση τους σε βάσεις δεδομένων.

Η εργασίες [9], [10], [11] συνοψίζουν διαφορετικές εφαρμογές IoT στην ιατρική περίθαλψη και συμπεραίνουν ότι οι αυτοματοποιημένες διαδικασίες μέσω IoT συμβάλουν στην βέλτιστη διαχείριση νοσοκομειακών πόρων και στην καλύτερη εξυπηρέτηση των ασθενών. Η εργασία [12] παρουσιάζει την τεχνική υλοποίηση για ένα RFID βραχιόλι που χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση ασθενών και την καταχώριση των αναγκαίων πληροφοριών για την χρησιμοποίησή τους από τον εκάστοτε γιατρό. Για την βέλτιστη λειτουργία μιας παθητικής RFID ετικέτας απαιτείται η εξέλιξη κεραίας που θα μπορεί να λειτουργεί ενώ είναι δεμένη στο χέρι του ασθενή.

Η εργασία [13] παρουσιάζει ένα αυτοματοποιημένο σύστημα ταξινόμησης χαρτοκιβωτίων σε ροή πακέτων μεταφορικής εταιρίας. Ενώ τα χαρτοκιβώτια μεταφέρονται επάνω σε ιμάντες ή ράουλα, η σχετικής τους θέση προσδιορίζεται με την βοήθεια παθητικών RFID ετικετών που προϋπάρχουν για την αποθήκευση δεδομένων αποστολής. Ταυτόχρονα ένα κεντρικό σύστημα ταυτοποιεί τα πακέτα και τα κατευθύνει περαιτέρω μέσα στο κέντρο διαλογής.

Η εργασία [14] αναλύει ένα σύστημα καταγραφής περιβαλλοντικής μόλυνσης που είναι ουσιαστικά και το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ασύρματοι κόμβοι καταγράφουν με την βοήθεια ενός αισθητήρα τύπου SNS-MQ135 δεδομένα για συγκέντρωση σωματιδίων NH₃, NO_x, alcohol, benzene, smoke, CO₂. Η ενέργεια παρέχεται στον κόμβους μέσω μπαταρίας, η συλλογή δεδομένων γίνεται μέσω μικροελεγκτή Arduino Uno και η μετάδοση των δεδομένων με τη βοήθεια ενός ασύρματου μόντεμ Wi-Fi τύπου ESP8266. Τα δεδομένα μπορούν να παρουσιαστούν τοπικά επάνω στον κόμβο με μία οθόνη LCD και ύστερα ανεβαίνουν μέσω Wi-Fi σε έναν σέρβερ για περαιτέρω επεξεργασία.

2.1.4 Προκλήσεις και Προβληματισμοί

Αν και το IoT προσφέρει σημαντικά οφέλη σε πλήθος τομέων — από τη βιομηχανία και την υγεία μέχρι τις έξυπνες πόλεις — ταυτόχρονα εγείρει κρίσιμα ζητήματα που αφορούν την ασφάλεια, την ιδιωτικότητα, τη διαλειτουργικότητα των συσκευών και την ηθική χρήση των δεδομένων [15], [16]. Παρακάτω τίθενται τα βασικότερα ζητήματα που αφορούν τις προκλήσεις και τους προβληματισμούς που συνοδεύουν την αξιοποίηση του IoT.

Σύνθετο και μεγαλύτερο τοπίο επιθέσεων: Εκ φύσεως, το IoT —δεν αποτελεί μία τεχνολογική υλοποίηση ή ένα τμήμα μιας εταιρικής υποδομής που μπορεί να είναι ελεγχόμενη. Για να ψηφιοποιηθούν οι πληροφορίες από τον φυσικό κόσμο και να συνδυαστούν με στόχο την σύνδεση αυτοκινήτων, κτιρίων, βιομηχανιών, κατοικιών, ψυγείων κ.α. με το χρήστη, απαιτείται ο συνδυασμός πάρα πολλών τεχνολογιών, σε κάθε πιθανό σημείο συλλογής πληροφοριών. Αυτό οδηγεί στην ραγδαία αύξηση των τελικών σημείων σύνδεσης στο δίκτυο και άρα στον πολλαπλασιασμό των πιθανών εισόδων κακόβουλων εισβολέων.

Απομακρυσμένη πρόσβαση: Κάθε συσκευή που είναι συνδεδεμένη εξ αποστάσεως σε ένα δίκτυο για σκοπούς παρακολούθησης ή ρύθμισης αποτελεί εν δυνάμει στόχο για κακόβουλες επιθέσεις. Ακόμα και όταν δεν αποθηκεύονται ευαίσθητα δεδομένα τοπικά, οι ίδιες οι συσκευές λειτουργούν ως ενεργά σημεία εισόδου στο εταιρικό περιβάλλον. Η κατάσταση επιδεινώνεται λόγω της απουσίας λογισμικού προστασίας, όπως anti-malware. Οποιαδήποτε συσκευή με IP διεύθυνση μπορεί να εντοπιστεί και να γίνει αντικείμενο επίθεσης. Όταν οι συσκευές αυτές βασίζονται σε υποδομές cloud για να λειτουργήσουν, η απειλή γίνεται ακόμη μεγαλύτερη. Υπάρχουν σοβαροί περιορισμοί στον έλεγχο των διαδρομών που ακολουθούν τα δεδομένα και στην αξιολόγηση των εφαρμογών που τα χρησιμοποιούν. Επιπλέον, τίθενται ζητήματα φυσικής ασφάλειας, καθώς οι διακομιστές που φιλοξενούν τέτοιες υπηρεσίες βρίσκονται συχνά εκτεθειμένοι, χωρίς επαρκή προστασία από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση.

Ιδιωτικότητα: Ένα από τα βασικά ζητήματα που προκύπτουν με τη χρήση των συσκευών Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) είναι ο τρόπος με τον οποίο αξιοποιούνται τα δεδομένα που συλλέγονται από το περιβάλλον του χρήστη. Για παράδειγμα, οι πληροφορίες που συγκεντρώνει ένα έξυπνο ψυγείο μπορεί να φαίνονται ασημαντες, αλλά όταν συνδυαστούν με δεδομένα από άλλες συσκευές μέσα στο σπίτι, μπορούν να αποκαλύψουν σημαντικές λεπτομέρειες για την καθημερινή ζωή των κατοίκων. Στον επιχειρηματικό τομέα, υπάρχει ο κίνδυνος να εκτεθούν ευαίσθητες διαδικασίες παραγωγής, οδηγώντας σε ενδεχόμενη βιομηχανική κατασκοπεία. Φυσικά, χωρίς τη συλλογή αυτών των δεδομένων, οι έξυπνες συσκευές δεν θα μπορούσαν να προσφέρουν τις διευκολύνσεις που υπόσχονται. Το κρίσιμο ερώτημα αφορά το πώς χρησιμοποιούνται αυτά τα δεδομένα, από ποιον και για ποιο σκοπό. Το ζήτημα της ιδιωτικότητας είναι πολύπλοκο και μέχρι σήμερα δεν υπάρχει αρκετά αυστηρή νομοθεσία που να ρυθμίζει τη διαχείριση των συλλεγόμενων πληροφοριών και τους αρμόδιους χρήστες τους. Η μόνη γραμμή άμυνας βρίσκεται στις

πολιτικές ασφάλειας κάθε εταιρείας, οι οποίες συχνά περιορίζονται στην ανάλυση και εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων. Για να ενισχυθεί η εμπιστοσύνη και η προστασία των χρηστών, αυτές οι πολιτικές θα πρέπει να είναι απλές, διαφανείς και εύκολα προσβάσιμες τόσο στους καταναλωτές όσο και στους εταιρικούς πελάτες.

Ροή δεδομένων: Κάθε νέα συσκευή που συνδέεται μέσω Wi-Fi προσθέτει επιπλέον δεδομένα στη συνολική κίνηση που ήδη υπάρχει στο δίκτυο. Αυτά τα δεδομένα πρέπει να συλλέγονται, να επεξεργάζονται και να αναλύονται με βάση τις ανάγκες της εκάστοτε επιχείρησης. Παρόλο που αυτή η εξέλιξη δημιουργεί νέες επιχειρηματικές δυνατότητες, συνοδεύεται και από σημαντικούς κινδύνους. Οι οργανισμοί οφείλουν να είναι ικανοί να ξεχωρίζουν τις νόμιμες ροές δεδομένων από τις κακόβουλες και να παρεμβαίνουν έγκαιρα πριν προκύψουν σοβαρά προβλήματα. Το βασικό ζήτημα δεν είναι τόσο η προστασία των ίδιων των συσκευών, όσο η διαχείριση της κυκλοφορίας δεδομένων και των εντολών που μεταφέρονται μέσω αυτών. Για παράδειγμα, αν ένας φούρνος μικροκυμάτων δώσει εντολή στο ψυγείο να κλείσει, θα μπορούσε να δημιουργηθεί σύγχυση ως προς την πηγή του προβλήματος. Είναι πιθανό να θεωρηθεί υπαίτιο το ψυγείο, ενώ το σφάλμα να βρίσκεται αλλού. Επιπλέον, οι συσκευές IoT λειτουργούν συχνά εκτός του εσωτερικού εταιρικού τείχους προστασίας (firewall) και συνδέονται απευθείας με εξωτερικές υπηρεσίες, χωρίς πάντα η επιχείρηση να γνωρίζει ποιοι είναι αυτοί οι πάροχοι ή πώς προστατεύουν τα δεδομένα. Το πιο ανησυχητικό είναι ότι, αν μια συσκευή παραβιαστεί ή παρουσιάσει πρόβλημα, το τμήμα πληροφορικής μπορεί να μην το αντιληφθεί εγκαίρως, λόγω της περιορισμένης επίβλεψης που έχει στη λειτουργία του λογισμικού και της αλληλεπίδρασής του με το υλικό της συσκευής.

Κόστος: Οι επιχειρήσεις επενδύουν σημαντικά ποσά τόσο σε εξοπλισμό που ενισχύει την παραγωγικότητά τους όσο και σε συστήματα ασφαλείας που προστατεύουν την υποδομή τους από επιθέσεις. Είναι κατανοητό πως η αγορά ενός laptop, για παράδειγμα, δικαιολογεί υψηλότερο κόστος, καθώς χρησιμοποιείται καθημερινά για κρίσιμες εργασίες. Όμως, ποιο θα ήταν το αναμενόμενο κόστος για έναν απλό αισθητήρα θερμοκρασίας; Και πόσα είναι διατεθειμένη να δαπανήσει μια εταιρεία για μια έξυπνη καφετιέρα ή ένα σύστημα αυτόματου φωτισμού; Συνήθως, υπάρχει μια ευθεία συσχέτιση ανάμεσα στο κόστος μιας συσκευής και στο επίπεδο ασφάλειας που αυτή προσφέρει. Οι κατασκευαστές που δίνουν έμφαση στην ασφάλεια των IoT προϊόντων τους, συνήθως τα τιμολογούν πιο ακριβά από άλλους. Για τον λόγο αυτό, πριν ενταχθεί οποιαδήποτε νέα συσκευή στο εταιρικό περιβάλλον, είναι απαραίτητο να γίνει σχολαστική αξιολόγηση τόσο των λειτουργικών της χαρακτηριστικών όσο και του τρόπου που επηρεάζει την παραγωγική διαδικασία.

2.1.5 Αρχιτεκτονικά Μοντέλα και Επίπεδα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT)

Η αρχιτεκτονική των συστημάτων Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα για τον σχεδιασμό, την υλοποίηση και τη λειτουργία αξιόπιστων και επεκτάσιμων

εφαρμογών. Καθώς τα IoT συστήματα ενσωματώνουν πλήθος ετερογενών συσκευών, δικτύων και υπηρεσιών, η ύπαρξη μιας σαφώς ορισμένης αρχιτεκτονικής είναι απαραίτητη ώστε να επιτυγχάνεται η ομαλή ροή των δεδομένων, η διαλειτουργικότητα και η αποδοτική διαχείριση των πόρων.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορα αρχιτεκτονικά μοντέλα για το IoT, τα οποία διαφέρουν ως προς τον αριθμό των επιπέδων και τον βαθμό ανάλυσης της λειτουργικότητας. Ωστόσο, τα περισσότερα από αυτά βασίζονται σε μια κοινή φιλοσοφία: τον διαχωρισμό του συστήματος σε διακριτά επίπεδα, καθένα από τα οποία επιτελεί συγκεκριμένο ρόλο. Τα πιο διαδεδομένα μοντέλα είναι το τριεπίπεδο και το πενταεπίπεδο αρχιτεκτονικό μοντέλο [17]. Σε μία πιο πρόσφατη εργασία προτείνονται μέχρι και 7 επίπεδα, αν και αναφέρονται σε πιο περίπλοκες και λιγότερο διαδεδομένες εφαρμογές που δεν είναι σχετικές με την παρούσα διπλωματική εργασία [18].

- **Τριεπίπεδο Αρχιτεκτονικό Μοντέλο IoT**

Το τριεπίπεδο μοντέλο αποτελεί την απλούστερη και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη προσέγγιση για την περιγραφή της αρχιτεκτονικής ενός IoT συστήματος. Αποτελείται από τα εξής επίπεδα:

Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer): Το επίπεδο αυτό αποτελεί το κατώτερο στρώμα της αρχιτεκτονικής και είναι υπεύθυνο για την αλληλεπίδραση με το φυσικό περιβάλλον. Περιλαμβάνει αισθητήρες και ενεργοποιητές που συλλέγουν δεδομένα, όπως θερμοκρασία, υγρασία, ποιότητα αέρα ή συγκεντρώσεις αερίων. Οι συσκευές αυτές μετατρέπουν φυσικά μεγέθη σε ψηφιακά δεδομένα, τα οποία μπορούν να υποστούν βασική επεξεργασία πριν τη μετάδοσή τους.

Επίπεδο Δικτύου (Network Layer): Το επίπεδο δικτύου είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά των δεδομένων από το επίπεδο αντίληψης προς τα ανώτερα επίπεδα. Σε αυτό το επίπεδο εντάσσονται οι τεχνολογίες επικοινωνίας, τόσο ενσύρματες όσο και ασύρματες, όπως Ethernet, Wi-Fi, κινητά δίκτυα, καθώς και τεχνολογίες χαμηλής ισχύος και μεγάλης εμβέλειας (LPWAN), όπως το LoRaWAN. Η επιλογή της τεχνολογίας επικοινωνίας επηρεάζει άμεσα την κατανάλωση ενέργειας, την εμβέλεια και την αξιοπιστία του συστήματος.

Επίπεδο Εφαρμογής (Application Layer): Το ανώτερο επίπεδο της αρχιτεκτονικής αφορά τις εφαρμογές που χρησιμοποιούν τα συλλεγόμενα δεδομένα για την παροχή υπηρεσιών στον τελικό χρήστη. Σε αυτό το επίπεδο πραγματοποιείται η απεικόνιση των δεδομένων, η δημιουργία αναφορών και η λήψη αποφάσεων βάσει προκαθορισμένων κανόνων ή αλγορίθμων. Το τριεπίπεδο μοντέλο προσφέρει απλότητα και σαφήνεια, ωστόσο δεν επαρκεί πάντα για την περιγραφή σύνθετων IoT συστημάτων, στα οποία απαιτείται πιο λεπτομερής ανάλυση της επεξεργασίας και της διαχείρισης των δεδομένων.

- **Πενταεπίπεδο Αρχιτεκτονικό Μοντέλο IoT**

Για την κάλυψη πιο απαιτητικών εφαρμογών, έχει προταθεί το πενταεπίπεδο αρχιτεκτονικό μοντέλο, το οποίο επεκτείνει το τριεπίπεδο προσθέτοντας ενδιάμεσα επίπεδα λειτουργικότητας. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει τα εξής επίπεδα:

Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer): Αντίστοιχο με το τριεπίπεδο μοντέλο, αφορά τη συλλογή δεδομένων από το φυσικό περιβάλλον μέσω αισθητήρων.

Επίπεδο Μεταφοράς (Transport Layer): Αναλαμβάνει τη μεταφορά των δεδομένων από τις συσκευές προς τα συστήματα επεξεργασίας, χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα και τεχνολογίες επικοινωνίας. Το επίπεδο αυτό διαχωρίζεται από το επίπεδο δικτύου ώστε να απομονώνονται οι λεπτομέρειες της μετάδοσης.

Επίπεδο Επεξεργασίας (Processing Layer): Το επίπεδο επεξεργασίας αποτελεί κρίσιμο στοιχείο των σύγχρονων IoT συστημάτων και περιλαμβάνει μηχανισμούς αποθήκευσης, ανάλυσης και επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων. Συχνά αξιοποιούνται τεχνολογίες cloud computing, βάσεις δεδομένων και αλγόριθμοι ανάλυσης δεδομένων.

Επίπεδο Middleware: Σε ορισμένες παραλλαγές του πενταεπίπεδου μοντέλου, εισάγεται επίπεδο μεσολάβησης (middleware), το οποίο διαχειρίζεται τη διαλειτουργικότητα μεταξύ ετερογενών συσκευών και εφαρμογών, διευκολύνοντας την ανταλλαγή δεδομένων και τον έλεγχο των συσκευών.

Επίπεδο Εφαρμογής (Application Layer): Όπως και στο τριεπίπεδο μοντέλο, το επίπεδο αυτό αφορά τις τελικές εφαρμογές και υπηρεσίες που προσφέρονται στους χρήστες.

Το πενταεπίπεδο μοντέλο παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία, επεκτασιμότητα και δυνατότητα ενσωμάτωσης προηγμένων λειτουργιών, όπως ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων.

- **Σχέση Αρχιτεκτονικών Μοντέλων με Σύγχρονες IoT Υλοποιήσεις**

Στην πράξη, τα περισσότερα σύγχρονα IoT συστήματα υλοποιούν υβριδικές αρχιτεκτονικές που συνδυάζουν στοιχεία τόσο του τριεπίπεδου όσο και του πενταεπίπεδου μοντέλου. Η χρήση τεχνολογιών όπως το LoRaWAN εντάσσεται κυρίως στο επίπεδο δικτύου ή μεταφοράς, ενώ οι πλατφόρμες server και cloud αντιστοιχούν στο επίπεδο επεξεργασίας και εφαρμογής.

Η κατανόηση των αρχιτεκτονικών μοντέλων και των επιπέδων του IoT διευκολύνει τη μετάβαση από τη θεωρητική ανάλυση στην πρακτική υλοποίηση, επιτρέποντας τον ορθολογικό σχεδιασμό συστημάτων που είναι αποδοτικά, ασφαλή και κλιμακούμενα. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η αρχιτεκτονική αυτή

προσφέρει το θεωρητικό υπόβαθρο για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση του προτεινόμενου συστήματος περιβαλλοντικής παρακολούθησης.

2.2 Τεχνολογία LoRa και LoRaWAN

Το LoRa (συντομογραφία του Long Range) είναι μια καινοτόμος, ιδιόκτητη τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας, σχεδιασμένη για μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Βασίζεται σε μια προηγμένη τεχνική διαμόρφωσης, γνωστή ως chirp spread spectrum (CSS), που της επιτρέπει να επικοινωνεί αξιόπιστα ακόμα και σε δύσκολες ραδιοεπικοινωνιακές συνθήκες.

Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε αρχικά από τη γαλλική εταιρεία Cycleo, με έδρα τη Γκρενόμπλ, και κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 2014. Λίγα χρόνια νωρίτερα, το 2012, η Cycleo εξαγοράστηκε από την αμερικανική Semtech, η οποία και συνέχισε την ανάπτυξη της τεχνολογίας.

Το LoRaWAN, από την άλλη, είναι το πρωτόκολλο επικοινωνίας και η αρχιτεκτονική συστήματος που πλαισιώνει το LoRa, καθορίζοντας πώς συσκευές συνδέονται και ανταλλάσσουν δεδομένα. Αποτελεί επίσημο πρότυπο της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU) με την κωδικοποίηση ITU-T Y.4480, ενώ η περαιτέρω εξέλιξή του επιβλέπεται από τη LoRa Alliance, μια ανοιχτή, μη κερδοσκοπική κοινοπραξία, στην οποία η Semtech είναι ιδρυτικό μέλος.

Μαζί, το LoRa και το LoRaWAN συγκροτούν ένα ισχυρό σύστημα επικοινωνίας χαμηλής ισχύος και μεγάλης εμβέλειας (LPWA), σχεδιασμένο ειδικά για το οικοσύστημα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Δίνει τη δυνατότητα σε συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία να επικοινωνούν ασύρματα σε τοπικό, εθνικό ή ακόμη και παγκόσμιο επίπεδο, υποστηρίζοντας βασικές ανάγκες του IoT όπως η αμφίδρομη επικοινωνία, η ασφάλεια, η κινητικότητα και ο εντοπισμός θέσης.

Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα που στοχεύουν σε μετάδοση μεγάλων όγκων δεδομένων με υψηλή ενεργειακή κατανάλωση, το LoRaWAN προσφέρει χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης (0,3 έως 50 kbit/s ανά κανάλι), κάνοντάς το ιδανικό για εφαρμογές όπου η εξοικονόμηση ενέργειας και η κάλυψη μεγάλων αποστάσεων είναι κρίσιμες.

2.2.1 LoRa

Το LoRa είναι μια προηγμένη τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας, σχεδιασμένη ειδικά για δίκτυα χαμηλής ισχύος και μεγάλης εμβέλειας (LPWAN). Μέσω αυτής, συσκευές με περιορισμένη ενεργειακή κατανάλωση μπορούν να στέλνουν δεδομένα σε μεγάλες αποστάσεις, χρησιμοποιώντας τόσο αδειοδοτημένες όσο και ελεύθερες ραδιοσυχνότητες. Η τεχνολογία βασίζεται στη διαμόρφωση chirp spread spectrum (CSS), η οποία επιτρέπει υψηλή ανθεκτικότητα στις παρεμβολές και αποδοτική χρήση του φάσματος.

Ο όρος LoRa αποτελεί ακρωνύμιο των λέξεων Long Range (μεγάλη εμβέλεια), και έχει καθιερωθεί για να περιγράψει το φυσικό επίπεδο της τεχνολογίας. Στην πράξη, το LoRa λειτουργεί ως μέθοδος διαμόρφωσης που επιτρέπει στα δίκτυα LPWAN να πετυχαίνουν εξαιρετική απόδοση:

- Επεκτείνει τη χωρική κάλυψη της επικοινωνίας σε πολλά χιλιόμετρα.
- Περιορίζει την κατανάλωση ενέργειας, κάτι κρίσιμο για συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία.
- Μειώνει τον κίνδυνο παρεμβολών, χάρη στη χρήση φασματικής διασποράς τύπου "chirp".

Η αρχιτεκτονική της τεχνολογίας LoRa βασίζεται σε δύο διακριτά επίπεδα που συνεργάζονται:

- Το φυσικό στρώμα (LoRa): Πρόκειται για το υλικό επίπεδο της επικοινωνίας – δηλαδή, το ίδιο το τσιπ LoRa που επιτρέπει τη ραδιοεπικοινωνία. Είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση των δεδομένων μέσω ραδιοκυμάτων.
- Το επίπεδο πρωτοκόλλου (LoRaWAN): Χτίζεται πάνω από το φυσικό επίπεδο και καθορίζει κανόνες για την ασφάλεια, την ακεραιότητα των δεδομένων και τη διαχείριση της σύνδεσης. Είναι αυτό που εξασφαλίζει την αξιοπιστία της επικοινωνίας στο πλαίσιο ενός έργου IoT.

Η συνεργασία αυτών των δύο επιπέδων επιτρέπει στο οικοσύστημα του LoRa να παρέχει ένα ευέλικτο, αποδοτικό και ασφαλές μέσο ασύρματης σύνδεσης για πληθώρα IoT εφαρμογών.

2.2.2 LoRaWan

Το LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) είναι ένα πρωτόκολλο δικτύωσης που αξιοποιεί την τεχνολογία LoRa για να οργανώσει την επικοινωνία ανάμεσα σε ασύρματες συσκευές και τον διακομιστή του δικτύου. Ουσιαστικά, παρέχει τη δομή και τους κανόνες που χρειάζονται για τη διαχείριση της επικοινωνίας, της κατανάλωσης ενέργειας και της ασφάλειας των συσκευών μέσα στο δίκτυο [19].

Ένα τυπικό δίκτυο LoRaWAN περιλαμβάνει τρία βασικά στοιχεία: τις τελικές συσκευές (όπως αισθητήρες), τις πύλες (gateways) και τον κεντρικό διακομιστή. Οι πύλες λειτουργούν ως σημεία μετάδοσης – λαμβάνουν τα σήματα από τις συσκευές και τα προωθούν στον διακομιστή, ο οποίος στη συνέχεια τα επεξεργάζεται. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει την αποδοτική και αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις, με παράλληλη εξοικονόμηση ενέργειας.

Το LoRaWAN ενσωματώνει επίσης ισχυρούς μηχανισμούς ασφάλειας, διασφαλίζοντας την κρυπτογράφηση των δεδομένων από τη στιγμή που παράγονται στη συσκευή μέχρι να φτάσουν στον τελικό αποδέκτη – μια διαδικασία γνωστή ως ασφάλεια από άκρο σε άκρο (end-to-end encryption).

Συνοπτικά, το LoRa αποτελεί τη βασική τεχνολογία διαμόρφωσης του ραδιοσήματος, ενώ το LoRaWAN είναι το λογισμικό και το πρωτόκολλο που αξιοποιεί αυτή την τεχνολογία για να επιτρέψει τη δημιουργία

ολοκληρωμένων δικτύων επικοινωνίας στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT). Το LoRaWAN προσθέτει λειτουργικότητες διαχείρισης, ασφάλειας και ενεργειακής απόδοσης που είναι κρίσιμες για την ανάπτυξη μεγάλων και αποδοτικών IoT δικτύων.

Αυτή η τεχνολογία βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως οι έξυπνες πόλεις, η γεωργία ακριβείας, τα έξυπνα κτίρια, τα αυτόματα συστήματα μέτρησης (π.χ. για νερό ή φυσικό αέριο), η παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων και οι βιομηχανικές λύσεις που βασίζονται στο IoT [19].

2.2.3 Ενεργειακή Απόδοση και Διαχείριση Ισχύος σε Δίκτυα LoRaWAN

Η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες σχεδιασμού σε συστήματα Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), ιδιαίτερα όταν οι συσκευές λειτουργούν με μπαταρία και είναι εγκατεστημένες σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά υπολογιστικά συστήματα, οι IoT κόμβοι καλούνται να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, γεγονός που καθιστά την εξοικονόμηση ενέργειας κρίσιμη.

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας ενός IoT κόμβου επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η συχνότητα δειγματοληψίας των αισθητήρων, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, η εμβέλεια της ασύρματης επικοινωνίας και ο χρόνος που ο μικροελεγκτής παραμένει σε ενεργή κατάσταση. Ιδιαίτερα η ασύρματη μετάδοση αποτελεί το πιο ενεργοβόρο τμήμα της λειτουργίας του συστήματος.

Για τον περιορισμό της κατανάλωσης, εφαρμόζονται τεχνικές διαχείρισης ισχύος (power management), με πιο διαδεδομένη τη χρήση καταστάσεων ύπνου (sleep modes) στους μικροελεγκτές. Οι σύγχρονοι μικροελεγκτές, όπως ο ESP32, υποστηρίζουν λειτουργίες όπως light sleep και deep sleep, κατά τις οποίες απενεργοποιούνται επιμέρους υποσυστήματα, μειώνοντας δραστικά την κατανάλωση ρεύματος.

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει επίσης ο περιορισμός του duty cycle, δηλαδή του ποσοστού χρόνου κατά το οποίο μια συσκευή εκπέμπει δεδομένα. Τα δίκτυα LoRaWAN είναι σχεδιασμένα ώστε να υποστηρίζουν χαμηλό duty cycle, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές περιοδικής μετάδοσης περιβαλλοντικών μετρήσεων.

Η επιλογή της τεχνολογίας LoRa επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, επιτυγχάνοντας ισορροπία μεταξύ εμβέλειας, αξιοπιστίας και αυτονομίας. Για τον λόγο αυτό, η LoRa αποτελεί μία από τις πλέον κατάλληλες λύσεις για IoT συστήματα που απαιτούν μακροχρόνια λειτουργία με περιορισμένους ενεργειακούς πόρους.

2.2.4 Σύγκριση Τεχνολογιών Ασύρματης Επικοινωνίας για IoT

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας ασύρματης επικοινωνίας αποτελεί κρίσιμο στάδιο στον σχεδιασμό ενός IoT συστήματος, καθώς επηρεάζει άμεσα την εμβέλεια, την κατανάλωση ενέργειας, το κόστος και την

αξιοπιστία της επικοινωνίας. Σήμερα, υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές IoT, με πιο διαδεδομένες τις LoRaWAN, NB-IoT, Sigfox, Wi-Fi και Bluetooth Low Energy (BLE).

Τα πρωτόκολλα Wi-Fi και Bluetooth προσφέρουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, όμως χαρακτηρίζονται από αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και περιορισμένη εμβέλεια, γεγονός που τα καθιστά λιγότερο κατάλληλα για απομακρυσμένες ή ενεργειακά αυτόνομες εφαρμογές.

Αντίθετα, τεχνολογίες όπως το NB-IoT και το Sigfox ανήκουν στην κατηγορία των δικτύων χαμηλής ισχύος και μεγάλης εμβέλειας (LPWAN). Το NB-IoT βασίζεται σε κυψελοειδείς υποδομές κινητής τηλεφωνίας, προσφέροντας υψηλή αξιοπιστία αλλά με αυξημένο λειτουργικό κόστος και εξάρτηση από παρόχους δικτύου. Το Sigfox, αν και εξαιρετικά ενεργειακά αποδοτικό, παρουσιάζει περιορισμούς στον όγκο και τη συχνότητα μετάδοσης δεδομένων.

Η τεχνολογία LoRaWAN συνδυάζει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, μεγάλη εμβέλεια και δυνατότητα υλοποίησης ιδιωτικών δικτύων χωρίς την ανάγκη συνδρομής σε πάροχο. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν το LoRaWAN ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές περιβαλλοντικής παρακολούθησης, όπου απαιτείται περιοδική αποστολή μικρού όγκου δεδομένων από αισθητήρες που λειτουργούν με μπαταρία [20].

2.2.5 Ασφάλεια σε Δίκτυα LoRaWAN

Η ασφάλεια αποτελεί βασικό παράγοντα αξιοπιστίας σε κάθε σύστημα Διαδικτύου των Πραγμάτων, καθώς τα δεδομένα που συλλέγονται και μεταδίδονται συχνά αφορούν ευαίσθητες πληροφορίες ή κρίσιμες λειτουργίες. Τα δίκτυα LoRaWAN έχουν σχεδιαστεί με ενσωματωμένους μηχανισμούς ασφάλειας, προκειμένου να διασφαλίζεται η ακεραιότητα και η εμπιστευτικότητα των δεδομένων [21].

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του LoRaWAN είναι η κρυπτογράφηση από άκρο σε άκρο (end-to-end encryption). Τα δεδομένα κρυπτογραφούνται στη συσκευή πριν τη μετάδοση και αποκρυπτογραφούνται μόνο στον τελικό αποδέκτη, γεγονός που αποτρέπει τη μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση κατά τη μεταφορά τους.

Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί ξεχωριστά κλειδιά ασφαλείας για τη δικτύωση και την εφαρμογή, διασφαλίζοντας ότι ακόμη και αν παραβιαστεί ένα επίπεδο, τα δεδομένα παραμένουν προστατευμένα. Παράλληλα, υλοποιούνται μηχανισμοί προστασίας από επιθέσεις επανάληψης (replay attacks) και παραποίησης δεδομένων.

Παρόλα αυτά, η συνολική ασφάλεια ενός IoT συστήματος δεν εξαρτάται μόνο από το πρωτόκολλο επικοινωνίας, αλλά και από τον σωστό σχεδιασμό του υλικού, τη διαχείριση των κλειδιών και την τακτική ενημέρωση του λογισμικού. Η κατανόηση και η εφαρμογή των αρχών ασφαλείας στο LoRaWAN αποτελεί

βασική προϋπόθεση για την αξιόπιστη λειτουργία IoT εφαρμογών μεγάλης κλίμακας. Έρευνα στο πεδίο της κρυπτογράφησης παράγει ολοένα και πιο ασφαλείς μεθόδους. Η εργασία [22] περιγράφει ένα ενισχυμένο σύστημα κρυπτογράφησης.

2.2.6 Ζώνες Συχνοτήτων LoRa και Κανονισμοί Ανά Περιοχή

Η τεχνολογία LoRa λειτουργεί σε μη αδειοδοτούμενες ζώνες συχνοτήτων (unlicensed bands), οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή και το εκάστοτε ρυθμιστικό πλαίσιο. Η επιλογή της κατάλληλης ζώνης συχνοτήτων είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επηρεάζει την εμβέλεια της επικοινωνίας, την κατανάλωση ενέργειας, καθώς και τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς εκπομπής.

Στην **Ευρώπη**, η τεχνολογία LoRa λειτουργεί κυρίως στη ζώνη των 868 MHz (EU868), η οποία ρυθμίζεται από το ευρωπαϊκό πρότυπο ETSI. Η συγκεκριμένη ζώνη επιτρέπει χαμηλή ισχύ εκπομπής και επιβάλλει περιορισμούς στο duty cycle, συνήθως έως 1 αποφεύγεται η συμφόρηση του φάσματος. Η EU868 αποτελεί την πιο διαδεδομένη επιλογή για εφαρμογές LoRaWAN στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Στη **Βόρεια Αμερική**, χρησιμοποιείται η ζώνη των 915 MHz (US915), η οποία ρυθμίζεται από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC). Σε σύγκριση με την ευρωπαϊκή ζώνη, η US915 επιτρέπει μεγαλύτερη ισχύ εκπομπής και δεν επιβάλλει αυστηρούς περιορισμούς στο duty cycle, γεγονός που προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στη μετάδοση δεδομένων.

Στην **Ασία**, οι χρησιμοποιούμενες ζώνες συχνοτήτων διαφέρουν ανά χώρα. Για παράδειγμα, στην Κίνα χρησιμοποιείται κυρίως η ζώνη CN470, ενώ στην Ινδία και σε άλλες χώρες της Νοτιοανατολικής Ασίας συναντώνται οι ζώνες AS923. Οι κανονισμοί σε αυτές τις περιοχές καθορίζουν τόσο το εύρος ζώνης όσο και τα όρια ισχύος, με στόχο τη συνύπαρξη πολλών ασύρματων συστημάτων στο ίδιο φάσμα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, παρότι η βασική τεχνολογία LoRa παραμένει κοινή, οι διαφοροποιήσεις στις ζώνες συχνοτήτων καθιστούν απαραίτητη τη σωστή ρύθμιση του εξοπλισμού ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης. Η χρήση λανθασμένης ζώνης συχνοτήτων μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη απόδοση του συστήματος ή ακόμη και σε παραβίαση κανονισμών.

Στο πλαίσιο των δικτύων LoRaWAN, οι περιφερειακές αυτές παράμετροι είναι τυποποιημένες μέσω των λεγόμενων Regional Parameters, οι οποίοι καθορίζουν τις επιτρεπόμενες συχνότητες, τα κανάλια και τις ρυθμίσεις μετάδοσης για κάθε περιοχή. Η συμμόρφωση με τους συγκεκριμένους κανόνες αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αξιόπιστη και νόμιμη λειτουργία ενός LoRaWAN συστήματος.

Πίνακας 1. Ζώνες συχνότητων LoRaWAN ανά γεωγραφική περιοχή

Γεωγραφική Περιοχή	Συχνότητες (MHz)	Ονομασία Ζώνης	Ρυθμιστικός Φορέας	Παρατηρήσεις
Ευρώπη	863-870	EU868	ETSI	Duty Cycle έως 1%
Βόρεια Αμερική	902-928	US915	FCC	Υψηλότερη ισχύς εκπομπής
Κίνα	470-510	CN470	ΜΠΤ	Ειδικές ρυθμίσεις καναλιών
Ασία (γενικά)	915-928	AS923	Τοπικοί φορείς	Διαφέρει ανά χώρα
Αυστραλία	915-928	AU915	ACMA	Παρόμοιο με US915
Νότια Αμερική	915-928	LA915	Τοπικοί φορείς	Παρόμοιο με US915

3. Αρχιτεκτονική και Σχεδίαση Συστήματος

3.1 Μικροελεγκτές

Οι μικροελεγκτές είναι μικρές λειτουργικές υπολογιστικές μονάδες, με ένα ενσωματωμένο επεξεργαστή, μνήμη και εισόδους/εξόδους για αναλογικά και ψηφιακά σήματα. Οι μικροελεγκτές είναι κατά κύριο λόγο δομημένες σε έναν ημιαγωγό και κατασκευάζονται με την μέθοδο της φωτολιθογραφίας επάνω σε δίσκους πυριτίου σε χιλιάδες ή εκατοντάδες χιλιάδες κομμάτια. Στην συνέχεια ξεχωρίζονται από τους δίσκους και εγκιβωτίζονται σε συνθετικό περίβλημα με μεταλλικούς ακροδέκτες pins ή pads, ώστε να πάρουν την μορφή γνωστή στους ευρύτερους χρήστες.

Ανάλογα με την υπολογιστική τους ισχύ μπορούν να εκτελέσουν εκατοντάδες μέχρι χιλιάδες γραμμές οδηγιών ανά δευτερόλεπτο, ώστε να χειριστούν ψηφιακή λογική, να εκτελέσουν μαθηματικές πράξεις, να διαβάσουν αναλογικά σήματα και να τα μετατρέψουν σε ψηφιακά, να χειριστούν αναλογικές ή ψηφιακές εξόδους [23].

Πίνακας 2. Τυπικοί μικροελεγκτές με 8-bit επεξεργαστή

Οικογένεια	Επεξεργαστής	Ρολόι	RAM/Flash	Τυπική Χρήση
AVR (Atmel/Microchip)	8-bit RISC	8–20 MHz	2KB / 32KB	Education, hobbyist, simple appliance control
PIC (Microchip)	8-bit	up to ~64 MHz	varies	Automotive, white goods, industrial control
8051 derivatives	8-bit CISC	varies	small	Legacy industrial, USB controllers, cheap peripherals

Ο πίνακας 2 συνοψίζει την ιστορική γενιά των μικροελεγκτών με 8-bit επεξεργαστή, όπως οι οικογένειες AVR και PIC που αντιπροσωπεύουν την απλούστερη μορφή ενσωματωμένης υπολογιστικής δύναμης. Με μόνο λίγα kilobyte μνήμης RAM, περιορισμένο αριθμό μητρώων και κανένα λειτουργικό σύστημα, η αξία τους σήμερα βασίζεται στην απλότητα και το ιδιαίτερα χαμηλό κόστος τους.

Αποτελούν εξαιρετικό σημείο εκκίνησης για τη διδασκαλία πριν οι μαθητές προχωρήσουν σε πιο εξελιγμένους επεξεργαστές ARM Cortex-M. Επίσης τυγχάνουν ευρείας εφαρμογής στη βιομηχανία σε περιπτώσεις που το κόστος αναβάθμισης σε 32-bit επεξεργαστή δεν δικαιολογείται.

Πίνακας 3. Κύριοι μικροελεγκτές βασισμένοι σε ARM Cortex-M

Οικογένεια	Επεξεργαστής	Ρολόι	RAM/Flash	Τυπική Χρήση
STM32 (ST Microelectronics)	Cortex-M0 to M7	up to ~480MHz (H7)	~4KB/16KB (M0 entry parts) up to ~1MB/2MB (H7)	Enormous range (M0 cheap/simple → M7 high-performance), excellent tooling (STM32CubeIDE), huge industry adoption
RP2040 / RP2350 (Raspberry Pi)	Dual Cortex-M0+/M33 (RP2350 also offers RISC-V cores)	133–150MHz	264KB/520KB SRAM, external QSPI flash (typically 2–16MB on boards)	PIO — programmable I/O state machines for bit-banging custom protocols in hardware; excellent low-cost teaching platform
SAMD (Microchip, powers Arduino Zero/MKR)	Cortex-M0+	48MHz	~32KB/256KB	Arduino's step up from AVR
TI MSP430	16-bit (not ARM)	a few MHz	~2–16KB/32–256KB	Ultra-low-power niche, worth mentioning as the "different architecture" outlier

Στον πίνακα 3 παρατίθενται οι κύριοι επεξεργαστές βασισμένοι στην ARM Cortex-M αρχιτεκτονική, με εξαίρεση τον TI SP430. Σε αυτό το σημείο οι μικροελεγκτές σταματούν να είναι παιχνίδια και γίνονται η ραχοκοκαλιά του σοβαρού σχεδιασμού προϊόντων με ενσωματωμένη υπολογιστική δύναμη. Με πραγματική διαχείριση μνήμης, ελεγκτές DMA και αρκετή μνήμη RAM και flash για την εκτέλεση ενός λειτουργικού συστήματος RTOS (real time operation system) με πολλαπλές παράλληλες εργασίες, επιτρέπουν στους μηχανικούς να κατασκευάσουν πραγματικά πολύπλοκα συστήματα με πολλαπλούς αισθητήρες, βρόγχους ελέγχου, συνδυασμό USB και Ethernet, κρυπτογραφημένες επικοινωνίες, έλεγχο κινητήρων

Η πραγματική τους αξία, ωστόσο, είναι η τυποποίηση: επειδή η ARM αδειοδοτεί την κεντρική αρχιτεκτονική αντί κάθε προμηθευτής να κατασκευάζει μια ιδιόκτητη αλυσίδα εργαλείων, το ίδιο σύνολο εντολών και η προσέγγιση εντοπισμού σφαλμάτων μεταφέρονται απευθείας στους προμηθευτές ημιαγωγών. Αυτό σημαίνει μεταφορά ιδιοτήτων απευθείας μεταξύ τσιπ, ακόμη και μεταξύ εταιρειών. Για να γίνει αυτό δυνατό απαιτείται εκ των προτέρων περισσότερη κατανόηση αυτών των περίπλοκων συστημάτων. Ωστόσο αυτή η πολυπλοκότητα είναι επίσης αυτό που τα καθιστά ικανά να εκτελούν

ταχύτερα πολλαπλές γραμμές κώδικα σε ελάχιστο ή «πραγματικό» χρόνο και να χειρίζονται πολλαπλούς αισθητήρες και περιφερειακά συστήματα που πραγματικά χρειάζονται τα περισσότερα καθημερινά προϊόντα.

Πίνακας 4. Κύριοι μικροελεγκτές με ενσωματωμένη ασύρματη επικοινωνία

Οικογένεια	Επεξεργαστής	RAM/Flash	Wireless	Τυπική Χρήση
ESP32	Dual Xtensa LX6 @240MHz	~520KB SRAM / up to 16MB external flash	WiFi + BT/BLE	Cheap, mature, huge ecosystem
ESP32-S3	Dual Xtensa LX7 @240MHz	~512KB SRAM / up to 32MB external flash	WiFi + BLE5	AI/vector instructions, USB OTG, camera interface — strong general-purpose pick
ESP32-C3/C6	RISC-V (single/dual) @160MHz	~400KB SRAM / external flash	C3: WiFi+BLE; C6 adds 802.15.4 (Zigbee/Thread)	Standard RISC-V toolchain, C6 relevant for Matter/Thread
nRF52/53 (Nordic)	Cortex-M4/M33 @100-200MHz	~256KB/1MB typical	BLE, Thread, Matter	Best-in-class for battery-powered BLE products; architecturally Cortex-M, but wireless is the whole point of the part

Στον πίνακα 4 παρατίθενται οι κύριοι μικροελεγκτές με ενσωματωμένη ασύρματη επικοινωνία, όπως η οικογένεια ESP32 της Espressif Systems και το nRF52/53 της Nordic. Ουσιαστικά αντιπροσωπεύουν το σημείο όπου ο μικροελεγκτής σταματάει πλέον να χρειάζεται ξεχωριστή μονάδα ασύρματης επικοινωνίας. Αντί να συνδυάζεται ένας μικροελεγκτής γενικής χρήσης με ένα ξεχωριστό μόντεμ WiFi ή Bluetooth μέσω μιας επικοινωνίας SPI ή UART, ο επεξεργαστής ραδιοκυμάτων RF frontend με τα απαραίτητα πρωτόκολλα βρίσκονται ενσωματωμένα στον ίδιο ημιαγωγό. Αυτό το γεγονός έχει σαν συνέπεια την εκθετική εξοικονόμηση χώρου επάνω στην πλακέτα, την απλοποίηση της πιστοποίησης του ημιαγωγού-προϊόντος και την αποφυγή μιας ολόκληρης κατηγορίας σφαλμάτων επικοινωνίας μεταξύ το μικροελεγκτή και του μόντεμ.

Αυτό που κάνει τις συγκεκριμένες οικογένειες μικροελεγκτών να ξεχωρίζουν είναι ότι κάθε μία έχει επιλέξει να επικεντρώσει τους υπολογιστικούς πόρους και να βελτιστοποιήσει συγκεκριμένες ιδιότητες που τις καθιστούν ιδανικές για συγκεκριμένες εφαρμογές. Για παράδειγμα το ESP32 κλίνει προς την

υπολογιστική γενικής χρήσης με ταχύτατους διπλούς πυρήνες για τον χειρισμό πολλαπλών εξαρτημάτων και δυνατότητες Wi-Fi και Bluetooth. Αντιθέτως τα nRF52/53 της Nordic κλίνουν προς πρωτόκολλα BLE (Bluetooth Low Energy) εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης για συσκευές που τροφοδοτούνται με μπαταρία και πρέπει να λειτουργούν για χρόνια, όχι για μέρες. Αυτό τα καθιστά ιδανικά για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων σε συχνότητες 2.4 GHz.

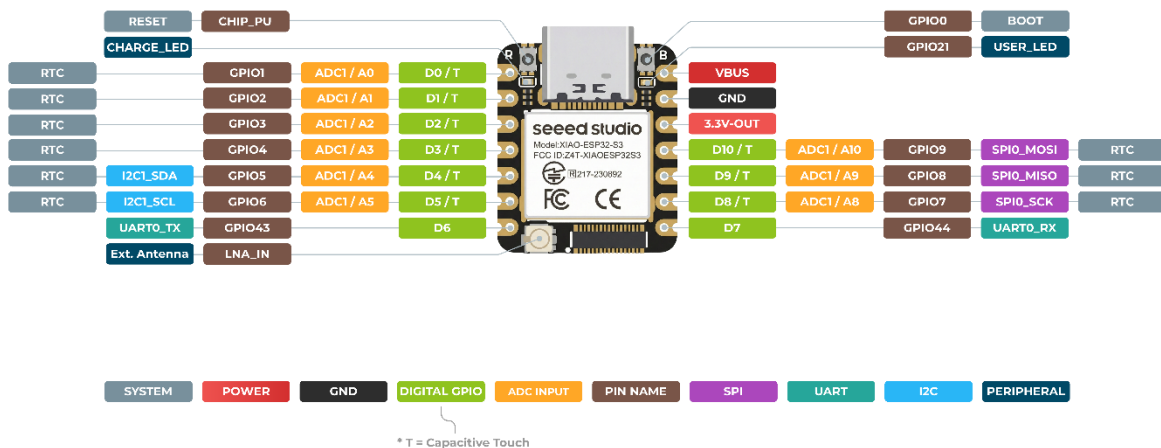
3.1.1 Επιλογή Μικροελεγκτή

Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω ανάλυση, στα πλαίσια της παρούσα διπλωματικής εργασίας συνιστάται η επιλογή ενός μικροελεγκτή με σημαντική υπολογιστική δυνατότητα για την διαχείριση πολλαπλών περιφερειακών συστημάτων και επομένως αποκλείονται οι μικροελεγκτές του πίνακα 2. Οι μικροελεγκτές του πίνακα 3 και 4 θα αποτελέσουν υποψήφια εξαρτήματα για το εν λόγω σύστημα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ενσωματωμένη ασύρματη επικοινωνία που παρέχουν οι μικροελεγκτές του πίνακα 4 δεν είναι απαραίτητη, εφόσον η επικοινωνία μεταξύ κόμβου και πύλης/τερματικού θα γίνεται μέσω τεχνολογίας LoRa και μέχρι την στιγμή της συγγραφής αυτής της εργασίας δεν υπάρχει αντίστοιχος ημιαγωγός με ενσωματωμένη δυνατότητα και καλή τεχνική υποστήριξη.

Παρ' όλα αυτά, η πύλη/τερματικό θα πρέπει να παρέχει τα περιβαλλοντικά δεδομένα που έχει καταγράψει ο κόμβος και μεταδώσει μέσω LoRa, στην κεντρική υπολογιστική μονάδα (server) με κάποιον τρόπο. Αρχικά αυτή η επικοινωνία θα είναι ενσύρματη, αλλά μελλοντικά θα μπορούσε να γίνει και με ασύρματο τρόπο, με την βοήθεια Wi-Fi ή Bluetooth. Οπότε συνιστάται η επιλογή μικροελεγκτή από τον πίνακα 4. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι οικογένεια nRF52/53 της Nordic είναι ιδανική για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χαμηλής κατανάλωσης, στα οποία όμως η επικοινωνία επιτυγχάνεται μέσω BLE (Bluetooth Low Energy).

Επομένως θα προτιμηθεί μικροελεγκτής της Espressif, η οποία παρέχει το δικό της πλαίσιο εξέλιξης λογισμικού ESP-IDF, με εκατομμύρια ενεργούς χρήστες στο οικοσύστημα και ευρεία τεχνική υποστήριξη, με έτοιμες βιβλιοθήκες και πρωτότυπες πλακέτες για απλές και εξειδικευμένες εφαρμογές.

Συγκεκριμένα η εταιρία Seeed Studio παρέχει την πρωτότυπη πλακέτα Xiao ESP32-S3 με τον αντίστοιχο μικροελεγκτή, διπλού πυρήνα στα 240MHz με 512KB SRAM και 8MB εξωτερική flash. Η επιλογή αυτή έρχεται σε συνδυασμό με την επιλογή μόντεμ LoRa που θα παρουσιαστεί στο επόμενο υπό-κεφάλαιο, ώστε να είναι βέλτιστος ο συνδυασμός τόσο σε φυσικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο επικοινωνίας.



Εικόνα 1. Πλακέτα Xiao ESP32-S3 με επεξήγηση ακροδεκτών

Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται η επιλεγμένη πλακέτα μικροελεγκτή ESP32-S3 με την αναγνώριση και επεξήγηση των επιμέρους εκτεθειμένων ακροδεκτών. Η διαστάσεις της πλακέτα είναι 21 x 17.8 x 1mm, και περιλαμβάνει τα παρακάτω κυρίως εξαρτήματα.

- Μικροελεγκτής ESP32-S3
- Μνήμη flash 8MB GD25Q64ENIGR
- Κοννέκτορας USB-C - UBF31-0171
- Κοννέκτορας επέκτασης DF40C-30DP-0.4V
- Ρυθμιστή τάσης SGM6029CYG/TR
- Φορτιστής μπαταρίας SGM40567
- Φωτοдиодος LED ένδειξης φόρτισης
- Φωτοдиодος LED για λειτουργία χρήστη
- Εκτεθειμένους 10 ακροδέκτες γενικής χρήσης

Ο μικροελεγκτής που θα εκτελέσει τις βασικές λειτουργίες του κόμβου και της πύλης, θα πρέπει να χειρίζεται την επικοινωνία με το μόντεμ LoRa, ενώ ταυτόχρονα για την περίπτωση του κόμβου και την επικοινωνία με τον/τους περιβαλλοντικούς αισθητήρες. Ο προγραμματισμός του κόμβου και της πύλης θα επιτευχθεί στο πλαίσιο εξέλιξης λογισμικού ESP-IDF και θα εγγραφεί απευθείας στην πλακέτα μέσω της θύρας USB με επικοινωνία UART καθώς υποστηρίζεται. Στην περίπτωση της πύλης η θύρα USB θα χρησιμοποιηθεί και για την επικοινωνία με την κεντρική μονάδα αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων.

Στην περίπτωση του κόμβου, θα επιλεγούν οι αναγκαίοι ακροδέκτες για την καταγραφή των αναλογικών σημάτων ή όπως θα εξηγηθεί παρακάτω για την ψηφιακή επικοινωνία με τους επιλεγμένους αισθητήρες. Καθώς ο κόμβος θα τροφοδοτείται από μπαταρία, ο ενσωματωμένος ημιαγωγός SGM40567 μας επιτρέπει

με εύκολο τρόπο την επίτευξη φόρτισης της μπαταρίας, ενώ το LED μας παρέχει και οπτική αναγνώριση ότι η μπαταρία είναι σε κατάσταση φόρτισης ή πλήρης. Στην από κάτω πλευρά της πλακέτας βρίσκονται δύο εκτεθειμένες περιοχές + και – για την συγκόλληση των ακροδεκτών της μπαταρίας.

3.2 Ασύρματα μόντεμ LoRa

Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.2 η τεχνολογία LoRaWan ορίζει ουσιαστικά το πρωτόκολλο επικοινωνίας που πρέπει να εφαρμόσει ένας πομποδέκτης LoRa. Στην πράξη όλοι οι υπάρχοντες ημιαγωγοί πρέπει να έχουν την άδεια αρχιτεκτονικής από την Semtech, για αυτό και στο εμπόριο υπάρχουν αποκλειστικά πλακέτες με ημιαγωγούς της Semtech ή κάποια αδειοδοτημένη παραλλαγή. Επομένως οι επιλογές για μόντεμ LoRa σύμφωνα με τη Semtech παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5. Κύρια μόντεμ LoRa από την Semtech

Parameter	SX1276	SX1262	LR2021 LoRa Plus
Generation / Release	Gen 1 / 2013	Gen 2 / 2019	Gen 4 / 2025
Frequency	137-1020 MHz	150-960 MHz	Sub-GHz +2.4GHz ISM + licensed S-band
TX Power	+20 dBm	+22 dBm	+22dBm
RX Sensitivity	-148 dBm	-148dBm	-141.5 dBm
RX Current	10 mA	4.6 mA	5.5 mA
Spreading Factor	SF6-12	SF5-12	SF5-12
Max LoRa Air Rate	37.5 kbps	62.5 kbps	125 kbps
Package	6x6 mm QFN-28	284x4 mm QFN-24	Not available

Από τον πίνακα 5 μπορούμε να συμπεράνουμε την εξελικτική πορεία των μόντεμ της Semtech με ξεκάθαρη τάση για βελτιστοποίηση της εμβέλειας από την πρώτη στην δεύτερη γενεά, ενώ από την δεύτερη στην τρίτη διακρίνεται η τάση για ευελιξία και προσθήκη νέων χαρακτηριστικών.

Οι δύο πρώτες γενιές επικεντρώθηκαν στο πως θα φτάσει το σήμα όσο το δυνατόν πιο μακριά με όσο το δυνατόν λιγότερη ισχύ, που είναι και τα κύρια χαρακτηριστικά της τεχνολογίας LoRa. Η μετάβαση από το SX1276 στο SX1262 προδίδει ουσιαστικά αυτή την βελτιστοποίηση, με χαμηλότερο ρεύμα λήψης, περισσότερη ισχύς εκπομπής, μικρότερες διαστάσεις. Το βασικό κατώτατο όριο ευαισθησίας λήψης δεν μετακινήθηκε, με τα δύο μόντεμ να φτάνουν τα -148 dBm, γεγονός που υποδηλώνει ότι από την πρώτη γενεά είχε ήδη βρεθεί το φυσικό κατώτατο όριο για αυτήν την αρχιτεκτονική.

Το LR2021 αντιπροσωπεύει μια σκόπιμη αλλαγή. Η Semtech αποδέχτηκε να θυσιάσει το κατώτατο όριο ευαισθησίας κατά 6,5 dB για να αποκτήσει λειτουργία πολλαπλών ζωνών, δορυφορική συνδεσιμότητα και υποστήριξη πολλαπλών πρωτοκόλλων σε μία μόνο παραλλαγή του προϊόντος. Αυτό δεν είναι μια σταδιακή βελτίωση, αλλά μια αλλαγή στη φιλοσοφία του προϊόντος. Από την μικροκομματική θεωρία γνωρίζουμε ότι μία μείωση της ισχύος ενός RF σήματος κατά 3 dB σημαίνει ότι η αποδιδόμενη ισχύς μειώνεται κατά

50% [24], και ως εκ τούτου μια μείωση κατά 6,5 dB ισοδυναμεί με περίπου 80%. Αυτό το γεγονός περιορίζει σημαντικά την αποδιδόμενη εμβέλεια.

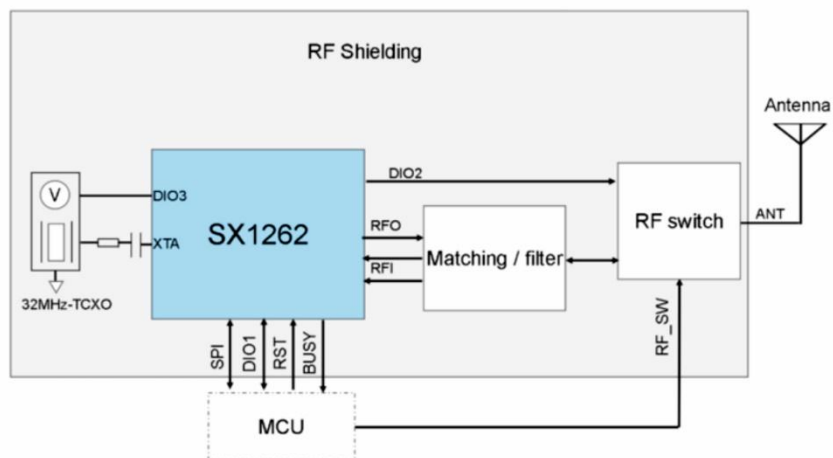
Μπορούμε λοιπόν να συμπεράνουμε ότι όσο η αγορά ωριμάζει, απαιτεί περισσότερες επιλογές επικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας. Αρχικά το SX1276 απέδειξε την λειτουργικότητα της τεχνολογίας (proof of concept). Στην συνέχεια το SX1262 επέτρεψε την μαζική δημιουργία δικτύων LoRaWAN με χαμηλό κόστος, βελτιωμένη εμβέλεια και μακρά διάρκεια ζωής της μπαταρίας για κόμβους.

Πλέον ο καινούργιος ημιαγωγός LR2021 προσπαθεί να καλύψει κενά σε εφαρμογές με την υποστήριξη πολλαπλών πρωτοκόλλων, όπως διαφαίνεται από την στρατηγική προσθήκη δορυφορικού σήματος S-band. Η επίγεια κάλυψη LoRaWAN είναι ώριμη στην Ευρώπη και αναπτύσσεται και αλλού, αλλά υπάρχουν προφανή κενά όπως οι ωκεανοί, οι έρημοι και οι πολικές περιοχές. Η δυνατότητα απευθείας σύνδεσης με δορυφόρο μέσω Long Range-Frequency Hopping Spread Spectrum (LR-FHSS) δείχνει ότι η Semtech προωθεί το LoRa ως υποδομή για παγκόσμια κάλυψη IoT, όχι μόνο αστικές και προαστιακές εφαρμογές. Εταιρείες όπως η Lacuna Space [25] και η Kinéis [26] κατασκευάζουν ήδη δορυφορικά δίκτυα χαμηλής τροχιάς γύρω από την γη (LEO) ειδικά για ανοδικές ζεύξεις (uplink) LoRa.

3.2.1 Επιλογή Μόντεμ LoRa

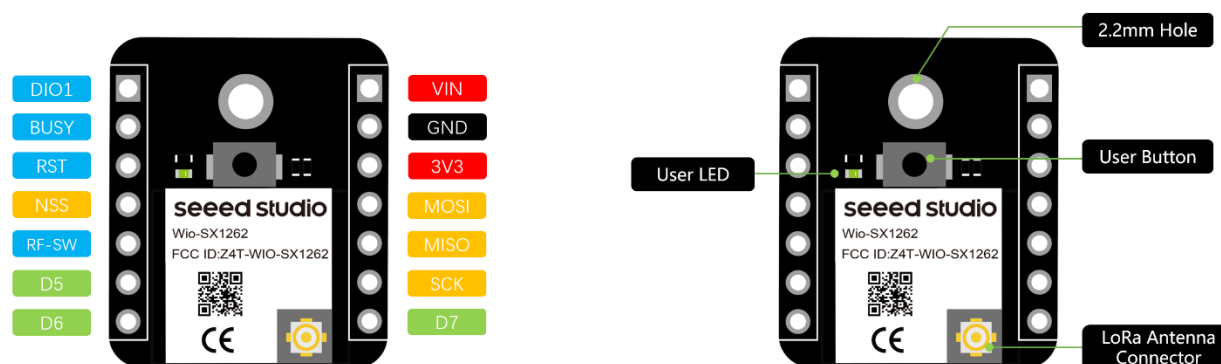
Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, το SX1262 είναι η βέλτιστη επιλογή μόντεμ LoRa, καθώς βρίσκεται στην κορυφή της ωριμότητάς του, είναι καλά υποστηριζόμενο, φθινό, καλά κατανοητό και περιλαμβάνεται σε έτοιμες βιβλιοθήκες firmware όπως το RadioLib ή το Meshtastic. Επίσης παρέχεται από αρκετούς διαφορετικούς προμηθευτές στο λιανικό εμπόριο.

Συγκεκριμένα η εταιρία Seeed Studio παρέχει την πρωτότυπη πλακέτα Wio-SX1262 με ευρωπαϊκή και αμερικανική πιστοποίηση FCC.



Εικόνα 2. Πλακέτα Wio-SX1262

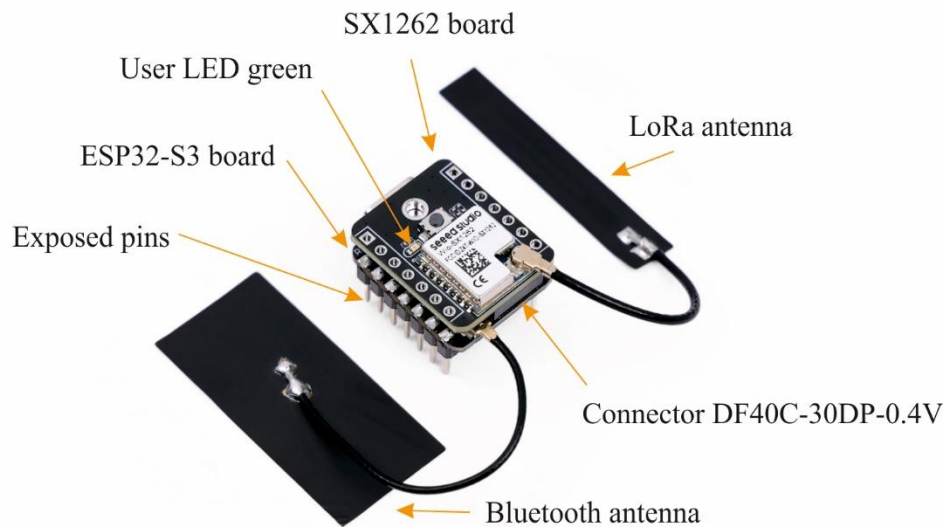
Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται το ενσωματωμένο μόντεμ SX1262 επάνω στην πρωτότυπη πλακέτα Wio-SX1262 μαζί με το λειτουργικό διάγραμμα του κυκλώματος. Απαραίτητο εξάρτημα για την λειτουργία όπως διαφαίνεται στο διάγραμμά είναι ένας ταλαντωτής κρυστάλλου με αντιστάθμιση θερμοκρασίας (TCXO – Temperature Compensated Crystal Oscillator) που βοηθάει στην δημιουργία του βασικού σήματος σε σταθερή συχνότητα. Περαιτέρω αναγκαίο είναι ένα φίλτρο ραδιοκυμάτων το οποίο έχει μελετηθεί και εξελιχθεί ακριβώς για την εν λόγω πλακέτα και αποτελεί κύριο κομμάτι για την απόκτηση πιστοποίησης. Τέλος ο διακόπτης ραδιοκυμάτων (RF switch) που χειρίζεται απευθείας από τον μικροελεγκτή, ορίζει αν το μόντεμ είναι σε κατάσταση λήψης ή αποστολής.



Εικόνα 3. Πλακέτα Wio-SX1262 με επεξήγηση ακροδεκτών

Το συγκεκριμένο μόντεμ παρέχεται σε μία έκδοση με εύκολη πρόσβαση στους ακροδέκτες όπως διαφαίνεται στην εικόνα 3. Ο χρήστης έχει περεταίρω ελεύθερα προς ενσωμάτωση στον προγραμματισμό ένα κουμπί και μία πράσινη φωτοδιόδο.

Από την πίσω μεριά η πλακέτα διαθέτει το συμπληρωματικό εξάρτημα του κοννέκτορα από την πλακέτα του μικροελεγκτή που επιλέχθηκε προηγουμένως τύπου DF40C-30DP-0.4V, έτσι ώστε να συνδυάζεται και να προγραμματίζεται με ευκολία όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.



Εικόνα 4. Συνδυασμένες πλακέτες μικροελεγκτή με μόντεμ LoRa

Σύμφωνα και με τα δεδομένα που παρέχει ο κατασκευαστής οι εκτεθειμένοι ακροδέκτες στην κάτω πλευρά της πλακέτας του μικροελεγκτή παραμένουν ελεύθερες για χρήση και έτσι επιτρέπεται να ενώσουμε στην συνέχεια τους περιβαλλοντικούς αισθητήρες για την λήψη δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε καταλήξει στην βασική αρχιτεκτονική του κόμβου και της πύλης.

3.3 Αισθητήρες Περιβαλλοντικών Μετρήσεων

Η παρακολούθηση και καταγραφή περιβαλλοντικών παραμέτρων αποτελεί βασικό πυλώνα για την κατανόηση και τη διαχείριση της ποιότητας ζωής, τόσο στον αστικό ιστό όσο και σε φυσικά οικοσυστήματα. Στο πλαίσιο αυτό, οι αισθητήρες περιβαλλοντικών μετρήσεων παίζουν καθοριστικό ρόλο, καθώς επιτρέπουν τη συνεχή και αξιόπιστη συλλογή δεδομένων από το φυσικό περιβάλλον. Μέσω της ενσωμάτωσής τους σε εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), οι αισθητήρες αυτοί συμβάλλουν στη δημιουργία έξυπνων λύσεων για την προστασία της υγείας, την ενεργειακή αποδοτικότητα και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστούν βασικοί τύποι τέτοιων αισθητήρων, με έμφαση στους αισθητήρες θερμοκρασίας και στους αισθητήρες που ανιχνεύουν και μετρούν συγκεντρώσεις μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα.

3.3.1 Αισθητήρες Θερμοκρασίας

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας αποτελούν τη βάση για την αξιόπιστη μέτρηση θερμοκρασιακών μεταβολών και εμφανίζονται σε διάφορες μορφές, ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής. Συχνά, η έννοια του

αισθητήρα θερμοκρασίας ταυτίζεται με τον όρο "θερμοζεύγος", έναν από τους πιο διαδεδομένους τύπους. Το θερμοζεύγος αποτελείται από δύο διαφορετικά μεταλλικά υλικά που ενώνονται στο ένα άκρο· όταν η ένωση αυτή εκτεθεί σε θερμότητα ή ψύξη, παράγεται μια ηλεκτρική τάση η οποία μπορεί να μεταφραστεί σε τιμή θερμοκρασίας. Τα θερμοζεύγη εκμεταλλεύονται ουσιαστικά το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή την παραγωγή τάσης όταν δύο διαφορετικά μέταλλα εκτίθενται σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας στηρίζονται σε φυσικές ιδιότητες που αλλάζουν με προβλέψιμο τρόπο καθώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία. Ένας από τους πιο συνηθισμένους μηχανισμούς είναι η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης, που συναντάται στους αισθητήρες τύπου RTD (Resistance Temperature Detector) και στους θερμίστορες. Οι RTD βασίζονται στην ιδιότητα ορισμένων μετάλλων να αυξάνουν την αντίστασή τους καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Η μεταβολή αυτή καταγράφεται και μετατρέπεται σε αντίστοιχη ένδειξη θερμοκρασίας. Τυπικά μέταλλα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή RTD είναι η πλατίνα, το νικέλιο και ο χαλκός.

Παρόμοια λειτουργία έχουν και τα θερμίστορ, αλλά χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ευαισθησία στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Κατασκευάζονται από πολυμερή ή κεραμικά υλικά και έχουν συνήθως μικρότερο εύρος θερμοκρασιών που μπορούν να ανιχνεύσουν σε σχέση με τα RTD. Ο χρόνος απόκρισης τους σε αλλαγές θερμοκρασίας είναι κατά κανόνα μικρότερος από τα RTD. Τα θερμίστορ κατηγοριοποιούνται σε αυτά που η αντίσταση τους ανεβαίνει με την άνοδο της θερμοκρασίας PTC (Positive Temperature Coefficient) και σε αυτά που η αντίσταση τους μειώνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας NTC (Negative Temperature Coefficient).

Πίνακας 6. Κύριες κατηγορίες αισθητήρων θερμοκρασίας

	RTD	Thermistor	Thermocouple
Αρχή λειτουργίας	Αλλαγή αντίστασης μετάλλου	Αλλαγή αντίστασης ημιαγωγού	Δημιουργία ηλεκτρικής τάσης στην ένωση διαφορετικών μετάλλων
Υλικά	Μέταλλα (Πλατίνα, Νικέλιο, Χαλκός)	Κεραμικά ή πολυμερή	Δύο διαφορετικά μέταλλα ή κράματα (π.χ. Chromel/Alumel)
Θερμοκρασιακό πεδίο	Ευρύ (-200°C to +850°C)	Στενό (-100°C to +150°C)	Εξαιρετικά ευρύ (-200°C to +1,700°C+)
Ακρίβεια	Υψηλή (υψηλή γραμμικότητα)	Μέτρια (μη γραμμικότητα)	Μέτρια

Ευαισθησία	Χαμηλή	Υψηλή	Χαμηλή
Απόκριση	Αργή	Γρήγορη	Ταχύτερη
Αντοχή	Εύθραυστο	Εύθραυστο	Ιδιαίτερα συμπαγές και ανθεκτικό
Κόστος	Ακριβό	Φθηνό	Οικονομικό

Από τον πίνακα 6 παρατηρούμε ότι ο αισθητήρας που θα επιλέξουμε για την παρούσα εργασία, θα είναι λογικά από την κατηγορία των θερμιστορ. Ο κύριος λόγος είναι το κόστος, καθώς ο κόμβος που εξελίσσουμε δυνητικά θα πρέπει να παραχθεί σε μεγάλες ποσότητες. Παρατηρούμε ότι το θερμοκρασιακό πεδίο που θέλουμε να μετρήσουμε είναι εντός των τυπικών ορίων ενός θερμιστορ, ενώ η απόκριση ενός τέτοιου αισθητήρα είναι ιδιαίτερα γρήγορη για να καλύψει τις ανάγκες των μετρήσεων.

Τέλος, υπάρχει και μια άλλη κατηγορία αισθητήρων, οι υπέρυθροι, που δεν απαιτούν φυσική επαφή με το αντικείμενο. Ανιχνεύουν τη θερμοκρασία μετρώντας την υπέρυθρη ακτινοβολία που αυτό εκπέμπει και μετατρέπουν την ενέργεια αυτή σε ηλεκτρικό σήμα, από το οποίο εξάγεται η θερμοκρασία του αντικειμένου. Σε αυτήν την κατηγορία εμπίπτουν και τα πυρόμετρα.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας, οι αισθητήρες θερμοκρασίας βελτιώνονται συνεχώς, τόσο σε μέγεθος όσο και σε απόδοση. Γίνονται ολοένα και μικρότεροι, πιο ακριβείς και ταχύτεροι στην απόκρισή τους, ενώ ταυτόχρονα αποκτούν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε δύσκολες συνθήκες. Η ενσωμάτωσή τους σε εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) τους καθιστά ακόμη πιο χρήσιμους, καθώς επιτρέπουν την παρακολούθηση της θερμοκρασίας από απόσταση και την ανάλυση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Αυτό διευκολύνει τη λήψη αποφάσεων, την έγκαιρη συντήρηση και την άμεση προσαρμογή των συστημάτων όταν χρειάζεται.

3.3.2 Αισθητήρες Υγρασίας

Υγρασία είναι η ποσότητα νερού στον περιβάλλοντα αέρα, η οποία εάν ξεπεράσει κάποια συγκεκριμένα όρια μπορεί να γίνει δυσάρεστη για τον άνθρωπο ή να επηρεάσει την λειτουργία μηχανημάτων και ηλεκτρικών συσκευών. Κατά την λειτουργία ηλεκτρονικών ή άλλου ευαίσθητου εξοπλισμού, η υγρασία πρέπει να ελέγχεται και να ρυθμίζεται αναλόγως για να διασφαλιστεί η αποφυγή βλαβών και βραχυκυκλωμάτων που θα μπορούσαν να προκαλέσουν μέχρι και φωτιά.

Το σημείο δρόσου είναι η θερμοκρασία στην οποία πρέπει να ψυχθεί ο αέρας ώστε να κορεστεί με υδρατμούς, υπό σταθερή πίεση και περιεκτικότητα υδρατμών. Περαιτέρω ψύξη του αέρα θα οδηγήσει σε συμπύκνωση των ατμοσφαιρικών υδρατμών προς σχηματισμό υγρού νερού (σταγόνες δρόσου). Στο σημείο δρόσου η σχετική υγρασία είναι 100%. Όταν ο αέρας ψύχεται έως το σημείο δρόσου μέσω επαφής με μια επιφάνεια που είναι πιο ψυχρή από αυτόν, νερό θα συμπυκνωθεί στην επιφάνεια [27].

Οι αισθητήρες υγρασίας μπορούν να μετράνε την απόλυτη υγρασία (absolute humidity AH) που είναι η αναλογία της μάζας των υδρατμών προς τον όγκο του αέρα, εκφρασμένη σε γραμμάρια ανά κυβικό μέτρο. Η απόλυτη υγρασία μπορεί να υπολογιστεί από τη σχετική υγρασία, τη θερμοκρασία του αέρα ή να μετρηθεί απευθείας. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν δύο θέρμιστρο σε διάταξη γέφυρας.

Εναλλακτικά οι αισθητήρες υγρασίας μπορούν να μετράνε την σχετική υγρασία (relative humidity RH) που είναι η ποσότητα υγρασίας στον αέρα σε σύγκριση με το επίπεδο υγρασίας στην ίδια θερμοκρασία και πίεση που απαιτείται για κορεσμό, εκφρασμένη ως ποσοστό. Οι περισσότεροι αισθητήρες υγρασίας λειτουργούν χρησιμοποιώντας την αρχή της RH λόγω της υψηλής ακρίβειας, της αξιοπιστίας και του χαμηλού κόστους.

3.3.3 Αισθητήρες Μονοξειδίου – Διοξειδίου του Άνθρακα

Οι αισθητήρες μονοξειδίου του άνθρακα αποτελούν βασικά μέσα προστασίας από ένα επικίνδυνο και αόρατο αέριο – το μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Το αέριο αυτό, το οποίο δεν έχει ούτε χρώμα ούτε οσμή, μπορεί να εκπέμπεται από οικιακές συσκευές που χρησιμοποιούν καύσιμα, όπως λέβητες, σόμπες ή τζάκια, και να προκαλέσει σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία ή ακόμη και θάνατο αν δεν ανιχνευτεί εγκαίρως.

Η λειτουργία των αισθητήρων βασίζεται στη μεταβολή των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων όταν έρθουν σε επαφή με CO. Όταν το επίπεδο του αερίου αυξηθεί στον αέρα, ο αισθητήρας αντιδρά παράγοντας ένα ηλεκτρικό σήμα, το οποίο ενεργοποιεί συναγερμό – ηχητικό, φωτεινό ή και τα δύο – ώστε να ειδοποιήσει τους παρευρισκόμενους για τον κίνδυνο.

Η σημασία αυτών των συσκευών είναι τεράστια, καθώς η έγκαιρη ανίχνευση του μονοξειδίου του άνθρακα επιτρέπει την απομάκρυνση από τον χώρο και την πρόληψη της δηλητηρίασης. Το συγκεκριμένο αέριο επηρεάζει τον οργανισμό συνδεδεμένο με την αιμοσφαιρίνη στο αίμα και εμποδίζοντας τη μεταφορά οξυγόνου, προκαλώντας υποξία.

Οι αισθητήρες εγκαθίστανται σε σημεία του σπιτιού όπου υπάρχουν εστίες καύσης – κοντά σε θερμαντικά σώματα, στην κουζίνα ή και στα υπνοδωμάτια για μεγαλύτερη ασφάλεια. Κυκλοφορούν σε διάφορους τύπους, με τους ηλεκτροχημικούς αισθητήρες να είναι από τους πιο αξιόπιστους, προσφέροντας ακρίβεια και μακροχρόνια λειτουργία. Σε κάθε περίπτωση, η παρουσία αυτών των αισθητήρων σε έναν χώρο είναι

καθοριστική για την προστασία της ανθρώπινης ζωής απέναντι σε έναν σιωπηλό αλλά εξαιρετικά επικίνδυνο εχθρό.

Οι αισθητήρες διοξειδίου του άνθρακα χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και μέτρηση των επιπέδων CO₂ στον αέρα, κάτι που είναι κρίσιμο για την αξιολόγηση της ποιότητας του περιβάλλοντος, τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους. Η παρουσία του CO₂ στον αέρα επηρεάζει άμεσα την ανθρώπινη ευεξία, τις γεωργικές αποδόσεις και διάφορες επιστημονικές και βιομηχανικές διεργασίες. Για παράδειγμα, σε κλειστά περιβάλλοντα, η αυξημένη συγκέντρωση CO₂ μπορεί να οδηγήσει σε πονοκεφάλους, κόπωση και μείωση της γνωστικής απόδοσης [28], ενώ στις καλλιέργειες μπορεί να επηρεάσει τη φωτοσύνθεση, ευνοώντας ή επιβαρύνοντας την ανάπτυξη των φυτών, ανάλογα με τα επίπεδα [29].

Σε εφαρμογές όπως τα συστήματα εξαερισμού, οι αισθητήρες αυτοί δίνουν σημαντική πληροφόρηση για το πότε χρειάζεται αερισμός, ιδιαίτερα σε χώρους με μεγάλη συγκέντρωση ατόμων. Επίσης, στη γεωργία, επιτρέπουν την ακριβή παρακολούθηση του περιβάλλοντος στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις, υποστηρίζοντας τον έλεγχο συνθηκών για βέλτιστη απόδοση. Εξίσου χρήσιμοι είναι οι αισθητήρες CO₂ και στον τομέα της έρευνας, όπου συμβάλλουν στη μελέτη βιολογικών διεργασιών όπως η αναπνοή και η φωτοσύνθεση.

Η μέτρηση του CO₂ είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς υπερβολικές ποσότητες του αερίου ενδέχεται να επηρεάσουν τόσο την υγεία όσο και τη λειτουργία οργανισμών και μηχανισμών. Στην ανθρώπινη υγεία, αυξημένα επίπεδα CO₂ σχετίζονται με δυσφορία και μειωμένη απόδοση, ενώ για τα φυτά, η υπερβολική συγκέντρωση μπορεί να διαταράξει την ισορροπία της φωτοσύνθεσης. Παράλληλα, η βιομηχανία στηρίζεται στη συνεχή παρακολούθηση του CO₂ για την ομαλή λειτουργία και τον έλεγχο ποιότητας πολλών διεργασιών.

Οι πιο συνηθισμένοι είναι οι αισθητήρες υπέρυθρων, Non-Dispersive Infrared (NDIR), οι οποίοι βασίζονται στην αρχή ότι το CO₂ απορροφά συγκεκριμένα μήκη κύματος υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται σε φασματογραφική απεικόνιση [30] και συνοψίζεται ως εξής:

- Μια λάμπα ή LED εκπέμπει υπέρυθρο φως μέσα από έναν οπτικό θάλαμο αερίων γεμάτο με ατμοσφαιρικό αέρα.
- Ένα οπτικό φίλτρο στο άκρο μπλοκάρει όλο το φως εκτός από το ακριβές μήκος κύματος που απορροφά το CO₂ (περίπου 4,26 μικρόμετρα).
- Ένας ανιχνευτής υπέρυθρων μετρά πόσο φως φτάνει με επιτυχία στην άλλη πλευρά.
- Περισσότερο CO₂ στον αέρα απορροφά περισσότερο από το υπέρυθρο φως. Μια χαμηλότερη ένδειξη φωτός στον ανιχνευτή σημαίνει υψηλότερη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα.

Μέσω αυτής της διεργασίας, οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να μετρούν με ακρίβεια τις συγκεντρώσεις του αερίου CO₂ στον αέρα. Στην εργασία [30] παρουσιάζεται περεταίρω η εφαρμογή αισθητήρων CO₂ NDIR για την καταγραφή περιβαλλοντικών συνθηκών σε εξωτερικούς χώρους και στάσεις μετρό.

Εναλλακτικά υπάρχουν αισθητήρες με διαφορετική αρχή λειτουργίας, ανάλογα με το μέγεθος, το κόστος, την ισχύ και την ακρίβεια της μέτρησης:

- Φωτοακουστικοί αισθητήρες: Στέλνουν συγκεκριμένη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια σε έναν θάλαμο δείγματος. Η απορροφούμενη ενέργεια παράγει μικροσκοπικά κύματα πίεσης (ήχου) μέσω του φωτοακουστικού φαινομένου, το οποίο μετρά ένας ακουστικός ανιχνευτής.
- Ηλεκτροχημικοί/Χημικοί Αισθητήρες: Το CO₂ αντιδρά με μια επιφάνεια πολυμερούς ή ηλεκτρολύτη, παράγοντας ένα μετρήσιμο ηλεκτρικό φορτίο ή ρεύμα ανάλογο με τη συγκέντρωση του αερίου.
- Αισθητήρες Ημιαγωγών Οξειδίου Μετάλλου: Ο αισθητήρας θερμαίνεται και όταν το CO₂ απορροφάται από την επιφάνεια οξειδίου μετάλλου, αλλάζει την ηλεκτρική αντίσταση του υλικού.

3.3.4 Επιλογή Αισθητήρα Καταγραφής Περιβαλλοντικών Συνθηκών

Κατόπιν της ανάλυσης των παραπάνω κεφαλαίων 3.3.1-3.3.3, και με μία σύντομη έρευνα στις μεγάλες ηλεκτρονικές σελίδες λιανικού εμπορίου ηλεκτρονικών εξαρτημάτων όπως:

- Mouser
- DigiKey
- Farnell

Παρατηρούμε ότι υπάρχει μία πληθώρα αισθητήρων που θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για την εξέλιξη του μετρητικού μας κόμβου.

Για λόγους απλοποίησης δεν θα λάβουμε υπόψιν αναλογικούς αισθητήρες. Θα ήταν παραδείγματος χάρη εύκολη η χρήση ενός αναλογικού θέρμιστορ για την μέτρηση θερμοκρασίας, καθώς ο μικροελεγκτής που επιλέξαμε μπορεί να καταγράψει αναλογικά σήματα και να τα μετατρέψει σε ψηφιακά στους ελευθέρους ακροδέκτες του, με την βοήθεια των ενσωματωμένων μετατροπέων αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (analog to digital converter).

Έχουμε μια λοιπόν μια ευρεία ποικιλία από «ψηφιακούς» αισθητήρες, που ουσιαστικά μετατρέπουν το αναλογικό του σήμα απευθείας σε ψηφιακό και κατόπιν το μεταδίδουν με κάποια εύχρηστη από μικροελεγκτές, μέθοδο επικοινωνίας όπως I²C, SPI, UART.

Συγκεκριμένα θα επικεντρωθούμε σε ψηφιακούς αισθητήρες για τις παρακάτω μετρήσεις:

- Θερμοκρασία
- Υγρασία
- Συγκέντρωση CO₂

Αξίζει να σημειωθεί ότι η πλειονότητα των αισθητήρων υγρασίας περιλαμβάνουν και αισθητήρα θερμοκρασίας. Στην προκειμένη περίπτωση, ευρεία εφαρμογή βρίσκει ο αισθητήρας DHT22 AM2302 που μετράει:

- σχετική υγρασία από 0 μέχρι 99% με ακρίβεια $\pm 2\%$ και ανάλυση $\pm 0.1\%$
- θερμοκρασία από -40 μέχρι $+80$ °C με ακρίβεια ± 0.5 °C και ανάλυση ± 0.1 °C

Οι συγκεκριμένες προδιαγραφές κρίνονται επαρκείς για την εφαρμογή στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Τα δεδομένα καταγράφονται κάθε 2 δευτερόλεπτα και μεταδίδονται ψηφιακά μέσω ενός από τους ακροδέκτες, χωρίς κάποιο συγκεκριμένο τυποποιημένο πρωτόκολλο, άλλα με συγκεκριμένες οδηγίες σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

Ουσιαστικά μας μένει να επιλέξουμε έναν αισθητήρα συγκέντρωσης CO₂. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αισθητήρας SNS MQ-135 που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία [14], δεν καταγράφει συγκεκριμένα την συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα, αλλά ένα μείγμα σωματιδίων χωρίς να μπορεί να ξεχωρίσει στην επιμέρους αναλογία. Επιπλέον θεωρείται πλέον αρκετά παρωχημένη τεχνολογία και επομένως δεν θα συμπεριληφθεί στους προτεινόμενους αισθητήρες.

Στον πίνακα 7 γίνεται μια ενδεικτική αντιπαράθεση μεταξύ 3 αισθητήρων, που είναι εύκολο να προμηθευτούν στο λιανικό εμπόριο και πληρούν τις προδιαγραφές για επαρκή μέτρηση συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα.

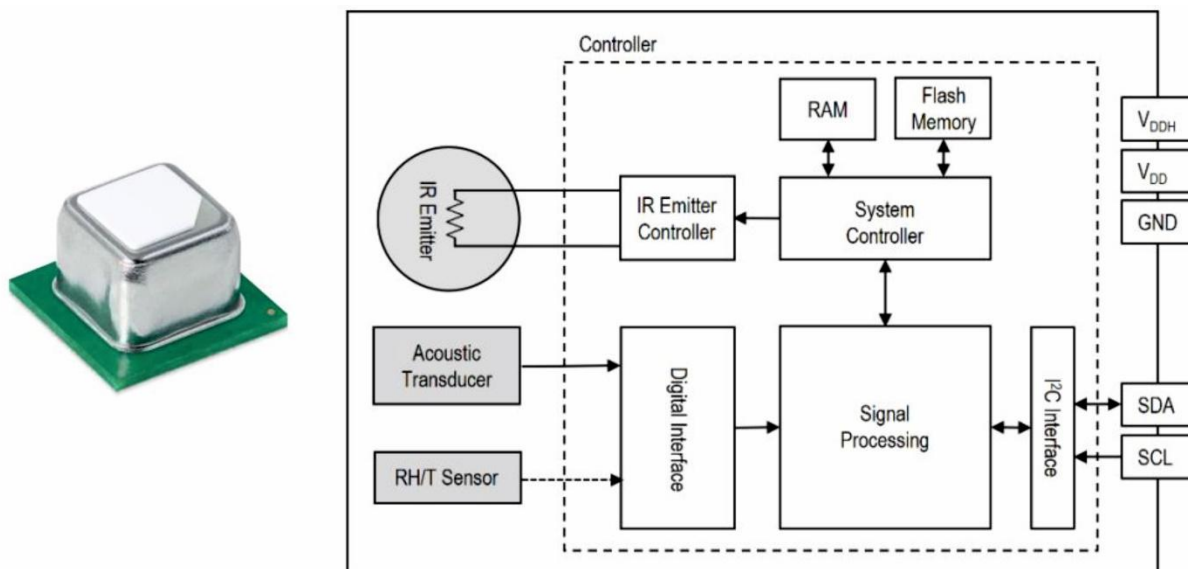
Πίνακας 7. Αισθητήρες μέτρησης συγκέντρωσης CO₂

	Sensirion SCD40	Winsen MH-Z19C	ScioSense ENS160
Τύπος μέτρησης	True CO₂ (Photoacoustic NDIR)	True CO₂ (Traditional NDIR)	eCO₂ (Estimated via VOCs)
Ακρίβεια	Υψηλή (±50 ppm + 5% of reading)	Υψηλή (±50 ppm + 5% of reading)	N/A (Algorithmic estimation)
Sensing Range	400 – 2,000 ppm	400 – 2,000 ppm	400 – 2,900 ppm (Equivalent)
Μεταφορά Δεδομένων	I ² C	UART / PWM / Analog	I ² C / SPI
Κατανάλωση Ενέργειας	Χαμηλή (~15–20mA peak, <0.4mA avg)	Υψηλή (~125mA peak during IR pulse)	Χαμηλή (~29mA peak during MOX heat)
Μέγεθος	Μικρό	Μεγάλο	Μικρότερο (surface mount)
Εξτρά	Ενσωματωμένος αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας	-	Πτητικές Οργανικές Ενώσεις & Δείκτης Ποιότητας Αέρα

Όπως παρατηρούμε από τον πίνακα 7, ο αισθητήρας ScioSense ENS160 μετράει έμμεσα την συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα, χωρίς όμως να μας περιορίζει το γεγονός αυτό για την παρούσα εργασία. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας έχει ιδιαίτερα χαμηλή κατανάλωση και μικρό μέγεθος μόλις 3 x 3 x 0.8mm. Τυγχάνει ευρείας εφαρμογής καθώς το κόστος του δεν ξεπερνάει τα 10 Ευρώ. Ο αισθητήρας Winsen MH-Z19C λειτουργεί με την κλασική μέθοδο υπέρυθρης φασματογραφίας που περιεγράφηκε στην ενότητα 3.3.3, έχει αρκετά καλή ακρίβεια και πολλαπλές μεθόδους για την μεταφορά των ψηφιακών δεδομένων. Τα κύρια μειονεκτήματα του είναι η υψηλή κατανάλωση ρεύματος κοντά στα 125mA, το μέγεθος του στα 32.9 x 19.7 x 8.6 mm και επιπλέον το κόστος του που ξεπερνάει τα 20 Ευρώ.

Η επιλογή για την παρούσα εργασία θα είναι ο αισθητήρας Sensirion SCD40 που λειτουργεί με την φωτοακουστική μέθοδο που περιεγράφηκε στην ενότητα 3.3.3, παρέχει καλή ακρίβεια και έχει μικρό μέγεθος 10.1 x 10.1 x 6.5 mm. Το κόστος του κυμαίνεται κοντά στα 10 ευρώ. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος αισθητήρας έχει και ενσωματωμένη μέτρηση θερμοκρασίας με εύρος μέτρησης από -10°C μέχρι 60°C, με ακρίβεια ±0.8°C και σχετικής υγρασίας με εύρος μέτρησης από 0 %RH μέχρι

100 %RH, με ακρίβεια ± 6 % RH. Με αυτόν τον τρόπο καταφέρνουμε με ένα εξάρτημα να πάρουμε και τις τρεις μετρήσεις που μας ενδιαφέρουν με την μορφή ψηφιακών δεδομένων μέσω πρωτοκόλλου I²C. Στην εικόνα 5 εμφανίζεται ο επιλεγμένος αισθητήρας Sensirion SCD40 για τον κόμβο.



Εικόνα 5. Επιλεγμένος αισθητήρας με το λειτουργικό του διάγραμμα

3.4 Μπαταρίες

Η αρχιτεκτονική του κόμβου απαιτεί τροφοδοσία με μπαταρία ώστε να είναι εύκολη η μετακίνηση του από μέρος σε μέρος για την καταγραφή δεδομένων σε διαφορετικές περιοχές όπου δεν υπάρχει απαραίτητα παροχή ρεύματος. Υπάρχουν μπαταρίες με διαφορετική χημική σύσταση που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την παρούσα εφαρμογή.

Καθαρά αναφορικά, θα μπορούσαμε πιθανώς να χρησιμοποιήσουμε 3 μπαταρίες AAA σε μια μπαταριοθήκη που θα συνδέεται στις ενδεδειγμένες περιοχές στο κάτω μέρος της πλακέτας του μικροελεγκτή για την συγκόλληση των ακροδεκτών μπαταρίας και που μπορεί να δεχτεί 3.3-5 volt. Τρεις αλκαλικές μπαταρίες στη σειρά θα αποδίδουν 3.6 με 4.5 volt με μέγιστο ρεύμα μικρότερο από 1 A. Τρεις Ni-MH μπαταρίες στην σειρά θα αποδίδουν 3.2 με 3.6 volt αλλά με υψηλότερο μέγιστο ρεύμα έως 2-3 A. Οι αλκαλικές μπαταρίες οριακά μπορεί να μην αποδίδουν αρκετό ρεύμα και δεν είναι επαναφορτιζόμενες. Οι Ni-MH βρίσκονται στο κάτω όριο της απαραίτητης τάσης τροφοδοσίας.

Η βέλτιστη επιλογή για ηλεκτρονικά είναι η χρήση επαναφορτιζόμενων μπαταριών λιθίου, οι οποίες προσφέρουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και χαμηλό βάρος, χαρακτηριστικά που τις καθιστούν ιδανικές για φορητές εφαρμογές. Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιείται μπαταρία τύπου LiPo (Lithium

Polymer), καθώς παρέχει σταθερή τάση λειτουργίας (ονομαστικά 3,7 V) και μπορεί να υποστηρίξει την κατανάλωση ρεύματος που απαιτείται από τον μικροελεγκτή και τα περιφερειακά του.

Οι Li-Po μπαταρίες αποτελούνται από στοιχεία λιθίου σε μορφή πολυμερούς γέλης, επιτρέποντας ευελιξία στο σχήμα και το μέγεθος. Έχουν μικρό ρυθμό αυτοεκφόρτισης, γεγονός που επιτρέπει στο σύστημα να παραμένει σε κατάσταση αναμονής για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς σημαντική απώλεια ενέργειας.

Για την ασφαλή λειτουργία, η πλακέτα του μικροελεγκτή περιλαμβάνει κύκλωμα προστασίας (Protection Circuit Module – PCM), το οποίο προλαμβάνει επικίνδυνες καταστάσεις, όπως υπερφόρτιση, υπερεκφόρτιση ή υπερένταση, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.1.1

3.4.1 Προϋπολογισμός ισχύος

Η επιλογή της χωρητικότητας της μπαταρίας εξαρτάται από τις απαιτήσεις αυτονομίας του συστήματος. Για παράδειγμα, μια μπαταρία 500–700 mAh μπορεί να προσφέρει αρκετές ώρες συνεχούς λειτουργίας ή ακόμη και ημέρες, εάν ο κόμβος λειτουργεί με βελτιστοποιημένη κατανάλωση (π.χ. χρήση deepsleep mode). Σε εφαρμογές μακράς διάρκειας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερες χωρητικότητες ή να συνδυαστούν με ηλιακά πάνελ για συνεχή φόρτιση.

Στην συνέχεια θα κάνουμε κάποιες απλές παραδοχές για λόγους απλοποίησης ώστε να έχουμε ένα αρχικό προϋπολογισμό της απαραίτητης ισχύος για ένα απλό και αποδεκτό σενάριο με απλουστευμένο λογισμικό. Ο αισθητήρας SCD40 παρέχει δύο ρυθμίσεις μετρήσεων, ανά 30 δευτερόλεπτα ή ανά 5 δευτερόλεπτα, ενώ παρέχει ταυτόχρονα δεδομένα και για τις τρεις περιβαλλοντικές μεταβλητές θερμοκρασία, υγρασία και συγκέντρωση CO₂.

Έστω ότι ο μικροελεγκτής ξυπνάει, δίνει ρεύμα και εκκινεί το μόντεμ LoRa και τον αισθητήρα για 25 δευτερόλεπτα, στην διάρκεια των οποίων ο αισθητήρας θα προλάβει να μας δώσει 4 μετρήσεις μετά την εκκίνηση του. Για λόγους απλοποίησης όλα τα περιφερειακά και ο μικροελεγκτής παραμένουν σε λειτουργία για αυτήν την διάρκεια. Οπότε μπορούμε να υπολογίσουμε την κατανάλωση ρεύματος με βάση τα χαρακτηριστικά των επιμέρους εξαρτημάτων.

Πίνακας 8. Αισθητήρες μέτρησης συγκέντρωσης CO₂

Εξάρτημα	Κατάσταση	Ρεύμα	Διάρκεια
ESP32-S3	Μόνιμα ενεργό (I ² C, SPI)	~35 mA	25 s
SCD40	Υψηλή απόδοση περιοδική	~15 mA	25 s
SX1262	Αναμονή (TCXO έτοιμος)	~2.35 mA	24.8 s
SX1262	Tx Ισχύς στα 14 dBm	~45 mA	4 × 46 ms ≈ 184 ms

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 8, το συνολικό ρεύμα για το παράθυρο των 25 δευτερολέπτων θα είναι:

- ESP32-S3: $35 \text{ mA} \times 25 \text{ s} = 875 \text{ mA}\cdot\text{s}$
- SCD40: $15 \text{ mA} \times 25 \text{ s} = 375 \text{ mA}\cdot\text{s}$
- SX1262 standby: $2.35 \text{ mA} \times 24.8 \text{ s} \approx 58.3 \text{ mA}\cdot\text{s}$
- SX1262 TX bursts: $45 \text{ mA} \times 0.184 \text{ s} \approx 8.3 \text{ mA}\cdot\text{s}$

Σύνολο ενέργειας $\approx 1,317 \text{ mA}\cdot\text{s} \approx 0.366 \text{ mAh}$ για κάθε κύκλο 25 s

Μέση κατανάλωση ρεύματος $\approx 52.7 \text{ mA}$ για κάθε κύκλο 25 s

Αν στην συνέχεια ορίσουμε ότι ο κόμβος μας θα μπαίνει σε κατάσταση deep sleep για μία ώρα και θα ξυπνάει για έναν κύκλο 25 δευτερολέπτων, η επιπλέον κατανάλωση που θα πρέπει να προστεθεί ισούται με $14 \mu\text{A}$ για το ESP32-S3 και άλλα $2.3 \mu\text{A}$ για το μόντεμ SX1262 ώστε να κρατήσει τις ρυθμίσεις του. Συνολικά αυτά τα $16.3 \mu\text{A}$ κατανάλωσης μπορεί να φαίνονται αμελητέα αλλά θα αποτελέσουν και την μεγαλύτερη διάρκεια κατανάλωσης του συστήματος για $3600 \cdot 25 = 3575$ δευτερόλεπτα. Οπότε η συνολική κατανάλωση κατά την διάρκεια του ύπνου του μικροελεγκτή θα είναι $0.0163 \text{ mA} \times 3575 \text{ s} \approx 58.3 \text{ mA}\cdot\text{s} \approx 0.0162 \text{ mAh}$. Κατ' επέκταση η συνολική κατανάλωση στη διάρκεια μίας ώρας για έναν κύκλο θα είναι, $0.0162 + 0.366 = 0.382 \text{ mAh}$

Μία μπαταρία LiPo χωρητικότητας 625 mAh θα μας αποδώσει $625/0.382 \approx 1636$ ώρες λειτουργίας. Ουσιαστικά υπολογίσαμε $1636/24 = 68$ μέρες ή περισσότερο από 2 μήνες συνεχόμενης λειτουργίας με μια μπαταρία αποδεκτής χωρητικότητας με τυπικό μέγεθος, που διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή, $40 \times 20 \times 8.5 \text{ mm}$ όπως φαίνεται στην εικόνα 6.



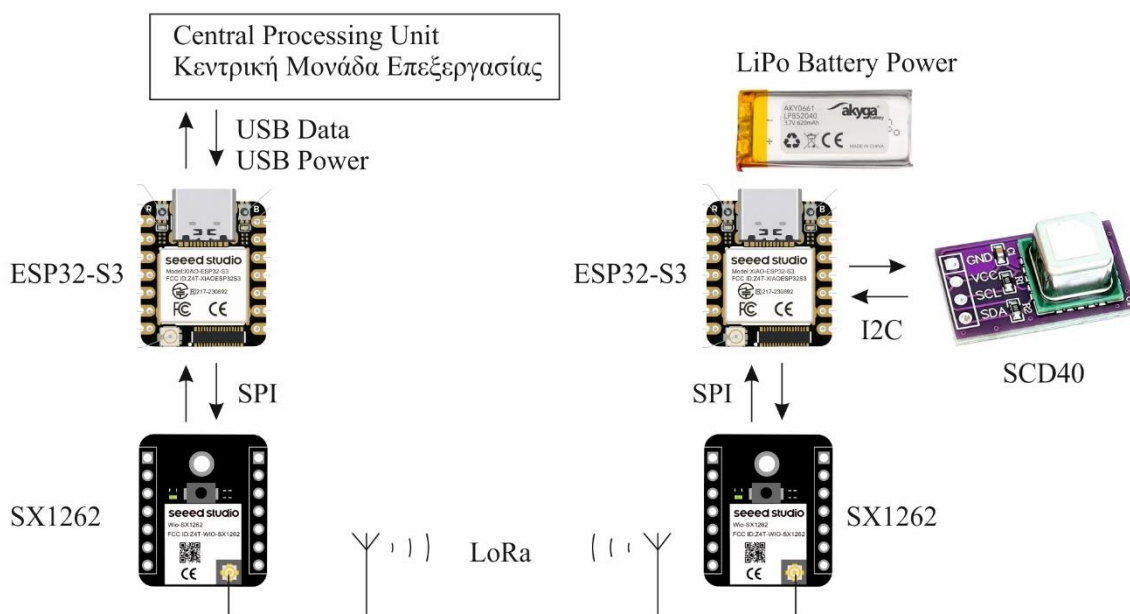
Εικόνα 6. Επιλεγμένη μπαταρία τύπου LiPo

3.5 Σύνοψη Αρχιτεκτονικής Συστήματος

Έχουμε πλέον καταλήξει στην συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος για την παρούσα εργασία. Το σύστημα μας θα περιλαμβάνει μία πύλη/τερματικό, η οποία θα τροφοδοτείται με ρεύμα και θα επικοινωνεί απευθείας με την κεντρική μονάδα επεξεργασίας για την συλλογή και αποθήκευση των δεδομένων μέσω του κοινέκτορα USB-C. Το μόντεμ LoRa της Semtech SX12616 συνδέεται απευθείας στην πλακέτα του

μικροελεγκτή μέσω του κοννέκτορα DF40C-30DP-0.4V. Η επικοινωνία με το ESP32-S3 επιτυγχάνεται μέσω πρωτοκόλλου SPI.

Ο κόμβος αποτελείται από την ίδια πλακέτες τόσο του μικροελεγκτή όσο και του μόντεμ LoRa, ώστε να απλουστεύεται στην συνέχεια ο προγραμματισμός τους. Ο αισθητήρας SCD40 που επιλέχθηκε μας παρέχει ταυτόχρονα μετρήσεις για τρεις περιβαλλοντικές μεταβλητές, θερμοκρασία, υγρασία και συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα. Επιλέχθηκε τόσο για το βελτιστοποιημένο κόστος του όσο και για την λειτουργικότητα του, ενώ η επικοινωνία για την μετάδοση δεδομένων από και προς τον μικροελεγκτή επιτυγχάνεται μέσω πρωτοκόλλου I²C. Η τροφοδοσία του κόμβου με ρεύμα επιτυγχάνεται με μία μπαταρία LiPo. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς της ενότητας 3.4.1 σχετικά με τις ανάγκες ισχύος και κατανάλωσης του κόμβου, καταλήξαμε ότι μια χωρητικότητα κοντά στα 625 mAh θα είναι αρκετή για να επιτρέψει την συνεχή λειτουργία του κόμβου για πάνω από 2 μήνες.



Εικόνα 7. Συνολική Αρχιτεκτονική Συστήματος

Στην εικόνα 7 παρουσιάζεται η συνολική απεικόνιση του συστήματος καταγραφής περιβαλλοντικών δεδομένων με βάση την ανάλυση του κεφαλαίου 3.

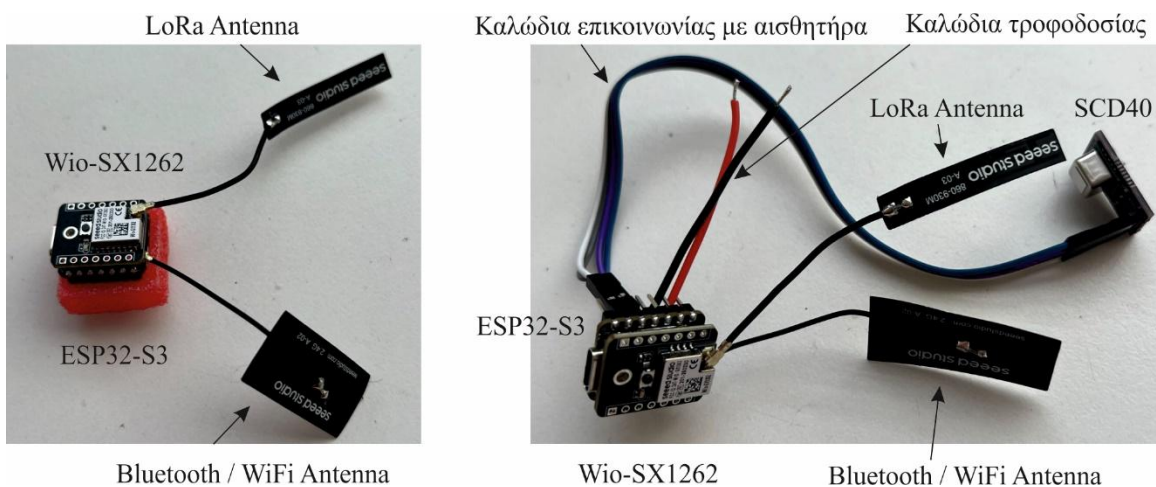
4. Τεχνική Υλοποίηση

4.1 Πρώτο Στάδιο – Αισθητήρας

Το πρώτο στάδιο της τεχνικής υλοποίησης του συστήματος, περιλαμβάνει την κατανόηση της λειτουργίας των επιμέρους εξαρτημάτων, την συναρμολόγηση, και τον αρχικό έλεγχο της λειτουργίας του αισθητήρα καταγραφής περιβαλλοντικών δεδομένων. Ουσιαστικά θέλουμε να επιβεβαιώσουμε την ορθή λειτουργία και το τρόπο με τον οποίο μεταφέρει τα δεδομένα στον μικροελεγκτή. Για αυτόν τον λόγο θα επικεντρωθούμε στα εξαρτήματα (hardware) και λογισμικό (firmware) κυρίως του κόμβου.

4.1.1 Sensor Hardware

Σε αυτό το στάδιο η συναρμολόγηση των εξαρτημάτων είναι ξεκάθαρη. Η πύλη /τερματικό απαιτεί απλά την συναρμολόγηση της πλακέτας του μικροελεγκτή με την πλακέτα του μόντεμ LoRa, καθώς και την σύνδεση των επιμέρους κεραιών όπως παρουσιάζεται στην αριστερή μεριά της εικόνας 8. Αυτή η αρχιτεκτονική θα παραμείνει και ως το τέλος, αφού εξυπηρετεί πλήρως τους στόχους της παρούσας εργασίας. Στο παρακάτω κεφάλαιο 5 θα μελετηθεί πως διαφορετικές κεραίες LoRa για την πύλη επηρεάζουν την εμβέλεια της επικοινωνίας.



Εικόνα 8. Πρωτότυπη πύλη και πρωτότυπος κόμβος

Περισσότερο ενδιαφέρον έχει η συναρμολόγηση του κόμβου, όπως παρουσιάζεται στην δεξιά μεριά της εικόνας 8. Παρομοίως με την πύλη, απαιτείται η συναρμολόγηση των πλακετών του μικροελεγκτή και του μόντεμ LoRa καθώς και η σύνδεση των επιμέρους κεραιών.

Στην συνέχεια συνδέεται ο αισθητήρας SCD40 μέσω καλωδίων μεταξύ των εκτεθειμένων ακροδεκτών των δύο πλακετών, του αισθητήρα και του μικροελεγκτή. Από το λειτουργικό του διάγραμμα του αισθητήρα όπως αυτό παρουσιάστηκε στην εικόνα 5, διαπιστώνουμε ότι θα πρέπει να συνδέσουμε τα VDD (Power), GND, SDA, SCL.

Πίνακας 9. Αντιστοίχιση ακροδεκτών για πρωτότυπο κόμβο

ESP32-S3	SCD40
3V3	VDD (Power)
GND	GND
GPIO 1	SDA
GPIO 2	SCL

Στον πίνακα 9 παρουσιάζεται η αντιστοίχιση των ακροδεκτών μεταξύ των δύο πλακετών. Αξίζει να σημειωθεί ότι αρχικά δοκιμάστηκε η χρήση ενός ελεύθερου ακροδέκτη (GPIO3) για την τροφοδοσία του αισθητήρα. Με αυτόν τον τρόπο, ο μικροελεγκτής θα μπορούσε να κόψει συνολικά το ρεύμα και κατ' επέκταση την κατανάλωση του αισθητήρα.

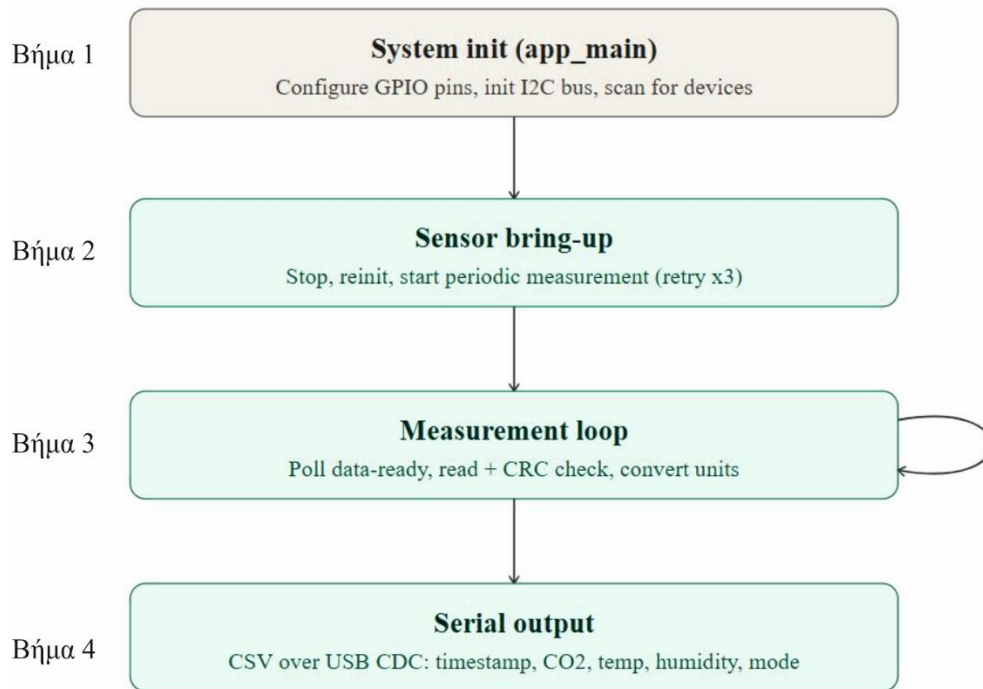
Ωστόσο το μέγιστο ρεύμα παροχής μέσω των ακροδεκτών σύμφωνα με τον κατασκευαστή Espressif δεν επιτρέπεται να ξεπερνάει τα 40 mA. Αν και στον πίνακα 8 υπολογίσαμε την κατανάλωση του αισθητήρα στα 15 mA κατά την διάρκεια καταγραφής δεδομένων, κατά την έναρξη του ο SCD40 τραβάει αρκετά περισσότερο ρεύμα με αποτέλεσμα εσωτερικό βραχυκύκλωμα και επανεκκίνηση του μικροελεγκτή. Το γεγονός αυτό εξακριβώνεται και από το εγχειρίδιο χρήσης του αισθητήρα που αναφέρει ως μέγιστο τυπικό ρεύμα παροχής στα 3.3V τα 175 mA, ενώ κατά μέγιστο μπορεί να ξεπεράσει τα 205 mA.

Παρ' όλα αυτά, ο ίδιος στόχος θα μπορούσε να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση ενός τρανζίστορ το οποίο θα χειρίζεται ένας ελεύθερος ακροδέκτης, π.χ. GPIO3 και θα ανοιγοκλείνει την παροχή ρεύματος απευθείας από την μπαταρία ή τον ακροδέκτη παροχής ρεύματος του μικροελεγκτή 3V3.

4.1.2 Sensor Firmware

Για τον προγραμματισμό του λογισμικού του μικροελεγκτή (firmware) χρησιμοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον VS Code σε συνδυασμό με το πλαίσιο ESP-IDF 5.5.3, που παρέχει έτοιμες βιβλιοθήκες για βασικές λειτουργίες της οικογένειας μικροελεγκτών ESP32. Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη που παρέχει ο κατασκευαστής του αισθητήρα Sensirion για την επικοινωνία με τον μικροελεγκτή και βρίσκεται στο αποθετήριο Github [31].

Στην συνέχεια παρατίθεται ο αλγόριθμος που εξελίχθηκε για την καταγραφή και μετάδοση των περιβαλλοντικών δεδομένων.



Εικόνα 9. Αλγόριθμος για την καταγραφή περιβαλλοντικών δεδομένων

Όπως φαίνεται στην εικόνα 9 ο αλγόριθμος για την καταγραφή και παρουσίαση περιβαλλοντικών δεδομένων μέσω του αισθητήρα SCD40 αποτελείται από 4 βασικά βήματα. Στο πρώτο βήμα ο μικροελεγκτής ορίζει ποιοι ακροδέκτες θα χρησιμοποιηθούν για την αντίστοιχη διεργασία και ξεκινάει μέσω του πρωτοκόλλου I²C να σαρώνει όλες τις πιθανές διευθύνσεις ψάχνοντας για την αναγνωριστική διεύθυνση του αισθητήρα που είναι η 0x62 σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Η μέγιστη ταχύτητα επικοινωνίας I²C είναι τα 100 kHz, αλλά εφόσον δεν είναι απαραίτητη και για λόγους ασφάλειας και ακεραιότητας των δεδομένων η ταχύτητα περιορίστηκε στα 50 kHz.

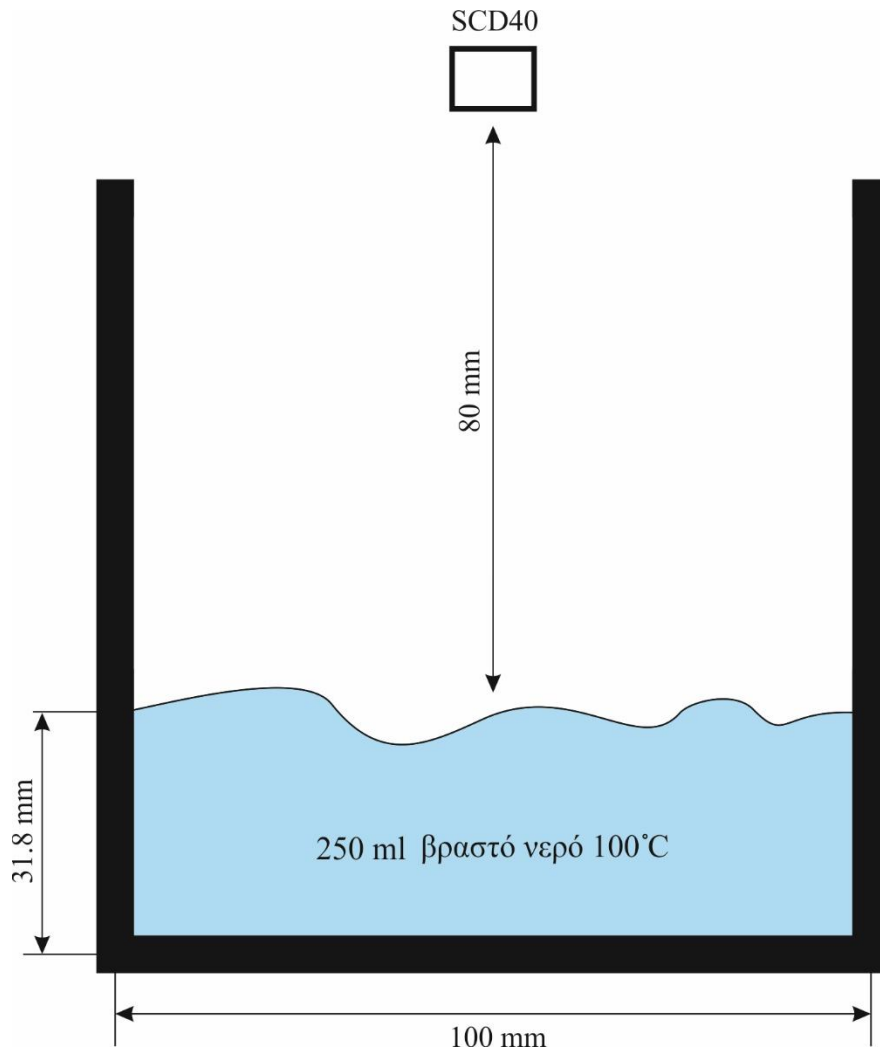
Εφόσον ο αισθητήρας αναγνωριστεί επιτυχώς, κατά το δεύτερο βήμα γίνεται η εκκίνηση του αισθητήρα στην κατάσταση όπου προετοιμάζει περιοδικές μετρήσεις κάθε 5 δευτερόλεπτα. Αρχικά στέλνεται οδηγία στον αισθητήρα να σταματήσει οποιεσδήποτε προηγούμενες μετρήσεις, να κάνει μια σύντομη επανεκκίνηση και ξεκινήσει την καταγραφή δεδομένων.

Στο τρίτο βήμα το λογισμικό μπαίνει σε έναν βρόγχο όπου επαναλαμβανόμενα ο μικροελεγκτής ζητάει δεδομένα από τον αισθητήρα και στην συνέχεια τα προωθεί μέσω USB με σειριακή επικοινωνία στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας σε μορφή CSV. Αυτή η μονάδα μπορεί να τα μεταποιήσει και να τα αποθηκεύσει με διαφορετικές μορφές ή να τα ανεβάσει σε cloud σέρβερ.

Στην προκειμένη περίπτωση τα δεδομένα συλλέγονται μέσω της σειριακής κονσόλας του VS Code για περεταίρω επεξεργασία μέσω Microsoft Excel.

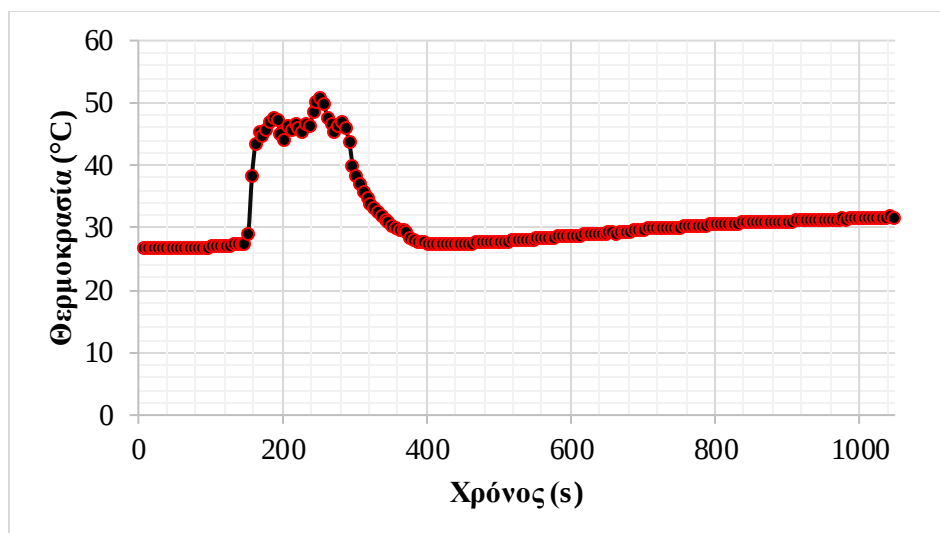
4.1.3 Επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας

Σε συνέχεια τη τεχνικής υλοποίησης που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες 4.1.1 - 4.1.2, παρουσιάζεται παρακάτω ένα γρήγορο πείραμα για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του αισθητήρα.



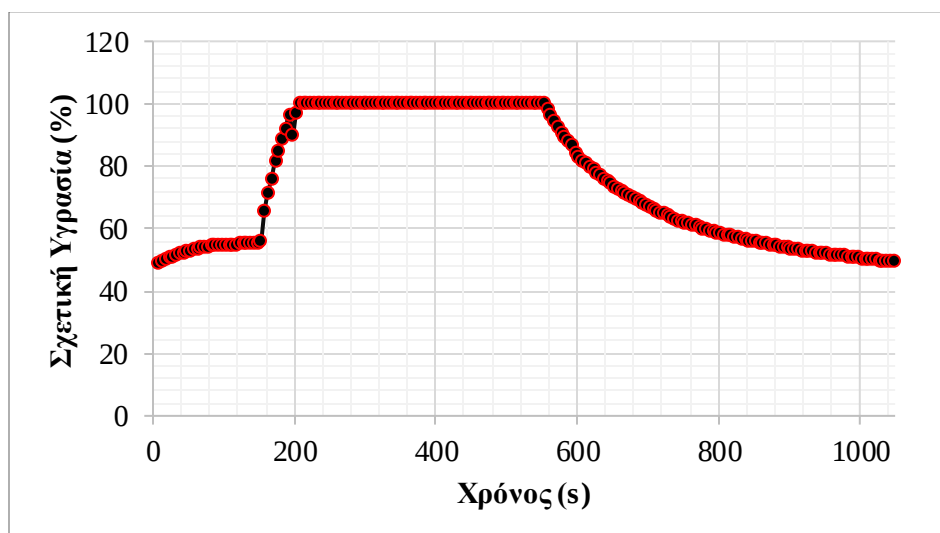
Εικόνα 10. Αρχικό πείραμα επιβεβαίωσης ορθής λειτουργίας

Το πείραμα όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 10 περιλαμβάνει ένα δοχείο (μπρίκι) με 250 ml νερού που έχει φτάσει σε σημείο βρασμού. Στην συνέχεια τοποθετείται ο αισθητήρας SCD40 σε απόσταση 80 χιλιοστών από την επιφάνεια του νερού και καταγράφονται τα δεδομένα με την βοήθεια του λογισμικού του μικροελεγκτή και εκτυπώνονται στην σειριακή κονσόλα. Κατόπιν παραμονής του αισθητήρα για 145 δευτερόλεπτα (περίπου δυόμισι λεπτά), ο αισθητήρας απομακρύνεται από την ροή των υδρατμών και αφήνεται σε ηρεμία επάνω σε μία επιφάνεια. Τα αποτελέσματα όπως παρατίθενται παρακάτω επιβεβαιώνουν την ορθή μετρητική λειτουργία του κόμβου.



Εικόνα 11. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στον χρόνο

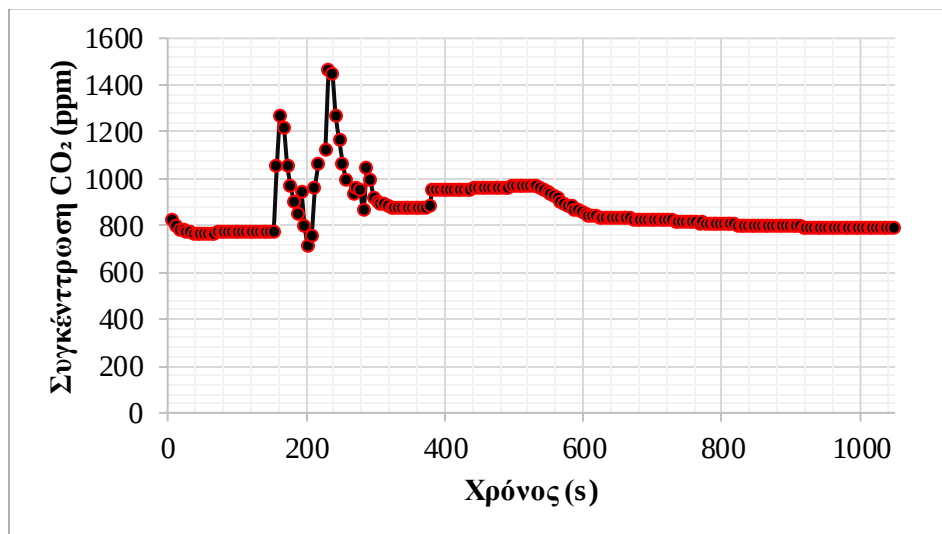
Στο διάγραμμα της εικόνας 11 παρατηρούμε ότι για τα πρώτα 150 περίπου δευτερόλεπτα ο αισθητήρας μετράει την θερμοκρασία του περιβάλλοντος δωματίου γύρω στους 27 βαθμούς Κελσίου. Την στιγμή που ο αισθητήρας έρχεται σε επαφή με την θερμή ροή υδρατμών η θερμοκρασία αυξάνεται κατακόρυφα και παραμένει μεταξύ των 45 και 50 βαθμών Κελσίου. Αυτές οι τιμές θερμοκρασίας, που επιβεβαιώθηκαν και με ένα ψηφιακό θερμόμετρο χειρός, είναι αναμενόμενες. Καθώς οι ζεστοί υδρατμοί με θερμοκρασία στους 100 βαθμούς Κελσίου εκτονώνονται προς τα επάνω, πέφτει η θερμοκρασία και η πίεση τους σύμφωνα με τους κανόνες της θερμοδυναμικής. Μετά την απομάκρυνση του αισθητήρα από την ροή υδρατμών, η θερμοκρασία επανέρχεται σταδιακά στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου.



Εικόνα 12. Εξέλιξη της σχετικής υγρασίας στον χρόνο

Στο διάγραμμα της εικόνας 12 παρατηρούμε ότι για τα πρώτα 150 περίπου δευτερόλεπτα ο αισθητήρας μετράει την σχετική υγρασία του περιβάλλοντος χώρου σε περίπου 55%. Η σχετική υγρασία ανεβαίνει κατακόρυφα στο 100% την στιγμή που ο αισθητήρας έρχεται σε επαφή με την θερμή ροή των υδρατμών. Σημαντική είναι η παρατήρηση ότι ενώ ο αισθητήρας απομακρύνεται από την θερμή ροή υδρατμών περίπου στα 300 δευτερόλεπτα του πειράματος, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την μέτρηση της θερμοκρασίας που ανταποκρίνεται σχεδόν ακαριαία, η μέτρηση της σχετικής υγρασίας αργεί σημαντικά να επανέλθει στα επίπεδα υγρασίας του περιβάλλοντος χώρου.

Ο λόγος είναι όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.3.2 είναι ότι όταν ο αέρας ψύχεται έως το σημείο δρόσου μέσω επαφής με μια επιφάνεια που είναι πιο ψυχρή από αυτόν, νερό θα συμπυκνωθεί στην επιφάνεια αυτή. Παρατηρούμε λοιπόν ότι θα περάσουν επιπλέον 255 δευτερόλεπτα μέχρι να αρχίσουν οι συμπυκνωμένοι αυτοί υδρατμοί να εξατμίζονται / απομακρύνονται από την επιφάνεια του αισθητήρα και η μέτρηση να αρχίσει να επανέρχεται σταδιακά στα επίπεδα του περιβάλλοντος χώρου.



Εικόνα 13. Εξέλιξη της συγκέντρωσης CO₂ στον χρόνο

Στο διάγραμμα της εικόνας 13 παρατηρούμε ότι για τα πρώτα 150 περίπου δευτερόλεπτα ο αισθητήρας μετράει την σχετική συγκέντρωση σωματιδίων διοξειδίου του άνθρακα του περιβάλλοντα χώρου κοντά στα 800 σωματίδια ανά εκατομμύριο. Την στιγμή που ο αισθητήρας έρχεται σε επαφή με την θερμή ροή υδρατμών η συγκέντρωση αυξάνεται κατακόρυφα. Παρατηρούνται δύο κορυφές στα 1250 ppm και 1500 ppm, ενώ στην συνέχεια όταν ο αισθητήρας απομακρύνεται από την ροή υδρατμών η μέτρηση επανέρχεται σιγά σιγά σε αυτήν του περιβάλλοντα χώρου.

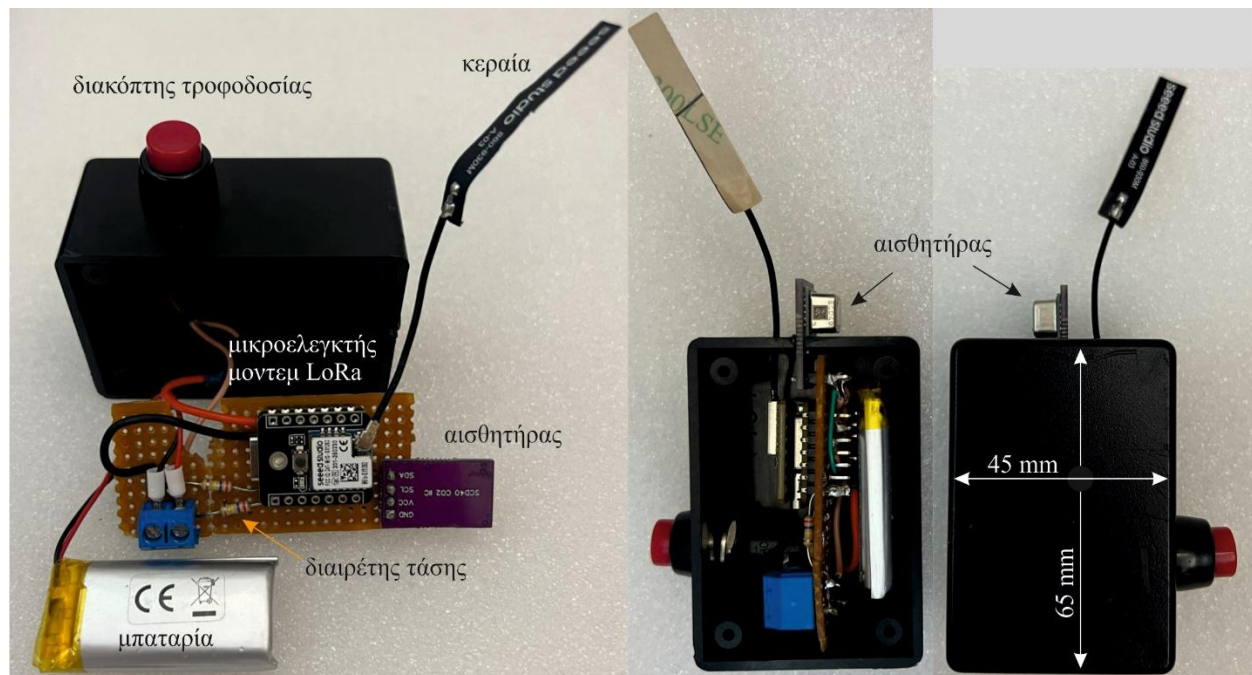
Αυτή η απότομη άνοδος είναι επίσης αναμενόμενη, καθώς το νερό περιέχει διοξείδιο του άνθρακα, του οποίου η διαλυτότητα πέφτει με την άνοδο της θερμοκρασίας. Το γεγονός αυτό είναι γνωστό από τους νόμους της φυσικής, ενώ είναι και θέμα διαρκούς έρευνας σχετικά με την περιεκτικότητα των ωκεανών σε διοξείδιο του άνθρακα [32].

4.2 Δεύτερο Στάδιο - LoRa

Το δεύτερο στάδιο της τεχνικής υλοποίησης επικεντρώνεται στην τροποποίηση του αισθητήρα που εξελίχθηκε στην προηγούμενη ενότητα σε έναν πλήρως αυτόνομο και ασύρματο κόμβο. Συνεπώς θα πρέπει να ενσωματωθεί η μπαταρία και το μόντεμ LoRa και να συναρμολογηθούν τα εξαρτήματα σε ένα εργονομικό κουτί/θήκη. Στην συνέχεια θα πρέπει να προγραμματιστεί η επικοινωνία μεταξύ του κόμβου – πομπού και της πύλης – δέκτη.

4.2.1 Node Hardware

Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 4.1.1, τα εξαρτήματα της πύλης δεν χρειάζονται περεταίρω εξέλιξη και θα παραμείνουν όπως εμφανίζονται στην εικόνα 8. Για τον κόμβο θα προτιμηθεί μία λύση στην κατεύθυνση βιομηχανικών εφαρμογών, όπου τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα περιλαμβάνονται σε μία θήκη /κουτί συνήθως από πλαστικό υλικό για να επιτρέπεται η λειτουργία των ενσωματωμένων κεραίων.



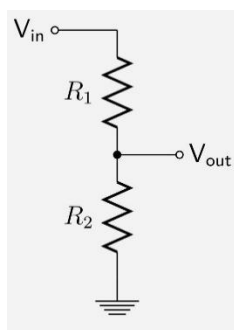
Εικόνα 14. Τελική γεωμετρία κόμβου

Για τον λόγο αυτόν χρησιμοποιήθηκε μία θήκη με διαστάσεις 65 x 45 x 30 mm. Τυπικά υλικά για θήκες ηλεκτρονικών στην πράξη αποτελούν τα ABS, PC, PVC, PET, PEEK και άλλα, ανάλογα με τις ανάγκες

της εκάστοτε εφαρμογής. Παραδείγματος χάρη το PC (polycarbonate) παρέχει εξαιρετική αντοχή σε θλιπτικά φορτία, ενώ το PEEK (polyether ether ketone) παρέχει εξαιρετική αντίσταση σε χημικούς διαλύτες. Για την παρούσα εφαρμογή θα ήταν χρήσιμη η αντοχή σε ηλιακή ακτινοβολία UV, καθώς ο κόμβος θα βρίσκεται δυνητικά σε εξωτερικό χώρο για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Στην εικόνα 14 παρουσιάζεται ο κόμβος στην τελική του μορφή. Στην προκειμένη περίπτωση προστέθηκε για ευκολία στην χρήση ένας εξωτερικός διακόπτης τροφοδοσίας τύπου μπουτόν. Ο διακόπτης είναι σε σειρά με την μπαταρία ώστε να αποκόπτεται συνολικά η τροφοδοσία του κόμβου.

Εφόσον πλέον η συνολική παροχή ενέργειας του κόμβου είναι πεπερασμένη και ορίζεται από την χωρητικότητα της μπαταρίας, έχει ενδιαφέρον για την εφαρμογή μας να μπορεί να μετριέται η τάση της, να μεταδίδεται στην πύλη και να καταγράφεται από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας. Για τον λόγο αυτό προστέθηκε ένας διαιρέτης τάσης, ο οποίος θα βοηθήσει στην καταγραφή της τάσης της μπαταρίας.



Εικόνα 15. Διαιρέτης τάσης

Ένας απλός διαιρέτης τάσης (γνωστός και ως διαιρέτης δυναμικού) είναι ένα παθητικό γραμμικό κύκλωμα που παράγει μια τάση εξόδου (V_{out}) που είναι ένα κλάσμα της τάσης εισόδου του (V_{in}). Η διαίρεση τάσης είναι το αποτέλεσμα της κατανομής της τάσης εισόδου μεταξύ των εξαρτημάτων του διαιρέτη. Ένα απλό παράδειγμα διαιρέτη τάσης, όπως αυτό που παρουσιάζεται στην εικόνα 15, αποτελείται από δύο αντιστάσεις συνδεδεμένες σε σειρά, με την τάση εισόδου να εφαρμόζεται στο ζεύγος αντιστάσεων και την τάση εξόδου να μετριέται στο ενδιάμεσο.

Αυτή η διάταξη μας επιτρέπει να μετασχηματίσουμε την τάση της μπαταρίας που αντιστοιχεί στο V_{in} μεταξύ 3.0-4.2V, σε μια κλίμακα που αντιστοιχεί στο V_{out} μεταξύ 1.5-2.1V. Ο κύριος λόγος που χρειάζεται αυτός ο μετασχηματισμός είναι γιατί οι θύρες γενικής χρήσης του μικροελεγκτή μπορούν να καταγράφουν σήματα τάσης μεταξύ 0 και 3.3 Volt. Με την βοήθεια του διαιρέτη τάσης μετασχηματίστηκε το εύρος τάσης στη μπαταρίας σε τιμές που μπορούν να καταγραφούν.

Θα πρέπει να διευκρινιστεί ωστόσο ότι ο διαιρέτης τραβάει συνεχώς ρεύμα και συνεπώς συμβάλλει στην συνολική κατανάλωση. Για αυτόν τον λόγο επιλέχθηκαν όσο το δυνατόν μεγαλύτερες τιμές αντιστάσεων, εν προκειμένω 270 kOhm, ώστε να μειωθεί σημαντικά το ρεύμα, αλλά να μπορεί ο μικροελεγκτής να μετρήσει την τάση. Μπορούμε λοιπόν να υπολογίσουμε το ρεύμα ως:

- $I = V / (R1 + R2)$

Όπου για V χρησιμοποιούμε την τάση της μπαταρίας και υπολογίζουμε:

- 3.3V: $I = 3.3 / 540,000 = 6.1 \mu A$
- 5V: $I = 5 / 540,000 = 9.3 \mu A$

Μπορούμε συνεπώς να συμπεριλάβουμε και την κατανάλωση του διαιρέτη τάσης στην συνολική κατανάλωση του συστήματος για να δούμε πως επηρεάζεται η διάρκεια ζωής του κόμβου μας με μία πλήρη φόρτιση. Στα δεδομένα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.4.1 προσθέτουμε μια συνεχή κατανάλωση ρεύματος περίπου 8 μA και καταλήγουμε ότι η συνολική κατανάλωση στη διάρκεια μίας ώρας για έναν κύκλο θα είναι, $0,008 + 0.0162 + 0.366 = 0.3902 \text{ mAh}$.

Η επιλεγμένη μπαταρία LiPo χωρητικότητας 625mAh θα μας αποδώσει πλέον $625 / 0.3902 \approx 1602$ ώρες λειτουργίας ή 66.7 μέρες, ενώ προηγουμένως χωρίς την χρήση του διαιρέτη η αυτονομία ανερχόταν στις 68 μέρες. Θα θεωρήσουμε αυτή την μικρή μείωση του λιγότερο από 2% αποδεκτή. Ως εκ τούτου η φόρτιση της μπαταρίας επιτυγχάνεται μέσω του κοινέκτορα USB-C της πλακέτας του μικροελεγκτή.

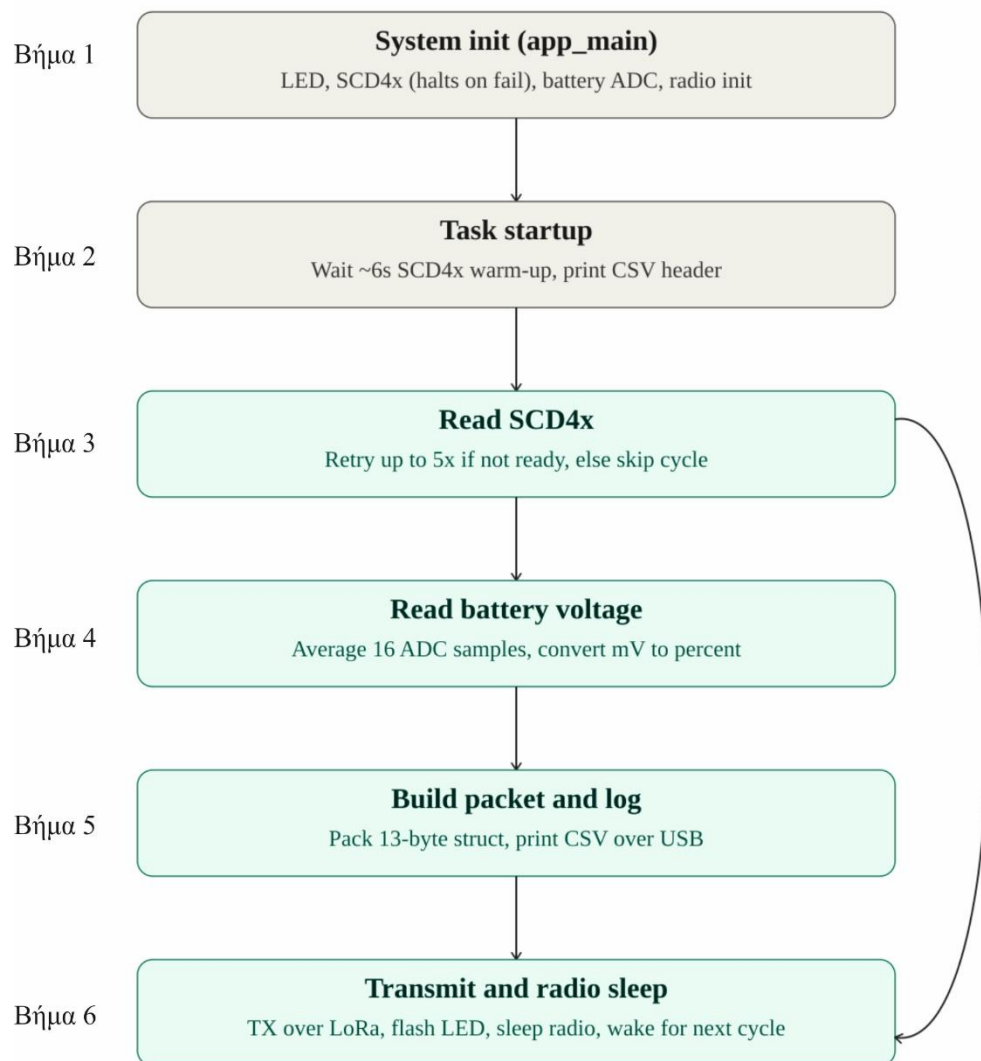
Πίνακας 10. Αντιστοίχιση ακροδεκτών για πρωτότυπο κόμβο

ESP32-S3	SCD40
3V3	Power
GND	GND
GPIO 5	SDA
GPIO 6	SCL
GPIO 1	Δεν αντιστοιχεί (Διαιρέτης Τάσης)
GPIO 21	Πράσινη Φωτοδίοδος

Στον πίνακα 10 παρουσιάζεται η αντιστοίχιση των ακροδεκτών μεταξύ των δύο πλακετών. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην παρακάτω ενότητα σχετικά με την εξέλιξη του λογισμικού του κόμβου, θα προστεθεί και ο χειρισμός της πράσινης φωτοδίοδου στην επάνω μεριά της πλακέτας του μόντεμ LoRa για οπτική επιβεβαίωση της επικοινωνίας.

4.2.2 Node Firmware

Για το λογισμικό του κόμβου χρειάστηκε η συγχώνευση του χειρισμού του αισθητήρα όπως αυτό παρουσιάστηκε στη προηγούμενη ενότητα 4.1.2 με ένα λογισμικό καθοδήγησης του μόντεμ LoRa. Υπάρχουν μερικές έτοιμες βιβλιοθήκες που παρέχουν αυτήν την δυνατότητα. Μια επιλογή που μπορούσαμε να ακολουθήσουμε είναι η ευρέως διαδεδομένη εφαρμογή της Meshtastic [33], με εκατοντάδες χιλιάδες ενεργούς χρήστες παγκοσμίως. Βασίζεται σε μια αποκεντρωμένη διαχείριση μηνυμάτων μεταξύ ανεξάρτητων κόμβων και έχει εξελιχθεί κυρίως για την επικοινωνία μεταξύ χρηστών. Στην προκειμένη περίπτωση θα έπρεπε να μεταποιηθούν τα δεδομένα του αισθητήρα σε πακέτα μηνυμάτων για την συγκεκριμένη αρχιτεκτονική.



Εικόνα 15. Αλγόριθμος λειτουργίας κόμβου

Μία δεύτερη επιλογή είναι η βιβλιοθήκη της RadioLib [34], η οποία περιέχει οδηγούς για μία πληθώρα από διαφορετικά μόντεμ ραδιοκυμάτων, συμπεριλαμβανομένου και του SX1262. Τελικά καταλήξαμε σε μία βιβλιοθήκη της εταιρίας Impact-BZ [35], που είναι ενεργή στην εξέλιξη συσκευών IoT και κεραιών για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών μέσω του τμήματος ασύρματων αισθητήρων.

Ο αλγόριθμος του λογισμικού του κόμβου, κατόπιν της συγχώνευσης του οδηγού του αισθητήρα με τον οδηγό του μόντεμ παρουσιάζεται στην εικόνα 15.

Στο πρώτο βήμα γίνεται η εκκίνηση του συστήματος με τον ορισμό λειτουργίας των επιμέρους θυρών και ακροδεκτών. Στο δεύτερο βήμα γίνεται η εκκίνηση του αισθητήρα με την απαραίτητη χρονοκαθυστέρηση που συνιστά ο κατασκευαστής.

Στο τρίτο βήμα ξεκινάει ουσιαστικά ο βρόγχος του κυρίως προγράμματος όπου καταγράφονται οι μετρήσεις θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα. Αν ο αισθητήρας δεν είναι έτοιμος παρακάμπτεται ο συγκεκριμένος κύκλος και ενημερώνεται ο χρήστης εφόσον είναι συνδεδεμένος στην σειριακή κονσόλα. Στο τέταρτο βήμα καταγράφεται η στάθμη της μπαταρίας μέσω του αναλογικού σε ψηφιακό μετατροπέα (ADC converter) της θύρας GPIO1 και μεταφράζεται σε ποσοστό επί τοις 100% με όρια 3V και 4.2 V. Αυτός ο τρόπος μας επιτρέπει να μεταδώσουμε την πληροφορία της στάθμης της μπαταρίας με ένα μόνο Byte και συνεπώς να εξοικονομήσουμε χώρο στα μεταδιδόμενα πακέτα. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται άλλωστε από την τεχνολογία Bluetooth για ασύρματες συσκευές.

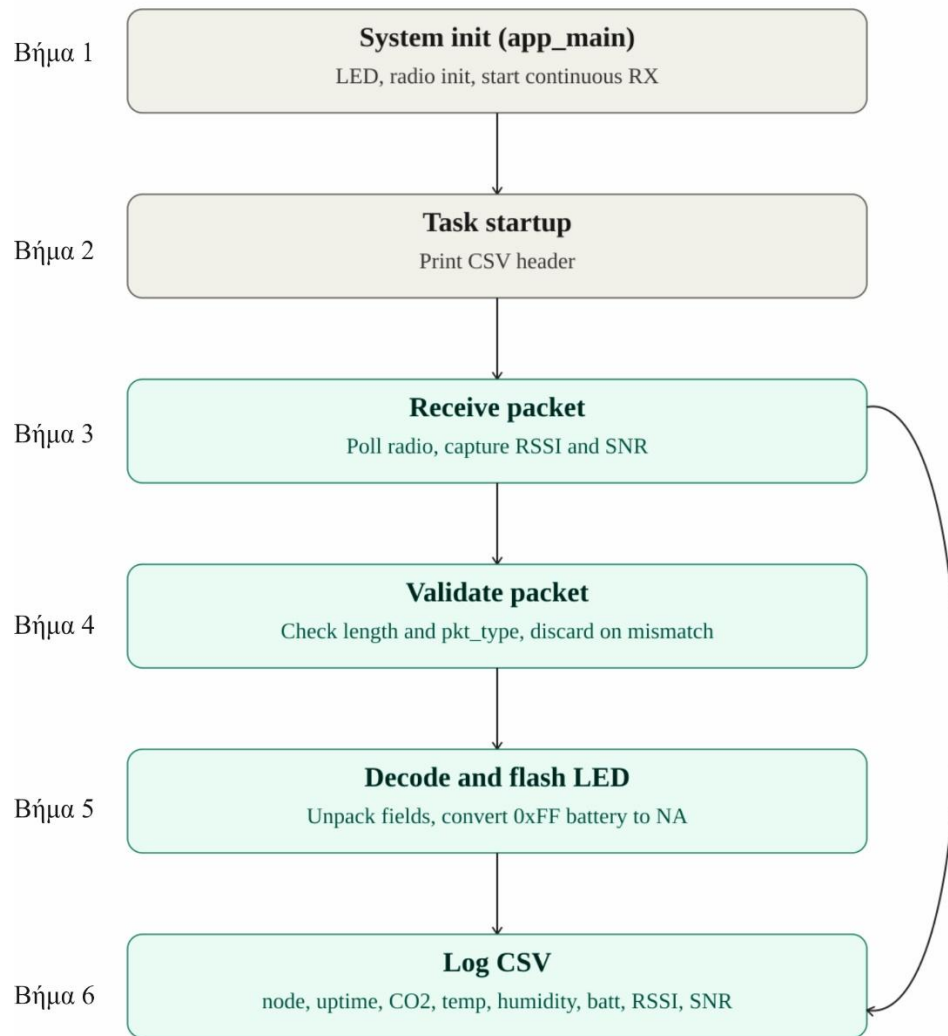
Στο πέμπτο βήμα μετασχηματίζονται τα δεδομένα σε ένα μήνυμα μήκους 13 Bytes, το οποίο εκτυπώνεται και στην σειριακή κονσόλα για κάποιον συνδεδεμένο χρήστη, κυρίως για λόγους ελέγχου. Στο έκτο βήμα γίνεται η αναμετάδοση του μηνύματος μέσω του μόντεμ LoRa. Μια επιτυχημένη αναμετάδοση σηματοδοτείται οπτικά με την στιγμιαία λάμψη του πράσινου LED στη πλακέτα του μόντεμ.

Πίνακας 11. Ανάλυση Bytes μεταδιδόμενων μηνυμάτων

Offset	Bytes	Field	Type	Meaning
0	1	pkt_type	uint8_t	Always 0xA1 (ENV sensor packet identifier)
1	1	node_id	uint8_t	Transmitter's node ID (set via NODE_ID macro)
2-5	4	node_uptime_s	uint32_t	Seconds since the transmitter booted
6-7	2	co2_ppm	uint16_t	CO2 concentration raw ppm
8-9	2	temperature_cdeg	int16_t	Temperature in C x100 (signed)
10-11	2	humidity_cpct	uint16_t	Relative humidity in %RH x100
12	1	battery_pct	uint8_t	Battery percentage 0-100 or 0xFF if invalid

4.2.3 Gateway Firmware

Στην άλλη μεριά της επικοινωνίας ο προγραμματισμός της πύλης /τερματικού ακολουθάει παρόμοια φιλοσοφία ώστε να μπορεί να καταγράψει και να αποκωδικοποιήσει τα αναμεταδιδόμενα μηνύματα του κόμβου. Η ανάλυση των Bytes που περιέχονται σε κάθε πακέτο παρουσιάζονται στον πίνακα 11.



Εικόνα 16. Αλγόριθμος λειτουργίας πύλης / τερματικού

Ο αλγόριθμος του λογισμικού της πύλης, όπως φαίνεται στην εικόνα 16 ακολουθάει αντίστοιχα βήματα με αυτόν του κόμβου. Στα δύο πρώτα βήματα γίνεται η εκκίνηση των εξαρτημάτων και επιβεβαιώνεται η ορθή επικοινωνία του μικροελεγκτή με το μόντεμ LoRa. Ο χρήστης ενημερώνεται μέσω της κονσόλας.

Στην συνέχεια το πρόγραμμα μπαίνει στον κύριο βρόγχο όπου το σύστημα είναι σε κατάσταση μόνιμης αναμονής μηνυμάτων RX mode. Όταν ληφθεί επιτυχώς ένα μήνυμα, μετρίεται η ισχύς του, ελέγχεται η

ορθότητα του και ότι έχει μεταδοθεί στην εντέλεια του. Εάν κριθεί ορθό αυτό αποκωδικοποιείται και γίνεται διαθέσιμο στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας σειριακά μέσω της θύρας USB-C.

***Πίνακας 12.** Ανάλυση μηνύματος στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας*

gateway_rx_ms	node_id	node_uptime_s	co2_ppm	temp_c	humidity_pct	RSSI	SNR
117887	0x01	126	785	23.18	58.51	52	-38
122887	0x01	131	785	23.17	58.6	52	-38
127887	0x01	136	785	23.12	58.53	52	-38
132887	0x01	141	785	23.14	58.59	52	-39
137887	0x01	146	786	23.11	58.6	52	-37

Στον πίνακα 12 παρουσιάζονται αναλυτικά κάποια τυπικά μηνύματα όπως τα παραλαμβάνει η πύλη, τα μετασχηματίζει και τα μεταδίδει στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας μέσω της θύρας USB-C. Αυτά περιλαμβάνουν την ώρα σε ms που είναι ενεργή η πύλη, την ταυτότητα του κόμβου που έστειλε το συγκεκριμένο μήνυμα (χρήσιμο για την περίπτωση ύπαρξης περισσότερων κόμβων), την διάρκεια που είναι ενεργός ο κόμβος, την συγκέντρωση σωματιδίων του διοξειδίου του άνθρακα, την θερμοκρασία, την σχετική υγρασία, την ισχύ του ληφθέντος σήματος και τον λόγο σήματος προς θόρυβο.

4.3 Σύνοψη Υλοποιημένου Συστήματος

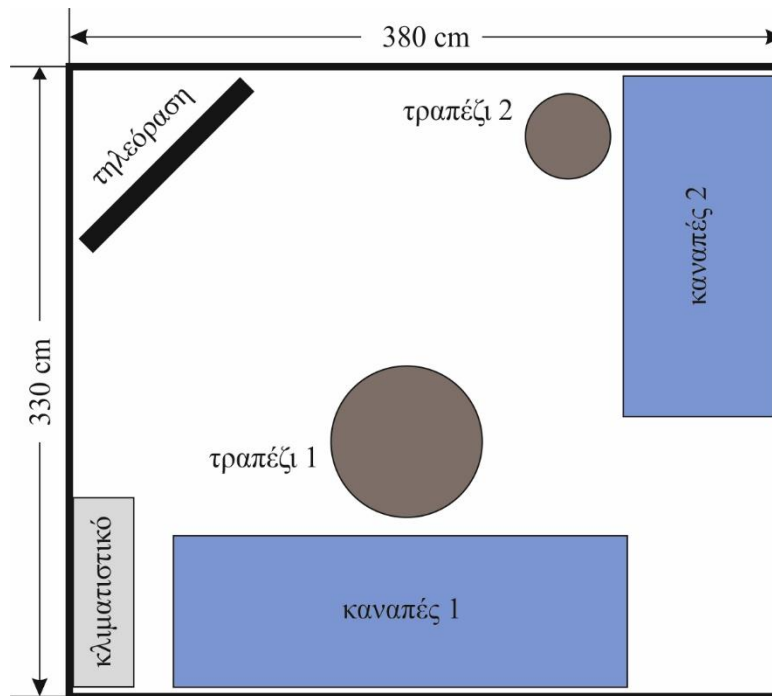
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε σε δύο στάδια η τεχνική υλοποίηση του συστήματος αποτελούμενο από έναν ασύρματο μετρητικό κόμβο και μία πύλη. Αρχικά παρουσιάστηκε η υλοποίηση του αισθητήρα καταγραφής περιβαλλοντικών συνθηκών σε συνδυασμό με τον μικροελεγκτή για την ορθή καταγραφή δεδομένων. Η απόδοση του συστήματος ελέγχθηκε με ένα απλό και πραγματικό πείραμα ώστε να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία.

Στην συνέχεια έγινε συγχώνευση του μετρητικού κομματιού του λογισμικού με έναν οδηγό για μόντεμ ασύρματης αναμετάδοσης των δεδομένων μέσω LoRa. Επιπλέον εξελίχθηκε λογισμικό για την λήψη των δεδομένων από μια πύλη, τον μετασχηματισμό τους και την παρουσίαση τους σε μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας.

5. Μετρήσεις και Απόδοση του Συστήματος

5.1 Μετρήσεις σε εσωτερικό χώρο - Μπαταρία/Θερμοκρασία/Υγρασία/CO₂

Εφόσον το σύστημα μας υλοποιήθηκε επιτυχώς όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, σε αυτό το κεφάλαιο θέλουμε να επιβεβαιώσουμε την απόδοση του συστήματος σε πραγματική χρήση. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να καταλήξουμε σε κάποια συμπεράσματα ως προς την χρησιμότητα του εν λόγω συστήματος ξεκινώντας αρχικά από ένα πείραμα σε εσωτερικό χώρο όπως αυτό παρουσιάζεται στην εικόνα 17.



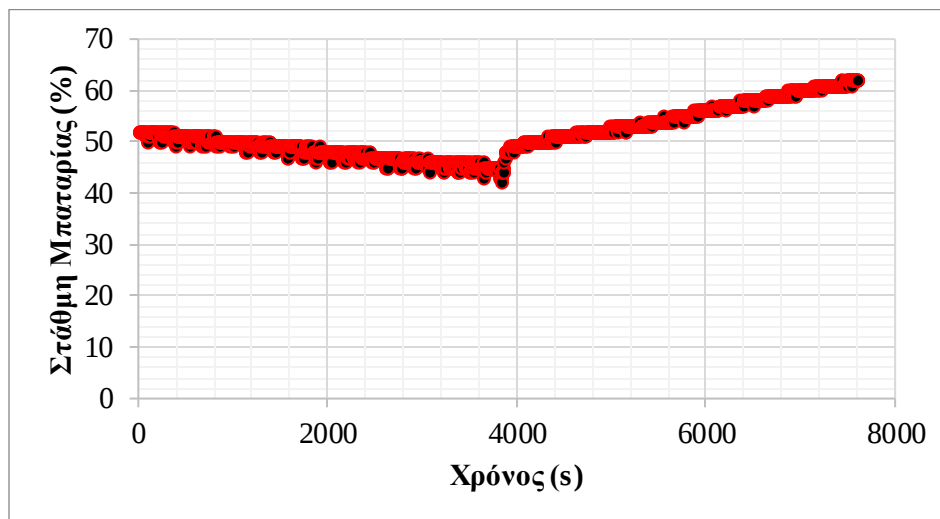
Εικόνα 17. Εσωτερικός χώρος μετρήσεων

Ο εσωτερικός χώρος που επιλέχθηκε, αποτελεί ένα καθιστικό σαλόνι 12.5 τετραγωνικών μέτρων. Κατά την διάρκεια του πειράματος τοποθετήθηκε ο κόμβος επάνω στο τραπέζι 1, περίπου στο κέντρο του δωματίου. Δύο ενήλικες βρίσκονταν καθισμένοι ο καθένας σε έναν καναπέ και το κλιματιστικό στην κάτω αριστερή γωνία του χώρου ξεκίνησε να λειτουργεί.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για το συγκεκριμένο πείραμα δεν τηρήθηκε η στρατηγική εξοικονόμησης ενέργειας που θέλει τον μικροελεγκτή να ξυπνάει μόνο μία φορά την ώρα, να καταγράφει και να αναμεταδίδει 4 μετρήσεις όπως αναλυθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο συγκεκριμένο πείραμα ο αισθητήρας είναι διαρκώς ενεργός και καταγράφει μετρήσεις κάθε 5 δευτερόλεπτα.

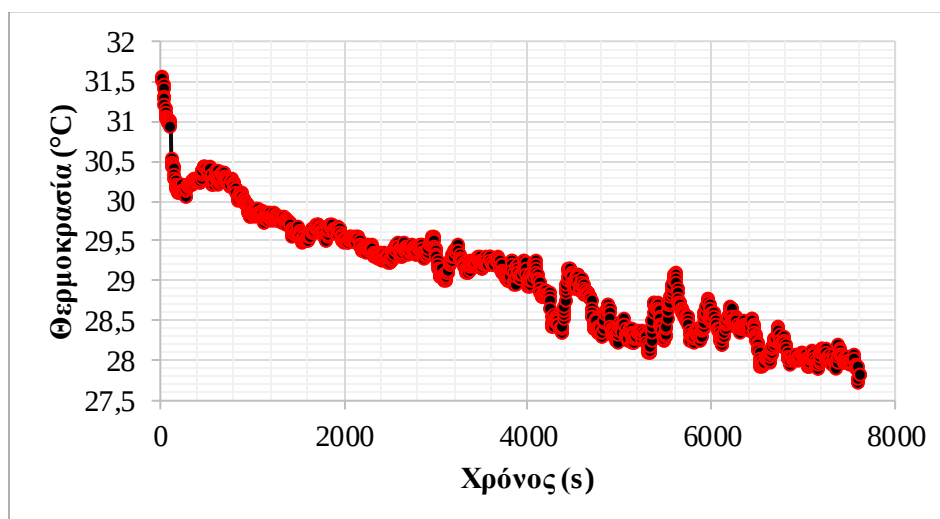
Το πείραμα διήρκησε λίγο παραπάνω από δύο ώρες. Κατά την πρώτη ώρα ο κόμβος λειτουργούσε με τροφοδοσία απευθείας από την μπαταρία, ενώ κατά την διάρκεια της δεύτερης ώρας ήταν συνδεδεμένη

παροχή 5V μέσω της πλακέτας του μικροελεγκτή. Με αυτόν τον τρόπο καταγράφηκε η αποφόρτιση και επαναφόρτιση του κόμβου όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα της εικόνας 18.



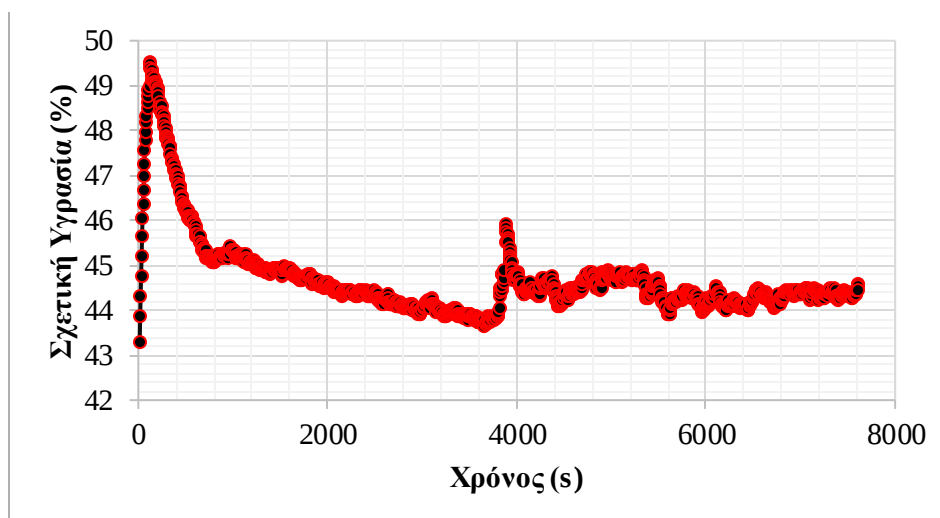
Εικόνα 18. Μέτρηση αποφόρτισης και επαναφόρτισης μπαταρίας

Όπως παρατηρούμε στην εικόνα 18 η μπαταρία ξεκινάει από 52% ή 3.62 V στην αρχή του πειράματος και πέφτει μέχρι τα 44% ή 3.53 V μέσα σε μία περίπου ώρα. Στην συνέχεια εφόσον ο κόμβος συνδέεται σε εξωτερική τροφοδοσία, η μπαταρία φορτίζεται μέσω του ενσωματωμένου ημιαγωγού SGM40567. Με την πάροδο μίας ακόμη περίπου ώρας η μπαταρία έχει φτάσει στο 62% ή 3.74 V. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι τα όρια λειτουργίας του κόμβου δεν συμπίπτουν απαραίτητα με το 0-100% της μπαταρίας και στην πράξη απαιτείται βαθμονόμηση. Είναι όμως μία ιδιαίτερα χρήσιμη ένδειξη γι' αυτό και χρησιμοποιείται ευρέως σε πληθώρα εφαρμογών.



Εικόνα 19. Μέτρηση θερμοκρασίας

Στο διάγραμμα της εικόνας 19 παρατηρούμε την εξέλιξη της θερμοκρασίας στον χρόνο. Όπως είναι φανερό η θερμοκρασία πέφτει κατά την διάρκεια του πειράματος δύο ωρών, ως αποτέλεσμα της λειτουργίας του κλιματιστικού.

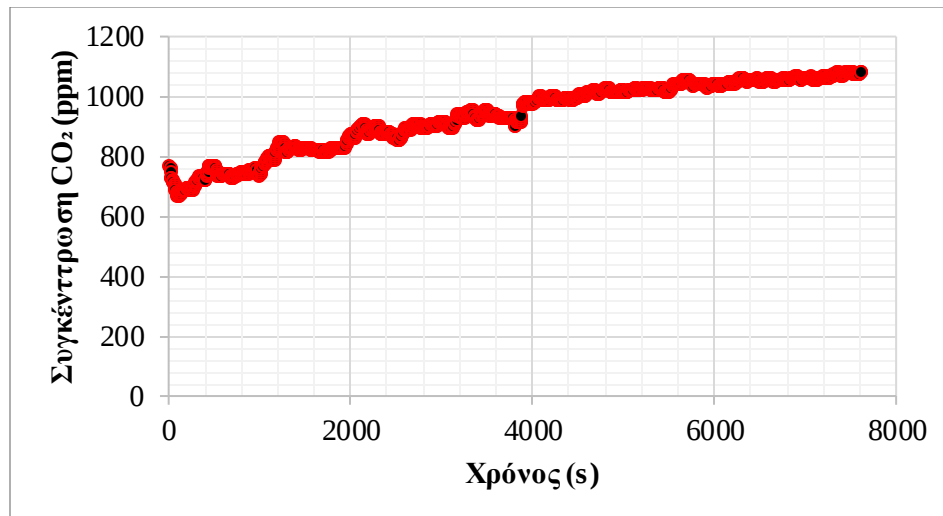


Εικόνα 20. Μέτρηση σχετικής υγρασίας

Στο διάγραμμα της εικόνας 20 παρατηρούμε ότι στην αρχή της μέτρησης η σχετική υγρασία αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό για τα 3 πρώτα λεπτά και υποχωρεί σταδιακά. Καθότι στο εγχειρίδιο χρήσης δεν αναφέρεται κάποιος συγκεκριμένος λόγος, όπως μια αρχική περίοδος που χρειάζεται ο αισθητήρας πριν αρχίσει να παράγει σωστές μετρήσεις, θα υποθέσουμε ότι είναι απόρροια των πραγματικών συνθηκών εντός του χώρου και του γεγονότος ότι το κλιματιστικό που μόλις ξεκίνησε κατευθύνει την ροή αέρα επάνω στον αισθητήρα. Αυτό παρατηρείται και την στιγμή που ανασηκώνεται ελαφρά ο κόμβος για να περαστεί το καλώδιο τροφοδοσίας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το διάγραμμα της εικόνας 21 στο οποίο παρουσιάζεται η συγκέντρωση σωματιδίων του διοξειδίου του άνθρακα. Όπως φαίνεται ξεκινάει από τιμές κοντά στα 650-700 ppm και καταλήγει σταδιακά στα 1050-1100 ppm. Αυτή η αύξηση είναι αναμενόμενη για έναν κλειστό χώρο στον οποίο βρίσκονται και αναπνέουν δύο ενήλικες.

Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι κινούμαστε σε καλές σχετικά τιμές συγκέντρωσης σωματιδίων. Η πιο ολοκληρωμένη πρόταση για τυποποίηση των αποδεκτών ορίων συγκέντρωσης CO₂ προέρχεται από την WELL [36]. Συγκεκριμένα αναφέρει ότι σε περιπτώσεις καλού εξαερισμού αυτή η τιμή θα πρέπει να βρίσκεται κοντά στα 900 ppm. Ωστόσο όπως αναφέρεται σε επιστημονικές έρευνες, αυτές οι τιμές εξαρτώνται από την περίοδο του χρόνου, την θερμοκρασία και την υγρασία [37].



Εικόνα 21. Μέτρηση συγκέντρωσης CO₂

5.2 Μέτρηση σε εξωτερικό χώρο - Εμβέλεια

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε εξωτερικό χώρο για την εξακρίβωσης της απόδοσης του συστήματος σε εμβέλεια. Για τον σκοπό αυτόν επιλέχθηκε τοποθεσία κοντά στις αθλητικές εγκαταστάσεις του δήμου Πανοράματος.



Εικόνα 22. Χάρτης της τοποθεσίας δοκιμών

Όπως φαίνεται από τον χάρτη στην εικόνα 22, στην συγκεκριμένη τοποθεσία υπάρχει ανοιχτός χώρος για βασικές μετρήσεις εμβέλειας, καθώς επίσης και λίγη κίνηση ώστε να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις ανεμπόδιστα.

5.2.1 Σύγκριση Κεραιών Πύλης

Η πύλη με την κεντρική μονάδα επεξεργασίας, εν προκειμένω ένας φορητός υπολογιστής, στήθηκαν στην αφετηρία που είναι σημαδεμένη με τον κόκκινο κύκλο στην κάτω αριστερή γωνία της εικόνας 22. Εφόσον για τον κόμβο ισχύει κατά κανόνα ότι το μέγεθος πρέπει να είναι όσο μικρότερο γίνεται, η κεραία του παραμένει σε όλες τις παρακάτω μετρήσεις η ίδια αυθεντική, τυπωμένη σε εύκαμπτο υλικό που παρέχει ο προμηθευτής του μόντεμ LoRa. Επομένως επιλέχθηκαν τρεις διαφορετικές κεραίες για την πύλη, συμπεριλαμβανομένης και μίας όμοιας με του κόμβου.

Πίνακας 13. Επιλεγμένες κεραίες για δοκιμασία εμβέλειας

Αριθμός	Τύπος	Διαστάσεις	Εύρος Συχνοτήτων	Κέρδος	Πόλωση
1	Printed monopole (node)	40x 7x 1 mm	830-960 MHz	0.04 dBi	Γραμμική
2	Long monopole	195x 12x 12 mm	868-915 MHz	2.00 dBi	Γραμμική
3	Circular monopole	165x 130x 2.4 mm	825-975 MHz	2.50 dBi	Κυκλική

Τα παρακάτω πειράματα περιλαμβάνουν στατική κεραία της πύλης, η οποία σε κάθε περίπτωση είναι στηριγμένη σε ένα τρίποδο σε απόσταση 1,5 μέτρου από το έδαφος. Η κεραία 1 είναι η όμοια με του κόμβου, έχει μικρό μέγεθος, γραμμική πόλωση και αρκετά χαμηλό κέρδος. Η κεραία 2 είναι σημαντικά μεγαλύτερη, προσφέρει καλύτερο κέρδος και γραμμική πόλωση. Η κεραία 3 από την εταιρία Impact-BZ, έχει σχήμα πάνελ, προσφέρει καλό κέρδος και επιπλέον κυκλική πόλωση. Η επικοινωνία μεταξύ δύο γραμμικών κεραιών απαιτεί οι άξονες πόλωσης τους να έχουν την ίδια διεύθυνση για την αποφυγή απωλειών [38]. Εφόσον ο κόμβος έχει αναγκαστικά γραμμική πόλωση στις παρακάτω μετρήσεις πρέπει να τηρηθεί η παραλληλότητα των αξόνων.



Εικόνα 23. Συγκριτική ανάλυση με διαφορετικές κεραίες πύλης

Στην εικόνα 23 παρουσιάζονται οι στατικές κεραίες της πύλης κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Στην συνέχεια μετατοπίζεται ο κόμβος κατά μήκος του δρόμου ανά τακτές αποστάσεις, καταγράφονται 10 μετρήσεις δεδομένων και υπολογίζεται η μέση τιμή του δείκτη RSSI. Ο συγκεκριμένος δείκτης μας δείχνει την ισχύ του ληφθέντος σήματος P_{RX} και η τιμή του επηρεάζεται από την ισχύ του εκπεμφθέντος σήματος P_{TX} , το κέρδος της κεραίας λήψης G_{RX} , το κέρδος της κεραίας εκπομπής G_{TX} , το μήκος κύματος λ και την απόσταση r (ισχύει για κεραίες χωρίς απώλειες).

$$P_{RX} = P_{TX} \cdot G_{RX} \cdot G_{TX} \cdot \frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2}$$

Από την θεωρία πεδίου και κεραιών γνωρίζουμε την παραπάνω σχέση και ως την εξίσωση μετάδοσης του Friis [38].

Πίνακας 14. Αποτελέσματα έντασης σήματος σε αυξανόμενη απόσταση

Αριθμός	Τύπος	RSSI @ 10 m	RSSI @ 50 m	RSSI @ 90 m	RSSI @ 135 m
1	Printed monopole	-77.2	-74.8	-95.8	-97.3
2	Long monopole	-60.2	-87.1	-90.1	-95
3	Circular monopole	-59.6	-81.6	-87	-92

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 14 παρατηρούμε μια σαφή βελτίωση της έντασης του ληφθέντος σήματος με την χρήση πιο αποδοτικής κεραίας, ειδικά όταν απομακρύνεται ο κόμβος από την πύλη και προσεγγίζει τα όρια ευαισθησίας του δέκτη του μόντεμ. Ουσιαστικά η κεραία 3 επιτρέπει την αποκωδικοποίηση σημάτων που προέρχονται από μεγαλύτερες αποστάσεις.

5.2.2 Σύγκριση Συντελεστή Διασποράς - Spreading Factor (SF)

Ο συντελεστής διασποράς ελέγχει πόσο ένα σύμβολο LoRa "διασπείρεται" σε όλο το εύρος ζώνης του καναλιού, το οποίο θυσιάζει τον ρυθμό δεδομένων για την εμβέλεια και την ευαισθησία του δέκτη. Ο συντελεστής διασποράς καθορίζει πόσα "chips" αντιπροσωπεύουν ένα σύμβολο — συγκεκριμένα, κάθε σύμβολο κωδικοποιεί bits SF και αποτελείται από 2^{SF} chips. Έτσι:

- SF7 $\rightarrow 2^7 = 128$ chips ανά σύμβολο $\rightarrow$ μεταφέρει 7 bits/σύμβολο
- SF12 $\rightarrow 2^{12} = 4096$ chips ανά σύμβολο $\rightarrow$ μεταφέρει 12 bits/σύμβολο

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με διαφορετικό συντελεστή διασποράς με την βοήθεια της κεραίας 3.

Πίνακας 15. Αποτελέσματα έντασης σήματος για διαφορετικό συντελεστή διασποράς

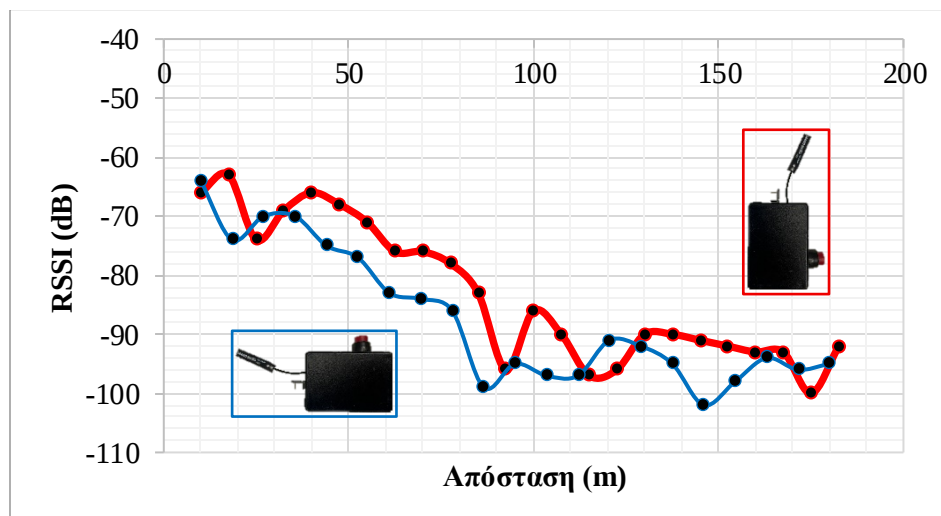
Συντελεστή Διασποράς	RSSI @ 10 m	RSSI @ 50 m	RSSI @ 90 m	RSSI @ 135 m
7	-59.6	-81.6	-87	-92
12	-59.6	-71.9	-83	-90

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 15, αυξάνοντας τον συντελεστή διασποράς μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε την εμβέλεια του συστήματος μας. Το κόστος στην προκειμένη περίπτωση θα είναι πιο αργή επικοινωνία, που δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την συγκεκριμένη εφαρμογή και αυξημένη κατανάλωση ενέργειας στον κόμβο, καθώς η εκπομπή των δεδομένων διαρκεί ελαφρώς περισσότερο.

5.2.3 Δοκιμή Κυκλικής Πόλωσης

Η τελευταία δοκιμή περιλαμβάνει τον έλεγχο κατά πόσο η κεραία 3 που προσφέρει κυκλική πόλωση θα καταγράψει το σήμα του κόμβου ενώ η κεραία του κόμβου βρίσκεται σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις. Το πρόβλημα που ουσιαστικά θέλουμε να ξεπεράσουμε είναι ότι εάν οι άξονες πόλωσης της κεραίας της πύλης και του κόμβου είναι κάθετες μεταξύ τους, η ένταση του σήματος θα είναι θεωρητικά μηδέν και ως εκ τούτου δεν θα μπορέσουμε να αποκωδικοποιήσουμε τα ληφθέντα δεδομένα.

Στην συγκεκριμένη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε η κεραία 3 για την πύλη και πραγματοποιήθηκαν 2 σειρές καταγραφής του σήματος του κόμβου. Μία φορά με την κεραία του κόμβου παράλληλη προς το έδαφος και μία με την κεραία του κόμβου κάθετη προς το έδαφος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα της εικόνας 24.



Εικόνα 24. Ισχύς σήματος ανά απόσταση μεταξύ κόμβου και πύλης

Όπως φαίνεται στην εικόνα 24 τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την κυκλική πόλωση της κεραίας 3. Το αποτέλεσμα αυτό τονίζει την σημασία μιας καλής κεραίας πύλης, εφόσον κατά κανόνα δεν είναι εφικτή η ενσωμάτωση μιας αντίστοιχα μεγάλης κεραίας στον εκάστοτε κόμβο.

6. Σύνοψη και Συμπεράσματα

6.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήθηκε και εξελέχθηκε ένα σύστημα ασύρματης και απομακρυσμένης καταγραφής περιβαλλοντικών δεδομένων. Αναλύθηκαν σε βάθος υπάρχοντα συστήματα απομακρυσμένης παρακολούθησης και συναφείς εφαρμογές από την σύγχρονη βιβλιογραφία. Στην συνέχεια μελετήθηκε η αρχή λειτουργίας διαφορετικών αισθητήρων για την καταγραφή περιβαλλοντικών συνθηκών. Η ιδανική λύση που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει έναν αισθητήρα που συνδυάζει την καταγραφή θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα σε έναν πακέτο με δυνατότητα ψηφιακής αναμετάδοσης των δεδομένων. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην κατανάλωση του συστήματος του κόμβου καθότι θα λειτουργεί με μπαταρία δυνητικά για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Στην συνέχεια εξελέχθηκε ένα σύστημα επικοινωνίας βασισμένο στο πρωτόκολλο LoRa με την ενσωμάτωση των αντίστοιχων μόντεμ σε κόμβο και πύλη.

Το συνολικό σύστημα απομακρυσμένης παρακολούθησης περιβαλλοντικών δεδομένων μελετήθηκε στην συνέχεια σε βάθος για να προσδιοριστεί η απόδοση του. Τα αποτελέσματα προδίδουν την επιτυχή ολοκλήρωση του στόχου ενός πρωτοτύπου συστήματος με περιθώρια βελτίωσης. Η καταγραφή των δεδομένων όπως παρουσιάστηκε παρέχει επαρκή ακρίβεια για τον συγκεκριμένο σκοπό, ενώ το κόστος του συστήματος κρατήθηκε όσο το δυνατόν χαμηλότερα ώστε επιτρέπεται η κλιμάκωση της εφαρμογής.

6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα εργασία περιγράφει μια αρχική έκδοση του συστήματος με περιθώρια βελτιστοποίησης. Κατ' αρχάς μπορεί μελλοντικά να εξελιχθεί η κεντρική μονάδα επεξεργασίας σε έναν cloud server που να αποθηκεύει τα δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο τα δεδομένα μπορούν να παρουσιάζονται στην συνέχεια μέσω πλατφόρμας ανάλυσης δεδομένων όπως η Thingspeak ή να εξελιχθεί κάποιο εργαλείο παρουσίασης δεδομένων από την αρχή. Θα μπορούσε επίσης να ενσωματωθεί στην πύλη ένας webserver που θα επιτρέπει στον χρήστη να συνδέεται ασύρματα για την μεταφορά των δεδομένων.

Στην μεριά του κόμβου, μελλοντικά μπορούν να προστεθούν και άλλοι αισθητήρες ή να προταθούν εναλλακτικές λύσεις για τον SCD40 που θα μειώσουν το κόστος, την κατανάλωση ρεύματος, τον χώρο ή θα παρέχουν αυξημένη ακρίβεια. Το λογισμικό μπορεί να βελτιστοποιηθεί ώστε να γίνουν πιο σωστοί οι χρονισμοί ύπνου και έτσι να μειωθεί η κατανάλωση. Τέλος με την προσθήκη GPS θα μπορούσε ο κόμβος να απευθυνθεί σε πιο εξελιγμένες εφαρμογές που απαιτούν γεωτοποθεσία (geolocation) ή να συνδυαστεί με αυτόνομα μη επανδρωμένο αεροσκάφη (drones).

Βιβλιογραφία

- [1] H. A. M. V. S. Alzoubi, «Investigating Benefits of Using IoT and Its Effect on Our Daily Life,» σε *Studies in Big Data vol. 147*, Springer, 2024, p. 369–380.
- [2] K. a. G. R. Adithya, «Benefits of IoT in Automated Systems,» σε *Integration of Mechanical and Manufacturing Engineering with IoT*, 2023, pp. 235-270.
- [3] X. Jia, Q. Feng, T. Fan και Q. Lei, «RFID technology and its applications in Internet of Things (IoT),» σε *2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, Yichang, 2012.
- [4] D. Dobkin, *The RF in RFID*, Oxford: Elsevier, 2008.
- [5] K. Lakhwani, H. K. Gianey, J. K. Wireko και K. H. Kamal, *Internet of Things (IoT) - Principles, Paradigms and Applications of IoT*, New Delhi: BPB Publications, 2020.
- [6] K. Ashton, «RFID Journal,» 22 June 2009. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.rfidjournal.com/expert-views/that-internet-of-things-thing/73881/>.
- [7] J. Hwang, C. Shin και H. Yoe, «Study on an Agricultural Environment Monitoring Server,» *Sensors*, pp. 11189-11211, 2010.
- [8] A. Zanella, N. Bui, M. Zorzi και L. Vangelista, «Internet of Things for Smart Cities,» *IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL*, τόμ. 1, αρ. 1, pp. 22-32, 2014.
- [9] C. Li, J. Wang, S. Wang και Y. Zhang, «A review of IoT applications in healthcare,» *Neurocomputing*, τόμ. 565, pp. 1-12, 2024.
- [10] N. A. J. W. A. M. B. A. K. M. K. S. Abdulmalek S, «IoT-Based Healthcare-Monitoring System towards Improving Quality of Life: A Review.,» *Healthcare*, τόμ. 10, pp. 1-32, 2022.
- [11] V. S. Naresh, S. S. Pericherla, P. S. R. Murty και S. Reddi, «Internet of Things in Healthcare Architecture, Applications, Challenges, and Solutions,» *International Journal of Computer Systems, Science & Engineering*, p. 411–421, 2020.
- [12] S. López-Soriano και J. Parrón, «Wearable RFID tag antenna for healthcare applications,» σε *IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications*, Turin, 2015.

- [13] A. Bouzakis και L. Overmeyer, «Package Positioning and Handling with the aid of an Integrated RFID Module for Belt Conveyor Systems,» *4th International Conference on Manufacturing Engineering*, pp. 529-537, 2011.
- [14] O. Kennedy, N.-O. Etinosa, M. Odusami, J. Samuel και O. Oluga, «A Smart Air Pollution Monitoring System,» *International Journal of Civil Engineering and Technology*, τόμ. 9, αρ. 9, p. 799–809, 2018.
- [15] P. Brous, M. Janssen και P. Herder, «The dual effects of the Internet of Things (IoT): A systematic review of the benefits and risks of IoT adoption by organizations,» *International Journal of Information Management*, τόμ. 51, pp. 1-17, 2020.
- [16] M. Burhan, R. A. Rehman, B. Khan και B.-S. Kim, «IoT Elements, Layered Architectures and Security Issues: A Comprehensive Survey,» *Sensors*, τόμ. 18, pp. 1-37, 2018.
- [17] M. Wu, T.-J. Lu, F.-Y. Ling, J. Sun και H.-Y. Du, «Research on the architecture of Internet of Things,» σε *3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*, Chengdu, 2010.
- [18] N. M. Kumar και P. K. Mallick, «The Internet of Things: Insights into the building blocks, component interactions, and architecture layers,» σε *International Conference on Computational Intelligence and Data Science*, 2018.
- [19] J. Haxhibeqiri, E. De Poorter, I. Moerman και J. Hoebeke, «A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application,» *Sensors*, pp. 1-38, 2018.
- [20] L. García, J. M. Jimenez, J. Lloret και P. Lorenz, «WiFi and LoRa Energy Consumption Comparison in IoT ESP 32/ SX1278 Devices and Technologies,» σε *SMART 2019 : The Eighth International Conference on Smart Cities, Systems, , Nice*, 2019.
- [21] F. -Y. L. I. Y. S. -W. C. S. -J. H. a. H. P. K. -L. Tsai, «Low-Power AES Data Encryption Architecture for a LoRaWAN,» *IEEE Access*, τόμ. 7, pp. 146348-146357, 2019.
- [22] S. Abboud και N. Abdoun, «Enhancing LoRaWAN Security: An Advanced AES-Based Cryptographic Approach,» *IEEE Access*, τόμ. 12, pp. 2589-2606, 2024.
- [23] M. Rafiquzzaman, *Microcontroller Theory and Applications with the PIC18F*, Wiley, 2018.
- [24] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Wiley, 2012.
- [25] L. Space, «Lacuna Space | Global Satellite IoT Connectivity,» 2026. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://lacuna-space.com/>.

- [26] Kinéis, «Kinéis | Satellite IoT & AIS Connectivity - Tracking & Monitoring,» 2026. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://kineis.com/en/spatial-iot-connectivity/>.
- [27] M. Lawrence, «The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air. A simple conversion and applications.,» *American Meteorological Society*, τόμ. 2, pp. 225-233, 2005.
- [28] M. M. S. K. H. T. S. D. S. S. F. W. Satish U, «Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance.,» *Environmental Health Perspectives*, pp. 1671-1677, 2012.
- [29] E. A. A. A. D. B. L. J. N. D. R. O. Stephen P. Long, «Food for Thought: Lower-Than-Expected Crop Yield Stimulation with Rising CO₂ Concentrations,» *Science*, τόμ. 312, αρ. 5782, pp. 918-1921, 2006.
- [30] G. A. G. K. J. C. K. a. H. K. Jongwon Kwon, «A study on NDIR-based CO₂ sensor to apply remote air quality monitoring system,» *ICCAS-SICE*, pp. 1683-1687, 2009.
- [31] GitHub, «Github - Sensirion/arduino-i2c-scd4x: Arduino library for sensirion,» Github, 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://github.com/Sensirion/arduino-i2c-scd4x>. [Πρόσβαση 05 09 2026].
- [32] P. Straatman, M. Gazzani και W. van Sark, «Experimental data for the rate of CO₂ release from seawater under vacuum at 30°C and ambient pressure at 100°C,» *Data in Brief*, τόμ. 64, pp. 1-8, 2026.
- [33] GitHub, «GitHub - meshtastic/firmware: The official firmware for Meshtastic,» 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://github.com/meshtastic/firmware>. [Πρόσβαση 09 2026].
- [34] GitHub, «GitHub - jgromes/RadioLib - Universal Wireless Communication Library,» 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://github.com/jgromes/RadioLib>. [Πρόσβαση 09 2026].
- [35] Impact-BZ, «Impact-BZ | IoT Sensors & Antenna Solutions,» 2026. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://impact-bz.co.uk/>. [Πρόσβαση 09 2026].
- [36] WELL, «WELL - International Well Building Institute,» 2026. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.wellcertified.com/>. [Πρόσβαση 09 2026].
- [37] D. Licina και S. Langer, «Indoor air quality investigation before and after relocation to WELL-certified office buildings,» *Building and Environment*, τόμ. 204, pp. 1-11, 2021.
- [38] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Wiley, 2016.

